산업적으로 이용 가능한 친환경적인 바이오필름 제어기술

Environmentally friendly biofilm control strategies for industrial application

김주성*
Joo-Sung Kim*

한국식품연구원 안전유통연구단

Research Group of Food Safety and Distribution, Korea Food Research Institute

김 주 성

Correspondence to
Joo-Sung Kim
Food Safety and Distribution Research Group, Korea Food Research Institute, 245, Nongsaengmyeong-ro, Iseo-myeon, Wanju-gun, Jeollabuk-do, Republic of Korea.
Tel: +82-63-219-9266
Fax: +82-63-219-9876
E-mail: jskim@kfri.re.kr

서론

식중독 사고는 인간의 생명, 건강과 직결되는 문제일뿐 아니라 경제적 손실, 관련식품 생산업체의 이미지 손상과 같은 다양한 손실이 발생하기 때문에 이러한 사고가 일어나지 않도록 하여야 한다. 식품에 존재하는 식중독 세균(foodborne pathogenic bacteria) 은 식품 제조, 가공, 조리시 식품과 맞닿는 표면에 부착할 수 있고, 다당류(polysaccharides), 단백질(proteins), DNA 등과 같은 세포외 고분자 물질(Extracellular Polymeric Substances, EPS) 을 분비하여 표면에 고착화 할 수 있다. 이렇게 세균의 세포와 EPS 로 이루어진 구조체를 바이오필름(biofilm) 이라고 한다. 이러한 바이오필름은 EPS 물질로 덮여 있어서 다양한 스트레스에 대하여 큰 저항성을 가지게 되며, 일반적인 항균물질에 대해서도 큰 저항성을 가지게 되어 제거하기가 힘들다. 식품제조업체와 같이 식품에 의한 지속적인 영양분이 공급되는 환경에서 바이오필름은 생존하고 지속적으로 생장하며, 오염되지 않은 새로운 원료를 교차오염을 통해 오염시킬 수 있기 때문에 바이오필름을 효과적으로 제어하는 것은 식품산업적 측면에서 중요하다고 할 수 있다.

또한 최근의 환경문제는 인류의 생존을 위협하고 있으며, 따라서 식품산업의 바이오필름 제어기술도 기존의 화학적인 제재보다는 지속적이고 친환경적인 기술의 개발이 필요하다. 따라서, 본 논문에서는 산업적으로 이용 가능한 친환경적인 바이오필름 제어 기술에 대하여 소개하고, 이들 기술의 장점과 단점에 대하여 논하고자 한다(표 1).

표 1. 바이오필름 제어기술의 장점과 단점

제어기술	장점	단점	참고문헌
Cold plasma	• 다양한 미생물에 효과 • 낮은 운용 비용 • 연속처리 가능	• 환경요소에 의한 효율성 제어의 어려움 • 낮은 투과율	[3]
Pulsed light	• 잔류 화학물질이 없음 • 짧은 처리시간	• 빛에 직접적인 노출이 필요함 • 높은 설치비용	[5]
Electrolyzed water	• 생산 및 이용이 간단함 • 다양한 미생물에 효과	• 높은 설치비용 • 저장중의 살균력 감소	[10, 12, 18]
Steam	• 짧은 처리시간 • 잔류 화학물질이 없음 • 좁은 틈에도 효과적임	• 시간에 따른 처리 효율의 감소 효과 • 열에 약한 표면에는 부적합	[5, 13]
Enzymes	• 병합처리에 의한 효과 증대 • 사용하기 안전함	• 처리조건에 의한 큰 효율 차이 • 높은 비용	[5, 15]
Bacteriocin	• 인체에 무해 • 식품에 첨가하여 사용 가능	• 높은 생산비용 • 상대적으로 낮은 효과	[16, 17]

