

포장 재질에 따른 대장균의 광펄스 처리 사멸 효과

이경미¹ · 박주안¹ · 신정규^{2*}

¹전주대학교 조리·식품산업학과, ²전주대학교 한식조리학과

The Effect of *Escherichia coli* Inactivation on Packaging Films Under Intense Pulsed Light Treatment

Gyeong Mi Lee¹, Juan Park¹, and Jung-Kue Shin^{2*}

¹Department of Culinary & Food Industry, Jeonju University

²Department of Korean Cuisine, Jeonju University

Abstract

This study investigated the inactivation effect of intense pulsed light (IPL) on various packaging films. The UV-C transmittance irradiance varied depending on the packaging materials, with the control group having an irradiance of 3.959 W/m². For the thinnest layer of 30 μm, polypropylene (PP) had an irradiance of 3.258 W/m², polyethylene (PE) had an irradiance of 3.193 W/m², and oriented polypropylene (OPP) had an irradiance of 3.200 W/m². In contrast, polyethylene terephthalate (PET) exhibited a significantly lower irradiance of only 0.065 W/m² for its thinnest film thickness of 100 μm. The light transmittance of the packaging materials was similar, with values of 91.3%, 89.7%, and 89.5% for PP, PE, and OPP, respectively. In contrast, PET exhibited a significantly lower light transmittance of 1.8% compared to the other packaging materials. These findings have practical implications for the food packaging industry. According to the packaging film material, the sterilization effects showed that the *E. coli* sterilization effect of PP was the highest, followed by PE and OPP, which were similarly effective. At the same time, PET exhibited the lowest sterilization effect. For PP film with a thickness of 30 μm, a 6.2 log reduction in the *E. coli* population was observed after 20 s of IPL treatment. Ultimately, inactivation was achieved after 60 seconds. Both PE and OPP films, which had a thickness of 30 μm, showed a 5.9 log reduction in *E. coli* after 30 s of IPL treatment, followed by complete inactivation after 60 s. The inactivation rate for PP, PE, and OPP films showed minimal variation regardless of thickness, although it gradually decreased with increasing thickness. For PET, achieving a 1 log reduction in *E. coli* required 180 s of IPL treatment at 100 μm thickness and 210 s at 120 μm thickness, indicating the influence of film thickness on inactivation rate. Even after 300 s of IPL treatment, the inactivation effect for PET remained around 1.5 log, the lowest among all packaging film materials.

Keywords: intense pulsed light (IPL), packaging film material, *Escherichia coli*, microbial inactivation, light irradiance

서론

식품업계는 제품의 생산, 포장, 유통, 그리고 소비자가 구매할 때까지 안전하고 믿을 수 있는 품질로 전달할 수 있도록 기술 개발과 함께 많은 노력을 하고 있다. 1인 가구의 증가와 밀키트의 출시, 식재료에 대한 소비자들의 관심이 증가하면서 식품의 포장단위가 줄어들어 소포장 형태의 제품이 다량 출시되고 있기도 하다(Lee et al., 2017). 또한 절단 야채, 과일, 샐러드 등과 같은 최소가공식품이나 바로 먹을 수 있는 제품들도 인기를 끌고 있다(Oh, 2013; Park & You,

2016). 그러나 이러한 최소가공식품은 신선한 상태로 유통되므로 기존의 가열 살균이 불가능하고 유통 및 저장 시에도 미생물의 과도한 증식이나 2차 오염 등의 문제로 안전성의 확보가 쉽지 않다(Cho et al., 2007; Jo et al., 2011; Kang et al., 2011).

한국의 가공식품 포장에 이용되는 재질은 polyethylene (PE)이 43.61%, polypropylene (PP)이 17.75%, polyethylene terephthalate (PET)가 12.05% 순으로 많이 사용되고 있다(Song et al., 2017). PP (polypropylene, 폴리프로필렌)의 화학식은 (C₃H₆)_n이며, 무미, 무취, 무독하여 안전성이 있고, 비중이 0.90-0.91로 가볍고 가공이 용이하며 투명도, 방습성, 광택도, 내열성이 우수하다. 그러나 산소 투과도가 높아 차단성이 필요할 때 알루미늄 증착이나 폴리염화비닐리덴(PVDC, polyvinylidene chloride)을 코팅해서 사용하며, 정전기 발생이 심하므로 대전방지처리가 요구된다. OPP(이축연신 폴리프로필렌) 필름의 경우, 투명성 및 표면광택도, 기계적

*Corresponding author: Jung-Kue Shin, Department of Korean Cuisine, College of Culture and Tourism, Jeonju University, 303 Cheonjam-ro, Wansan-gu, Jeonju 55069, Republic of Korea
Tel: +82-63-220-3081; Fax: +82-63-220-3264
E-mail: sorilove@jj.ac.kr
Received February 10, 2024; revised March 25, 2024; accepted May 4, 2024

강도가 좋아 각종 스낵, 빵, 라면류 등 유연포장의 인쇄용으로 쓰이며, 방습 처리 후 과채류 포장에도 사용한다(Shubhra et al., 2011). PE(폴리에틸렌, polyethylene)는 에틸렌(ethylene) 가스의 중합체이자 가장 먼저 상업화된 폴리 올레핀계 물질로, 저밀도 폴리에틸렌(LDPE, low density polyethylene), 고밀도 폴리에틸렌(HDPE, high density polyethylene), 선형 저밀도 폴리에틸렌(LLDPE, linear low density polyethylene), 초저밀도 폴리에틸렌(VLDPE, very low density polyethylene) 등이 사용되고 있다. PE의 화학구조식은 -CH-CH-CH-CH-로, 비중은 0.93-0.96이며, 수분차단성, 내화학성, 내한성, 기체 투과성이 높고 가격이 저렴하다. LDPE는 과채소류 및 냉동식품 포장에 주로 사용된다(Sara, 2017). PET (polyethylene terephthalate, 폴리에틸렌 테레프탈레이트)는 에틸렌글리콜(ethylene glycol)과 테레프탈산(terephthalic acid)의 축합 중합체이며, 화학식은 $(C_{10}H_8O_4)_n$ 으로 비중은 1.4이며, 기계적 강도가 높고, 투명성, 질감성, 치수 안정성, 내수성, 내화학성, 차단성이 우수한 포장재이다. 용융점이 높아 보일 인 백(boil-in-bag), 레토르트 파우치, 이중오븐용(dual ovenable), 다양한 용기의 뚜껑(lid)으로 쓰인다. 주로 탄산음료나 액체 식품용으로 쓰이는데, 무게가 가벼워 수송비용이 절감되며, 질겨서 잘 깨지지 않고, 고압의 탄산가스가 들어있어도 폭발하지 않으므로, 유리병 대신 사용되고 있다. PET 필름의 차단성을 더욱 증가시킨 폴리염화비닐리덴 코팅 필름은 보향성 및 산화 방지를 위해 가공육이나 치즈, 조미김 등의 포장에, 알루미늄을 진공 증착한 PET 필름은 스낵 및 포도주의 백 인 박스(bag-in-box) 형태의 포장에 사용된다(Park et al., 2000; Sin & Tuen, 2023).

