# 이산화염소 가스의 식품 살균 적용 연구 동향

## Research trends on the application of chlorine dioxide gas to food sterilization

김세연, 박상현

Se-Yeon Kim, Sang-Hyun Park

공주대학교 식품공학과

Department of Food Science and Technology, Kongju National University, Yesan, Chungnam, 32439, Republic of Korea

박 상 현

Correspondence to

Department of Food Science and Technology, Kongju National University, Yesan, Chungnam, 32439, Republic of Korea.
Phone: +82-41-330-1482.
E-mail: shpark@kongju.ac.kr

## 서론

최근 1인 가구 및 맞벌이 가구가 증가함에 따라 식품 소비에 있어 편리함을 추구하는 트렌드가 확산되고 있으며 이에 따라 즉석식품 시장규모가 커지고 있다. 그 중 하나로 신선편이 식품 시장 역시 소비자의 건강에 대한 관심 증가와 함께 급속도로 확대되고 있는 추세이다(18, 21). 신선편이 식품이란 "농 · 임산물을 세척, 박피, 절단 또는 세절 등의 가공 공정을 거치거나 이에 단순히 식품 또는 식품첨가물을 가한 것으로서 그대로 섭취할 수 있는 샐러드, 새싹채소 등"으로 정의된다(21). 이러한 신선편이 식품의 경우 가공 공정을 최소화하여 생산되기 때문에 간편성과 식품 본연의 영양학적 · 기능적 특성을 유지할 수 있다는 장점이 있으나 유해미생물에 의한 식중독 사고로부터 자유로울 수 없다는 문제점을 지니고 있다. 실제 국내에서 유통되고 있는 신선편이 과일 및 채소에 대한 미생물적 품질 평가 연구를 통해 대장균군, *Escherichia coli*, *Bacillus cereus*, *Staphylococcus aureus* 등의 검출 사례가 보고된 바 있다 (19, 20, 31). 또한 국내 신선편이 식품에서의 검출도는 낮으나 국외의 연구 결과 및 사례를 바탕으로 볼 때, *E. coli* O157, *Listeria monocytogenes*, *Salmonella* 등의 식중독균 역시 신선편이 식품에서 안전성 문제를 야기할 수 있을 것으로 생각된다(25).

신선편이 과일 및 채소에 존재하는 미생물 제어를 위해 살균소독제를 활용한 세척이 가장 손쉽게 사용될 수 있으며 그 외에 자외선 조사, 플라즈마 등의 비가열 살균 기술을 활용한 연구가 이루어지고 있다(3, 50). 그 중 하나로 기존 액상 형태가 아닌 가스 형태의 살균소독제를 활용한 신선편이 과일 및 채소에 존재하는 유해미생물 제

어 연구가 이루어지고 있으며 이에 대표적으로 사용되는 물질이 이산화염소($ClO_2$)이다. 가스 형태 살균소독제의 경우 액상의 살균소독제에 비해 우수한 확산성 및 투과성을 나타내어 손상된 표면이나 접촉이 어려운 부위에 존재하는 식중독균 제어에 있어 효과적인 것으로 알려져 있다(13). 또한 가스 형태이기 때문에 식품의 저장이나 운송 중에도 활용될 수 있는 가능성을 지니고 있다. 하지만 눈에 보이지 않는 가스 형태이기 때문에 사용상 작업자의 안전성 문제를 고려해야 하며 실제 이산화염소 가스 역시 인체 유해성을 지니기 때문에 식품현장에서의 사용을 위해서는 제한이 따른다. 본 회고에서는 가스 살균소독제로써 이산화염소의 특성, 관련 연구 동향 및 상업적 적용 가능성을 검토하고자 한다.

## 본론

### 1. 이산화염소의 특성

이산화염소의 일반적인 특성을 표1에 나타내었다. 이산화염소는 염소와 유사한 이취를 가지며 상온에서 황록색를 띄는 기체 상태의 화합물이다. 물에 대한 용해도가 염소에 비해 10배 이상 높은 것으로 알려져 있으며 수용액 상에서 가수분해되지 않고 용해된 기체 상태로 존재할 수 있다(1, 11). 또한 휘발성이 높아 이산화염소 용액을 교반하거나 blowing하는 과정을 통해 공기 중으로 빠르게 배출될 수 있다. 이산화염소는 물리적 충격이나, 압력, 온도 등에 민감하다고 알려져 있으며 공기 중 이산화염소 가스 농도가 10% (v/v)를 초과하면 폭발할 수 있어 일반적으로 저농도의 안정화된 수용액 상태로 판매 및 운송되거나 사용 전 전구 물질의 혼합을 통해 제조되어야 한다(37, 53). 또한 이산화염소 용액은 빛에 의해 광분해될 수 있어 빛에 노출되지 않는 조건으로 보관 및 이송되어야 한다(53). 이산화염소는 비교적 넓은 pH 범위 (pH 4-10)에서 안정성을 나타내지만 pH 10 이상의 수용액에서는 염소산염(chlorate) 및 아염소산염(chlorite) 이온을 형성하며 pH 2 이하의 환경에서는 염화물 이온으로 완전 해리된다(2, 11).

