자원과학연구 (Resources Science Research)
Resour Sci Res, 2019, 1(2):71-77
ISSN: 2713-7872

ARTICLE

이산화염소 가스 처리의 토마토 내 식중독균 제어 효과 예측 모델 개발

박 상 현*
공주대학교 식품공학과

Model Building to Describe and Predict the Antimicrobial Effect of Chlorine Dioxide Gas on the Inactivation of Foodborne Pathogens in Tomatoes

Sang-Hyun Park*
Department of Food Science and Technology, Kongju National University, Yesan 32439, Korea

Received: October 4, 2019
Revised: November 18, 2019
Accepted: December 13, 2019

*Corresponding author :
Sang-Hyun Park
Department of Food Science and Technology, Kongju National University, Yesan 32439, Korea
Tel : +82-41-330-1482
E-mail :shpark@kongju.ac.kr

Copyright © 2019 Resources Science Research Institute, Kongju National University. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ORCID
Sang-Hyun Park
https://orcid.org/0000-0003-2119-7845

Abstract

The objective of this study was to develop and validate a model to predict the effect of relative humidity (RH) on the inactivation of *Escherichia coli* O157:H7, *Salmonella* Typhimurium, and *Listeria monocytogenes* on tomatoes by chlorine dioxide (ClO_2) gas. The Weibull model was used to analyze survival curves of foodborne pathogens and a predictive inactivation model was developed by substituting scale parameters (δ) and shape parameters (p). We conducted validation experiments to identify that developed model predict the inactivation of foodborne pathogens well. For all three pathogens, A_f values were not over than 1.197, and B_f values were between 0.973 and 1.091. The developed model reliably predicted inactivation of *E. coli* O157:H7, *S.* Typhimurium, and *L. monocytogenes* by ClO_2 gas at various RH levels and it may help the fresh produce industry to establish effective conditions for ClO_2 gas treatment.

Keywords

Chlorine dioxide gas, Foodborne pathogen, Predictive model, Weibull model

Ⅰ. 서 론

최근 이산화염소(chlorine dioxide, ClO_2)의 살균소독제로의 활용이 주목받고 있다(Bhagat *et al.*, 2010). 이산화염소는 강한 산화제로 미생물 세포의 세포막에 존재하는 효소를 비롯한 단백질에 산화적 손상을 유발하여 미생물을 제어하는 것으로 알려져 있다(Aieta & Berg, 1986). 또한, 이산화염소는 세포막을 침투하여 세포질 내 효소 단백질의 손상을 유발한다고 알려져 있다(USDA, 2002). 이산화염소는 다른 염소계 살균소독제에 비해 pH나 유기물에 대한 영향을 크게 받지 않으며, 질소화합물과 반응하여 클로라민(chloramine)을 형성하지 않는 특성을 지니고 있다(Aieta *et al.*, 1984; Beuchat, 1998).

이러한 이산화염소 가스의 장점으로 인해 시금치(Neal *et al.*, 2012; Park & Kang, 2015), 토마토(Bhagat *et al.*, 2010, Trinetta *et al.*, 2013), 양상추(Mahmoud & Linton, 2008) 등 많은 식중독 사고와 연관되어 있는 신선채소 및 과일류를 비롯하여 사과(Du *et al.*, 2002), 블루베리(Sun *et al.*, 2014), 감자(Wu & Rioux, 2010), 오렌지(Bhagat *et al.*, 2011), 새싹채소(Prodduk *et al.*, 2014), 당근(Sy *et al.*, 2005), 딸기(Han *et al.*, 2004) 등에 존재하는 식중독균에 대한 이산화염소 가스의 제어 효과가

보고된 바 있다. 또한 스테인레스(Trinetta *et al*., 2012; Vaid *et al*., 2010), polyvinyl chloride, 유리(Li *et al*., 2012, Morino *et al*., 2011)와 같은 식품접촉표면에 존재하는 식중독균에 대한 이산화염소 가스의 제어 효과 역시 보고된 바 있다.

