pISSN 1229-1153 / eISSN 2465-9223 *J. Food Hyg. Saf.*
Vol. 41, No. 4, pp. 244~252 (2026)
https://doi.org/10.13103/JFHS.2026.41.4.244

Journal of Food Hygiene and Safety
Available online at http://www.foodhygiene.or.kr

김밥 재료에 오염된 *Salmonella* Enteritidis의 생육 및 UVC-LED 조사에 의한 저감 효과

정명지[1] · 강혜미[2,3] · 육현균[2,3]*

[1]국립한국교통대학교, [2]중앙대학교 식품생명공학과, [3]중앙대학교 그린테크 기반 식품안전 BK연구팀

Growth of *Salmonella* Enteritidis on *Gimbap* Ingredients and Their Inactivation by UVC-LED Irradiation

Myoung-Ji Jeong[1], Hyemi Kang[2,3], Hyun-Gyun Yuk[2,3]*

[1]*Department of Food Science and Technology, Korea National University of Transportation, Jeungpyeong, Korea*
[2]*Department of Food Science and Biotechnology, Chung-Ang University, Anseong, Korea*
[3]*GreenTech-based Food Safety Research Group, BK21 Four, Chung-Ang University, Anseong, Korea*

(Received June 10, 2026/Revised August 11, 2026/Accepted August 12, 2026)

ABSTRACT - The increasing consumption of ready-to-eat foods has heightened the risk of foodborne illnesses associated with the food dish *gimbap*, where egg garnishes are considered a potential source of *Salmonella* contamination. This study evaluated the growth behavior of *S.* Enteritidis on representative *gimbap* ingredients at different storage temperatures and assessed the efficacy of 275 nm ultraviolet-C light-emitting diode (UVC-LED) irradiation as a surface decontamination treatment prior to *gimbap* preparation. A cocktail containing four strains of *S.* Enteritidis was inoculated onto egg garnish and ham (animal-based ingredients), and cucumbers and carrots (plant-based ingredients). The inoculated samples were stored at 4°C, 10°C, and 25°C for up to 9 h. No significant growth was observed at 4°C or 10°C for any ingredient. However, at 25°C, there were significant increases in *Salmonella* populations after 3 h on egg garnish, 1.5 h on carrot, and 4.5 h on cucumber; however, there was no significant increase on ham. The potential use of UVC-LED irradiation for rapid surface decontamination was also evaluated. At a distance of 10 cm (0.66 mW/cm^2), a UV dose of 9.9 mJ/cm^2 resulted in reductions of 1.0 log CFU/g on egg garnish, 1.2 log CFU/g on ham, 2.6 log CFU/g on carrot, and 2.3 log CFU/g on cucumber. Reducing the distance to 1 cm (1.90 mW/cm^2) did not significantly improve the inactivation efficacy. The variations in inactivation efficacies among the ingredients were considered to be associated with differences in the direct exposure to UVC caused by surface irregularities and uneven structures. These results suggest that storage below 10°C is critical to prevent *Salmonella* growth on *gimbap* ingredients and that 275 nm UVC-LED treatment could improve microbial safety during *gimbap* preparation.

Key words : UVC-LED, *Salmonella* Enteritidis, *Gimbap* ingredients, Ready-to-eat foods, Surface decontamination

김밥은 밥을 소금과 참기름으로 간한 후 김 위에 얇게 펼치고, 계란지단, 햄, 시금치, 단무지, 당근, 오이 등 다양한 재료를 넣어 말아 한입 크기로 절단하여 섭취하는 대표적인 복합조리식품이다. 사용되는 식재료의 종류에 따라 다양한 형태로 제조될 수 있으며, 여러 영양소를 균형 있게 섭취할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 가정에서 직접 제조하기에는 준비 과정이 번거롭기 때문에 김밥전문점이나 편의점 등에서 구매하여 섭취하는 경우가 많다. 대학생을 대상으로 즉석섭취식품 구매 선호도를 조사한 결과, 김밥류(98.7%)가 가장 높은 선호도를 나타냈으며, 샌드위치(90.5%), 햄버거(90.1%), 도시락(75.7%), 초밥(75.6%) 순으로 나타났다[1]. 또한 통계청 양곡 소비량 조사에 따르면 도시락류 제조업의 쌀 소비량은 2020년 4만 0197 ton에서 2021년 4만 6723 ton으로 전년 대비 16.2% 증가한 것으로 보고되었다[2]. 도시락류 제조업은 다양한 식재료를 혼합·배합하여 도시락 및 김밥류와 같은 조리식품을 생산

*Correspondence to: Hyun-Gyun Yuk, Department of Food Science and Biotechnology, Chung-Ang University, Anseong 17546, Korea
Tel: +82-31-670-3268
E-mail: yukhg@cau.ac.kr

Copyright © The Korean Society of Food Hygiene and Safety. All rights reserved. The Journal of Food Hygiene and Safety is an Open-Access journal distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

하는 산업을 의미하며, 최근 코로나19 이후 간편식 및 1인 가구 증가로 인해 즉석섭취식품의 소비가 지속적으로 증가하는 추세이다.

즉석섭취식품의 소비 증가와 함께 조리시설의 위생관리 미흡으로 인한 식중독 발생 위험 또한 증가하고 있다[3]. 우리나라의 최근 식중독 발생 현황을 살펴보면 연평균 약 300건 내외의 식중독이 보고되고 있으며, 주요 원인 병원체로 Norovirus, 병원성 *Escherichia coli*, *Salmonella* spp. 등이 보고되고 있다. 특히 *Salmonella*는 매년 지속적으로 발생하는 대표적인 세균성 식중독 원인균으로 알려져 있다[4]. *Salmonella* 식중독의 주요 원인 식품으로 계란이 널리 알려져 있으며[5], 난각은 다공성 구조로 인해 *Salmonella*와 같은 병원성 미생물에 노출될 위험이 높아 유통 및 보관 과정에서 각별한 주의가 요구된다[6]. 김밥 제조 시 필수적으로 사용되는 계란지단은 다수의 계란을 혼합하여 제조되기 때문에 오염된 계란이 포함될 경우 전체 제품으로 오염이 확산될 가능성이 높다. 최근 국내에서 발생한 *Salmonella* 식중독 사례에서도 김밥과 같이 계란이 포함된 복합조리식품이 주요 원인 식품으로 보고되고 있다[7]. 실제로 2021년 7-8월 김밥 전문 프랜차이즈 매장에서 김밥 섭취 후 200여 명이 집단 식중독 의심 증상을 보였으며, 환자 검체에서 *Salmonella*가 검출된 사례가 보고되었다[7]. 또한 계란지단뿐만 아니라 액란을 원료로 사용한 식품에서도 *Salmonella* 식중독이 발생한 사례가 보고된 바 있는데, 2018년 국내 학교 집단급식에서 제공된 초콜릿 케이크 섭취 후 다수의 환자가 발생하였고, 원인 식품 제조에 사용된 난백액에서 *S.* Thompson이 검출된 바 있다[8]. 이러한 계란 유래 *Salmonella* 오염은 축사 환경이 *Salmonella*에 오염될 경우 산란계가 보균 상태가 될 수 있으며, 이로부터 생산된 계란의 난각 또는 내용물이 오염될 수 있기 때문으로 보고되고 있다[9]. Jung 등[10]의 연구에서도 국내 생산 단계 계란의 *Salmonella* 오염도를 조사한 결과, 전국 60개소의 선별포장업소 중 12개 업소에서 수거된 계란에서 *Salmonella* 양성으로 나타난 바 있다.

