

전기 에너지를 이용한 비가열 식품가공기술

Nonthermal Food Processing Technology using Electric Power

신정규*, 김보라¹, 김애진¹
 Jung-Kue Shin*, Bo-Ra Kim¹, Ae-Jin Kim¹

전주대학교 전통음식문화전공, ¹전주대학교 전통식품산업학과
 Department of Traditional Food Culture, JeonJu University,
¹Department of Traditional Food Industry, JeonJu University

1. 서론

경제적 수준이 향상되고 건강에 대한 관심이 높아지고 소비자들의 건강한 식생활에 대한 기대가 커지면서 보다 좋은 품질, 신선한 제품에 대한 소비자의 요구는 점점 커지고 있다. 특히 과일, 야채류 뿐만 아니라 가공 식품에 있어서도 가능한 한 원물 그대로의 품질을 즐기고 싶어하는 요구가 지속적으로 증가하고 있다. 그러나 식품을 생산하는 대부분의 공정은 열처리를 통해서 제품을 생산하기 때문에 열처리에 의해서 일어나는 영양성분의 파괴, 향미의 손실, 색택의 변화, 조직감의 변화 등에 의한 기호도의 감소를 피할 수 없다. 이러한 문제로 인해 식품업계에서는 가열을 대체할만한 가공 공정의 개발을 요구하고 있다.

이러한 소비자 및 식품업계의 요구에 따라 최근들어 열처리 공정을 대체하면서 고품질의 제품을 생산할 수 있는 비가열 공정(nonthermal processing)에 대한 관심이 크게 증가하고 있으며 활발한 연구가 진행되고

있다. 지금까지 연구되고 있는 비가열 공정은 물리적 방법으로는 고전압 펄스 전기장(high voltage pulsed electric fields, PEF), 초고압(high hydrostatic pressure, HHP), 광펄스(intense pulse light, IPL), 초음파(ultrasonification), 비가열 플라즈마(nonthermal plasma, NTP), 고전압 아크 방전(high voltage arc discharge), 이온화 조사(inoizing radiation), 진동자 기장(oscillating magnetic fields) 등이 있으며, 화학적 방법으로는 이산화탄소, 박테리오신, 양이온 다중 고분자와 같은 화학물질, 세포벽 분해효소등을 이용하고 있다(1-3).

이와 같은 여러 가지 비열 가공 기술 중 고전압 펄스 전기장, 광펄스 기술, 비가열 플라즈마, 고전압 아크 방전, 전자빔 조사, X-ray 등은 고전압(또는 중·저전압)의 전기 에너지를 활용하여 식품을 살균 또는 가공하는 기술이라는 공통점을 가지고 있다. 고전압을 활용한 가공 방법들은 식품을 처리할 경우 온도가 거의 상승하지 않으며, 처리시간은 짧고 무엇보다도 대

*Corresponding author: Jung-Kue Shin
 Department of Traditional Food Culture and Food Industry Research Institute, JeonJu University
 45 Baengma-gil, Wansan-gu, Jeonju, Jeonbuk 560-759, Korea
 Tel: +82-63-220-3081
 Fax: +82-63-220-3264
 email: sorilove@jj.ac.kr

부분 연속처리가 가능하며, 처리 후에도 식품의 물리적·화학적 및 영양학적 특성들을 거의 변화하지 않는다. 또한 이 전기적 비가열 가공 기술은 친환경적 기술로서 이산화탄소의 발생을 줄이고, 에너지 측면에서도 열처리 공정에 비해 적은 에너지를 소모하는 녹색 기술로서 관심을 받고 있다. 이러한 이유로 최근 들어서 정부는 고부가가치식품분야의 신성장 동력 및 원천기술 R&D 세제지원 대상 기술로서 비가열 살균 기술을 선정하기도 하였다.

본고에서는 비가열 가공 기술로서 전기에너지를 활용한 기술 중 가장 활발한 분야인 고전압 펄스 전기장, 광펄스, 비가열 플라즈마의 원리, 미생물의 사멸 기작 및 효과, 식품분야에의 응용 등에 대해서 요약 기술하고자 한다.

II. 고전압 펄스 전기장(High Voltage Pulsed Electric Fields, PEF)

1. 고전압 펄스 전기장 시스템의 구성과 원리

고전압 펄스 전기장 처리 기술의 기본원리는 2개의 전극 사이에 대상 물질을 위치시키고 전극 양단에 10 kV/cm 이상의 고전압을 가하여 순간적으로 방전시켜 전기장을 형성시킴으로서 식품을 처리하는 기술이다. 고전압 펄스 전기장 시스템의 개략도는 Fig 1 과 같다. 고전압 펄스 전기장 시스템을 구성하는 기본적인 요소는 직류 전원 장치(DC power supply), 에너지를 일

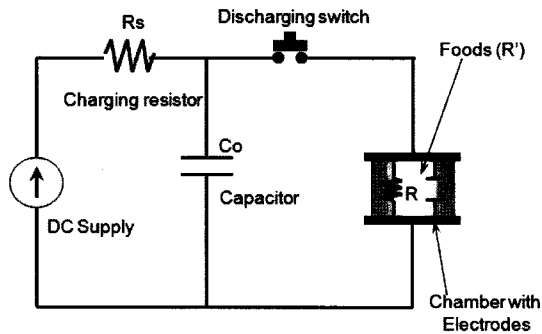


Fig 1. Schematic diagram of high voltage pulsed electric field system

시적으로 저장하기 위한 충전기(capacitor), 저장된 에너지를 순간적으로 방전시키기 위한 스위치(discharging switch), 그리고 대상 물질을 처리하기 위한 처리 용기(treatment chamber with electrodes)이다.

고전압 펄스 전기장의 처리는 직류전원장치에서 발생된 고전압의 에너지를 축전기에 충전시킨 후 전기적 신호에 따라 스위치가 접촉되면 축전지에 축적된 에너지가 전극을 통해 처리 용기내에 있는 대상 물질에 방전됨으로서 이루어진다. 대부분의 식품은 많은 양의 수분을 함유하고 있기 때문에 식품에 고전압의 전기가 인가되면 짧은 시간(수 μsec)내에 고전압의 전류가 흐르게 된다. 고전압의 방전이 끝나면 스위치는 다시 떨어지고 고전압의 에너지는 다시 축전지에 충전되고 같은 과정을 반복하게 된다. 이처럼 충전과 방전 사이클은 매우 짧은 시간, 즉 msec에서 μsec 단위에서 일어나게 되며, 충전의 시간보다는 방전의 시간이 매우 작게 된다. 따라서 식품에 수백내지 수십번의 고전압이 방전되더라도 실제 방전이 되는 시간은 1 sec 이하로 매우 짧기 때문에 열의 발생이 거의 없게 된다.

2. 고전압 펄스 전기장 기술의 발전 동향

고전압 펄스 전기장의 식품에의 응용은 가열공정의 단점을 보완하기 위한 비가열 살균 기술로서였다. 1960년 Gossling(4)이 전기장을 이용하여 미생물을 불활성화하고, Doevenspeck(5)은 전기장의 세기에 따라 전기장이 미생물에 미치는 영향이 다르게 나타나는 것을 보고하면서 고전압 전기장 처리가 가열 살균을 대체할 수 있는 비가열 공정으로서의 가능성을 제시하게 되었다. 그 이후 1960년대 후반에 Sale과 Hamilton(6)은 약 25 kV/cm 이상의 직류 전기장에 의해 세균과 효모가 사멸되고, 사멸 효과는 미생물의 종류, 전기장의 세기 그리고 처리 시간 등에 의해 영향을 받는 것으로 보고하였다. 1980년대가 되면서 많은 연구자들에 의해 미생물의 불활성화에 대한 연구가 이루어지면서 체계적인 연구가 시작되었으며, Zimmerman(7)에 의해 전기장 내에서의 미생물의 특징과 변화에 대한 연구 결과가 보고되었다. 1990년대에 들어서면서 장치의 기술적 문제, 실제 식품내 미생물의 살균, 고전압 펄스

전기장 처리가 식품에 미치는 영향 등에 대한 연구가 진행되고, 1990년대 후반에는 Ohio주립대학(OSU)에 음료를 대량으로 처리할 수 있는 pilot 설비가 설치·운영되면서 산업적 적용에 대한 가능성을 보여주었다. 그러나 고전압 펄스 전기장 기술의 산업적 적용은 동력학적 연구, 전극으로부터 식품으로의 전기분해산물의 전이, 처리용기내의 화학적·물리적 변화등에 대한 연구 결과의 부족과 시스템의 복잡성, 안정성 및 경제적 문제로 빠른 진행을 보이지 못하고 있다.

