

# 고전압 펄스 전기장을 이용한 식품의 상업적 살균

Commercial pasteurization of foods using high voltage pulsed electric fields treatment

신정규<sup>1,2\*</sup>  
Jung-Kue Shin<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>전주대학교 스마트식품융합기술 ICC, <sup>2</sup>전주대학교 한식조리학과  
<sup>1</sup>Smart Food Convergence Technology ICC, Jeonju University  
<sup>2</sup>Department of Korean Cuisine, Jeonju University

## Abstract

High voltage pulsed electric field technology has been attracting attention in the the food industry as an eco-friendly nonthermal process technology using electrical energy. The lack of understanding of the equipment and the burden of equipment cost have not significantly increased the commercial application, but the potential as a technology to replace the heat process has been continuously increased. Sterilization of foods using the PEF process has been applied to liquid foods with low viscosity such as fruit and vegetable juices, but recently, high viscosity smoothies, high concentrate protein drink, mixed juice, and alcoholic beverages. Studies on sterilization of solid foods

such as powders, raw meats are also being conducted. Also, the application of extraction and recovery of useful ingredients, activation of active compounds, pretreatment of drying, improvement of meat quality, changes of properties of starch has been studies.

Keywords: high voltage pulsed electric fields, non-thermal process, sterilization, processing condition, other application

## 서론

식품 소비에 있어서 소비자들의 건강과 고품질에 대한 요구가 지속적으로 증가하면서 영양 손실을 최소화하면서도 품질 유지가 지속될 수 있는 새로운

\* Corresponding author: Jung-Kue Shin

Department of Korean Cuisine, College of Culture & Tourism, Jeonju University, 303 Cheonjam-ro, Wansan-gu, Jeonju, 55069. Republic of Korea

Tel: +82-63-220-3081

Fax: +82-63-220-3264

E-mail: sorilove@jj.ac.kr

Received August 31, 2020; revised September 10, 2020; accepted September 10, 2020



기술에 대한 필요성도 계속 제기되고 있다. 가열살균과 같은 전통적인 살균은 대부분의 영양소가 열에 민감하기 때문에 영양 손실이 발생할 수 밖에 없으며, 또한 가열에 따른 에너지 소비량이 커서 생산 비용 증가의 원인이 되기도 한다. 식품의 또 다른 품질 유지 방법으로 사용되는 화학적 보존제의 경우에는 소비자들의 첨가물에 대한 거부감이 커지면서 사용을 제한하는 경향이 뚜렷해지고 있어 제한점이 있기도 하다. 따라서 식품업계에서는 소비자의 요구변화에 따라 가열살균과 화학적 처리방법을 대체하면서도 맛, 영양, 품질이 좋은 제품을 만들 수 있는 새로운 공정을 찾고 있다(Shahin 등, 2018; Shin 등, 2010). 이러한 노력 가운데 효과적이면서도 비용 효율적인 방법 중 하나로 전기 또는 전기장(EFs, electric fields)을 활용한 공정에 대한 연구와 응용이 늘고 있다. 그러나 전기에너지를 바탕으로 하는 공정은 기술적 잠재성이 있음에도 불구하고 운영상의 문제, 기본적인 지식의 부족으로 상업적 규모의 적용이 늦어지고 있기도 하다(Galanakis, 2013; Rocha 등, 2018; Sakr과 Liu, 2014). 그럼에도 불구하고 전기에너지를 활용한 공정은 특정분야, 특히 살균과 추출과 같은 분야에서는 많은 연구와 적용이 이루어지고 있으며, 고효율의 생산공정으로서 가능성이 확인되고 있다(Puértolas과 Barba, 2018). 전기 에너지를 활용한 공정으로는 고전압 펄스 전기장(high voltage pulsed electric fields, PEF), 광펄스(high intensity pulsed light or intense pulsed light, IPL), 비가열플라즈마(nonthermal plasma, NTP), 저온플라즈마(cold plasma, CP), 고전압 아크방전(high voltage arc discharge) 등이 있는데 이들은 처리시간은 짧고 열이 발생하지 않으며, 대부분 연속처리가 가능하고, 공정 후 식품의 품질 및 영양학적 특성을 변화시키지 않는 특징이 있다. 또한 친환경 기술로서 가열 공정에 비해 에너지의 소비를 줄일 수 있으며, 이산화탄소의 발생도 줄일 수 있는 장점도 가지고 있다. 하지만 앞서 이야기한 것처럼 식품분야에서는 전기적 지식의 부족, 이미 잘 확립되어져 있는 기존 공정, 장비의 안정성 및 안전성, 그리고 공정 교체에 따른

비용의 부담 등으로 실제 공정에서의 적용은 활발하지 않다. 하지만 고품질의 제품과 가공을 줄인 식품을 찾는 소비자의 요구와 새로운 공정을 활용한 신제품의 개발, 마케팅 관점 등에서 이러한 공정을 적용하고자 하는 식품업계의 필요성 때문에 전기에너지를 활용한 공정에 대한 연구는 살균 뿐만 아니라 유용물질의 추출, 건조의 전처리, 기타 기존 식품 공정의 대체 공정으로서의 적용이 시도되고 있다.

본 고에서는 비가열 식품 가공 기술로서 전기에너지를 활용한 다양한 기술 중 가장 활발히 연구되고 있는 고전압 펄스 전기장을 이용한 식품의 상업적 살균을 중심으로 공정원리, 공정에 영향을 미치는 요인, 최근의 실제 식품에서의 적용, 살균 이외의 적용에 대하여 요약 기술하였다.