김밥전문점과 같은 조리환경에서 조리자가 *Salmonella*에 오염된 난각 또는 난내용물을 취급한 후 적절한 세척이나 소독 없이 다른 조리된 식재료를 취급할 경우 교차오염이 발생할 수 있으며, 오염된 식품을 소비자가 섭취할 경우 식중독 발생으로 이어질 수 있다. 이러한 *Salmonella* 식중독 사고를 예방하기 위해서는 식재료와 접촉하는 조리기구의 위생관리와 충분한 가열처리가 중요하며, 조리자의 개인위생 관리 또한 필수적이다. 또한 김밥 제조 과정에서 재료에 존재하는 *Salmonella*를 사전에 저감할 수 있는 기술이 적용된다면 교차오염에 의한 식중독 발생을 예방하는 데 도움이 될 것으로 판단된다. 따라서 음식점과 같은 조리 현장에서 간편하게 적용 가능한 소형 살균기술의 개발이 필요하다.

자외선(ultraviolet, UV)은 약 10-400 nm 범위의 파장을 가지는 전자기파로, 파장에 따라 UV-C, UV-B 및 UV-A로 구분된다[11]. UV-C는 100-280 nm 범위의 파장대를 가지며 가장 높은 살균 효과를 나타내는 것으로 알려져 있다[12]. 기존에는 주로 수은 램프 형태의 UV 광원이 사용되어 왔으나, 수은 램프는 파손 시 수은 누출 위험이 있으며 인체 및 환경에 유해할 수 있다는 단점이 있다[13]. 반면 UV-LED (light-emitting diode)는 수은을 사용하지 않는 친환경 광원으로, 에너지 소비가 적고 소형화가 가능하며 내구성이 우수하고 열 발생이 적다는 장점을 가진다[12]. 이러한 장점으로 인해 최근 UV-LED를 이용한 식품 표면 살균 연구가 활발히 진행되고 있다. 예를 들어, 다진 소고기에 오염된 *Listeria monocytogenes*와 *S.* Typhimurium을 255, 265 및 285 nm 파장에서 조사한 결과 285 nm에서 가장 높은 저감 효과가 나타났으며[14], Kim 등[15]은 254 nm UV-LED를 이용하여 세척 당근 표면에 오염된 *E. coli* O157:H7 및 *L. monocytogenes*를 약 2.4 log CFU/g 감소시킨 바 있다. 그러나 UV-LED는 빛이 조사되는 표면에 한정하여 살균 효과를 나타내는 특성이 있으므로 식품의 표면 구조 및 특성에 따라 살균 효과가 달라질 수 있다. 특히 김밥은 계란지단, 햄, 채소류 등 다양한 표면 특성을 가진 재료로 구성된 복합조리식품이기 때문에 UV-LED의 살균 효과가 식재료별로 다르게 나타날 가능성이 있다. 따라서 본 연구에서는 김밥 재료에 오염된 *S.* Enteritidis의 저장 온도에 따른 생육 특성을 조사하고, 김밥 제조 현장에서 적용 가능한 저감 기술로서 UV-LED 조사에 의한 *S.* Enteritidis의 저감 효과를 평가하고자 하였다.

Materials and Methods

균주 및 배양방법

본 연구에서는 *S.* Enteritidis 109 (Group D1; Centers for Disease Control and Prevention, Atlanta, GA, USA), *S.* Enteritidis 124 (phage type 8; Maryland Department of Health and Mental Hygiene, Baltimore, MD, USA), *S.* Enteritidis 125 (phage type 13; Department of Agriculture, Olympia, WA, USA), *S.* Enteritidis 130 (phage type 2; Centers for Disease Control and Prevention)의 총 4종 균주를 사용하였다. 이들 균주는 가금류 감염 및 면역 연구와 계란을 포함한 식품 미생물 연구에 활용되어 온 *S.* Enteritidis 균주들로, 서로 다른 phage type을 포함하도록 선정하였다. 또한 단일 균주 사용 시 특정 균주의 고유한 UV 감수성이 결과에 미치는 영향을 최소화하고 보다 대표성 있는 결과를 얻기 위해 이들 균주를 혼합하여 cocktail 형태로 사용하였다. 균주는 20% glycerol 용액에 현탁하여 초저온냉동고(-80°C)에 보관하였으며, 실험 전 해동한 후, 멸균된 Tryptic Soy Broth (TSB; Becton, Dickinson

and Company, Sparks, MD, USA)에 접종하여 37°C에서 24시간 동안 2회 연속 계대배양한 후 실험에 사용하였다.

김밥 재료에 접종된 *S.* Enteritidis만 선택적으로 계수하기 위하여 각 균주를 항생제 nalidixic acid sodium salt (Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, USA)에 단계적으로 적응시켰다. 각 균주는 1.0 ppm nalidixic acid가 포함된 TSB에 접종하여 37°C에서 24시간 배양한 후, 배양액을 nalidixic acid 농도를 1.5배씩 증가시킨 TSB에 순차적으로 계대배양하는 방법으로 최종 150.0 ppm nalidixic acid에 적응시켰다. 균주의 순도 확인을 위하여 각 단계에서 배양액을 Xylose Lysine Deoxycholate agar (XLD; BD, Sparks)에 도말한 후 37°C에서 24시간 배양하여 *Salmonella* 특이 집락 형성을 확인하였다. 이후 모든 실험에 사용된 배지는 nalidixic acid 150.0 ppm을 첨가하여 사용하였다.

시료준비

본 연구에서는 김밥 재료 중 동물성 식재료로 계란지단과 햄을, 식물성 식재료로 당근과 오이를 선정하였다. 또한 김밥에서의 *Salmonella* 생육을 관찰하기 위하여 이미 조리된 김밥을 시료로 사용하였다. 오이와 당근은 충청북도 진천군 소재 식자재마트 (Jincheon, Korea)에서 구매하였다. 계란지단은 경상북도 구미시(Gumi, Korea)에서 제조된 완제품을 온라인을 통해 구매하여 사용하였다. 햄은 충청북도 진천군 (Jincheon, Korea)에서 구매한 스모크 햄을 사용하였으며, 약 7×5×1 cm 크기로 절단한 후 예열된 팬에서 약 3-5분 동안 양면을 가열하였다. 당근은 약 5×7×1 cm 크기로 절단한 후 소금을 첨가한 끓는 물에서 약 5분간 데쳐 사용하였다. 오이는 세척 후 약 3×5×1 cm 크기로 절단하여 사용하였다. 김밥은 충청북도 증평군 소재 김밥전문점(Jeungpyeong, Korea)에서 구매하여 제조 후 30분 이내에 실험에 사용하였다.

