과열 증기의 식품 살균 적용 연구 동향

Research trends on the application of superheated steam to food sterilization

김수환*

Soo-Hwan Kim

가톨릭대학교 식품영양학과

Department of Food Science and Nutrition, The Catholic University of Korea, Bucheon 14662, Republic of Korea

김 수 환

Correspondence to

Soo-Hwan Kim
Department of Food Science and Nutrition, The Catholic University of Korea, Bucheon 14662, Republic of Korea.
Tel: +82-2-2164-4316
E-mail: soohwan94@catholic.ac.kr

서론

식품 산업에서는 소비자의 다양한 요구에 부응하기 위해 안전성과 품질을 동시에 확보할 수 있는 새로운 가공 및 살균 기술 개발이 지속되고 있다. 특히 식중독 사고에 대한 사회적 관심이 높아지면서, 병원성 미생물 제어를 위한 효과적이고 지속가능한 살균 기술에 대한 수요가 증가하고 있다. 기존의 염소계 소독제, 가열 살균 공정, 자외선 및 오존 처리 등은 오랫동안 활용되어 왔으나, 표면 미세구조에 부착된 미생물이나 내열성 포자, 생물막 구조를 형성하는 병원균에 대해서는 제어 한계가 지적되고 있다. 또한 일부 화학적 소독제는 유해 부산물 생성 가능성, 작업자 안전성, 적용 표면의 부식 문제 등 부작용이 보고되고 있다.

이러한 배경 속에서 과열증기 (Superheated Steam, SHS)는 새로운 대안 기술로 주목받고 있다. 과열증기는 포화증기를 추가 가열하여 생성되는 고온 · 건식 상태의 증기로, 일반적인 열처리에 비해 빠른 온도 상승, 높은 열전달 효율, 수분 잔류 감소 등의 장점을 지닌다(Zhang et al., 2024). 최근 과열증기는 신선 농산물, 견과류, 종자류, 식품포장재 및 가공 설비 표면 등 다양한 식품 시스템에 적용되어 병원성 세균, 생물막, 내열성 포자에 대한 제어 가능성을 확인하는 연구가 보고되고 있다. 특히 기존 물리적 · 화학적 방법으로 제어가 어려웠던 고 내성 미생물 제어에서 과열증기의 활용성이 강조되고 있다.

본 리뷰에서는 과열증기를 활용한 다양한 식품 원료 및 식품접촉 표면의 미생물 제어 연구 동향을 정리하고, 최근 보고된 실험 데이터를 기반으로 병원성 세균, 생물막, 내열성 포자에 대한 제어 효과를 고찰하고자 한다.

본론

1. 과열증기의 특성

과열증기는 포화증기를 추가로 가열하여 생성된 무색의 기체로, 일반적인 포화증기보다 높은 온도와 에너지를 가지며 수분이 있으나 마치 수분이 없는 것과 비슷한 물리적 특성을 가진다. 기체 내에 증발 가능한 액상이 존재하지 않기 때문에 응축수가 형성되지 않으며, 이로 인해 열전달 시 표면의 수분을 빠르게 제거하고 미생물을 제어하는 효과를 갖는다(Abu-Farah and Germann, 2022; Park et al., 2024). 과열증기의 열역학적 성질은 몰리에르 선도(Mollier diagram)를 통해 시각적으로 확인할 수 있으며, 이는 압력, 엔탈피, 온도 등의 상태를 한눈에 파악할 수 있도록 도와준다. 몰리에르 선도에서 포화 증기는 포화 곡선상에 위치하며, 포화곡선의 좌측은 포화액, 우측은 포화증기로 구분된다. 이 포화 곡선을 기준으로 오른쪽 영역은 모두 과열증기 영역으로, 이때의 증기는 수분의 밀도와 유전율이 낮고 높은 온도와 추가적인 현열 (sensible heat)을 가진 상태이다. 선도 내 포화 곡선까지 도달하는 데 필요한 에너지는 잠열 (latent heat)을 포함하며, 이를 초과하여 과열증기 영역으로 이동할수록 증기 온도는 더욱 상승하게 되고, 이는 전적으로 현열로 구성된다. 따라서 몰리에르 선도는 특정 압력에서 증기를 포화 상태로 유지할지, 과열 상태로 더 가열할지를 판단하고, 건조나 살균 공정의 온도 및 엔탈피 조건 설정에 활용할 수 있는 유용한 도구로 작용한다(Rauf, 2023).

