

녹색성장시대 식품산업의 새로운 전략 기술(II)

- 대기압 플라즈마 기술을 중심으로 -

Atmospheric Pressure Plasmas Technology as a
Emerging Technology for Sustainable Food Industry

김윤지 | 안전성연구단

Yun-Ji Kim | Food Safety Research Group

플라즈마란?

미국의 물리학자 Langmuir가 플라즈마라는 말을 물리학 용어로 처음 사용하였다. 플라즈마는 이온화된 기체로 물질의 4번째 상태이며(그림 1) 우주 전체의 99% 이상을 구성한다. 거시적인 관점에서 볼 때 플라즈마는 전기적으로 중성이며 자유대

전 정공을 포함하며 전기 전도성이 있다. 플라즈마를 분류할 때(그림 2) 공급되는 에너지의 종류와 플라즈마로 전달되는 에너지의 양에 따라 전자밀도와 전자온도로 나타나는 플라즈마의 물성치는 달라진다. 이러한 구분을 통해서 국소열평형 플라즈마(local thermodynamic equilibrium plasma)와 비국소열평형 플라즈마(non-local thermodynamic

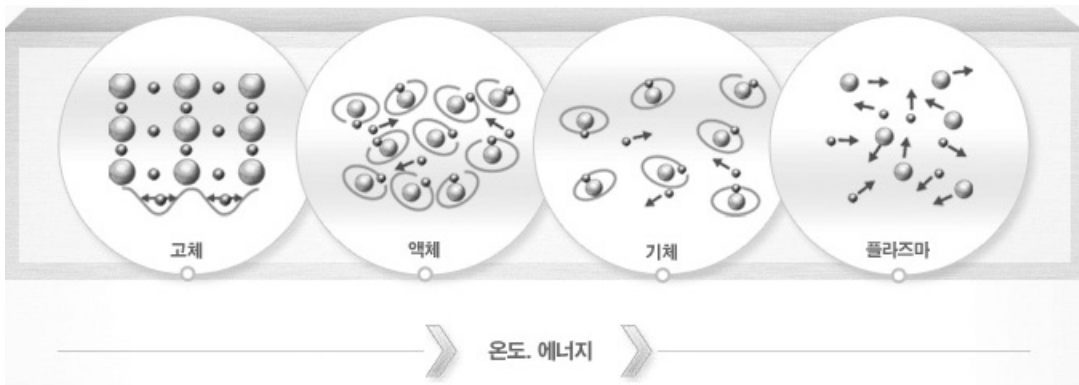


그림 1. 물질의 4번째 상태인 플라즈마 (출처: www.hysco.com)