주로 살균공정의 대체기술로서 연구되어져 오던 고전압 펄스 전기장 기술은 1980년대 후반 식품내의 효소의 불활성화나 식물 세포 또는 일반 세포의 투과성 변화에 의한 세포내 유용 물질의 추출, 2000년대 들어서 건조의 전처리 기술 등 다른 분야로 응용에 대한 연구가 진행되면서 활용범위가 확대되고 있으며, 식품 산업 이외에도 생물공학이나 의학분야 등의 고부가가치 산업으로의 적용에 대한 연구도 함께 진행되고 있다.

3. 불활성화에 대한 연구

불활성화 기작

미생물에 대한 고전압 펄스 전기장의 적용은 미생물 세포막에 압력과 불안정성을 가져오게되고 경우에 따라서는 세포막에 비가역적인 손상을 일으키게 되고(7-10), 이온 수송의 변화(11-13), 효소의 조직 구조의 변화(14-15) 등을 일으키게 된다. 이러한 변화는 세포막의 유전과괴 현상에 의해 일어나는 것으로 세포막 사이에 0.7~2.2V의 전위차가 형성되면 세포막에 구멍이 생기게 되어 세포막 투과성이 크게 증가하여 세포의 불활성화를 일으키게 된다. Zimmerman(7)에 의하면 세포막이 2~10 kV/cm의 강도를 가진 전기장에 약 20 ns~10 ms 정도 노출이 되면 가역성 세공이 형성되고 전기장이 제거되면 세포막은 초기의 정상적인 상태로 되돌아가게 되지만, 노출시간이 10~15 ms 이상이 되면 비가역적인 손상을 입게 되는 것으로 설명하고 있다(Fig 2). 한편 Coster와 Zimmerman(16)은 세포압축이론으로 사멸 기작을 설명하고 있는데 세포막은 약 2 정도의 작은 유전상수를 갖는 유전체로서 세포막 양쪽에 자유전하가 축적되어 외부에서 전기장

이 가해지면 세포막 사이의 전위차가 증가하게 된다. 이렇게 발생된 전하는 반대전하를 갖고 따라서 두전하 사이에 인력이 작용하게 되어 세포막을 압축시키고 세포막의 두께를 감소시켜 불안정한 얇은 상태로 만들게 된다. 이러한 작용이 계속되면 결국 세포막에 세공이 형성된다. 또 다른 이론으로는 삼투압의 불균형에 의한 불활성화로서 전기장에 의해 만들어진 세공을 통해 세포내의 이온이나 작은 분자들이 유출되고 이것이 삼투압의 불균형을 일으키게 되어 세포를 팽창시키면서 결국에는 파괴시키게 된다(Fig 3)(17,18). 이 이외에도 전기장에 의해 생성된 가역적 세공은 점차 비가역적 세공을 형성하려고 하는 경향이 있다는 친수성/소수성 이론(19)과 전기장이 세포막의 지방과 단백질에 영향을 주어 상변이와 구조전이를 유발하여 세포를 불활성화시킨다는 구조변이이론(20)도 사멸기작의 하나로 제시되고 있다.

미생물과 효소의 불활성화

1950년대 초반 이후 전기장의 세기는 다르지만 전기장에 의해 *Escherichia coli*, *Streptococcus faecalis*, *Bacillus subtilis*, *Streptococcus cremiris*, *Micrococcus radiodurans*와 같은 미생물뿐만 아니라 trypsin이나 protease와 같은 효소를 불활성화시킬 수 있다는 연구결과(5)가 보고되었다. 또한 *E.coli*, *Staphylococcus aureus*, *Micrococcus lysodeikticus*, *Sarcina lutea*, *Bacillus subtilis*, *B. cereus*, *B. megaterium*, *Clostridium welchii*, *Listeria innocua* 그리고 yeasts(*Saccharomyces cerevisiae*, *Candida utilis*)

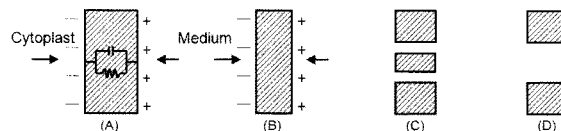


Fig 2. Diagram of reversible and irreversible electric breakdown

(A) Accumulation of transmembrane electric potential(charge), (B) Compression of membrane, (C) Reversible breakdown of membrane (small pore formation), (D) Irreversible breakdown of membrane (large pore formation)

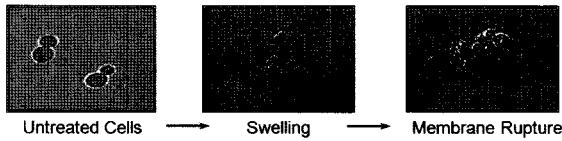


Fig 3. Morphological changes of *Saccharomyces cerevisiae* during PEF treatment

등과 같은 박테리아의 사멸(6,21-23)에 대한 비열 효과도 보고되었다. 최근에는 주스, 살사소스, 우유, 그리고 액란과 같은 실제 식품에 존재하는 변태 미생물 (yeast, molds, *Pseudomonas* spp.)과 병원성 미생물 (*E. coli* O157:H7, *Listeria* spp., *Salmonella* spp.)의 불활성화에 대한 연구도 진행되었다. Barbosa-Cánovas 등(24)은 약 7 log 이상의 사멸효과를 얻을 수 있으며, 처리 후 저장을 하면서도 병원성 미생물이 검출되지 않았다고 보고하였으며, 불활성화 효과에 차이는 있으나 trypsin, lactic dehydrogenase, galactosidase, plasmin, protease, lipase 등과 같은 다양한 효소에 대한 연구(25-29)도 보고되었다. 효소의 불활성화 원인은 PEF 처리가 효소 단백질의 2, 3차 구조를 변화시키고, 활성부위와 전체 구조사이의 분자 연결에도 변화를 주는 것으로 추측되어진다(29). 포자에 대한 불활성화는 아직도 연구중에 있으나 *Bacillus* spores의 경우 약 99~90%를 불활성화시킬 수 있으며(30,31), 이것은 디피콜린산의 손실과 관련이 있는 것으로 추측된다. 곰팡이의 경우에는 그 종류에 따라 불활성화 효과가 달라 분생포자(conidiospores)의 경우에는 36 kV/cm, 7 μ s의 처리만으로도 불활성화가 가능하지만, 자낭포자(ascospores)의 경우에는 같은 처리 조건에서 거의 영향을 받지 않는다(24).

병합처리 효과

대부분의 비가열 살균 공정과 마찬가지로 고전압 펄스 전기장도 식품내의 모든 미생물을 사멸시키는 멸균 공정이 아니기 때문에 다른 공정이나 항균제 등과의 조합을 통해 품질의 손실을 최소화하고 식품의 안전성을 확보할 수 있다(32).

Vega-Mercado 등(33)은 유기산을 사용하여 pH를 낮추면 PEF 처리시 불활성화 효과가 커진다고 보고

하였으며, pH 2.4의 용액내의 대장균에 12.5 kV/cm의 전기장을 처리하였을 경우 4 log 이상의 사멸을 얻었다는 보고도 있다. 이러한 불활성화의 상승효과는 세포내로 해리되지 않은 산이 침투하여 PEF의 효과를 상승시키는 것으로 보고 있다(34).

그람 양성 세포의 세포막에 영향을 주는 항균제의 하나인 nisin을 50 kV/cm, 60 μ s의 PEF 처리조건에서 1000 IU/mL 농도로 병합 처리할 경우 병원성 세균인 *Listeria innocua*를 3.8~5.5 log까지 사멸시킬 수 있는 상승효과를 보였다(35,36). 그러나 그람 음성 세포는 세포 외막에 있는 당지질 때문에 뚜렷한 상승효과를 보이지 않는다(37-39).

PEF 처리시 다른 것보다도 가장 큰 상승효과를 보이는 것은 바로 온도(50~60 $^{\circ}$ C)와의 병합처리이다. Sensoy 등(40)은 25 kV/cm에서 100 μ s처리했을 경우 50 $^{\circ}$ C로 *Salmonella dublin*을 병합처리하였을 경우 2 log 이상 더 사멸되었다고 보고하였다. Reina 등(41)도 50 $^{\circ}$ C에서 우유에 있는 *Listeria monocytogenes*를 30 kV/cm, 600 μ s 처리하였을 경우 3.5~4 log 더 사멸되었다고 하였다. 이 이외에도 *Saccharomyces cerevisiae*, *Salmonella enteritidis*, *E. coli*, *Lactobacillus brevis* 등의 미생물도 비슷한 결과를 나타내었다. 온도에 의해 상승효과를 보이는 이유는 세포막이 높은 온도에서는 약해지고, 세포는 불안정해져 쉽게 사멸되는 것으로 보인다(42-44).