이산화염소는 강한 산화력을 나타내는 물질로 염소에 비해 2.5배의 산화력을 가진다고 알려져 있다. 이산화염소는 단일 전자 교환 반응을 유도하며 유기물질의 전자가 풍부한 부분을 산화시켜 $ClO_2^-$ 이온으로 환원된다(17, 55). 이는 염소의 치환 반응과 다르며, 결과적으로 이산화염소는 다른 염소계 살균소독제와 달리 유기물질과 반응하여 트리할로메탄(trihalomethanes; THMs)이나 할로초산(haloacetic acids, HAAs) 등의 유해물질을 적게 생산하는 것으로 알려져 있다(39).

이산화염소는 여러 제법을 통해 만들어질 수 있으며 미국 FDA에서는 1) 아염소산나트륨(sodium chlorite) 용액을 염소 가스 또는 차아염소산나트륨(sodium hypochlorite)과 염산의 혼합물과 반응시키거나 2) 염소산나트륨(sodium chlorate) 용액을 황산의 존재하에서 과산화수소와 반응시키거나 3) 아염소산나트륨 용액의 전기분해를 통해 생성된 이산화염소를 식품용으로 사용할 수 있도록 허가하고 있다(47).

### 2. 이산화염소 관련 규제

미국 FDA에서는 물에 용해된 형태의 이산화염소를 가금류 가공에 있어 3 ppm 이상 잔류하지 않는 범위 내에서 항균 물질로 사용할 수 있도록 허가하고 있으며 동일한 형태로 3 ppm 이상 잔류하지 않는 범위 내에서 과일 및 야채류의 세척에 사용을 허가하고 있다(47). 또한 최근 미국 FDA는 이산화염소 가스를 의료용 기구의 살균에 사용할 수 있도록 허가한 바 있다(48). 우리나라의 경우 이산화염소(수)는 빵류 제조용 밀가루에 한하여 1kg 당 30mg 이하로 사용할 수 있으며, 과일류, 채소류 등의 살균 목적으로 최종 식품에 잔류하지 않는 조건으로 사용 가능하다(22). 이산화염소수를 식품용 살균제로 사용할 경우 제품 사용방법에 따라 희석하여 침지 처리한 후 흐르는 물에 1회 이상 세척할 것을 권유하고 있다. 또한 식품첨가물 공전에서 기구 등의 살균 · 소독제로써 식품조리 · 판매용 기구, 유가공용 기구 등에 이산화염소의 사용을 허가하고 있

다. 우리나라의 경우 이산화염소수와 이산화염소 가스를 구분하여 관리하고 있으며 식품용 살균제로는 이산화염소수만 허용하고 있다. 이산화염소 가스의 경우 상기에서 언급된 밀가루 개량제로만 허용되어 있으며 이 경우 작업자가 흡입하지 않도록 사람이 없는 분리된 공간에서 사용하고, 사용 후에는 제거해야 한다(23).

산업안전보건법 "화학물질 및 물리적인자의 노출기준"에서 이산화염소의 노출기준을 시간가중평균노출기준(TWA) 0.1 ppm(0.3 mg/$m^3$), 단시간노출기준(STEL) 0.3 ppm(0.9 mg/$m^3$)으로 제시하고 있다. 허용 노출 한도 이상의 가스를 흡입하였을 때에는 눈, 피부 및 호흡기를 자극할 수 있어 작업 시 가스 노출을 방지하기 위한 폐쇄형 시스템이 필요하다. 이러한 문제로 인해 이산화염소 가스의 식품 적용이 제한될 수 있으며 이산화염소 가스의 식품 산업에서의 폭넓은 적용을 위해서는 작업자의 교육, 가스의 유출을 예방할 수 있는 폐쇄 시스템의 개발 등이 필수적이라 할 수 있다(40).