본론

1. Cold plasma

플라즈마(plasma) 는 고체, 액체, 기체 다음의 4번째 물질의 상태로 정의할 수 있으며, 아르곤(argon), 헬륨(helium), 산소(air), 질소(N_2) 가스 분자에 전기 에너지를 가하여 만들어진다[1]. 플라즈마는 전자, 양이온, 원자, 자유 라디칼, 오존, UV 등으로 구성되며, 이들 중의 반응성이 강한 물질들이 바이오필름 구조를 파괴하고, 침투하여 바이오필름 내의 미생물을 불활성화하는 것으로 알려져 있다[1]. 또한 플라즈마의 침식작용에 의하여 EPS 매트릭스를 파괴, 붕괴시켜서 바이오필름이 접착 표면으로부터 쉽게 떨어지게 한다[1]. 플라즈마는 그 이외에도 바이오필름의 형성에 관여하는 쿼럼센싱(quorum sensing) 분자를 억제하는 효과가 있는 것으로 알려져 있다[1]. 기존의 연구들은 바이오필름을 제어하는데 플라즈마가 효과가 있음을 보이고 있다[1]. 예를 들어 상추의 표면에 접종하여 15 ℃ 에서 형성한 *Listeria monocytogenes* 와 *Pseudomonas fluorescens* 의 혼합 바이오필름은 2분 처리에 각각 2.2 와 4.2 Log 감소하였다[2]. 플라즈마의 장점은 미생물에 효과적인 물질들이 다양하게 들어 있어서 적용할 수 있는 미생물의 범위가 넓다는데 있으며, 상대적으로 낮은 운용 비용, 연속적인 처리가 가능하다는 점이 장점으로 꼽힌다[3]. 하지만, 대기중의 습기와 같은 제어하기 힘든 환경적인 요소들이 처리 효과에 크게 영향을 미치는 것, 낮은 투과율로 인하여 바이오필름과 같은 구조에 침투가 힘든 점 등은 단점으로 꼽힌다[3].

2. Pulsed Light

펄스 광선(Pulsed light) 은 전기적 에너지를 이용하여 만들어지며 높은 강도 및 넓은 파장대의 빛이 단시간 펄스의 형태를 띄는 것을 말한다[4]. 펄스 광선에는 많은 양의 UV-C 가 포함되어 있으며, 미생물의 DNA 와 세포 구조를 효과적으로 파괴한다[5]. 펄스 광선은 바이오필름의 EPS 매트릭스를 파괴하여 내부의 미생물을 효과적으로 불활성화 할 수 있는 것으로 알려져 있다[5]. 또한 일반 UV 처리에 비해서 상대적으로 에너지를 적게 소비한다[6]. 펄스 광선은 채소, 육류, 과일 주스, 포장된 고체 식품, 식품과 관련된 기구 및 기기, 포장지의 표면을 살균하는데 효과적으로 이용될 수 있다[7,8]. 최근의 한 연구에서는 펄스 광선이 *Salmonella* 바이오필름에 효과가 있는 것이 관찰되었으며, 일반 살균제인 차아염소산나트륨(sodium hypochlorite) 과 병합처리를 하였을 때 더 효과적인 것이 밝혀졌다[9]. 이 기술은 잔류 화학물질을 남기지

않으며, 처리시간이 짧고, 에너지 효율이 높은 장점이 있다[5]. 하지만, 빛이 직접 닿지 못하는 곳에는 처리효과가 떨어지며, 초기 설치비용이 높다는 단점을 가지고 있다[5].

3. Electrolyzed water

전해수(electrolyzed water)는 수돗물에 용해된 염화나트륨(NaCl) 용액을 전기분해하여 만들어진다. 전기분해를 통해 미생물을 불활성화시킬 수 있는 물질인 hydroxide (OH^-), hypochlorous acid (HOCl), hypochlorite ion (^-OCl), chlorine gas (Cl_2) 등이 만들어진다[10]. 생산방법이 간단하고 다양한 미생물에 항균 효과를 보이기 때문에 식품과 식품환경의 표면 살균에 많이 이용되고 있다[10]. 최근의 한 연구에서는 미산성전해수(slightly acidic electrolyzed water) 처리에 의하여 스테인레스 스틸과 유리 표면에 형성한 *Listeria monocytogenes* 바이오필름 내의 생균수를 각각 30초, 1분 처리에 의하여 4 log 넘게 감소시키는 효과를 보였다[11]. 하지만, 시간이 지남에 따라서 chlorine 의 농도가 감소하여 살균력이 감소하고, 관련 설비를 갖추는데 높은 비용이 드는 것이 단점으로 꼽힌다[12].