열전달 관점에서 과열증기는 포화증기보다 높은 현열을 포함하고 있어, 물질의 온도를 급격히 상승시키는 데 유리하다. 포화증기 상태에서는 증발 과정에서 잠열(latent heat) 이 소비되지만, 과열증기는 그 이상의 추가 에너지를 지닌 상태로 기체 온도 자체가 더 높기 때문에, 재료 표면과의 접촉 시 빠른 온도 상승과 수분 제거가 동시에 가능하다(Romdhana et al., 2015). 특히 표면 수분을 빠르게 증발시켜 일시적인 탈수 효과를 유도하며, 이는 미생물의 생장 억제 뿐 아니라 조직 구조 변화, 효소 불활성화 등 다양한 물리화학적 효과로 이어진다(Alfy et al., 2016). 과열증기는 150 – 300℃ 사이의 범위에서 주로 활용되며, 특히 열원이 직접 제품에 접촉하지 않고 기체 형태로 전달되므로 보다 균일한 열처리가 가능하다. 고온의 기체는 제품 표면에서 응축되지 않아, 포화증기 대비 제품 품질을 더 정밀하게 제어할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 온도가 지나치게 높을 경우, 제품의 탄화나 영양소 손실, 조직 손상 등이 발생할 수 있어 열처리 시간과 온도 조건의 정밀한 제어가 필요하다.

2. 과열증기의 산업적 활용 및 미생물 제어

과열증기의 역사는 100년도 더 거슬러 올라가 19세기 초 산업혁명 이후 증기기관의 열효율을 높이기 위하여 활용되었으며, Rankine 사이클이라고 하는 열역학적 효용을 위해 과열증기의 개념이 본격적으로 등장하였다. 20세기에 들어서 과열증기가 보일러 설비에 기계 및 화학공정의 열 교환 목적으로 활용이 되었으며, 식품산업에서 건조 또는 대량생산을 위한 살균 공정에 활용이 되었다. 다음은 다양한 식품에 대한 과열증기의 살균용 적용에 대한 연구를 정리한 것이다.

2.1. 견과류

과열증기는 견과류 표면의 병원성 미생물 제어에서 높은 살균 효과를 나타냈다. 아몬드와 피스타치오를 대상으로 200℃, 15초 또는 30초 처리 시 *E. coli* O157:H7, *S.* Typhimurium, *S.* Enteritidis PT 30, *L. monocytogenes*가 5.5 log 이상 감소하였다 (Ban and Kang, 2016). 그 중에서도 그람 음성균은 모두 6 log 이상 감소하며, 열에 대하 저항성이 *L. monocytogenes*보다 실험에서 사용된 그람 음성균들의 열 저항성이 상대적으로 낮음을 확인할 수 있었다. 반면 100℃의 포화증에서는 전반적으로 2~3 log 수준의 제어효과를 보였다. 또 다른 연구에서는 피칸과 아몬드 표면의 *S.* Typhimurium과 *S.* Enteritidis를 180℃의 과열증기로 처리하였을 때, 피칸은 13 초, 아몬드는 8 초 만에 검출 한계 이하 (6.34 log

reduction 이상)에 도달한 반면, 포화증기로는 각각 35초 45초의 시간이 검출 한계 이하로 균을 저감하는데 요구된다고 보고하였다(Ban and Kang, 2018). 결과적으로, 과열증기가 머금는 수분의 양은 적어서 표면에 불필요한 응축수를 만드는 것 외에도 살균효과도 월등히 높다는 것을 알 수 있다.

