

플라즈마-고도산화공정을 이용한 흰다리새우(*Litopenaeus vannamei*)의 세척 조건 확립

이예빈 · 김명희 · 정장근* · 황희정†

경상국립대학교 해양산업연구소(학생) · *㈜유니파이(대표) · †경상국립대학교(교수)

Establishment of Washing Conditions for Pacific White Shrimp (*Litopenaeus vannamei*) Using Plasma-Advanced Oxidation Process

Ye-Bin LEE · Myeong-Hui KIM · Jang-Gun JUNG* · Hee-Jeong HWANG†

Institute of Marine Industry, Gyeongsang National University(student) · *UNIPIE Co., Ltd(president) ·

†Gyeongsang National University(professor)

Abstract

This study evaluated the applicability of a plasma-advanced oxidation process (P-AOP) as a non-thermal washing technology for Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) and investigated its effects on microbial safety and quality preservation during refrigerated storage. The samples were washed using a P-AOP system under controlled conditions for 5 min and stored at 10°C for 14 days. The P-AOP treatment achieved a significant reduction in microbial load, decreasing the initial total aerobic bacterial count from 4.28 to 1.22 log CFU/g, and effectively suppressed microbial growth during storage, resulting in lower bacterial levels at day 14 (7.32 log CFU/g) compared with the untreated control (8.08 log CFU/g). In addition to microbial inactivation, plasma washing contributed to improved quality retention by maintaining textural stability, reducing discoloration, and delaying physicochemical deterioration throughout storage. Chemical spoilage indicators, including pH, lipid oxidation, and volatile basic nitrogen, showed slower increases in the treated samples, indicating delayed protein degradation and oxidative changes. Overall, these results suggest that P-AOP washing effectively enhances microbial safety and quality stability of shrimp, primarily through the action of reactive species generated during the plasma-assisted oxidation process.

Key words : Non-thermal plasma treatment, *Litopenaeus vannamei*, Microbial inactivation, Quality preservation, Seafood safety

I. 서론

최근 식품 안전성과 품질에 대한 소비자의 관심이 증가함에 따라 수산물의 위생적 처리 및 저장 중 품질 유지 기술에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다(Olatunde and Benjakul, 2018). 특히

흰다리새우(*Litopenaeus vannamei*)는 전 세계적으로 가장 많이 양식되는 품종 중 하나로 우수한 맛과 영양적 가치 덕분에 국내외 시장에서 수요가 매우 높다. 그러나 수산물은 높은 수분 함량과 영양 성분, 그리고 중성 부근의 pH를 유지하고 있어 미생물 증식 및 효소 활성화에 의한 부패

† Corresponding author : 055-772-9141, hjh212@gnu.ac.kr, <https://orcid.org/0009-0009-9420-0866>.

* 이 논문은 ㈜유니파에서 제공한 장비를 활용하여 수행되었음.

가 매우 빠르게 진행되는 특징이 있다(Gram and Huss, 1996). 특히 수산물의 초기 오염은 포획 및 가공 과정에서의 교차 오염뿐만 아니라 내장 및 껍질에 서식하는 고유 미생물 군집에 의해 발생하며, 이는 유통 과정 중 품질 저하와 식중독 사고의 주요 원인이 된다(Iwamoto et al., 2010). 수산물은 위생적 세척 및 저장 안전성 확보가 필수이므로 수산물의 선도를 유지하고 안전성을 확보하기 위해 전통적으로 염소계 살균제 처리나 고온 가열 살균법이 이용되어 왔다. 하지만 염소계 살균제는 잔류물에 의한 trihalomethanes 등의 발암물질 생성 우려와 특유의 냄새로 인해 기호성이 저하되는 문제가 있으며(Richardson et al., 2007; Gil et al., 2009), 기존의 가열 살균 공정은 고온의 노출로 인한 식감 변화 및 품질 저하의 문제점이 제기되어 왔다. 이에 따라 식품의 영양적·감각적 특성을 보존하면서도 유해 미생물을 효과적으로 제어하여 보완할 수 있는 비가열 살균 기술(non-thermal processing)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다(Safwa et al., 2023). 최근 다양한 비가열 기술 중 플라즈마 기반 고도산화공정(plasma advanced oxidation process, P-AOP)은 차세대 위생 처리 기술로 주목받고 있다. 플라즈마는 기체에 높은 에너지가 가해져 이온화된 상태로 형성되며, 방전 과정에서 자외선(UV), 오존(O_3), 수산화 라디칼($\cdot OH$), 초과산화 이온($O_2\cdot^-$) 등과 같은 다양한 활성산소종(reactive oxygen species, ROS) 및 활성질소종(reactive nitrogen species)이 생성된다. 이러한 활성종은 미생물의 세포벽과 세포막을 손상시키고 DNA와 단백질에 산화적 손상을 유도하여 미생물 제어 효과를 나타내는 것으로 보고되어 왔다(Liao et al., 2017; Misra and Jo, 2017). 또한 플라즈마 처리 과정에서 생성되는 활성종은 유기물 및 표면 오염물의 산화 분해를 유도할 뿐 아니라 미세 기포 형성과 국소적인 물리적 작용을 통해 표면 오염물의 탈착을 촉진함으로써 세척 효율을 향상시킬 수 있다(Park et al., 2020). 이러한 특성은 수분 함량이

높고 변질에 민감한 수산물의 세척 공정에 효과적으로 적용될 수 있을 것으로 보고되고 있으나(Kim and Min, 2017; Albertos et al., 2017), 해당 기술을 실제 수산식품산업에 적용하기 위한 연구가 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는

P-AOP 기술을 흰다리새우 세척 공정에 적용하여 처리 시간에 따른 총 호기성 세균수 저감 효과를 평가하고 저장 기간 동안의 미생물학적 및 물리·화학적 품질 변화를 종합적으로 분석하고자 하였다. 이를 통해 수산물 가공 공정에 적용 가능한 비가열 플라즈마 세척의 적정 처리 조건을 제시하고자 한다.