균 접종 및 생육곡선

각 시료(계란지단, 햄, 당근, 오이 및 김밥)는 약 10 g씩 사용하였다. 배양된 *S.* Enteritidis 각 균주는 균주별로 250 µL씩 취하여 1.5 mL microtube에 혼합한 후 원심분리기(Micro 17TR, Hanil Science Co. Ltd., Daejeon, Korea)를 이용하여 4°C, 3,500×g에서 10분간 원심분리하였다. 상등액을 제거한 뒤 phosphate buffered saline (PBS; Biosesang, Seongnam, Korea) 1 mL를 첨가하여 균체를 재현탁하였다. 동일한 세척 과정을 2회 반복하여 잔존 배지를 제거하고 접종용 균 현탁액을 준비하였다. 세척된 *S.* Enteritidis 혼합균(cocktail)의 농도는 약 7.0 log CFU/mL였으며, 이를 2회 희석하여 최종적으로 각 시료 표면에 100 µL씩 접종하였다(약 4.0 log CFU/g). 접종된 균이 각 시료 표면에 안정적으로 부착되도록 생물안전작업대(Biosafety cabinet; CHC LAB, Daejeon, Korea) 내에서 약 30분간 자연 건조하였다. 접종된 시료를 멸균백에 넣은 후 저온배양기(IL-11-4C, JEIO Tech Co. Ltd., Daejeon, Korea)에서 4°C, 10°C, 25°C 조건에서 최대 9시간 동안 저장하였다. 저장 중 *S.* Enteritidis의 생육 변화를 확인하기 위하여 1.5시간 간격으로 시료를 꺼내어 멸균된 0.1% peptone water (PW; BD, Sparks) 90 mL를 첨가하였다. 이후 시료는 Stomacher (WiseMix® WES, DAIHAN Scientific, Wonju, Korea)를 이용하여 2분간 균질화하였다. 균질화된 시료는 0.1% PW를 이용하여 단계적으로 희석한 후, 각 희석액 100 µL를 nalidixic acid (150 ppm)가 첨가된 tryptic soy agar (TSA; BD)에 도말평판법으로 도말하였다. 도말된 평판은 37°C에서 24시간 동안 배양한 후 생성된 집락수를 계수하였으며, 결과는 Log CFU/g 단위로 나타내었다.

UVC-LED 조사장치 및 조사방법

본 연구에서는 파장 275 nm의 UVC-LED 광원(10.5 mW, Point Engineering Co., Ltd., Asan-si, Korea)을 사용하였다. 조사장치는 6개의 직사각형 PCB 모듈이 알루미늄 지지판에 평행하게 배열된 평면형 다중광원 구조로 구성되었으며, 각 모듈에는 6개의 UVC-LED 소자가 일정한 간격으로 배치되어 총 36개의 LED 소자가 사용되었다. LED 모듈은 acrylonitrile butadiene styrene (ABS) 재질의 housing에 장착하여 외부 광 유입을 차단하고 조사 조건을 일정하게 유지하였다(Fig. 1). 다중 LED 배열에서는 개별 광원의 조사영역이 중첩되므로 거리와 조사강도 간 관계가 이상적인 점광원의 역제곱 관계와 다르게 나타날 수 있다. 이에 따라 UVC-LED와 시료 표면 간 거리 변화에 따른 조사강도(irradiance)는 Digital Optical Power and Energy Meter (PM100D, THORLABS, Newton, NJ, USA)를 이용하여 각 거리의 시료 표면 위치에서 직접 측정하였으며, 측정된 수치를 활용하여 조사 선량(irradiation dose)은 아래 식을 이용하여 계산하였다.

$$E=P\times t$$

여기서 E는 조사선량 (mJ/cm^2), P는 조사강도 (mW/cm^2), t는 조사시간 (s)을 나타낸다.

UVC-LED 조사 실험에 사용된 시료는 앞서 기술한 방법에 따라 준비하였다. UVC-LED와 시료 표면 간 거리를 10 cm(0.66 mW/cm^2)로 설정한 후, 각 시료에 대해 0, 15, 30, 45, 60, 180(3 min), 300 s(5 min) 동안 자외선 조사를 실시하였다. 조사 후 시료는 멸균백에 넣고 멸균된 0.1% PW 90 mL를 첨가한 뒤 Stomacher를 이용하여 2분간 균질화하였다. 균질화된 시료는 0.1% PW로 적절히 희석한 후, 각 희석액 100 µL를 TSA (BD)에 도말평판법으로 도말하였다. 도말된 평판은 37°C에서 24시간 배양한 후 생성된 집락수를 계수하여 Log CFU/g으로 나타내었다. 또

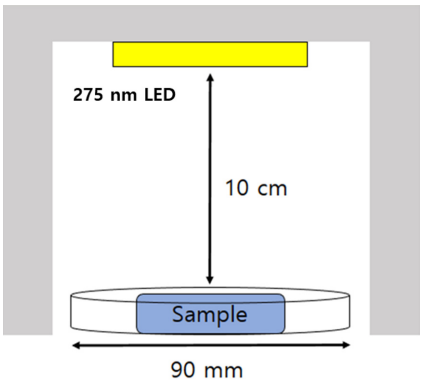

Fig. 1. Schematic diagram of 275 nm UV-LED irradiation system for *gimbap* ingredients at an irradiance of 0.66 mW/cm^2.

한 LED 조사 거리의 영향을 비교하기 위하여 동일한 방법으로 LED와 시료 표면 간 거리를 1 cm(1.90 mW/cm^2)로 설정한 후 동일한 조사시간 조건에서 실험을 수행하였다.

햄 pH 측정 방법

햄의 pH는 Yim 등[16]의 방법을 일부 변형하여 측정하였다. 시료 10 g에 증류수 90 mL를 첨가한 후, 멸균백에 담아 Stomacher를 이용하여 2분간 균질화하였다. 균질액의 pH는 pH meter (SevenCompact S220, Mettler-Toledo GmbH, Greifensee, Switzerland)를 이용하여 측정하였다.

시료 표면 촬영 방법

각 김밥 재료 시료는 약 1.0×2.0×0.3 cm 크기로 절단한 후 투명한 평판 위에 배치하였다. 시료 표면 이미지는 시료로부터 약 20 cm 거리에서 스마트폰 후면 카메라(iPhone 12 Pro Max, Apple Inc., Cupertino, CA, USA; wide camera, 26 mm)를 이용하여 촬영하였다.