2.2. 과일 및 채소류

과열증기는 과일과 채소류 표면의 병원성 미생물에 대해서도 단시간 내 높은 미생물 사멸 효과를 보였다(Kwon et al., 2018). 수박에서는 200℃, 10초 처리 시 *E. coli* O157:H7, *S.* Typhimurium, 그리고 *L. monocytogenes* 모두 검출 한계 이하로 감소되었으며, 메론에서는 200℃, 30초 처리 시 *S.* Typhimurium이 검출 한계 이하로 제어되었다. 수박과 메론 사이의 저감효율 차이는 표면 거칠기에 영향을 받은 것으로 해석이 되며, 표면이 상대적으로 균일하지 못한 메론 표면이 과열증기로부터 미생물을 일정 수준 보호해주었다. 표면 상태에 따른 미생물 제어 효과는 방울토마토와 오렌지에 대해 과열 증기처리 하였을 때도 관찰할 수 있었다(Ban and Kang, 2018). 큐티클 층으로 인하여 표면이 매끄러운 방울토마토에서는 3초 안에 200℃의 과열증기가 *E. coli* O157:H7, S. Typhimurium, *L. monocytogenes*를 모두 검출 한계 이하로 제어한 반면, 오렌지에서는 같은 온도에서 세 병원균을 검출 한계 이하로 제어하기 위해서는 최소 20초가 필요하였다. 결과적으로, 식품 샘플의 표면 매트릭스에 따라 과열증기의 효과가 달라지는데, 과채류의 경우 열에 대해 민감한 경우가 많기 때문에 껍질이 두껍거나 표면이 매끄럽지 않은 이상 모든 과채류에 대해 적용하기는 어려울 수 있음을 시사한다.

2.3. 종자류

최근에 미국에서는 새싹채소에 의한 식중독 사건이 다수 발생하였고 FDA에서는 종자에 대한 완전한 살균이 어려움을 시사한 바 있었다(Fahey et al., 2023). 기존의 FDA 권고에서는 20,000 ppm의 calcium hypochlorite에 10–15분 침지하는 것을 권고하였으나, 이에 대한 효과는 현재는 많은 의문을 남기고 있는 실정이다(Ocho Bernal et al., 2023). 하지만 종자에 과도한 물리적 처리를 할 경우, 미생물을 제어하더라도 발아에 필요한 효소까지 제어될 수 있어 조심스러운 접근이 필요하다. 최근 연구에서 파이프에 빠르게 흐르는 250–300℃의 과열증기에 무 종자를 흘려 1초 미만의 처리로 주요 병원균을 제어하는 시스템을 구축한 바 있다(Kim, Park, Ahn, et al., 2024). 특히 해당 연구에서는 종자 표면에 미세한 균열을 주어 종자의 수분 흡수 능력을 향상시켜 초기 발아율을 향상시킨 것뿐만 아니라 염에 대한 저항성도 개선하여 과열증기의 적용 가능성을 밝혔다. 하지만, 대규모 처리에서는 전체적인 온도제어가 어려울 수 있어 추후에 스케일업 연구가 요구되고 있다.

2.4. 식품접촉표면 (생물막)

과열증기는 표면에 대해 강력한 살균효과를 보이고, 압력을 가지고 분사되기 때문에 생물막 제어에 대한 효과도 기대할 수 있다. 선행연구에서는 식품 가공 환경에서 중요한 스테인리스 스틸 및 PVC 표면에 형성된 생물막에 대해서 효과적인 살균력을 보였다(Ban et al., 2014). 스테인리스 스틸 표면에서는 200℃, 5초 처리 시 *E. coli* O157:H7 3.42 log, *S.* Typhimurium 3.74 log, *L. monocytogenes* 3.95 log reduction을 달성하였고, PVC 표면에서는 200℃, 20초 처리로 *E. coli* 4.76 log 이상, S. Typhimurium 5.03 log 이상, *L. monocytogenes* 3.88 log reduction에 도달하였다. 생물막 내 미생물은 부착 구조로 인해 일반적인 영양세포보다 제어가 어렵지만, 고온 단시간 과열증기로 상당한 살균이 가능하였으며, 열 전도 특성이 좋은 스테인리스 스틸 표면에 형성된 바이오필름 내부 균 제어가 더 용이하다는 것을 알 수 있다.

2.5. 내열성 포자 제어

영양세포에 비해 열에 대하여 높은 내성을 보이는 포자

Table 1. Studies on the microbicidal or sporicidal effect of superheated steam on various food or food contact surface.