광 펄스 기술은 식품에 열을 발생시키지 않고 포장된 상태로 식품을 살균할 수 있어 신선식품의 유통기한을 연장시킬 수 있는 비가열 가공기술이다. 광 펄스는 “intense pulsed light (IPL)”, “pulsed white light (WHL)”, “broad-spectrum white light” 등 여러 가지 이름으로 불리며, 햇빛과 유사한 범위인 UV (ultraviolet)부터 근적외선(near infrared)까지 넓은 범위의 빛을 짧은 시간 동안 강하게 조사하여 식품의 표면에 존재하는 미생물을 사멸시킴으로써 식품의 유통 및 보존기간을 늘리는 기술이다. 광 펄스 기술은 자외선 UV 영역 뿐 아니라 근적외선 NIR 영역까지 포함한다는 점에서 기존의 UV 살균과는 구별된다(Chung, 2011). 광펄스 기술은 채소, 과일 등의 신선식품이나 향신료와 같은 분말식품, 유아식, 액상식품, 육류 및 해산물 등 고체 식품, 투명한 반고체식품 등에 적용하는 연구가 이루어지고 있다(Kim et al., 2013a, b). 감마선이나 전자선 등의 방사선과 비교하였을 때 광 펄스 기술의 살균력은 상대적으로 약하지만, 소비자들이 느끼는 심리적 거부감이 적다는 장점이 있다(Allende et al., 2006; Kim et al., 2010). 광 펄스 기술에서는 광원의 특성에 따라 빛의 세기, 파장대, pulse의 수, 처리시간, 시료와 광원 사이의 거리가 주요 인자이며, 처리할 식품의 종류

와 포장재, 미생물의 특성, 액체식품의 경우 투과도와 선택을 고려해야 한다. 살균하려는 대상 식품의 면적과 크기에 따라 lamp의 개수와 배치, pulse의 주기가 달라진다(Barbosa-Cánovas et al., 2011). 광 펄스 살균 처리 시에는 펄스(pulse)가 0.1-50 J/cm 범위의 에너지 밀도(energy density)를 가지며, 1 μ s-0.1 s의 간격의 flash 형태로 조사하게 되는데, 강한 빛을 아주 짧은 시간에 식품에 가하여, 식품 표면의 미생물을 살균하거나 불활성화시킴으로써, 식품 내 유해미생물 수를 감소시키고 식품의 유통기한을 연장하며 품질을 높이기 위한 목적으로 사용한다(Chung, 2011; Park, 2017).

광 펄스 살균 장치를 구성할 때에는 축전기(capacitor)로부터 얼마나 빠르고 고강도로 증폭된 빛 또는 전기 에너지를 만들어 내는가가 최우선되며, 이렇게 만들어진 빛 또는 전기 에너지를, 식품의 품질 열화를 최소화하는 범위 내에서 식품에 얼마나 효과적으로 전달할 수 있게 하는가가 중요하다(Shin et al., 2010). 이때 광 펄스 처리 시에는 식품의 2차 오염 방지를 위해 광원과 식품 사이에 투명성을 띤 중간체가 위치하게 된다. 빛이 식품에 도달하여야 하기 때문에 광 펄스 처리 시 광원과 식품 사이에는 식품을 담는 처리용기(chamber) 또는 포장 필름(packaging film)의 재질에 따른 투과 특성이 충분히 고려되어야 한다. 하지만 아직까지 광 펄스 처리 시 사용되는 처리 용기 및 포장 재질에 대한 국내의 연구는 현재까지 미비한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 광펄스의 처리 시 사용되는 포장지의 재질에 따른 대장균의 살균효과에 대한 연구를 통해 광펄스 살균 공정의 산업화를 위한 기초 자료를 확보하고자 하였다.

재료 및 방법

사용균주 및 배양조건

실험에 사용된 미생물은 *Escherichia coli* (ATCC 10538)로 한국중균협회 부설 미생물보존센터(Korean Culture Center of Microorganism, Seoul, Korea)로부터 분양받아 사용하였다. 분양받은 *E. coli*는 단일 colony를 취한 후 tryptic soy agar (TSA, Difco Laboratories, Detroit, MI, USA)에 계대배양하여 4°C의 온도에서 보관하면서 사용하였다. 광펄스 살균에 사용할 시료는 계대배양 된 *E. coli*를 1-2 colony를 분리하여 200 mL의 tryptic soy broth (TSB, Difco Laboratories) 액체배지를 담은 삼각플라스크에 접종하고 37°C에서 12시간 전배양하였으며, 배양한 균액을 새로운 배양액에 1% 접종하여 대수증식기 후반(10 h)까지 배양하여 실험에 사용하였다. 이때 최종 균체 농도는 약 10^8 CFU/mL 수준이었으며, 본 실험에 사용된 모든 시료는 동일한 방법으로 매번 새롭게 배양하여 사용하였다.