## 본론

### 고전압 펄스 전기장(High voltage pulsed electric fields technology, PEF)

고전압 펄스 전기장 기술은 Gossling (1960)에 의해 전기장에 의한 미생물 불활성화 가능성이 제안된 후 Doevenspeck (1961), Sale과 Hamilton (1967) 등에 의해서 전기장이 미생물의 사멸에 미치는 영향의 연구가 시작되었다. 이후 1980년대가 되면서 Hilsheger과 Niemann (1980), Hulsheger 등(1981, 1983)이 전기장에 의한 미생물의 불활성화에 대한 체계적인 연구, Zimmerman (1986)에 의해 전기장 내에서 미생물의 특성이나 변화에 대한 기본적인 이론이 정립되면서 본격적인 연구가 진행되었다. 1990년대에 들어서면서 생산 공정 적용에 대한 연구가 시작되었으며, Grahl 등(1992)은 오렌지 주스와 우유 등 유동 식품의 회분식 살균에 대한 연구를 바탕으로 베를린 대학과 연속식 살균 장치의 개발을 하였고, PurePulse Technologies사는 전기장 세기 35~45 kV/cm, flow rate 3,000~8,000 L/h의 상업적 사용이 가능한 연속처리 장치를 개발(Shin, 2000)하

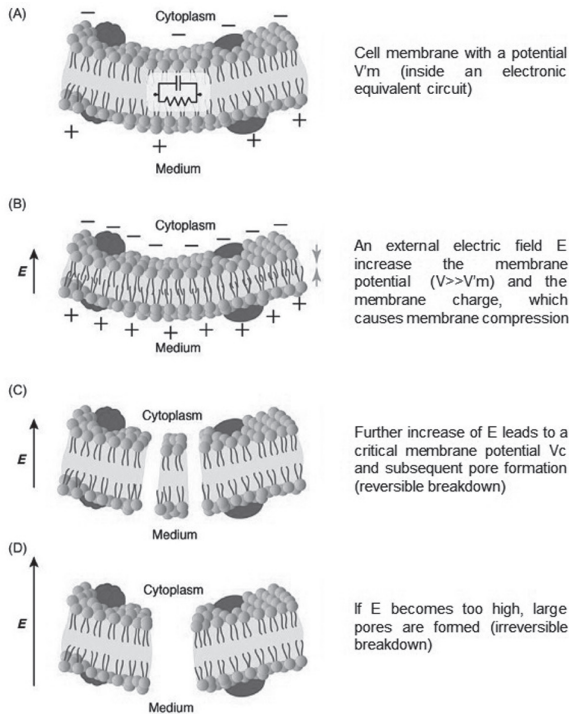


Fig. 1. Schematic diagram of reversible and irreversible breakdown of cell membrane by high voltage pulsed electric field (Shahin et al., 2018).

면서 제조 생산 공정에 대한 연구가 본격화 되었다. 이후 고전압 펄스 전기장 기술은 여러 분야의 식품 제조·생산 공정에 적용 테스트가 성공적으로 이루어지고 있다. 그동안의 연구에 의하면 고전압 펄스 전기장은 식품의 살균, 즉 미생물의 불활성화, 식물체로부터의 유용물질 추출, 냉동 또는 건조의 전처리 방법으로서의 적용이 이루어지고 있다(Barba 등, 2016; Jaeger 등, 2009).

고전압 펄스 전기장 처리는 두 개의 전극 사이에 시료를 놓은 후 높은 전기를 통과시키면서 고전압의 전기장을 형성시켜 수 초 이내로 처리하는 방법으로, 장치의 기본 구성은 고전압 축전기(capacitor), 스위치(switch), 고전압 발생기(high voltage electrical generator), 전극(electrodes), 그리고 처리용기(treatment chamber)로 구성되어져 있다(Park 등, 2012; Shin과

Pyun, 2000). 고전압 펄스 전기장 처리에 의한 식품의 살균에 주요 변수는 장치적 변수(공정변수)로는 전기장의 세기(field strength, kV/cm) 또는 인가전압(kV), 처리 시간(treatment time,  $\mu\text{s}$ ~ms), 펄스 폭(pulse width,  $\mu\text{s}$ ), 펄스 수 (frequency, Hz) 등이 있으며, 환경변수로는 처리온도(temperature), 시료의 흐름 속도(flow rate, L/min), 식품 내 초기 미생물의 수, 시료의 pH, 시료의 성분 등이 있다. 그리고 처리 시료에 따른 처리 용기의 모양 등이 중요 변수로서 알려져 있다(Shin 등, 2010). PEF 시스템은 현재 10 ton/h, 에너지 필요량 10~100 kJ/kg, 필요전력 30 kW의 시스템이 생산 공정 적용이 테스트되고 있다. 국내에서는 B사가 pilot plant 규모의 시스템으로 착즙 주스 공정에 적용하여 제품을 생산하고 있으며, N사의 경우에는 2020년에 준공한 신규 공장에 PEF 설비를 도입하여 제품을 생산할 것이라고 발표하기도 하였다. 그러나 생산 공정에 적용하기 위해서는 설비 투자비가 최소 5억에서 25억원 정도가 소요(Vega-Mercado 등, 2007)되고, 실공정 적용에 대한 예가 다양하지 않고, 설비 운영의 안정성에 대한 자료가 다른 신규 공정에 비해 많지 않아 현장 적용에는 시간이 조금 더 걸릴 것으로 보인다.

### 고전압 펄스 전기장 살균의 원리

고전압 펄스 전기장을 식품 살균의 공정에 적용하고 효율적인 장치나 처리 용기를 설계하기 위해서는 PEF가 미생물을 불활성화 시키는 원리에 대한 이해가 반드시 필요하다. PEF의 미생물 불활성화 원리에 대해서는 이미 많은 연구(Martín-Belloso 등, 2004; Martín-Belloso와 Elez-Martínez, 2005; Shin, 2000)가 이루어졌는데 공통적으로 받아 들여지는 기작은 고전압 펄스 전기장에 노출된 세포의 세포막의 파괴(electroporation & electric breakdown)에 의한 불활성화이다 (Fig. 1). 고전압 펄스 전기장에 노출된 세포는 전기장 내의 전자 흐름에 따라 이온이 이동하고 세포막의 인지질층이 극성화되면서 세포막에 전위차를 만들게 된다. 이러한 전위차에