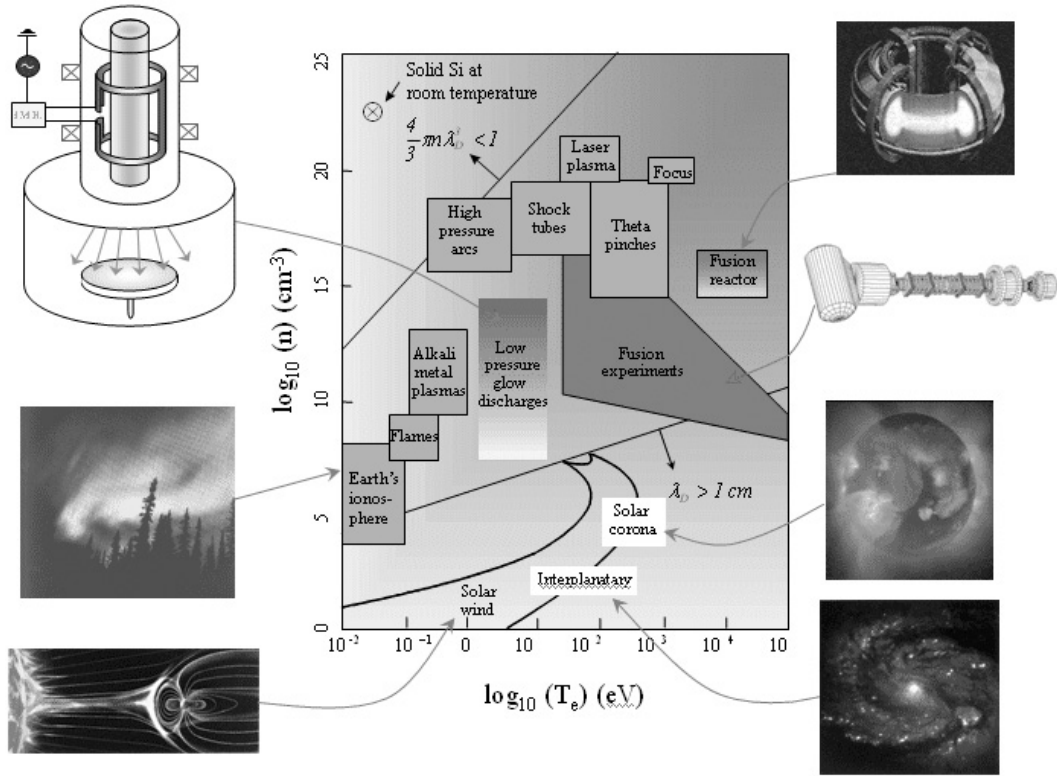


그림 2. 플라즈마의 종류 (출처: www.hysco.com)

equilibrium plasma)로 나눌 수 있다. 플라즈마를 생성하기 위해 공급되는 에너지의 밀도는 플라즈마의 상태에 많은 영향을 준다. 전반적으로 밀도가 높은 에너지가 공급되면 전기아크와 같은 국소열 평형 플라즈마가 생성되고, 보다 낮은 공급 에너지 밀도를 가지거나 펄스 형태로 에너지가 공급되는 경우에는 비국소열평형 플라즈마가 생성된다.

플라즈마를 발생하는 압력에 따라 대기압 플라즈마와 저압 플라즈마로 분류하는데 플라즈마를 발생시키는 방법에 따라 열적 플라즈마 방전과 비열적 플라즈마 방전으로 나누기도 한다. 열적 플라즈마 방전은 가스를 Joule heating 등을 이용, 가열

하여 이온화를 하는 방법이고 비열적 방전 플라즈마 방법은 가스의 가열은 최소화하고 주로 전자를 가열하여 이온화시키는 방법이다.

대기압 플라즈마란?

대기압 플라즈마란 기체의 압력을 100 Torr부터 대기압 이상까지 유지하면서 저온 플라즈마를 발생하는 기술을 말한다. 대기압 플라즈마는 국소열 평형 상태인 중앙 혹은 플라즈마 코어 영역과 비국소열평형 상태인 주변 영역으로 구분된다. 대기압

플라즈마 발생원들은 직류 및 저주파수, 라디오파 주파수 파장으로 집화되는 플라즈마, 마이크로파 방전으로 구분된다. 대기압 플라즈마 발생 기술의 역사는 최초 번개를 연구하면서 시작되었다고 말할 수 있으나, 1990년 후반 열 플라즈마(thermal plasma)를 이용한 폐기물 처리와 코로나 방전 및 유전장벽방전(dielectric barrier discharge, DBD)을 이용한 유해기체(NOx, SOx 등) 처리에 대한 연구를 시작으로 플라즈마-살균 및 제독 관련 기술이 본격화 되었다. 저온 플라즈마 가운데 대기압 플라즈마(atmospheric pressure plasma)는 대기압 상태에서 플라즈마를 발생하는 기술로 유전 장벽 방전(dielectric barrier discharge, DBD), 코로나 방전(corona discharge), 마이크로파 방전(microwave discharge) 및 아크 방전(arc discharge) 등으로 분류되며, 현재 램프, 디스플레이, 표면 처리, 물질 합성 및 분해 과정 등 다양한 분야에 사용되고 있다. 그 중에서도 수백도(400~600℃)에 이르던 기존 표면처리 온도를 상온 영역까지 낮출 수 있어 기체 온도는 낮지만(상온 ~700℃), 전자 온도는 10,000~100,000℃로 높아 라디칼 밀도가 높은 비열적 플라즈마가 활발히 이용되고 있다. 뾰족한 전극 주변에서 발생하는 코로나 플라즈마는 대표적인 비열적 플라즈마로 매우 광범위하게 응용되고 있으며 최근 특히 생물 응용 분야에서 활발히 이용되고 있다.