포장 재질

광펄스 처리 시 포장 재질에 따른 대장균의 살균 효과를

연구하기 위한 포장 재질의 선택은 전주시 완산구 소재의 대형마트 3곳에서 유통되고 있는 과채류에 사용되는 포장용 투명 플라스틱 필름 43종에 대하여 사전 조사한 후, 가장 많이 쓰이고 있는 포장 필름 재질인 PE (polyethylene), PP (polypropylene), PET (polyethylene terephthalate)와 스낵류, 빵류, 라면류에 널리 사용되는 OPP (oriented polypropylene)의 4종의 포장 재질을 선택하였다. 포장 재질은 서울 청계천 소재의 방산시장(Bangsan market, Seoul, Korea)에서 구입하여 150 mm width × 150 mm height × 30-120 μm thickness 규격으로 잘라 사용하였다. 시중에서 유통되고 있는 포장 두께에 따라 PP, PE는 30, 40, 50, 70 μm 두께의 필름을 구입하였고, OPP는 30, 40 μm, PET는 100, 120 μm 두께의 필름을 구입하여 사용하였다.

광펄스 처리 장치 및 처리 조건

본 연구에 사용된 광펄스 처리 장치는 Park & Shin (2021)

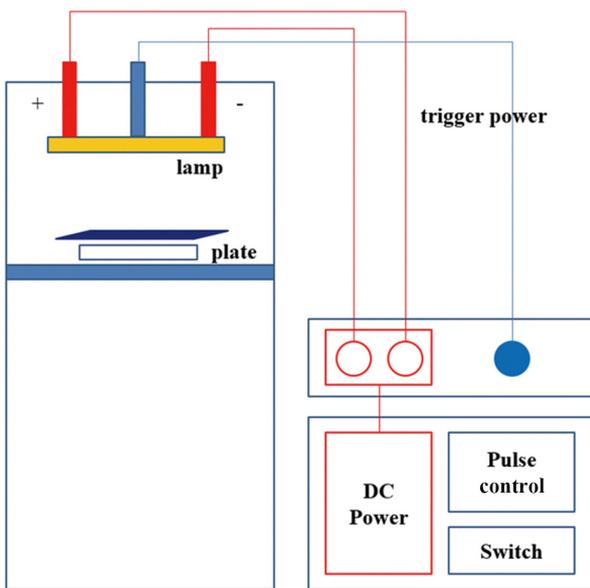


Fig. 1. Schematic diagram and photography of the intense pulsed light treatment system.

이 사용한 것과 같은 장치(Fig. 1)로 전원 공급부, 펄스발생기, 광원과 처리용기로 구성되어 있다. 전원장치에서 발생 가능한 펄스 수는 1-50 pps (pulse per second)이고, 1회에 작동할 수 있는 최대 시간은 60분이다. 광원은 무수은 제논 가스로 충전 되어 있는 석영 재질의 제논램프(Heraeus Noblelight XAP series lamp NL4006, Heraeus Noblelight, Cambridge, UK)를 사용하였다. 광원에서 발생하는 빛의 세기는 광원에 인가되는 전압의 세기를 기준으로 하였다. 포장 재질 살균을 측정 실험에서는 *E. coli*를 도말한 평판배양 접시 위에 PE, PP, OPP 및 PET를 덮은 후 광펄스 처리를 하였다. 광펄스 처리 조건은 전압 1,000 V (10 kW), 펄스 수 5 pps, 램프와 시료 사이의 거리는 1.5 cm로 하였고, 처리 시간은 0-360초 사이였다.

빛의 투과율 측정

광펄스 처리 시 빛이 투과되는 양(광도)을 측정하기 위해 *E. coli* 살균 실험과 동일한 처리 조건인 전압 1,000 V, 펄스 수 5 pps, 램프와의 거리 1.5 cm에서 파장별 광도방사량을 측정하였다. 방사량계(HD 2012.2, Delta Ohm, Padua, Italy)의 광량 측정 센서 위에 서로 다른 재질의 포장필름(PP, PE, OPP, PET)을 덮고 살균 실험과 같은 조건에서 광펄스 처리 시 파장별 광 투과량을 측정하였다. 센서별 파장은 UV-A (220-280 nm), UV-B (280-315 nm), UV-C (315-400 nm), RAD (400-1,050 nm)였으며, 모든 측정은 3회 반복하여 평균값을 나타내었다.

생균수의 측정

E. coli 배양액을 4,000 rpm으로 10분간 원심분리(Gyro 406G, Gyrozen, Daejeon, Korea)하여 멸균생리식염수(NaCl 0.85%)로 2회 세척한 후, 균일하게 재현탁하여 사용하였다. 재현탁한 배양액을 단계적으로 희석하여 0.1 mL씩 tryptic soy agar (Difco Laboratories) 평판 고체배지에 도말하여 광펄스 시스템의 제논램프 하단에 놓고 그 위에 두께별 포장 필름(PP, PE, OPP, PET)을 덮은 후 광펄스 처리를 하였다. 광펄스 처리 후 36°C에서 24-48시간 배양하여 평판 배지에 형성된 균락(colony)수를 계수하여 CFU/mL으로 나타내었다. 균락수는 30-300개 사이의 것을 계수하였다. 미생물의 사멸율은 초기균수(N_0)에 대한 처리 후 생균수(N)의 비율(N/N_0)을 계산하여 로그 축에 표시하였으며, 시료당 3회 반복 실험하여 측정하였다.

Kinetic 분석

광펄스 살균 패턴을 살펴보기 위해 식(1)과 같이 1차 반응에 의거하여 해석하고 살균곡선의 기울기로부터 사멸속도상수(k)를 구하였으며, 식(2)에 의해 D 값(D-value, decimal reduction time)을 산출하였다(Chun et al., 2002; Mok & Jeon, 2012). 그리고 대조구와는 달리 포장재질에 따라서 tailing에

의한 biphasic의 살균 형태를 보이는 구간을 나누어 사멸속도상수(k_1 , k_2)와 D 값(D_1 , D_2)을 개별적으로 산출하였다.

$$\ln\left(\frac{N}{N_0}\right) = -k \cdot t \quad (1)$$

$$D = \frac{2.303}{k} \quad (2)$$

여기서 N_0 : 초기균수, N : 광펄스 처리 후 균수, k : 사멸속도상수(s^{-1}), t : 처리시간(s), D : decimal reduction time (s)을 말한다.