II. 연구 방법

1. 시료 수집

본 연구에서 사용한 흰다리새우는 우리새우영여조합법인과 고바다 수산에서 구입 후 -18°C 에 냉동보관하였다. 실험 전 조건당 시료 10-15 kg을 유수해동한 후 플라즈마 처리 전까지 4°C 냉장 저장하였다. 플라즈마 처리 후에는 10°C 저온 배양기(HB-103S, Hanbaek, Bucheon, Korea)에 보관한 후 최대 14일까지 보관하면서 저장 중 일어나는 품질 특성 변화를 측정하였다.

2. P-AOP 처리

본 연구에 적용된 플라즈마 시스템은 ㈜유니파이에서 제작된 장치로 약 188 W의 소비전력 조건에서 운전되었으며 플라즈마와 시료 간 접촉 유량은 94.3 L/min 으로 유지하였다. 장치는 20-40 kHz의 주파수 범위와 8-20 kVpp의 인가 전압에서 작동하도록 설계되었으며 세척 구조의 수위는 100 L, 수온은 10°C 이하로 유지한 조건에서 5분간 처리하였다.

3. 미생물 계수

플라즈마 처리 전과 후 시료에 존재하는 일반 세균수는 주입도말법으로 측정하였다. 시료는 멸균된 집게와 가위를 사용하여 머리, 꼬리, 다리를 제거하고 5 g을 채취한 후 멸균백(BF-1930F, BNF KOREA, Gimpo, Korea)에 담아 멸균된 0.85% NaCl을 45 mL를 주입한 후 스토마커(LS-1250A, BNF KOREA, Gimpo, Korea)로 3분간 균질화하였다. 멸균된 0.85% NaCl을 이용하여 10배씩 단계 희석하여 1 mL씩 채취한 후 지름 9 cm petri dish(10090, SPL, Pocheon, Korea)에 분주하고 그 위에 plate count agar(Difco, Detroit, Michigan, USA) 배지를 주입한 후 36℃ 저온배양기에 48 ± 2시간 배양하였다. 배양 후 생성된 colony 수를 계산하여 플라즈마 처리의 미생물 저감 효과를 확인하였다.

4. 경도 측정

P-AOP 처리 후 새우의 저장성 증진 및 조직 연화 방지 효과를 파악하기 위해, 처리 전과 후의 시료를 10℃ 저온배양기에 최대 14일간 저장하며 물리·화학적 특성 변화를 관찰하였다. 경도(hardness) 측정은 시료의 머리, 꼬리, 껍질 및 다리를 제거한 후, 시료(5 g)를 일정한 크기로 채취하여 진행하였다. 채취한 시료는 texture analyzer(Brookfield, CT3, Middleboro, MA, USA)의 측정 플레이트 중앙에 수평으로 위치시킨 후 분석을 수행하였다. 분석에는 길이 5 cm, 지름 2 cm 규격의 원통형 TA46 probe를 사용하였으며, 기기 조작 조건은 trigger load 5 g, test speed 1.70 mm/s, target distance 10.0 mm로 설정하여 시료 중심부를 일정한 속도로 압축하였다. 탐침이 시료를 누를 때 발생하는 최대 압축력(peak force)을 측정하여 gf(gram-force) 단위로 나타내었으며, 각 처리구당 시료를 3회 이상 반복 측정하여 그 평균값을 산출하였다.

5. 색도 측정

색도 측정은 머리, 꼬리 및 다리를 제거한 새우 시료 5 g을 채취하여 표면을 균일하게 한 뒤, colorimeter (NH 310, 3nh, Guangdong, China)를 이용하여 분석하였다. 정확한 측정을 위해 분석 전 측정 기기를 표준 백색판(standard white plate)으로 보정(calibration)하여 사용하였다. 각 시료의 표면을 3회 이상 반복 측정하여 얻은 L*(명도, lightness), a*(적색도, redness), b*(황색도, yellowness) 값의 평균을 구하였다. 또한, 플라즈마 처리 및 저장 기간 경과에 따른 시료의 종합적인 색상 변화를 평가하기 위해, 초기(0일 차) 시료의 측정값을 기준으로 전체 색도차(color difference)인 ΔE 값을 다음 계산식으로 산출하여 나타내었다.

$$\Delta E = [(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2]^{1/2} \dots\dots\dots (1)$$

6. pH 측정

플라즈마 처리 전과 후를 10℃ 저온배양기에서 14일간 저장하여 저장 기간 경과에 따른 새우 육질의 부패 및 품질 변화 정도를 파악하기 위하여 pH를 측정하였다. 측정에는 pH meter (Orion Star A211, Thermo Fisher Scientific, Waltham, MA, USA)를 사용하였으며, 분석의 정확도를 높이기 위해 측정 직전 기기를 pH 4.01, 7.00, 10.01의 3점 표준 완충용액 (Orion Application Solution 910104, 910107, 910110, Thermo Fisher Scientific, Waltham, MA, USA)으로 보정하여 사용하였다. 시료는 5 g을 채취하여 멸균백에 담은 후, 0.85% NaCl 용액 45 mL를 주입하여 1:9 (w/v) 비율로 혼합하였다. 이후 스토마커를 이용하여 3분간 균질화함으로써 시료 내 성분이 용매에 충분히 용출되도록 유도하였다. 균질화된 혼합액은 불순물 제거를 위해 여과지(Whatman No. 4, Cytiva, Incheon, Korea)로 여과하였으며, 최종 수집된 맑은 여과액에 전극을 담가 수치가 안정화되었을 때의 pH 값을 기록하였다. 모든 측정은 3회 반복 수행하여 그 평균값을 산출하였다.