### 3. 이산화염소의 미생물 살균 기작

강한 산화제로써 이산화염소는 세균, 바이러스, 곰팡이 및 효모 등에 대한 폭넓은 살균 효과를 나타낼 수 있다. 이산화염소의 미생물 살균 기작은 미생물 세포막을 구성하고 있는 단백질과 효소에 대한 산화적 손상 유도, 세포막 손상에 의한 세포 내 물질의 용출, 단백질, DNA, RNA와 같은 세포질 내 물질의 산화적 손상, 단백질 합성의 저해 등 이다(1, 38). 특히 단백질을 구성하고 있는 아미노산 중 시스테인, 메티오닌, 트립토판 및 티로신과 높은 반응성을 나타내는 것으로 알려져 있다(1).

이산화염소의 미생물 살균 효과에는 여러 요인들이 영향을 미칠 수 있는 것으로 알려져 있다. 이산화염소수 처리의 경우 용액 내 부유 입자의 존재, 유기물의 존재가 미생물 살균 효과에 영향을 미칠 수 있다고 알려져 있다(7). 온도 조건에 따른 이산화염소수의 미생물 살균 효과는 일반적인 염소수 처리와 동일하게 처리 온도가 증가함에 따라 증가하는 것으로 알려져 있다. 이산화염소수 처리에 의한 *E. coli* O157:H7 및 *Pseudomonas aeruginosa* 의 제어 효과가 10℃ 에서보다 20℃에서 더 높게 나타났다는 연구 결과가 보고된 바 있으며 *Mycobacterium avium* 의 제어 효과 역시 5-30℃ 온도 범위에서 온도가 증가할수록 높게 나타난 바 있다(43, 51). 또한 이산화염소수의 처리에 있어 pH가 미생물 살균 효과에 미치는 영향에 대한 연구는 많이 보고된 바 없으나 pH 6-10의 범위에서는 큰 영향이 없다는 연구 결과가 보고된 바 있다(10).

이산화염소 가스의 경우 이산화염소수 처리와는 다른 요인들이 미생물 살균 효과에 영향을 미치는 것으로 보고되고 있으며 상대습도 조건이 가장 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 이산화염소 가스의 미생물 살균 효과는 높은 상대습도 조건에서 처리 시 높게 나타나며 이는 이산화염소 가스의 물에 대한 높은 용해도에 기인한다(13). 피망을 0.3 mg/L 농도의 이산화염소 가스로 처리하였을 때, 상대습도 조건이 55%에서 95%로 증가함에 따라 *E. coli* O157:H7 제어 효과가 1.93 log에서 4.00 log CFU/5g으로 증가하였다(13). 토마토에 존재하는 *E. coli* O157:H7, *S.* Typhimurium, *L. monocytogenes* 의 경우 20 ppmv 이산화염소 가스를 20분 간 처리 시 50% 및 70% 상대습도 조건에서 각각 1.07-1.35 log 및 3.06-4.39 log 감소가 나타났으며 90% 상대습도 조건에서는 6 log 이상의 감소가 확인되었다(34). 또한 이산화염소 가스 처리에 의한 *Bacillus subtilis* 포자 제어 효과 역시 높은 상대습도 조건에서 증가한다고 보고된 바 있으며 이는 이산화염소 가스가 높은 습도조건에서 swelling 된 포자에 더 잘 침투되기 때문이라고 설명된다(52, 54). 이러한 상대습도 조건의 영향 때문에 대부분의 이산화염소 가스 활용 연구는 80% 이상의 상대습도 조건에서 이루어지고 있다. 미생물이 존재하는 표면의 특성 역시 이산화염소 가스의 살균 효과에 영향을 미칠 수 있다. 표면 거칠기와 소수성이 다른 식품 및 식품접촉표면 샘플에 존재하는 식중독균에 대한 이산화염소 가스 처리 효과를 확인해보았을 때, 샘플 표면의 소수성 정도와 식중독균 제어 효과 사이에 높은 상관 관계를 확인할 수 있었다(32).

친수성이 높은 표면 샘플에 존재하는 식중독균이 이산화염소 가스의 처리에 의해 더 많이 저감화 되었으며 이는 물에 대한 용해도가 높은 이산화염소 가스의 특성에 따라 샘플 표면에서 수분과 반응하는 이산화염소 가스의 양이 증가하였기 때문일 것으로 생각된다. 온도 조건 역시 이산화염소 가스의 미생물 살균 효과에 영향을 미칠 수 있으며 이산화염소수 처리와 다르게 낮은 온도 조건에서 식품 및 식품접촉표면에 존재하는 미생물에 대한 제어 효과가 더 높게 나타났다는 연구 결과가 있다(33). 이는 가스의 용해도가 낮은 온도 조건에서 더 높아짐에 따른 것으로 생각되며 유사한 결과가 오존 가스를 활용한 연구에서도 보고된 바 있다(6).