통계분석

처리 조건에 따라 측정된 광도방사량 값의 유의성을 검정하기 위해 Duncan의 다중 범위검정(Duncan's multiple range test)을 실행하여 나타내었다. 모든 통계분석의 유의 수준은 95%였으며, 실험 데이터는 3회씩 반복하여 측정하였다. 통계분석은 SPSS Version 21.0 package program (SPSS INC., Chicago, IL, USA)을 이용하여 처리하였다.

결과 및 고찰

포장 재질에 따른 빛의 투과율

포장 재질에 따른 광펄스 처리 시 빛의 투과량을 측정하여 Table 1에 나타내었다. 광펄스 처리 시 UV-C의 빛 투과율은 PP가 가장 높았고 그 다음으로 OPP와 PE가 비슷한

값을 나타내었다. 먼저 제논 램프의 광 방사량을 측정할 때 조구의 경우, UV-C의 광 방사량은 3.595 W/m^2 이었고, PP의 UV-C 투과량은 두께 $30 \mu\text{m}$ 에서는 $3.258 \pm 0.014 \text{ W/m}^2$, $40 \mu\text{m}$ 는 $3.147 \pm 0.024 \text{ W/m}^2$, $50 \mu\text{m}$ 와 $70 \mu\text{m}$ 는 각각 $3.110 \pm 0.026 \text{ W/m}^2$, $3.003 \pm 0.047 \text{ W/m}^2$ 으로 필름 두께에 따른 빛의 투과량에 큰 차이는 없었으나 포장 재질의 두께가 두꺼워짐에 따라 투과량이 적어지는 경향을 보였다. PE의 경우에도 UV-C의 투과량은 $30 \mu\text{m}$ 에서는 3.193 W/m^2 , $40 \mu\text{m}$ 는 3.163 W/m^2 , 그리고 $50 \mu\text{m}$ 와 $70 \mu\text{m}$ 는 각각 3.108 W/m^2 , 3.003 W/m^2 로 PP보다는 빛의 투과량이 다소 낮으나 포장 재질 두께에 따른 빛의 투과량에는 큰 차이를 보이지는 않았으며 두께가 증가함에 따라 투과량이 낮아지는 경향을 나타내었다. OPP의 UV-C 투과량은 $30 \mu\text{m}$ 에서는 3.200 W/m^2 , $40 \mu\text{m}$ 는 3.168 W/m^2 로 나타나 PE나 PP와 같은 경향을 보였다. PET는 필름의 두께가 PP, PE, OPP들 보다 두꺼운 이유로 UV-C의 투과량이 매우 낮아 $100 \mu\text{m}$ 에서는 0.065 W/m^2 , $200 \mu\text{m}$ 에서는 0.057 W/m^2 의 값을 보였다. 전체적으로 모든 필름에서 두께가 증가함에 따라 UV-C의 투과율은 비례하여 감소하였다. UV-A와 RAD 파장도 포장 필름의 재질이나 두께와 상관없이 두께가 증가함에 따라 투과율은 낮아지는 경향을 보였다. 각 포장 필름 재질의 가장 얇은 두께를 기준으로 UV-C의 투과율을 백분율(%)로 나타내면 PP, OPP, PE는 각각 91.3%, 89.7%, 89.5%였으며, PET는 1.8%로 나타나 필름의 재질과 두께에 따른 살균율이 다르게 나타날 것으로 예상되었다.

Table 1. Energy density of transmitted light as packaging films by intense pulsed light treatment

(unit: W/m^2)

| Wave Length | | UV-C (220-280 nm) | UV-B (280-315 nm) | UV-A (315-400 nm) | RAD (400-1,050 nm) | |
|--------------------------------|-----|----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Packaging film materials | PE | Control | 3.567 ± 0.004^{1a} | 4.054 ± 0.022^a | 1.659 ± 0.005^{ab} | 2.453 ± 0.014^a |
| | | $30 \mu\text{m}$ | 3.193 ± 0.016^b | 4.022 ± 0.038^{ab} | 1.661 ± 0.010^{ab} | 2.456 ± 0.005^a |
| | | $40 \mu\text{m}$ | 3.163 ± 0.031^{bc} | 3.995 ± 0.021^{ab} | 1.663 ± 0.006^{ab} | 2.455 ± 0.017^a |
| | | $50 \mu\text{m}$ | 3.108 ± 0.047^c | 3.984 ± 0.036^b | 1.654 ± 0.004^a | 2.455 ± 0.022^a |
| | | $70 \mu\text{m}$ | 2.947 ± 0.052^d | 4.019 ± 0.044^{ab} | 1.667 ± 0.006^b | 2.476 ± 0.013^a |
| | PP | Control | 3.567 ± 0.004^a | 4.054 ± 0.022^a | 1.659 ± 0.005^a | 2.453 ± 0.014^{ab} |
| | | $30 \mu\text{m}$ | 3.258 ± 0.014^b | 3.990 ± 0.024^b | 1.652 ± 0.038^a | 2.478 ± 0.017^a |
| | | $40 \mu\text{m}$ | 3.147 ± 0.024^c | 4.028 ± 0.033^{ab} | 1.657 ± 0.008^a | 2.458 ± 0.008^{ab} |
| | | $50 \mu\text{m}$ | 3.110 ± 0.026^c | 4.018 ± 0.021^{ab} | 1.665 ± 0.004^a | 2.470 ± 0.016^a |
| | | $70 \mu\text{m}$ | 3.003 ± 0.047^d | 4.015 ± 0.044^{ab} | 1.661 ± 0.006^a | 2.440 ± 0.013^b |
| | OPP | Control | 3.567 ± 0.004^a | 4.054 ± 0.022^a | 1.659 ± 0.005^{ab} | 2.453 ± 0.014^a |
| | | $30 \mu\text{m}$ | 3.200 ± 0.031^b | 4.015 ± 0.025^a | 1.662 ± 0.004^a | 2.455 ± 0.015^a |
| | | $40 \mu\text{m}$ | 3.168 ± 0.037^b | 4.006 ± 0.024^a | 1.652 ± 0.002^b | 2.471 ± 0.013^a |
| | PET | Control | 3.567 ± 0.004^a | 4.054 ± 0.022^a | 1.659 ± 0.005^a | 2.453 ± 0.014^a |
| | | $100 \mu\text{m}$ | 0.065 ± 0.001^b | 0.651 ± 0.010^b | 1.650 ± 0.005^{ab} | 2.446 ± 0.010^a |
| | | $200 \mu\text{m}$ | 0.057 ± 0.002^c | 0.517 ± 0.010^c | 1.648 ± 0.004^b | 2.444 ± 0.008^a |