7. Thiobarbituric acid reactive substances (TBARS) 측정

시료의 저장 중 지방산패도를 조사하기 위해 산 추출법(Witte et al., 1970)을 이용하여 시료의 TBARS값을 산출하였다. 머리, 꼬리, 다리를 제거한 시료 5 g에 15 mL 증류수를 넣어 균질화하고 균질화된 시료액은 여과지로 여과하였다. 여과시킨 시료액에 15% trichloroacetic acid (TCA) (Junsei Chemical Co., Ltd, Tokyo, Japan)와 0.02 M thiobarbituric acid (TBA)(Thermo Scientific, A12681.14, Waltham, MA, USA)시약을 혼합하여 90°C에서 15-60분간 반응시킨 뒤 원심분리기(Centrifuge 1248R, gyrozen, Gimpo, Korea)로 3,000 RPM, 10분간 원심분리하였다. 이후 상층액만 광로길이 10 mm, 외측 규격 12.5 × 12.5 × 45 mm을 가진 Cuvette(PS)(Art.-No. 2712120, Ratiolab GmbH, Germany)에 넣고 UV/VIS 분광광도계(X-ma 1000, Human Corporation, Seoul, KOREA)를 사용하여 531-532 nm에서 흡광도를 측정하였으며, 측정된 흡광도에 변환계수 5.88을 곱하여 최종 TBARS 값을 산출하였다.

8. Volatile basic nitrogen(VBN) 측정

플라즈마 처리 전과 후 저장 기간 동안 새우의 단백질 변성 정도를 비교하기 위해 Conway의 미량 확산법 (Conway, 1950)으로 VBN을 측정하였다. 머리, 꼬리, 다리를 제거한 시료 2 g을 멸균 백에 넣고 20% TCA 2 mL를 넣은 후 3분간 균질화하였다. 이후 증류수 16 mL를 넣은 후 여과지를 이용하여 여과액을 확보하였다. Conway dish의 내실에 붕산 흡수제 1mL를 주입하였다. 붕산 흡수제는 붕산(Boric Acid, Fujifilm Wako Pure Chemical Corporation, Osaka, Japan) 10 g에 에틸알코올 200 mL를 가하여 용해시킨 후 0.2% methyl red(493-52-7, Daejung, Gyeonggi-do, Korea) 용액과 0.1% methyl blue (7220-79-3, Daejung, Gyeonggi-do, Korea) 용액을 1:3의 비율로 혼합한

혼합 지시약을 뜻한다. 그 후 Conway dish의 오른쪽 외실에 균질 후 여과한 시료 용액 1 mL, 왼쪽 외실에 증류수 50 mL에 약 60 g의 탄산칼륨(Junsei Chemical Co., Ltd, Tokyo, Japan)을 가해 10분간 가열하여 방냉한 후 여과한 포화탄산칼륨 1 mL를 주입하였다. 주입 후 뚜껑과 맞닿는 부분에 바세린을 발라 가스가 밖으로 새어 나가지 않도록 밀폐하였다. 이후 20°C에서 120분 방치 후 내실의 봉산에 0.01 N HCl(증류수 900 mL, 0.1N-Hydrochloric acid standard solution, Siheung-si, Korea 1:9)로 적정하였으며, 측정된 값들을 다음 식에 적용하여 최종 VBN 값을 산출하였다.

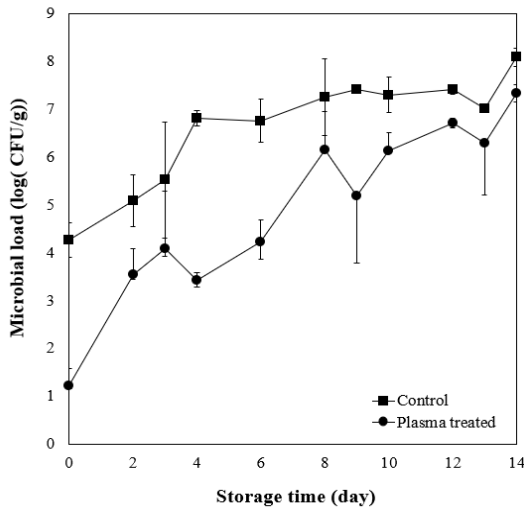
$$VBN(mg/100g) = \frac{0.14 \times (S - B) \times 20 \times DF \times F \times 100}{W} \quad \dots (2)$$

여기서 S는 시료의 적정량(mL), B는 Blank의 적정량(mL), DF는 희석배수(Dilution factor), F는 0.01 N HCl의 역가(Factor), W는 시료의 무게(g)를 의미한다.

III. 연구 결과

1. 플라즈마 수처리 공정을 통한 새우 미생물 살균 효과

일반세균 분석 결과는 [Fig. 1]과 같으며 대조구는 초기 4.28 log CFU/g에서 저장 3-4일 만에 6.81 log CFU/g를 초과하며 빠른 부패 양상을 보였고, 최종 14일 차에는 8.08 log CFU/g까지 미생물이 급증하였다. 이와 대조적으로 플라즈마 처리구는 초기 1.22 log CFU/g를 기록하며 강력한 초기 살균 능력을 보여주었다. 더불어 저장 기간 내내 세균 증식이 완만하게 억제되어 최종 14일 차에 7.32 log CFU/g를 나타냄으로써, 부패 속도를 효과적으로 지연시켰음을 확인하였다. 이 같은 미생물 생육 제어 효과는 플라즈마 활성종이 미생물의 세포 구조를 직접적으로 파괴하여 사멸을 유도하는 기작으로 설명된다. 특히 본 연구에