이산화염소 가스의 식중독균 제어 효과는 식중독균이 존재하는 표면의 특성(거칠기, 소수성)과 같은 내적 요인이나 가스 농도, 처리 시간, 상대습도, 온도 조건과 같은 외적 요인에 영향을 받는다고 알려져 있다(Han *et al*., 2001; Park and Kang, 2017). 특히, 이산화염소 가스는 물에 대한 용해도가 높기 때문에 상대습도(relative humidity, RH) 조건이 이산화염소 가스의 식중독균 제어 효과에 큰 영향을 미치는 요인으로 알려져 있으며(Linton *et al*., 2006), 상대습도 조건이 높을수록 식중독균이 존재하는 표면에서 반응하는 이산화염소 가스의 양이 증가하고, 이에 따라 더 많은 식중독균 저감화가 나타난다고 보고된 바 있다(Park and Kang, 2018). 따라서 많은 이산화염소 가스의 식중독균 저감화 연구가 RH 80% 이상의 조건에서 이루어진 바 있다(Bhagat *et al*., 2010; Gómez-López *et al*., 2008; Popa *et al*., 2007; Vandekinderen *et al*., 2009).

이처럼 RH 조건이 이산화염소 가스의 식중독균 제어 효과에 큰 영향을 미치는 요인이지만 현재까지 RH 조건에 따른 이산화염소 가스의 식중독균 제어 효과를 예측할 수 있는 모델은 보고된 바 없다. 실험적 결과를 기반으로 한 RH 조건에 따른 이산화염소 가스의 식중독균 저감화 예측 모델을 개발하는 것은 실제 다양한 RH 조건에서 활용될 수 있는 이산화염소 가스의 효율성을 판단하고 원하는 제어 효과를 달성하기 위한 최적의 처리 조건을 확립하는 데 있어 중요하다고 할 수 있다.

본 연구의 목적은 Weibull 모델을 기반으로 하여 RH 조건에 따른 이산화염소 가스의 주요 식중독균(*Escherichia coli* O157:H7, *Salmonella* Typhimurium, 및 *Listeria monocytogenes*)에 대한 제어 효과 예측 모델을 개발하고 accuracy factor(A_f)와 bias factor(B_f)를 통해 개발된 예측 모델을 검증하는 것이다.

II. 재료 및 방법

미생물 균주 및 균액 준비

본 연구에 사용된 *E. coli* O157:H7(ATCC 35150, ATCC 43889, ATCC 43890), *S.* Typhimurium(ATCC 19585, ATCC 43971, DT 104) 및 *L. monocytogenes*(ATCC 19111, ATCC 19115, ATCC 15313) 균주는 서울대학교 식품위생공학실에서 분양 받아 사용하였다. 각각의 균주를 5 mL의 tryptic soy broth(TSB; Difco, Becton, Dickinson, USA)에 접종한 후 37℃에서 24시간 동안 배양하고, 4,000×g 조건으로 20분간 원심분리하였다. 원심분리 후 얻은 균체를 0.2% peptone water(PW; Difco)를 사용하여 3회 washing 하였으며 최종적으로 0.2% PW에 현탁하여 실험에 사용될 10^8-10^9 CFU/mL 농도의 균액을 준비하였다.

시료 준비 및 접종

토마토(90–110 g)를 흐르는 물에 세척한 후 클린 벤치 내에서(22±2℃) 1시간 동안 건조하였다. 실험에 사용된 토마토는 예비 실험을 통해 *E. coli* O157:H7, *S.* Typhimurium 및 *L. monocytogenes* 균이 존재하지 않는 것을 확인하였다. 토마토 겉껍질 부분을 5×2 cm 크기로 자른 후 클린 벤치 내에서 준비된 균액 0.1 mL를 마이크로파이펫을 이용하여 15-20 개의 spot으로 접종하였다. 접종 후 클린 벤치 내에서(22±2℃) 1시간 동안 건조하였다.

이산화염소 가스 처리

이산화염소 가스 처리는 선행 연구에서 보고된 것과 동일한 방식으로 수행되었다(Park and Kang, 2018). 접종된 토마토 시료를 가스 처리 챔버 중앙에 놓고 덮개를 통해 처리 조건에 도달하기 전에 이산화염소 가스에 노출되는 것을 방지하였다. 접종된 토마토 시료는 22±1℃ 조건에서 1, 5, 10, 20 및 30 ppmv 농도의 이산화염소 가스에 최대 20분간 노출되었다. RH 조건은 초음파 nebulizer(H-C976, Osungsa, Korea)를 통해 50%, 70% 및 90% ±2% 조건으로 조절되었으며, thermohygrometer(YTH-600, Uins, Korea)를 통해 모니터링 되었다. 처리 조건에 맞는 이산화염소 가스 농도, RH 조건이 되었을 때 덮개를 제거하여 접종된 샘플에 이산화염소 가스 처리가 이루어지도록 하였다.

