

광펄스 처리 용기의 재질에 따른 대장균의 사멸 효과

박주안 · 신정규^{1,2*}

(주)엄지식품, ¹전주대학교 스마트식품융합기술ICC, ²전주대학교 한식조리학과

Effect of Inactivation on *Escherichia coli* as Panel Materials of Treatment Chamber Used in Intense Pulsed Light Treatment

Juan Park and Jung-Kue Shin^{1,2*}

Umji Food Co.

¹Smart Food Convergence Technology ICC, Jeonju University

²Department of Korean Cuisine, Jeonju University

Abstract

In this study, the inactivation effect of intense pulsed light with the materials of the treatment chamber was investigated. The UV-C light amount of the light source of the control was 3.595 W/m². The UV-C light quantity of quartz with a thickness of 1 mm was 3.356 W/m², acrylic 0.878 W/m², and glass 0.06 W/m², and the light transmittance was 93.4% for quartz, 24.4 for acrylic, and 1.7% for glass. As for the bactericidal effect of the materials of the treatment chamber, quartz showed the same inactivation effect as the control regardless of material thickness. A 1 mm thick acrylic showed a lethal effect of 1.1 logs after 60 s and 5.0 logs after treatment for 180 s. As the thickness increased, the lethal effect was significantly reduced. Glass had no sterilization effect regardless of its thickness. All of the death curve patterns except for glass showed a bi-phasic form. For the death rate constant and D value, the k_1 was 0.287 s⁻¹, k_2 was 0.072 s⁻¹, D₁ value was 8.02 s, and D₂ value was 31.87 s. At a thickness of 1 mm, k_1 was 0.284 s⁻¹ and k_2 was 0.069 s⁻¹ for quartz, k_1 was 0.018 s⁻¹ and k_2 was 0.042 s⁻¹ for acrylic, and k was 0.004 s⁻¹ for glass. The D values were D₁=8.11 s, D₂=33.87 s for quartz, D₁=127.94s, D₂=54.83 s for acrylic, and D=575.75 s for glass.

Key words: intense pulsed light (IPL), *Escherichia coli*, microbial inactivation, chamber materials, quartz

서 론

고품질 식품에 대한 소비자들의 수요가 높아지면서 식품이 가지고 있는 천연의 색, 맛, 영양, 향, 조직감 등이 유지된 고품질 식품에 대한 요구도 높아지고 있다(Zhang et al., 2020). 국민 소득의 증대와 생활 수준의 향상은 식품의 구매에 있어서 안전성이 중요한 요인이 되었으며, 식품안전관리인증(HACCP), 농산물 우수관리인증(GAP), 유전자변형식품(GMO) 표시제도, 친환경농산물품질 인증 등 식품 품질과 안전을 확보하고자 하는 노력도 함께 진행되고 있다. 식품업계에서는 소비자들의 요구에 따라 생산에서 유통, 소비자에게 이르기까지 안전하고 믿을 수 있는 식품을 생산할 수 있는 방법의 개발에 노력하고 있다(Park &

You, 2016). 따라서 식품의 품질 저하를 최소화하면서 안전하게 저장기간을 연장시키고 열처리에 따른 에너지 소비량도 현저히 줄일 수 있는 비가열 가공 기술(nonthermal processing)이 활발히 연구되고 있다(Shin et al., 2010). 기존 가열살균의 대안으로 제시되고 있는 비가열 가공기술에는 물리적인 방법으로는 초고압(high hydrostatic pressure, HHP), 고전압 펄스 전기장(high voltage pulsed electric field, PEF), 비가열 플라즈마(nonthermal plasma, NTP), 광펄스(high voltage intense pulsed light, IPL) 등이 있다. 이러한 비가열 가공 기술로 식품을 처리할 경우 온도의 상승이 적고, 처리 시간이 짧고, 연속 처리가 가능하며, 이산화탄소의 발생에 에너지의 소모를 줄일 수 있는 장점이 있다. 그러나 비가열 살균 기술은 대부분 하나의 가공 공정으로는 열처리 공정에 준하는 안전성을 확보하기 어려워 병합처리를 통해 향상된 효과를 얻는 연구가 진행되고 있기도 하다(Allende et al., 2007; Kim et al., 2010).

광펄스 기술은 식품에 열을 발생시키지 않고 포장된 상태로 식품을 살균할 수 있어 신선식품의 유통기한을 연장시킬 수 있는 비가열 가공 기술이다. 광펄스는 햇빛과 유

*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 3 August 2021; revised 17 August 2021; accepted 18 August 2021

사한 범위인 UV (ultraviolet)부터 근적외선(near infrared)까지 넓은 범위의 빛을 짧은 시간 동안 강하게 조사하여 식품의 표면에 존재하는 미생물을 사멸시킴으로서 식품의 유통 및 보존기간을 늘리는 기술이다(Chung, 2011; Kim & Shin, 2015). 광펄스 기술은 채소, 과일 등의 신선식품이나 향신료와 같은 분말식품, 유아식, 액상식품, 육류 및 해산물 등 고체식품, 투명한 반고체식품 등에 적용하는 연구가 이루어지고 있다(Kim et al., 2013). 미국 등 일부 국가에서는 광펄스 기술을 포장재, 식품, 의약품 등 표면 살균에 실용화 및 대형 산업화를 추진하고 있으나 국내의 연구는 그리 활발하지 않다(Elmnasser et al., 2007). 광펄스 기술은 광원(빛)의 세기, 파장, 펄스의 수, 처리시간, 시료와 광원 사이의 거리가 주요 공정 요인이며, 처리할 식품의 종류와 식품 포장재, 미생물의 특성, 액체 식품의 경우 투과도와 색이 살균에 영향을 미친다(Shin et al., 2012).