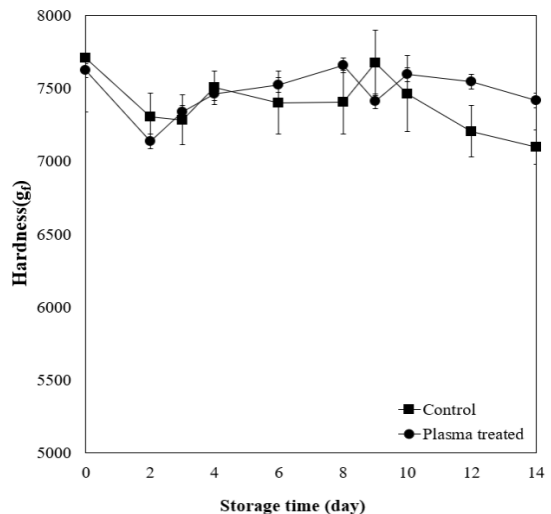
[Fig. 1] Changes in total aerobic bacterial counts of the control and plasma-treated samples during storage.

서 나타난 3.06 log CFU/g의 높은 초기 저감 효과는 Shiekh and Benjakul(2020)이 흰다리새우에 고전압 냉 플라즈마를 5분간 처리했을 때 보고한 약 3.0 log CFU/g의 저감 수치와 매우 유사한 경향을 보였다. 이는 단순 대기압 노출 방식이 아닌, 액중 방전 기반의 P-AOP 시스템이 생성하는 고농도의 하이드록실 라디칼($\cdot\text{OH}$) 및 오존(O_3)이 수중 미세 기포와 결합하여 새우 표면의 복잡한 요철 부위에 서식하는 미생물에 효과적으로 도달하여 사멸시켰기 때문으로 사료된다. 또한 이러한 경향은 Kim and Min(2017)이 붉은 새우 (*Solenocera crassicornis*)를 대상으로 플라즈마 처리 시 초기 호기성 세균수 감소 및 성장 억제 효과를 확인한 연구 결과와도 일치하였다. 또한, 고등어 필렛에 플라즈마를 적용한 Albertos et al. (2017)의 연구에서도 플라즈마에 의한 초기 미생물 저감이 후속적인 세균 증식 시점을 늦추어 저장 수명을 연장한다고 보고한 바 있다. 결론적으로, 본 연구에 적용된 5분간의 P-AOP 처리는 초기 살균력으로 미생물의 밀도를 낮추어 새우의 미생물학적 안전성을 확보하고 유통 기한을 연장

하는 데 효과적인 것으로 판단된다.

2. 플라즈마 수처리 공정을 통한 새우 저장 중 품질 변패 속도 저하효과

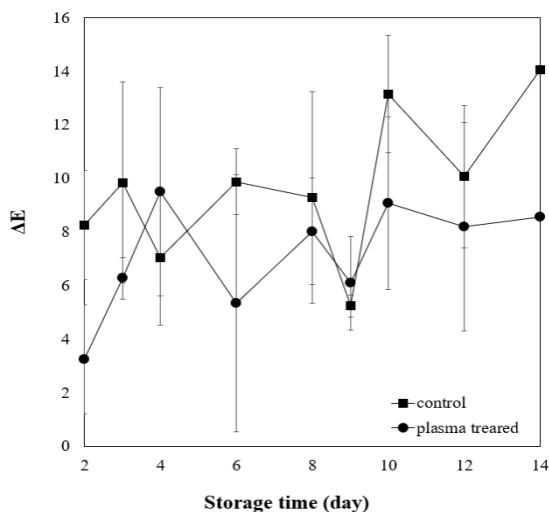
본 연구의 경도 결과는 [Fig. 2]에 나타내었다. 대조구는 초기 7,711.67 gf를 시작으로 저장 8일 차(7407.33 gf)부터 조직 연화가 급격히 진행되어 최종 저장일인 14일 차에는 7099.00 gf까지 수치가 감소하였다. 반면, 플라즈마 처리구는 7623.00 gf를 시작으로 9일 차(7413.00 gf)에 이르러서야 완만한 연화가 시작되었으며, 최종 14일 차에도 7418.00 gf를 기록해 경도 감소 폭이 대조구에 비해 현저히 낮아 구조적 안정성을 우수하게 유지하는 것으로 나타났다. 일반적으로 수산물의 조직 연화는 저장 중 증식하는 부패 미생물 유래의 단백질 분해 효소와 내인성 효소의 복합적인 작용으로 인해 근육 섬유가 붕괴되면서 발생한다. 본 실험에서 플라즈마 처리구가 단단한 육질을 유지한 것은 앞선 미생물 결과([Fig. 1])와 연관 지어 볼 때 플라즈마의 살균 작용이 미생물의 생육을 강력히 억제하여 단백질 분해 효소의 활성을 낮추었기 때문으로 판단된다. 또한, Ma et al.



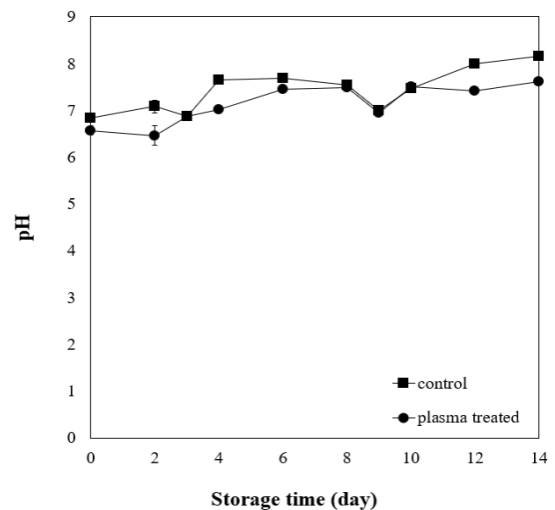
[Fig. 2] Changes in hardness values of the control and plasma-treated samples during storage.