통계분석

모든 실험은 독립적으로 3회 반복 수행하였으며, 결과는 평균값±표준편차(mean±standard deviation)로 나타내었다. 측정값 간의 통계적 유의성은 IBM SPSS Statistics software (version 25.0; IBM Corp., Armonk, NY, USA)를 사용하여 일원배치 분산분석(one-way analysis of variance, ANOVA)을 통해 검정하였다. 사후검정(post-hoc test)은 Tukey의 다중비교 방법을 적용하였으며, 통계적 유의성은 95% 신뢰수준에서 P<0.05로 판단하였다.

Results and Discussion

김밥 재료별 보관 온도에 따른 *S.* Enteritidis 생육

*Salmonella*에 오염된 김밥 재료 및 김밥이 이상적인 냉장온도 조건(4°C), 온도남용 조건(10°C), 상온 조건(25°C)에서 평균 영업시간을 고려한 9시간 동안 보관되었을 경우를 가정하여 *S.* Enteritidis의 생육 변화를 관찰하였다. 계란지단에서는 4°C와 10°C에서 *Salmonella*의 생육이 관찰되지 않은 반면, 25°C에서는 3시간 이후부터 유의적으로(P<0.05) 생육이 시작되어 9시간 후 초기균수 대비 약 2.5 log 증가하였다(Fig. 2A). 반면 햄에서는 모든 온도 조건에서 *Salmonella*의 유의적인 증가가 관찰되지 않았다(Fig. 2B). 당근과 오이의 경우 계란지단과 유사하게 4°C와 10°C에서는 생육이 관찰되지 않았으나, 25°C에서는 3시간 이후부터 증가가 나타나 9시간 후 초기균수 대비 각각 약 2.7 log와 1.3 log 증가하였다(Fig. 3). 모든 재료가 포함된 김밥에서도 4°C와 10°C에서는 *Salmonella*의 생육이 관찰되지 않았으나, 25°C에서는 3시간 이후부터 유의적인 증가가 나타났으며 9시간 후 약 2.0 log 증가하였다(Fig. 4).

본 연구 결과, 햄을 제외한 대부분의 김밥 재료 및 김밥에서는 상온(25°C)에서만 *Salmonella* 생육이 관찰되었다. 이는 *Salmonella*가 중온균으로 약 7-47°C 범위에서 생육이 가능하기 때문에 냉장온도인 4°C에서는 생육이 거의 발생하지 않으며, 10°C에서도 생육 속도가 매우 제한적이기 때문으로 판단된다[17]. Kim 등[18]은 김밥을 15°C에서 저장할 경우 시간이 경과함에 따라 일반세균수가 증가함을 보고

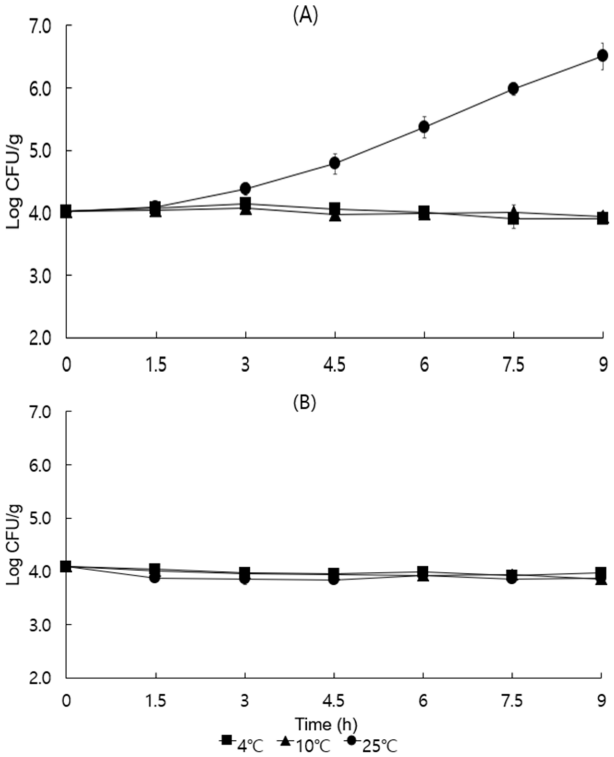

Fig. 2. Growth of *Salmonella* Enteritidis on egg garnish (A) and ham (B) at 4°C, 10°C and 25°C for 9 h. Error bars represent the standard deviations of three independent replicates (n=3).

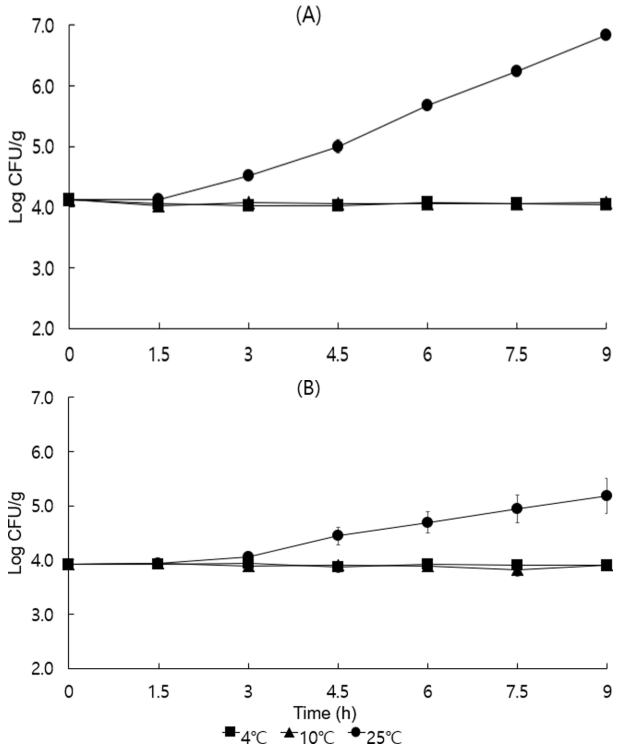

Fig. 3. Growth of *Salmonella* Enteritidis on shredded carrot (A) and shredded cucumber (B) at 4°C, 10°C and 25°C for 9 h. Error bars represent the standard deviations of three independent replicates (n=3).

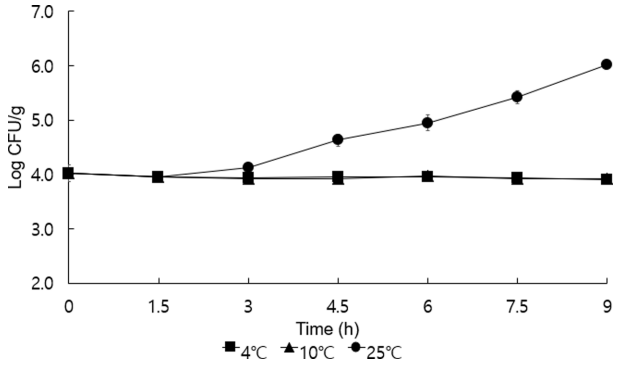

Fig. 4. Growth of *Salmonella* Enteritidis on *gimbap* at 4°C, 10°C and 25°C for 9 h. Error bars represent the standard deviations of three independent replicates (n=3).