대기압 플라즈마의 산업적 이용

대기압 방전에 의한 플라즈마 대량 생산기술은 많은 물질을 화학적 내지는 생물학적으로 처리할

수 있는 기술이므로 환경오염 방지 및 정화 분야뿐만 아니라 재료 및 에너지 분야 등에서도 미래 산업에서 중추적인 역할을 할 수 있는 유망 기술로 주목받고 있다. 대기압 속에서 기체의 평균자유행정이 매우 짧아 전자를 가속하기가 어려워 안정적인 플라즈마를 형성하는 것이 매우 어렵다. 최근 대기압 플라즈마에 관한 연구와 적용이 활발히 이루어지고 있는데 코로나 방전과 DBD(dielectric barrier discharge) 방전 등을 예로 들 수 있다. 코로나 방전의 경우 침전극 주위에서 플라즈마가 발생하는 체적은 크지 않지만 코로나 방전으로 공기 중의 이온바람 등을 발생시키기 용이하여 분진 등의 입자를 대전시켜 공장 굴뚝의 집진기 등으로 이용할 수 있다. DBD 플라즈마의 경우 병원 소독기로 사용하는 연구도 진행되었다. 현재 열과 물에 민감한 EO(ethylene oxide)를 이용한 소독기가 병원에서 사용되고 있다. EO는 저온에서 병원 장비를 소독하기 때문에 인기가 높으나 마시면 눈병을 유발하고 호흡질환을 유발하며 두통이 생기고 설사와 구토를 유발하는 등의 부작용으로 제약품과 의료기기를 소독할 수 있는 새로운 방법이 절실히 요구되고 있다. 이러한 상황으로 DBD 플라즈마를 이용한 의료기기 살균 연구가 가속화되어 DBD 소독기를 사용하여 병원기기를 살균할 경우 몇 시간 내에 완벽하게 소독이 되고 EO 소독기와 비교할 때 모든 면에서 우수하였다.

대기압 플라즈마는 서로 대향된 전극사이에 교류 전기장을 인가하면 전기장에 의해 반응 가스 내 전자는 높은 에너지로 가속되어지고 일정 수준 이상의 에너지로 가속된 전자는 산소 분자와 충돌하여 산소 이온을 만들거나 산소 원자 이온으로 분리된다. 이온 상태는 매우 불안정한 상태이므로 주위

의 전자와 결합하여 산소 라디칼이 되거나 다른 산소 이온과 결합하여 오존을 만들게 되며 오존은 다시 전자와 충돌하여 산소 분자와 산소 라디칼로 다시 분해된다. 이렇게 생성된 산소 라디칼을 피처리물 위로 분출시켜 유기물을 제거한다. 여러 가지 장점 중 하나는 플라즈마 부피가 작고 구조가 간단해 휴대성과 접근성이 높기 때문이다. 대기압 플라즈마는 저압 공정 플라즈마와 비교하여 진공 시스템을 사용하지 않아 설치 및 유지비용이 저렴하여 경제적이다. 또 플라즈마 기술은 폐기물을 발생시키지 않아 비오염적이고 환경 친화적이다. 대기압 플라즈마 기술은 그 역사가 전 세계적으로 길지 않기 때문에 해결해야 할 문제점을 많이 가지고 있