(2020)은 곧은빨중하새우(*Metapenaeus ensis*)의 저장 연구에서 플라즈마 처리 시 발생하는 활성종이 근원섬유 단백질 간의 이황화 결합 형성을 유도하여 단백질의 3차원적 네트워크 구조를 한층 강화시킨다고 보고한 바 있다. 따라서 본 연구 결과 역시 플라즈마 처리가 효소적 분해를 억제하는 동시에 근육 단백질의 물리적 결합력을 증대시킴으로써, 저장 중 발생할 수 있는 조직 붕괴를 효과적으로 방어한 결과로 사료된다. 색도 분석 결과는 [Fig. 3]에 나타내었다. 대조구는 초기 8.24로 시작하여 14일 차에 14.04까지 상승하며 전반적으로 높은 색택 저하를 보였다. 이와 대조적으로 플라즈마 처리구는 초기 3.25에서 최종 14일 차 8.54로 완만한 상승 폭을 보여, 저장 기간 내내 유의미하게 낮은 색도 변화를 유지하였다. 일반적으로 새우 저장 중 발생하는 변색, 즉 흑변 현상은 표피에 존재하는 폴리페놀 산화효소(polyphenol oxidase, PPO)가 페놀 화합물을 산화시켜 어두운 멜라닌 색소를 형성하기 때문이다. 플라즈마 처리구에서 변색이 지연된 것은 플라즈마 방전 시 생성되는 다양한 활성종들이 이러한 효소적 산화 반응을 효과적으로 억제했기

때문으로 유추할 수 있다. 실제로 Xu et al.(2020)의 연구에서도 플라즈마의 활성종들이 흰다리새우 내 PPO의 3차원적 단백질 구조를 변형시켜 활성을 원천적으로 저해함으로써 흑변과 같은 색택 저하를 방지했음을 보고한 바 있다. 또한, 앞선 미생물 저감 결과([Fig. 1])를 고려할 때, 플라즈마 처리가 표면 부패 미생물의 증식을 억제함으로써 미생물 대사산물에 기인한 2차적인 변색까지 방어하여 종합적인 외관 품질 향상에 기여한 것으로 사료된다. 플라즈마 처리 전 후 저장 기간 동안 새우의 pH변화의 경우 대조구는 초기 pH 6.84에서 시작하여 저장 4일 차부터 7.6으로 급격히 상승하였으며, 부패가 진행됨에 따라 최종 저장기간인 14일에는 8.1까지 증가하였다([Fig. 4]). 반면, 플라즈마 처리구는 초기 pH 6.57에서 시작하여 6일 차에 7.4를 나타내었고, 이후 완만한 증가 양상을 보여 14일 차에는 7.62로 나타났다. 플라즈마 처리는 염기성 물질 생성을 억제하여 저장 중 pH의 급격한 상승을 억제하는 데 효과적인 것으로 관찰된다. 이는 비슷한 연구로 Bora et al.(2022)이 플라즈마 활성수로 처리한 새우의 pH가 저장 기간 동안 7.7 미만으로 유지되

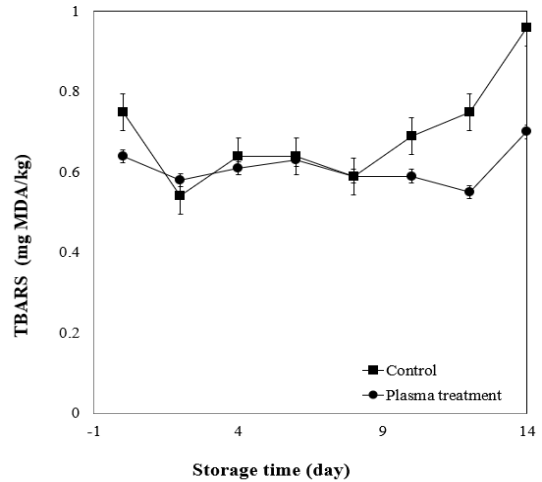


[Fig. 3] Changes in color values of the control and plasma-treated samples during storage.



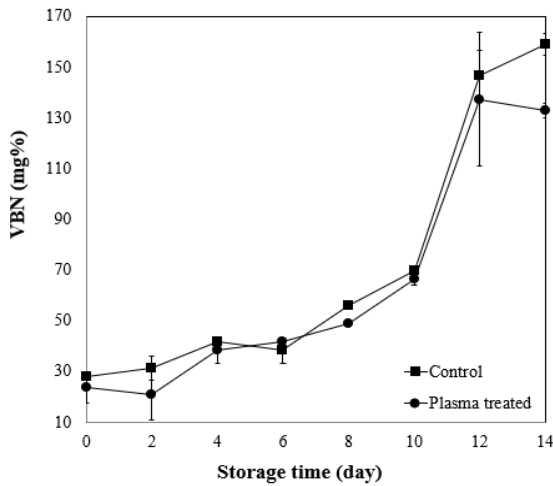
[Fig. 4] Changes in pH values of the control and plasma-treated samples during storage.