Sample	Microorganisms	Temperature	Time	Log reduction	Reference
Black peppercorn	*S.* Typhimurium	100℃ (SS)	25 s	>6.34	(Ban and Kang, 2018)
	& S. Enteritidis	140℃ (SHS)	13 s	>6.34	
		180℃ (SHS)	3 s	>6.34	
Pecan		100℃ (SS)	35 s	>6.34	
		140℃ (SHS)	19 s	>6.34	
		180℃ (SHS)	13 s	>6.34	
Almond		100℃ (SS)	45 s	>6.34	
		140℃ (SHS)	30 s	>6.34	
		180℃ (SHS)	8 s	>6.34	
Watermelon	*E. coli* O157:H7	100℃ (SS)	10 s	3.52	(Kwon et al., 2018)
		200℃ (SHS)	10 s	>5.16	
	S. Typhimurium	100℃ (SS)	10 s	3.54	
		200℃ (SHS)	10 s	>4.99	
	L. monocytogenes	100℃ (SS)	10 s	3.14	
		200℃ (SHS)	10 s	>4.89	
Cantaloupe	*E. coli* O157:H7	100℃ (SS)	30 s	2.93	
		200℃ (SHS)	30 s	>5.72	
	S. Typhimurium	100℃ (SS)	30 s	3.95	
		200℃ (SHS)	30 s	>5.01	
	L. monocytogenes	100℃ (SS)	30 s	3.61	
		200℃ (SHS)	30 s	>4.99	
Cherry tomato	*E. coli* O157:H7	100℃ (SS)	3 s	2.3	(Ban and Kang, 2018)
		200℃ (SHS)	3 s	>5.74	
	S. Typhimurium	100℃ (SS)	3 s	2.66	
		200℃ (SHS)	3 s	>6.05	
	L. monocytogenes	100℃ (SS)	3 s	1.39	
		200℃ (SHS)	3 s	>5.21	
Oranges	*E. coli* O157:H7	100℃ (SS)	20 s	2.57	
		200℃ (SHS)	20 s	>5.91	
	S. Typhimurium	100℃ (SS)	20 s	2.33	
		200℃ (SHS)	20 s	>5.75	
	L. monocytogenes	100℃ (SS)	20 s	2.42	
		200℃ (SHS)	20 s	>5.27	
Pistachio	*E. coli* O157:H7	100℃ (SS)	30 s	3	(Ban and Kang, 2016)
		200℃ (SHS)	30 s	6.1	
	S. Typhimurium	100℃ (SS)	30 s	3.3	
		200℃ (SHS)	30 s	6.3	
	S. Enteritidis PT 30	100℃ (SS)	30 s	2.7	
		200℃ (SHS)	30 s	6.4	
	L. monocytogenes	100℃ (SS)	30 s	2.7	
		200℃ (SHS)	30 s	5.5	
Almond	*E. coli* O157:H7	100℃ (SS)	15 s	3.9	
		200℃ (SHS)	15 s	6.2	
	S. Typhimurium	100℃ (SS)	15 s	3.8	
		200℃ (SHS)	15 s	6.5	
	S. Enteritidis PT 30	100℃ (SS)	15 s	2.9	