의해 세포막의 안과 밖에 자유전하가 축적되면서 세포막 전위차가 증가하게 된다. 이렇게 세포막 안과 밖에 축적된 반대 극성의 자유전하는 전기적 인력에 의해 세포막에 전기압축(electrocompression)을 일으키고 압축이 지속되면서 세포막의 탄성력을 감소시켜 세공(pore)을 형성시킨다. 그러나 이 단계의 세포막 천공은 가역적인 현상으로 전기장이 제거되게 되면 원래 상태로 되돌아가게 된다. 세포막의 세공 형성 후 전기장 내 세포의 노출이 길어지게 되면 세공이 커지면서 단백질이 conducting channel을 형성하고 세포막의 투과성을 증진시키고 세포 내부 물질의 유출 등에 의해 고유 기능에 손상을 일으켜 사멸에 이르게 되는 것이다. Shin과 Lee (2015)의 고전압 펄스 전기장에 의한 효모의 불활성화 연구에 따르면 세포막의 파괴 또는 투과성 변화에 의해 세포 내의 자외선 흡수물질의 유출, 이온 성분의 유출 등이 확인되었으며, 처리시간이 길어짐에 따라 염색시약에 의한 세포 염색이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 고전압 펄스 전기장에 의해 사멸되지 않은 세포의 경우에도 세포의 단백질 합성 체계의 손상에 의한 기능 손실이 일어나는 것으로 확인되었다. 고전압 펄스 전기장 처리에 의해 미생물은 생리적인 변화도 나타나게 되는데 일반적으로 미생물은 어느 정도의 외부 환경의 변화나 스트레스에도 견딜 수 있도록 되어 있으나 PEF 처리를 받은 세포의 경우에는 내염성의 영향을 받아 3%의 소금이 첨가된 배지에서 정상적인 생육을 하지 못하는 것으로 나타났으며, 세포막의 ATPase의 활성 소실, 일부 세포 내 효소의 활성 소실 등을 나타내기도 하는 것으로 보고 되었다(Park 등, 2013).

## 고전압 펄스 전기장 공정의 영향 요인

일반적으로 고전압 펄스 전기장을 식품 공정에 적용할 때 주요 변수는 1) 고전압 펄스 발생기에서 발생하는 전압의 세기(전기장의 세기), 2) 저장되는 에너지와 펄스의 길이를 연결하는 축전량, 3) 전극

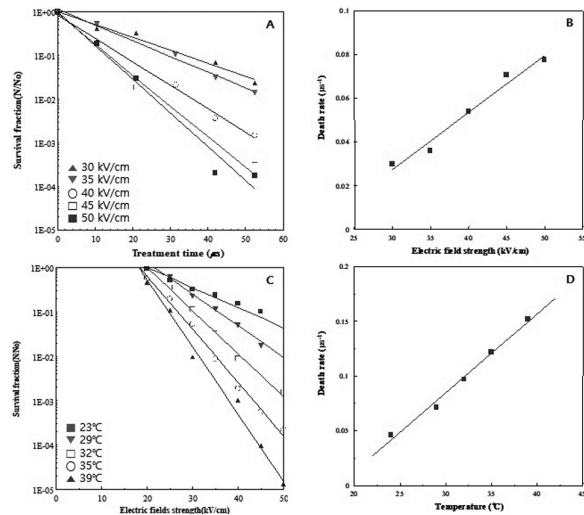


Fig. 2. Effect of electric field strength (A, B), treatment temperature (C, D) on *S. cerevisiae* cells inactivation by high voltage pulsed electric fields treatment (Shin, 2000).

간의 거리, 4) 펄스 수 또는 빈도 수(frequency), 5) 펄스의 형태, 6) 처리 용기의 형태, 7) 식품의 성질(resistivity), 그리고 8) 연속공정의 경우 식품의 유량 등이 있다(Shin, 2000). Shin (2008)에 의하면 전기장의 세기를 30 kV/cm에서 50 kV/cm로 점차적으로 증가시키기에 따라 사멸율이 현저하게 증가하였으며, 처리 시간이 증가하면서 직선적으로 사멸율이 감소하였다고 하였다(Fig. 2). PEF 장치에 사용되는 축전지는 일정량 이상의 전기를 저장하였다가 순간적으로 대량의 에너지를 내보낼 수 있는 에너지의 저장 공간으로서 전기의 축전량은 공정을 안정적으로 운행하는 것에 있어 중요한 요인이다. 축전량이 적을 경우 frequency가 커지거나 펄스의 길이가 길어지게 되면 방전시 앞부분의 에너지 양과 뒷부분의 에너지 양이 달라지게 되므로 균일한 살균이 어려워지게 된다. 따라서 적절한 에너지를 저장할 수 있는 축전지가 필요하다. PEF 공정에 사용되는 펄스의 형태는 exponential decay pulse, square pulses (rectangular pulse), spike pulse, monopolar pulse, bipolar pulse 등이 사용되고 있다. Shin 등 (2007)과 Ha 등 (1999)에 의하면 당근 주



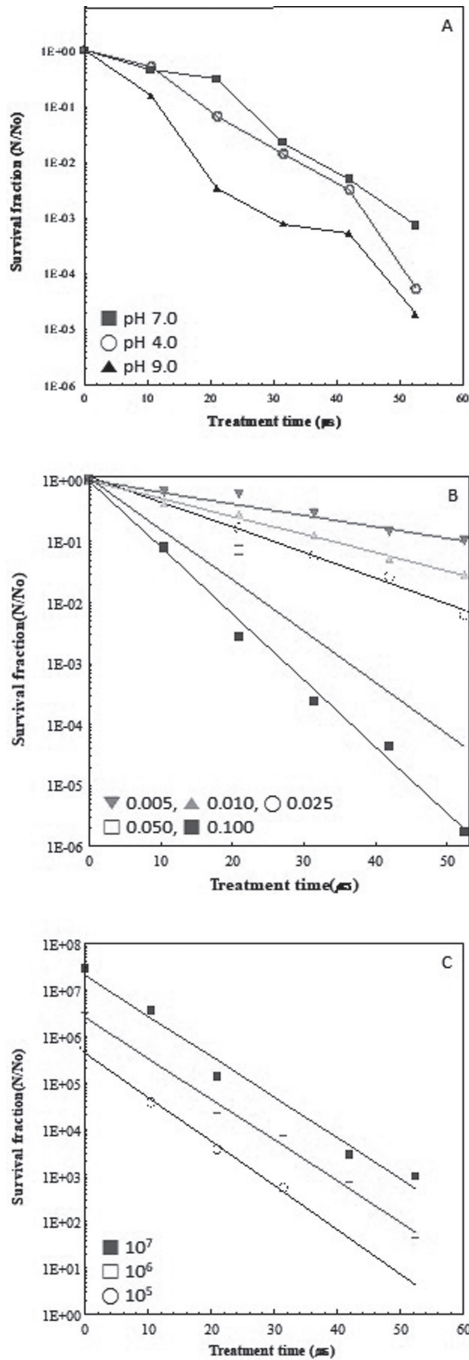


Fig. 3. Effect of pH (A), ionic strength (B), and initial cell concentration (C) on *S. cerevisiae* cells inactivation by high voltage pulsed electric fields treatment (Shin, 2000).