어 대조구보다 낮았다고 보고한 결과와 일치한다. 일반적으로 수산물의 pH 상승은 부패 미생물과 내인성 효소에 의해 단백질이나 질소 화합물이 분해되면서 암모니아, 트리메틸아민(trimethylamine, TMA) 등 휘발성 염기 물질이 축적되기 때문이다(Shiekh and Benjakul, 2020). 따라서 본 연구에서 플라즈마 처리구의 pH 상승이 지연된 것은, 플라즈마 처리 시 발생하는 활성종이 부패 원인균의 증식을 효과적으로 억제함으로써 염기성 대사 산물의 생성을 감소시켰기 때문으로 사료된다. Shiekh and Benjakul(2020) 역시 흰다리새우 저장 실험에서 고전압 저온 플라즈마 처리가 미생물 대사 활동을 저해하여 pH 상승이 억제됨을 관찰하였다. 지질 산화 지표인 TBARS 분석 결과는 [Fig. 5]에 나타내었다. 대조구는 초기 0.75 mg MDA/kg에서 저장 8일 차(0.59 mg MDA/kg)까지 일시적인 증감을 보이다가, 이후 산패가 빠르게 가속화되어 최종 저장일인 14일 차에는 0.96 mg MDA/kg까지 수치가 급격히 상승하였다. TBARS 수치가 저장 8일 차까지 일시적으로 감소한 것은 지질 산화의 2차 산물인 말론디알데하이드(MDA)가 시료 내 단백질의 아미노기 또는 유리 아미노산과 결합하여 Schiff base와 같은 복합체를 형성했거나, MDA 자체가 다른 화합물로 추가 산화되었기 때문으로 판단된다(Al-Dalali et al., 2022). 이러한 상호작용은 TBA 시약과 반응할 수 있는 유리 MDA의 양을 감소시켜 수치상의 하락을 유발하며, 이는 수산물과 같이 단백질 함량이 높은 시료에서 전형적으로 관찰되는 현상이다(Al-Dalali et al., 2022). 반면, 플라즈마 처리구는 초기 0.64 mg MDA/kg 수준에서 시작하여 저장 12일 차(0.55 mg MDA/kg)까지 유의미한 상승 없이 안정적인 상태를 유지하였다. 이후 완만하게 증가하여 최종 14일 차에 0.70 mg MDA/kg을 기록, 지질 산화를 지연시키는 데 탁월한 효과가 있음을 확인하였다. 일반적으로 플라즈마 처리 시 발생하는 다양한 활성 라디칼은 지질 산화를 촉진하는 매개체로 작용할 수 있으나, 본 연구에서는



[Fig. 5] Changes in TBARS values of the control and plasma-treated samples during storage.

반대로 지질 산패가 효과적으로 지연되었다. 이러한 결과는 플라즈마 처리가 lipase 등의 지질 분해 효소를 분비하는 부패성 호기성 세균의 증식을 강력하게 억제했기 때문인 것으로 사료된다(Liao et al., 2018). 또한, Ekezie et al.(2017)은 플라즈마 방전 중 생성된 활성종 자체가 새우 체내의 산화 관련 효소 활성을 직접적으로 저해한다고 설명한다. 결과적으로 본 실험의 플라즈마 세척 조건은 미생물 유래 효소와 내인성 효소의 활성을 동시에 효과적으로 제어함으로써 저장 중 지질 산패를 안정적으로 지연시킨 것으로 판단된다. [Fig. 6]은 플라즈마 처리 전 후 저장 기간동안 새우의 단백질 품질과 관련된 신선도를 평가한 VBN 분석 결과이다. 대조구는 초기 28 mg%에서 저장 2일 차(31.5 mg%)부터 유의미한 수치 상승이 관찰되었으며, 단백질 분해가 가속화되는 10일 차에는 70 mg%로 급증하였다. 이후 부패가 빠르게 진행되어 최종 저장일인 14일 차에는 159 mg%에 도달하며 뚜렷한 부패 양상을 보였다. 반면, 플라즈마 처리구는 초기 23.8 mg%로 대조구에 비해 낮게 시작하였으며, 4일 차(38.5 mg%)부터 완만한 상승 곡선을 그렸다. 최종 14일 차에도 133 mg%를 기록하여 저장 전 기간에 걸쳐 대



[Fig. 6] Changes in VBN values of the control and plasma-treated samples during storage.

조구보다 단백질 변성이 안정적으로 억제되는 양상을 유지하였다. 수산물의 VBN 수치 증가는 주로 부패 미생물이 육단백질과 아미노산을 분해하여 암모니아나 TMA와 같은 염기성 물질을 생성하기 때문에 발생한다. 이러한 관점에서 본 결과는 플라즈마 처리가 단백질 부패에 직접적으로 관여하는 부패 미생물의 초기 생육을 강력하게 제어하는 데 효과적임을 시사한다. 이는 앞서 확인한 일반세균수 저감 및 pH 상승 억제 결과와도 높은 상관관계를 가진다. 곧은빨중하새우를 활용한 저장 실험을 진행한 Huang et al.(2019)의 연구에서도 플라즈마 처리가 새우의 단백질 탈아미노 반응(deamination)을 주도하는 *Pseudomonas* 속 등 주요 호기성 부패균의 증식을 억제하여 VBN의 생성 속도를 근본적으로 늦추는 것으로 확인된 바 있다. 따라서 본 연구 결과 역시 플라즈마 공정의 살균력이 미생물 유래의 단백질 분해 효소 총량을 감소시켜 단백질의 구조적 붕괴와 염기성 물질 축적을 효과적으로 지연시킨 것으로 판단된다.