식중독균의 계수

식중독균의 계수를 위해 이산화염소 가스 처리가 끝난 토마토 샘플을 30 mL의 멸균증성완충용액(Difco)이 담긴 멸균백(Labplas Inc., Canada)에 옮긴 후 stomacher(EASY MIX, AES Chemunex, France)를 사용하여 2분간 균질화하였다. 균질화 후 1 mL의 시험 용액을 9 mL의

PW를 이용하여 10배 단계 희석한 후 0.1 mL의 각 시험 용액 및 희석 용액을 식중독균 선택 배지에 분주 도말하였다. Sorbitol MacConkey agar(SMAC; Difco), Xylose Lysine Desoxycholate agar(XLD; Difco) 및 antimicrobic supplement(Difco)가 첨가된 Oxford agar base(OAB; Difco)가 *E. coli* O157:H7, *S.* Typhimurium 및 *L. monocytogenes* 검출을 위한 선택 분별 배지로 각각 사용되었다. 적은 균수가 예상되는 샘플의 경우 검출한계를 낮추기 위해 멸균백에서 1 mL를 취하여 각각의 식중독균 선택 배지 4개에 0.25 mL씩 분주 도말하였다. 도말한 선택 배지를 37℃에서 24-48시간 동안 배양한 후 형성된 집락을 계수하고 log CFU/cm^2 단위로 환산하였다.

예측 모델 개발

예측 모델 개발을 위한 이산화염소 가스 처리에 따른 토마토 내 *E. coli* O157:H7, *S.* Typhimurium 및 *L. monocytogenes*의 저감화 결과는 선행 연구 내용을 활용하였다(Park and Kang, 2018). 저감화 결과를 GInaFit 프로그램(Geeraerd *et al*., 2005)을 사용하여 Weibull model을 적용해 분석하였으며, δ 및 p 값은 아래와 같은 식에 의해 계산하였다:

$$\log_{10}(N) = \log_{10}(N_0) - \left(\frac{t}{\delta}\right)^p \quad \text{(Equation 1)}$$

상기 식에서 N(CFU/cm^2)은 이산화염소 가스 처리 후 미생물 수, N_0는 초기 미생물 수, t(s)는 처리 시간, δ는 characteristic 처리 시간, 그리고 p는 shape parameter를 의미한다.

얻어진 δ 및 p 값 중 δ값을 RH에 대한 함수로 나타내어 Weibull model의 δ 값에 대입함으로써 예측 모델 식을 확립하였다.

모델 검증

개발된 모델이 RH 조건에 따른 이산화염소 가스의 식중독균 제어 효과를 정확히 예측할 수 있는지 확인하기 위해 모델 개발에 사용된 RH 조건인 30%, 50%, 70% 및 90% 사이의 60% 및 80% RH 조건에서 검증 실험을 수행하였다. 실험을 통해 얻은 식중독균 세 종의 저감화 실험 수치와 예측 모델을 통해 얻은 예측 수치를 비교하였다. Accuracy factor(A_f)와 bias factor(B_f)가 예측 모델을 검증하는데 사용되었다. A_f 및 B_f 값은 아래의 식에 의해 계산되었다(Ross, 1996).

$$A_f = 10^{\frac{\sum\left|\log\left(\frac{predicted}{observed}\right)\right|}{n}}$$

$$B_f = 10^{\frac{\sum\log\left(\frac{predicted}{observed}\right)}{n}}$$

상기 식에서 n은 관측 수를 나타낸다. A_f 는 실험 수치가 예측 수치에 얼마만큼 근접하는지를 나타내는 척도로 완전히 일치하였을 때 1이 되며, 1에서 멀어질수록 개발된 모델의 부정확성을 나타낸다. B_f 는 모델에 의해 예측된 수치가 실제 실험 수치 결과를 과대평가하는지 과소평가하는지를 나타내는 척도로 실험 수치와 예측 수치가 일치하였을 때 1을 기준으로 0.70-1.15의 범위일 때 개발된 모델이 적합한 것으로 평가한다.