스를 exponential decay pulse와 square wave pulse로 처리하였을 경우 square wave pulse가 exponential decay pulse보다 약 2 log 이상의 높은 살균율을 나타내는 것으로 보고하고 있으며, Qin 등 (1994) 과 Beveridge 등 (2005)은 monopolar pulse보다는 bipolar pulse가 식품의 살균에 효과적인 것으로 보고하였다. PEF에 의한 식품의 살균은 식품의 전기적 특성에 따라서도 영향을 받게 되는데 예를 들어 전기 전도도 물질(ex, 소금)이 많은 식품의 경우에는 전기 전도도가 커지면서 인가된 전기의 흐름도 커져 살균이 제대로 이루어지지 않게 된다. 식품의 살균이 제대로 이루어지기 위해서는 식품의 물, 단백질, 비타민 등의 영양성분 등에 맞게 축전 효과와 저항 효과가 균형을 이룰 수 있도록 장치와의 조화가 함께 이루어져야 한다. 처리 용기는 PEF 공정 중 식품이 실제로 전기적 처리를 받는 부분으로 전극과 전극을 지지(holding) 할 수 재질로 구성되어 있으며, 평행판(parallel plate) 타입, 평행선(parallel wire) 타입, 실린더(concentric cylinders) 타입, co-field 타입 등의 전극을 가진 처리 용기들이 보고되고 있다(Hofmann, 1989; Mohamed과 Eissa, 2012). 널리 사용되는 평행판형의 처리용기는 전기장 세기의 분포가 균일하고 많은 양을 처리할 수 있어 가장 적합한 형태로 알려져 있으며, concentric cylinder 형은 유체의 균일한 흐름을 얻을 수 있어 산업적으로 적용할 때 큰 장점을 가지고 있으며, co-field형은 전극과 식품이 직접 접촉하지 않아 전기분해물질 등의 발생이 없어 안전성이 높은 장점이 있지만 처리용기의 설계가 다른 처리용기에 비해 어렵다는 단점이 있다.

고전압 펄스 전기장에 의한 식품의 살균에 있어서는 식품의 종류나 식품이 가지고 있는 성질에 따라서도 영향을 받는다(Fig. 3). pH는 세포의 항상성을 유지하는데 있어서 중요한 요인으로서 중성의 pH에서는 대부분의 세포가 안정적이거나 낮은 pH에서는 항상성을 유지하기 위한 에너지 소모로 외부 충격에 대한 저항성이 감소하게 되어 오렌지 주스, 당근 주스와 같은 산성식품에 효율적 살균이 가능



하다(Hong, 1997, Schottroff 등, 2018). 식품 내에 존재하는 이온이나 전기전도도도 PEF의 살균 공정에 영향을 미치는데 식품내 이온 성분이 많아지면 전하의 전달체로 전하량에 따라 전류의 흐름이나 저항성에 영향을 미치게 되며, 특히  $H^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ 와 같은 이온들은 세포막의 투과성에도 큰 영향을 미치고 세포막의 손상에도 관여한다. 이온이 많아지게 되면 전기전도도에도 영향을 미쳐 살균 효율에 영향을 주게 되는데 일정한 범위까지는 전기전도도의 증가가 식품의 살균 효과를 증가시키나 일정 이상으로 이온 강도가 증가하여 전기전도도가 더 크게 증가하면 오히려 살균 효과를 감소시키게 된다(Saraiva 등, 1996; Vega-Mercado 등, 1996). 따라서 식품의 살균에 있어서 이온의 양이 다량으로 존재하는 고염도의 식품 등은 살균 효과가 감소하게 된다. 또한 식품 내의 균의 오염도도 살균 효과에 영향을 미치게 된다. 연구 결과에 따르면 식품의 초기 오염도가 살균에 영향을 주는지에 대한 논란은 있지만 초기 오염도가 높으면 사멸 속도가 오염도가 적을 때보다 느리며, 사멸율도 감소하는 것으로 보고되고 있다(Son과 Shin, 2008). 따라서 식품을 다룰 때 가능한한 오염이 되지 않는 환경하에서 식품을 다루는 것이 살균 공정에서 효율을 높일 수 있을 것으로 보인다.

### 고전압 펄스 전기장에 의한 식품의 살균

고전압 펄스 전기장의 식품 살균에의 적용 연구는 현재도 여러 연구자에 의해서 진행되고 있다. PEF의 식품의 살균 적용은 초기에는 오렌지 주스와 우유 등의 유체 식품을 대상으로 회분식 연구로 살균 조건에 대한 연구를 시작으로 하여 연속식 살균 장치의 개발의 연구가 이루어졌으며, 이후 과일 주스, 액란(liquid egg), stimulate milk ultrafiltrate (SMUF) 등과 같은 모델 식품 등에 대한 연구 결과가 보고되었다(Dunn과 Pearlman, 1987; Grahl 등, 1992; Sitzmann, 1995). 이후 오히오 주립대학에서 델몬트사와 함께 상업적 생산 규모의 오렌지 주