IV. 결론

본 연구에서는 P-AOP를 흰다리새우의 세척 공정에 도입하여 초기 미생물 수치를 낮추는 것뿐만 아니라 부패와 관련된 효소의 활성 자체를 제어하는 데 효과적이었음을 종합적으로 규명하였다. 특히 선행연구를 통해 대조구 및 모든 처리 조건에서 특정 병원균이 발견되지 않았음을 확인하였기에, 식품의 일반적인 미생물 오염 수준을 대표적으로 나타내는 지표인 총 호기성 세균수를 중심으로 미생물 저감 효과를 평가하였다. 5분간의 P-AOP 처리는 수중에 다양한 활성종을 발생시켜 3.06 log의 초기 미생물 저감 효과를 나타냈다. 이러한 미생물 제어의 핵심 기전은 물리·화학적 복합 작용에 기인한다. 강력한 산화력을 가진 하이드록실 라디칼($\cdot\text{OH}$)이 세포막의 지질, 단백질 및 핵산을 비선택적으로 산화시켜 세포 구조를 파괴하며, 오존(O_3)이 강력한 산화제로 작용하여 세포벽과 세포막을 손상시킴으로써 내부 물질의 누출을 유도한다. 여기에 플라즈마에서 방출되는 자외선(UV)이 DNA 내 피리미딘 다이머(pyrimidine dimer) 형성을 유도하여 세포의 복제와 전사를 억제함으로써 미생물의 대사 활성을 근본적으로 저해하고 사멸을 유도하는 것으로 판단된다. 이러한 살균 효과를 바탕으로 P-AOP 처리 후 14일간 저장했을 때, pH 상승 및 VBN, TBARS 값의 증가가 대조구에 비해 낮은 수준을 유지하였다. 또한 플라즈마 처리가 염기성 물질 생성과 조직 연화를 방지하여 수산물 고유의 경도와 색도를 유지하는 데 유리한 공정임을 확인하였다. 결과적으로 본 연구를 통해 P-AOP는 수산물의 위생 안전성과 상품성을 동시에 향상시킬 수 있는 차세대 비가열 공정으로서 높은 가치를 지니는 것으로 확인되었다. 산업적 실용성 측면에서 P-AOP는 기존 화학적 소독제 사용 시 발생하는 잔류물 제거를 위한 추가 행굼 공정을 생략할 수 있어 용수 사용량을 절감하며, 연속 세척 시스템으로의 통합이 용이하여 공정 효율을 극대화할 수 있다. 경제성 측면에서도 본 공정은 저온에서 수행되므로 고온 가열 살균 대비 에너지

소비 효율이 높고 폐수 처리 부하를 낮추어 운영 비용을 절감하는 이점이 있다. 향후 대용량 처리 시스템에서의 소비전력 대비 살균 효율에 대한 추가적인 실증 연구가 뒷받침된다면, P-AOP는 수산물 가공 산업 전반에 걸쳐 지속 가능한 친환경 핵심 공정으로 자리매김할 수 있을 것으로 기대된다. 다만 본 연구에서는 미생물 평가 지표를 총 호기성 세균수에 국한하여 분석하였으므로 향후에는 수산물의 변질을 실질적으로 주도하는 특정 부패균이나 식중독을 유발하는 주요 위생 지표균에 대해 P-AOP가 미치는 직접적인 제어 효과를 규명하는 연구가 반드시 수행되어야 할 것이다. 따라서 실제 가공 현장 접목을 위한 시스템 설계와 품목별 처리 표준화, 에너지 효율 최적화 및 미생물학적 정밀 검증을 위한 심도 있는 후속 연구가 병행되어야 할 것으로 사료 된다.

References

- Albertos I, Martín-Diana AB, Cullen PJ, Tiwari BK, Ojha SK, Bourke P, Álvarez C and Rico D(2017). Effects of dielectric barrier discharge (DBD) generated plasma on microbial reduction and quality parameters of fresh mackerel (*Scomber scombrus*) fillets. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 44, 117 - 122.
<https://doi.org/10.1016/j.ifset.2017.07.006>
- Al-Dalali S, Li C and Xu B(2022). Interaction of lipid oxidation products with proteins in foods. *Journal of Food Science and Technology*, 59(5), 1714~1725.
<https://doi.org/10.1007/s13197-021-05184-2>
- Cho MS, Cho YJ and Kim SM(2014). Freshness maintenance and microbiological changes of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) depending on storage temperature. *Journal of Distribution Science*, 12(11), 105~113.
<https://doi.org/10.13106/jdvs.2014.12.11.105>
- Choi C, Moon J, and Jeong M(2012). Nonthermal sterilization and shelf-life extension of seafood products by intense pulsed light treatment. *The Korean Journal of Food and Nutrition*, 25(1), 1~7.
<https://doi.org/10.9799/ksfan.2012.25.1.001>
- Ekezie FGC, Sun DW and Cheng JH(2017). A review on recent advances in cold plasma technology for the food industry: Current applications and future trends. *Trends in Food Science & Technology*, 69, 46~58.
<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.08.007>
- Fan X and Song Y(2020). Advanced oxidation process as a postharvest decontamination technology to improve microbial safety of fresh produce. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 68(46), 12916~12926.
<https://doi.org/10.1021/acs.jafc.0c01381>
- Gil MI, Selma MV, López-Gálvez F and Allende A(2009). Fresh-cut product sanitation and wash water disinfection: Problems and solutions. *International Journal of Food Microbiology*, 134(1-2), 37~45.
<https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2009.05.021>
- Gram L and Huss HH(1996). Microbiological spoilage of fish and fish products. *International Journal of Food Microbiology*, 33(1), 121~137.
[https://doi.org/10.1016/0168-1605\(96\)01134-8](https://doi.org/10.1016/0168-1605(96)01134-8)
- Huang M, Zhuang H, Zhao J, Wang J, Yan W and Zhang J(2019). Effect of atmospheric cold plasma treatment on the quality of shrimp (*Metapenaeus ensis*) during cold storage. *LWT - Food Science and Technology*, 111, 201~207.
<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.05.051>
- Iwamoto M, Ayers T, Mahon BE and Swerdlow DL(2010). Epidemiology of seafood-associated infections in the United States. *Clinical Microbiology Reviews*, 23(2), 399~411.
<https://doi.org/10.1128/CMR.00059-09>
- Jo SY, Park JA, Hwang HJ, Kim SJ, Choi JL, Ha JY and Cho MS(2016). Effects of freezing-storage temperature on the shelf life of mackerel fish. *Korean Journal of Food Science and Technology*, 48(6), 536~541.
<https://doi.org/10.9721/KJFST.2016.48.6.536>
- Kang H and Kim J(2024). Research trends on ignition of ionic monopropellants using plasma. *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, 28(3), 75~90.
<https://doi.org/10.6108/KSPE.2024.28.3.075>
- Kim HJ and Min SC(2017). Effects of cold plasma treatment on the quality of Pacific white shrimp