통계 분석

모든 실험은 3회 반복하여 수행하였으며, 실험 결과는 Statistical Analysis System(SAS Institute, USA)의 analysis of variance(ANOVA) procedure를 통해 분석되었고, 평균값은 Duncan’s multiple range test를 통해 분리되었다. 실험 결과의 유의적인 차이는 $p<0.05$ 수준에서 결정되었다.

Ⅲ. 결과 및 고찰

식중독균의 저감화 곡선은 선형의 형태를 따르지 않는 경우가 많으며, 이러한 비선형 저감화 곡선을 분석하기 위한 다양한 모델이 개발되었

다(Geeraerd *et al*., 2005). 그 중 Weibull model은 미생물의 저감화를 분석하는데 유연하고 편리한 기능을 가지고 있어(Peleg, 1999), 이를 활용한 식중독균의 저감화 분석 논문들이 많이 보고되고 있다(Martínez-Hernández *et al*., 2015; Wang *et al*., 2016). 본 연구에서는 RH 조건에 따른 이산화염소 가스의 토마토 내에 존재하는 *E. coli* O157:H7, *S.* Typhimurium 및 *L. monocytogenes*에 대한 저감화 효과를 보고한 Park과 Kang(2018)의 선행 논문의 연구 결과를 Weibull model을 통해 분석하여 δ 및 p 값을 얻었다(Table 1).

Weibull model의 scale parameters(δ)와 shape parameters(p)는 저감화 곡선의 경향성을 이해할 수 있게 해 준다(Choi *et al*., 2012). Weibull model을 적용한 예측 모델의 개발에 있어 p값에 의한 영향은 적으며, 이러한 경우 p값을 고정하면 보다 신뢰도가 높은 예측 모델이 나온다는 연구 결과들이 보고된 바 있다(Chen and Hoover, 2004; Couvert *et al*., 2005). 따라서 본 연구의 모델 개발에 있어서는 각 습도 조건(30%, 50%, 70% 및 90%)에서 *E. coli* O157:H7, *S.* Typhimurium 및 *L. monocytogenes* 에 대해 얻은 p값의 평균치인 0.35, 0.54 및 0.51를 고정하여 사용하였다.

세 가지 식중독균의 RH 조건에 따른 δ 값의 변화는 아래와 같은 식으로 표현할 수 있다. 여기에서 h는 RH(%)를 나타낸다.

E. coli O157:H7:

$$\delta = 0.0022h^2 - 0.515h + 31.491 (R^2 = 0.9326)$$

S. Typhimurium:

$$\delta = 0.0018h^2 - 0.2546h + 15.444 (R^2 = 0.9305)$$

L. monocytogenes:

$$\delta = 0.0026h^2 - 0.4482h + 27.606 (R^2 = 0.9636)$$

상기에서 얻은 δ 값에 대한 수식 및 p 값의 평균치를 Weibull model 식에 대입한 결과는 Table 2와 같다. 개발된 예측 모델의 효용성을 확인하기 위해 검증 실험을 수행하였으며 예측 모델에 의한 예측 수치와 실제 실험을 통해 얻은 실험 수치는 Table 3과 같다. 세 가지 식중독균에 있어 A_f 값은 최대 1.197을 나타내었으며 B_f 값의 경우 0.973에서 1.091 사이의 값을 나타내어 본 연구에서 개발된 예측 모델이 RH 조건에 따른 이산화염소 가스의 *E. coli* O157:H7, *S.* Typhimurium 및 *L. monocytogenes*에 대한 저감화를 예측하는데 효과적이라는 것을 알 수 있다. 또한, 개발된 예측 모델이 식중독균의 저감화를 낮은 수준(0-0.5 log reductions)에서 뿐만 아니라, 높은 수준 (3.5-4.0 log reductions)에서도

Table 1. Kinetic parameters of the Weibull model for *E. coli* O157:H7, *S.* Typhimurium, and *L. monocytogenes* in tomatoes after 10 ppmv ClO_2 gas treatment at various RH conditions.