광펄스 살균 시스템은 전원장치, 식품용으로 허가된 램프, 액체 식품 및 포장된 식품을 처리할 경우 포장재나 처리 용기와 빛을 차단할 수 있는 차폐 공간이 필요하다. 전원장치에서 공급된 전원이 램프에 인가되어 발생된 빛이 처리할 식품과 광원 사이의 매개체(처리용기 또는 포장재)를 투과하여 식품에 전달되게 된다. 따라서 광펄스 처리에 있어서 처리용기나 포장재의 재질의 투과특성이 충분히 고려되어야 한다. 하지만 아직까지 광펄스 처리시 사용되는 처리용기 및 포장재질에 대한 연구는 거의 없다.

본 연구에서는 광펄스 처리시 사용되는 처리 용기의 재질에 따른 빛의 투과도, 살균율에 대한 연구를 통해 광펄스 살균 시스템 구성과 산업화를 위한 기초 자료를 확보하고자 하였다.

재료 및 방법

사용균주 및 배양조건

실험에 사용된 *Escherichia coli* (ATCC10538)로 한국 중균협회 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 계대배양된 *E. coli*를 1-2 colony를 따서 200 mL의 tryptic soy broth (TSB, Difco Laboratories) 액체배지를 담은 삼각플라스크에 접종하고 37°C에서 12시간 전배양하였으며, 배양한 균액을 새로운 배양액에 1% 접종하여 대수증식기 후반(10시간)까지 배양하여 실험에 사용하였다. 이 때 최종 균체 농도는 약 10^8 CFU/mL 수준이었으며, 본 실험에 사용된 모든 시료는 동일한 방법으로 매번 새롭게 배양하여 사용하였다.

처리용기 재질

광펄스 처리 시 처리용기로 사용할 재질로는 빛의 투과가 가능하며 투명한 재질 중 처리용기의 형태로 가공이 가능한 재질 3종(석영, 아크릴, 유리)을 실험 재질로 선정하였다. 석영은 분광광도계 등에 쓰이는 셀(cell)이나 실험용 각종 분석기기에 널리 쓰이며, 광펄스 장치의 제논 램프에 사용되는 재질이기에 때문에 우선적으로 선정하였으며, 플라스틱 중에서 가장 투명성이 높으며 절단 및 성형이 가능한 투명한 아크릴 재질과 심리적·기능적 특성이 뛰어나고 일상적으로 쓰임이 다양하고 투명성이 좋아 주방 조리도구 및 식기류 등에 많이 쓰이는 유리 재질을 실험재질로 선정하였다. 실험에 사용된 처리용기 재질은 100 mm (W)×100 mm (H)×1-3 mm thickness 규격의 사각판 형태로 된 석영, 아크릴, 유리를 사용하였다. 석영(순도 99.9%)은 조이랩(Seoul, Korea), 아크릴(PMMA, PolyMethylMethacrylate, 순도 99%)은 미레이저스카시(Jeonju, Korea), 유리(soda-lime glass for container, 순도 74%)는 새한랩(Seoul, Korea)에서 구입하였다.

광펄스 처리 장치 및 처리 조건

연구에 사용된 광펄스 처리 장치는 Park (2016)이 사용한 것과 같은 장치로 전원공급부, 펄스발생기, 광원과 처리용기로 구성되어 있다(Fig. 1). 전원장치에서 발생 가능한 펄스 수는 1-50 pps이고, 1회에 작동할 수 있는 최대 시간은 60분이다. 광원은 무수은 제논 가스로 충전되어 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. 처리용기 재질별 살균율 측정 실험에서는 *E. coli*를 도말한 평판배양접시 위에 석영, 아크릴, 유리를 덮은 후 광펄스 처리를 하였다. 광펄스 처리 조건은 전압 1,000 V, 펄스 수 5 pps (pulse with 10 μ m), 램프와 시료 사이의 거리는 1.5 cm로 하였고, 처리 시간은 0-360초 사이였다.

빛의 투과율 측정

광펄스 처리시 빛이 투과되는 양(광도)을 측정하기 위해 *E. coli* 살균 실험과 동일한 처리조건인 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 투명판(quartz, acryl, glass)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.