4. Steam

전통적으로 열을 이용하여 미생물을 불활성화하는 방법 중에서 증기(steam)를 이용한 방법은 hot water 또는 hot air 보다 효과적이다[13]. 증기의 경우 잔류 화학물질에 대한 염려가 없어서 친환경적이며, 좁은 갈라진 틈과 같은 구조에 효과적이고, 처리 시간이 상대적으로 짧은 장점을 가지고 있다[13]. 이러한 증기는 미생물의 세포막을 파괴하고, 단백질을 변성시키며, 바이오필름의 EPS 물질을 제거하는 효과가 있다[5]. 한 연구에서는 다양한 표면에서 형성한 *Listeria innocua* 가 형성한 바이오필름에 대하여 포화증기(saturated steam) (100 ℃) 를 6초 동안 처리하였을 때 2.4 – 3.1 log CFU 의 저감 효과가 관찰되었다[13]. 다른 연구에서는 *Escherichia coli* O157:H7, *Salmonella Typhimurium*, *L. monocytogenes* 등의 식중독균 바이오필름에 대하여 포화증기보다 온도가 더 높은 과열증기(superheated steam)를 사용하였을 때 포화증기를 사용하였을 때에 비하여 바이오필름 제거 효과가 훨씬 높아지는 것이 관찰되었다[14]. 하지만, 처리 시간이 길어짐에 따라서 처리 효율이 떨어지는 점, 열에 약한 표면에는 부적합하다는 점은 단점으로 꼽힌다.

5. Enzymes

EPS 물질은 바이오필름이 살균제와 같은 스트레스로부터 저항성을 갖게 하기 때문에 EPS 를 제거하기 위하여 효소(enzymes) 를 이용할 수 있다[5]. 이들 효소들은 EPS를 구성하고 있는 단백질, 다당류, DNA 를 분해하여 바이오필름의 구조를 파괴하고, 미생물의 세포가 쉽게 밖으로 노출이 되어 잘 떨어지게한다 [15]. 기존의 연구들에 의하여 proteinase K, subtilisin, α-amylase, cellulase, DNase I 등의 효소들이 바이오필름 형성 저해 및 제거에 효과가 있음이 밝혀졌다[15]. 효소를 이용한 방법은 친환경적이며, 사용하기 안전하고, EPS 를 제거하기 때문에 다른 방법과 병합처리하여 시너지 처리효과를 거둘 수 있다. 하지만, 온도, pH 와 같은 환경요소가 처리효과에 영향을 줄 수 있다는 것, 가격이 상대적으로 높다는 점 등의 단점이 있다.

6. Bacteriocin

박테리오신(bacteriocin)은 젖산세균(lactic acid bacteria)이 분비하는 항세균 성질을 가진 단백질 또는 펩타이드를 이르는 말이다[16]. 니신(nisin), 페디오신 (pediocin) 이 대표적이며, 이들은 식품에 사용될 만큼 안전하다[6]. 특히, 니신은 GRAS (Generally Recognized As Safe) 물질로 등록되어있다. 이들 물질은 미생물의 세포막을 파괴하여 미생물을 불활성화시키며, 파괴된 세포막을 거쳐 내부로 침입하여 대사활동을 방해한다[16]. 이러한 미생물 불활성화 효과는 박테리오신이 바이오필름 형성을 억제하고 이미 형성된 바이오필름을 제거하는데 주요한 메커니즘이다[16]. 또한 박테리오신은 식중독균이 식품과 관련된 표면에 부착하는

것을 방해함으로써 바이오필름 형성을 저해하는 것으로 알려져 있다[16]. 이러한 박테리오신은 *L. monocytogenes*, *Staphylococcus aureus*, *E. coli*, *S.* Typhimurium, *Cronobacter sakazakii* 와 같은 식중독균의 바이오필름을 제어하는 효과가 있는 것으로 밝혀졌다[16]. 식품에 첨가할 수 있기 때문에 제조공정 이후에도 교차오염을 줄일 수 있는 효과를 기대할 수 있다[17]. 하지만, 높은 생산비용, 상대적으로 낮은 효과 등은 단점으로 꼽힌다.

결론

이러한 친환경적인 바이오필름 제어기술들은 환경 보존과 식품산업의 지속적인 발전을 위하여 필요하다. 그리고, 바이오필름의 제어가 쉽지 않은 점을 감안할 때 이러한 기술 개발이 지속적으로 필요하다고 할 수 있다. 또한 다른 제어기술과의 병합처리를 통하여 바이오필름 제어 효과가 월등히 향상될 수 있다는 것이 많은 연구들을 통하여 밝혀진 만큼 실제 산업현장에 적용하여 큰 효과를 기대할 수 있다.