Pathogens	RH (%)	Weibull model	
		δ (min)	p
E. coli O157:H7	30	17.30 ± 4.37	0.10 ± 0.07
	50	13.24 ± 5.84	0.18 ± 0.04
	70	3.99 ± 2.63	0.36 ± 0.11
	90	3.40 ± 1.68	0.75 ± 0.19
S. Typhimurium	30	9.26 ± 2.04	0.19 ± 0.08
	50	7.58 ± 1.69	0.28 ± 0.04
	70	5.89 ± 2.50	0.44 ± 0.11
	90	7.05 ± 2.66	1.24 ± 0.43
L. monocytogenes	30	16.20 ± 4.52	0.16 ± 0.10
	50	12.50 ± 5.80	0.18 ± 0.05
	70	8.03 ± 4.63	0.31 ± 0.11
	90	8.46 ± 1.54	1.38 ± 0.28

Table 2. Developed predictive models for inactivation of *E. coli* O157:H7, *S.* Typhimurium, and *L. monocytogenes*

	Developed predictive models[1)]
E. coli O157:H7	$\log(N)=\log_{10}(N_0)-\left(\frac{t}{0.0022h^2-0.515h+31.491}\right)^{0.35}$
S. Typhimurium	$\log(N)=\log_{10}(N_0)-\left(\frac{t}{0.0018h^2-0.2546h+15.444}\right)^{0.54}$
L. monocytogenes	$\log(N)=\log_{10}(N_0)-\left(\frac{t}{0.0026h^2-0.4482h+27.606}\right)^{0.51}$

1) N_0, initial population of pathogen; *N*, population of pathogen; *h*, relative humidity (%); *t*, time (min).

Table 3. Predicted (P) and observed population (O) of foodborne pathogens at different fat content and accuracy factors (A_f) and bias factors (B_f)

	RH (%)		Time (min) 0	1	5	10	15	20	Verification A_f	B_f
E[1)]	60	P	7.10	6.63	6.04	6.04	5.88	5.75	1.191	0.973
		O	7.10 ± 0.11[2)]	6.53 ± 0.15	6.12 ± 0.22	5.98 ± 0.31	5.92 ± 0.47	5.85 ± 0.39		
	80	P	7.10	6.50	6.05	5.76	5.56	5.40	1.197	1.052
		O	7.10 ± 0.11	6.41 ± 0.18	6.10 ± 0.14	5.85 ± 0.27	5.48 ± 0.24	5.32 ± 0.30		
S	60	P	6.98	6.62	6.12	5.73	5.43	5.17	1.180	1.028
		O	6.98 ± 0.25	6.58 ± 0.31	6.22 ± 0.38	5.65 ± 0.40	5.34 ± 0.42	5.25 ± 0.24		
	80	P	6.98	6.62	6.12	5.73	5.42	5.16	1.169	1.086
		O	6.98 ± 0.25	6.55 ± 0.35	6.20 ± 0.17	5.69 ± 0.36	5.31 ± 0.31	5.12 ± 0.58		
L	60	P	6.10	5.79	5.40	5.10	4.87	4.68	1.177	1.091
		O	6.10 ± 0.30	5.72 ± 0.25	5.48 ± 0.27	5.04 ± 0.21	4.89 ± 0.51	4.62 ± 0.31		
	80	P	6.10	5.76	5.33	5.01	4.76	4.54	1.112	1.081
		O	6.10 ± 0.30	5.79 ± 0.30	5.28 ± 0.45	4.94 ± 0.17	4.72 ± 0.12	4.50 ± 0.18		

1) E, *E. coli* O157:H7; S, *S.* Typhimurium; L, *L. monocytogenes.*
2) Mean ± standard deviation.

잘 예측하는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 개발된 예측 모델이 본 연구에서 사용된 30%-90% RH 조건 외의 RH 조건에서도 *E. coli* O157:H7, *S.* Typhimurium, 및 *L. monocytogenes* 의 저감화를 잘 예측할 수 있다는 것을 의미한다.

Ⅳ. 요 약

본 연구에서는 이산화염소 가스 처리 시 RH 조건에 따른 토마토 내 *E. coli* O157:H7, *S.* Typhimurium 및 *L. monocytogenes*의 저감화를 예측하기 위한 모델을 개발하고, 이를 검증하였다. 저감화 결과, 분석에는 Weibull model이 사용되었으며 분석을 통해 얻은 δ 및 p 값을 Weibull model 식에 대입하여 예측 모델을 개발하였다. 개발된 예측 모델을 검증하기 위해 예측 모델 개발에 사용되지 않은 조건인 60 및 80% RH 조건에서 실험을 수행한 후 실험 수치를 예측 수치와 비교하여 accuracy factor(A_f)와 bias factor(B_f)를 계산하였다. 그 결과, 예측 모델이 RH 조건에 따른 이산화염소 가스의 토마토 내 식중독균이 저감화를 효과적으로 예측하는 것을 확인하였다. 본 연구 논문의 결과는 향후 이산화염소

가스의 실제적인 산업적 활용에 있어 최적의 처리 조건을 확립하는데 활용될 수 있을 것이다.