스 PEF 살균 장치를 제작하여 시생산을 실시하였으며, PurePulse Technologies 회사는 3,000~8,000 L/h의 상업적 살균 규모의 연속 처리장치를 개발하여 액란(liquid egg)의 살균을 실시하기도 하였다(Shin과 Pyun, 2000). Park 등(2012)과 Shin 등(2010)에 의하면 2000~20010년으로 PEF에 의한 식품의 살균은 완두콩 스프, 당근 주스, 김치 소스 등의 액상 식품에 대한 적용이 주로 이루어진 것으로 보고되고 있다. 그리고 주로 연구가 이루어진 과일 주스의 생산에의 적용을 통해 최적 살균 조건에 의해 살균된 주스의 경우 3주 전후의 냉장 유통 기간을 갖는 프리미엄 주스의 생산이 가능한 것으로 나타났다. 과일 주스 이외에도 야채주스, 우유, 주류, 식초, 소스류까지 상업적 살균이 가능한 것으로 보고되고 있으나 이에 대한 실제적 데이터는 보고되지 않고 있다. 2010년 이후의 PEF의 식품의 살균 적용 연구를 살펴보면 Table 1에서 보는 바와 같이 아직까지는 대부분 과일 주스나 야채 주스와 같은 액상 식품에 주로 적용되고 있으나 이전의 연구가 점도가 낮고 유동성이 좋은 액상 식품이 주를 이룬 반면에 최근의 연구에서는 스무디(smoothie)나 혼합 주스와 같은 점도가 높은 액상 식품의 살균에 적용이 이루어져 이전에 비해 적용할 수 있는 식품의 종류가 많아졌음을 알 수 있다. 또한 액상 식품 이외에도 분말식품의 살균에 적용되어 분유, 분말 주스, 건조 과일 등의 살균에도 적용되어 약 3-5 log의 살균 효과를 보이는 것으로 보고되고 있으며, 고형분 함량이 높은 단백질 음료나 산성의 유청 농축액의 살균에도 적용될 수 있음을 알 수 있다. 그리고 가장 최근에는 생닭의 살균에 적용하여 가금류의 주요 오염균인 *Campylobacter jejuni*를 1.9 log 정도 감소시켜 고체 식품의 살균에도 적용 가능성이 보고되었다.

### 고전압 펄스 전기장의 식품 살균 이외의 적용

고전압 펄스 전기장은 식품의 살균을 목적으로 연구되기 시작하였으나, 그 적용범위를 넓혀 유용 물질의 추출, 식품의 건조 전처리, 제빵 적용을 통

Table 1. High voltage pulsed electric field processing to inactivation of microorganisms in foods

Food type	Target microorganisms	Processing conditions	Inactivation results	References
Apple-strawberry-banana smoothie	Yeast & molds	PEF continuous flow system	untreated smoothies spoilage after 8 day, treated smoothie spoilage after 18 day at 4°C	Timmermans 등(2016)
Apple juice	<i>E. coli</i> K12	PEF in combination with high intensity light pulses	5 log reduction	Caminiti 등(2011)
Strawberry, apple, and pear juices	<i>E. coli</i> O157:H7, <i>S. enteritidis</i> , <i>L. monocytogenes</i>	HVPEF combined with natural antimicrobials	> 5 log reduction	Timmermans 등(2014)
Infant milk formula	<i>Cronobacter sakazaki</i>	15 kV/cm, 3,000 pulses	4.4 log reduction	Pina-Pérez 등(2013)
Tangor juice powder	Aerobe, yeast/mold, coliform	16 kV/cm, 70°C, 100 kJ/L	3.9, 4.3, 0.9 log reduction	Lee 등(2018)
Dried blueberries	native microorganisms	2 kV/cm	5 log reduction	Yu 등(2017)
Orange juices	<i>E. coli</i> , <i>Sal. Typhimurium</i> , yeast & molds	12.5 kV/cm~90 kV/cm, 4 µs~1000µs	0.1 log ~ 6.2 log reduction	Buckow 등(2013)
Fruit and vegetable juice	Enzyme	1 kV/cm~35 kV/cm, 20°C~80°C	50%~90% inactivation	Mannozi 등(2019)
Cranberry juice	<i>E. coli</i>	2.2 kV/cm~13.2 kV/cm	6.57 log reduction	Rezaeimotlagh 등(2018)
High solid protein solution	<i>Listeria innocua</i>	32 kV/cm, 7L/h, 150 kJ/kg	5.7 log reduction	Schottroff 등(2020)
Acid whey concentrate	native microorganisms	39 kV/cm~95 kV/cm, 1~4Hz, 1~100 pulse, 9µs~50µs	<1.8 log reduction	Simonis 등(2019)
Red wine	<i>Brettanomyces bruxellensis</i>	PEF in combination SO <sub>2</sub> and HPP, 30 kV/cm, <1kHz	<5.2 log reduction	van Wyk 등(2018)
Raw chicken	<i>Campylobacter jejuni</i>	20 kV/cm, 50 pulse, 20µs pulse width	<1.9 log reduction	Clemente 등(2020)

한 물성 변화 등에 대한 연구가 이루어지고 있다 (Table 2). 동물세포와 식물세포의 그 기본 구조는 지질 이중막을 가지고 있는 세포로서 크기의 차이가 있을 뿐 그 구조에는 큰 차이가 없다. 고전압 펄스 전기장이 세포의 세포막을 파괴하여 사멸을 일으키는 살균 기작을 응용하여 세포 내에 존재하는 유용 성분을 세포 외로 추출하거나, 세포 내 수분의 이동을 촉진시켜 건조 효율을 증가시키는 것에 대한 적용 연구가 최근 들어 활발히 이루어지고 있다. 고전압 펄스 전기장의 살균 이외의 적용은 1980년

후반 과일과 야채로부터 즙의 추출량을 늘릴 수 있다(Rogob, 1988)라는 연구 결과가 보고된 이후 당근, 포도 등으로부터 주스의 수율을 높이는 연구가 주로 이루어졌다. 최근의 연구에서는 색소, 생리활성물질 등의 추출에 적용되어 PEF 처리하였을 경우 약 2배 이상의 수율을 얻을 수 있으며(Barba 등, 2015; Gachvska 등, 2010), 공정에 필요한 에너지도 10% 이상 절약할 수 있는 것으로 보고되고 있기도 하다(Ferreira 등, 2019). 고전압 펄스 전기장을 식품의 건조 전처리에 적용하는 예도 점차 늘어나



Table 2. Other application of high voltage pulsed electric field processing in foods