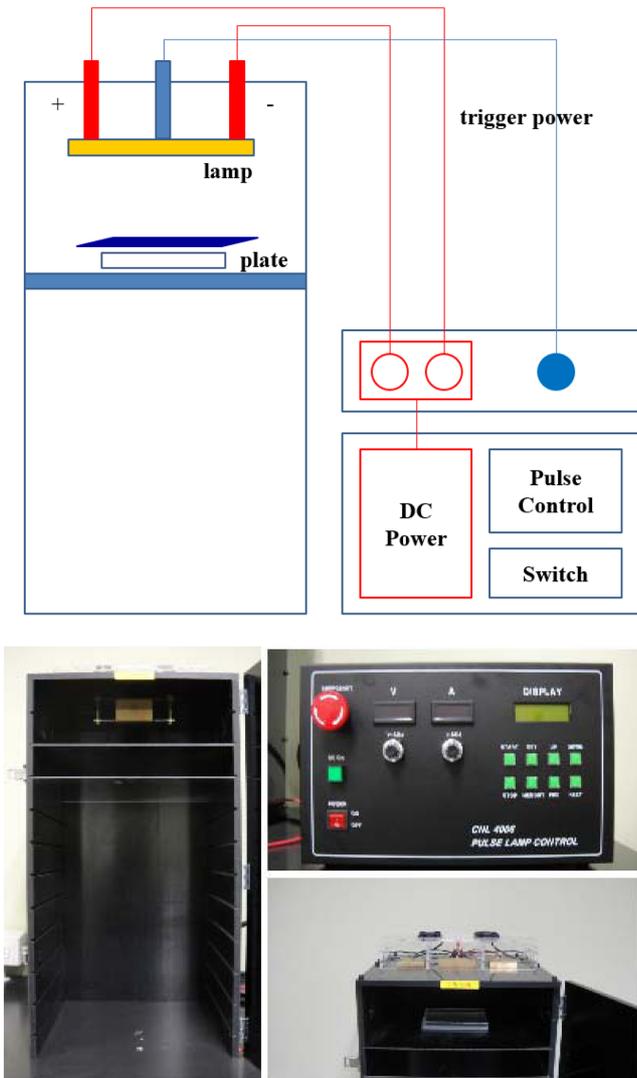


Fig. 1. Schematic diagram and photography of the intense pulsed light treatment system.

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 제논 램프 하단에 놓고 그 위에 1-3 mm 두께의 석영판, 아크릴판, 유리판을 덮개를 연 배양 접시를 덮은 후 광펄스 처리를 하였다. 광펄스 처리 후 36°C에서 24-48시간 배양하여 평판 배지에 형성된 균락(colony)수를 계수하여 CFU/mL으로 나타내었다. 균락수는 30-300 개 사이의 것을 계수하였다. 미생물의 사멸율은 초기균수(N_0)에 대한 처리 후 생균수(N)의 비율(N/N_0)을 계산하여 로그축에 표시하였으며, 시료당 3회 반복실험하여 측정하였다.

살균 동력학적 분석

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

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

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

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 검증하기 위해 Duncan의 다중 범위검정(Duncan's multiple range test)을 실행하여 나타내었다. 모든 통계 분석의 유의수준은 $p < 0.05$ 였으며, 실험 데이터는 3회씩 반복하여 측정하였다. 통계분석은 SPSS Version 21.0 package program (IBM Corp., Armonk, NY, USA)을 이용하여 처리하였다.

결과 및 고찰

용기 재질에 따른 빛의 투과율

광펄스 처리시 처리 용기 재질을 투과한 빛의 양을 측정하여 Table 1에 나타내었다. 먼저 제논 램프의 광 방사량을 측정된 대조구의 경우, UV-C의 광 방사량은 3.595 W/m^2 이었고, 석영의 경우 두께 1 mm의 석영을 투과했을 때 3.358 W/m^2 , 2 mm의 경우 3.212 W/m^2 , 3 mm의 경우 3.171 W/m^2 으로 나타나 석영의 두께에 따라 투과율이 줄어드는 하였으나 대조구 대비하여 90% 내외의 투과율을 보였다. 일반적으로 석영은 UV의 투과 성능이 우수하고 가시광선 및 근적외선 흡수율이 매우 낮은 성질을 가지고 있으며(MICQ, 2020), 램프의 재질로 사용된 석영의 UV 투과율이 90% 이상인 것으로 보고(Heraus, 2021)되고 있어 본 실험의 결과와 일치하였다. 아크릴의 경우에는 1 mm 두께의 아크릴을 통과했을 때 0.878 W/m^2 , 2 mm의 경우 0.673 W/m^2 , 3 mm의 경우에는 0.201 W/m^2 으로 두께가 늘어남에 따라 투과율이 크게 줄어들었으며, 석영과 비교하였을 때 투과율이 크게 떨어지는 것을 알 수 있었다. 아크릴의 경우 UV-C는 투과가 거의 되지 않으며, 300 nm 이상의 파장의 빛은 70% 이상 투과한다라는 보고(Pawar, 2016; Araujo et al., 2019)가 있는데, 본 실험에서는 두께가 얇은 경우에는 UV-C의 투과율이 20%정도가 되었으며, 두께가 두꺼워짐에 따라 투과가 거의 되지 않는 것으로 나타났다.