References

1. Aieta E, Berg JD. 1986. A review of chlorine dioxide in drinking water treatment. J Am Water Works Assoc 78:62–72.
2. Aieta E, Roberts PV, Hernandez M. 1984. Determination of chlorine dioxide, chlorine, and chlorate in water. J Am Water Works Assoc 76:64–77.
3. Beuchat LR. 1998. Surface decontamination of fruits and vegetables eaten raw: A review. WHO/FSF/FOS/98.2. Geneva, Switzerland: Food Safety Unit, World Health Organisation.
4. Bhagat A, Mahmoud BSM, Linton RH. 2010. Inactivation of *Salmonella* enterica and *Listeria monocytogenes* inoculated on hydroponic tomatoes using chlorine dioxide gas. Foodborne Pathog Dis 7:677-685.
5. Chen H, Hoover DG. 2004. Use of Weibull model to describe and predict pressure inactivation of *Listeria monocytogenes* Scott A in whole milk. Innov Food Sci Emerg Technol 5:269-276.
6. Choi MR, Liu Q, Lee SY, Jin JH, Ryu S, Kang DH. 2012. Inactivation of *Escherichia coli* O157: H7, *Salmonella* typhimurium and *Listeria monocytogenes* in apple juice with gaseous ozone. Food Microbiol 32:191-195.
7. Couvert O, Gaillard S, Savy N, Mafart P, Legu RI. 2005. Survival curves of heated bacterial spores: Effect of environmental factors on Weibull parameters. Int J Food Microbiol 101:73-81.
8. Du J, Han Y, Linton RH. 2002. Inactivation by chlorine dioxide gas (ClO_2) gas of *Listeria monocytogenes* spotted onto different apple surfaces. Food Microbiol 19:481-490.
9. Geeraerd A, Valdramidis V, Van Impe J. 2005. GInaFiT, a freeware tool to assess non-log-linear microbial survivor curves. Int J Food Microbiol 102:95-105.
10. Gómez-López VM, Ragaert P, Jeyachchandran V, Debevere J, Devlieghere F. 2008. Shelf-life of minimally processed lettuce and cabbage treated with gaseous chlorine dioxide and cysteine. Int J Food Microbiol 121:74-83.
11. Han Y, Floros JD, Linton RH, Nielsen SS, Nelson PE. 2001. Response surface modeling for the inactivation of *Escherichia coli* O157:H7 on green peppers (*Capsicum annuum* L.) by chlorine dioxide gas treatments. J Food Prot 64:1128-1133.
12. Han Y, Shelby TL, Schultze KK, Nelson PE, Linton RH. 2004. Decontamination of strawberries using batch and continuous chlorine dioxide gas treatments. J Food Prot 67:2450-2455.
13. Li Y, Zhu N, Jia H, Wu J, Yi Y, Qi J. 2012. Decontamination of *Bacillus subtilis* var. *niger* spores on selected surfaces by chlorine dioxide gas. J Zhejiang Univ Sci B 13:254-260.
14. Linton RH, Han Y, Selby TL, Nelson PE. 2006. Gas-/vapor-phase sanitation (decontamination) treatments. In Microbiology of fruits and vegetables. 1st ed. Sapers GM, Gorny JR, Yousef AE (ed). CRC Press, Boca Raton, FL.
15. Mahmoud BSM, Linton RH. 2008. Inactivation kinetics of inoculated *Escherichia coli* O157:H7 and *Salmonella* enterica on lettuce by chlorine dioxide gas. Food Microbiol 25:244-252.
16. Martnez-Hernndez GB, Huertas JP, Navarro-Roco J, Gomez PA, Art F, Palop A, Art-Hernndez F. 2015. Inactivation kinetics of foodborne pathogens by UV-C radiation and its subsequent growth in fresh-cut kailan-hybrid broccoli. Food Microbiol 46:263-271.
17. Morino H, Fukuda T, Miura T, Shibata T. 2011. Effect of low-concentration chlorine dioxide gas against bacteria and viruses on a glass surface in wet environments. Lett Appl Microbiol 53:628-634.
18. Neal JA, Marquez-Gonzalez M, Cabrera-Diaz E, Lucia LM, O'Bryan CA, Crandall PG. 2012. Comparison of multiple chemical sanitizers for reducing *Salmonella* and *Escherichia coli* O157:H7 on spinach (*Spinacia oleracea*) leaves. Food Res Int 45:1123-1128.
19. Park SH, Kang DH. 2015. Antimicrobial effect of chlorine dioxide gas against foodborne pathogens under differing conditions of relative humidity. Lebensm Wiss Technol 60:186-191.