Sample	Microorganisms	Temperature	Time	Log reduction	Reference
		200℃ (SHS)	15 s	6.7	
	L. monocytogenes	100℃ (SS)	15 s	2.4	
		200℃ (SHS)	15 s	5.7	
Radish seed	*E. coli* O157:H7	200℃ (SHS)	<1 s, 3 times	2.92	(Kim, Park, Ahn, et al., 2024)
		300℃ (SHS)	<1 s, 3 times	4.42	
	S. enterica	200℃ (SHS)	<1 s, 3 times	3.24	
		300℃ (SHS)	<1 s, 3 times	4.73	
	L. monocytogenes	200℃ (SHS)	<1 s, 3 times	2.86	
		300℃ (SHS)	<1 s, 3 times	3.95	
Stainless steel	*E. coli* O157:H7	100℃ (SS)	5 s	1.51	(Ban et al., 2014)
	biofilm	200℃ (SHS)	5 s	3.42	
	S. Typhimurium	100℃ (SS)	5 s	1.7	
	biofilm	200℃ (SHS)	5 s	3.74	
	L. monocytogenes	100℃ (SS)	5 s	1.38	
	biofilm	200℃ (SHS)	5 s	3.95	
PVC	*E. coli* O157:H7	100℃ (SS)	20 s	2.16	
	biofilm	200℃ (SHS)	20 s	>4.76	
	S. Typhimurium	100℃ (SS)	20 s	2.9	
	biofilm	200℃ (SHS)	20 s	>5.03	
	L. monocytogenes	100℃ (SS)	20 s	2.17	
	biofilm	200℃ (SHS)	20 s	3.88	
Wheat kernel	Total bacteria	110℃ (SHS)	80 s	2.84	(Hu et al., 2016)
		200℃ (SHS)	80 s	2.98	
	Total mold	110℃ (SHS)	20 s	1.43	
		200℃ (SHS)	20 s	>2.03	
	Bacillus spp.	110℃ (SHS)	80 s	0.35	
		200℃ (SHS)	80 s	0.74	
Garlic	*B. cereus* endospore	120℃ (SHS)	180 s	3.46	(Jo et al., 2019)
		180℃ (SHS)	180 s	5.27	
Black peppercorn	*B. cereus* endospore	200℃ (SHS)	60 s	1.15	(Kim et al., 2023)
		300℃ (SHS)	60 s	3.57	
		300℃ (SHS)	10 s × 6	>5.63	
Aluminum foil	*B. cereus* endospore	135℃ (SHS)	2 s	0.6	(Rana et al., 2022)
	Aspergillus fischeri ascospore	135℃ (SHS)	2 s	>4.43	

는 exosporium, coat, cortex, dehydrated core 등으로 구성되어 있으며, 특히 탈수된 내부 구조에서 열 저항성이 기인한다(Khanal et al., 2024). 따라서, 과열증기로 박테리아 내생포자를 제어하려면 높은 온도, 긴 처리 시간이 아니라면, 별도의 조합처리나 새로운 방법이 요구된다. 최근 연구에서 마늘 표면의 *B. cereus* 포자는 180℃, 180초 과열증기 처리 시 5.27 log 감소가 확인되어, 견과류나 과일보다 높은 온도와 시간이 요구됨을 보여준다(Jo et al., 2019). Kim et al. (2023)에서는 연속처리 보다 펄스로 나눠서 처리하는 것이 포자 제어 및 piperine과 같은 성분을 유지하는데 유리하다고 보고한 바가 있으며, 1 분 이내의 살균에서 3 log reduction 이상을 달성하기 위해서는 최소 250℃가 필요하였다. 포자 종류에 따른 차이도 관찰되었다. 알루미늄 호일 표면에서 135℃, 2초 처리 시 *B. cereus* 내생포자 (endospore)는 0.6 log 감소에 그친 반면, *Aspergillus fischeri* 자낭포자 (ascospore)는 동일

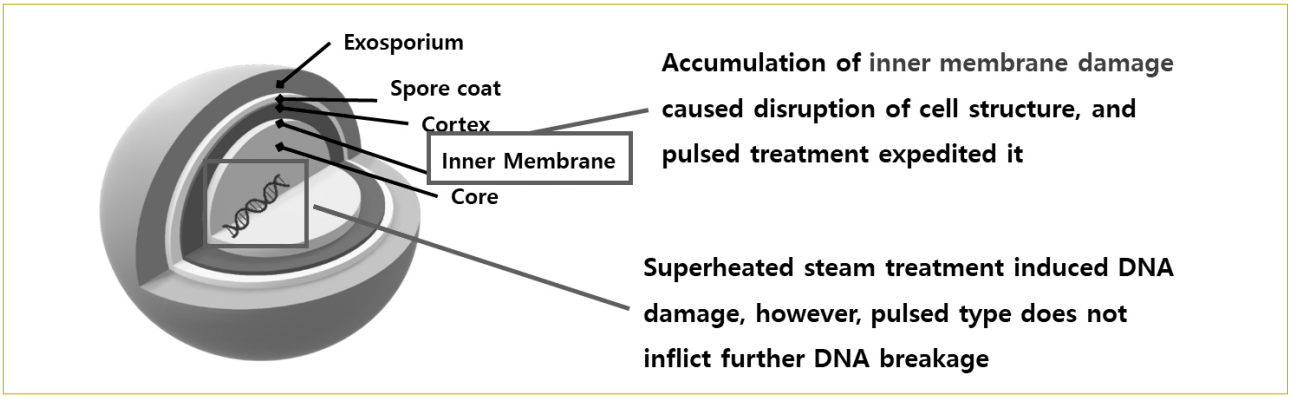

Fig 1. Inactivation mechanisms of pulsed superheated steam.