Table 1. Energy density of transmitted light as chamber materials by intense pulsed light treatment (unit : W/m²)

Wave Length		UV-C (220-280 nm)	UV-B (280-315 nm)	UV-A (315-400 nm)	RAD (400-1,050 nm)	
Chamber materials	Quartz	Control	3.595±0.015 ^{a1)}	4.624±0.037 ^a	1.620±0.004 ^a	2.523±0.003 ^a
		1 mm	3.358±0.007 ^b	4.123±0.013 ^b	1.620±0.002 ^{ab}	2.502±0.011 ^b
		2 mm	3.212±0.017 ^c	4.040±0.024 ^c	1.619±0.002 ^{bc}	2.519±0.003 ^a
		3 mm	3.171±0.009 ^d	3.966±0.016 ^d	1.598±0.004 ^c	2.518±0.001 ^a
	Acryl	Control	3.595±0.015 ^a	4.624±0.037 ^a	1.620±0.004 ^a	2.523±0.003 ^a
		1 mm	0.878±0.016 ^b	2.114±0.017 ^b	1.620±0.002 ^a	2.513±0.003 ^b
		2 mm	0.673±0.009 ^c	0.296±0.002 ^c	1.619±0.005 ^a	2.515±0.002 ^b
		3 mm	0.201±0.003 ^d	0.203±0.004 ^d	1.598±0.002 ^b	2.515±0.003 ^b
	Glass	Control	3.595±0.015 ^a	4.624±0.037 ^a	1.620±0.004 ^a	2.523±0.003 ^a
		1 mm	0.060±0.001 ^b	0.470±0.009 ^b	1.602±0.007 ^b	2.509±0.003 ^b
		2 mm	0.051±0.001 ^{bc}	0.423±0.006 ^c	1.614±0.003 ^a	2.507±0.006 ^b
		3 mm	0.044±0.000 ^c	0.112±0.003 ^d	1.616±0.006 ^a	2.521±0.003 ^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 : 1000 V, 5 pps, distance : 1.5 cm

유리의 경우에는 1 mm 두께일 경우 0.060 W/m², 2 mm에서는 0.051 W/m², 3 mm의 경우에는 0.044 W/m²으로 가장 낮은 투과율을 보였다. 유리의 빛의 투과성에 대한 연구결과를 보면 유리는 유리에 혼합되어져 있는 물질에 따라 UV의 투과율이 차이가 있으며(Ehrt & Seever, 1991; Tuchinda et al., 2006), 일반적인 유리의 경우 UV의 투과율은 30% 미만, 대부분의 UV-C는 투과되지 않는 것으로 보고되고 있다(Murahara et al., 2004; Schoott, 2020). 본 실험에서는 UV의 투과율은 21.7%, UV-C의 투과율은 2% 미만으로 보고된 값과 일치하는 결과를 보였다. 석영, 아크릴, 유리 모두 재질과 상관없이 두께가 늘어남에 따라 UV-C의 투과율이 감소하였다. UV-A와 RAD는 석영, 아크릴, 유리의 재질과 두께의 변화와 상관없이 대조구와 투과율에 있어 차이를 보이지 않았다. 재질별로 UV-C의 투과율을 백분율로 나타내었을 때, 대조구에 대비하여 석영은 두께에 따라 88.2%-93.4 %, 아크릴은 5.1%-24.4%, 유리는

1.2%-1.7%로 석영이 가장 높게 나타났다.

제논램프는 햇빛의 파장과 비슷하게 자외선에서부터 근적외선까지의 넓은 범위의 빛을 발생시킨다. 빛은 가시광선에서 UV-A, UV-B, UV-C로 갈수록 파장이 짧아지고, 파장이 짧아질수록 에너지가 강하고 침투력(permeability)은 약하다. 이 중, 에너지 준위(energy level)가 높은 UV-C가 미생물의 사멸효과가 가장 높은 것으로 알려져 있다(Gayán et al., 2013; Ploydaeng et al., 2020). 따라서 광펄스 처리를 위한 용기로 사용하기 위해서는 UV-C의 투과율이 상대적으로 높은 석영이 가장 적절하지만, 석영 재질의 가격과 가공적성이 문제가 될 것으로 보인다.

처리 용기 재질에 따른 광펄스 살균 효과

광펄스 처리에 사용되는 처리 용기의 재질에 따른 살균 효과를 Fig. 2에 나타내었다. 실험에 사용한 *E. coli*의 초기 균수는 10⁸ CFU/mL이었고, 대조구의 경우 광펄스 처리 60