### 4. 이산화염소 가스 적용 연구

2000년대 이후부터 이산화염소 가스를 활용한 식품 및 식품접촉표면에 존재하는 유해미생물 제어 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 이산화염소 가스를 활용한 연구는 과일 및 야채에서 가장 많이 이루어지고 있으며 사과, 딸기, 블루베리, 시금치, 감자, 오렌지, 토마토, 상추, 숙주, 당근, 멜론, 피망 등에 존재하는 유해미생물 제어 연구 결과가 보고된 바 있다(표2). 또한, 스테인리스 스틸, 목재, 플라스틱, PVC, 유리 등의 식품접촉표면에 존재하는 식중독균에 대한 이산화염소 가스의 제어 효과 연구 역시 진행된 바 있다(표 3).

진행된 연구 결과를 통해 이산화염소 가스가 식품 및 식품접촉표면에 존재하는 유해미생물 제어에 있어 뛰어난 효과를 나타낸다는 것을 확인할 수 있다. 하지만 몇몇 연구에서는 산화력이 높은 이산화염소 가스의 특성으로 인해 과일 및 야채의 색 변화 등과 같은 품질 변화가 일어날 수 있다고 보고하고 있다. 또한 산화력으로 인해 스테인리스 스틸과 같은 표면에서는 부식에 의한 문제가 일어날 수 있어 이산화염소 가스의 실제적인 적용을 위해서는 살균 효과와 더불어 처리 대상에 따른 최적 처리 조건을 설정하는 연구가 진행되어야 할 것으로 생각된다.

## 결론

이산화염소 가스는 비가열 살균 기술로 액상의 살균소독제와 차별되는 특성으로 인해 식품의 저장이나 운송 기간 중에 활용될 수 있는 장점을 지니고 있으며 식품 뿐만 아니라 식품접촉표면 내 유해미생물 제어에도 활용될 수 있다. 또한 식품 산업 외에 미국 FDA의 승인 사례에서도 볼 수 있듯이 의료용 기구 살균용으로도 높은 활용 가능성을 가지고 있다. 하지만 이산화염소 가스의 인체 위해성 문제가 있으며 실제 이산화염소 가스의 발생 농도 조절이 안되는 제품을 사용할 경우 작업자의 안전 문제가 발생할 수 있다. 따라서 반드시 밀폐된 처리 시설 및 가스 발생 농도가 조절되는 장비의 활용이 필요하다. 또한 현재 이산화염소 가스의 경우 밀가루 개량제로만 허용되어 있기 때문에 이산화염소 가스의 활용을 위해서는 관련 사용 기준이 뒷받침 되어야 할 것으로 생각된다. 이산화염소 가스의 실제적 적용을 위한 관련 연구의 추가적인 진행과 이의 활용을 위한 사용 기준이 확립된다면 이산화염소 가스 처리 기술이 추후 식품안전성 확보에 기여할 수 있는 하나의 중요한 기술로 자리잡을 수 있을 것이라고 생각된다.

## 참고 문헌


1. Aieta, E., Berg, J.D. (1986). A review of chlorine dioxide in drinking water treatment. Journal American Water Works Association, 78:62–72.

2. Aieta, E.M., Roberts, P.V., Hernandez, M. (1984). Determination of chlorine dioxide, chlorine, and chlorate in water. Journal American Water Works Association, 1:64–77.

3. Baier, M., Görgen, M., Ehlbeck, J., Knorr, D., Herppich, W.B., Schloter, O. (2014). Non-thermal atmospheric pressure plasma: screening for gentle process conditions and antibacterial efficiency on perishable fresh produce. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 22:147–157.

4. Bhagat, A., Mahmoud, B.S.M., Linton, R.H. (2010).

Inactivation of *Salmonella enterica and Listeria monocytogenes* inoculated on hydroponic tomatoes using chlorine dioxide gas. Foodborne Pathogens and Disease, 7:677–685.

5. Bhagat, A., Mahmoud, B.S.M., Linton, R.H. (2011). Effect of chlorine dioxide gas *on Salmonella enterica* inoculated on navel orange surfaces and its impact on the quality attributes of treated oranges. Foodborne Pathogens and Disease, 8:77–85.

6. Cardenas, F.C., Andres, S., Giannuzzi, L., Zaritzky, N. (2011). Antimicrobial action and effects on beef quality attributes of a gaseous ozone treatment at refrigeration temperatures. Food Control, 22:1442–1447.