조건에서 4.43 log 감소하여, 생식의 목적이 강한 자낭포자는 생존을 위한 내생포자와는 달리 열에 대한 저항성이 박테리아 영양세포 만큼 약하다는 것을 알 수 있다(Rana et al., 2022).

3. 과열증기의 미생물 제어 기작

과열증기는 높은 온도를 기반으로 하여 짧은 시간 내에 표면 미생물을 빠르게 사멸시킬 수 있는 열처리 기술이다. 기본적으로 기존의 일반적인 열처리와 유사한 사멸 메커니즘을 따르며, 처리 과정에서 세포막의 파괴, 단백질의 변성, 핵산 등 세포 내 구성물의 비활성화가 동시에 발생하여 미생물의 생존을 억제한다(Ahnoff et al., 2015; Kim, Park and Kang, 2024). 이러한 작용으로 인해 영양세포 상태의 일반적인 병원성 세균들은 수 초 이내의 과열증기 처리로도 충분한 살균 효과를 얻을 수 있다. 그러나 내생포자를 형성하는 세균의 경우, 고도의 구조적 방어 기작을 가지고 있어 일반 세균에 비해 훨씬 높은 내열성을 보이며, 이로 인해 수 분 단위의 장시간 처리가 요구된다(Fan et al., 2024). 따라서 포자에 대한 살균 효과를 이해하기 위해서는 일반적인 열처리와 차별화된 포자 특이적 사멸 메커니즘에 대한 고찰이 필요하다.

포자는 exosporium, spore coat, cortex, dehydrated core 등으로 구성되어 열에 대한 내성이 매우 높으며, 특히 탈수된 core 내부의 낮은 수분활성도가 열전달을 제한하는 주요 요인으로 작용한다. 과열증기 처리 시에도 이러한 포자의 복합구조로 인해 살균은 점진적이고 단계적으로 일어난다. 기존 연구에 따르면 습열 (wet heat)은 주로 내막 (inner membrane)의 단백질 변성과 효소 비활성화를 통해 포자를 사멸시키는 것으로 알려져 있다. Warth (1980)는 습열 처리 후 효소 불활성화가 먼저 발생하며 이어서 내막 손상이 뒤따른다고 보고하였고, Coleman et al. (2010)은 내막 단백질 변성이 막 파괴로 이어진다고 설명하였다. Fan et al. (2019) 또한 열초음파 처리 이후 내막 손상과 DPA 유출을 관찰하였다. 반면, 건열 (dry heat)은 주로 DNA 이중가닥 절단을 유발하여 포자를 사멸시킨다. Reineke & Mathys (2020)는 건열 처리 시 DNA 손상이 주요한 사멸 기작임을 확인하였다. 과열증기는 높은 온도와 함께 표면 건조 효과를 동반하기 때문에 습열과 건열의 중간적 특성을 나타낼 수 있다. 최근 연구에서는 pulsed 과열증기와 continuous 과열증기 처리에 따른 포자 내 개별 구조물의 손상 차이가 평가되었다. 40초까지의 처리에서는 내막 손상 정도가 두 처리 간 유의한 차이를 보이지 않았으나, 60초 처리 시 pulsed 과열증기 처리에서 더 많은 DPA 유출이 관찰되어 ($p < 0.05$) pulsed 처리에서 내막 손상이 누적됨을 시사하였다. 효소 비활성화 역시 20초 이후부터 유의한 차이를 보여 ($p < 0.05$) 단백질 변성이 초기 살균 차이를 설명하는 주요 요인으로 제시되었다. DNA 손상은 장시간 continuous 과열증기 처리 후 일부 관찰되었으나 ($p > 0.05$), 미생물 사멸의 주요 차이는 주로 효소 및 내막 손상에서 기인하는

것으로 분석되었다. 이러한 결과는 과열증기 처리에서도 pulsed 방식이 습열적 특성을 증폭시키는 방식으로 작용할 수 있음을 시사한다(Setlow, 2006).