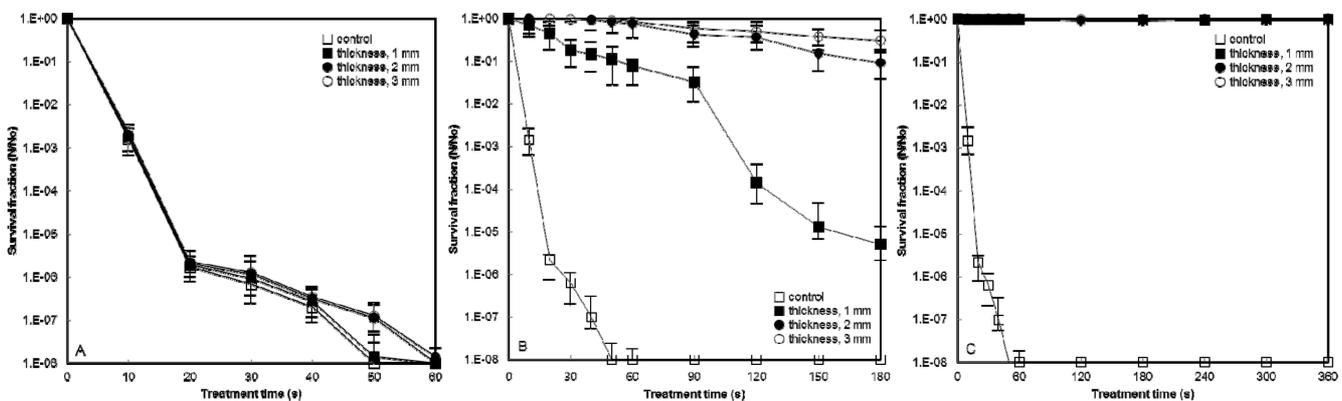


Fig. 2. Effect of inactivation on *E. coli* as chamber materials (quartz (A), acryl (B), and glass (C)) and thickness (1, 2, and 3 mm) by intense pulsed light treatment.

초 후에 모두 사멸하였다. 석영의 경우에는 1 mm 두께에서는 10초 처리 후 2.8 log, 20초 처리 후 5.7 log, 60초 처리 후에는 대조구와 동일하게 모두 사멸하였다. 2 mm, 3 mm의 두께에서도 1 mm 두께보다는 조금 낮은 살균 효과를 보였으나 60초 처리 후에 모두 사멸되어 석영의 경우에는 3 mm 두께까지는 살균율에 큰 차이를 보이지 않았다(Fig. 2A). 아크릴의 경우에는 1 mm 두께에서는 60초 처리 후 1.1 log 사멸하였고, 180초 처리 후에는 5.0 log 사멸하였으나, 2 mm, 3 mm에서는 180초 처리 후에 각각 1 log, 0.5 log 사멸하여 두께가 증가됨에 따라 살균 효과가 현저히 감소하는 것을 확인할 수 있었다(Fig. 2B). 유리의 경우에는 두께 1 mm-3 mm에서 모두 60-360초 처리하여도 살균 효과를 확인하기 어려웠다(Fig. 2C).

처리 용기 재질에 따른 광펄스 처리 시 살균 효과를 비교하기 위해 1 mm 두께의 석영, 아크릴, 유리 재질의 살균 효과를 Fig. 3에 비교하였다. 석영 1 mm의 경우 60초 동안 광펄스 처리하였을 때 8 log 사멸하였고, 아크릴 1 mm의 경우에는 180초 동안 광펄스 처리 하였을 때 5 log가 사멸하였다. 하지만 유리 1 mm의 경우에는 180초 동안 광펄스 처리 후에도 살균 효과가 없었다. 석영, 아크릴, 유리의 투명도는 육안으로 봤을 때는 큰 차이가 없었지만 *E. coli*의 사멸 효과는 큰 차이를 나타내었다. Kim et al. (2010)과 Lee & Shin (2015)에 의하면 광펄스의 살균은 강한 빛의 노출에 의해 세포벽과 세포막의 파괴에 의한 물리적 충격 효과, 광원에서 발생하는 열이 식품 표면 미생물에 전달되어 세포가 불활성화되는 광열 효과(photothermal effect), 그리고 빛 에너지를 흡수한 미생물의 DNA 손상에 따른 광화학 효과(photochemical effect)라고 하였는데 본 연구결

과로 보면 처리용기 재질을 통과한 UV-C에 의한 영향이 크게 나타나 광화학 효과가 더 큰 영향을 미친 것으로 판단된다.

살균 동력학적 분석

광펄스 처리시 처리용기 재질별 살균 패턴을 알아보기 위해 사멸속도상수 k 값과 균이 90% 사멸하는데 필요한 시간인 D 값을 계산하여 Table 2와 Fig. 4에 나타냈다. 열 살균이나 광펄스 살균에 있어서 사멸곡선은 대부분 직선형으로 나타나지만, 본 실험에서는 bi-phasic의 형태를 나타냈다. 먼저 대조구의 k_1 값은 $0.287 s^{-1}$ 이었으며, k_2 값은 $0.072 s^{-1}$ 이었고, D_1 은 8.02 s였으며, D_2 는 31.87 s였다. 처

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

		Inactivation rate constants (s^{-1})		Decimal reduction times (s)	
		k_1	k_2	D_1	D_2
Control		0.287	0.072	8.02	31.87
	1 mm	0.284	0.069	8.11	33.87
	2 mm	0.281	0.044	8.19	52.34
Quartz	2 mm	0.279	0.043	8.25	53.55
	3 mm				
Chamber materials	Acryl 1 mm	0.018	0.042	127.94	54.83
	2 mm	0.003	0.008	767.67	287.87
	3 mm	0.002	0.003	1,151.50	767.67
Glass	1 mm	0.004	-	575.75	-
	2 mm	0.004	-	575.75	-
	3 mm	0.004	-	575.75	-