Application	Sample foods	Processing condition	Application results	References
Extraction	anthocyanins from red cabbage	2.5 kV/cm	2.15 time yield increase	Gachovska 등(2010)
	sugar from sugar beet	670 V/cm, 250 μs	2.34 time yield increase	Barba 등(2015)
	inulin from chicory	100~600 V/cm	yield increase	Loginova 등(2010)
	grape fruit	6 kV/cm, 8.3 kJ/kg	20 % increase, 10% energy saving	Ferreira 등(2019)
Bioactive compounds recovery/ activation	pine nut	5~20 kV/cm, 2400 Hz	antioxidant activity 10.5% increase	Liang 등(2017)
	carotenoid from microalgae bioproducts	5~20 kV/cm, 75 μs~40 ms	80% improve recovery	Luengo와 Raso (2017)
Dehydration	spanish sausage	1 kV/cm, 200 μs, 28 kJ/kg	reduce drying time from 17 to 9-10 day	Astráin-Redín 등 (2019)
	carrot	0.6 kV/cm, 0.1 s	decrease drying time 33%-55%	Liu 등(2020)
	blueberries	2 kV/cm,	decrease drying time 33%-43%	Yu 등(2017)
Pre-sowing seed treatment	wheat seeds	2~6 kV/cm, 20~50 pulse	increase water uptake, germination ratio	Ahmed 등(2020)
	wheat seed	0.125 kV/cm~0.15 kV/cm, 40~50 μs, total 4 s treatment	increase gemination ratio	Starodubtseva 등 (2018)
Meat processing	beef loin	5, 10 kV/cm, 20, 50, 90 Hz	increase tenderness	Bekhit 등(2014)
Bakery process	starch	<10 kV/cm	decrease retrogradation tendency	Zhu (2018)

고 있는데, Jalté 등(2009)은 동결건조의 전처리 과정으로 감자를 처리한 후 건조하였을 경우 최종 제품의 변형을 최소화할 수 있었으며, 소시지를 PEF 처리하였을 경우에는 건조시간을 17일에서 9-10일 줄일 수 있는 것으로 보고하였다(Astráin-Redín 등, 2019). 또한 당근이나 블루베리와 같은 과일의 경우에는 건조시간을 33%~55% 줄일 수 있었다(Liu 등, 2020; Yu 등, 2017). 최근에는 씨앗에 PEF 처리를 하여 씨앗의 오염도를 낮추고 PEF 처리를 받은 씨앗은 에너지를 흡수하여 대사작용의 변화를 일으키고, 물의 흡수량이 증가하면서 발아율이 높아지는 연구결과도 보고되고 있다(Ahmed 등, 2020; Starodubtseva 등, 2018). 이 이외에도 쇠고기의 안심, 등심 부위에 PEF를 처리하였을 경우 부드러움이 증가하였으며, 제빵 분야에서는 PEF 처리시 수분손실을 줄이고 빵의 품질을 향상시키거나 노화를 억제시킬 수 있었다(Aibara 등, 1992; Zhu, 2018).

## 요약

고전압 펄스 전기장 기술은 전기 에너지를 활용한 친환경적 비가열 공정 기술로서 꾸준히 업계의 관심을 받고 있다. 장치에 대한 이해의 부족과 장비 가격에 대한 부담으로 실제 상업적 적용이 크게 증가하지 않고 있으나 가열 공정을 대체할 수 있는 기술로서의 가능성은 지속적으로 제기되고 있다. PEF 공정을 이용한 식품의 살균은 지금까지는 대부분 과일 및 야채 주스 등 저점도의 액체 식품의 살균에 대해 적용되어 왔으나 최근에는 고점도의 스무디, 고농도 단백질 음료, 혼합 주스, 알코올 음료 등으로 적용 범위가 확대되었으며, 분말, 생육 등 고체 식품의 살균에 대한 연구도 진행되고 있다. 살균 이외에도 색소, 유용성분의 추출 및 회수, 생리활성물질의 활성화, 건조의 전처리 등의 식품 공정 뿐만 아니라 씨앗의 발아율 증가, 육제품의 육질 변



화, 전분의 물성 변화 등에 대한 적용이 연구되면서 기존의 식품 공정을 보완 또는 대체할 수 있는 기술로서 기대되고 있다.