결론

과열증기는 높은 온도와 우수한 열전달 특성을 기반으로 식품 원료 및 식품접촉 표면의 병원성 미생물 제어에 효과적인 기술로 평가되고 있다. 영양세포 상태의 일반 병원균은 수 초 이내의 과열증기 처리로도 높은 살균 효과를 보이며, 다양한 농산물, 견과류, 종자류, 가공설비 표면 등 여러 대상에 적용 가능성이 확인되었다. 특히, 생물막 구조를 포함한 부착형 병원균 제어에서도 일정 수준 이상의 살균 효과가 보고되었다. 한편, 내생포자를 포함하는 고 내성 미생물의 경우 포자의 구조적 특성으로 인해 열저항성이 크게 증가하며, 이에 따라 더 높은 온도와 장시간의 처리가 요구된다. 과열증기에 의한 포자 살균은 내막 손상, 단백질 변성, 효소 불활성화, DPA 유출 등의 순차적 변화를 거쳐 진행되며, pulsed 처리가 continuous 처리에 비해 내막 손상 누적 및 초기 효소 변성에서 유리한 결과를 보였다. 건열적 특성에 의해 DNA 손상 또한 일정 수준 발생하지만, 미생물 사멸의 주요 차이는 내막과 단백질 표적에 의한 것으로 판단된다. 이러한 결과들은 과열증기가 다양한 식품 및 가공환경에서 병원성 미생물 제어를 위한 효과적 도구로 활용될 수 있음을 보여주며, 특히 포자 제어 효율 향상을 위한 최적화 연구 및 복합처리 기술 개발이 향후 중요한 과제로 제시된다.

참고 문헌

1. Abu-Farah, L., Germann, N., 2022. Simulations of thermal phase changes and bacterial inactivation in a superheated steam dishwasher. Physics of Fluids 34.
2. Ahnoff, M., Cazares, L.H., Sköld, K., 2015. Thermal inactivation of enzymes and pathogens in biosamples for MS analysis. Bioanalysis 7, 1885-1899.
3. Alfy, A., Kiran, B., Jeevitha, G., Hebbar, H.U., 2016. Recent developments in superheated steam processing of foods—a review. Critical reviews in food science and nutrition 56, 2191-2208.
4. Ban, G.-H., Kang, D.-H., 2016. Effectiveness of superheated steam for inactivation of *Escherichia coli* O157: H7, *Salmonella* Typhimurium, *Salmonella* Enteritidis phage type 30, and *Listeria monocytogenes* on almonds and pistachios. International Journal of Food Microbiology 220, 19-25.
5. Ban, G.-H., Kang, D.-H., 2018. Inactivation of *Escherichia coli* O157: H7, *Salmonella* Typhimurium, and *Listeria monocytogenes* on cherry tomatoes and oranges by superheated steam. Food Research International 112, 38-47.
6. Ban, G.-H., Yoon, H., Kang, D.-H., 2014. A comparison of saturated steam and superheated steam for inactivation of *Escherichia coli* O157: H7, *Salmonella* Typhimurium, and *Listeria monocytogenes* biofilms on polyvinyl chloride and stainless steel. Food Control 40, 344-350.
7. Coleman, W., Zhang, P., Li, Y.Q., Setlow, P., 2010. Mechanism of killing of spores of *Bacillus cereus* and Bacillus megaterium by wet heat. Letters in Applied Microbiology 50, 507-514.
8. Fahey, J.W., Smilovitz Burak, J., Evans, D., 2023. Sprout microbial safety: a reappraisal after a quarter-century. Food Frontiers 4, 318-324.
9. Fan, L., Ismail, B.B., Hou, F., Muhammad, A.I., Zou, M., Ding, T., Liu, D., 2019. Thermosonication damages the inner membrane of *Bacillus subtilis* spores and impels their inactivation. Food Research International 125, 108514.
10. Fan, L., Zhang, Y., Ismail, B.B., Muhammad, A.I., Li, G., Liu, D., 2024. *Bacillus* spore germination: mechanisms, identification, and antibacterial strategies. Critical reviews in food science and nutrition 64, 11146-11160.
11. Hu, Y., Nie, W., Hu, X., Li, Z., 2016. Microbial decontamination of wheat grain with superheated steam. Food Control 62, 264-269.