하였으며, Koo 등[19] 또한 10°C에서 김밥을 장기간 저장할 경우 미생물 수가 증가한다고 보고하였다. 이러한 결과는 저장온도뿐 아니라 저장시간 또한 복합조리식품의 미생물 증식에 중요한 영향을 미친다는 점을 시사한다.

특히 햄에서는 모든 온도 조건에서 *Salmonella*의 유의적인 증식이 관찰되지 않았다. 가공육의 미생물학적 안정성은 일반적으로 pH, 수분활성도, 염류, 보존료 및 식품 매트릭스 특성 등 여러 인자가 복합적으로 작용하는 hurdle effect에 의해 영향을 받을 수 있다[20]. 본 연구에 사용된 햄의 pH는 6.60±0.04로 측정되었으며 pH 자체가 *Salmonella*의 생육을 직접적으로 제한하는 수준은 아닌 것으로 판단되었다. 그러나 제품의 영양성분 및 원재료 표시사항을 확인한 결과 나트륨 함량은 100 g당 720 mg이었고, 정제소금과 함께 소브산칼륨(potassium sorbate) 및 아질산나트륨(sodium nitrite)이 첨가되어 있었다. 염류는 식품의 수분 이용성과 세포 외 삼투환경에 영향을 주어 *Salmonella*의 생육을 지연시킬 수 있으며[21], 소브산염 및 아질산염과 같은 보존료 역시 식품의 pH와 기타 환경요인에 따라 미생물의 생육 억제에 기여할 수 있다[22,23]. 따라서 햄에서 관찰된 *Salmonella*의 비증식은 단일 요인보다는 pH와 염류, 보존료 및 식품 매트릭스 특성이 복합적으로 작용한 결과일 가능성이 있다. 다만 영양표시에 제시된 총 나트륨 함량은 실제 NaCl 농도와 동일하지 않으며, 본 연구에서는 수분활성도, 실제 염 농도 및 보존료의 잔존농도를 직접 측정하지 않았으므로 각 요인의 개별적인 기여도를 명확히 구분하기는 어렵다.

따라서 김밥 재료 및 김밥에 오염된 *Salmonella*의 생육을 최소화하기 위해서는 10°C 이하의 냉장온도에서 보관하는 것이 중요하다. 다만 본 연구의 9시간 관찰 범위에서 4°C와 10°C 조건의 유의적인 균수 증가는 나타나지 않았지만, 생존균은 지속적으로 검출되었으므로 10°C 이하의 보관이 *Salmonella*를 사멸시키는 것은 아니다. 또한 더 장기간 보관할 경우 증식 가능성을 배제할 수 없다. 특히 상온에서 장시간 방치될 경우 단시간 내에도 유의적인 미생물 증가가 발생할 수 있으므로 제조 후 가능한 빠른 시간 내에 소비하는 것이 필요할 것으로 사료된다.

UVC-LED 조사의 *S.* Enteritidis 오염 김밥 재료의 저감 효과와 표면 특성의 영향

앞서 제시한 결과에서와 같이 김밥 재료(계란지단, 햄, 당근, 오이)에 오염된 *Salmonella*는 냉장 조건에서 증식하지는 않았으나 생존은 가능한 것으로 나타났다. 이는 김밥 재료를 냉장 보관하더라도 생존한 병원성 미생물에 의해 교차오염이 발생할 가능성이 있음을 의미한다. 따라서 김밥 제조 직전에 재료 표면에 존재하는 *Salmonella*를 현장에서 신속하게 저감할 수 있는 기술이 필요하며, 본 연구에서는 UVC-LED를 이용하여 김밥 재료 표면에 오염된 *S.* Enteritidis의 저감 효과를 평가하였다.

예비실험 결과, UVC-LED 광원과 PBS에 접종된 *Salmonella* 간 거리가 약 10 cm(0.66 mW/cm^2)일 때 1분 이내에 균이 모두 사멸되는 것을 확인하였다(data not shown). 이를 바탕으로 실제 식품 표면에서의 살균 효과를 평가하기 위해 LED와 시료 간 거리를 약 10 cm로 설정하여 실험을 수행하였다(Fig. 5A). 계란지단의 경우 9.9 mJ/cm^2(15초) 조사 시 초기균수(6.1 log CFU/g) 대비

약 1.0 log 감소한 5.1 log CFU/g 수준으로 나타났으며, 이후 조사 선량을 198 mJ/cm^2(300초)까지 증가시켜도 추가적인 유의적 감소는 나타나지 않았다(P>0.05). 햄에서도 유사한 경향이 나타났으며, 9.9 mJ/cm^2 조사 시 약 1.2 log 감소가 나타났고 198 mJ/cm^2 조사 시 약 4.0 log CFU/g 수준까지 감소하였다. 당근과 오이에서도 유사한 경향이 나타났으며, 9.9 mJ/cm^2 조사 시 각각 2.6 log CFU/g 및 2.3 log CFU/g 감소가 나타났고 이후 조사 선량 증가에 따른 추가적인 유의적 감소는 나타나지 않았다.

UVC-LED의 살균 효과를 향상시키기 위하여 LED와 시료 표면 간 거리를 1 cm로 감소시켜 실험을 수행하였다(Fig. 5B). 계란지단의 경우 28.5 mJ/cm^2(15초) 조사 시 초기균수(6.1 log CFU/g) 대비 약 0.9 log 감소하였으며, 조사 선량 증가에 따른 추가 감소는 제한적이었으나 570 mJ/cm^2 (300초) 조사 시 약 1.5 log 감소하였다. 햄에서도 28.5 mJ/cm^2 조사 시 약 1.2 log 감소가 나타났으며 570 mJ/cm^2 조사 시 추가적으로 약 1.2 log 감소하였다. 당근에서는 28.5 mJ/cm^2 조사 시 약 1.6 log 감소하였고 570 mJ/cm^2 조사 시 총 3.6 log 감소하였다. 반면 오이에서는 가장 높은 감소 효과가 나타났으며 28.5 mJ/cm^2 조사 시 약 2.5 log 감소하였고 570 mJ/cm^2 조사 시 거의 검출한계 수준까지 감소하였다.

모든 시료에서 UVC-LED 조사 초기에 *Salmonella* 감소가 크게 나타났으나 이후 조사 선량 증가에 따른 추가적인 감소는 제한적인 것으로 나타났다. 이러한 결과는 UVC가 식품 내부로 침투하지 못하고 표면에 존재하는 미생물에만 영향을 미치는 특성과 관련이 있는 것으로 판단된다. UVC는 DNA 내 pyrimidine dimer 형성을 유도하여 세포 복제를 억제하는 것으로 알려져 있으나[24] 투과도가 매우 낮아 표면 살균에 주로 활용된다[25]. 따라서 식품 표면 구조에 의해 일부 미생물이 빛이 도달하지 않는 영역(shadowing area)에 존재할 경우 조사 선량이 증가하더라도 추가적인 살균 효과가 제한될 수 있다[26].