¹⁾Mean±SD

^{a-d)}Means are significantly within the same column at $p < 0.05$ by Duncan's multiple range test.

Treatment condition: 1,000 V, 5 pps, distance: 1.5 cm

포장 재질에 따른 살균 효과

광펄스 처리 시 사용되는 포장 재질에 따른 살균 효과를 그래프로 나타내었다(Fig. 2). 실험에 사용한 *E. coli*의 초기 균수는 10^8 CFU/mL이었고, 대조구의 경우 광펄스 처리 후 30초 이내에 모두 사멸하였다. PP 30 μm 의 경우, 20초 처리 시 6 log 정도의 사멸 효과를 보였으며, 60초 처리 후에는 모든 균이 사멸하였다(Fig. 2A). OPP, PE 30 μm 의 경우, 30초 처리 시 6 log, 60초 처리 시 모든 균이 사멸하였다. PP, OPP, PE 포장 필름의 경우, 광 펄스 처리 시 필름의 두께가 30, 40, 50, 70 μm 로 늘어남에 따른 *E. coli*의 사멸율에 큰 차이가 없었으나, 두께가 증가함에 따라 점차 감소하는 경향을 보였다(Figs. 2A-2C). PET 포장 필름은 1 log 사멸효과를

얻기 위해 PET 100 μm 는 180초, PET 120 μm 는 210초가 필요했다. 다른 포장 필름과 비슷한 수준의 사멸효과를 얻기 위해서 처리 시간을 15% 가량 늘려야 하기 때문에 광펄스 처리 시 PET 포장 필름의 두께는 *E. coli*의 사멸율에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 그리고 PET 포장 필름의 경우 300초 동안 처리 시에도 100, 120 μm 두께의 필름 모두 살균 효과는 1.5 log 내외로 가장 낮았다(Fig. 2D).

포장필름 재질별 *E. coli*의 살균 효과를 비교하기 위해 두께가 가장 얇은 PP, PE, OPP 포장 필름 30 μm 와 PET 포장 필름 100 μm 사멸율을 비교하여 그래프로 나타냈다(Fig. 3). 가장 살균 효과가 높은 포장 필름은 PP로 6 log의 사멸 효과를 나타냈고 처리 시간은 20초였다. 다음으로 살균 효