7. Chen, Y.S.R., Sproul, O.J., Rubin, A.J. (1984). Inactivation of Naegleria Gruberi cysts by chlorine dioxide. EPA Grant R808150–02–0, Department of Civil Engineering, Ohio State University.

8. Du, J., Han, Y., Linton, R.H. (2002). Inactivation by chlorine dioxide gas ($ClO_2$) of *Listeria monocytogenes* spotted onto different apple surfaces. Food Microbiology, 19:481–490.

9. Du, J., Han, Y., Linton, R.H. (2003). Efficacy of chlorine dioxide gas in reducing *Escherichia coli* O157:H7 on apple surfaces. Food Microbiology, 20:583–591.

10. Dychdala, G.R. (1991). Chlorine and chlorine compounds. In: BLOCK SS. (Ed.), Disinfection, Sterlization, and Preservation, 4th Edn. Philadelphia, PA: Lea and Febiger.

11. EPA. (2006). Reregistration eligibility decision (RED) for chlorine dioxide and sodium chlorite (Case 4023).

12. Han, Y., Applegate, B., Linton, R.H., Nelson, P.E. (2003). Decontamination of *Bacillus thuringiensis* spores on selected surfaces by chlorine dioxide gas. Journal of Environmental Health, 66:16–21.

13. Han, Y., Floros, J.D., Linton, R.H., Nielsen, S.S., Nelson, P.E. (2001). Response surface modeling for the inactivation of *Escherichia coli* O157:H7 on green peppers (Capsicum annuum L.) by chlorine dioxide gas treatments. Journal of Food Protection, 64:1128–1133.

14. Han, Y., Linton, R.H., Nielsen, S.S., Nelson, P.E. (2000). Inactivation of *Escherichia coli* O157:H7 on surface–uninjured and –injured green pepper (*Capsicum annuum* L.) by chlorine dioxide gas as demonstrated by confocal laser scanning microscopy.

15. Han, Y., Selby, T.L., Schultze, K.K., Melson, P.E., Linton, R.H. (2004). Decontamination of strawberries using batch and continuous chlorine dioxide gas treatments. Journal of Food Protection, 67:2450–2455.

16. Han, Y., Sherman, D.M., Linton, R.H., Nielsen, S.S., Nelson, P.E. (2000). The effects of washing and chlorine dioxide gas on survival and attachment of *Escherichia coli* O157:H7 to green pepper surfaces. Food Microbiology, 17:521–533.

17. Hoehn, R.C., Rosenblatt, A.A., Gates, D.J. (1996). Considerations for chlorine dioxide treatment of drinking water. Conference proceedings, AWWA Water Quality Technology Conference, Boston, MA.

18. Jang, A.R., Han, A., Lee, S., Jo, S., Song, H., Kim, D., Lee, S.Y. (2021). Evaluation of microbiological quality and safety of fresh–cut fruit products at retail levels in Korea. Food Science and Biotechnology, 30:1393–1401.

19. Jo, M.J., Jeong, A.R., Kim, H.J., Lee, N., Oh, S.W., Kim, Y.J., Chun, H.S., Koo, M. (2011). Microbiological quality of fresh–cut produce and organic vegetables. Korean Journal of Food Science and Technology, 43:91–97.

20. Kim, M.J., Cheigh, C.I. (2021). Microbiological quality of fresh cut fruits in Korea. Korean Journal of Food Science and Technology, 53:809–814.

21. Kim, S.H., Lee, K.I., Heo, S.Y., Lee, W.J. (2019). Research on fresh–cut fruits and vegetables. Korea Rural Economic Institute Report, 1–307.

22. Korean Food and Drug Administration. (2022). Food additives code. Available at: https://various.foodsafetykorea.go.kr/fsd/#/ext/Document/FA.

23. Korean Food and Drug Administration. (2022). Guidelines for food sanitizers. Available at:https://www.foodsafetykorea.go.kr/portal/board/boardDetail.do?bbs _no=bbs110& ntctxt_no=1089811&menu_no=2880.

24. 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. Journal of Zhejiang University SCIENCE B, 13:254–260.

25. Machado–Moreira, B., Richards, K., Brennan, F., Abram, F., Burgess, C.M. (2019). Microbial contamination of fresh produce: What, Where, and How?. Comprehensive Reviews in Food Science and

Food Safety, 18:1727-1750.