이러한 결과와 식품 표면 형태의 관련성을 확인하기 위하여 김밥 재료의 표면을 카메라로 관찰하였다(Fig. 6). 계란지단에서는 불규칙한 요철과 굴곡이 뚜렷하게 나타났으며, 햄은 비교적 균일하였으나 일부 미세한 불균일성이 관찰되었다. 당근은 상대적으로 큰 굴곡이 적고 균일한 절단면을 나타낸 반면, 오이에서는 길이 방향의 선형 구조와 일부 국소적인 굴곡이 관찰되었다. 다만, 본 연구에서 사용한 광학 카메라를 통한 관찰은 표면의 거시적인 형태와 굴곡을 확인하는 데에는 유용하나, 마이크로미터(μm) 수준인 미생물의 부착 미세구조나 자외선 차단 효과(shadowing effect)를 정밀하게 평가하기에는 해상도와 객관성에 한계가 있다. 따라서 식품 표면의 미세구조가 UVC-LED의 투과 및 살균 효율에 미치는 영향을 보다 깊이 이해하기 위해 기존 주사전자현미경(scanning electron microscope, SEM) 기반의 식품 미세구조 연구 결과를 함께 고찰하였다. 계란지단과 관련하여 Asai 등[27]은 전란액을 오믈렛 형태로 가열한 후 SEM으로 미세구조를 관찰한 결과, 가열된 egg gel에서 불균일하고 다공성인 구조가 형성되는 것을 보고하였다. 이러한 미세구조적 특성은 표면에 부착된 미생물의 UVC 노출을 불균일하게 할 수 있으며, 본 연구에서 상대적으로 제한적인 *Salmonella* 감소가 나타난 데 일부 기여했을 가능성이 있다. 햄 역시 Sheen 등[28]의 연구에서 육안상 비교적 평활하게 절단된 cooked ham에서도 μm 수준의 표면 거칠기와 peaks 및 valleys가 확인되어, 거시적으로 균일하게 보이는 표면에서도 존재할 수 있는 미세한 불균일성이 UVC의 직접적인 도달을 제한했을 가능성이 있다. 반면 당근은 본 연구에서 비교적 균일한 절단면을 나타냈으며, Tatsumi 등[29]은 carrot stick을 날카로운 칼날로 절단한 경우 세포 손상이 적고 비교적 균일한 절단면이 형성될 수 있음을 SEM으로 확인하였다. 따라서 이러한 상대적으로 균일한 표면이 표면에 부착된 미생물에 대한 UVC의 직접적인 도달을 용이하게 하여, 높은 미생물 감소효과에 일부 기여했을 가능성이 있다. 오이의 경우, Smith 등[30]은 신선한 오이의 외

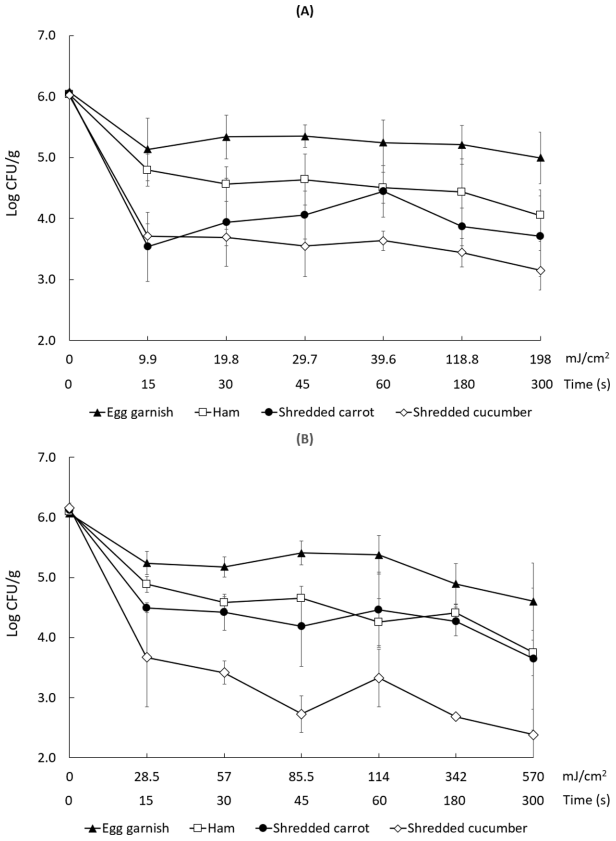

Fig. 5. Inactivation of *Salmonella* Enteritidis on the *gimbap* ingredients by 275 nm UVC-LED irradiation at room temperature at an irradiance of 0.66 mW/cm^2 (A) and 1.90 mW/cm^2 (B) for 5 min. Error bars represent the standard deviations of three independent replicates (n=3).

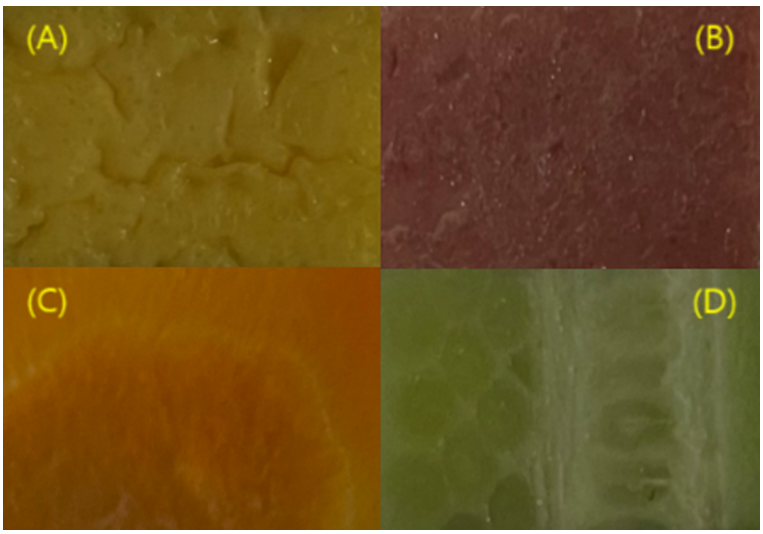

Fig. 6. Photograph of surface of egg garnish (A), ham (B), shredded carrot (C) and shredded cucumber (D).