다. 본격적인 대기압 플라즈마에 대한 연구는 1995년 이후로 보고 있으며, 기존의 저압 플라즈마와는 매우 다른 물리적 화학적 특성을 보이고 있다. 특히 국내 대기압 플라즈마 기술은 1999년 KAIST를 비롯한 몇몇 대학 연구실과 연구소를 중심으로 기본적인 대기압 플라즈마 발생을 토대로 시작되었다. 국내의 기술 수준은 세계적인 기술과 많은 격차를 보이고 있으나, 최근 활발한 연구를 통해 그 차이가 줄어들고 있다. 대기압 플라즈마는 높은 진공을 요구하는 특수 장비가 필요 없고 기계장치가 단순하여 비용이 적게 들고, 작동이 쉽고 응용성이 다양하여 재료의 표면개질, 유해균의 불활성화, 독성 가스의 제거 등에 응용이 시도되고 있다. 이밖

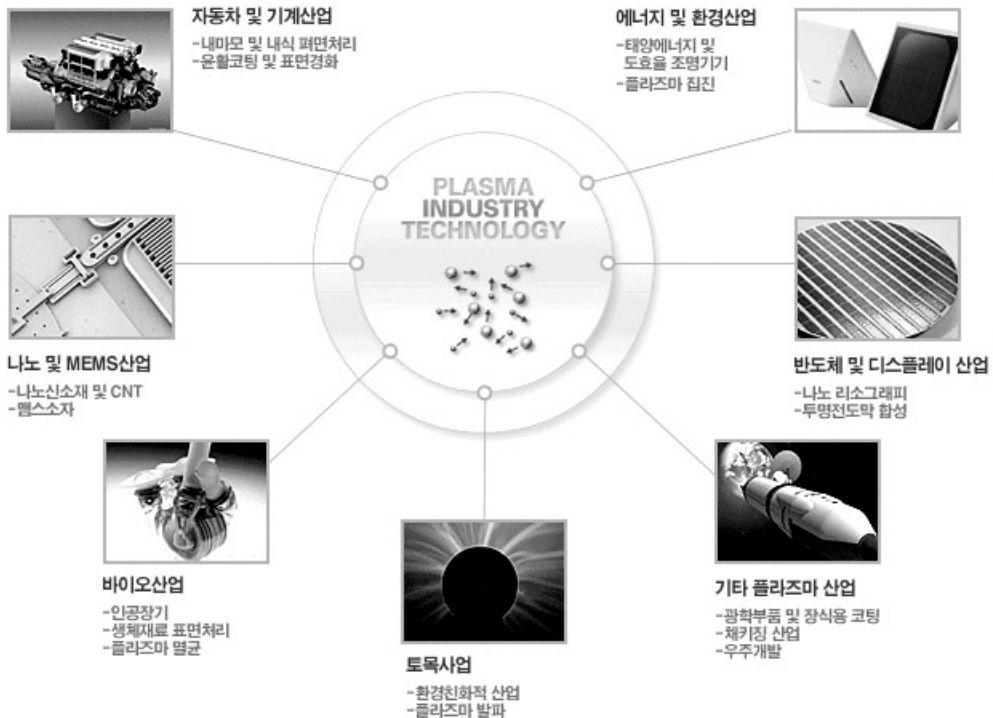


그림 3. 산업기술로서 플라즈마의 이용 (출처: www.plasma.kisti.re.kr)

에 플라즈마를 산업에 이용하는 분야는 그림 3과 같이 여러 분야에서 이용되고 있다.

식품산업에서 대기압 플라즈마 기술의 응용과 전망

전통적으로 미생물을 저감하기 위해 사용해 오던 화학적 biocide 사용 방법이 물리적인 방법에 의해 저감시키는 방법으로 이동하고 있다. 이러한 기술가운데 새롭게 떠오르고 있는 기술이 플라즈마를 이용하는 것이다. 높은 반응성을 가진 라디칼(-OH, -H, -HO₂, H₂O₂) 및 오존 등을 생성하여 살균력을 가지며 공정 중 열이 발생하지 않아 식품

특성상 열처리가 불가한 식품뿐만 아니라 가공식품 제조시설이나 식품 용기의 위생화에도 유효할 것으로 생각된다. 플라즈마 기술을 이용하여 식품에 적용한 국외 연구로는 표면이 딱딱한 견과류 이외에 멜론, 망고 및 사과를 비롯한 과실류의 표면 살균에 이용한 연구사례가 있다. 이러한 연구는 대부분 아크방전 시스템을 이용하여 진공관 안에 식품을 삽입하고 처리 후 꺼내는 방식으로 여전히 연속적 살균방법과는 차이가 있다. 이외에 agar plate에 저온 플라즈마를 처리하여 *Salmonella stanley* 및 *E. coli* O157:H7의 제거에 이용하였으나 직접 식품에 플라즈마를 처리한 연구는 국내·외 모두 이루어지지 않은 실정이다. 플라즈마를 이용한 살균은 투과력이 약하여 표면 살균에만 적용할 수 있

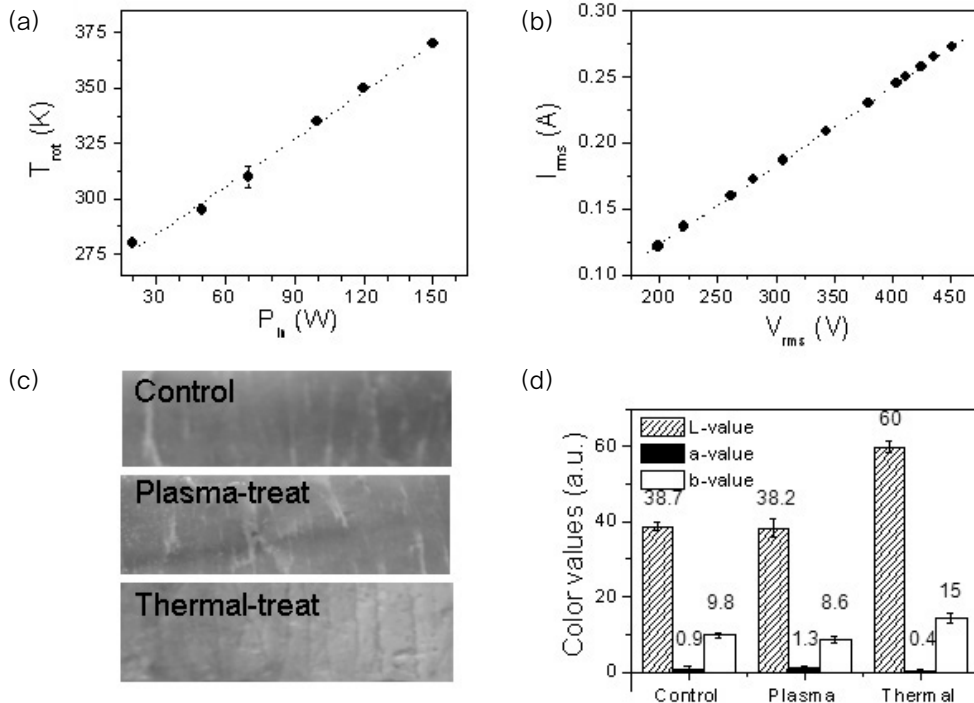


그림 4. 대면적 플라즈마-제트의 돼지고기 처리

는 단점이 있다. 예로써 polypropylene, glass 및 agar를 사용하여 다양한 재질에 대한 미생물 살균을 시도한 결과 재질의 투과성이 없는 polypropylene이 플라즈마 감수성이 가장 낮게 나타났으나 표면에 오염된 미생물이 시료 내부로 침투한 agar의 경우 플라즈마 감수성이 높게 나타난 연구 사례가 있다. 국내에서는 충남대학교 조철훈 교수 연구팀에서 돼지고기를 이용하여 대형 및 소형 플라즈마-제트의 플라즈마 특성을 연구를 수행하였다. 실험 방법은 먼저 대면적 플라즈마-제트에 대해 같은 100℃의 플라즈마와 열판을 이용하여 돼지고기를 처리하고 각각 돼지고기 표면의 열 손상에 의한 색 변화를 색 측정기를 이용하여 수치화하였다(그림 4). 같은 온도라도 플라즈마 처리한 돼

지고기는 컨트롤 시료와 색이 비슷했으나 열판 위의 돼지고기는 눈에 보일 정도로 색이 변했다. 돼지고기에 흐르는 실제 전류 역시 측정 결과 생체에 전기적 해를 입히는 수준이 못되었다.

그림 5는 소형 플라즈마-제트를 이용한 돼지고기 처리 결과이다. 주파수에 따라 50 kHz의 경우 돼지고기에 흐르는 실제 전류가 13.56 MHz와 비교하여 한 단위 낮았고 온도 역시 입력전압이 증가해도 상온에서 거의 변함없었다. 그리고 50 kHz 플라즈마는 플라즈마 방출 길이가 길어 전극과 시료 사이의 간격을 더 넓은 범위에서 제어할 수 있었고, 그 결과 플라즈마 특성 제어도가 높아진 연구 결과를 얻었다.

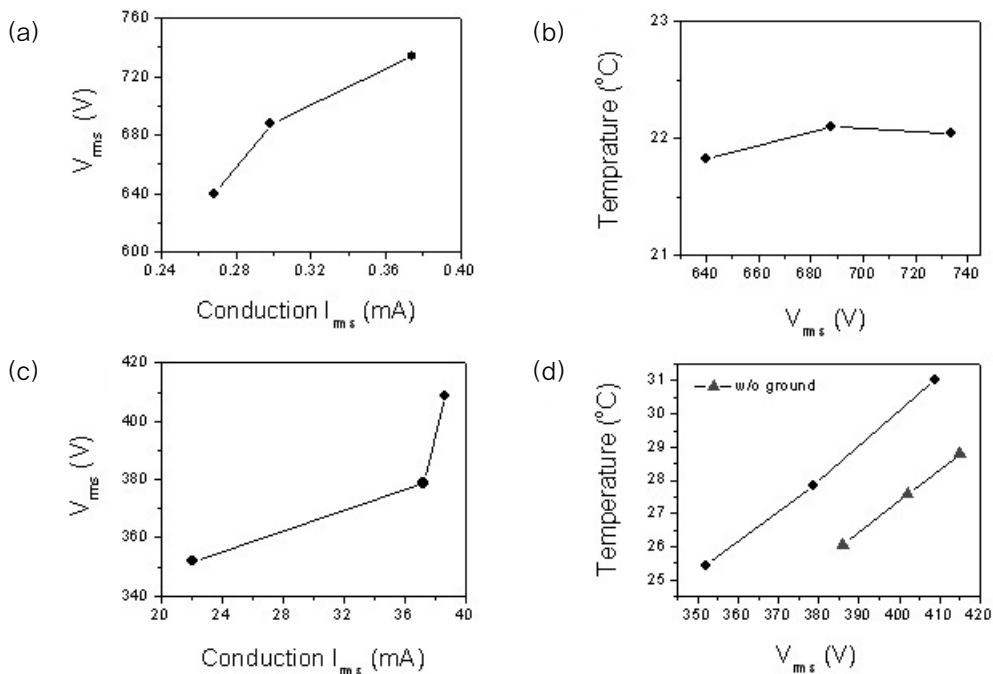


그림 5. LF와 rf 소형 플라즈마-제트의 돼지고기 처리 시 전기 및 온도 특성

또한 조철훈 교수팀은 대면적 플라즈마-제트를 이용하여 인체 피부를 처리하고(그림 6) 플라즈마 처리 전 후로 피부의 세균을 수집하여 배양한 결과 플라즈마 처리 효과가 확연히 나타남을 확인했다. 플라즈마 처리 전의 세균 수가 플라즈마 처리 후의 세균 수보다 많음을 볼 수 있다(그림 7). 이런 결과는 본 대기압 플라즈마의 생체 적용 가능성을 시사한다고 보고하였다.