4. 식품 가공에의 응용

식품 살균

고전압 펄스 전기장은 미생물의 불활성화할 수 있는 연구결과를 바탕으로 식품 살균에 직접적으로 적용하는 실험들이 이루어지고 있다. 지금까지의 식품 살균에의 적용을 보면 Krupp Maschinenteknik GmbH, FMC Europe N.V.는 회분식 및 연속식 살균장치를 개발하였으며(45-47), 미국의 Maxwell Lab.은 과일 주스나 액란의 살균, Washington 주립대학에서는 탈지분유나 완두콩 수프, 연세대학교는 당근주스, 전주대학교는 김치소스와 같은 식품의 살균에 대한 연구 결과 발표(48-51)하였으며, Ohio 주립대학에서는 시

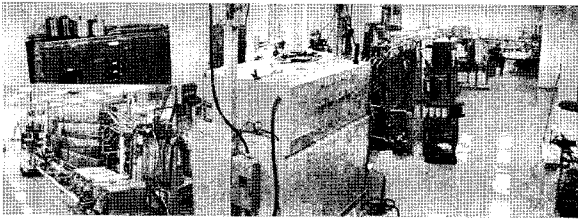


Fig 4. Pilot scale PEF treatment system with Aseptic Packaging system in Ohio State University

간당 2000L를 처리할 수 있는 pilot 규모의 연속식 PEF 처리장치와 무균 포장장치를 연결(Fig 4)하여 오렌지 주스를 생산하는 실험을 실시하였다. PEF 처리한 대부분의 식품은 기존의 열처리 공정을 거친 식품과 품질 비교를 하였을 경우 거의 차이가 없거나 우수한 것으로 평가되었다(52).

식품의 살균에 적용하기 위해 Ohio 주립대학 연구팀은 PEF 공정을 위한 식품의 조건 및 PEF 시스템의 경제성을 분석하였다. PEF 살균 기술이 적용 가능한 식품은 액체 식품, 고체 입자 함유식품, 일부 고형 식품등으로 연속시스템의 도입을 위해서는 pumping이 가능하고, 고형분이 포함되어 있을 경우에는 고른 분산이 가능하여야 하며, 크기에 제한이 있다. 또한 고형 식품의 경우에는 회분식 처리만이 가능하며, 두께 30 mm 이하의 균일한 크기를 갖고 충분한 수분을 가져야 한다. 경제성 분석의 결과에 의하면 효모를 기준으로 하여 50°C를 넘지 않는 범위에서 5 log의 사멸

을 얻기 위해서는 100 J/mL의 에너지, 0.17 cent/L가 필요하며, 이 전기적 에너지에 의한 온도의 상승을 막기 위한 냉각시스템에는 약 170 J/mL, 0.22 cent/L 정도가 필요한 것으로 분석되었다. Table 1에는 약 2000 L/h의 용량을 처리하기 위한 PEF 장치를 구축하는데 필요한 예상 경비를 정리한 것이다.

추출

고전압 펄스 전기장 기술이 식물성 또는 동물성 세포로부터 즙액이나 색소 및 기타 유용성분을 추출하는 방법으로 응용이 지속적으로 연구되었다(53-61). Rogob(53)에 의하면 과일과 야채 중의 즙액의 함유량을 90~95%에 달하지만 일반적인 추출법에 의해서는 추출량이 50~60% 밖에는 되지 않는데 미세하게 분쇄한 사과를 5~15 kV/cm의 전기장을 가하여 압력과 병행하여 추출하였을 경우 수율을 15% 이상 올릴 수 있었다고 보고하였으며, Geulen 등(54)은 당근을 파쇄하여 2.6 kV/cm의 고전압 처리 후 10 MPa로 5분간 압착할 경우 일반적 추출에 의한 것보다 40% 이상의 추출효과를 높게 얻을 수 있었으며, β -carotene의 함량도 더 높은 것으로 보고하였다. Praproscic 등(60)은 백포도로부터 주스를 압착하는 과정에 250~1000 V/cm의 전기장을 가하여 추출할 경우 그냥 압착만을 할 경우 49~54%이었던 주스의 수율이 76~78%까지 증가하며, 주스의 품질(산화율, 유기산 함량, 당도 등)에 있어서도 우수한 것으로 보고하였다.

Table 1. Cost Analysis for Scale-up of PEF system with co-field chamber

	Liquid foods	Liquid food with particles	
		particle size = 1.25 cm	particle size = 2.5 cm
No. of Chamber	6	6	6
Electrodes gap	1.27 cm	5 cm	10 cm
Resistance (Ω /chamber)	10	90	45
Peak Voltage (kV)	48	192	385
Peak Current (kA)	0.82	2.12	8.5
Velocity (cm/s)	784	50	12
System Cost (1,000 \$)	200-400	500-1,000	1,000-2,000

* Average electric field strength 35 kV/cm, treatment time 50 μ s, Electrical resistance 200 $\Omega \cdot \text{cm}$

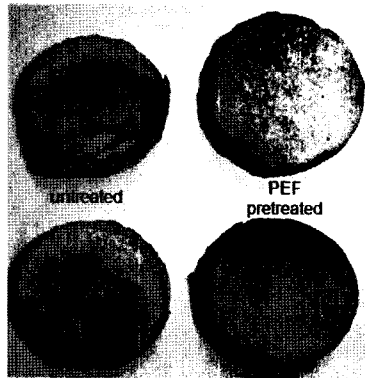


Fig 5. Photograph for the untreated and PEF pre-treated potato, which were freeze dried.

Shin 등(59)은 자색고구마로부터 색소를 추출하는데 10~35 kV/cm의 전기장을 가하였을 경우가 대조구에 비해 37% 이상의 추출량 향상 효과를 보이는 것으로 보고하였다.

고전압 펄스 전기장은 채소 및 과일 주스의 추출뿐만 아니라 생리활성물질을 추출에도 응용되고 있다(62-64). Dornenburg와 Knorr(65)은 적색색소를 생성하는 *Chenopodium rubrum* 세포를 상온에서 1.6 kV/cm의 전기장 처리하면 거의 100% 추출할 수 있다고 보고하였으며, *Morinda citrifolia* 세포로부터 anthraquinone의 추출에도 효과가 큰 것으로 보고하였다. Kim 등(63)은 carotenoids 색소를 생산하는 효모인 *Phaffia rhodozyma*로부터 고전압 전기장 병합 처리를 통해 색소 추출량을 향상시킬 수 있으며, 세포막 분해 효소등과 함께 처리할 경우에는 그 효과가 더욱 증가되는 것으로 보고하였다.

건조

고전압 펄스 전기장을 식품의 건조 분야에 응용하는 연구결과가 최근들어 많이 보고되고 있다(65-68). Jalté 등은 동결건조의 전처리 과정으로서 감자를 400 V/cm, 처리시간 10^{-4} ~0.3 sec 처리하였을 경우 그냥 동결 건조한 감자에 비해 변형을 줄이고 동결건조 시간을 단축시킬 수 있다고 보고하였다(Fig 5). Ade-Omowaye 등(66)은 붉은 피망을 천연 건조하기전에 2.0 kV/cm의 펄스 전기장을 가하였을 경우 건조 후

피망의 색깔이 오래동안 잘 보존될 뿐만 아니라, 건조 효과도 증가한다고 보고하였다. 이러한 건조 효율의 증가는 향후 원물을 활용한 스낵의 제조나 고품질 건조 식품의 생산 등에 보다 폭넓게 적용할 수 있을 것으로 전망된다.

이 이외에도 고전압 펄스 전기장은 제빵시 밀가루에 적용하여 수분손실을 줄이고 빵의 품질을 향상(69)시킬 수 있게 하거나, 폐수를 처리하는 분야에의 적용(70) 등 다양한 분야로 응용 연구가 진행되고 있다.