부 표면에서 epidermal cells, stomata, trichomes 및 trichome scars를 확인하였으며, stomata가 표피 내부로 수 μm 함몰되어 있음을 보고하였다. 다만 해당 연구는 외부 표피를 관찰한 반면 본 연구에서는 절단면을 사용하였으므로 직접적인 비교에는 한계가 있다. 종합적으로, 식품의 거시적 표면 형태와 미세구조가 반드시 일치하는 것은 아니며, UVC-LED 살균효과의 차이를 단순히 표면의 평활성만으로 설명하기는 어렵다. 그럼에도 불구하고, 본 카메라 관찰과 기존 미세구조 문헌을 종합하면 계란지단의 뚜렷한 요철과 햄의 미세 표면 거칠기는 shadowing effect를 증가시키는 요인으로, 당근의 상대적으로 균일한 절단면은 UVC의 직접적인 노출을 용이하게 하는 요인으로 작용했을 가능성이 있다. 오이의 높은 감소효과는 표면 형태뿐만 아니라 실제 미생물의 부착 위치와 UVC 노출 정도 등 여러 요인이 복합적으로 작용한 결과로 판단된다.

본 연구 결과, *S.* Enteritidis가 오염된 김밥 재료 및 김밥은 4°C와 10°C에서는 9시간 동안 유의적인 생육이 나타나지 않았으나, 25°C에서는 균수가 증가하여 상온 보관 시 식중독 발생 위험이 증가할 수 있음을 확인하였다. 또한 275 nm UVC-LED 조사 시 모든 김밥 재료에서 조사 초기 단계에서 *S.* Enteritidis가 유의적으로 감소하였다. 특히 UVC-LED와 시료 간 거리를 1 cm로 단축하여 조사강도가 증가한 조건(1.90 mW/cm^2)에서는 최대 3.6 log CFU/g의 감소 효과가 나타났다. 그러나 조사 거리 및 조사강도 조건에 따른 살균 효과의 유의적인 차이는 확인되지 않았으며, 이는 본 연구에서 적용한 범위 내의 조사강도 차이가 *S.* Enteritidis의 저감 효과를 추가로 유의하게 향상시키기 어렵다는 것을 의미한다. 재료별 살균 효과의 차이는 식품 표면 구조에 따른 shadowing effect와 관련이 있는 것으로 판단되며, 미생물의 부착 위치와 식품 매트릭스 특성 등 다른 요인도 함께 고려할 필요가 있다. 한편, 본 연구에서는 UVC-LED의 저감 효과를 명확히 평가하기 위해 자연적으로 발생할 수 있는 오염 수준보다 높은 농도의 *S.* Enteritidis를 접종한 가혹 조건(worst-case scenario)을 적용하였다. 실제 김밥 제조 현장에서는 초기 오염 수준이 본 실험 조건보다 낮을 가능성이 있으므로, 비교적 낮은 1-3 mJ/cm^{2}의 UVC-LED 조사 선량에서도 실질적인 미생물 저감 효과를 기대할 수 있을 것으로 예상된다. 따라서 UVC-LED는 김밥 제조 직전에 각 재료의 표면에 적용할 수 있는 실용적인 비가열 살균기술로 활용될 수 있으며, 김밥과 같은 복합조리식품에서 재료 간 교차오염으로 인한 식중독 발생 위험을 낮추는 추가적인 위생관리 수단으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 다만, 본 기술의 실제 적용을 위해서는 향후 UVC-LED 조사가 김밥 재료의 색, 향 및 지질 산화 등 품질 특성에 미치는 영향에 대한 추가적인 평가가 필요하다.

국문요약

즉석섭취식품의 소비 증가와 함께 김밥과 관련된 식중독 발생 위험이 증가하고 있으며, 특히 계란지단은 *Salmonella* 오염의 주요 원인 식재료로 지목되고 있다. 본 연구에서는 김밥 재료에 오염된 *S.* Enteritidis의 보관 온도에 따른 생육 특성을 평가하고, 김밥 제조 전 단계에서 적용 가능한 표면 살균 기술로서 275 nm UVC-LED의 저감 효과를 확인하였다. 동물성 식재료인 계란지단과 햄, 식물성 식재료인 오이와 당근을 대상으로 *S.* Enteritidis 4균주를 혼합하여 표면 접종한 후 4°C, 10°C, 25°C에서 9시간 동안 보관하며 균의 생육 변화를 관찰하였다. 모든 재료에서 4°C와 10°C에서는 유의적인 생육이 나타나지 않

았으나, 25°C에서는 계란지단(3시간), 당근(1.5시간), 오이(4.5시간)에서 균수가 유의적으로 증가하였으며, 햄에서는 유의적인 증가가 나타나지 않았다. UVC-LED의 살균 효과를 평가한 결과, LED와 시료 간 거리를 10 cm (0.66 mW/cm^2)로 설정하고 9.9 mJ/cm^{2}의 선량으로 조사하였을 때 계란지단에서 1.0 log CFU/g, 햄에서 1.2 log CFU/g, 당근에서 2.6 log CFU/g, 오이에서 2.3 log CFU/g 감소하였다. UVC-LED와 시료 간 거리를 1 cm (1.90 mW/cm^2)로 감소시켰을 때에도 추가적인 살균 효과의 유의적인 증가는 나타나지 않았다. 이러한 재료별 살균 효과의 차이는 식품 표면의 굴곡 및 불균일성에 의해 UVC 빛 투과가 제한됨에 따라 미생물 살균 효과가 감소하였기 때문으로 판단된다. 본 연구 결과, 김밥 재료는 10°C 이하에서 보관할 경우 *Salmonella*의 생육을 억제할 수 있으며, 275 nm UVC-LED 처리는 김밥 제조 직전에 재료 표면에 적용 가능한 추가적인 살균 기술로서 김밥의 미생물학적 안전성을 향상시키는 데 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

Conflict of Interest

The authors declare no potential conflict of interest.

ORCID

Myoung-Ji Jeong https://orcid.org/0009-0009-0586-547X
Hyemi Kang https://orcid.org/0009-0000-8042-6746
Hyun-Gyun Yuk https://orcid.org/0000-0001-9841-7899