미생물이나 병원균의 살·멸균 관련 시험은 주로 유리나 종이 위에서의 효과를 관찰한 것으로 여전히 생물학적 관점에서 많은 연구가 필요한 초기 단계이다. 또한 대기압 플라즈마의 경우 투과력이 이미 상용되고 있는 감마선, 전자선, X선 등 방사

선에 비해 약하여 표면 살균에 그칠 수 있어 전반적인 식품 비열처리 살균기술로 응용하기 위해서는 다양한 연구가 필요한 상태이다. 최근 국외에서



그림 6. 플라즈마 인체 피부 처리

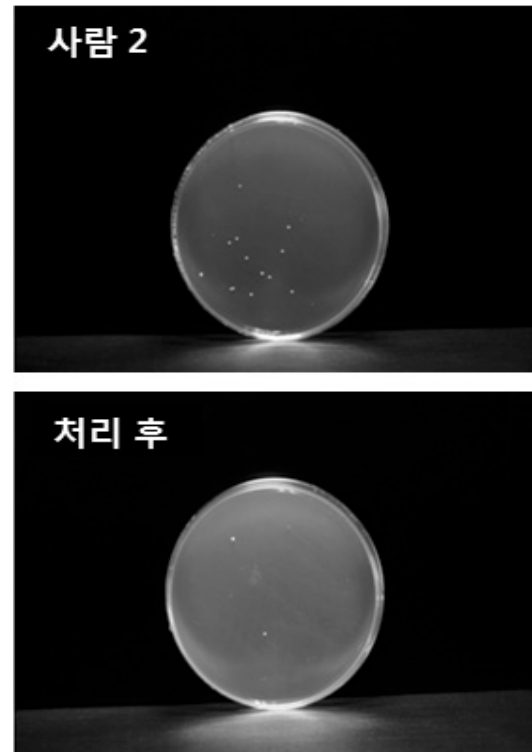
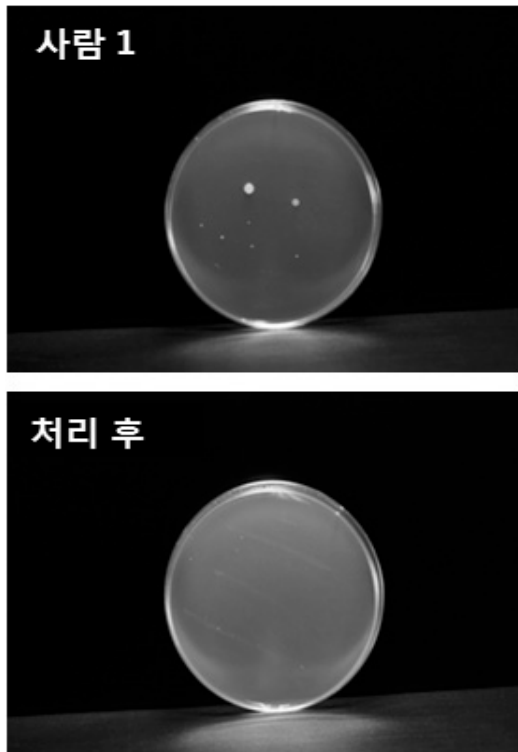


그림 7. 플라즈마 피부 처리 살균 효과

는 다양한 종류의 식품(과일, 채소류 및 육 가공제품) 살균에 이용한 연구가 진행되고 있고 단일 미생물의 살균에 플라즈마를 응용한 연구가 미미하게 소개되고는 있으나 실제 식품적용 연구는 발표된 바가 거의 없으므로 매우 희소한 연구 분야이다. 따라서 이 분야에 대한 가능성은 이론적으로 예측되고 있으나 아직 선진 외국에서도 식품분야에 대한 적용 기술 개발이 시작 단계이므로 국내에서도 대기압 플라즈마를 이용한 기술개발에 관심과 노력을 기울인다면 녹색성장시대 주목할 만한 가공 살균 기술에 대한 원천기술을 확보할 수 있는 기회라고 사료된다.