III. 광펄스(Intense Pulsed-Light, IPL)

광펄스 기술은 UV(ultraviolet)부터 근적외선(near infrared)부분까지의 넓은 범위의 빛을 짧은 시간동안 강하게 조사하여 식품의 표면에 존재하는 미생물을 사멸시킴으로서 보존기간을 늘리는 기술로, 'intense pulsed-light, IPL(71,72)', 'pulsed white light, WHL(73)', 'high intensity broad-spectrum pulse light(74)', 'pulsed UV light(75)', 'pulse light(76)' 등의 여러 가지 이름으로 불리우고 있다. IPL 시스템의 개략도는 Fig 6과 같다. 장치의 전체적인 개념은 PEF 시스템과 비슷하다. 고전압을 발생시킬 수 있는 전원 장치, 전기 에너지를 저장할 수 있는 축전지, 그리고 기체로 충전되어 있는 lamp로 구성되어 있다. PEF와 시스템과 다른 것은 전극 대신 lamp가 연결되어 있다. IPL 장치의 작동 원리는 DC의 전원 장치에 발생된 전기 에너지는 축전지에 충전되고 일정량의 전원이 지속적으로 램프에 흐른다. Xeon과 같은 불활성 가스가 충전되어 있는 램프에는 trigger 전원이 연결

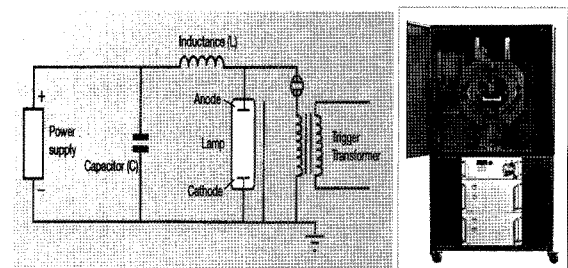


Fig 6. Schematic diagram and photograph of Intense pulse light system

되어 있다. Trigger 전원이 아주 짧은 시간(수 μ s) 동안 램프로 인가가 되면 일정량의 전원에 의해 약간의 여기 상태에 있던 가스는 순간적으로 크게 발광을 하면서 강한 빛을 발생하게 된다.

사멸기작

현재 광펄스 처리에 가장 많이 쓰이는 램프는 xenon flash lamp로 미생물의 불활성화에 가장 중요한 부분은 UV-C part이다. Rowan 등(76)은 식품과 밀접한 미생물(*Bacillus cereus*, *Listeria monocytogenes*, *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*, *Salmonella enteritidis*, *Pseudomonas aureginosa*, *Saccharomyces cerevisiae*)의 불활성화에 대해서 보고하였는데 pulsed UV flash 처리의 경우에는 약 5~6 log의 사멸 효과를 보였으나, UV light에 의해서는 1-2 log 정도의 사멸효과만을 나타내었다. 단색화장기(monochromator)를 사용한 Wang 등(77)의 실험에 의하면 *E. coli*의 불활성화에 효과가 높은 파장은 230~360 nm로 측정되었는데 270 nm 부근에서 최대 사멸율을 보였으며, 300 nm 이상에서는 별 효과가 없었다.

광펄스에 의한 미생물의 살균 작용은 photothermal 또는 photochemical 효과에 의한 것으로 어느 하나에 의한 것이라기 보다는 두 효과가 함께 영향을 미친다. 많은 연구자들은 주된 살균 기작을 photochemical 효과에 의한 것으로 보고하고 있으며, 일부의 실험 결과에 의하면 IPL 처리시 온도 상승은 1°C 미만으로 photothermal 효과는 거의 없는 것으로 나타났다(76). IPL에 의한 미생물의 사멸은 CW UV에 의한 미생물 사멸처럼 pyrimidine dimers의 형성에 의한 세포 복제 저해(78), photoproduct의 형성에 의한 single strand와 double strand의 파괴, cyclobutane dimer의 형성 등(79)에 의한 것으로 보고되고 있다.

Photothermal 효과를 주장하는 연구결과도 있는데 Hiramoto(80)나 Dunn 등(81)은 미생물이 열을 흡수하여 사멸하게 되고, 식품의 표면층이 광펄스의 에너지를 흡수하여 식품 내의 미생물을 사멸시킨다고 보고하였다. 그러나 이 에너지의 양이 식품 전체를 가열시킬 정도의 열은 아니라고 하였다. Wekhof(82)과

Wekhof 등(83)은 램프로부터 나오는 에너지가 0.5 J/cm²를 넘을 경우, 세포의 변형과 파괴를 일으키는 열사멸 효과를 보인다고 하였다. Photochemical, Photothermal 효과 이외에 DNA의 구조 변화, 세포막의 손상등도 사멸 기작으로 보고되고 있다(84,85).

IPL처리의 영향 요인

IPL의 처리시 미생물의 사멸에 영향을 미치는 요인은 램프로부터 나오는 빛의 세기, 빛에 대한 민감성, 램프와 시료사이의 거리, 빛의 전달 매체 등이다. IPL 처리시 시료가 광원으로부터의 거리가 가까울수록 그 효과는 더욱 커진다(86,87). 시료의 두께도 사멸 효과에 영향을 미치는데, 시료의 두께가 두꺼울수록 효과가 감소하게 되는데 이는 UV의 투과성에 제한이 따르기 때문이며, 특히 불투명한 시료일 경우 그 효과는 더욱 감소하게 된다(88). IPL 처리가 빛에 의해 미생물의 사멸시키는 방법이기 때문에 그림자 효과(shadow effect)도 미생물의 사멸에 크게 영향을 미친다. 즉 미생물의 접종량이 많아져서 중층이 될 경우 그 효과는 크게 떨어지게 된다(89). 식품의 성분 조성도 사멸 효과에 큰 영향을 미치게 된다. Gómez-López 등(90)은 여러 식품 성분을 포함하는 한천 배지에 *Photobacterium phosphoreum*, *L. monocytogenes*, *Candida lambica* 등을 도말하여 처리하였는데, 단백질이나 지방이 첨가되었을 경우 사멸 효과가 감소하고, 반면에 물이나 전분이 추가된 배지에서의 사멸효과는 큰 영향을 받지 않았다.

미생물의 사멸 효과

광펄스에 의한 미생물의 사멸효과에 대한 보고는 많지는 않으나 최근들어 연구가 활발히 진행되고 있다. MacGregor 등(91)은 *E. coli* O157:H7, *L. monocytogenes*에 512 μ s, 380 kW/cm²의 에너지를 가하였을 경우 약 6~7 log의 사멸 효과를 얻었으며, Krishnamurthy 등(92)도 완충용액이나 평판 배지 상에서 *S. aureus*에 IPL처리를 5초동안 하였을 경우 약 7~8 log 사멸시킬 수 있다고 보고하였다. Fine과 Gervais(93)는 glass bead와 quartz plates에 접종한 *S. cerevisiae*를 IPL 처리 하였을 경우 약 7 log 정도의 사멸을

을 얻을 수 있음을 보고하였다. Cho 등(94)은 *L. plantarum*, *L. brevis*, *Leuconostoc mesenteroides*, *Pediococcus pentosaceus*와 같은 유산균에 IPL 처리를 하여 각 7 log 이상의 사멸율을 얻었다고 보고하였다.

액체 시료에 대한 IPL 처리의 미생물 사멸 효과를 보면, *Klebsiella*는 약 7 log, 바이러스나 *Cryptosporidium parvum*은 약 4 log 정도의 사멸 효과를 보이는 것으로 보고하였으며(95), Ghasemi 등(96)은 *E. coli*와 *Salmonella*를 액체에 현탁하여 약 900 J의 에너지를 가하여 9 log의 사멸율을 얻을 수 있다고 보고하였다.

광펄스 처리와 다른 처리방법과의 병합처리에 의한 사멸 효과에 대한 연구 결과도 일부 보고가 되고 있는데, MacDonald 등(97)은 *Bacillus spore*에 pulsed UV light과 hydrogen peroxide를 병합 처리하여 pulsed UV light 단독 처리시보다 2 log 이상 사멸 상승 효과를 얻었다고 보고하였다.

식품에의 적용

광펄스 처리의 식품 적용 사례로 가장 많이 연구되고 있는 것이 과일 및 야채류에 존재하는 미생물을 사멸하는 것이다. Hoornstra 등(98)은 배추, 부추, 파프리카, 당근, 케일등의 야채에 0.6 J/cm²의 IPL 처리를 한 결과 1.6~2.6 log CFU/cm²의 미생물수를 감소시켰으며, 각 야채의 관능적 품질에는 큰 영향을 주지 않고, 7°C와 20°C의 온도에서 7일 이상을 유지하였다고 보고하였다. Marquenie 등(99)은 딸기와 체리같은 과일류에 존재하는 곰팡이인 *B. cinerea*와 *M. fructigena*에 IPL 처리를 하여 최대 3~4 log 감소되었으며, 역시 딸기의 품질에는 아무런 영향을 주지 않았다고 보고하였다.

광펄스 처리가 분말 식품이나 종자의 오염을 처리하는 기술로서의 적용도 연구가 되고 있다(71,72,93,100). Choi 등(71,72)은 분말 이유식에 *Listeria monocytogenes*, *Enterobacter sakazakii*를 접종하여 IPL 처리한 결과 각각 4 log, 5 log 이상의 사멸효과를 보이는 것으로 보고하였으며, Jun 등(100)은 옥수수에 접종한 *A. niger* 포자를 처리하여 약 5 log, Fine and Gervais(93)는 밀가루와 후추의 *S. cerevisiae*를 처리하여 1 log 정도의 사멸 효과를 거두었다고 보고하였다.