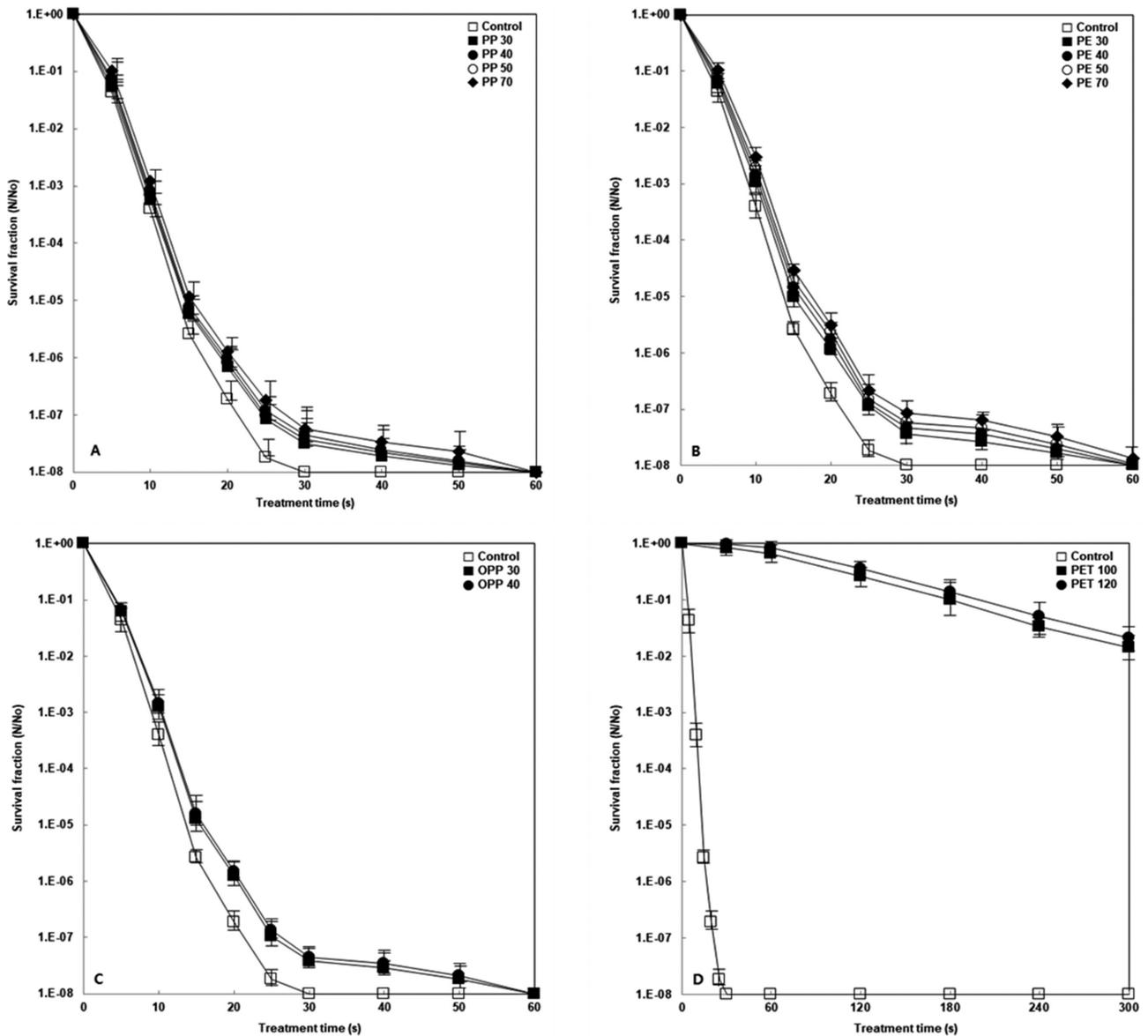


Fig. 2. Effect of inactivation on *E. coli* as packaging films (PP (A), PE (B), OPP (C), and PET (D)) and thickness (30-120 μm) by intense pulsed light treatment. Treatment condition: 1,000 V, 5 pps, distance: 1.5 cm.

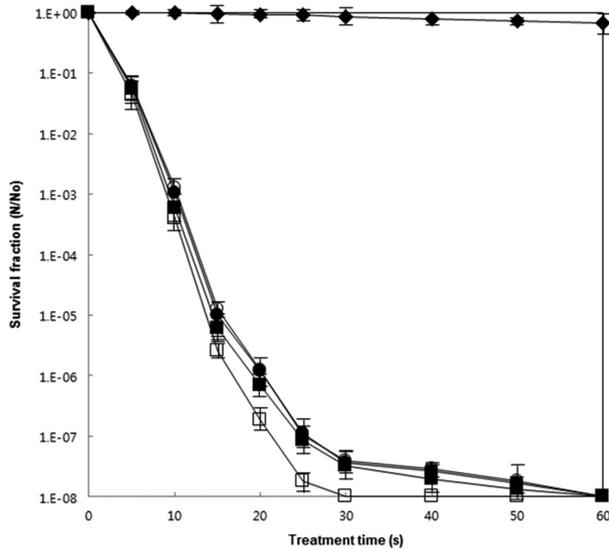


Fig. 3. Inactivation of *E. coli* as treatment time by intense pulsed light with various packaging films. (□) Control, (■) PP 30 μm, (●) PE 30 μm, (○) OPP 30 μm, (◆) PET 100 μm. Treatment condition: 1000 V, 5 pps, distance: 1.5 cm.

과가 있었던 OPP, PE 포장 필름은 30초간 처리하였다. PP, OPP, PE 포장 필름은 60초 동안 광 펄스 처리 시 *E. coli*가 모두 사멸하였으나, PET 포장 필름은 60초 처리 후에도 사멸 효과가 0.2 log로 가장 낮았다.

Kinetic 분석

광펄스 처리 시 포장 재질에 따른 살균 패턴을 알아보기 위해 사멸속도 상수 k 값과 균이 90 % 사멸하는데 필요

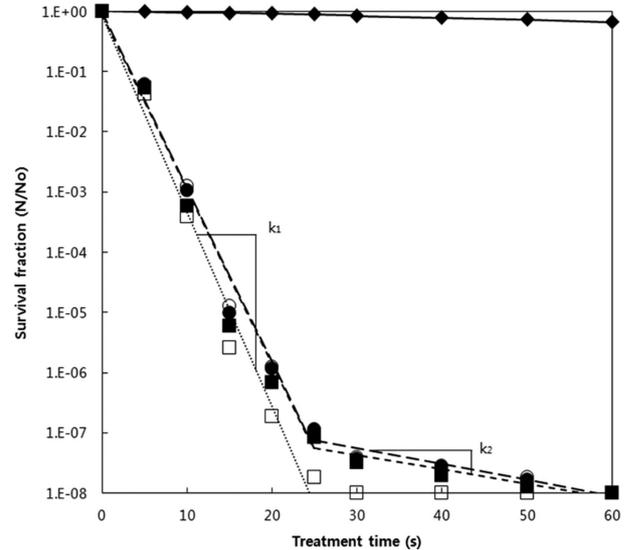


Fig. 4. Inactivation kinetics of *E. coli* cells by intense pulsed light treatment as treatment time at various packaging films. (□) Control, (■) PP 30 μm, (●) PE 30 μm, (○) OPP 30 μm, (◆) PET 100 μm. Treatment condition: 1000 V, 5 pps, distance: 1.5 cm.

한 시간인 D 값을 계산하여 Table 2과 Fig. 4으로 나타내었다. 먼저 대조구의 k_1 값은 0.329 s^{-1} 이었으며, D_1 은 7.00초였다. 포장 필름 재질에 따른 *E. coli* 살균실험에서 사멸속도는 PP가 가장 빨랐고 PE, OPP가 그 PP와 거의 유사하지만 비슷했고, PET는 가장 느렸다. 특히 PP의 경우, k 값과 D 값이 대조구와 매우 유사하여 사멸속도가 가장 빠른 것으로 나타났다. PP의 k_1 값은 PP 30 μm에서 0.303 s^{-1} , PP 40 μm에

Table 2. Inactivation rate constants and decimal reduction times of *E. coli* by intense pulsed light treatment with various packaging films

| | | Inactivation rate constants (s^{-1}) | | Decimal reduction times (s) | | |
|--------------------------|-----|---|-------|-----------------------------|-------|-------|
| | | k_1 | k_2 | D_1 | D_2 | |
| Control | | 0.329 | - | 7.00 | - | |
| Packaging film materials | PP | 30 μm | 0.303 | 0.024 | 7.60 | 96.0 |
| | | 40 μm | 0.300 | 0.026 | 7.68 | 88.6 |
| | | 50 μm | 0.296 | 0.028 | 7.78 | 82.3 |
| | | 70 μm | 0.287 | 0.031 | 8.02 | 74.3 |
| | PE | 30 μm | 0.293 | 0.026 | 7.86 | 88.6 |
| | | 40 μm | 0.287 | 0.028 | 8.02 | 82.3 |
| | | 50 μm | 0.281 | 0.029 | 8.20 | 79.4 |
| | | 70 μm | 0.273 | 0.031 | 8.44 | 74.3 |
| | OPP | 30 μm | 0.292 | 0.026 | 7.89 | 88.6 |
| | | 40 μm | 0.287 | 0.028 | 8.02 | 82.3 |
| | PET | 100 μm | 0.018 | 0.003 | 127.9 | 767.7 |
| | | 120 μm | 0.014 | 0.003 | 164.5 | 767.7 |