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

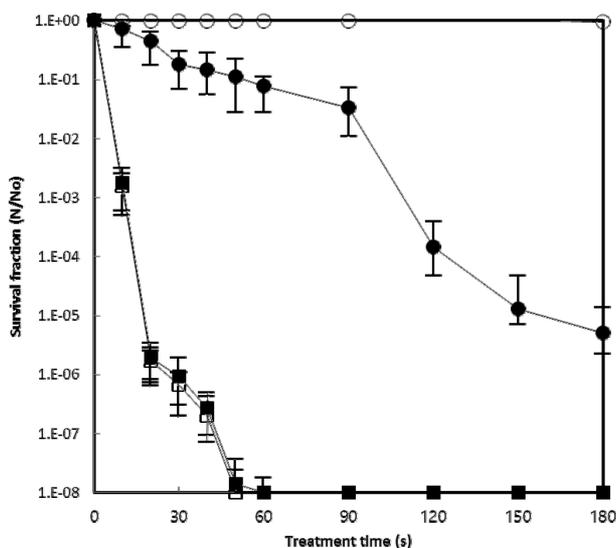


Fig. 3. Inactivation of *E. coli* by intense pulsed light treatment as chamber materials. (□) Control, (■) quartz 1 mm, (●) acryl 1 mm, (○) glass 1 mm. Treatment condition: 1,000 V, 5 pps, distance: 1.5 cm.

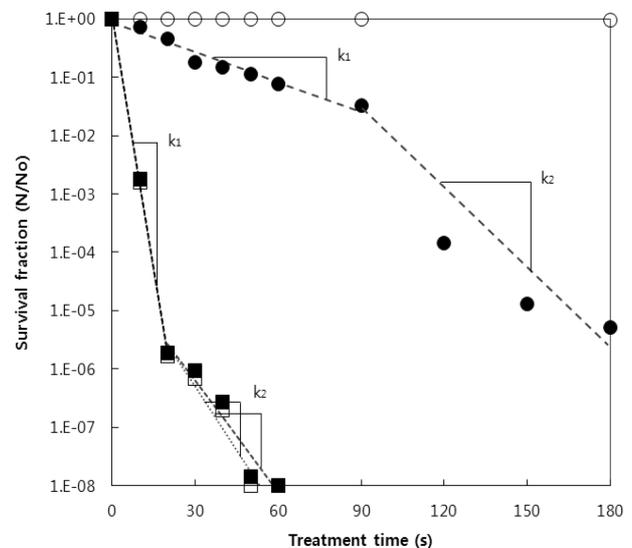


Fig. 4. Inactivation kinetics of *E. coli* cells by intense pulsed light treatment as treatment time at various chamber materials. (□) Control, (■) quartz 1 mm, (●) acryl 1 mm, (○) glass 1 mm. Treatment condition: 1,000 V, 5 pps, distance: 1.5 cm.

리용기 재질에 따른 살균 data로부터 사멸속도상수 k 와 D 값을 보면 1 mm의 두께에서 석영은 k_1 은 0.284 s^{-1} , k_2 는 0.069 s^{-1} , 아크릴은 k_1 은 0.018 s^{-1} , k_2 는 0.042 s^{-1} 이었고, 유리는 k 는 0.004 s^{-1} 이었다. 두께 1 mm에서 D 값은 석영은 $D_1=8.11 \text{ s}$, $D_2=33.87$, 아크릴은 $D_1=127.94 \text{ s}$, $D_2=54.83 \text{ s}$, 유리는 $D=575.75 \text{ s}$ 로 나타났다. 재질의 두께가 증가하면서 석영은 사멸속도상수 값이 감소하는 경향을 보였으나 큰 차이를 나타내지는 않았으며, D_1 값도 큰 차이를 보이지는 않았다. 그러나 아크릴은 두께가 증가하면서 사멸속도상수 값이 크게 감소하였으며, D 값도 모두 크게 증가하여 두께가 두꺼워짐에 따라 살균 효과가 크게 떨어질 것을 예상할 수 있었다. 반면 유리는 두께와 상관없이 사멸속도상수 값과 D 값이 모두 낮은 값을 나타내어 살균 효과를 거의 나타내지 못하였다.