또 다른 적용분야로서 최근 수산물의 오염균을 저감하는 기술 개발이 이루어지고 있다. Shin 등(101)은 연어, 광어, 새우등에 *E. coli*, *L. monocytogenes*, *P. aeruginosa* 등을 접종해서 IPL을 처리했을 경우 1~3.5 log 정도 사멸하는 결과는 얻었으며, Ozer과 Demirci(102)도 연어의 *L. monocytogenes*가 0.86~1.09 log 정도 사멸한다고 보고하였다. 이 이외에도 육류, 치즈, 케익, 새우 등에 적용하는 연구사례가 보고되고 있다.

VI. 비가열 플라즈마(Non-thermal Plasma)

플라즈마는 분자의 일부분이 여기 또는 이온화되어 가스와 같은 상태로 되어 있는 것을 말한다. 이러한 플라즈마는 생성되는 조건에 따라서 가열 플라즈마(thermal plasma)와 비가열 플라즈마(non-thermal plasma)로 나눌 수 있는데, 가열 플라즈마는 고압($\geq 10^5$ Pa)와 50MW 이상의 전력을 필요로 한다. 반면에 비가열플라즈마는 낮은 압력과 상대적으로 낮은 전기로도 발생시킬 수 있으며, 가열플라즈마가 5~20×10³ K 이상의 온도로 가열되는 반면 비가열 플라즈마는 40 °C 정도의 낮은 온도가 유지된다(103,104).

비가열 플라즈마의 장치 구성을 보면 고전압의 전원과 수 kHz의 주파수를 발생시킬 수 있는 전원 장치, 플라즈마를 발생시키기 위한 전극, 그리고 전극 사이에 공급하는 가스, 일부의 경우 방전 처리 용기 등이 필요하다(Fig 7)(105).

비가열 플라즈마는 화학적 소독제와 유사한 살균 작용을 갖는다. 즉, 플라즈마는 산소원자, 오존, 자유라디칼 등을 발생시켜 이 물질들이 세포막을 공격하여 산화

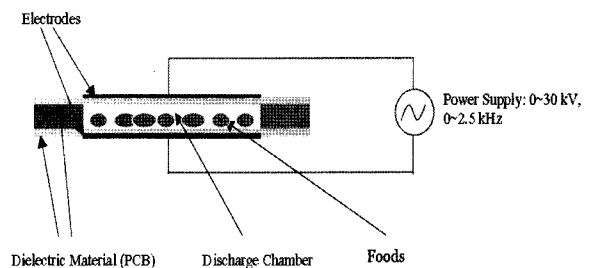


Fig 7. Schematic diagram of Nonthermal plasma system

를 일으키고 이로 인해 세포가 사멸하게 된다. 그리고 강력한 라디칼 물질들에 의해서 세포의 표면에 물리적 손상을 입히기도 한다(106-108). 또한 플라즈마는 세포막에 구멍을 내어 투과성에 변화를 일으키는 PEF 사멸기작과 비슷하게 작용하기도 한다. 한편 Thymine dimers를 형성하고 double-strand를 파괴하여 DNA에 손상을 입혀 사멸효과를 보이기도 하며(109), 세포의 대사체계에 변화를 일으키기도 한다(110).

비가열 플라즈마에 의한 미생물의 사멸은 90년대 초반에 시도되었다(111-114). 사멸 효과는 플라즈마를 생성시키는 가스의 종류(115), 전극의 표면 특성과 조성, 전극간의 거리, 살균 대상 물질이 액체일 경우에는 용매의 물리화학적 특성, 처리 대상 미생물의 종류 및 생육 단계 등이 영향을 미친다(116,117).

비가열 플라즈마는 주로 식품의 표면에 존재하는 미생물을 사멸시키는데 이용이 되고 있는데, 적용된 예를 보면 사과 표면에 존재하는 *Salmonella*와 *E. coli* O157:H7에 적용하여 34~3.6 log의 감소 효과를 얻었으며(118), 망고, 멜론의 *P. agglomerans*, *G. liquefaciens*의 경우에는 3 log(119), 견과류 표면에 존재하는 *A. parasiticus*의 경우에는 5 log(120), 치즈와 햄에 접종한 *L. monocytogenes*는 최대 5.8 log의 감소를 보이는 것으로 보고(121)되었다. 이 이외에도 돼지고기 표면, 달걀 표면등 다양한 식품에 적용 연구가 진행되고 있다.

V. 기타

전기적 에너지를 사용한 비가열 살균기술에는 이상에서 언급한 세 가지의 기술 이외에도 고전압 아크 방전(high voltage arc discharge, HVAD), 전자빔(electron beam, EB), x-ray 처리 기술 등이 있다. 고전압 아크 방전 기술은 대상 물질과 전극 사이에 고전압의 에너지를 아크 방전시켜 미생물을 사멸시키는 기술로서 액체 식품을 살균하는 기술 중 하나이다. 이 기술은 1920년대 우유의 살균에 처음으로 적용되었으나, 아직 식품 가공에 적용된 사례가 많지 않다. HVAD 기술은 고전압의 방전에 의해 생성된 수압과 자유라디칼이 세포막에 비가열적 손상을 입혀 세포를 사멸

시키게 되는 것으로 알려져 있다(122). 공기중의 병원성 미생물의 살균, 액체 식품의 살균 내지는 육류 및 생선류의 표면 살균, 폐수 처리 등에 응용이 가능하다(123). 전자빔 기술은 이온화 조사 살균 기술이라고도 불리우는데, 1950년대에 살균 기술로서의 가능성이 밝혀진 이후 최근들어 많은 연구결과와 산업적 적용이 확대되고 있다. 전자빔 기술도 기본적인 원리는 다른 고전압 기술들과 비슷하지만 전자 가속기를 사용한다는 점에서 차이점이 있다. 지금까지의 연구 결과를 보면 수산물, 육제품, 포장재, 육가공 및 유제품 등 다양한 분야에 적용이 이루어지고 있다(124-126).

VI. 결론

비가열 처리 공정 기술 중 전기적 에너지를 활용한 가공 기술은 아직 연구결과나 산업적 적용의 사례가 많지 않다. 그러나 소비자와 식품업계의 새로운 고부가가치 제품에 대한 요구, 이산화탄소 저감 가공 기술의 개발 필요성, 새로운 기술과의 융합 등의 의해 최근들어 활발한 연구가 진행되고 있다. 전기적 에너지를 활용한 비가열 가공 기술이 현장에 적용되기 위해서는 장치의 안정성 및 경제성에 대한 문제, 식품성분 및 품질에 대한 화학적, 생물학적 연구 등 해결해야 할 점들이 많이 남아있기는 하지만, 연속공정이 가능하고, 에너지 이용 효율이 높으며, 고품질·고부가가치의 식품을 만들 수 있어 열처리 공정의 대체 기술로서 뿐만 아니라 다양한 분야로의 적용이 확대될 수 있는 잠재력이 큰 기술 분야이기 때문에 기술의 선점이나 새로운 기술의 개발을 위해 보다 많은 연구가 진행되어야 할 것이다.

감사의 글

이 논문은 농림수산식품부 수산특정연구개발사업 및 울촌재단의 재원을 지원받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Cho HY, Shin JK, Pyun YR. Non-thermal processing technology by high voltage pulsed electric field, Korean Food Sci-