References

1. Lee, J.H., Bae, H.J., A survey on the ready-to-eat foods' consumption practices of university students and microbiological quality assessment of kimbap. *Korean J. Food Cook. Sci.*, **31**, 153-161 (2015).
2. Korean Statistical Information Service (KOSIS), (2026, April 1). Rice consumption in business sector (10th revision). Retrieved from https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?sso=ok&returnurl=https%3A%2F%2Fkosis.kr%3A443%2FstatHtml%2FstatHtml.do%3Fconn_path%3DMT_ZTITLE%26list_id%3DF14_20%26obj_var_id%3D%26seqNo%3D%26tblId%3DDT_1ED0006%26vw_cd%3DMT_ZTITLE%26itm_id%3D%26language%3Dkor%26lang_mode%3Dko%26orgId%3D101%26
3. Lee, J., Huh, S., Assessing risk factors for foodborne illness in restaurants in Seoul. *One Health*, **20**, 101009 (2025).
4. Hwang, M.J., Park, S.Y., Kim, H., Yang, S.J., Yang, S., Yang, J.S., Waterborne and foodborne disease outbreaks in the Republic of Korea, 2023. *Public Health Wkly. Rep.*, **18**, 17-32 (2024).
5. Bermudez-Aguirre, D., Carter, J., Niemira, B.A., An investigation about the historic global foodborne outbreaks of *Salmonella* spp. in eggs: From hatcheries to tables. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.*, **24**, e70202 (2025).
6. Teymouri Zadeh, Z., Shariatmadari, F., Sharafi, M., Karimi Torshizi, M.A., Amelioration effects of n-3, n-6 sources of fatty acids and rosemary leaves powder on the semen parameters, reproductive hormones, and fatty acid analysis of sperm in aged Ross broiler breeder roosters. *Poult. Sci.*, **99**, 708-718 (2020).
7. Eun, J.S., Han, J., Lim, J.H., Shin, E., Kim, J., Ko, D.J., Yoo, J., Kim, S., Kim, J.S., Park, J.S., Park, J.H., Salmonellosis outbreaks linked to eggs at 2 *gimbap* restaurants in Korea. *Epidemiol. Health*, **46**, e2024036 (2024).
8. Eun, Y., Jeong, H., Kim, S., Park, W., Ahn, B., Kim, D., Kim, E., Park, E., Park, S., Hwang, I., Son, H., A large outbreak of *Salmonella enterica* serovar Thompson infections associated with chocolate cake in Busan, Korea. *Epidemiol. Health*, **41**, e2019002 (2019).
9. Shaji, S., Selvaraj, R.K., Shanmugasundaram, R., *Salmonella* infection in poultry: a review on the pathogen and control strategies. *Microorganisms*, **11**, 2814 (2023).
10. Jung, H.R., Lee, Y.J., Prevalence and characterization of non-typhoidal *Salmonella* in egg from grading and packing plants in Korea. *Food Microbiol.*, **120**, 104464 (2024).
11. Diffey, B.L., Sources and measurement of ultraviolet radiation. *Methods*, **28**, 4-13 (2002).
12. Kim, S.J., Kim, D.K., Kang, D.H., Using UVC light-emitting diodes at wavelengths of 266 to 279 nanometers to inactivate foodborne pathogens and pasteurize sliced cheese. *Appl. Environ. Microbiol*., **82**, 11-17 (2016).
13. Murashita, S., Kawamura, S., Koseki, S., Inactivation of nonpathogenic *Escherichia coli*, *Escherichia coli* O157:H7, *Salmonella enterica* Typhimurium, and *Listeria monocytogenes* in ice using a UVC light-emitting diode. *J. Food Prot.*, **80**, 1198-1203 (2017).
14. McSharry, S., Koolman, L., Whyte, P., Bolton, D., Inactivation of *Listeria monocytogenes* and *Salmonella* Typhimurium in beef broth and on diced beef using an ultraviolet light emitting diode (UV-LED) system. *LWT*, **158**, 113150 (2022).
15. Kim, J.Y., Kim, E.K., Shin, C.L., Song, K.B., Effect of UV-C irradiation on inactivation of *Escherichia coli* O157:H7 and *Listeria monocytogenes* on washed carrot during storage. *Food Sci. Preserv.*, **16**, 636-643 (2009).
16. Yim, D.G., Shin, D.J., Jo, C., Nam, K.C., Effect of sodium-alternative curing salts on physicochemical properties during salami manufacture. *Food Sci. Anim. Resour.*, **40**, 946-956 (2020).
17. Olaimat, A.N., Holley, R.A., Effects of changes in pH and temperature on the inhibition of *Salmonella* and *Listeria monocytogenes* by allyl isothiocyanate. *Food Control*, **34**, 414-419 (2013).
18. Kim, D.H., Song, H.P., Kim, J.K., Kim, J.O., Lee, H.J., Byun, M.W., Determination of microbial contamination in the process of rice roled in dried laver and improvement of shelf-life by gamma irradiation. *J. Korean Soc. Food Sci. Nutr.*, **32**, 991-996 (2003).
19. Koo, M.S., Kim, Y.S., Shin, D.B., Oh, S.W., Chun, H.S.,

Shelf-life of prepacked kimbab and sandwiches marketed in convenience stores at refrigerated condition. *J. Food Hyg. Saf.*, **22**, 323-331 (2007).
20. Dalzini, E., Merigo, D., Caproli, A., Monastero, P., Cosciani-Cunico, E., Losio, M.N., Daminelli, P., Inactivation of *Listeria monocytogenes* and *Salmonella* spp. in milano-type salami made with alternative formulations to the use of synthetic nitrates/nitrites. *Microorganisms*, **10**, 562 (2022).
21. Aspridou, Z., Akritidou, T., Koutsoumanis, K.P., Simultaneous growth, survival and death: The trimodal behavior of Salmonella cells under osmotic stress giving rise to "Phoenix phenomenon". *Int. J. Food Microbiol*., **285**, 103-109 (2018).
22. Amin Zare, M., Razavi Rohani, S.M., Raeisi, M., Javadi Hosseini, S.H., Hashemi, M., Antibacterial effects of monolaurin, sorbic acid and potassium sorbate on *Staphylococcus aureus* and *Escherichia* coli. *J. Food Qual. Hazards Control*, **1**, 52-55 (2014).
23. Majou, D., Christieans, S., Mechanisms of the bactericidal effects of nitrate and nitrite in cured meats. *Meat Sci*., **145**, 273-284 (2018).
24. Rastogi, R.P., Richa, Kumar, A., Tyagi, M.B., Sinha, R.P., Molecular mechanisms of ultraviolet radiation-induced DNA damage and repair. *J. Nucleic Acids*, **2010**, 592980 (2010).
25. Fan, X., Huang, R., Chen, H., Application of ultraviolet C technology for surface decontamination of fresh produce. *Trends Food Sci. Technol.*, **70**, 9-19 (2017).
26. Kim, G.H., Lee, C.L., Yoon, K.S., Combined hurdle technologies using UVC waterproof LED for inactivating foodborne pathogens on fresh-cut fruits. *Foods*, **10**, 1712 (2021).
27. Suzuki, M., Kakuda, M., Asai, T., Ueno, M., Sugiyama, S., Effects of milk fat cream and rapeseed oil addition on the rheological properties of liquid egg and its heat-induced gel structure and texture. *J. Cookery Sci. Jpn*., **47**, 312-319 (2014).
28. Sheen, S., Bao, G., Cooke, P., Food surface texture measurement using reflective confocal laser scanning microscopy. *J. Food Sci*., **73**, E227-E234 (2008).
29. Tatsumi, Y., Watada, A.E., Wergin, W.P., Scanning electron microscopy of carrot stick surface to determine cause of white translucent appearance. *J. Food Sci*., **56**, 1357-1359 (1991).
30. Smith, K.R., Fleming, H.P., Van Dyke, C.G., Lower, R.L., Scanning electron microscopy of the surface of pickling cucumber fruit. *J. Am. Soc. Hortic. Sci*., **104**, 528-533 (1979).