Treatment condition : 1000 V, 5 pps, distance : 1.5 cm

서 0.300 s^{-1} , PP 50 μm 에서 0.296 s^{-1} , PP 70 μm 에서는 0.287 s^{-1} 였고, PP의 D_1 값은 PP 30 μm 에서 7.60초, PP 40 μm 에서 7.68초, PP 50 μm 에서 7.78초, PP 70 μm 에서 8.02초였다. PP의 k_2 값은 PP 30 μm 에서 0.024 s^{-1} , PP 40 μm 에서 0.026 s^{-1} , PP 50 μm 에서 0.028 s^{-1} , PP 70 μm 에서 0.031 s^{-1} 이었고, PP의 D_2 값은 PP 30 μm 에서 96초, PP 40 μm 에서 88.6초, PP 50 μm 에서 82.3초, PP 70 μm 에서 74.3초로 나타났다. PP 필름의 두께가 늘어남에 따른 사멸속도의 차이가 거의 없었고, k 값과 D 값 모두 대조구와 매우 유사한 것으로 나타났다. PE의 k_1 값은 PE 30 μm 에서 0.293 s^{-1} , PE 40 μm 에서 0.287 s^{-1} , PE 50 μm 에서 0.281 s^{-1} , PE 70 μm 에서는 0.273 s^{-1} 였고, PE의 D_1 값은 PE 30 μm 에서 7.86초, PE 40 μm 에서 8.02초, PE 50 μm 에서 8.20초, PE 70 μm 에서 8.44초였다. PE의 k_2 값은 PE 30 μm 에서 0.026 s^{-1} , PE 40 μm 에서 0.028 s^{-1} , PE 50 μm 에서 0.029 s^{-1} , PE 70 μm 에서 0.031 s^{-1} 이었고, PE의 D_2 값은 PE 30 μm 에서 88.6초, PE 40 μm 에서 82.3초, PE 50 μm 에서 79.4초, PE 70 μm 에서 74.3초로 나타났다. PE 필름의 두께가 늘어나더라도 사멸속도의 차이는 거의 없었고, k 값과 D 값 모두 PP 다음 순으로 대조구와 유사한 것으로 나타났다. OPP의 k_1 값은 OPP 30 μm 에서 0.292 s^{-1} , OPP 40 μm 에서 0.287 s^{-1} 였고, OPP의 D_1 값은 OPP 30 μm 에서 7.89초, OPP 40 μm 에서 8.02초로 나타났다. OPP의 k_2 값은 OPP 30 μm 에서 0.026 s^{-1} , OPP 40 μm 에서 0.028 s^{-1} 이었고, OPP의 D_2 값은 OPP 30 μm 에서 88.6초, OPP 40 μm 에서 82.3초로 나타났다. OPP의 경우, 필름의 두께가 늘어남에 따른 사멸속도의 차이가 거의 없었고, k 값과 D 값, 사멸속도가 PE와 전반적으로 일치하는 것으로 나타났다. PET의 k_1 값은 PET 100 μm 에서 0.018 s^{-1} , PET 120 μm 일 때 0.014 s^{-1} 였고, k_2 값은 100 μm , 120 μm 모두 0.003 s^{-1} 으로 측정되었다. PET의 D_1 값은 PET 100 μm 에서 127.9초였고, PET 120 μm 에서 164.5초로, D_2 값은 100, 120 μm 모두 767.7초로 나타나 다른 포장 필름 재질에 비해 광펄스 처리 시 살균 속도가 가장 느렸다.

광펄스 처리 시 포장 필름 재질에 따른 빛 투과율과 *E. coli*의 살균효과는 PP가 가장 높았고, 그리고 다음 순으로 유사하게 PE, OPP가 높았으며, PET는 매우 낮았다. 따라서 광펄스 처리 시 식품의 포장필름 재질로는 PP, PE, OPP가 적합하며, PET는 적합하지 않다고 판단된다. 광펄스의 산업적 적용 시 식품의 종류와 특성에 알맞은 포장 필름으로 PP, PE, OPP를 활용할 수 있으며 포장 필름의 선택지가 있는 것이 광펄스 시스템의 실용화에 있어서 큰 장점이 될 것으로 생각된다. 또한, 현재 시중의 Fresh cut 과일 및 샐러드에 주로 사용되는 PET 재질은 실험 결과 광펄스 처리 시 포장재질로 적합하지 않으므로 식품을 먼저 PP, PE, OPP 필름으로 내포장하여 광펄스 처리한 후 PET 용기에 넣어 외포장하는 방법이 적절한 것으로 판단된다. 소비자는 PET 용기를 통해 식품 섭취 시 편익을 얻고, 산업체와 판매처는 광

펄스 살균 효과를 통해 식품의 유통기한 증가와 신선도 저하로 인해 발생하던 기존의 폐기비용을 감소하는 이점이 있을 것으로 생각한다.

