



Microbial inactivation modeling and salting characteristics of shredded kimchi cabbages (*Brassica pekinensis* L.) treated with radio frequency heating

Eun Ji Choi, Hae Woong Park, Jung Gyu Lee, Ho Hyun Chun*

Advanced Process Technology and Fermentation Research Group, World Institute of Kimchi, Gwangju 61755, Korea

라디오파 가열 처리한 절단 배추의 미생물 불활성 모델링 및 절임 특성

최은지 · 박해웅 · 이중규 · 천호현*

세계김치연구소 신공정발효연구단

Abstract

This study investigated the effect of radio frequency (RF) heating at 27.12 MHz on the inactivation of pre-existing microorganisms and salting characteristics of shredded kimchi cabbages. Samples of shredded kimchi cabbages were subjected to 27.12 MHz RF heating at different power levels (1,000 and 1,500 W) or to hot water (HW) at 60 and 70 °C. RF heating at 1,500 W for 3 min reduced the populations of aerobic bacteria, yeast and molds, coliforms, and lactic acid bacteria in the shredded kimchi cabbage samples by 2.56, 1.26, 4.36, and 4.31 log CFU/g, respectively; moreover, survival plots fitted using the Weibull model for 1,500 W RF heating yielded D_r values of 1.92, 2.66, 1.81, and 0.75 min, respectively. The salinity of shredded kimchi cabbages treated with RF and HW heating increased more rapidly than that of the control during salting. With respect to the moisture content and hardness in the shredded kimchi cabbages, no significant differences were observed among the treatments, after salting for 4 h. In addition, the surface temperature distributions of the RF-heated samples were relatively uniform compared to those of the HW-heated samples. These results clearly indicated that the RF heating technology has the potential to decontaminate kimchi cabbages of pre-existing microorganisms, before the salting process.

Key words : shredded kimchi cabbage, radio frequency, microbial inactivation, salting, quality

서 론

김치는 한국인 식생활에서 가장 중요한 위치를 차지하는 부식이다(1). 2016년 국민영양통계에 따르면 김치는 국내 다소비 식품 중 3순위로서 국민 1인당 1일 섭취량이 약 62.4 g이다. 최근에는 맛별이 가구와 단체급식 증가, 가공식품산업의 발달로 식생활 소비환경이 변화함에 따라 산업적으로 대량 생산되는 상품 김치를 구매하거나 절임배추 상품

을 준비하여 김치를 담그는 가정이 늘어나고 있다(2).

특히 배추김치의 주원료인 절임배추는 밭에서 수확한 배추를 정선 후 절단, 염수 절임, 세척 및 탈수를 거쳐 비가열 제조되는데 토양 미생물과 병원성 미생물을 제거하는 공정이 절임배추의 위생과 품질 표준화에 결정적인 영향을 미친다(3). 절임배추 상품을 제조하는 김치가공업체들은 절임배추 구매 후 세척 없이 이용하는 방법을 권고하고 있으며 실제 대부분 소비자들도 구매한 절임배추를 세척하지 않고 바로 이용하는 경우가 많아 위생적인 절임배추 생산에 대한 요구가 높다. 그러나 김치가공업체나 배추 산지 작목반에서 관행적으로 이용하는 절임 후 수돗물 세척방법은 절임배추에 존재하는 초기 미생물을 감소시키는데 효과적이지 못하다(4). 현재 국내에서 유통 중인 절임배추의 미생물 오염도는 호기성 세균 수 4.7-7.1 log CFU/g, 대장균군 2.1-4.4 log CFU/g, 유산균 3.6-6.7 log CFU/g과 *Bacillus*

*Corresponding author. E-mail : hhchun@wikim.re.kr
 Phone : 82-62-610-1761, Fax : 82-62-610-1850
 Received 18 September 2018; Revised 5 November 2018;
 Accepted 7 November 2018.
 Copyright © The Korean Society of Food Preservation. All rights reserved.

cereus 1.0-2.0 log CFU/g 수준을 나타내고 있다(5,6).

지금까지 절임배추에 미생물 오염원을 감소시키기 위한 방법으로 절임 후 세척 단계에서 오존(7), 전해수(8) 또는 염소계 화합물(9) 등 화학적 살균제를 이용한 연구가 수행된 바 있지만 이취 발생, 작업자의 건강 유해 등 문제점이 발생할 우려가 있다. 특히 염소계 살균제는 식품 중 유기물과 반응하여 클로로페놀이나 트리할로메탄을 생성하고 잔류염소 때문에 실제 절임배추 가공현장에서 이용하기가 쉽지 않다(10). 따라서 절임배추의 미생물학적 안전성 확보를 위해 제조 공정 중 효과적인 미생물 제어 기술 적용이 반드시 필요하다.

채소 가공 중 가열 전처리는 shelf-life 연장을 위한 전략으로 이용되어져 왔다(11). 특히 저온 가열 살균은 채소의 미생물학적 안전성 확보와 효소 산화 불활성에 의한 품질 유지를 목적으로 하는 가장 보편적인 가열기술이다(12). 최근에는 라디오파 유전 가열(radio frequency dielectric heating) 기술을 이용한 급속 저온 가열 살균에 관심이 증대되고 있다(13). 관행적인 저온 가열은 60-90°C 열풍이나 열수를 이용하여 열전달과 열확산으로 채소 조직표면에 미생물을 살균시킨다(14). 반면 라디오파를 이용한 식품 가열의 원리는 전기장이 양과 음으로 진동할 때 식품 내부에 극성을 가지는 물분자가 회전하고 충돌하며 발생하는 운동 및 마찰에너지가 열에너지로 바뀌면서 식품의 온도를 높이는 것이다(15). 13.56, 27.12와 40.68 MHz 라디오파 가열은 915 또는 2,450 MHz 마이크로파와 비교하여 식품에 침투 깊이가 높아 식품 내부 가열이 균일한 장점이 있다(16).

국외에서는 라디오파 에너지를 이용한 식품 가열 살균 연구가 활발히 수행되고 있다. 2018년 Kou 등(17)은 27.12 MHz 라디오파 처리에 따른 사과 주스와 으깬 감자에 접종된 *Escherichia coli*와 *Staphylococcus aureus* 감소 효과를 보고하였다. 2017년 Geveke 등(15)은 라디오파 가열과 열수 병합처리가 열수 단독처리와 비교하여 계란 저온살균에 소요되는 시간을 약 60% 감소한다는 결과를 발표하였다. 국내에서는 라디오파 가열 살균 연구 관련하여 아몬드, 고춧가루 또는 후추에 인위적으로 오염시킨 *Salmonella typhimurium*, *E. coli* O157:H7 등 병원성 미생물 감소 효과가 보고된 바 있다(18-20). 그러나 신선 배추에 오염미생물 불활성을 위한 라디오파 가열기술 적용 연구는 현재까지 수행된 바 없다.

따라서 본 연구는 27.12 MHz 라디오파와 열수 가열처리가 절단 배추에 존재하는 호기성 세균, 효모 및 곰팡이, 대장균군과 유산균의 불활성에 미치는 영향과 미생물 생존 곡선을 설명할 수 있는 적합한 모델을 구명하고 가열처리한 배추의 절임 특성에 대한 기초 자료를 확보하고자 수행하였다.

재료 및 방법

실험 재료

본 실험에 사용한 배추(*Brassica pekinensis* L.) 시료는 2018년 7월 강원도 정선에서 수확한 '춘광' 품종을 광주 남구 소재 농수산물 도매시장에서 구입 후 겉잎과 비가식 부위를 제거하여 준비하였다. 1차 정선한 배추 줄기 부위는 멸균 처리한 칼을 이용하여 가로 4±0.5 cm와 세로 3±0.5 cm 크기로 절단 후 배추의 가열 전처리와 염수 절임에 이용하였다.

라디오파 가열과 열수 처리

라디오파와 열수 가열 처리를 위해 절단 배추 시료는 300 g을 칭량하여 멸균된 low-density polyethylene(LDPE) film bag에 각각 밀봉 포장 하였다. 라디오파 가열은 27.12 MHz 라디오파 가열 시스템(FRT-5, Yamamoto Vinita Corp., Ltd., Osaka, Japan)을 이용하여 시료와 상부 electrode의 간격을 40 mm로 설정하고 1,000과 1,500 W 출력에서 시료를 각각 1, 2와 3분 처리하였다. 열수 가열은 수온이 60±1과 70±1°C로 유지된 water bath(VS-1205SW1, Vision Scientific Corp., Bucheon, Korea)에 밀봉된 배추 시료를 각각 5, 10, 15와 20분 처리하였다. 가열 처리를 하지 않은 절단 배추를 대조구로 비교하였다.

가열 처리에 따른 절단 배추의 미생물 수 변화 측정

라디오파와 열수 가열 처리에 따른 절단 배추의 미생물 수 변화를 분석하기 위해 시료 25 g은 0.85% 멸균 생리식염수 225 mL가 담긴 멸균 필터 stomacher bag에 넣은 후 stomacher(Bagmixer R400, Interscience Inc., Saint Nom, France)를 이용해 3분간 균질화 시켰다. 균질화 된 용액은 0.85% 멸균 생리식염수로 10배수 연속 희석한 후 희석액 1 mL를 각각의 배지에 분주하였다. 호기성 세균은 3M Petrifilm™ aerobic count plate(Petrifilm AC, 3M Co., St. Paul, MN, USA)를 사용하여 37°C에서 48시간 배양 후 붉은 집락수를 계수하였다. 효모 및 곰팡이는 3M Petrifilm™ yeast and mold count plate(Petrifilm YM, 3M Co.)를 사용하여 25°C에서 72시간 배양 후 녹색 집락수를 계수하였다. 대장균군은 3M Petrifilm™ coliform count plate(Petrifilm CC, 3M Co.)를 사용하여 37°C에서 24시간 배양 후 기포가 생성된 붉은 집락수를 계수하였다. 유산균은 de Man, Rogosa and Sharpe agar(MRS, Difco, Detroit, MI, USA)를 사용하여 37°C에서 48시간 혐기배양 후 노란 발색 반응을 나타낸 집락수를 계수하였다. 검출된 미생물 수는 시료 g당 colony forming unit(CFU)로 나타냈고 3회 반복하여 측정하였다.

절단 배추의 미생물 불활성화 모델링

라디오파와 열수 가열 처리에 의한 절단 배추에 호기성 세균, 효모 및 곰팡이, 대장균군과 유산균 불활성은 first-order kinetic과 Weibull 모델을 각각 이용하여 설명하였다. First-order kinetic 모델은 아래의 수식을 이용하였고 선형 inactivation curve에 유효하다(21).

$$\log \frac{N}{N_0} = -KH_t$$

N_0 은 시료의 초기 미생물 수, N 은 라디오파 가열 처리 후 시료의 미생물 수, K 는 1차 반응 상수, H_t 는 라디오파 또는 열수 가열 시간(분)을 각각 나타낸다. 한편 살균처리에 따른 microbial inactivation curve가 비선형을 나타낼 때는 Weibull 모델이 적합하다(22). Weibull 모델은 아래의 수식을 이용하였으며 α 와 β 값은 Microsoft Excel 2015에 non-linear least-squares regression 해 찾기 기능을 이용하여 분석하였다.

$$\log \frac{N}{N_0} = -\frac{1}{2.303} \left(\frac{H_t}{\alpha} \right)^\beta$$

α 는 characteristic 처리시간, β 는 shape parameter이다. D_t 은 미생물 수 90% 감소에 필요한 가열처리 시간으로 아래의 수식을 이용하여 분석하였다.

$$D_t = \alpha \times (2.303)^{1/\beta}$$

가열 처리에 따른 절단 배추의 내부온도 time-temperature 와 표면온도 분포 변화 분석

절단 배추 시료의 중심부에 광섬유온도센서(FOTEMP4, Optocon AG, Dresden, Germany)를 삽입하고 라디오파와 열수 가열 중 처리 시간에 따른 온도 변화를 분석하였다. 라디오파와 열수 가열 처리 직후 절단 배추 표면온도 분포는 적외선 카메라(A655SC, FLIR Systems, Stockholm, Sweden)를 이용하여 측정하였다. 시료의 표면온도 하강과 측정오류를 최소화하기 위해 시료의 온도 측정은 20초 이내로 완료하였다. 또한 표면온도 편차는 직사각형 시료 바깥쪽으로부터 1.5 cm를 제외한 부분의 최고온도와 최저온도 차이로 분석하였다.

절입 중 가열 처리한 절단 배추의 염도, 수분함량 및 경도 변화 분석

절단 배추의 절입을 위한 염수는 1차 증류수에 정제염(Hanju Corp., Ulsan, Korea)을 10% 농도로 첨가하여 준비하였다. 라디오파 또는 열수 가열 처리한 절단 배추는 10% 염수가 담긴 5 L 비커에 1:2(w/v) 비율로 침지시키고 15℃

incubator에서 4시간 동안 절입을 실시하였다. 절입 중 절단 배추의 염도는 Mohr 적정법을 이용하여 분석하였다. 마쇄한 배추 시료 1 g은 증류수로 50배 희석하여 여과하였다. 여과액 10 mL에 지시약 2% potassium chromate 1 mL를 가한 뒤 0.02 N AgNO₃ 용액으로 갈색이 되는 시점을 종말점으로 적정하였다. 0.02 N AgNO₃ 용액의 소비량을 통해 염도(%)를 계산하였다. 절단 배추의 수분함량은 시료 1 g을 aluminum weighting dish에 취한 후 적외선 수분측정기(MB45, Ohaus Co., Pine Brook NJ, USA)를 이용하여 측정하였다. 절단 배추의 경도는 texture analyzer(TA-XT2, Stable Micro System Ltd., Surrey, UK)를 사용하여 penetration test를 행하였다. Choi 등(4)의 선형 연구 방법을 참고하여 지름 2 mm cylindrical probe가 0.5 mm/s test speed와 10 mm 깊이로 배추 조직을 통과시킬 때 얻어지는 최대값을 측정하였다. 측정 횟수는 각 처리구 당 절단 배추 조각을 무작위로 10개 선발하여 반복 측정 후 평균값을 구하여 kg으로 나타내었다.

통계처리

모든 실험은 3회 이상 반복하여 측정하였으며 실험 결과는 평균값±표준편차로 나타났다. 처리평균 간의 유의성 검정은 SPSS(Statistical Package for the Social Science, Version 19, SPSS Inc., Chicago, IL, USA) program을 이용하여 $p < 0.05$ 수준에서 Duncan's multiple range test 방법으로 다중비교를 실시하였다.

결과 및 고찰

라디오파와 열수 가열에 따른 절단 배추에 오염된 미생물 불활성 효과

절입배추의 위생 상태와 품질에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 절입배추에 생육하는 미생물 수이다(23). 1,000과 1,500 W 라디오파 또는 60과 70℃ 열수 가열처리에 따른 절단 배추에 호기성 세균, 효모 및 곰팡이, 대장균군과 유산균의 생존곡선은 Fig. 1에 나타냈다. 본 연구에 사용한 배추 시료의 호기성 세균, 효모 및 곰팡이, 대장균군과 유산균의 분포는 2.55-5.29 log CFU/g의 수준으로 나타났다(data not shown). Oh 등(24)은 국산 배추의 재배기간 중 배추잎 표면에 *Staphylococcus aureus*와 *B. cereus*가 약 2.0-4.0 log CFU/g 수준으로 유지한 결과를 보고한 바 있다. 따라서 절입 전 배추 원료의 미생물 오염도를 낮출 있는 살균공정이 필요함이 확인되었다.

1,000 W 라디오파 3분 처리는 절단 배추에 호기성 세균, 효모 및 곰팡이, 대장균군과 유산균 수를 각각 1.88, 1.04, 4.36과 2.62 log CFU/g 감소시켰다. 1,500 W 라디오파의 경우, 3분 처리 후 대장균군과 유산균 수는 각각 4.36와

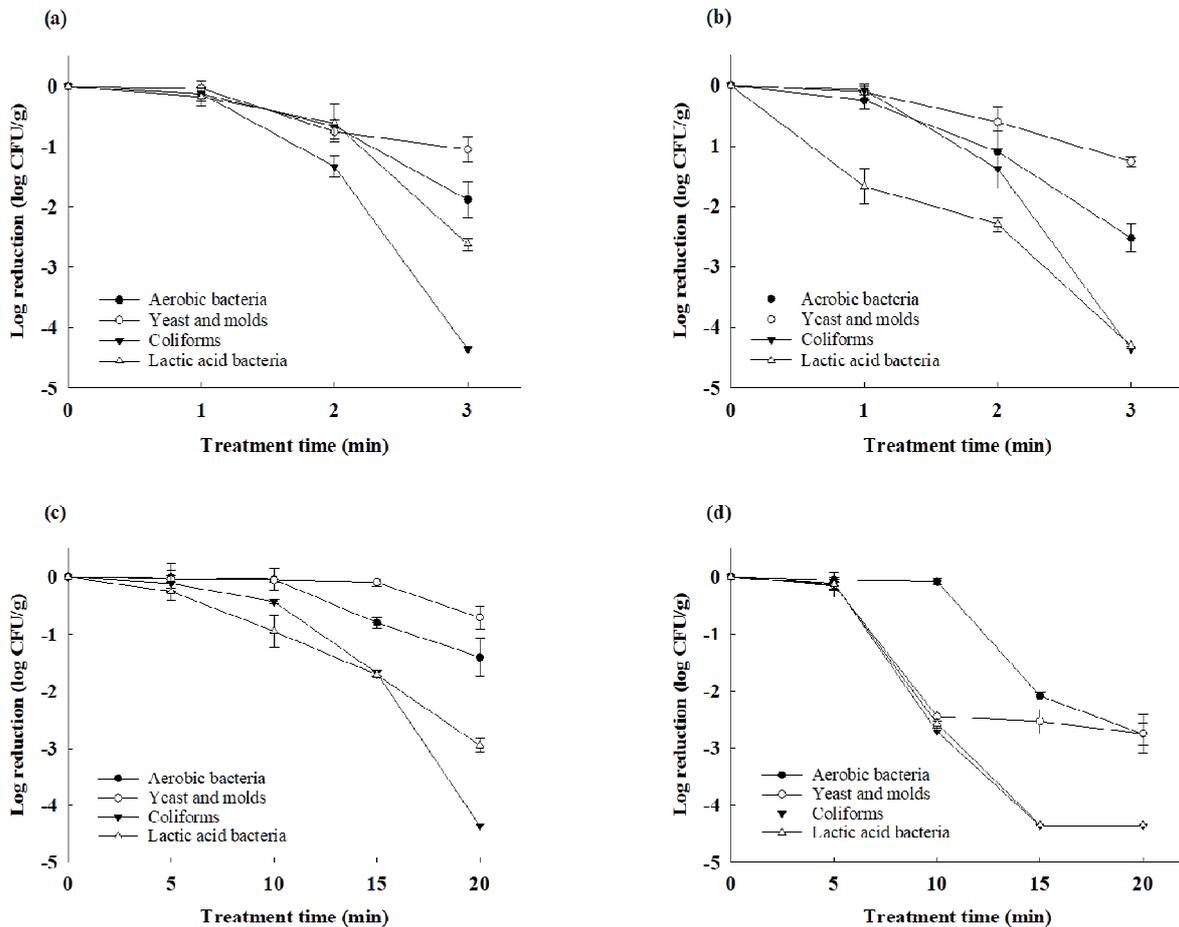


Fig. 1. Effect of radio frequency at 1,000 (a) and 1,500 W (b), and hot water heating at 60 (c) and 70°C (d) on the survival of pre-existing microorganisms on shredded kimchi cabbages.

Each point represents the mean for triplicates and error bars show standard deviations.

4.31 log CFU/g까지 감소하였다. 반면 60과 70°C 열수 5분 처리는 절단 배추에 존재하는 호기성 세균, 효모 및 곰팡이, 대장균군, 유산균 수를 효과적으로 감소시키지 못했다. 특히 호기성 세균은 60과 70°C 열수 10분 처리까지 뚜렷한 감균효과를 보이지 않았다. 절단 배추에 대장균군과 유산균 수는 60°C 열수 20분 처리로 각각 4.36과 2.95 log CFU/g 까지 감소하였다. 또한 70°C 열수 15분 처리는 절단 배추에 대장균군과 유산균 수는 4.36과 4.34 log CFU/g 감소시켰으며 이는 1,500 W 라디오파 3분 처리와 유사한 저해효과를 나타냈다. 이러한 결과는 절단 배추에 오염된 미생물 종류에 따라 미생물의 일정한 수를 사멸시키는데 필요한 가열 온도와 처리 시간이 다를 수 있음을 입증하였다. Orsat 등(25)은 27.12 MHz 라디오파 가열 2분 이내 처리로 진공 포장한 ready-to-eat 당근에 오염된 호기성 세균을 효과적으로 감소시켰다고 보고하였는데 본 연구결과와 유사하였다. Lui 등(26)도 27.12 MHz 라디오파 처리가 채심에 호기성 세균수를 3 log CFU/g 이상 감소시킨 결과와 라디오파 가열 시스템의 챔버 내 시료가 위치한 상부와 하부 electrode 간격과

처리 시간에 따라 살균 효과 차이가 있음을 보고하였다. 따라서 27.12 MHz 라디오파 유전가열은 열수 가열에 비해 절단 배추에 오염된 미생물 불활성에 소요되는 시간을 효과적으로 절감할 수 있는 것으로 판단된다.

절단 배추의 미생물 생존곡선 모델링

라디오파와 열수 가열에 대한 절단 배추에 오염된 미생물의 저해 감수성을 알아보기 위해 라디오파와 열수 가열 처리에 따른 미생물 생존 곡선 결과를 first-order kinetic 모델과 Weibull 모델에 각각 적용시키고 모델들의 적합성을 확인하였다.

1,000 W 라디오파 가열에 따른 호기성 세균, 효모 및 곰팡이, 대장균군과 유산균 수 변화에 대한 Weibull 모델의 root mean square error(RMSE) 값은 각각 0, 0.12, 0.03과 0.06인 반면 first-order kinetic 모델의 RMSE 값은 0.32, 0.16, 0.84와 0.54로 나타났다(Table 1). 1,500 W 라디오파 가열에 따른 호기성 세균, 효모 및 곰팡이, 대장균군과 유산균의 생존곡선도 Weibull 모델의 RMSE 값이 0.01-0.29로

Table 1. Evaluation of two models estimating the reductions in pre-existing microorganisms on shredded kimchi cabbages after radio frequency heating at 1,000 and 1,500 W, and after hot water heating at 60 and 70 °C

Microorganism	Model	RMSE ¹⁾				R ²			
		1,000 W radio frequency	1,500 W radio frequency	60 °C hot water	70 °C hot water	1,000 W radio frequency	1,500 W radio frequency	60 °C hot water	70 °C hot water
Aerobic bacteria	First-order	0.32	0.34	0.29	1.18	0.86	0.91	0.81	0.81
	Weibull	0.00	0.01	0.10	0.36	1.00	1.00	0.97	0.91
Yeast and molds	First-order	0.16	0.17	0.18	1.49	0.90	0.92	0.60	0.82
	Weibull	0.12	0.03	0.03	0.51	0.93	1.00	0.99	0.83
Coliforms	First-order	0.84	0.84	0.74	0.64	0.83	0.83	0.88	0.90
	Weibull	0.03	0.06	0.72	0.63	1.00	1.00	0.88	0.90
Lactic acid bacteria	First-order	0.54	0.29	0.30	0.62	0.79	0.97	0.95	0.90
	Weibull	0.06	0.29	0.05	0.61	1.00	0.97	1.00	0.90

¹⁾Root mean square error.

Table 2. Weibull model parameters for the inactivation of pre-existing microorganisms on the shredded kimchi cabbages after radio frequency and hot water heating

Heating treatment	Microorganism	α ¹⁾	β ²⁾	Dr-value ³⁾
1,000 W radio frequency	Aerobic bacteria	1.70	2.56	2.35
	Yeast and molds	1.64	1.53	2.83
	Coliforms	1.37	2.96	1.82
	Lactic acid bacteria	1.79	3.49	2.28
1,500 W radio frequency	Aerobic bacteria	1.29	2.08	1.92
	Yeast and molds	1.73	1.96	2.66
	Coliforms	1.36	2.92	1.81
	Lactic acid bacteria	0.33	1.02	0.75
60 °C hot water	Aerobic bacteria	12.91	2.73	17.52
	Yeast and molds	18.63	7.01	20.99
	Coliforms	2.44	1.16	5.02
	Lactic acid bacteria	6.65	1.73	10.76
70 °C hot water	Aerobic bacteria	8.58	2.25	12.42
	Yeast and molds	2.10	0.86	5.51
	Coliforms	2.17	1.09	4.66
	Lactic acid bacteria	2.29	1.12	4.83

¹⁾Characteristic time using radio frequency and hot water heating (min).

²⁾Shape parameter.

³⁾Radio frequency and hot water heating time (s) required for 90% reduction of the counts of pre-existing microorganisms.

first-order kinetic 모델의 RMSE 값인 0.17-0.84와 비교하여 대부분 작게 나타났다. 또한 1,000과 1,500 W 라디오파 가열 처리한 절단 배추의 미생물 생존곡선에 적용된 Weibull 모델 correlation coefficients(R²)는 0.93-1.00으로 first-order kinetic 모델의 0.79-0.97과 비교하여 이상적인 1에 가까운 값을 나타내었다. 따라서 1,000과 1,500 W 라디오파 가열 처리를 이용한 절단 배추에 호기성 세균, 효모

및 곰팡이, 대장균군과 유산균 불활성화 모델은 비선형 Weibull 모델이 first-order kinetic 모델에 비해 높은 적합성으로 나타났다. 60과 70 °C 열수 가열에 따른 호기성 세균, 효모 및 곰팡이, 대장균군과 유산균의 생존곡선도 first-order kinetic 모델에 비해 Weibull 모델에서 낮은 RMSE 값과 높거나 같은 R²를 보여 비선형 모델이 더 적합하였다. Hu 등(27)은 27.12 MHz 라디오파 가열 처리에 따른 고춧가루에 접종된 *Salmonella typhimurium* 생존곡선이 Weibull 모델에 높은 적합성을 나타냈다고 보고한 바 있다. 27.12 MHz 라디오파와 열풍을 병합한 가열 방법을 이용한 밤에 인위적으로 오염시킨 *Penicillium crustosum*, *Penicillium discolor*와 *Penicillium expansum*의 사멸곡선의 경우도 Weibull 모델이 first-order kinetic 모델에 비해 높은 R²값을 보인 결과가 보고되었다(28).

Weibull 모델의 α 와 β 파라미터는 호기성 세균, 효모 및 곰팡이, 대장균군과 유산균의 생존 곡선 형태를 설명한다. Weibull 모델의 α 값은 스케일 파라미터로서 온도 의존성을 가지고 있으며 α 파라미터 값의 대수는 온도와 선형적으로 관련된다(29). 1,500 W 라디오파 가열에 따른 호기성 세균, 효모 및 곰팡이, 대장균군과 유산균 수 변화 결과를 적용한 Weibull 모델의 α 값은 각각 1.29, 1.73, 1.36과 0.33분으로 나타났다. 반면 60 °C 열수 가열에 따른 효모 및 곰팡이의 생존곡선을 적용한 Weibull 모델의 α 값은 18.63분으로 가장 큰 값을 보였다. α 값의 변화는 미생물 생존 곡선의 기울기를 변화시키지만 형태에는 영향을 미치지 않는다(27).

한편 1,000과 1,500 W 라디오파 가열에 따른 호기성 세균, 효모 및 곰팡이, 대장균군과 유산균 생존곡선에 적용한 Weibull 모델의 β 값은 1.02-3.49로 1보다 크기 때문에 아래로 오목한 형태를 보인다. 또한 1,500 W 라디오파 가열에 따른 호기성 세균, 효모 및 곰팡이와 대장균군과 유산균의 Dr 값은 각각 1.92, 2.66, 1.81과 0.75분으로 나타났다. 따라서 1,500 W 라디오파 처리 3분 이내로 고춧가루에 존재하는

미생물 90% 이상 사멸이 가능하다고 판단된다.

70°C 열수 가열의 효모 및 곰팡이 저해 결과를 적용한 Weibull 모델 β 값은 0.86으로 위로 볼록한 형태를 나타냈다. 또한 60과 70°C 열수 가열에 따른 호기성 세균의 D_r 값은 각각 17.52와 12.42분으로 1,500 W 라디오파 가열의 D_r 값 1.92분과 비교하여 약 6.5배 이상 차이를 보였다.

가열 처리한 절단 배추의 절임 중 염도, 수분함량 및 경도 변화

1,000과 1,500 W 라디오파(3분)와 60과 70°C 열수(20분) 가열 처리한 배추의 염수 절임 중 염도, 수분함량 및 경도 변화를 측정된 결과는 Table 3에 나타내었다.

배추의 염수 절임공정은 삼투작용으로 배추 조직 내에 NaCl 확산과 수분 유출이 동시에 발생하는데 절임배추의 일정 수준 이상의 염도는 부패미생물 생육을 억제한다(30,31). 또한 절임배추의 염도는 소비자가 구매를 결정하는데 중요한 지표이다. 라디오파 또는 열수 가열 처리는 절임 중 절단 배추의 염도 변화에 유의적인($p<0.05$) 영향을 미쳤다(Table 3). 절임 1시간 후 1,000과 1,500 W 라디오파 처리한 절단 배추의 염도는 각각 3.02와 3.81%로 대조구(가열 처리하지 않은 절단 배추)의 2.40%와 유의적인($p<0.05$) 차이를 나타냈다. 또한 절임 4시간 후 1,000과 1,500 W 라디오파와 60과 70°C 열수 처리한 절단배추의 염도는 4.00-4.77%로 대조구에 비해 0.50-1.27% 높은 값을 보였다. 따라서 절임 전 배추 원료의 라디오파 급속가열 전처리배

추의 절임율을 높일 수 있을 것으로 판단된다.

1,000과 1,500 W 라디오파 3분 처리 후 절단 배추의 수분 함량은 각각 94.14와 93.84%, 60과 70°C 열수 20분 가열 처리한 절단 배추는 각각 93.43과 93.38%로 나타나 대조구의 초기 수분함량 94.05%와 유의적($p<0.05$) 차이를 보이지 않았다. 절임시간이 증가함에 따라 절단 배추의 수분함량은 감소하는 경향을 나타냈다. 그러나 절임 4시간 후 대조구의 수분함량은 89.50%로 1,000과 1,500 W 라디오파와 60과 70°C 열수 처리구와 유의적($p<0.05$) 차이를 나타내지 않았다.

가열 처리한 절단 배추의 경도를 측정된 결과(Table 3), 1,000과 1,500 W 라디오파 및 60과 70°C 열수 처리한 절단 배추의 경도는 각각 0.69, 0.68, 0.67과 0.72 kg로 나타나 대조구에 비해 0.12-0.17 kg의 높은 값을 나타냈다. 저온 가열 처리는 펙틴질 세포벽 구조를 강화시키는 pectinesterase 활성을 유도하여 채소 조직의 경도를 증가시킨다(32). 한편 80°C 이상의 고온에서 장시간 가열하면 배추의 세포막 파괴와 세포 팽창으로 조직 손상 현상이 발생하지만 60-70°C 저온 열처리하는 갈변반응에 관여하는 효소활성 억제와 미생물 감소시켜 저장 중 배추의 품질 변화를 방지할 수 있다(33). 절임 4시간 후 1,000과 1,500 W 라디오파 처리한 절단 배추의 경도는 0.78 kg이었으며 60과 70°C 열수 처리한 절단 배추는 각각 0.72와 0.77 kg으로 대조구와 비교하여 유의적인($p<0.05$) 차이가 없었다. 따라서 라디오파 또는 열수 가열 처리가 절단 절임배추의 경도에 부정적인 영향이 없음

Table 3. Changes in salinity, moisture content, and hardness of shredded kimchi cabbages treated with radio frequency and hot water heating during salting

Quality parameter	Heating treatment	Salting time (h)				
		0	1	2	3	4
Salinity (%)	Control	0.19±0.02 ^{1)(Cz2)}	2.40±0.06 ^{Ed}	2.81±0.01 ^{Ec}	3.26±0.01 ^{Eb}	3.50±0.02 ^{Da}
	1,000 W radio frequency	0.22±0.01 ^{ABc}	3.02±0.11 ^{Cc}	3.94±0.02 ^{Cc}	4.41±0.14 ^{Bb}	4.73±0.04 ^{Aa}
	1,500 W radio frequency	0.23±0.01 ^{Ad}	3.81±0.13 ^{Ac}	4.53±0.06 ^{Ab}	4.59±0.07 ^{Ab}	4.77±0.05 ^{Aa}
	60°C hot water	0.20±0.02 ^{BCd}	2.80±0.15 ^{Dc}	3.36±0.08 ^{Db}	3.93±0.05 ^{Da}	4.00±0.06 ^{Ca}
	70°C hot water	0.22±0.01 ^{ABc}	3.35±0.01 ^{Bd}	4.12±0.01 ^{Bc}	4.22±0.11 ^{Cb}	4.35±0.06 ^{Ba}
Moisture content (%)	Control	94.05±0.39 ^{Aa}	91.06±0.52 ^{Ab}	90.95±0.35 ^{Ab}	90.28±0.81 ^{Abc}	89.50±0.52 ^{Ac}
	1,000 W radio frequency	94.14±0.89 ^{Aa}	91.50±0.79 ^{Ab}	90.23±0.66 ^{Abc}	90.21±0.71 ^{Abc}	89.77±0.73 ^{Ac}
	1,500 W radio frequency	93.84±0.63 ^{Aa}	91.91±0.64 ^{Ab}	90.92±0.67 ^{Ab}	90.86±0.24 ^{Ab}	90.76±1.02 ^{Ab}
	60°C hot water	93.43±0.72 ^{Aa}	91.07±0.41 ^{Ab}	90.91±0.23 ^{Ab}	90.75±0.54 ^{Ab}	90.20±0.16 ^{Ab}
	70°C hot water	93.38±1.09 ^{Aa}	90.91±0.45 ^{Ab}	90.96±0.38 ^{Ab}	90.89±1.01 ^{Ab}	90.84±1.03 ^{Ab}
Hardness (kg)	Control	0.55±0.05 ^{Bb}	0.69±0.09 ^{Aab}	0.66±0.07 ^{Aab}	0.65±0.07 ^{Aab}	0.76±0.11 ^{Aa}
	1,000 W radio frequency	0.69±0.06 ^{Aa}	0.79±0.08 ^{Aa}	0.76±0.07 ^{Aa}	0.76±0.08 ^{Aa}	0.78±0.09 ^{Aa}
	1,500 W radio frequency	0.68±0.08 ^{Aa}	0.78±0.10 ^{Aa}	0.75±0.05 ^{Aa}	0.75±0.10 ^{Aa}	0.78±0.11 ^{Aa}
	60°C hot water	0.67±0.04 ^{Aa}	0.66±0.07 ^{Aa}	0.69±0.06 ^{Aa}	0.69±0.08 ^{Aa}	0.72±0.04 ^{Aa}
	70°C hot water	0.72±0.09 ^{Aa}	0.72±0.10 ^{Aa}	0.75±0.05 ^{Aa}	0.78±0.15 ^{Aa}	0.77±0.08 ^{Aa}

¹⁾Each value is mean±SD.

²⁾Mean values in the same column (^{A-E}) or row (^{a-c}) followed by different letters are significantly different according to Duncan's multiple range test ($p<0.05$).

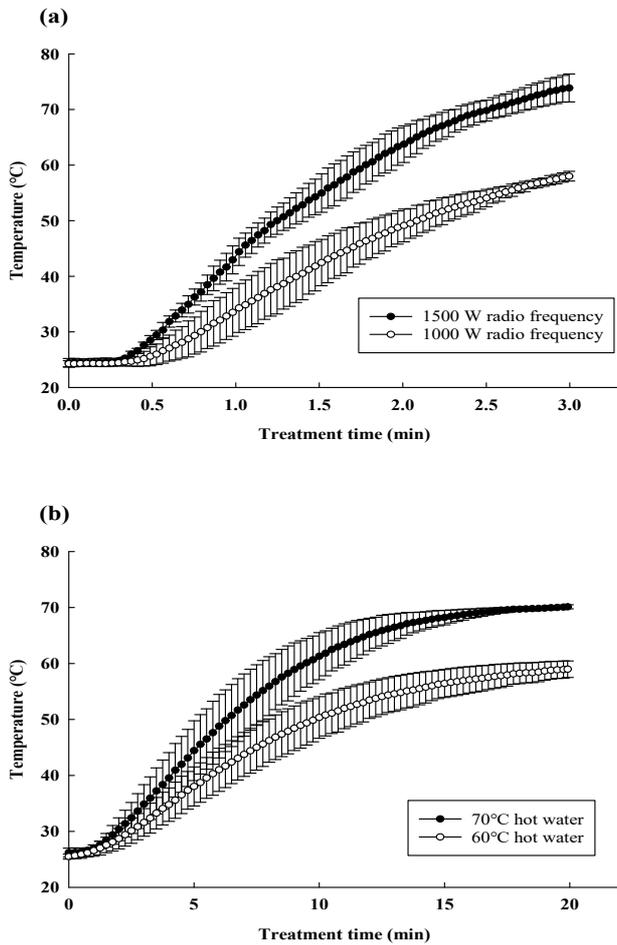


Fig. 2. Time-temperature profiles of shredded kimchi cabbage during radio frequency (a) and hot water (b) heating.

을 확인하였다.

가열 처리에 따른 절단 배추의 내부온도 time-temperature 와 표면온도 분포 변화

라디오파와 열수 가열 처리시간에 따른 절단 배추의 내부온도 변화는 Fig. 2에 나타내었다. 1,000과 1,500 W 라디오파 3분 처리 후 절단 배추의 내부온도가 각각 58과 74°C까지 빠르게 증가하였다. 절단 배추의 내부온도가 65°C까지 도달하는데 70°C 열수 처리는 11.88분 소요된 반면 1,500 W 라디오파 처리는 2.08분으로 가열 처리시간을 약 1/6배 수준으로 단축시킬 수 있었다. 본 연구결과 라디오파 유전 가열은 배추에 물분자가 전계 방향이 바뀔 때 발생시키는 마찰에너지를 열원으로 이용하기 때문에 열수에 의한 열전도 방식보다 급속하게 온도를 상승시키는 것으로 판단된다. Ozturk 등(34)에서 27.12 MHz 라디오 가열 시 옥수수 가루에 열전달속도는 5.52°C/min으로 85°C 열풍 가열의 12.71°C/min보다 빠르다고 보고한 결과는 본 연구 결과와 유사하였다. 1,000과 1,500 W 라디오파와 60과 70°C 열수의 처리시간에 따른 절단 배추의 표면온도 분포 변화를 관찰한 결과는 Fig. 3에 제시하였다. 1,000과 1,500 W 라디오파 3분 가열 처리 후 절단 배추의 표면온도 편차는 각각 2.03과 2.37°C로 균일한 분포를 나타냈다. 반면 60과 70°C 열수 20분 가열 처리된 절단 배추의 표면온도 편차는 각각 4.77과 7.23°C를 나타내 라디오파 가열 처리구에 비해 표면온도 분포가 불균일함을 확인하였다.

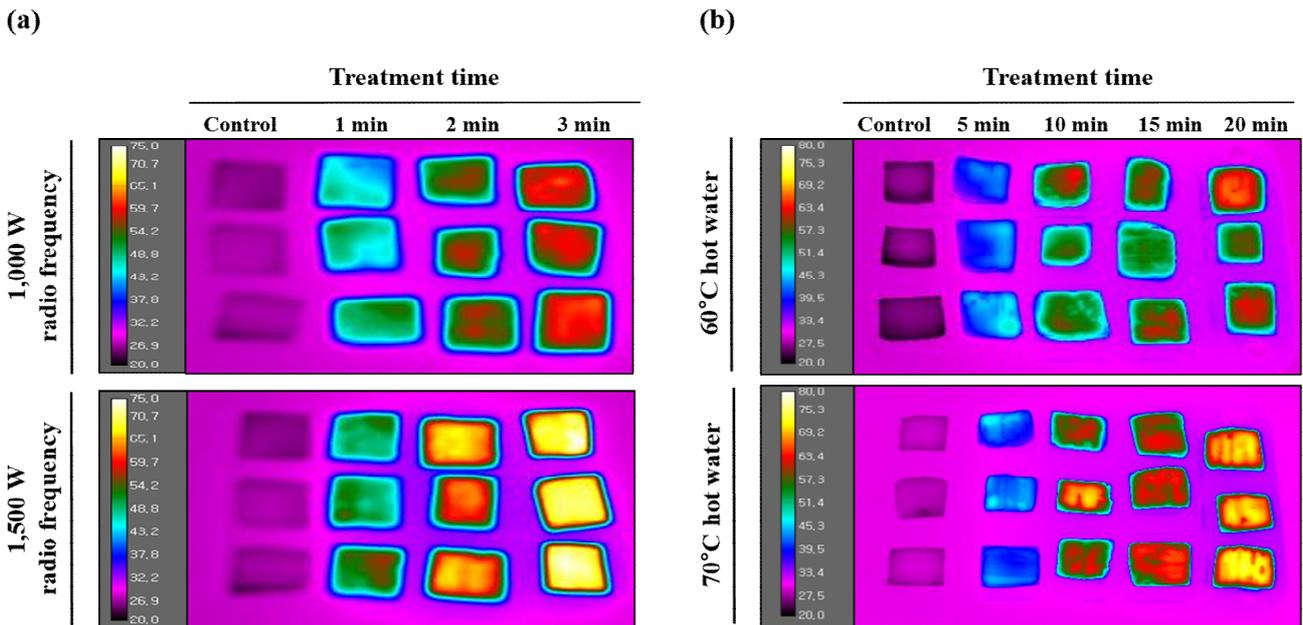


Fig. 3. The surface thermal distributions of shredded kimchi cabbage after radio frequency (a) and hot water (b) heating.

요 약

본 연구는 27.12 MHz 라디오파와 열수 가열에 따른 절단 배추의 미생물 불활성화 효과를 모델링하고 절입 중 가열 처리된 절단 배추의 이화학적 품질 변화에 미치는 영향을 살펴보았다. 1,500 W 라디오파 3분 가열은 절단배추에 호기성 세균, 효모 및 곰팡이, 대장균군과 유산균 수를 각각 2.56, 1.26, 4.36과 4.31까지 감소시켰다. 또한 라디오파와 열수 가열 처리에 따른 호기성 세균, 효모 및 곰팡이, 대장균군과 유산균의 생존곡선은 Weibull 모델에 높은 적합도를 나타냈다. 1,000과 1,500 W 라디오파 처리가 60과 70°C 열수 처리에 비해 절단 배추의 품온을 약 60-70°C까지 상승 시키는데 소요되는 시간이 적었으며 표면온도 분포도 균일함을 관찰하였다. 한편 10% 염수 절입 중 라디오파 또는 열수 가열 처리한 배추의 염도가 대조구에 비해 유의적으로 ($p < 0.05$) 빠른 증가를 보였다. 염수 절입 후 라디오파 또는 열수 가열 처리한 배추와 대조구의 수분함량과 경도는 유의적 차이가 없었다. 따라서 본 연구를 통해 절입배추 제조공정에 라디오파 급속 및 균일가열을 이용한 배추 전처리 기술의 적용 가능성을 확인하였다. 향후 2절 또는 4절 형태 배추 원료의 라디오파 가열 전처리를 위한 라디오파 출력과 처리시간 최적화 연구가 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 세계김치연구소 기관고유사업(KE1803-4-1, KE1801-1)의 연구비 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- Ha AW, Ju SY (2016) Nutrient intakes and frequently consumed foods among Korean adults according to the intake frequency of *Baechu* (Chinese cabbage) kimchi: Based on the 2012~2013 Korea national health and nutrition examination survey. *J Nutr Health*, 49, 125-133
- Song HY, Cheon SH, Yoo SR, Chung YB, Seo HY (2016) Changes in quality characteristics of salted Kimchi cabbage and kimchi paste during storage. *Korean J Food Preserv*, 23, 459-470
- Kim NH, Jang SH, Kim SH, Lee HJ, Kim Y, Ryu JH, Rhee MS (2015) Use of phytic acid and hyper-salting to eliminate *Escherichia coli* O157:H7 from napa cabbage for kimchi production in a commercial plant. *Int J Food Microbiol*, 214, 24-30
- Choi EJ, Chung YB, Han AR, Chun HH (2015) Combined effects of sanitizer mixture and antimicrobial ice for improving microbial quality of salted Chinese cabbage during low temperature storage. *J Korean Soc Food Sci Nutr*, 44, 1715-1724
- Kim HW, Jang JJ, Kim NH, Lee NY, Cho TJ, Kim SH, Rhee MS (2018) Factors that determine the microbiological quality of ready-to-use salted napa cabbage (*Brassica pekinensis*): Season and distribution temperature. *Food Control*, 87, 1-8
- Ku KH, Choi EJ, Jeong MC (2014) Comparison of quality characteristics between seasonal cultivar of salted-Kimchi cabbage (*Brassica rapa* L. ssp. *Pekinesis*). *Korean J Food Preserv*, 21, 512-519
- Lee KH (2008) Effect of ozone treatment for sanitation of Chinese cabbage and salted Chinese cabbage. *J Korean Soc Food Sci Nutr*, 37, 90-96
- Park SS, Sung JM, Jeong JW, Park KJ, Lim JH (2013) Quality changes of salted Chinese cabbages with electrolyzed water washing and a low storage temperature. *J Korean Soc Food Sci Nutr*, 42, 615-620
- Park SS, Sung JM, Jeong JW, Park KJ, Lim JH (2012) Efficacy of electrolyzed water and aqueous chlorine dioxide for reducing pathogenic microorganism on Chinese cabbage. *Korean J Food Sci Technol*, 44, 240-246
- Gomez-Lopez VM, Lannoo AS, Gil MI, Allende A (2014) Minimum free chlorine residual level required for the inactivation of *Escherichia coli* O157:H7 and trihalomethane generation during dynamic washing of fresh-cut spinach. *Food Control*, 42, 132-138
- Chhe C, Imaizumi T, Tanaka F, Uchino T (2018) Effects of hot-water blanching on the biological and physicochemical properties of sweet potato slices. *Eng Agric Environ Food*, 11, 19-24
- Wang J, Yang XH, Mujumdar AS, Wang D, Zhao JH, Fang XM, Zhang Q, Xie L, Gao ZJ, Xiao HW (2017) Effects of various blanching methods on weight loss, enzymes inactivation, phytochemical contents, antioxidant capacity, ultrastructure and drying kinetics of red bell pepper (*Capsicum annuum* L.). *LWT-Food Sci Technol*, 77, 337-347
- Rincon AM, Singh RK (2016) Inactivation of Shiga toxin-producing and nonpathogenic *Escherichia coli* in non-intact steaks cooked in a radio frequency oven. *Food Control*, 62, 390-396
- Castro SM, Saraiva JA, Lopes-da-Silva JA, Delgadillo

- I, Van Loey A, Smout C, Hendrickx M (2008) Effect of thermal blanching and of high pressure treatments on sweet green and red bell pepper fruits (*Capsicum annuum* L.). *Food Chem*, 107, 1436-1449
15. Geveke DJ, Bigley AB, Brunkhorst CD (2017) Pasteurization of shell eggs using radio frequency heating. *J Food Eng*, 193, 53-57
 16. Choi EJ, Yang HS, Park HW, Chun HH (2018) Inactivation of *Escherichia coli* O157:H7 and *Staphylococcus aureus* in red pepper powder using a combination of radio frequency thermal and indirect dielectric barrier discharge plasma non-thermal treatments. *LWT-Food Sci Technol*, 93, 477-484
 17. Kou X, Li R, Hou L, Zhang L, Wang S (2018) Identifying possible non-thermal effects of radio frequency energy on inactivating food microorganisms. *Int J Food Microbiol*, 269, 89-97
 18. Jeong SG, Baik OD, Kang DH (2017) Evaluation of radio-frequency heating in controlling *Salmonella enterica* in raw shelled almonds. *Int J Food Microbiol*, 254, 54-61
 19. Jeong SG, Kang DH (2014) Influence of moisture content on inactivation of *Escherichia coli* O157:H7 and *Salmonella enterica* serovar Typhimurium in powdered red and black pepper spices by radio-frequency heating. *Int J Food Microbiol*, 176, 15-22
 20. Kim SY, Sagong HG, Choi SH, Ryu S, Kang DH (2012) Radio-frequency heating to inactivate *Salmonella* Typhimurium and *Escherichia coli* O157:H7 on black and red pepper spice. *Int J Food Microbiol*, 153, 171-175
 21. Chun HH, Kim HJ, Won M, Chung KS, Song KB (2010) A comparison of kinetic models of foodborne pathogen inactivation by aqueous chlorine dioxide, fumaric acid, and ultraviolet-C. *J Korean Soc Appl Biol Chem*, 53, 243-248
 22. Bialka KL, Demirci A, Puri VM (2008) Modeling the inactivation of *Escherichia coli* O157:H7 and *Salmonella enterica* on raspberries and strawberries resulting from exposure to ozone or pulsed UV-light. *J Food Eng*, 85, 444-449
 23. Kim JH, Park KY, Choi HS, Yang JY (2010) Quality evaluation of conventional salted cabbages. *Korean J Food Nutr*, 23, 659-663
 24. Oh SY, Nam KW, Yoon DH (2017) Analysis of pathogenic microorganism's contamination and heavy metals on Kimchi cabbage by cultivation methods in Korea. *J Food Hyg Saf*, 32, 500-506
 25. Orsat V, Garipey Y, Raghavan GSV, Lyew D (2001) Radio-frequency treatment for ready-to-eat fresh carrots. *Food Res Int*, 34, 527-536
 26. Liu Q, Zhang M, Xu B, Fang Z, Zheng D (2015) Effect of radio frequency heating on the sterilization and product quality of vacuum packaged Caixin. *Food Bioprod Process*, 95, 47-54
 27. Hu S, Zhao Y, Hayouka Z, Wang D, Jiao S (2018) Inactivation kinetics for *Salmonella typhimurium* in red pepper powders treated by radio frequency heating. *Food Control*, 85, 437-442
 28. Hou L, Kou X, Li R, Wang S (2018) Thermal inactivation of fungi in chestnuts by hot air assisted radio frequency treatments. *Food Control*, 93, 297-304
 29. van Boekel MAJS (2002) On the use of the Weibull model to describe thermal inactivation of microbial vegetative cells. *Int J Food Microbiol*, 74, 139-159
 30. Park SS, Sung JM, Jeong JW, Park KJ, Lim JH (2013) Quality changes of salted Chinese cabbages with electrolyzed water washing and a low storage temperature. *J Korean Soc Food Sci Nutr*, 42, 615-620
 31. Han GJ, Son A, Lee SM, Jung JK, Kim SH, Park KY (2009) Improved quality and increased *in vitro* anticancer effect of kimchi by using natural sea salt without bitter and baked (Guwun) salt. *J Korean Soc Food Sci Nutr*, 38, 996-1002
 32. Woo NRY, Chung HK, Kang MH (2005) Properties of Korean traditional pepper pickle made by different preheating temperature treatments. *J Korean Soc Food Sci Nutr*, 34, 1219-1225
 33. Nugraedi PY, Dekker M, Widianarko B, Verkerk R (2016) Quality of cabbage during long term steaming; phytochemical, texture and colour evaluation. *LWT-Food Sci Technol*, 65, 421-427
 34. Ozturk S, Kong F, Singh, RK, Kuzy JD, Li C (2017) Radio frequency heating of corn flour: Heating rate and uniformity. *Innovative Food Sci Emerging Technol*, 44, 191-201