26. Mahmoud, B.S.M., Bhagat, A.R, Linton, R.H. (2007). Inactivation kinetics of inoculated *Escherichia coli* O157:H7, *Listeria monocytogenes* and *Salmonella* enterica on strawberries by chlorine dioxide gas. Food Microbiology, 24:736-744.

27. Mahmoud, B.S.M., Linton, R.H. (2008). Inactivation kinetics of inoculated *Escherichia coli* O157:H7 and *Salmonella enterica* on lettuce by chlorine dioxide gas. Food Microbiology, 25:244-252.

28. Mahmoud, B.S.M., Vaidya, N.A., Corvalan, C.M., Linton, R.H. (2008). Inactivation kinetics of inoculated *Escherichia coli* O157:H7, *Listeria monocytogenes* and *Salmonella* Poona on whole cantaloupe by chlorine dioxide gas. Food Microbiology, 25:857-865.

29. 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. Letters in Applied Microbiology, 53:628-634.

30. Neal, J.A., Marquez-Gonzalez, M., Cabrera-Diaz, E., Lucia, L.M., O'Bryan, C.A., Crandall, P.G., Ricke, S.C., Castillo, A. (2012). Comparison of multiple chemical sanitizers for reducing *Salmonella* and *Escherichia coli* O157:H7 on spinach (*Spinacia oleracea*) leaves. Food Research International, 45:1123-1128.

31. Park, H.J., Lee, J.E., Kim, S.A., Shim, W.B. (2021). Microbial risk assessment for mixed vegetable salad and fresh and frozen fruits distributed in Korea. Journal of Food Hygiene and Safety, 36:324-330.

32. Park, S.H., Kang, D.H. (2017). Influence of surface properties of produce and food contact surfaces on the efficacy of chlorine dioxide gas for the inactivation of foodborne pathogen. Food Control, 81:88-95.

33. Park, S.H., Kang, D.H. (2018). Effect of temperature on chlorine dioxide *inactivation* of *Escherichia col i* O157:H7, *Salmonella* typhimurium, and *Listeria monocytogenes* on spinach, tomatoes, stainless steel, and glass surfaces. International Journal of Food Microbiology, 275:39-45.

34. Park, S.H., Kim, W.J., Kang, D.H. (2018). Effect of relative humidity on inactivation of foodborne pathogens using chlorine dioxide gas and its residues on tomatoes. Letters in Applied Microbiology, 67:154-160.

35. Popa, I., Hanson, E.J., Todd, E.C.D., Schilder, A.C., Ryser, E.T. (2007). Efficacy of chlorine dioxide gas sachets for enhancing the microbiological quality and safety of blueberries. Journal of Food Protection, 70:2084-2088.

36. Prodduk, V., Annous, B.A., Liu, L., Yam, K.L. (2014). Evaluation of chlorine dioxide gas treatment to inactivate *Salmonella enterica* on mungbean sprouts. Journal of Food Protection, 11:1876-1881.

37. Simpson, G.D. (2005). Practical chlorine dioxide. Greg D. Simpson & Associates, Colleyville, TX.

38. 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. Journal of Food Protection 77:1127-1132.

39. Sun, X., Baldwin, E., Bai, J. (2019). Applications of gaseous chlorine dioxide on postharvest handling and storage of fruits and vegetables - A review. Food Control, 95:18-26.

40. Suslow, T.V. (2000). Chlorination in the production and postharvest handling of fresh fruits and vegetables: Chap. 6. Fruit and vegetable processing. In: McLaren, D. (Ed.), Use of Chlorine-Based Sanitizers and Disinfectants in the Food Manufacturing Industry. Food Processing Center at the University of Nebraska, Lincoln, NE.

41. Sy, K.V., Murray, M.B., Harrison, M.D., Beuchat, L.R. (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. Journal of Food Protection, 68:1176-1187.

42. Sy, K.V., McWatters, K.H., Beuchat, L.R. (2005). Efficacy of gaseous chlorine dioxide as a sanitizer for killing *Salmonella*, yeasts, and molds on blueberries, strawberries, and raspberries. Journal of Food Protection, 68:1165-1175.

43. Taylor, J.H., Rogers, S.J., Holah, J.T. (1999). A comparison of the bactericidal efficacy of 18 disinfectants used in the food industry against *Escherichia coli* O157:H7 and *Pseudomonas aeruginosa* at 10 and 20°C. Journal of Applied Microbiology, 87:718-725.

44. Trinetta, V., Linton, R.H., Morgan, M.T. (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 Microbiology, 34:296-302.

45. Trinetta, V., Morgan, M.T., Linton, R.H. (2010). Use of high-concentration-short-time chlorine dioxide gas treatments for the inactivation of *Salmonella enterica* spp. inoculated onto Roma tomatoes. Food Microbiology, 27:1009-1015.