- ence and Industry, 29: 28-35 (1996)
2. Shin JK, Pyun YR. Foodstuff sterilization by high voltage pulsed electric fields treatment, Korean Food Science and Industry, 33: 27-35 (2000)
 3. Mertens B, Korr D. Development of Nonthermal processes for food preservation, Food technology, 46: 124-133 (1992)
 4. Gossling BS, Artificial Mutation of micro-organisms by electrical shock. United Kingdom, UK Patent 845743 (1960)
 5. Doevenspeck, H. Verfahren und vorrichtung zur gewinnung der einzelnen phasen nus dispersen systemen. German Patent 1237541 (1960)
 6. Sale AJH and Hamilton WA. Effect of high electric fields on microorganisms I. Killing of bacteria and yeast, Biochimica Biophysica ACTA, 148: 781-788 (1967)
 7. Zimmerman U. Electrical Breakdown, electroporation and electrofusion. Reviews on Physiological Biochemical Pharmacology, 105: 175-256 (1986)
 8. Pothakamury UR, Barbosa-Cánovas GV, Swanson BG, Spence KD. Ultrastructural changes in *Staphylococcus aureus* treated with pulsed electric fields. Food Science and Technology International, 3: 113-121 (1997)
 9. Jin ZT, Qiu X, Zhang, Q.. Application of high speed microscopy imaging technology in evaluation of inactivation of microorganisms by pulsed electric fields. Institute of Food Technologies, Annual Meeting, Paper 59C-16 (1998)
 10. Calderón-Miranda ML, Barbosa-Cánovas GV, Swanson BG. Transmission electron microscopy of *Listeria innocua* treated by pulsed electric fields and nisin in skimmed milk. International Journal of food Microbiology, 51: 31-39 (1999)
 11. Vega-Mercado H, Pothakamury UR, Chang FJ., Barbosa-Cánovas GV, Swanson BG. Inactivation of *E. coli* by combining pH, ionic strength and pulsed electric field hurdles. Food Research International, 29: 117-121 (1996)
 12. Kim H, Ye J, Li Y. Inactivation of *Listeria monocytogenes* in chilling brine using a flow through electrochemical treatment. Institute of Food Technologist, Annual Meeting, Paper 59H-22 (2001)
 13. Shin JK. Inactivation of *Saccharomyces cerevisiae* by high voltage pulsed electric fields, Ph.D. Thesis, Yonsei, (2000)
 14. Vega-Mercado H, Powers JR, Barbosa-Cánovas G.V, Swanson BG. Plasmin inactivation with pulsed electric fields. Journal of Food Science, 60: 1132-1136 (1995)
 15. Fernandez-Díaz MD, Barsotti L, Dumay E, Cheftel JC. Effect of pulsed electric fields on ovalbumin solutions and dialyzed egg white. Journal of Agriculture Food Chemistry, 48: 2332-2339 (2000)
 16. Coster HGL, Zimmerman U. The mechanism of electrical breakdown in the membranes of *Valonia utricularis*. Journal of Membrane Biology, 22: 73-90 (1975)
 17. Tsong TY. Electrical modulation of membrane proteins: enforced conformational oscillations and biological energy and signal transductions. Annual Reviews of Biophysics and Chemistry, 19: 83-106 (1990)
 18. Kinoshita J Jr, Tsong TY. Hemolysis of erythrocytes by a transient electric field. Proceedings of the National Academy of Science USA. 74: 1923-1927 (1977)
 19. Dimitrov DS. Electric field-induced breakdown of lipid bilayers and cell membranes; a thin viscoelastic model. Journal of Membrane Biology, 78: 53-60 (1984)
 20. Neumann E, Rosenheck H. Permeability changes induced by electric impulses in vesicular membranes. Journal of Membrane Biology, 10: 279-290 (1972)
 21. Hamilton WA, Sale AJH. Effects of high electric fields on microorganisms. II. Mechanism of action of the lethal effect. Biochimica Biophysica Acta, 148: 789-800 (1967)
 22. Shin JK. Inactivation of *Listeria innocua* by high voltage pulsed electric field using continuous treatment chamber, Food Engineering Progress, 11: 96-102 (2007)
 23. Shin JK. The effect of operating parameters on inactivation of *Saccharomyces cerevisiae* by high voltage pulsed electric fields. Food Engineering Progress 12: 90-96 (2008)
 24. Barbosa-Cánovas GV, Góngora-Nieto MM, Pothakamury UR, Swanson BG. Preservation of Foods with Pulsed Electric Fields. New York; Academic Press, pp. 1-9, 76-100, 104: 108-155 (1999)
 25. Vega-Mercado H, Powers JR, Barbosa-Cánovas GV, Swanson BG. Plasmin inactivation with pulsed electric fields. Journal of Food Science, 60: 1132-1136 (1995)
 26. Vega-Mercado H, Powers JR, Barbosa-Cánovas GV, Swanson BG. Effect of added calcium and EDTA on the inactivation of a protease from *Pseudomonas fluorescens* M3/6 when exposed to pulsed electric fields. In: Barbosa-Cánovas GV, Zhang H.(Eds), Electric Fields in Food Processing. Lancaster, PA: Technomic, pp. 121-134 (2001)
 27. Vega-Mercado H, Powers JR, Martin-Bellosos O, Lueddecke L, Barbosa-Cánovas GV, Swanson BG. Changes in susceptibility of proteins to proteolysis and the inactivation of an extracellular protease from *Pseudomonas fluorescens* M3/6 when exposed to pulsed electric fields. Barbosa-Cánovas GV, Zhang, H.(Eds), Electric Fields in Food Processing. Lancaster, PA: Technomic, pp. 105-120 (2001b)
 28. Ho SY, Mittal GS, Cross JD. Effect of high field electric pulses on the activity of selected enzymes, Journal of Food Engineering, 31: 69-84 (1997)
 29. Yeom HW, Zhang QH, Dunne CP. Inactivation of enzyme papain by pulsed electric field in a continuous system, Food

- Chemistry, 67: 53-59 (1999)
30. Marquez VO, Mittal GS, and Griffiths MW. Destruction and inhibition of bacterial spores by high voltage pulsed electric fields. *Journal of Food Science*, 62: 399-409 (1997)
 31. Shin JK, Lee SJ, Cho HY, Pyun YR, Lee JH, Chung MS. Germination and subsequent inactivation of *Bacillus subtilis* spores by pulsed electric field treatment. *Journal of Food Processing and Preservation*, 43: 43-54 (2010)
 32. Leistner L. Hurdle effect and energy savings, In: Downey WK. (Ed.), *Food Quality and Nutrition*, Barking: Applied Science Publishers, p 553 (1978)
 33. Vega-Mercado H, Pothakamury UR, Chang FJ, Barbosa-Cánovas GV, Swanson BG. Inactivation of *E. coli* by combining pH, ionic strength and pulsed electric field hurdles. *Food Research International*, 29: 117-121 (1996b)
 34. Liu X, Yousef AE, Chism GW. Inactivation of *Escherichia coli* O157:H7 by combination of organic acids and pulsed electric fields. *Journal of Food Safety*, 16: 287-299 (1997)
 35. Kalchaynand N, Sikes T, Dunne CP, Ray B. Hydrostatic pressure and electroporation have increased bactericidal efficiency in combination with bacteriocins. *Applied and Environmental Microbiology*, 60: 4174-4177 (1994)
 36. Calderón-miranda MS, Barbosa-Cánovas GV, Swanson, BG. Inactivation of *Listeria innocua* in skim milk by pulsed electric fields and nisin. *International Journal of Food Microbiology* 51: 1930 (1999a)
 37. Calderón-miranda MS, Barbosa-Cánovas GV, Swanson, BG. Inactivation of *Listeria innocua* in liquid whole egg by pulsed electric fields and nisin. *International Journal of Food Microbiology*, 51: 7-17 (1999b)
 38. Terebiznik MR, Jagus RJ, Cerrutti P, Huergo MS, Pilosof AM. Combined effect of nisin and pulsed electric fields on the inactivation of *Escherichia coli*. *Journal of Food Protection*. 63: 741-747 (2000)
 39. Góngola-Nieto MM, Seignour L, Riquet P, Davidson, P.M., Barbosa-Cánovas, G.V, Swanson, B.G. Nonthermal inactivation of *Pseudomonas fluorescens* in liquid whole egg. In: Barbosa-Cánovas, G.V, Zhang, H. (Eds), *Pulsed Electric Fields in Food Processing: Fundamental Aspects and Applications*. Lancaster, PA: Technomic Publishers pp. 193-210 (2001)
 40. Sensoy I, Zhang Q.H, Sastry SK. Inactivation kinetics of *Salmonella dublin* by pulsed electric fields. *Journal of Food Protection*, 63: 741-747 (2000)
 41. Reina LD, Ji, ZT, Zhang QH, Yousef AE. Inactivation of *Listeria monocytogenes* in milk by pulsed electric field. *Journal of Food Protection*, 61: 1203-1206 (1998)
 42. Son SM, Shin JK. The effect of environmental factors on inactivation of *Saccharomyces cerevisiae* by high voltage pulsed electric fields. *Food Engineering Progress*, 12: 156-162 (2008)
 43. Pothakamury UR, Vega-Mercado H, Zhang Q, Barbosa-Cánovas GV, Swanson BG. Effect of growth stage and temperature on inactivation of *E. coli* by pulsed electric fields. *Journal of Food Protection*, 59: 1167-1171 (1996)
 44. Vega-Mercado H, Martin-Belloso O, Chang FJ, Barbosa-Cánovas GV, Swanson BG. Inactivation of *Escherichia coli* and *Bacillus subtilis* suspended in pea soup using pulsed electric fields. *Journal of Food Process and Preservation*, 20: 501-501 (1996a)
 45. Grahl T, Sitzman W, Markl H. Killing of microorganisms of fluid media by high-voltage pulse. *DECHEMA Biotechnology Conference Series 5B*, 675 (1992)
 46. Sitzmann W. Keimabtötung Mit Hilfe Elektrischer Hochspannungsimpulse in Pumpfähigen Nahrungsmitteln. Vortrag Anlässlich des Seminars. Presented at DECHEMA Mtg., Frankfurt, Germany, July 6-7 (1990)
 47. W. High voltage pulse techniques for food preservation. In: *New methods of food preservation*, Blackie Academic & Professional, London (1995)
 48. Tsong TY. On electroporation of cell membranes and some related phenomena, *Bioelectrochemistry Bioenergetics*, 24: 271-295 (1990)
 49. Bushnell AH, Dunn JE, Clark RW. High pulsed voltage systems for extending the shelf life of pumpable food products. U.S. Patent 5,048,404 (1991)
 50. Ha KY, Shin JK, Lee SH, Cho HY, Pyun YR. Non-thermal pasteurization of carrot juice by high voltage pulsed electric fields with exponential decay pulse. *Korean Journal of Food Science and Technology*, 31: 1577-1582 (1999)
 51. Shin JK, Shin HH. Sterilization and storage of liquid kimchi sauce by high voltage pulsed electric fields, *Food Engineering Progress*, 10: 262-268 (2006)
 52. Barsotti L, Cheftel C. Food processing by pulsed electric fields. II. Biological aspects. *Food Reviews International*, 15: 181-213 (1999)
 53. Rogob EA. Electropasmolysis, In: *Electrical and physical process of Food, Agriculture Production*, Moscow, p 86
 54. Guelen M, Teichgraber P, Knorr D. Effects of high electric field pulse treatment on carrot juice yield. IFT Annual meeting: Book of Abstracts. p 53
 55. Knorr D, Geulen M, Grahl T, Sitzmann W. Food application of high electric field pulses. *Trend in Food Science and Technology*, 5: 71-75 (1994)
 56. Oshima T, Sato M, Saito M. Selective release of intracellular protein using pulsed electric field. *Journal of Electrostatics*, 35: 103-112 (1995)
 57. Knorr D, Angersbach A, Eshtiaghi MN, Heinz V, Lee, DU.