● 참고문헌 ●

1. 엄환섭, 저온 상압 플라즈마와 그 응용 물리학과 첨단기술, May, 42-46, 2008
2. Ben GR, Reece RJ, Montie TC, Kelly-Wintenberg K, Tsai PPY, Helfritch DJ, Feldman P, Sherman DM, Karakaya F, Chen Z, Sterilization and plasma processing of room temperature surfaces with a one atmosphere uniform glow discharge plasma (OAUDGP), Surface and Coatings Technology, 131, 528-542, 2000
3. Cho SH, Kim KO, Chung JH, Ryu CH, Outbreaks and control of Listeria attributed to agricultural, marine and animal husbandry products, Journal of Food Hygiene Safety, 9, 191-198, 1994
4. Deng XT, Shi JJ, Shama G, Kong MG, Effects of microbial loading and sporulation temperature on atmospheric plasma inactivation of Bacillus subtilis spores, Applied Physics Letters, 101, 1323-1330, 2006
5. Dimitra D, Anna CSP, Brad S, Jeffrey EC, George-John EN, Ernst KI, John BL, Behavior of Escherichia coli O157:H7, Listeria monocytogenes, and Salmonella Typhimurium in teewurst, a raw spreadable sausage, International Journal of Food Microbiology, 130, 245-250, 2009
6. Farkas J, Irradiation as a method for decontaminating food: A review, Int. J. Food Microbiol, 44, 189-208, 1998
7. Han KH, Kang JG, Uhm HS, Current applied Physics, 7, 211, 2007
8. Hong CH, Bahk GJ, Comparison of cross-contamination of Salmonella spp. on pork meat and workers' hands during pork cutting precessing, Korean Journal for Food Science of Animal Resources, 28, 562-566, 2008
9. Matila-Standholm TE, Skytta E, The effect of spoilage flora on the growth of food pathogens in minced meat stored at chilled temperature, Lebensm-Wiss. Technol, 24, 116-120, 1991
10. Moon SY, Kim DB, Gweon BM, Choe WH, Song HP, Jo C, Feasability study of the sterilization on pork and human skin surface by atmospheric pressure plasmas, Thin Solid Films, 517, 4272-4275, 2009

11. Niemira BA, Sites J, Cold plasma inactivates *Salmonella stanley* and *Escherichia coli* O157:H7 inoculated on golden delicious apples, *Journal of Food Protection*, **71**, 1357-1365, 2008
12. Perni S, Liu DW, Shama G, Kong MG, Cold atmospheric plasma decontamination of the pericarps of fruit, *Journal of Food Protection*, **71**, 302-308, 2008
13. Ritu A, Alka P, Sant P, Genotypic characterization of *Listeria monocytogenes* isolated from milk and ready-to-eat indigenous milk products, *Food Control*, **20**, 835-839, 2009
14. Rumun K, Incidence of *Listeria monocytogenes* in beef, pork, raw-dried and raw-smoked sausages in Bulgaria, *Food Control*, **20**, 953-955, 2009
15. Son JH, Chyun JH, Comparative analysis of satisfaction level on hospital foods in elderly and middle aged patients, *Korean J. Dietary Culture*, **16**, 442-450, 2001
16. Song HP, Kim B, Choe JH, Jung S, Moon SY, Choe W, Jo C, Evaluation of atmospheric pressure plasma to improve the safety of sliced cheese and ham inoculated by 3-strain cocktail *Listeria monocytogenes*, *Food Microbiol.*, **26**, 432-436, 2009
17. WHO, Wholesomeness of irradiated food (Report of Joint FAO/IAEA/WHO Expert Committee), Technical Report Series 890 Geneva, Switzerland, 1981
18. Yu H, Perni S, Shi JJ, Wang MG, Kong MG, Shama G, Effects of cell surface loading and phase of growth in cold atmospheric gas plasma inactivation of *Escherichia coli* K12, *Journal of Applied Microbiology*, **101**, 1323-1330, 2006

김윤지 이학박사

소 속 : 한국식품연구원 안전성연구단
전문분야 : 식품위생, 병원성 미생물 저감화 기술
E-mail : yunji@kfri.re.kr
T E L : 031-780-9085