## References

- Ahmed Z, Manzoor MF, Ahmad N, Zeng XN, ud Din Zia, Roobab U, Qayum A, Siddique R, Siddeeg A, Rahaman A. Impact of pulsed electric field treatments on the growth parameters of wheat seeds and nutritional properties of their wheat plantlets juice. *Food Sci. Nutr. in press* (2020)
- Aibara S, Hisaki K, Watanabe J. Effects of high-voltage field treatment on wheat dough and bread-making properties. *Cereal Chem.* 64: 465-467 (1992)
- Astráin-Redín L, Raso J, Gebrián G, Álvarez I. Potential of pulsed electric fields for the preparation of Spanish dry-cured sausages. *Sci. Rep.* 9: 16042 (2019)
- Barba FJ, Parniakov O, Pereira SA, Wiktor A, Grimi N, Boussetta N, Saraiva JA, Raso J, Martin-Belloso O, Witrowa-Rajchert D, Lebovka N, Vorobiev E. Current applications and new opportunities for the use of pulsed electric fields in food science and industry. *Food Res. Intl.* 77: 773-798 (2015)
- Barba FJ, Zhu Z, Koubaa M, Sant'Ana AS, Orlie V. Green alternative methods for the extraction of antioxidant bioactive compounds from winery wastes and by-products: a review. *Trends Food Sci. Tech.* 49: 96-109 (2016)
- Bekhit AEDA, van de Ven R, Suwandy V, Fahri F, Hopkins DL. Effect of pulsed electric field treatment on cold-boned muscles of different potential tenderness. *Food Bioprocess Technol.* 7: 3136-3146 (2014)
- Beveridge JR, MacGregor SJ, Anderson JG, Fouracre RA. The influence of pulse duration on the inactivation of bacteria using monopolar and bipolar profile pulsed electric fields. *IEEE T. Plasma Sci.* 33: 1287-1293 (2005)
- Buckow R, NG S, Toepfl S. Pulsed electric field processing of orange juice : a review on microbial, enzymatic, nutritional, and sensory quality and stability. *Compr. Rev. Food Sci. F.* 12: 455-467 (2013)
- Caminiti IM, Palgan I, Noci F, Muñoz A, Whyte P, Comin DA, Morgan DJ, Lyng JG. The effect of pulsed electric fields (PEF) in combination with high intensity light pulse (HILP) on *Escherichia coli* inactivation and quality attributes in apple juice. *Innov. Food Sci. Emerg.* 12: 118-123 (2011)
- Clemente I, Condón-Abanto S, Pedrós-Garrido S, Whyte P, Lyng JG. Efficacy of pulsed electric fields and antimicrobial compounds used alone and in combination for the inactivation of *Campylobacter jejuni* in liquids and raw chicken. *Food Control* 107: 106491 (2020)
- Doevenspeck H. Influencing cells and cell walls by electrostatic impulses. *Fleischwirtschaft* 13: 968-987 (1961)
- Dunn JE, Pearlman JS. Methods and apparatus for extending the shelf life of fluid food products. US Patent 4,695,472 (1987)
- Ferreira VJ, Amal AJ, Roy Patricia, García-Armingol T, López-Sabiron AM, Ferreira G. Energy and resource efficiency of electro-poration-assisted extraction as an emerging technology towards a sustainable bio-economy in the agri-food sector. *J. Clean. Prod.* 233: 1123-1132 (2019)
- Galanakis CM. Emerging technologies for the production of nutraceuticals from agricultural by-products: a viewpoint of opportunities and challenges. *Food Bioprod. Process* 91: 575-579 (2013)
- Grahl T, Sitzmann W, Märkl H. Killing of microorganisms in fluid media by high-voltage pulses. pp. 675-678. In: Proceedings of the 10<sup>th</sup> DECHEMA Biotechnol. Conference Series, 5B, Verlagsgesellschaft, Hamburg, Germany (1992)
- Ha KY, Shin JK, Lee SH, Cho HY, Pyun YR. Nonthermal pasteurization of carrot juice by high voltage pulsed electric fields with exponential decay pulse. *Korean J. Food Sci. Technol.* 31: 1577-1582 (1999)
- Hoffmann GA. Cell in electric fields, physical and practical electron aspects of electro-cell fusion and electroporation. In: Electroporation and Electrofusion in Cell Biology, Neumann E, Sower AE, Jordan CA. Plenum Press, New York, NY, USA (1989)
- Hong SI. Inactivation of *Lactobacillus plantarum* by high pressure carbon dioxide. Ph.D. Thesis, Yonsei University, Seoul, Korea (1997)
- Hulsheger H, Niemann EG. Lethal effects of high voltage pulses on *E. coli* K12. *Rad. Environ. Biophys.* 18: 281-288 (1980)
- Hulsheger H, Potel J, Niemann EG. Killing of bacteria with electric pulses of high field strength. *Rad. Environ. Biophys.* 20: 53-65 (1981)
- Hulsheger H, Potel J, Niemann EG. Electric field effects on bacteria and yeast cells. *Rad. Environ. Biophys.* 22: 149-162 (1983)
- Jager H, balasa A, Knorr D. Food industry applications for pulsed electric fields. pp. 181-216. In: Electrotechnologies for Extraction from Food Plants and Biomaterials. Eugene V, Nikolai L. Springer, Berlin, Germany (2009)
- JaltéM, LanoiselléJL, Lebovka NI, Vorobiev E. Freezing of potato tissue pre-treatment by pulsed electric fields. *LWT-Food Sci. Technol.* 42: 576-580 (2009)
- Lee SJ, Bang IH, Choi HK, Min SC. Pasteurization of mixed mandarin and hallabong tangor juice using pulsed electric field processing combined with heat. *Food Sci. Biotechnol.* 27: 669-675 (2018)
- Lee SJ, Shin JK. Intra- an extra-cellular mechanisms of *Saccharomyces cerevisiae* inactivation by high voltage pulsed electric fields treatment. *Korean J. Food Sci. Technol.* 47: 87-94 (2015)
- Leungo E, Raso J. Pulsed electric field-assisted extraction of pig-



