

녹색성장시대 식품산업의 새로운 전략 기술 -고전압 펄스 전기장 기술을 중심으로-

김 윤 지
안전성연구단

High Intensity Pulsed Electric Field Technology as a Reemerging Technology for Sustainable Food Industry

Yun-Ji Kim

Food Safety Research Group

식품산업에서 기술혁신의 중요성

전 세계적으로 환경변화와 자원고갈이라는 문제로 인류의 생존에 위협을 받고 있어 선진 국가들은 녹색기술 육성과 환경규제를 통하여 관련 산업의 성장 및 새로운 시장 점유를 위해 빠르게 움직이고 있다. 우리나라 정부에서도 저탄소 녹색성장(Low Carbon Green Growth)을 향후 60년의 새로운 국가비전으로 제시하고 농림수산식품부에서도 녹색성장을 위한 국가식품시스템 구축에서 식품시스템 개념을 새롭게 정의하고 있다. 새로운 식품 시스템에서는 식품시스템 내부 경제 주체 행위와 식품안보, 환경보호, 생태시스템과 같은 환경 및 사회적 요인을

합친 개념을 도입하고 있다. 새로운 식품시스템에서는 식량안보의 불확실성 증대, 식품안전성에 대한 관심 고조, 급격한 식품소비패턴 변화로 영양 불균형 심화, 온실가스 배출 증가 등에 따른 환경부담 증가와 같은 위협요소가 반영·고려되어야 한다. 이러한 상황은 전 세계적으로 공통적인 것으로 녹색성장의 성패에 국가의 미래가 좌우된다고 하여도 과언이 아니다. 이와 같은 시대적 요구에 부응하기 위하여 모든 산업에서 적은 에너지를 이용하여 생산효율을 최대화하면서 환경오염을 최소화할 수 있는 기술개발에 총력을 기울이고 있는 실정이다. 식품산업도 예외일 수 없지만 국내 현실은 아직 새로운 기술에 대한 관심과 투자가 미진하

Table 1. Examples of Processing Innovations in Food Industry

	Structure Formation	Separation	Conversion	Stabilization
Beverage	• Encapsulation	• Centrifugal • PEF • