pISSN 1229-1153 / eISSN 2465-9223 *J. Food Hyg. Saf.*
Vol. 41, No. 1, pp. 32~41 (2026)
https://doi.org/10.13103/JFHS.2026.41.1.32

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

에어-스팀 레토르트 공정 최적화: 다양한 레토르트 운영 조건에서 온도 분포 평가

김병후†* · 이동빈† · 이현석 · 고은미 · 이종원 · 김종억 · 이진원 · 김평원 · 김태석
풀무원기술원 품질기술센터

Optimization of Air-Steam Retort Processing: Evaluation of Temperature Distribution under Various Conditions

Byoung Hu Kim†*, Dong Bin Lee†, Hyeon Seok Lee, Eun Mi Ko, Jong Won Lee, Jong Eok Kim, Jin Won Lee, Pyeong Won Kim, Tae Seok Kim
[1]*Food Quality Technology Center, Food Safety Division, Pulmuone Co., Ltd., Cheongju, Korea*

(Received April 6, 2025/Revised May 20, 2025/Accepted May 21, 2025)

ABSTRACT - The retort method refers to a food processing technology used for the reliable control of *Clostridium botulinum* spores, which are commercial food sterilization indicators. Depending on the retort conditions, problems such as temperature deviation, nutrient destruction, and deterioration of sensory quality could occur. In this study, we aimed to optimize an air–steam retort operated under overpressure by quantitatively evaluating heat distribution (HD) at 95°C and 121°C across positions and testing heat penetration (HP) to estimate F_0 under practical operating factors: product loading per tray (12, 18, and 28 units), steam supply (100%, 90%, and 80%), and pressure setpoints (0.3-0.7 kgf cm^2 at 95°C; 1.3-1.7 kgf cm^2 at 121°C). Positional HD assessments at both temperatures characterized the temperature deviation and consistently identified a floor-level cold point during the hold phase, thereby highlighting the risk of non-uniform heating inherent to air–steam systems. Overloading (28 ea/tray) and reduced steam supply (notably 80%) significantly worsened uniformity and reduced lethality at the cold spot (D3_d), whereas adequate pressure control improved the outcomes: at 121°C, F_0 at D3_d fell from 16.72±0.8 to 9.01±1.4 as the steam supply decreased from 100% to 80% (P<0.05), and increased from 14.84±1.1 to 19.12±1.2 as pressure rose from 1.3 to 1.7 kgf cm^2 (P<0.05). These results indicate that moderating tray loading, maintaining steam capacity, and precisely controlling overpressure are critical for securing target lethality at cold points, while limiting overprocessing elsewhere. This study provides an evidence-based operating guidance anchored in position-specific HD and HP data for the industrial implementation of air-steam retorting, to ensure commercially sterile products with improved process robustness.

Key words: Retort sterilization, Temperature distribution, Cold spot, F_0 Value

식품매개 감염은 여전히 세계 공중보건의 중대한 위협이다. World Health Organization (WHO)는 매년 약 6억 명이 불량 식품섭취로 질병을 겪고 42만 명이 사망한다고 추정한다[1]. 이러한 위험은 특히 저산성 통조림 및 레토르트 제품에서 내열성 포자를 형성하는 *Clostridium botulinum*에 의해 부각되며, 해당 미생물의 생장·독소 생성 가능성을 확실히 차단하는 열처리 공정 설계가 필수적이다[2,3].

저산성식품(low-acid foods)은 미국 연방규정에 따라 pH가 4.6을 초과하고 수분활성도(a_w)가 0.85를 초과하는 식품으로 정의되며, 이들 제품은 '상업적 멸균(commercial sterility)'을 달성하도록 규제된다(21 CFR Part 113). 산성화식품(acidified foods)은 저산성 원료에 산을 가해 최종 평형 pH를 4.6 이하로 유지하는 제품군으로 별도 관리된다[4,5]. 이러한 규제는 레토르트 공정의 목표를 F_0 중심으로 설정하게 하며, 목표 미생물의 D-, z-값과 공정 온도·시간 조합을 통해 안전성과 품질을 균형 있게 달성하도록 요구한다[6,7].

레토르트 공정은 상업적 멸균을 달성하기 위한 대표적 고온·가압 열처리 기술로, 장치·가열매체에 따라 배치식/연속식과 열수침지, 열수분사, 증기-공기혼합(steam-air) 방식 등으로 세분된다. 공정 사이클은 일반적으로 승온(come-

†These authors contributed equally to this work.
*Correspondence to: Byoung Hu Kim, Food Quality Technology Center, Food Safety Division, Pulmuone Co., Ltd., Cheongju 28220, Korea
Tel: +82-10-8234-9880, Fax: +82-2-6499-0131
E-mail: bh.kim@pulmuone.com

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.

up time, CUT)–가열 유지–냉각 단계로 구성되며, 각 단계에서의 열전달 특성과 기록의 적합성은 규제 심사 및 검증의 핵심이다[8].

증기-공기혼합 레토르트는 과압 상태에서 증기와 공기를 혼합하여 가열하는 방식으로, 공기의 낮은 열전달계수로 인해 '콜드 스팟(cold spot)'이 형성될 위험이 있다. 이에 따라 다양한 변수에 따른 온도 균일성 확보의 핵심이 된다[9]. 온도 불균일은 공정 기준점이 되는 콜드 스팟의 F_0 도달을 지연시켜 미생물학적 안전성 미달 또는 품질 과열(영양·조직 손상)을 초래할 수 있다. 따라서 산업 현장에서는 온도분포(temperature distribution, TD) 시험과 열침투(heat penetration, HP) 시험을 통해 장치 및 적재 조건에서의 균일성을 정량 평가하고, 공정 파라미터(적재 패턴, 승온 시간, 증기-공기·압력 제어 등)를 조정한다.[10] 선행연구에서도 물분사/증기-공기 레토르트의 조업 중 표준편차 0.7°C 내외 등 '타이트한' 균일성이 보고되나, 제품·용기·적재에 따라 편차는 달라지므로 실측 기반 최적화가 요구된다.[11]

따라서, 본 연구의 목적은 제품의 적재 패턴, 스팀 공급량, 압력 공급 등 핵심 매개변수가 레토르트 내부 온도분포와 콜드 스팟, F_0 형성에 미치는 영향을 체계적으로 평가하고, 미생물학적 안전성은 보장하면서 품질 열화는 최소화할 수 있는 최적의 운영 프로토콜(optimal operating protocol)을 도출하여 산업 현장에서 활용 가능한 레토르트 공정의 중요 품질관리 방향을 명확하게 제시하고자 한다.

재료 및 방법

레토르트 살균 조건 설계

본 연구에는 증기-공기 혼합식 레토르트(STERI-ACE, PRS-40-I, Kyunghan Co., Gyeongsan, Korea)를 사용하였다.

Table 1. Experimental control conditions for temperature distribution assessment

Retort condition		Time (min)	Temperature (°C)	Pressure (kg/cm^2)
Pasteurization (95°C)	Exhausting	-	65	-
	1'st sterilization	30	95	0.5
	Cooling	25	-	0.8
Sterilization (121°C)	Exhausting	-	65	-
	1'st sterilization	15	100	0.5
	2'nd sterilization	15	121	1.5
	Cooling	25	-	1.7

The differential carts were stacked in 15 trays, with 24 products loaded on each tray. Retort maximum operating temperature 125°C, maximum operating pressure 0.2 MPa (2 kgf/cm^2), one-time production capacity 1,080 units, boiler capacity 800 kg/hr, compressor capacity 11 kW (15 HP), cooling water consumption 315 L/min.

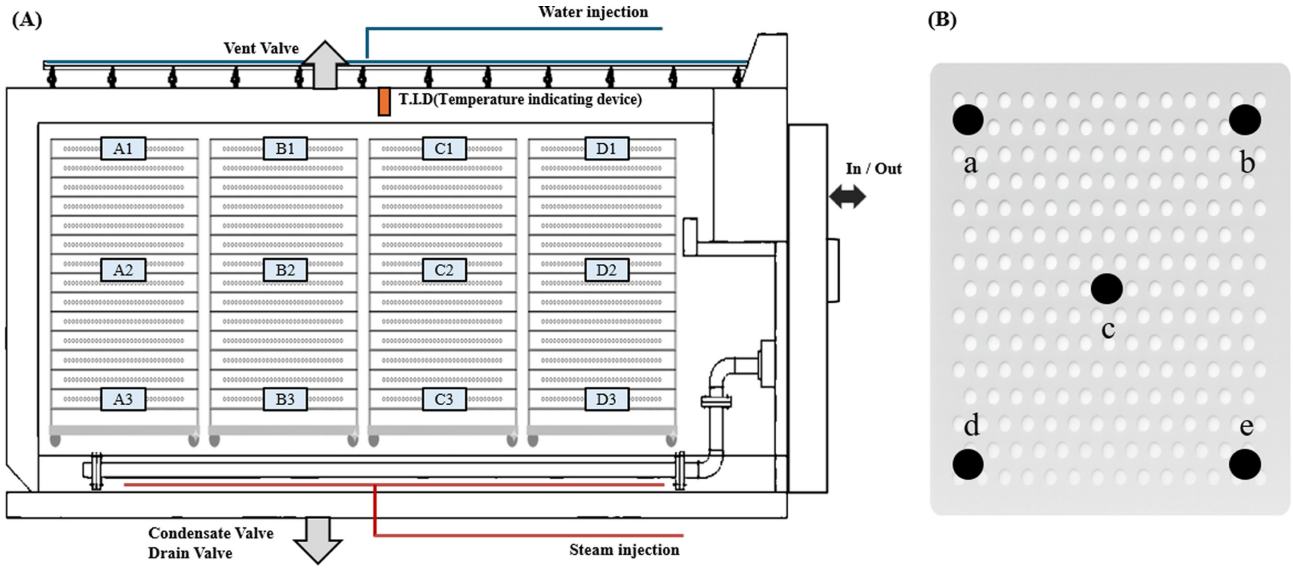

Fig. 1. Schematic diagram of cart and T.I.D/T.M.D locations inside the retort vessel. A-D represent the order of carts, 1-3 represent the location of T.M.D (1: Top, 2: Middle, 3: Bottom), and a-e represent detailed location of data logger by tray.

장비의 외부 규격은 1,850×4,400×2,350 mm (W×L×H)이며, 내부는 트레이(15단)가 장착된 대차 4대로 구성된다. 시료(model sample) 제작에는 레토르트 파우치(160×220 mm, Uwrapco, Ansan, Korea)를 사용하였고, 파우치 재질은 PET (12 μm)/AL(9 μm)/NY(15 μm)/CPP(90 μm)의 다층 필름 구조이다. 각 파우치에 초기 온도 40°C로 설정된 정제수 500 g을 충진하고 열로 밀봉하여 열분포(heat distribution, HD) 및 열침투(heat penetration, HP) 측정용 시료로 사용하였다. 모든 실험은 공정 중 온도 프로파일 분석을 위해 10초 간격으로 데이터가 수집되었으며, Table 1에 제시된 조건을 기반으로 3회 반복하여 수행함으로써 결과의 재현성을 확보하였다.

레토르트 온도 분포도 평가(Cold point 분석)

레토르트 온도 분포도 측정은 설비가 2대 이상인 경우, 2대 이상의 설비를 동시에 가동하는 실제 상황과 동일한 조건에서 진행하였다. 레토르트 내부의 온도 분포를 측정하기 위하여 -30-+140°C 온도 범위의 TrackSense® Pro (Rigid temperature sensor, Ellab Co., Hillerod, Denmark)를 사용하여 1분 간격으로 기록하였다. Fig. 1에 제시된 조건과 같이 대차의 상·중·하 대표 위치를 포함한 총 12개 지점과 트레이별 5개 지점을 격자화하여 실험을 진행하였다[12]. 각 측정지점에는 temperature measuring device (TMD)를 스테인리스 메시/클립으로 흔들림 5 mm 이하로 설치하고, 설비 제어 온도와의 편차 검증을 위해 temperature indicating device (TID)는 공정 제어센서와 동일 위치에 병치하여 계측 일치성을 확인하였다[4]. 시험은 설비가 목표 온도에 안정적으로 도달한 이후에도 열적 정상상태를 확인할 수 있도록 추가 구간을 포함하여 수행하였고[9], 위치별 승온시간, 공정구간(holding time, HT) 변동성의 온도 편차를 지표화하여 cold spot을 도출하고, 이후 실험의 기준 위치로 확정하였다[12].

적재 패턴에 따른 열 분포 평가

다음 연구는 가열 매체(증기)의 원활한 순환을 보장하기 위해, 국제식품가공전문가협회의[13] 가이드라인에 따라 트레이 바닥에 직경 25 mm의 천공을 확보하였다. Table 1에 제시된 조건을 기반으로 규격 620×950×64 mm (W×L×H)의 트레이 단위 시료 적재량을 12, 18, 28개로 단계화하여 적재 밀도 변화에 따른 증기-공기 흐름, 레토르트 챔버 내 공간적 온도편차 변화를 평가하였다(Fig. 2).

스팀 공급량에 따른 열 분포 평가

레토르트 설비의 노후화나 스팀 노즐의 스케일(scale)은 가열 매체의 유량 및 분사 균일성을 저해하여 온도 편차를 유발하는 주요 원인이 될 수 있다[6]. 이러한 변수가 열분포에 미치는 영향을 평가하기 위해, 주 증기 공급 밸브의 개방도를 각각 100%, 90%, 80%로 조절하였다. 밸브 개방도를 달리하여 의도적으로 스팀 유량을 감소시켰을 때, 레토르트 내부의 온도 분포 균일성의 변화를 평가하였다.

압력 조건에 따른 열 분포 평가

스팀-에어 레토르트에서 압력 기준 변화가 레토르트 내부 온도 분포에 미치는 영향을 평가하였다. 95°C에서 0.5 kgf/cm^{2}를 기준 압력 대조군으로 설정하고, 동일 온도에서 0.3 및 0.7 kgf/cm^{2}의 처리군을 추가하여 실험을 수행하였다. 또한, 121°C에서 1.5 kgf/cm^{2}를 기준 압력 대조군으로 설정하고, 동일 온도에서 1.3 및 1.7 kgf/cm^{2}의 처리군을 추가하여 실험을 수행하였다. 탈기는 4 min (약

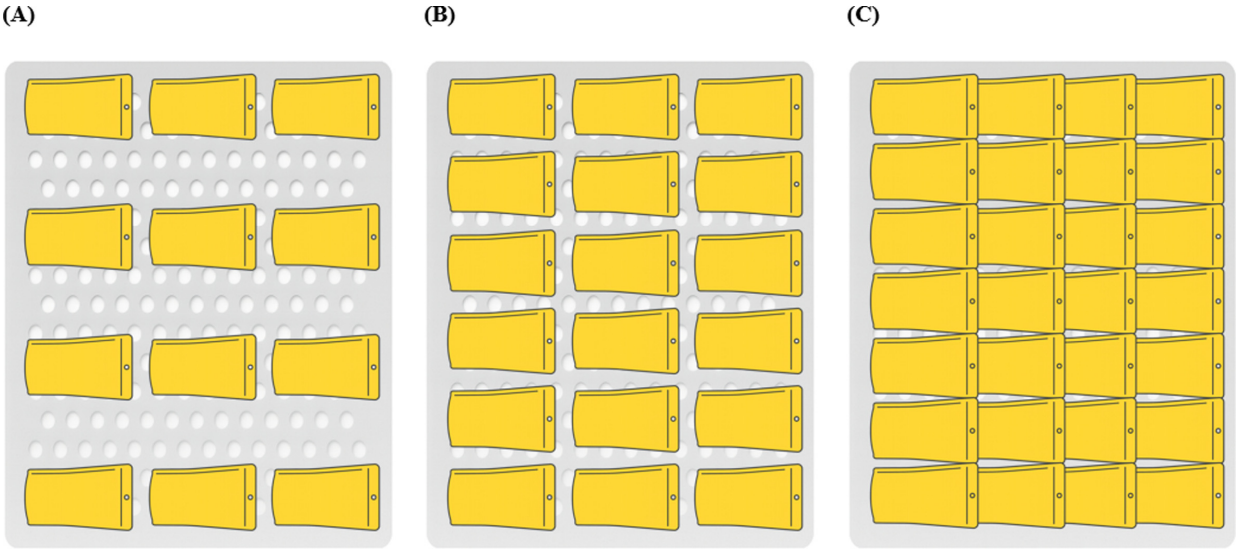

Fig. 2. Pouch loading pattern within the retort tray. The pouches represent (A) 3×4 stacking, (B) 3×6 stacking, and (C) 4 ×7 stacking.

100 kPa 차압 유지) 후 스팀–공기 혼합비는 고정, 과압은 공기 주입으로 제어하였다. 가열은 초기 제품온도 40±1°C에서 시작하여 설정온도 도달(CUT) 시간을 표준화하고, 유지 단계에서 온도 ±0.5°C, 압력 ±0.05 bar 안정성을 확보하였다.

열침투 Test 및 F_0 평가

각 공정 조건에서 제품의 열침투 특성과 살균값(F_0)을 측정하기 위해 파우치 내 가열 매체의 대류를 고려하여 기하학적 중심부를 콜드 스팟(cold spot)으로 가정하고 고정틀을 이용해 온도 센서의 끝을 정확히 위치시켰다[14]. 본 살균 공정은 혐기성 균인 *C. botulinum*의 사멸 측정 조건을 기준으로 하여 지표 온도 121.1°C, z값 10°C를 사용하여 아래 수식과 같이 살균도를 나타내는 F_0값을 산출하였다[15]. 아래 수식에서 t_0는 가열처리 시작 시간, t는 가열처리 마지막 시간, F_i는 임의 의 온도(T_f)에서 T_{ref}로 1분간 가열 처리한 효과에 해당하는 가열시간이다.

$$F_0 = \int_{t_0}^{t} L(t)\cdot dt = \int_{t_0}^{t} 10^{(\theta_i - 121.1)/z}\cdot dt = \int_{t_0}^{t} \frac{1}{F}\cdot dt$$

통계분석

본 연구를 통해 얻어진 결과는 세 번의 독립적인 실험 결과의 평균값이며, 통계 소프트웨어 SPSS (Ver. 26.0, IBM Corp., Armonk, NY, USA)를 이용하여 일원분산분석(ANOVA) 방법을 통해 그룹간 유의성을 검증하였다. Duncan's multiple range test를 통해 통계적 유의성을 검증하였으며, 모든 유의적 차이는 P<0.05 수준에서 분석하였다.

결과 및 고찰

레토르트 온도 분포도 측정(Cold point 분석)

레토르트 살균의 핵심은 레토르트 챔버 및 적재 바스켓 전역의 온도 균일성을 정량화하여 냉점을 정확히 특정하고, 공정 설정값이 해당 지점에서도 목표 치사값을 확보하는지 입증하는 데 있다. 이를 위해 본 연구는 스팀-에어(오버프레셔) 레토르트에서 바스켓 상·중·하 12지점의 온도 분포와 시간경과에 따른 최고–최저 온도차(ΔT)를 정밀 계측하고, TID와의 편차, come-up/holding time (CUT/HT) 단계별 변동성(σT) 및 ΔT(+1/3/5 min)를 통합 지표로 평가하였다. 본 연구의 측정 결과, 레토르트 설비 내부 12 개 지점의 온도 분포를 측정한 결과, 기준 온도계(TID) 대비 +0.4°C에서 -0.9°C 범위의 편차를 나타냈다(Table 2, Fig. 3A). 스팀-에어 레토르트 운영시 온도편차는 가열된 증기가 상승하고 상대적으로 차가운 응축수는 하강하는 자연대류 현상으로 인해 상단보다 하단부의 온도가 낮아지는 경향과 일치하며[16], 본 연구는 Fig. 3B와 같이 TID 대비 0.72°C 낮게 측정된 하단부 D3_d을 Cold spot으로 결정하

Table 2. Evaluation of temperature distribution in each basket and tray section in retort

Stage	Basket position	T_{mean} (°C)*	σT_{avg} (°C)**	ΔT + 1min HT(T_{max} - T_{min}) (°C)***	ΔT + 3min HT(T_{max} - T_{min}) (°C)***	ΔT + 5min HT(T_{max} - T_{min}) (°C)***
T.I.D	Control	121.5^{NS}	0.36^{NS}	0.7^{NS}	0.4^{NS}	0.2^{NS}
A	1	121.8	0.35	0.9	0.8	0.2
	2	121.4	0.3	0.8	0.6	0.3
	3	121.3	0.28	1	0.5	0.2
B	1	121.9	0.4	0.8	0.6	0.1
	2	121.4	0.32	1.2	0.6	0.2
	3	121.1	0.34	1.3	0.7	0.3
C	1	121.5	0.38	1	0.7	0.2
	2	121.4	0.36	0.8	0.4	0.1
	3	121	0.33	0.8	0.5	0.2
D	1	121.4	0.22	0.8	0.7	0.1
	2	121.1	0.37	0.7	0.5	0.2
	3	120.8	0.35	1.1	0.7	0.3

Data are presented as the means±standard deviation of three independent experiments. NS: no significant difference within the same column at P<0.05.

*T_{mean}: Average temperature at the end of the CUT phase.

**σT_{avg}: Standard deviation at the end of the CUT phase.

***ΔT + 1/3/5 min: Temperature difference (ΔT) between the highest reading thermocouple (T_{max}) and the lowest reading thermocouple (T_{min}) for each position, based on the point at which 121.0°C is reached (0 min).

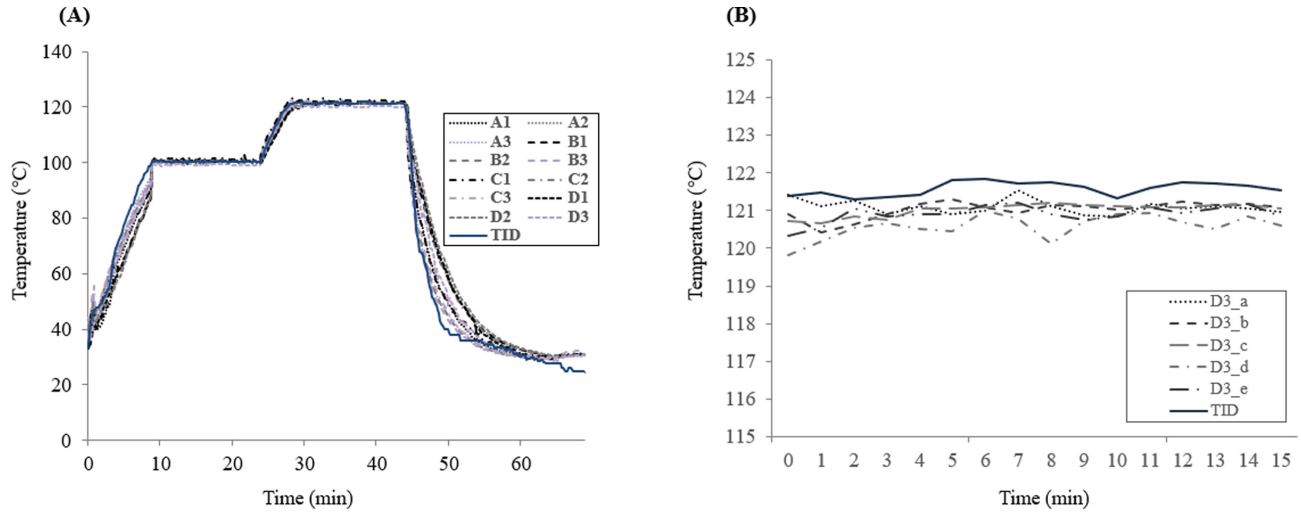

Fig. 3. Schematic diagram of cart and T.I.D/T.M.D locations inside the retort vessel. A-D represent the order of carts, 1-3 represent the location of T.M.D (1: Top, 2: Middle, 3: Bottom), and a-e represent detailed location of data logger by tray.

였다. ΔT 최대값은 1.1°C로 IFTPS[13]에서 제시한 허용 편차 기준 1.7°C를 만족하였다. 또한, HT로부터 1분, 3분, 5분 후 공정구간 동안 센서별 최대온도와 최저온도의 차이를 비교하였다. 공정구간이 시작점에서의 센서들의 표준편차는 상단부(1)보다 하단부(3)가 더 높았고, 평균 온도는 상단부 대비 더 낮은 것으로 확인되었으나, 유의적인 차이는 관찰되지 않았다(P>0.05). Cold spot의 정확한 위치 및 온도 파악은 미생물학적 안전성을 확보하기 위한 최소 살균값(F_0)의 결정에 핵심 요소이며[17], 스팀 노즐 막힘, 과적재, 압력 누출 등 다양한 변수에 의해 cold spot 온도가 저하될 경우 공정 안정성을 위협할 수 있다. 이에 따라 레토르트 설비는 신제품 출시, 장기 미사용, 수리 등 주요 변경이 발생한 경우 반드시 열분포(HD) 및 열침투(HP) 검증을 재실시해야 한다. 온도 측정에는 보정된 TMD를 사용하며, 실험 전 교정된 상태에서 동일 조건 하에 반복 측정이 요구된다[18]. 또한, 설치된 온도계는 최소 연 1회 이상 공인기관의 검교정을 받아야 하며, 주 제어 온도계 외에도 추가 온도 기록계를 병행 설치하고, 온도계 간 편차는 0.5°C 이내로 관리해야 한다[4]. 또한, 레토르트 공정에서 대차별 thermo label 부착 및 코드화 관리는 품질·안전·공정 이슈 발생 시 신속한 제품 추적과 기록 연계성을 강화하여 보류·회수 범위를 최소화하는 효과적 수단이 된다.

적재 패턴에 따른 열 분포 평가

본 연구에서는 동일한 레토르트 공정 조건에서 적재 수량(12개, 18개, 28개)에 따른 온도 분포 변화를 비교 평가하였다(Fig. 4, Table 1). 95°C 살균 조건에서의 평균 중심 온도는 각각 95.29±0.31°C, 95.09±0.12°C, 92.95±3.42°C로 나타났으며, 12개 및 18개 적재군 간에는 유의적인 차이가 없었으나(P>0.05), 28개 적재 시 셋팅 온도 도달까지 약 12분이 추가 소요되고 최대 온도 편차가 -10.1°C에 달해 유의적인 온도 편차가 관찰되었다(P<0.05). 121°C 조건에서는 각각 121.32±0.28°C, 121.59±0.20°C, 120.54±1.05°C로 측정되었으며, 이 역시 12개 및 18개 적재 간 유의차는 없었으나(P>0.05), 28개 적재 시 +6분의 도달 시간 증가와 함께 -2.7°C의 최대 온도 편차가 관찰되었다(P<0.05). 특히 121°C 조건은 100°C에서 10분간의 전처리(1차 살균)를 포함함으로써 95°C보다 안정적인 온도 유지 경향을 보였고, 과적재로 인한 트레이 타공 막힘 및 열순환 불균일이 주요 원인으로 분석되었다. 제품의 과적재로 인해 트레이 타공이 막히면 내부 열순환이 불균일해지며, 이로 인해 특정 영역(레토르트 하단 또는 내부 가장자리)에서 온도의 저하(cold spot)가 발생한다는 기존 연구 결과가 보고되어 있다[8,12]. 따라서 레토르트 공정 운영 시에는 제품 적재용 트레이 설계 시 모든 제품 주변으로 열이 균일하게 순환될 수 있도록 통풍구의 크기 및 배치, 적재 밀도, 트레이 층수 등을 고려해야 한다. 또한, 가열된 증기가 제품 주변을 지속적으로 흐르며 차가운 공기층을 제거하는 것은 열 전달의 균일성을 확보하고 특정 지점의 저온화, 즉 콜드스팟(cold spots) 형성을 방지하는 데 중요한 역할을 한다[6]. 따라서, 적재 수량은 온도 분포 및 열침투에 중요한 영향을 미치므로, 적정 적재 수량 기준을 수립하여 과적재로 인한 come-up time 지연 및 온도 편차를 최소화해야 한다[19]. 상부 트레이의 무게에 의해 제품이 압박되어 파손되는 현상을 방지하기 위해 트레이 높이를 제품 크기 또는 용기 높이 보다 충분히 여유 있게 확보해야 한다. 또한, 식품 제조공정에서 포장 공정의 처리 용량(capacity)에 비해 열처리 공정의 처리 용량이 상대적으로 낮은 경우, 포장 완료 후 열처리까지의 대기 시간이 장기화될 수 있다. 이러한 지연은 제품이 미생물 증식에 적합

한 중온 범위에 장시간 노출되는 결과를 초래하며, 결과적으로 세균의 증식 가능성을 높이고 관능적 품질 저하 및 변질 발생 위험을 초래할 수 있다. 따라서 포장-열처리 공정 간 용량 균형의 확보와 포장 직후 가능한 한 신속하게 냉장 보관을 통해 잔열로 인한 과잉 가열과 미생물 증식을 사전에 억제하는 것이 중요하며 제품 안전성과 품질 보존을 위해 핵심적인 관리 요소로 간주된다.

스팀 공급량에 따른 열 분포 평가

Fig. 5는 Table 1과 같이 동일한 레토르트 조건에서 스팀 배관 노후, 설비 위생(냉각수 노즐 스케일로 인한 막힘 등)으로 인한 스팀 유량 미흡에 따른 변화를 평가하기 위해 주 증기 공급 밸브(main steam supply valve)의 개방도를 각각 100%, 90%, 80%로 조절하여 2차 살균 및 냉각 과정에서의 온도 분포 변화를 확인하였다. 95°C 조건에서 평균 중심 온도는 각각 95.14±0.10°C, 91.93±1.52°C, 83.92±1.88°C로, 90%와 80% 공급군 모두 100% 대비 유의한 온도 편차가 확인되었고(P<0.05) 80% 공급군은 공정 종료 시까지 목표 온도(95°C)에 도달하지 못했다. 121°C 조건에서도 평균 중심 온도는 121.28±0.18°C, 120.49±0.59°C, 118.17±1.11°C로 나타나, 특히 80% 공급군은 공정 종료 시에도 목표 온도(121°C)에 미달하여 초기·중기 구간에서의 열공급 부족이 전체 열분포를 지연시켰다(P<0.05). 스팀-에어 레토르트는 탈기와 CUT 구간에 단시간 고증기 유량이 요구되므로 보일러 용량 부족, 배관 누증, 프로그램 설정 오류 등으로 수요가 공급능력을 초과하면 스팀 품질(습증기 증가)이 저하되고 유효 열함량이 감소하여 목표 온도 도달 실패·균일성 저하로 직결될 수

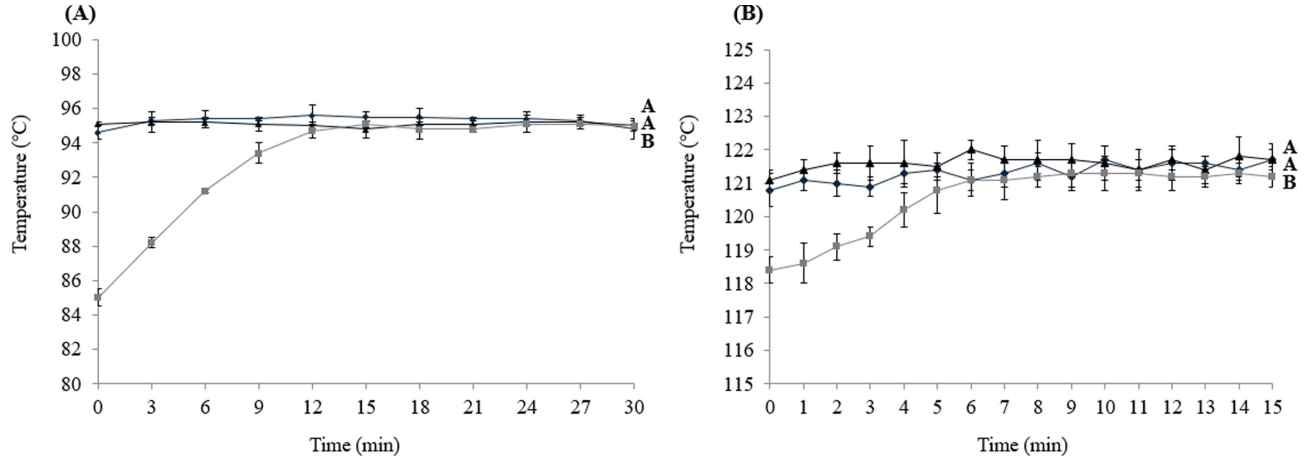

Fig. 4. Evaluation of heat distribution by temperature conditions 95°C (A) and 121°C (B) according to loading pattern (◆: Loading_12ea, ▲: Loading_18ea, ■: Loading_28ea). Data are presented as the means ± standard deviation of three independent experiments. Different uppercase letters (A-C) indicate a significant difference (P<0.05).

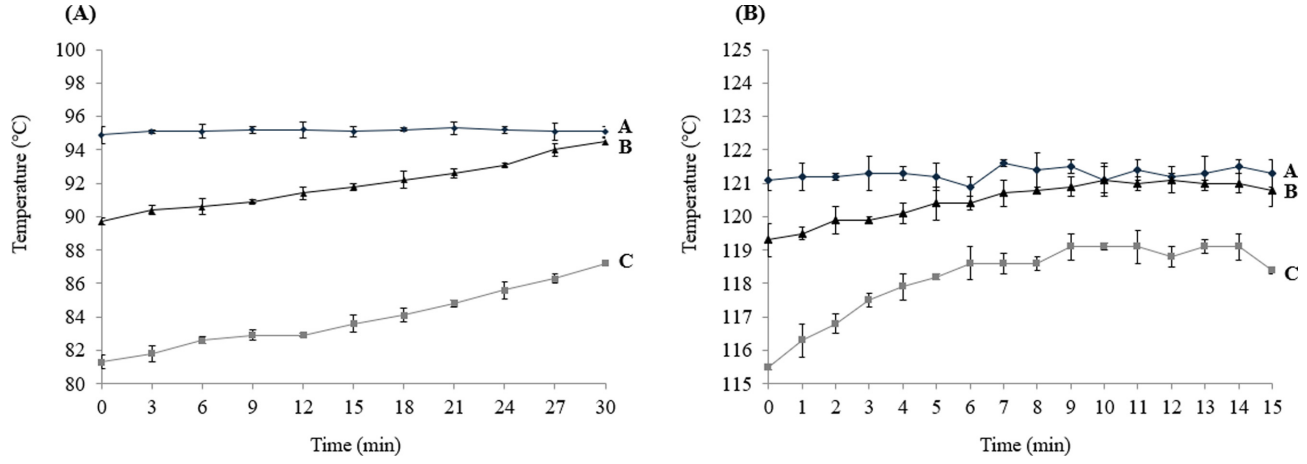

Fig. 5. Evaluation of heat distribution by temperature conditions 95°C (A) and 121°C (B) according to steam supply amount (◆: Steam supply_100%, ▲: Steam supply_90%, ■: Steam supply_80%). Data are presented as the means ± standard deviation of three independent experiments. Different uppercase letters (A-C) indicate a significant difference (P<0.05).

있다[20,21]. 더불어 수질 경도가 높은 순환수, 지하수를 사용할 경우 칼슘 성분 석출로 스케일화 되어 스팀 공급 노즐의 부분 폐색을 유발해 분사 패턴과 순환 유량을 왜곡하고, 그 결과 수조 및 선반 하단부의 cold point에서 TD 편차가 확대될 위험이 있다[8,22]. 실제 스팀-에어 레토르트에서는 용기 형상·적재·유동 혼합의 차이로 열분포, 열침투 결과 값이 달라지므로, 주기적인 노즐·스케일 점검과 경수 관리, 벤팅·순환 검증을 통한 공간적 균일성 확보가 필수적이다. 또한, 밀폐된 용기에 열처리/냉각 중 이음새에 응력이 가해질 경우 미량의 스팀/냉각수가 제품에 혼입되어 제품 변질이 발생할 수 있으므로 일정 농도의 염소를 함유하도록 하여 순환수에 대한 미생물 제어가 필요하며, 공정 중 제품 파손 등으로 내부에 오염이 발생하는지를 주기적으로 점검하고 파손제품 발생 시 열수/냉각수 등의 교체 조치가 필요하다.

압력 조건에 따른 열 분포 평가

Fig. 6는 Table 1과 같이 동일 레토르트에서 가압을 달리하여 스팀 주입과 보온 동안의 압력 제어가 열 분포와 목표온도 도달성에 미치는 영향을 평가하였다. 95°C 조건에서 0.5 kgf/cm^{2}와 비교했을 때 저가압에서는 평균 HT가 유의하게 낮고 분산이 확대되었으며, 0.3 kgf/cm^{2}에서는 공정 종료 시점까지 목표온도 95°C에 도달하지 못했다. 121°C 조건에서도 1.5 kgf/cm^{2}와 비교했을 때 1.3 kgf/cm^{2}에서 동일한 경향이 관찰되었다. 모든 비교군 간 차이는 유의적인 온도편차가 관찰되었다(P<0.05). 스팀–에어 레토르트에서 가압이 응축 전열과 외부 대류계수의 유효화를 통해 열전달을 안정화하는 반면, 과소 가압 시 경계층 교란 부족 및 에어 포켓으로 냉점이 형성되어 CUT가 지연되고 평균 HT가 저하되는 메커니즘을 야기한다[23]. 또한, 과잉 가압시 제품 표면의 온도가 급격히 상승하여 열전달 불균형 및 과잉 가열이 발생할 수 있다. 이러한 현상은 제품 내부에 과도한 열부하를 초래함으로써 관능적 품질 저하뿐 아니라 영양소 손실 및 에너지 효율 저하를 유발한다. 이를 방지하기 위해 스팀 공급 압력 및 주입 시간을 공정별·제품별로 최적화하고, 초기 가열 단계에서의 vent 제어를 정밀히 관리하는 것이 필수적이다[8]. 레토르트 살균시 벤팅 단계를 수용하기 위해 공정 사이클의 처음 몇 분 동안 증기를 주입하여 최대 에너지 수요가 발생하며, 공기와 증기는 도움 없이 쉽게 혼합되지 않기 때문에 cold spot이 없도록 하기 위해 배출 단계에서 공기를 제거하는 것이 필수적이다[24,25]. 운영 측면에서는 두 대 이상 레토르트의 벤팅·come-up 동시 가동을 피하는 스케줄이나 스팀 어큐뮬레이터 도입 등으로 피크 수요를 평준화하면 보일러 과부하와 온도 편차를 완화할 수 있다[21]. 레토르트 공정에서 사용되는 포장 용기는 가열 및 냉각 단계 동안 외부 압력(외압)과 내부 압력(내압)의 균형 유지가 필수적이다. 내압이 외압보다 과도하게 높거나 낮을 경우, 포장 용기는 팽창 또는 수축 현상을 겪을 수 있으며, 심할 경우 구조적 파손이 발생할 수 있다[26]. 특히, 가열 과정 중 포장 용기 내부에 포화증기량이 과도하게 형성되면 내부 압력이 급격히 상승하게 되고, 이로 인해 용기 내벽 또는 실링부가 견딜 수 있는 압력을 초과하여 파열 또는 실링 부위의 파손이 유발될 가능성이 높아진다. 이러한 손상은 제품의 무균성 유지 실패로 이어질 수 있어, 식품안전성과 직결되는 중대한 품질 결함으로 간주된다. 따라서 레토르트 공정 중 가열 및 냉각 단계에서 포장재의 변형이나 파손을 방지하고, 무균성을 확보하기 위해서는 외부 압력 조건의 정밀한 설정이 필수적이다. 즉, 열처리 온도와 시간뿐만 아니라 포장 용기의 물리적 특성과 내용물의 열팽창

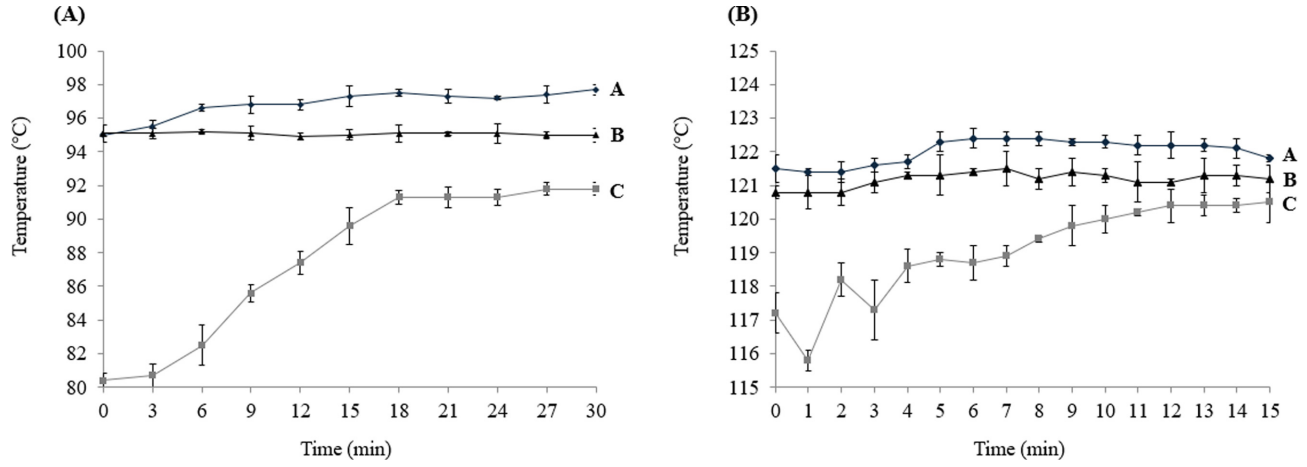

Fig. 6. Evaluation of heat distribution by temperature conditions 95°C (A_◆: 0.7kgf/cm^2, ▲: 0.5kgf/cm^2, ■: 0.3kgf/cm^2) and 121°C (B_◆: 1.7kgf/cm^2, ▲: 1.5kgf/cm^2, ■: 1.3kgf/cm^2) according to pressure conditions. Data are presented as the means ± standard deviation of three independent experiments. Different uppercase letters (A-C) indicate a significant difference (P<0.05).

Table 3. Heat penetration analysis of F_0 value against retort operating conditions at 121°C

Conditions		F_0 value (Heat lethality)	
		B1-c	D3-d
Product loading pattern	12 ea/tray	18.77 ± 1.7^{Aa}	16.75 ± 1.4^{Ab}
	18 ea/tray	18.24 ± 1.2^{Aa}	16.37 ± 0.8^{Ab}
	28 ea/tray	17.12 ± 0.9^{Ba}	13.74 ± 1.2^{Bb}
Steam supply conditions	100%	18.61 ± 1.1^{Aa}	16.72 ± 0.8^{Ab}
	90%	17.13 ± 1.0^{Ba}	15.27 ± 0.9^{Bb}
	80%	12.22 ± 1.1^{Ca}	9.01 ± 1.4^{Cb}
Pressure conditions	1.7 kg/cm^2	21.11 ± 0.9^{Aa}	19.12 ± 1.2^{Ab}
	1.5 kg/cm^2	18.41 ± 1.1^{Ba}	16.52 ± 0.6^{Bb}
	1.3 kg/cm^2	16.75 ± 1.3^{Ba}	14.84 ± 1.1^{Cb}

The data are presented as the means±standard deviation of three independent experiments. The differences between uppercase letters (A-C) indicate significant differences by conditions, and the differences between lowercase letters (a-c) indicate significant differences by temperature sensor location ($P<0.05$).

특성 등을 고려한 정밀한 압력 제어는 제품 품질과 위생 안전성 확보의 핵심 변수로 작용한다.

열침투 Test 및 F_0값 분석

Table 3는 선행 온도분포(TD) 시험으로 특정된 hot spot (C1)과 cold spot (D3_d)을 기준점으로 동일 배치에서 열침투(HP)를 수행하여, 제품 적재패턴(12/18/28 개), 스팀 공급량(100/90/80%), 가압(1.7/1.5/1.3 kgf/cm^2)의 세 요인이 냉점 치명도(F_0)에 미치는 영향을 정량 검증하였다. D3_d에서 적재량 증가 및 과적재 시 F_0는 16.75±1.4에서 13.74±1.2로 유의하게 감소하였고($P<0.05$), 스팀 공급량 저감 시 16.72±0.8에서 9.01±1.4로, 가압 저감 시 19.12±1.2에서 14.84±1.1로 각각 유의한 차이를 보였으며($P<0.05$), 동일 조건의 C1 대비 전반적으로 유의차가 관찰되었다($P<0.05$). 이러한 결과는 적재밀도 상승에 따른 전도 지배성 확대 및 유효 대류계수 저하, 스팀–공기 혼합비 변화와 과소 가압에 따른 용기–매질 접촉 조건 악화, CUT 지연 및 국부 온도편차 확대가 냉점의 열치사 적분값(F_0)을 저감시키는 열전달 메커니즘으로 설명된다[27,28]. F_0는 121.1°C, z값 10°C 기준에서 시간적 적분으로 정의되며, 냉점 온도–시간 이력의 형태와 CUT 단축, 열분포 균일화가 목표 F_0 확보에 결정적으로 작용한다[29]. 따라서 공정 설계는 HD에서 HP 순으로 worst case (냉점)를 특정·검증한 후, 목표 F_0 (예: 121.1°C, z값 10°C)를 과살균 최소화와 병행해 만족시키는 적재·스팀·가압·CUT의 허용창을 도출하도록 구조화되어야 한다[8]. 더불어 제품 산도에 따라 저산성통조림식품(LACF, pH>4.6 & a_w>0.85), 산성화식품(가산산으로 pH≤4.6), 산성식품(pH≤4.6)으로 구분되는 규제 틀과의 정합성이 요구되며, LACF의 경우 21 CFR Part 113 및 108.35에 근거한 공정설계·등록·기록 요건을 충족하는 방식으로 HP 결과를 공정기준화에 반영해야 한다[30].

Acknowledgement

This work was supported by Pulmuone Co., Ltd.

국문요약

식품매개 감염은 여전히 세계 공중보건의 중대한 위협이다. 특히 저산성 통조림 및 레토르트 제품에서 내열성 포자를 형성하는 *Clostridium botulinum*에 의해 부각되며, 해당 미생물의 생장·독소 생성 가능성을 확실히 차단하는 열처리 공정 설계가 필수적이다. 증기-공기혼합 레토르트는 과압 상태에서 증기와 공기를 혼합하여 가열하는 방식으로, 공기의 낮은 열전달계수로 인해 '콜드 스팟(cold spot)'이 형성될 위험이 있다. 따라서, 본 연구는 증기-공기혼합(air-steam) 레토르트의 공정 최적화를 위해 95°C 및 121°C 조건에서 다지점(대차 상·중·하부 12지점/트레이별 5구간)으로 정량 평가하고, 적재밀도(12, 18, 28개), 스팀 공급량(100, 90, 80%), 가압(0.3-0.7 및 1.3-1.7 kgf/cm^2)이 균일가열성과 살균값(F_0)에 미치는 영향을 분석하였다. 기준 온도계 대비 최대 편차는 ΔT=1.1°C로 IFTPS 허용범위 이내였으나, 냉점(cold spot)은 일관되게 하부(D3_d)에서 확인되었고, 과적재(28개) 시 CUT 지연과 온도편차 확대가 발생하였다. 스팀공급 저하(특히 80%)와 저가압(0.3 또는 1.3 kgf/cm^2)은 목표온도 미도달·분산 증가를 야기했으며, 이는 냉점의 F_0 유의 저하로 연결되었다(예: 121°C에서 스팀 100% 대비 80% 조건의 D3_d F_0 16.72→9.01). 반면, 충분한 스팀품질·환기(venting)와 적정 가압(1.5-1.7 kgf/cm²) 유지 시 공간적 균일성과 목표 F_0 확보가 용이하

였다. 결과적으로 레토르트 운전의 핵심 관리포인트는 적정 적재·트레이 통기성 확보, 주증기 공급능력 및 노즐 스케일 관리, 벤팅·순환 성능 검증, 공정단계별 정밀 압력제어이며, HD에서 HP 순의 검증체계를 통해 냉점 기준으로 과살균을 최소화하면서 규제수준의 상업적 멸균을 보장할 수 있음을 제시한다. 본 연구는 산업현장에서 적용 가능한 운영 프로토콜을 제안함으로써 레토르트 열살균 공정의 품질·안전 관리에 실증적 근거를 제공한다.

Conflict of interests

The authors declare no potential conflict of interest.