- Processing concepts based on high intensity electric field pulses, *Trend in Food Science and Technology*, 12: 129-135 (2001)
58. Knorr D, Angersbach A. Impact of high-intensity electric field pulses on plant membrane permeabilization, *Trend in Food Science and Technology*, 9: 185-191 (1998)
 59. Shin JK, Shin HH. Effect of high voltage pulsed electric fields on extraction purple sweet potato pigment, *Korean Journal of Food Preservation*, 14: 165-169 (2007)
 60. Praporscic I, Lebovka N, Vorobiev E, Peuchot, MM. Pulsed electric field enhanced expression and juice quality of white grapes, *Separation and Purification Technology*, 52: 520-526 (2007)
 61. Proporscic I, Shynkaryk MV, Lebovka NI, Vorobiev E. Analysis of juice colour and dry matter content during pulsed electric field enhanced expression of soft plant tissue. *Journal of Food Engineering*, 79: 662-670 (2007)
 62. Eshtiaghi, M.N, Knorr, D. High electric field pulse pretreatment: potential for sugar beet processing, *Journal of Food Engineering*, 52, 265-272 (2002)
 63. Kim NH, Shin JK, Cho HY, Pyun YR. Effects of high voltage pulsed electric fields on the extraction of carotenoid from *Phaffia rhodozyma*, *Korean Journal of Food Science and Technology*, 31: 720-726 (1999)
 64. Dornenburg H, Knorr D. Cellular permeabilization of cultures plant tissues high electric field pulses or ultra high pressure for the recovery of secondary metabolites. *Food Microbiology*, 7: 35-48 (1003)
 65. Jalté M, Lanoisellé JL, Lebovka NI, Vorobiev E. Freezing of potato tissue pre-treatment by pulsed electric fields, *LWT-Food Science and Technology*, 42: 576-580 (2009)
 66. Ade-Omowaye BIO, Rastogi NK, Angersbach A, Knorr D. Combined effects of pulsed electric field pre-treatment and partial osmotic dehydration on air drying behaviour of red bell pepper, *Journal of Food Engineering*, 60: 89-98 (2003)
 67. Ade-Omowaye BIO, Angersbach A, Taiwo KA Knorr D. Use of pulsed electric field pre-treatment to improve dehydration characteristics of plant based foods, *Trend in Food Science and Technology*, 12: 285-295 (2001)
 68. Lebovka NI, Shynkaryk NV, Vorobiev E. Pulsed electric field enhanced drying of potato tissue, *Journal of Food Engineering*, 78: 606-613 (2007)
 69. Aibara S, Hisaki K, Watanabe J. Effects of high-voltage field treatment on wheat dough and bread-making properties. *Cereal Chemistry*, 64, 465-467 (1992)
 70. Sitzmann W, Münch EW. Elektrische Verfahren zurKeimabtötung. *Ernahrungs industrie* 6: 54-58 (1988)
 71. Choi MS, Cheigh CI, Jeong EA, Shin JK, Chugn MS. Non-thermal sterilization of *Listeria monocytogenes* in infant foods by intense pulsed-light treatment, *Journal of Food Engineering*, 97: 504-509 (2010)
 72. Choi MS, Cheigh CI, Jeong EA, Shin JK, Park JY, Song KB, Park JH, Kwon KS, Chung MS. Inactivation of *Enterobacter sakazakii* inoculated on formulated infant foods by intense pulsed light treatment, *Food Science and Biotechnology*, 18: 1537-1540 (2009)
 73. Marquenie D, Geeraerd AH, Lammertyn L, Sontjens C, Van-Impe JF, Michiels CW. Combinations of pulsed white light and UV-C or mild heat treatment to inactivate conidia of *Botrytis cinerea* and *Monilia fructigena*. *International Journal of Food Microbiology*, 85: 185-196 (2003)
 74. Roberts P, Hope A. Virus inactivation by high intensity broad spectrum pulsed light. *Journal of Virological Methods*. 110: 61-65 (2003)
 75. Sharma RR, Demirci A. Inactivation of *Escherichia coli* O157:H7 on inoculated alfalfa seeds with pulsed ultraviolet light and response surface modeling. *Journal of Food Science*, 68: 1448-1453 (2003)
 76. Rowan NJ, MacGregor SJ, Anderson JG, Fouracre RA, McIlvaney L, Farish O. Pulsed-light inactivation of food-related microorganisms. *Applied and Environmental Microbiology*, 65: 1312-1315 (1999)
 77. Wang T, MacGregor SJ, Anderson JG, Woolsey GA. Pulsed ultra-violet inactivation spectrum of *Escherichia coli*. *Water Research*, 39: 2921-2925 (2000)
 78. Bolton JR, Linden KG. Sterilization of methods for fluence (UV dose) determination in bench-scale UV experiments. *Journal of Environmental Engineering*, 129: 209-215 (2003)
 79. Slieman TA, Nicholson WL. Artificial and solar UV radiation induces strand breaks and cyclobutane dimer in *Bacillus subtilis* spore DNA. *Applied and Environmental Microbiology*, 62: 1977-1983 (2000)
 80. Hiramoto T. Method of sterilization, US Patent 4,464,336 (1984)
 81. Dunn JE, Clark RW, Asmus JF, Pearlman JS, Boyerr K, Painchaud F. Methods for preservation of foodstuffs. US Patent 4,871,559 (1989)
 82. Wekhof A. Disinfection with flash lamps. *PDA Journal of Pharmaceutical Science and Technology*, 54: 264-276 (2000)
 83. Wekhof A, Trompeter FJ, Franken O. Pulse UV disintegration (PUVD): A new sterilization mechanism for packaging and broad medical-hospital applications. The first international conference on ultraviolet technologies, Washington D.C., USA. (2001)
 84. Wuytack EY, Thi Phuong LD, Aertsen A, Reyns KMF, Marquenie D, De Kerelaere B. Comparison of sublethal injury