요 약

본 연구에서는 포장 필름의 재질에 따른 광펄스의 살균 효과에 대해서 알아보았다. 포장 필름의 재질에 따른 UV-C의 광량은 대조구는 3.595 W/m^2 이었으며, PP, PE, OPP의 가장 얇은 두께인 30 μm 에서 PP는 3.258 W/m^2 , PE는 3.193 W/m^2 , 그리고 OPP는 3.200 W/m^2 였으며, PET는 가장 얇은 두께인 100 μm 에서 0.065 W/m^2 로 매우 낮았다. 빛의 투과율은 PP는 91.3%, PE는 89.7%, OPP는 89.5%로 유사했고 PET는 1.8%로 다른 필름 재질보다 낮았다. 포장 필름 재질에 따른 살균 효과는 PP의 *E. coli* 살균 효과가 가장 높았고, 다음으로 PE와 OPP가 유사하게 높았으며, PET는 살균 효과가 가장 낮게 나타났다. PP 30 μm 의 경우, 20초 동안 광펄스 처리 시 6.2 log의 사멸 효과를 보였으며, 60초 처리 후에는 모든 균이 사멸하였다. PE, OPP의 경우 30 μm 의 두께에서 30초 동안 광펄스 처리 시 *E. coli*에 대해 5.9 log의 사멸 효과를 보였고, 60초 후에는 모든 균이 사멸하였다. PP, PE, OPP의 경우 필름의 두께에 따른 사멸율에는 거의 차이가 없었으나 두께가 증가함에 따라 점차 감소하는 경향을 보였다. PET는 1 log의 사멸 효과를 위해서 100 μm 는 180초, 120 μm 는 210초 동안 광펄스 처리 시간이 필요한 것으로 나타나 PET 필름의 두께가 *E. coli*의 사멸율에 영향을 미치는 것으로 생각되며 300초 동안 처리해도 살균 효과가 1.5 log 내외로 포장 필름 중 가장 낮았다.

감사의 글

본 연구는 농림축산식품부의 재원으로 농림식품기술기획평가원의 고부가가치식품 기술개발사업(신선 밀키트 품질 안정화를 위한 고전압 기반 비가열 처리 장치 개발 및 산업화)의 지원을 받아 연구되었습니다(322018-4).

References

- Allende A, McEvoy JL, Luo Y, Artes F, Wang CY. 2006. Effectiveness of two-sided UV-C treatments in inhibiting natural microflora and extending the shelf-life of minimally processed 'red oak leaf' lettuce. *Food Microbiol.* 23: 241-249.
- Barbosa-Cánovas GV, Schaffner DW, Pierson MD, Zhang QH. 2011. Pulsed light technology. *J. Food Sci. Suppl.* 82-85.
- Cho SD, Youn SJ, Kim DM, Kim GH. 2007. Quality evaluation of fresh-cut market products by season, *J. Korean Food & Nutr.* 20: 295-303.
- Chun JK, Kim KH, Mok C, Lee SJ, Kwon YA. 2002. Food

- engineering. McGraw-Hill Korea, Seoul, Korea pp. 114-115.
- Chung MS. 2011. Intense pulsed light sterilization in food industry. Korean J. Safe Food 6: 11-16.
- Jo MJ, Jeong AR, Kim HJ, Lee NR, Oh SW, Kim YJ, Chun HS, Koo MS. 2011. Microbiological quality of fresh-cut produce and organic vegetables. Korean J. Food Sci. Technol. 43: 91-97.
- Kang TM, Cho SK, Park JY, Song KB, Chung MS, Park JH. 2011. Analysis of microbial contamination of sprouts and fresh-cut salads in a market. Korean J. Food Sci. Technol. 43: 490-49.
- Kim BR, Kim AJ, Hong HJ, Shin JK. 2013a. Sterilization of yeast isolated from makgeolli by intense pulsed light treatment in bath system. Korean Food Eng. Prog. 17: 159-164.
- Kim BR, Kim AJ, Shin JK. 2013b. Effect of sterilization by intense pulsed light on radiation-resistant bacterium, *Micrococcus roseus*. Korean J. Food Sci. Technol. 45: 248-251.
- Kim DS, Song SK, Park YS. 2010. A comparison of single disinfection Process for Inactivation of *E. coli*. KSBB J. 25: 25-32.
- Lee J, Yoon HS, Yoon HH. 2017. Effect of TV restaurant review program attributes on food service consumer's empathy, attitude, and visit intentions. J. East Asian Soc. Diet Life 27: 204-214.
- Mok CK, Jeon HJ. 2012. Reduction of microorganisms in red pepper powder by low pressure discharge plasma. Food Eng. Prog. 16: 107-112.
- Oh SY. 2013. Food consumption expenditure situation in Korean households. Bulletin of Food Technol. 26: 118-124.
- Park JA. 2017. Effect of sterilization as chamber and packaging film materials by intense pulsed light. MS thesis, Jeonju Univ. Jeonju, Korea.
- Park JA, Shin JK. 2021. Effect of inactivation on *Escherichia coli* as panel materials of treatment chamber used in intense pulsed light treatment. Food Eng. Prog. 25: 241-247.
- Park JH, You SY. 2016. Analysis of food consumption behavior and dietary satisfaction in Korean households and single household. Korean J. Agr. Economics 57: 103-138.
- Park MH, Lee DS, Lee GH. 2000. Food packaging. Hyungseol. Seoul, Korea pp. 76-102.
- Sara R. 2017. Polyethylene. pp. 247-278. In: Brydson's Plastics Materials. Gilbert M (ed). Elsevier, Amsterdam, Netherland.
- Shin JK, Kim BR, Kim AJ. 2010. Nonthermal food processing technology using electric power. Food Sci. Ind. 43: 21-34.
- Shubhra QTH, Alam AKMM, Quaiyyum MA. 2011. Mechanical properties of polypropylene composites: A review. Sage J. 26: 362-391.
- Sin LT, Tueen BS. 2023. Plastics and environmental sustainability issues. pp. 1-43. In: Plastic and Sustainability. Sin LT and Tueen BS (eds). Elsevier, Amsterdam, Netherland.
- Song HJ, Chang YJ, Park SJ, Choi JC, Han JJ. 2017. Analytical survey on the package source, components, and various characteristics of processed foods in Korea. Korean J. Packag. Sci. Tech. 23: 173-181.

Author Information

이경미: 전주대학교 조리·식품산업학과 박사수료

박주안: 전주대학교 조리·식품산업학과 석사졸업

신정규: 전주대학교 한식조리학과 교수