46. Trinetta, V., Vaid, R., Xu, Q., Linton, R.H., Morgan, M. (2012). Inactivation of *Listeria monocytogenes* on ready-to-eat food processing equipment by chlorine dioxide gas. Food Control, 26:357-362.

47. U.S. Food and Drug Administration. (2020). CFR173.300. CFR—Code of Federal Regulations Title 21.

48. U.S. Food and Drug Administration. (2022). Sterilization for Medical Devices. Available at:https://www.fda.gov/medical-devices/general-hospital-devices-and-supplies/sterilization-medical-devices.

49. Vaid, R., Linton, R.H., Morgan, M.T. (2010). Comparison of inactivation of *Listeria monocytogenes* within a biofilm matrix using chlorine dioxide gas, aqueous chlorine dioxide and sodium hypochlorite treatments. Food Microbiology, 27:979-984.

50. Varalakshmi, S. (2021). A review on the application and safety of non-thermal techniques on fresh produce and their products. LWT, 149:111849.

51. Vicuña-Reyes, J.P., Luh, J., Mariñas, B.J. (2008). Inactivation of *Mycobacterium avium* with chlorine dioxide. Water Research, 42:1531-1538.

52. Westphal, A.J., Price, P.B., Leighton, T.J., Wheeler, K.E. (2003). Kinetics of size changes of individual *Bacillus thuringiensis* spores in response to changes in relative humidity. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 100: 3461-3466.

53. White, G.C. (2010). Chlorine Dioxide. In Handbook of Chlorination and Alternative Disinfectants (5th ed., pp. 700-722). John Wiley& Sons.

54. Woodworth, A.J., Jeng, D.K. (1990). Chlorine dioxide gas sterilization under square-wave conditions. Applied and Environmental Microbiology, 56:514-519.

55. Wu, V.C.H., Rioux, A. (2010). A simple instrument-free gaseous chlorine dioxide method for microbial decontamination of potatoes during storage. Food Microbiology, 27:179-184.

Table 1. Physical and chemical properties of $ClO_2$ (EPA, 2006).

| | |
|---|---|
| Chemical formula | $ClO_2$ |
| Chemical structure | O = Cl = O |
| Molecular weight | 67.45 g/mol |
| Color | Gas phase: yellow green to orange Liquid phase: reddish-brown |
| Melting point | -59 ℃ |
| Boiling point | 11 ℃ |
| Odor | Strongly pungent, chlorine-like |
| Physical state | Gas at room temperature |
| Vapor pressure | 490 mmHg (0 ℃) > 760 mmHg (25 ℃) |
| Stability | Unstable, estimated half in water ~25 min |

Table 2. Studies on the antimicrobial effect of $ClO_2$ gas against pathogenic microorganisms on produce.