20. Park SH, Kang DH. 2017. Influence of surface properties of produce and food contact surfaces on the efficacy of chlorine dioxide gas for the inactivation of foodborne pathogens. Food Control 81:88-95.
21. Park SH, Kang DH. 2018. Effect of relative humidity on inactivation of foodborne pathogens using chlorine dioxide gas and its residues on tomatoes. Lett Appl Microbiol 67:154-160.
22. Prodduk V, Annous BA, Liu L, Yam KL. 2014. Evaluation of chlorine dioxide gas treatment to inactivate *Salmonella* enterica on mungbean sprouts. J Food Prot 11:1876-1881.
23. Peleg M. 1999. On calculating sterility in thermal and non-thermal preservation methods. Food Res Int 32:271-278.
24. Popa I, Hanson EJ, Todd ECD, Schilder AC, Ryser ET. 2007. Efficacy of chlorine dioxide gas sachets for enhancing the microbiological quality and safety of blueberries. J Food Prot 70:2084-2088.
25. Ross T. 1996. Indices for performance evaluation of predictive models in food microbiology. J Appl Microbiol 81:501-508.
26. Sun X, Bai J, Ference C, Wang Z, Zhang Y, Narciso J, Zhou K. 2014. Antimicrobial activity of controlled-release chlorine dioxide gas on fresh blueberries. J Food Prot 7:1127-1132.
27. Sy KV, Murray MB, Harrison MD, Beuchat LR. 2005. Evaluation of gaseous chlorine dioxide as a sanitizer for killing *Salmonella*, *Escherichia coli* O157:H7, *Listeria monocytogenes*, yeasts, and molds on fresh and fresh-cut produce. J Food Prot 68:1176-1187.
28. Trinetta V, Linton RH, Morgan MT. 2013. The application of high-concentration short-time chlorine dioxide treatment for selected specialty crops including Roma tomatoes (*Lycopersicon esculentum*), cantaloupes (*Cucumis melo* ssp. *melo* var. *cantaloupensis*) and strawberries (*Fragaria × ananassa*). Food Microbiol 34:296-302.
29. Trinetta V, Vaid R, Xu Q, Linton RH, Morgan M. 2012. Inactivation of *Listeria monocytogenes* on ready-to-eat food processing equipment by chlorine dioxide gas. Food Control 26:357-362.
30. US Food and Drug Administration (US FDA). 2002. Ultraviolet radiation for the processing and treatment of food. Code of Federal Regulations, 21 Part 179.39.
31. Vaid R, Linton RH, Morgan MT. 2010. Comparison of inactivation of *Listeria monocytogenes* within a biofilm matrix using chlorine dioxide gas, aqueous chlorine dioxide and sodium hypochlorite treatments. Food Microbiol 27:979-984.
32. Van Boekel MA. 2002. On the use of the Weibull model to describe thermal inactivation of microbial vegetative cells. Int J Food Microbiol 74:139-159.
33. Vandekinderen I, Devlieghere F, Van Camp J, Kerkaert B, Cucu T, Ragaert P, De Bruyne J, De Meulenaer B. 2009. Effects of food composition on the inactivation of foodborne microorganisms by chlorine dioxide. Int J Food Microbiol 131:138-144.
34. Wang T, Wu J, Qi J, Hao L, Yi Y, Zhang Z. 2016. Kinetics of inactivation of *Bacillus subtilis* subsp. *niger* spores and *Staphylococcus albus* on paper by chlorine dioxide gas in an enclosed space. Appl Environ Microbiol 82:3061-3069.
35. Wu VCH, Rioux A. 2010. A simple instrument-free gaseous chlorine dioxide method for microbial decontamination of potatoes during storage. Food Microbiol 27:179-184.