석영은 silicon dioxide (SiO_2)이루어져 있으며, 불순물의 함량이 매우 적기 때문에 화학적으로 안정하고, 광학적, 전기적 내구성이 높으며, 열 충격에 매우 강하여 내열성이 우수하여 $1,000^\circ\text{C}$ 이상의 온도에서도 사용이 가능한 특성을 가지고 있다(Nam et al., 2006; Park et al., 2006; Maeng et al., 2013). 아크릴(acryl, polymer methyl methacrylate)은 2 mm 두께일 때 빛 투과율이 92%이며, 이 중 가시광선의 투과율은 89%로 알려져 있다. 또한 비교적 넓은 온도 범위에서 사용이 가능하며, 내열성, 내한성, 전기적 성질을 균형있게 갖추고 있으며, 가공성이 우수한 것으로 알려져 있다(Schmidt et al., 1983; Chie et al., 2005). 유리는 투명하고 깔끔한 분위기를 주어 식기류나 조리도구 등으로 널리 쓰이며, 목적에 따라 여러 형태로 가공되어 사용되고 있다. 유리의 가시광선 영역 투과율은 81-90%, 태양 복사열은 765 내외이며 두께가 두꺼워질수록 가시광선 및 태양 복사열의 투과율, 차폐 계수가 낮아진다(Kim et al., 1993; Lee & Yoo, 2003; Han et al., 2014). 유리의 구조는 규소와 산소 원자가 결합하여 만든 일종의 그물코에 균테균테 구멍(crack)이 남겨진 형태로 이러한 결정형 구조는 빛이 유리를 통과할 때 굴절, 산란시키는 역할을 하게 된다. 석영과 유리는 구성성분은 비슷하나 순도 및 가공형태에 따른 결정형의 차이가 있어 빛의 투과에 차이가 발생하게 된다. 따라서 광펄스 처리시 고순도의 규소와 산소로 만들어져 빛을 굴절없이 직선으로 투과시키는 석영은 식품 표면에 광펄스의 빛을 그대로 전달하여 높은 살균 효과를 갖지만, 유리는 빛을 사방으로 흩어지게 하여 살균 효과가 낮게 나타나는 것으로 보인다. 다만 석영의 경우 $1,800^\circ\text{C}$ 이상의 높은 온도와 진공 공정을 필요로 하고, 재질이 고가로서 비용 부담이 크다는 단점이 있어 향후 처리용기의 재질로 사용할 때에 적절한 두께의 선정이 중요한 것으로 판단된다.

요 약

본 연구에서는 처리용기의 재질에 따른 광펄스의 살균 효과에 대해서 알아보았다. 처리용기의 재질에 따른 UV-C의 광량은 대조구는 3.595 W/m^2 이었으며, 두께 1 mm에서 석영은 3.358 W/m^2 , 아크릴은 0.878 W/m^2 , 그리고 유리는 0.060 W/m^2 였으며, 빛의 투과율은 석영은 93.4%, 아크릴은 24.4%, 유리는 1.7%로 나타났다. 처리 용기 재질에 따른 살균 효과는 석영은 처리용기의 두께와 상관없이 대조구와 동일한 살균 효과를 보였으며, 아크릴은 1 mm 두께에서 60초 처리 후 1.1 log 사멸하였으며, 180초 처리 후에는 5.0 log의 사멸효과를 보였으며, 두께가 증가함에 따라 살균 효과가 현저히 감소하였다. 유리는 두께와 관계없이 살균 효과가 거의 없었다. 사멸패턴은 유리를 제외하고는 모두 bi-phasic의 형태를 보였으며, 사멸속도상수와 D 값은 대조구는 k_1 값은 0.287 s^{-1} 이었으며, k_2 값은 0.072 s^{-1} 이었고, D_1 은 8.02 s 였으며, D_2 는 31.87 s 였다. 1 mm의 두께에서 석영은 k_1 은 0.284 s^{-1} , k_2 는 0.069 s^{-1} , 아크릴은 k_1 은 0.018 s^{-1} , k_2 는 0.042 s^{-1} 이었고, 유리는 k 는 0.004 s^{-1} 이었다. 두께 1 mm에서 D 값은 석영은 $D_1=8.11 \text{ s}$, $D_2=33.87$, 아크릴은 $D_1=127.94 \text{ s}$, $D_2=54.83 \text{ s}$, 유리는 $D=575.75 \text{ s}$ 로 나타났다.

References

- Allende A, Alicia M, Buenda B, Toms-Barbern F, Gil MI. 2007. Impact of combined postharvest treatments (UV-C light, gaseous O_3 , superatmospheric O_2 and high CO_2) on health promoting compounds and shelf-life of strawberries. *Postharvest Biol. Tec.* 46: 201-211.
- Arayjo GR, Pollmann T, Ulrich A. 2019. Photoluminescence response of acrylic (PMAA) and polytetrafluoroethylen (PTFE) to ultraviolet light. *Eur. Phys. J. C* 79: 653
- Chie EK, Park JP, Huh SN, Hong SM, Park SW, Kim IA, Wu HG, Kim JS, Kang WS, Kim IH, Ha SW, Park CI. 2005. Carbon fiber as material for radiation fixation device: a comparative study with acrylic. *J. Radi. Prot. Res.* 30: 1-7.
- 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. *Safe Food* 6: 11-16.
- Ehrt D, Seeber W. 1991. Glass for high performance optics and laser technology. *K. Non-Cryst. Solids* 129: 19-30.
- Elmnasser N, Ritz M, Leroi F, Orange N, Bakhrouf A, Federighi M. 2007. Bacterial inactivation using pulsed light. *A. Alim.* 36: 401-408.
- Gayán E, Álvarez I, Condón S. 2013. Inactivation of bacterial spores by UV-C light. *Innov. Food Sci. Emerg.* 19: 140-145.
- Han DH, Oh HS, Jung GJ. 2014. Feature analysis reflections transmittances of visible light by changing the surface roughness in plate glass. *J. Region. Assoc. Archit. Inst. Korea.* 16: 223-230.
- Hearus, 2021. Quartz glass for optics data and properties. Avail-