| Sample | Microorganism | $ClO_2$ concentration | Time (min) | RH (%) | Log reduction | Reference |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Cabbage | *Salmonella* | | 30.8 | | 4.42 | 37 |
| | *E. coli* O157:H7 | 4.1 mg/L | 20.5 | 48–85 | 3.13 | |
| | *L. monocytogenes* | | 29.3 | | 3.60 | |
| Carrot | *Salmonella* | | 30.8 | | 5.15 | |
| | *E. coli* O157:H7 | 4.1 mg/L | 20.5 | 51–88 | 5.62 | |
| | *L. monocytogenes* | | 29.3 | | 5.88 | |
| Lettuce | *Salmonella* | | 30.8 | | 1.58 | |
| | *E. coli* O157:H7 | 4.1 mg/L | 20.5 | 36–84 | 1.57 | |
| | *L. monocytogenes* | | 29.3 | | 1.53 | |
| Apple | *Salmonella* | 4.1 mg/L | 25 | 35–68 | 4.21 | |
| Tomatoes | *Salmonella* | 4.1 mg/L | 25 | 34–62 | 4.33 | |
| Onion | *Salmonella* | 4.1 mg/L | 25 | 35–64 | 1.94 | |
| Peach | *Salmonella* | 4.1 mg/L | 25 | 55–78 | 3.23 | |
| Blueberry | *Salmonella* | 4.1 mg/L | 30 | 76–90 | 2.95 | 38 |
| Strawberry | *Salmonella* | 4.1 mg/L | 30 | 85–88 | 2.32 | |
| Raspberry | *Salmonella* | 4.1 mg/L | 30 | 75–83 | 0.52 | |
| Blueberry | *E. coli* O157:H7 | | | | 4.25 | 39 |
| | *Salmonella* | 4 mg/L | 720 | 99.9 | 3.62 | |
| | *L. monocytogenes* | | | | 3.94 | |
| Mungbean sprout | *Salmonella* | 0.5 mg/L | 60 | 50–75 | 5.5 | 40 |
| Green bell pepper | *E. coli* O157:H7 | 1.2 mg/L | 30 | 90–95 | 6.45 | 41 |
| | *E. coli* O157:H7 | 1.2 mg/L | 30 | 90–95 | >8.04 | 42 |
| | *L. monocytogenes* | 3.0 mg/L | 10 | 90–95 | >6 | 10 |
| Apple | *L. monocytogenes* | 4.0 mg/L | 30 | 90 | >5.5 | 43 |
| | *E. coli* O157:H7 | 7.2 mg/L | 10 | 90–95 | >5.8 | 44 |
| Strawberry | *E. coli* O157:H7 | | 10 | | 4.6 | 45 |
| | *Salmonella enterica* | 5.0 mg/L | 10 | 90–95 | 4.3 | |
| | *L. monocytogenes* | | 10 | | 4.7 | |
| | *E. coli* O157:H7 | 3.0 mg/L | 10 | 90–95 | >5.0 | 46 |
| | *L. monocytogenes* | | 10 | | >5.0 | |
| | *E. coli* O157:H7 | | 3 | | 2.7 | 47 |
| | *Salmonella* | 10.0 mg/L | 3 | 90–95 | 4.8 | |
| | *L. monocytogenes* | | 3 | | 3 | |
| Lettuce | *E. coli* O157:H7 | 5.0 mg/L | 10 | 90–95 | 4.6 | 48 |
| Lettuce | *S. enterica* | | 10 | | 4.3 | |
| Cantaloupe | *E. coli* O157:H7 | | 10 | | 4.6 | 49 |
| | *Salmonella Poona* | 5.0 mg/L | 6 | 90–95 | 5 | |
| | *L. monocytogenes* | | 10 | | 4.3 | |
| | *E. coli* O157:H7 | | 3 | | 2.0 | 47 |
| | *Salmonella* | 10.0 mg/L | 3 | 90–95 | 4 | |
| | *L. monocytogenes* | | 3 | | 3.3 | |
| Spinach | *E. coli* O157:H7 | 2.1 mg/L | 60 | – | 0.7 | 50 |
| | *Salmonella* | | | | 0.6 | |

| Sample | Microorganism | $ClO_2$ concentration | Time (min) | RH (%) | Log reduction | Reference |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Tomatoes | *S. enterica* | 0.5 mg/L | 10 | 90 | >5.0 | 51 |
| | *L. monocytogenes* | | | | >5.0 | |
| | *Salmonella* | 2 mg/L | 3 | 90–95 | 2.41 | 52 |
| | | 5 mg/L | | | 2.43 | |
| | | 8 mg/L | | | 3.77 | |
| | | 10 mg/L | | | 4.78 | |
| Orange | *S. enterica* | 0.5 mg/L | 10 | 90 | >5.0 | 53 |

**Table 3. Studies on the antimicrobial effect of $ClO_2$ gas against pathogenic microorganisms on food contact surfaces.**

| Surfaces | Microorganism | $ClO_2$ concentration | Time (min) | RH (%) | Log reduction | Reference |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Stainless steel | *L. monocytogenes* Biofilm | 0.3 mg/L | 10 | 75 | 3.2 | 54 |
| | *L. monocytogenes* Biofilm | 1.0 mg/L | 10 | 75 | 2.5 | 55 |
| | | 2.0 mg/L | | | 3.8 | |
| Paper | *B. thuringiensis* spore | 10.0 mg/L | 720 | 85–92 | 3.6 | 56 |
| Wood | | | | | 5.0 | |
| Epoxy | | | | | 5.7 | |
| Plastic | | | | | 5.8 | |
| Stainless steel | | | | | ca. 4.6 | |
| Painted steel | | | | | ca. 5.9 | |
| Polyvinyl chloride | *B. subtilis* spore | 0.08 % (v/v) | 180 | 75 | ca. 6.5 | 57 |
| Polyurethane | | | | | ca. 4.7 | |
| Glass | | | | | ca.5.0 | |
| Cotton cloth | | | | | ca. 1.5 | |
| Glass | *E. coli* | 0.05 ppmv | 180 | 54 | >2.0 | 58 |
| | *S. aureus* | 0.05 ppmv | 300 | 54 | >2.0 | |