ORCID

Byoung Hu Kim https://orcid.org/0000-0001-6107-1919
Dong Bin Lee https://orcid.org/0009-0007-1906-9197
Hyeon Seok Lee https://orcid.org/0009-0004-1475-8477
Eun Mi Ko https://orcid.org/0009-0003-6261-6732
Jong Won Lee https://orcid.org/0009-0004-0953-7987
Jong Eok Kim https://orcid.org/0009-0000-4670-2356
Tae Seok Kim https://orcid.org/0009-0008-8994-1128
Jin Won Lee https://orcid.org/0009-0004-4103-6824
Pyeong Won Kim https://orcid.org/0009-0001-5584-9912

References

1. World Health Organization (WHO), 2015. WHO estimates of the global burden of foodborne diseases: foodborne disease burden epidemiology reference group 2007-2015, WHO, Geneva, Switzerland.
2. Munir, M.T., Mtimet, N., Guillier, L., Meurens, F., Fravalo, P., Federighi, M., Kooh, P., Physical treatments to control *Clostridium botulinum* hazards in food. *Foods*, **12**, 1580 (2023).
3. Chaidoutis, E., Keramydas, D., Papalexis, P., Migdanis, A., Migdanis, I., Lazaris, A.C., Kavantzas, N., Foodborne botulism: a brief review of cases transmitted by cheese products. *Biomed. Rep.*, **16**, 41 (2022).
4. Code of Federal Regulations (CFR), (2025, March 13). 21 CFR Part 113—Thermally processed sow-acid foods. Retrieved from https://www.ecfr.gov/current/title-21/chapter-I/subchapter-B/part-113
5. United States Food and Drug Administration (FDA), (2025, March 13). Acidified and low-acid canned foods guidance. Retrieved from https://www.fda.gov/food/guidance-documents-regulatory-information-topic-food-and-dietary-supplements/acidified-low-acid-canned-foods-guidance-documents-regulatory-information, Springer, New York, NY, USA.
6. Holdsworth, S.D., Simpson, R., 2016. Thermal processing of packaged foods, 3rd ed, Springer, New York, NY, USA.
7. Soni, A., Bremer, P., Brightwell, G., A comprehensive review of variability in the thermal resistance (D-values) of foodborne pathogens—A challenge for thermal validation trials. *Foods*, **11**, 4117 (2022).
8. Jimenez, P.S., Bangar, S.P., Suffern, M., Whiteside, W.S., Understanding retort processing: a review. *Food Sci. Nutr.*, **12**, 1545-1563 (2023).
9. Gil, A.G., González, O.A.O., Sepúlveda, L.F.C., Torres, P.N.A., Venting stage experimental study of food sterilization process in a vertical retort using temperature distribution tests and energy balances. *Case Stud. Therm. Eng.*, **22,** 100736 (2020).
10. Allpax, (2025, May 20). Retort temperature distribution and container heat penetration testing (white paper). Retrieved from https://www.allpax.com/white-papers/retort-temperature-distribution-and-container-heat-penetration-testing/
11. Food Safety and Inspection Service (FSIS), (2025, May 20). Virtual thermal processing—student handouts. Retrieved from https://www.fsis.usda.gov/sites/default/files/media_file/2021-03/VTP_Student_Handouts.pdf
12. Canadian Food Inspection Agency (CFIA), (2025, March 12). Commercial sterilization of low-acid food in hermetically sealed containers – Temperature distribution. Retrieved from https://inspection.canada.ca/en/preventive-controls/controls-food/hermetically-sealed-containers
13. Institute for Thermal Processing Specialists (IFTPS), 2014. Guidelines for conducting thermal processing studies, 3rd ed, IFTPS, Slidell, LA, USA.
14. MacNaughton, J.T., The effects of various retort motions on the rate of heat penetration and quality attributes of pouch packaged foods. Ph.D. Dissertation, Clemson University, Clemson, SC, USA (2018).
15. Smout, C., Van Loey, A.M.L., Hendrickx, M.E.G., Non-uniformity of lethality in retort processes based on heat distribution and heat penetration data. *J. Food Eng.*, **45**, 103-110 (2000).
16. Raits, E., Pinte, L., Kirse-Ozolīna, A., Muizniece-Brasava, S., Temperature distribution and heat penetration in steam-air retort using glass jars and retort pouches. *Rural Sustain. Res.*, **46**, 1-8 (2021).
17. Llave, Y.A., Hagiwara, T., Sakiyama, T., Artificial neural network model for prediction of cold spot temperature in retort sterilization of starch-based foods. *J. Food Eng.*, **109**, 553-560 (2012).
18. Canadian Food Inspection Agency (CFIA), (2025, May 20). Temperature distribution test for steam-still retorts. Retrieved from https://inspection.canada.ca/en/food-safety-industry/packing-food/temperature-distribution-test
19. Jung, H., Lee, Y.J., Yoon, W.B., Using numerical analysis to develop a retort process to enhance antioxidant activity and physicochemical properties of white radish in different-sized packages. *Processes*, **10,** 2589 (2022).
20. United States Food and Drug Administration (FDA), (2025, May 10). Steam pressure for retorts and autoclaves. Retrieved from https://www.fda.gov/inspections-compliance-enforcement-and-criminal-investigations/inspection-guides/steam-pressure-retorts-and-autoclaves

21. Biglia, A., Comba, L., Fabrizio, E., Gay, P., Ricauda Aimonino, D., Steam batch thermal processes in unsteady state conditions: Modelling and application to a case study in the food industry. *Appl. Therm. Eng.*, **118**, 638-651 (2017).
22. United States Food and Drug Administration (FDA), (2025, April 6). Processing in spray or cascading water retorts (Form FDA 3511g)—Thermal processing system review worksheet. Retrieved from https://www.fda.gov/media/71391/download
23. Varga, S., Oliveira, F.A.R., Balsa-Canto, E., Modelling temperature variability in batch retorts and its implications. *J. Food Eng*., **44**, 163-174 (2000).
24. U.S. Department of Agriculture (USDA), (2025, June 16). Module 11: retorts—processing with overpressure. Retrieved from https://www.fsis.usda.gov/sites/default/files/media_file/2022-02/11-Retorts-Using-Overpressure_0.pdf
25. Allpax, (2025, May 20). Understanding the retort sterilization process: steam-air retorts. Retrieved from https://www.retorts.com/white-papers/steam-air-retorts/
26. Ghai, G., Teixeira, A.A., Welt, B.A., Goodrich-Schneider, R., Yang, W., lmonacid, S., Measuring and predicting head space pressure during retorting of thermally processed foods. *J. Food Sci.*, **76,** E298-308 (2011).
27. Awuah, G.B., Ramaswamy, H.S., Economides, A., Thermal processing and quality: principles and overview. *Chem. Eng. Process. Process Intensif.*, **46,** 584-602 (2007).
28. Barbosa-Cánovas, G.V., Fontana, A.J.Jr., Schmidt, S.J., Labuza, T.P., 2014. Water activity in foods: fundamentals and applications, 2nd ed, Wiley, Hoboken, NJ, USA.
29. Xue, Q., Xue, C., Luan, D., Wang, Y., Wen, Y., Bi, S., Xu, L., Jiang, X., Unlocking the potential of microwave sterilization technology in ready-to-eat imitation crab meat production. *Foods*, **12**, 4412 (2023).
30. U.S. Food and Drug Administration (FDA), (2025, May 20). Guidance for Industry: acidified foods and low-acid canned foods. Retrieved from https://www.fda.gov/food/guidance-documents-regulatory-information-topic-food-and-dietary-supplements/acidified-low-acid-canned-foods-guidance-documents-regulatory-information