- ments from *Chlorella vulgaris*. pp 2939–2954. In: Handbook of Electroporation. Miklavčič D. (Ed.), Springer Nature, Cham, Switzerland (2017)
- Liang R, Zhang Z, Lin S. Effects of pulsed electric field on intracellular antioxidant activity and antioxidant enzyme regulating capacities of pine nut (*Pinus koraiensis*) peptide QDHCH in HepG2 cells. *Food Chem.* 237: 793–802 (2017)
- Liu C, Pirozzi A, Ferrari G, Vorobiev E, Grimi N. Effects of pulsed electric fields on vacuum drying and quality characteristics of dried carrot. *Food Bioprocess Tech.* 13: 45–52 (2020)
- Mannozi C, Rompoonpol K, Fauster T, Tylewicz U, Romani S, Rosa MD, Jaeger H. Influence of pulsed electric field and ohmic heating pretreatments on enzyme and antioxidant activity of fruit and vegetable juices. *Foods* 8: 247 (2019)
- Martín-Belloso O, Elez-Martínez P. Food safety aspects of pulsed electric fields. pp 184–217. In: Emerging Technology for Food Processing. Sun DW, Academic Press, Cambridge, MA, USA
- Mohamed MEA, Eissa AHA. Pulsed electric fields for food processing technology. pp 275–306. In: Structure and Function of Food Engineering. IntechOpen, London, UK (2012)
- Park HC, Shim JM, Lee JH, Lee DU. Application of pulsed electric field on food processing. *Food Ind.* 45: 70–75 (2012)
- Park HR, Yoon SJ, Park HS, Shin JK. Physiological changes of *Saccharomyces cerevisiae* by high voltage pulsed electric field treatment. *Korean J. Food Sci. Technol.* 45: 590–597 (2013)
- Pina-Pérez M, Martínez-López A, Rodrigo D. Cocoa powder as a natural ingredient revealing an enhancing effect to inactivate *Cronobacter sakazakii* cells treated by pulsed electric fields in infant milk formula. *Food Control* 32: 87–92 (2013)
- Puértolas E, Barba FJ. Electrotechnologies applied to valorization of by-products from food industry: main findings, energy and economic cost of their industrialization. *Food Bioprod. Process.* 100: 172–184 (2016)
- Qin BL, Zhang Q, Barbosa-Cánovas GV, Swanson BG, Pedrow PD. Inactivation of microorganisms by pulsed electric fields of different voltage waveforms. *IEEE T. Dielect. El. In.* 1: 1047–1057 (1994)
- Rezaeimotlagh A, Tang KSC, Resch M, Cullen PJ, Trujillo FJ. Inactivation kinetics of *Escherichia coli* in cranberry juice during multi-stage treatment by electric fields. *Food Res. Intl.* 106: 780–790 (2018)
- Rocha CMR, Genisheva Z, Ferreira-Santos P, Rodrigues R, Vincente AA, Teixeira JA, Pereira RN. Electric field-based technologies for valorization of bioresources. *Bioresource Technol.* 254: 325–339 (2019)
- Rogob EA. Electroporation. p 86. In: Electrical and Physical Process of Food. Agriculture Production, Moscow, Russia (1988)
- Sakr M, Liu S. A comprehensive review on applications of ohmic heating (OH). *Renew Sustain Energy Rev.* 39:262–260 (2014)
- Sale AJ, Hamilton WA. Effect of high electric fields on microorganisms. I. Killing of bacteria and yeast. *Biochim. Biophys. Acta* 148: 781–788 (1967)
- Sale AJ, Hamilton WA. Effect of high electric fields on microorganisms. II. Mechanisms of action of the lethal effect. *Biochim. Biophys. Acta* 148: 789–800 (1967)
- Saravia J, Oliviera JC, Lemos A, Hendrickx M. Analysis of the kinetic pattern of horseradish peroxidase thermal inactivation in sodium phosphate buffer solutions of different ionic strength. *Intl. J. Food Sci. Technol.* 31: 223–231 (1996)
- Schottroff F, Gratz M, Krottenthaler A, Johnson NB, Bédard MF, Jaeger H. Pulsed electric field preservation of liquid whey protein formulations – influence of process parameters, pH, and protein content on the inactivation of *Listeria innocua* and the retention of bioactive ingredients. *J. Food Eng.* 243: 142–152 (2019)
- Scottroff F, Johnson K, Johnson NB, Bédard MF, Jaeger H. Challenges and limitations for the decontamination of high solids protein solutions at neutral pH using pulsed electric fields. *J. Food Eng.* 268: 109737 (2020)
- Shahin R, Mohamed K, Anderson SS, Ralf G. Mechanisms of microbial inactivation by emerging technologies. pp 111–132. In: Innovative Technologies for Food Preservation. Francisco JB, Anderson SS, Vibeke O, Mohamed K. Academic Press, Cambridge, MA, USA (2018)
- Shin JK, Ha KY, Pyun YR, Choi MS, Chung MS. Pasteurization of carrot juice by high voltage pulsed electric fields with square wave pulse and quality change during storage. *Korean J. Food Sci. Technol.* 39: 506–514 (2007)
- Shin Jk, Kim BR, Kim AJ. Nonthermal food processing technology using electric power. *Food Ind.* 43: 21–34 (2010)
- Shin JK, Pyun YR. Sterilization of food using high voltage pulsed electric fields. *Food Ind.* 33: 27–35 (2000)
- Shin JK. Inactivation of *Saccharomyces cerevisiae* by high voltage pulsed electric fields, Ph.D Thesis, Yonsei University, Seoul, Korea (2000)
- Shin JK. The effect of operating parameters on inactivation of *Saccharomyces cerevisiae* by high voltage pulsed electric fields. *Food Eng. Prog.* 12: 90–96 (2008)
- Simonis P, Kresulis S, Stankevich V, Kamilija S, Striguniene K, Ragoza G, Arunas S. Pulsed electric field effects on inactivation of microorganisms in acid whey. *Intl. J. Food Microbiol.* 291: 128–134 (2019)
- Sitzmann W. High voltage pulse techniques for food preservation. pp 236–252. In: New Methods of Food Preservation, Gould GW, Chapman & Hall, London, UK (1995)
- Son SM, Shin JK. The effect of environmental factors on inactivation of *Saccharomyces cerevisiae* by high voltage pulsed electric fields. *Food Eng. Prog.* 12: 154–162 (2008)

- Starodub GP, Livinskiy SA, Gabrielyan SZ, Lubaya SI, Afanacev MA. Process control of pre-sowing seed treatment by pulsed electric field. *Acta Technol. Agri.* 1: 28-32 (2018)
- Timmermans RAH, Nederhoff AL, Nierop Groot MN, van Boekel MAJS, Mastwijk HC. Effect of electrical field strength applied by PEF processing and storage temperature on the outgrowth of yeasts and moulds naturally present in a fresh fruit smoothie. *Intl. J. Food Microbiol.* 230: 21-30 (2016)
- Timmermans RAH, Nierop Groot MN, Nederhoff AL, van Boekel MAJS, Master AM, Mastwijk HC. Pulsed electric field processing of different fruit juices: impact of pH and temperature on inactivation of spoilage and pathogenic microorganisms. *Intl. J. Food Microbiol.* 173: 105-111 (2014)
- van Wyk S, Farid MM, Silva FVM. SO<sub>2</sub> high pressure processing and pulsed electric field treatments of red wine: effect on sensory, *Brettanomyces* inactivation and other quality parameters during one year storage. *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* 48: 204-211 (2018)
- Vega-Mercado H, Gongora-Nieto MM, Barbosa-Cánovas GV, Swanson BG. Pulsed electric fields in food preservation. pp 783-813, In: *Handbook of Food Preservation*. Rahman MS, CRC press, Boca Raton, FL, USA (2007)
- Vega-Mercado H, Pothakamury UR, Chang FJ, Barbosa-Cánovas GC, Swanson BG. Inactivation of *Escherichia coli* by combination pH, ionic strength and pulsed electric fields hurdles. *Food Res. Intl.* 29: 117-121 (1996)
- Yu Y, Jin TZ, Xiao G. Effects of pulsed electric fields pretreatment and drying method on drying characteristics and nutritive quality of blueberries. *J. Food Proc. Preserv.* e13303 (2017)
- Zhu F. Modifications of starch by electric field based techniques. *Trends Food Sci. Tech.* 75: 158-169 (2018)
- Zimmermann U. Electric breakdown, electroporation and electrofusion. *Rev. Physiol. Biochem. Pharmacol.* 105: 176-256 (1986)