- able from: https://www.heraeus.com/media/media/hca/doc_hca/products_and_solutions_8/optics/Data_and_Properties_Optics_fused_silica_EN.pdf. Accessed Aug. 15, 2021.
- Kim AJ, Shin JK. 2015. Nonthermal sterilization of pathogenic *Escherichia coli* by intense pulsed light using a batch system. Korean J. Food Sci. Technol. 47: 81-86.
- Kim BR, Kim AJ, Hong HJ, Shin JK. 2013. Sterilization of yeast isolated from makgeolli by intense pulsed light treatment in bath system. Food Eng. Prog. 17: 159-164.
- Kim CG, Heo J, Kim YS. 1993. Preparation and characteristics of infrared transmitting glasses in the PbO-Bi₂O₃-Ga₂O₃ system. J. Korean Ceramic Soc. 30: 709-716.
- Kim DS, Song SK, Park YS. 2010. A comparison of single disinfection process for inactivation of *E. coli*. KSBB J. 25: 25-32.
- Lee SD, Yoo HC. 2003. A case study on the transmittance of glass as building material. In: Proceeding of the KSES Spring Conference in 2003. May 5, Seoul, Korea pp. 135-140.
- Maeng JH, Yoon KH, Choi SC, Kim HJ. 2013. The effect of sintering temperature on the synthesis of quartz glass by fumed silica sintering. J. Kor. Powd. Met. Inst. 20: 134-137.
- MICQ. 2020. Classification of quartz glass. Available from: <https://www.micquartz.com/ko/optical-quartz-glass-jgs1-jgs2-jgs3/>. Accessed Aug. 15, 2021.
- Mok CK, Jeon HJ. 2012. Reduction of microorganisms in red pepper powder by low pressure discharge plasma. Food Eng. Prog. 16:107-112.
- Murahara M, Funatse T, Okamoto Y. 2004. Photochemical adhesion of fused silica glass for UV transmittance. In: Laser-Induced Damage in Optical Materials, Exarhos GH, Guenther NK, Lewis KL, Soileau MJ, Xtolz CJ. (eds). SPIE, Bellingham, WA, USA. pp 224-231.
- Nam BU, An JS, Park SE, Shin JS, Oh HS. 2006. Preparation of high-purity quartz panel using sol-gel method. In: Proceeding of the KAIS Fall Conference in 2006. November 2, Hongsung, Korea pp. 272-275.
- Park JH, You SY. 2016. Analysis on food consumption behavior and dietary satisfaction according to household type. Korean J. Agri. Eco. 57: 103-138.
- Park JH. 2016. Sterilization effect of microorganism on black and white pepper using intense pulsed light. MS thesis, Jeonju University, Jeonju, Korea.
- Park SE, Shin JS, Oh HS, Kim KY, Kang BH. 2006. Characterization of quartz glass substrate for tft-lcd panel. In: Proceeding of the KAIS Fall Conference in 2006. November 2, Hongsung, Korea pp. 257-260.
- Pawar E. 2016. A review article on acrylic PMMA. IOSR-JMCE. 13: 1-4.
- Ploydaeng M, Rahatanavin N, Rattanakaemakorn P. 2020. UV-C light: A powerful technique for inactivating microorganisms and the related side effects to the skin. Photodermatol. Photo. 37: 12-19.
- Schmidt RA, Chan HP, Kodera Y, Doi K, Chen CT. 1983. Evaluation of cassette performance: physical factors affecting patient exposure and image contrast. Radiology 146: 801-806.
- Schott AG. 2020. Transmittance of optical glass. Available from: https://www.schott.com/d/advanced_optics/5b1f5065-0587-4b3f-8fc7-e508b5348012/1.3/schott-tie-35-transmittance-of-optical-glass-en.pdf. Accessed Aug. 15, 2021.
- Shin JK, Kim BC, Kim BR, Kim AJ. 2012. A study of quality and shelf-life of Korean traditional turbid rice wine (takju) by batch intense pulsed light. Food Eng. Prog. 16: 58-63.
- Shin JK, Kim BR, Kim AJ. 2010. Nonthermal food processing technology using electric power. Food Ind. 43: 21-34.
- Tuchinda C, Srivannaboon S, Lim HW. 2006. Photoprotection by window glass, automobile glass, and sunglasses. J. Am. Acad. Dermatol. 54: 845-854.
- Zhang R, Lebovka N, Marchal L, Vorobiev E, Grimi N. 2020. Comparison of aqueous extraction assisted by pulsed electric energy and ultrasonication: Efficiencies for different microalgal species. Algal Res. 47: 101857.

Author Information

박주안: (주)업지식품 대리
 신정규: 전주대학교 교수