감사의 글

이 논문은 2025년도 과학기술정보통신부 재원으로 한국식품연구원의 지원(E0232100-03)을 받아 수행된 연구성과입니다.

참고 문헌

1. Zhu Y, Li C, Cui H, Lin L. Feasibility of cold plasma for the control of biofilms in food industry. Trends in Food Science & Technology. 99: 142-151 (2020).

2. Patange A, Boehm D, Ziuzina D, Cullen PJ, Gilmore B, Bourke P. High voltage atmospheric cold air plasma control of bacterial biofilms on fresh produce. International Journal of Food Microbiology. 293: 137-145 (2019).

3. Katsigiannis AS, Bayliss DL, Walsh JL. Cold plasma for the disinfection of industrial food-contact surfaces: an overview of current status and opportunities. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. 21: 1086-1124 (2022)

4. Gómez-López VM, Ragaert P, Debevere J, Devlieghere F. Pulsed light for food decontamination: a review. Trends in Food Science & Technology. 18: 464-473 (2007)

5. Chowdhury MAH, Reem CSA, Ashrafudoulla M, Rahman MA, Shaila S, Ha AJ, Ha SD. Role of advanced cleaning and sanitation techniques in biofilm prevention on dairy equipment. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. 24: e70176 (2025)

6. Matthews KR, Kniel KE, Montville TJ. Food Microbiology: an introduction. 4th edition. ASM Press. Washington, DC, USA (2017)

7. Dhar R, Basak S, Chakraborty S. Pasteurization of fruit juices by pulsed light treatment: a review on the microbial safety, enzymatic stability, and kinetic approach to process design. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. 21: 499-540 (2022)

8. Obileke K, Onyeaka H, Miri T, Nwabor OF, Hart A, Al-Sharify ZT, Al-Najjar S, Anumudu C. Recent advances in radio frequency, pulsed light, and cold plasma technologies for food safety. Journal of Food Process Engineering. 45: e14138 (2022)

9. Gao F, Lyu C, Ning Z, Zhao S, Shao L, Xu X, Wang H. Inactivation of *Salmonella* biofilms formed on stainless steel surfaces by pulsed light. Food Control. 153: 109955 (2023)

10. Rahman SME, Khan I, Oh DH. Electrolyzed water as a novel sanitizer in the food industry: current trends and future perspectives. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. 15: 471-490 (2016)

11. Hao J, Zhang J, Zheng X, Zhao D. Bactericidal efficacy of slightly acidic electrolyzed water (SAEW) against *Listeria monocytogenes* planktonic cells and biofilm on food-contact surfaces. Food Quality and Safety. 6: fyab038 (2022)

12. Rebezov M, Saeed K, Khaliq A, Rahman SJU, Sameed N, Semenova A, Khayrullin M, Dydykin A et al. Application of electrolyzed water in the food industry: a review. 12: 6639 (2022)

13. Hua Z, Younce F, Tang J, Ryu D, Rasco B, Hanrahan I, Zhu MJ. Efficacy of saturated steam against Listeria innocua biofilm on common food-contact surfaces. Food Control. 125: 107988 (2021)

14. Ban GH, Yoon H, Kang DH. 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 (2014)

15. Kim JS, Lim MC, Kim SM, Lee JY. Extracellular matrix-degrading enzymes as a biofilm control strategy for food-related microorganisms. Food Science and Biotechnology. 32: 1745-1761 (2023)

16. Pang X, Song X, Chen M, Tian S, Lu Z, Sun J, Li X, Lu Y. Combating biofilms of foodborne pathogens with bacteriocins by lactic acid bacteria in the food industry. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. 21: 1657-1676 (2022)

17. Parada Fabián JC, Álvarez Contreras AK, Natividad Bonifacio I, Hernández Robles MF, Vázquez Quiñones CR, Quiñones Ramírez EI, Vázquez Salinas C. Toward safer and sustainable food preservation: a comprehensive review of bacteriocins in the food industry. 45: 277-302 (2025)

18. Dhivya R, Rajakrishnapriya VC, Sruthi K, Chidanand DV, Sunil CK, Rawson A. Biofilm combating in the food industry: Overview, non-thermal approaches, and mechanisms. Journal of Food Processing and Preservation. 46: e16282 (2022)