- induced in *Salmonella enterica* serovar *Typhimurium* by heat and by different nonthermal treatments. *Journal of Food Protection*, 66: 31-37 (2003)
85. Takeshita K, Shibato J, Sameshima T, Fukunaga S, Isobe S, Arihara K. Damage of yeasts induced by pulsed light irradiation. *International Journal of Food Microbiology*, 85:151-158 (2003)
 86. Hillegas SL, Demirci A. Inactivation of *Clostridium sporogenes* in clover honey by pulsed UV-light treatment. *Agricultural Engineering International*, V. Manuscript FP 03009 (2003)
 87. Ozer NP, Demirci A. Inactivation of *Escherichia coli* O157:H7 and *Listeria monocytogenes* inoculated on raw salmon fillets by pulsed UV-light treatment. *International Journal of Food Science and Technology*, 41: 354-360 (2006)
 88. Sharma RR, Demirci A. Inactivation of *Escherichia coli* O157:H7 on inoculated alfalfa seeds with pulsed ultraviolet light and response surface modeling. *Journal of Food Science*, 68: 1448-1453 (2003)
 89. Gómez-López VM, Devlieghere F, Bonduelle V, Devereux J. Intense light pulses decontamination of minimally processed vegetables and their shelf-life. *International Journal of Food Microbiology*, 103: 79-89 (2005)
 90. Gómez-López VM, Devlieghere F, Bonduelle V, Devereux J. Factors affecting the inactivation of microorganisms by intense light pulses. *Journal of Applied Microbiology*, 99: 460-470 (2005)
 91. MacGregor SJ, Rowan NJ, McIlvaney L, Anderson JG, Fouracre RA, Farish O. Light inactivation of food related pathogenic bacteria using a pulsed power source. *Letters in Applied Microbiology*, 27: 67-70 (1998)
 92. Krishnamurthy K, Demirci A, Irudayaraj J. Inactivation of *Staphylococcus aureus* by pulsed UV-light sterilization. *Journal of Food Protection*, 67: 1027-1030 (2004)
 93. Fine F, Gervais P. Efficiency of pulsed UV light for microbial decontamination of food powders. *Journal of Food Protection*, 67: 787-792 (2004)
 94. Cho HY, Shin JK, Song YA, Yoon SJ, Kim JM, Pyun YR. Nonthermal Pasteurization of Lactic acid bacteria by High intensity light pulse. *Korean Journal of Food Science and Technology*, 34: 631-636 (2002)
 95. Huffman DE, Slifko TR, Salisbury K, Rose JB. Inactivation of bacteria, virus and *Cryptosporidium* by a point of use device using pulsed broad spectrum white light. *Water Research*, 34: 2491-2498 (2000)
 96. Ghasemi Z, Macgregor S, Anderson J, Lamont Y. Development of an integrated solid-state generator for light inactivation of food related pathogenic bacteria. *Measurement Science and Technology*, 14: N26-N32 (2003)
 97. McDonald KF, Curry RD, Clevenger TE, Brazos BJ, Unklesbay K, Eisenstark, A. et al. A comparison of pulsed and continuous ultraviolet light sources for the decontamination of surface. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 28: 1581-1587 (2000)
 98. Hoorstra E, de Jong G, Notermans S. Preservation of vegetables by light. In *Society for Applied Microbiology*(Ed.) *Frontiers in microbial fermentation and preservation*, Washington, the Netherlands.
 99. Marquenie D, Michaels CW, Van Imper JF, Schrevels E, Nicolai BN, Pulsed white light in combination with UV-C and heat to reduce storage rot of strawberry. *Postharvest Biology and Technology*, 28: 455-461 (2003)
 100. Jun S, Irudayaraj J, Demirci A, Geiser D. Pulsed UV-light treatment of corn meal for inactivation of *Aspergillus niger* spores. *International Journal of Food Science and Technology*, 38: 883-888 (2003)
 101. Shin JK, Chung MS, Park YS. High intensity pulsed light treatment for preservation and shelf-life extension of seafoods. *Unreported Report*, (2010)
 102. Ozer NP, Demirci A. Inactivation of *Escherichia coli* O157:H7 and *Listeria monocytogenes* inoculated on raw salmon fillets by pulsed UV-light treatment. *International Journal of Food Science and Technology*, 41: 354-360 (2006)
 103. Moreau M, Orange N, Feuilletoy MGJ. Non-thermal plasma technologies: New tools for bio-decontamination. *Biotechnology Advances*, 26: 610-617 (2008)
 104. Mastwijk HC, Groot MNH. Use of cold plasma in Food Processing. *Encyclopedia of Biotechnology in Agriculture and Food*, not printed, 2010
 105. Laroussi M, Alexeff I, Kang WL. Biological decontamination by nonthermal plasma. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 28: 184-188 (2000)
 106. Benstaali B, Moussa D, Addou A, Brisset JL. Plasma treatment of aqueous solutes: some chemical properties of gliding arc in humid air. *European Physical Journal Applied Physics*, 4: 171-179 (1998)
 107. Benstaali B, Moussa D, Sauvage L, Addou A, Cheron BG, Brisset JL. Interaction between plasma and aqueous solutes. In the proceedings of the international symposium on high pressure, Low temperature plasma chemistry, Hakone VI, Cork, Ireland, 148-152 (1998)
 108. Laroussi M, Leipold F. Evaluation of the roles of reactive species, heat and UV radiation in the inactivation of bacterial cells by air plasma at atmospheric pressure. *International Journal of Mass Spectrometry*, 233: 81-86 (2004)
 109. Moreau M, Feuilletoy MGJ, Veron W, Meylheuc T, Cheva-

- lier S, Brisset JL. Gliding arc discharge in the potato pathogen *Erwinia carotovora* subsp. atroseptica: mechanism of the lethal action and effect on membrane-associated molecules. *Applied Environmental Microbiology*, 73: 5904-5910 (2007)
110. Laroussi M, Richardson JP, Dobbs FC. Biochemical and morphological effects of non-equilibrium atmospheric pressure plasmas on bacteria. In proceedings of the XVth international symposium on plasma chemistry. Orléans, France, 729-734 (2001)
111. Baier RE, Carter JM, Sorenson SE, Meyer AE, McGowan BD, Kasprzak SA. Radiofrequency gas plasma (glow discharge). Disinfection of dental operative instruments, including handpieces. *Journal of Oral Implantology*, 18: 236-242 (1992)
112. Griffiths N. Low temperature sterilization using gas plasma. *Medical Device Technology*, 37-40 (1993)
113. Laroussi M. Sterilisation of contaminated matter with an atmospheric pressure, *International Journal of Mass Spectrometry*, 233: 35-38 (1996)
114. Chau TT, Kao KC, Blank G, Madrid, F. Microwave plasma for low temperature dry sterilization, *Biomaterials*, 17: 1273-1277 (1996)
115. Lerouge S, Wertherimer MR, Marchand R, Tabrizian M, Yahia L'H. Effect of gas composition on spore mortality and etching during low pressure plasma sterilization, *Journal of Biomedical Materials Research*, 51: 128-135 (2000)
116. Vitrac H, Guespin-Michel J, Brisset JL. A microbiological investigation of the gliding arc treatment of aqueous media. In the proceedings of the International symposium on high pressure, Low temperature plasma chemistry, Hakone VII, Greifswald, Germany, 393-397 (2000)
117. Kamgang JO, Briandet R, Brisset JL, Naïtali M. Destruction of planktonic, adherent and biofilm cells of *Staphylococcus epidermidis* using a gliding discharge in humid air. *Journal of Applied Microbiology*, 103: 621-628 (2007)
118. Niemira BA, Sites JE. Cold plasma inactivates *Salmonella stanley* and *Escherichia coli* O157:H7 inoculated on golden delicious apples. *Journal of Food Protection*, 71: 1357-1365 (2008)
119. Stefano P, David WL, Gilbert S, Michael GK. Cold atmospheric plasma decontamination of the pericarps of fruit, *Journal of food protection*, 71: 302-308 (2008)
120. Pervin B, Nese BA, Lutfi O. Elimination of *Aspergillus parasiticus* from nut surface with low pressure cold plasma treatment, *Food Microbiology*, 25: 626-632 (2008)
121. Song HP, Kim B, Choe JH, Jung SO, Moon SY, Choe WH, Jo CU. Evaluation of atmospheric pressure plasma to improve the safety of sliced cheese and ham inoculated by 3-strain cocktail *Listeria monocytogenes*. *Food Microbiology*, 26: 432-436 (2009)
122. Edebo L, Selin I. The effect of pressure shock-wave and some electrical quantities in the microbial effect of transient electric arcs in aqueous systems. *Journal of General Microbiology*, 50: 235-259 (1968)
123. FABCO Technologies, PulsePower disinfects fresh juices, extends shelf-life, *Food Engineering*, 10: 47-50 (1998)
124. Park JG, Yoon Y, Park JN, Han II, Song BS, Kim JH, Kim WG, Hwang HJ, Han SB, Lee JW. Effects of gamma irradiation and electron beam irradiation on quality, sensory, and bacterial population in beef sausage patties, *Meat Science*, in print (2010)
125. Kim HJ, Ham JS, Lee JW, Kim KH, Ha SD, Jo CU. Effect of gamma and electron beam irradiation on the survival of pathogens inoculated into sliced and pizza cheese, *Radiation physics and chemistry*, 79: 731-734 (2010)
126. Song HP, Kim BN, Jung SO, Choe JH, Yun HJ, Kim YJ, Jo CU. Effect of gamma and electron beam irradiation on the survival of pathogens inoculated into salted, seasoned, and fermented oyster, *LWT-Food science and technology*, 42: 1320-1324 (2009)