12. Jo, Y., Bae, H., Kim, S.-S., Ban, C., Kim, S.O., Choi, Y.J., 2019. Inactivation of *Bacillus cereus* ATCC 14579 spore on garlic with combination treatments of germinant compounds and superheated steam. Journal of food protection 82, 691-695.

13. Khanal, S., Kim, T.D., Begyn, K., Duverger, W., Kramer, G., Brul, S., Rajkovic, A., Devlieghere, F., Heyndrickx, M., Schymkowitz, J., 2024. Mechanistic insights into the adaptive evolvability of spore heat resistance in *Bacillus cereus* sensu lato. International Journal of Food Microbiology 418, 110709.

14. Kim, S.-H., Park, S.-H., Ahn, J.-B., Kang, D.-H., 2024. Inactivation of *E. coli* O157: H7, *Salmonella enterica*, and L. monocytogenes through semi-continuous superheated steam treatment with additional effects of enhancing initial germination rate and salinity tolerance. Food microbiology 117, 104373.

15. Kim, S.-H., Park, S.-H., Kang, D.-H., 2023. Inactivation of *Bacillus cereus* endospores on black pepper by pulsed superheated steam system. Food Research International 167, 112649.

16. Kim, S.-H., Park, S.-H., Kang, D.-H., 2024. Simultaneous combination treatment with superheated steam and nebulized organic acid to inactivate *Bacillus cereus* endospores on stainless steel surfaces. Food Control 155, 110028.

17. Kwon, S.-A., Song, W.-J., Kang, D.-H., 2018. Comparison of the effect of saturated and superheated steam on the inactivation of *Escherichia coli* O157: H7, *Salmonella* Typhimurium and *Listeria monocytogenes* on cantaloupe and watermelon surfaces. Food microbiology 72, 157-165.

18. Ocho Bernal, T.G., Lyttle, N., Jung, Y., 2023. Microbiological quality of microgreen seeds purchased from online vendors and evaluating seed decontamination techniques available online. Frontiers in Sustainable Food Systems 7, 1264472.

19. Park, H.W., Balasubramaniam, V., Heldman, D.R., Cai, S., Snyder, A.B., 2024. Computational fluid dynamics analysis of superheated steam's impact on temperature and humidity distribution within enclosed dry food processing spaces. Journal of Food Engineering 360, 111718.

20. Rana, Y.S., Chen, L., Balasubramaniam, V., Snyder, A.B., 2022. Superheated steam effectively inactivates diverse microbial targets despite mediating effects from food matrices in bench-scale assessments. International Journal of Food Microbiology 378, 109838.

21. Rauf, S.B., 2023. Saturated and Superheated Steam Tables, Thermodynamics Made Simple for Energy Engineers. River Publishers, pp. 55-73.

22. Reineke, K., Mathys, A., 2020. Endospore inactivation by emerging technologies: a review of target structures and inactivation mechanisms. Annual review of food science and technology 11, 255-274.

23. Romdhana, H., Bonazzi, C., Esteban-Decloux, M., 2015. Superheated steam drying: An overview of pilot and industrial dryers with a focus on energy efficiency. Drying Technology 33, 1255-1274.

24. Setlow, P., 2006. Spores of *Bacillus subtilis*: their resistance to and killing by radiation, heat and chemicals. Journal of applied microbiology 101, 514-525.

25. Warth, A., 1980. Heat stability of *Bacillus cereus* enzymes within spores and in extracts. Journal of bacteriology 143, 27-34.

26. Zhang, H., Yu, F., Yi, J., Xu, X., Ma, Y., 2024. Superheated steam technology: Recent developments and applications in food industries. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety 23, e70073.