- (*Litopenaeus vannamei*). Journal of Food Science, 82(11), 2650~2658.
<https://doi.org/10.1111/1750-3841.13952>
- Kim JH, Kim MJ and Seong MH(2015). Effects of storage temperature and packaging method on the changes of volatile basic nitrogen (VBN) in pork. Korean Journal of Food Preservation, 22(3), 365~371.
<https://doi.org/10.11002/kjfp.2015.22.3.365>
- Kim S, Park S, Jee B, Kim Y, and Kwon M(2020). Low frequency plasma disinfectant effect in seawater and three major fish bacterial disease pathogens. Journal of Fish Pathology, 33(1), 91~95.
<https://doi.org/10.7847/jfp.2020.33.1.091>
- Kim SS, Park Sh, Kim SH and Kang DH(2019). Synergistic effect of ohmic heating and UV-C irradiation for inactivation of *Escherichia coli* O157:H7, *Salmonella* Typhimurium and *Listeria monocytogenes*. Food Control, 102, 69~75.
<https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2019.02.016>
- Kulawik P and Tiwari BK(2019). Recent advancements in the application of non-thermal plasma technology for the seafood industry. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 59(19), 3199~3210.
<https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1508197>
- Lee JE and Kim BH(2021). Trends in eco-friendly sterilization and disinfection technologies in seafood processing facilities. Journal of Food Hygiene and Safety, 36(4), 311~322.
<https://doi.org/10.13103/JFHS.2021.36.4.311>
- Liao X, Liu D, Xiang Q, Ahn J, Chen S, Ye X and Ding T(2017). Inactivation mechanisms of non-thermal plasma on microbes: A review. Food Control, 75, 83~91.
<https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2016.12.021>
- Liao X, Su H, Liu D, Chen S, Hua Z, Ye X and Ding T(2018). Preservation of ice-stored shrimps (*Metapenaeus ensis*) by plasma-activated water ice. Food Control, 90, 164~171.
<https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2018.04.038>
- Ma R, Tian Y, Xu Y, Yu Q and Yuan Y(2020). Effect of dielectric barrier discharge cold plasma on the texture and protein structure of ice-stored prawn (*Metapenaeus ensis*). LWT - Food Science and Technology, 132, 109811.
<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109811>
- Misra NN and Jo C(2017). Applications of cold plasma technology for microbiological safety in meat industry. Trends in Food Science & Technology, 64, 74~86.
<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.03.003>
- Nam KT, Yoo SK and Ji SY(2014). Effects of low-temperature plasma treatment on lipid oxidation and microbial inhibition in meat products. Korean Journal for Food Science of Animal Resources, 34(3), 254~261.
<https://doi.org/10.5851/kosfa.2014.34.3.254>
- Oh SW and Lee HS(2016). Correlation analysis between VBN and pH changes of seafood according to storage temperature. Journal of Food Hygiene and Safety, 31(5), 320~327.
<https://doi.org/10.13103/JFHS.2016.31.5.320>
- Olatunde OO and Benjakul S(2018a). Non-thermal technologies for shelf-life extension of seafood: A review. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 58(4), 635~647.
<https://doi.org/10.1111/1541-4337.12354>
- Olatunde OO and Benjakul S(2018b). Non-thermal plasma for food preservation and shelf-life extension: A review. Seafood Science, 2, 120~135.
<https://doi.org/10.1080/10408398.2016.1208638>
- Pankaj SK, Wan Z and Keener KM(2018). Effects of cold plasma on food quality: A review. Foods, 7(1), 4.
<https://doi.org/10.3390/foods7010004>
- Park SJ, Kim YJ and Kwon MS(2020). Evaluation of sterilization efficiency and water quality improvement effect of seafood washing water based on advanced oxidation process (AOP). Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 53(2), 180~188.
<https://doi.org/10.5657/KFAS.2020.53.2.180>
- Richardson SD, Plewa MJ, Wagner ED, Schoeny R and DeMarini DM(2007). Occurrence, genotoxicity, and carcinogenicity of regulated and emerging disinfection by-products in drinking water: A review and roadmap for research. Mutation Research/Reviews in Mutation Research, 636(1-3), 178~242.
<https://doi.org/10.1016/j.mrrev.2007.09.001>
- Safwa SM, Ahmed T, Talukder S, Sarkar A and Rana MR(2023). Applications of non-thermal technologies in food processing industries - A review. Journal of Agriculture and Food Research, 18, 100917.
<https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100917>

Shiekh KA and Benjakul S(2020). Effect of high voltage cold atmospheric plasma on the quality of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) during refrigerated storage. *LWT - Food Science and Technology*, 119, 108848.

<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108848>

Shin SY, Kim JH and Lee SJ(2018). Current status and prospects of applying non-thermal sterilization technologies in the seafood processing industry. *Korean Journal of Food Preservation*, 25(4), 456~467. <https://doi.org/10.11002/kjfp.2018.25.4.456>

Xu Y, Tian Y, Ma R, Liu Y and Yuan Y(2020). Effect of dielectric barrier discharge (DBD) cold plasma on the inactivation and structural modification of polyphenol oxidase in *Litopenaeus vannamei*. *Food Chemistry*, 317, 126454.

<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126454>

• Received : 09 March, 2026

• Revised : 09 April, 2026

• Accepted : 15 April, 2026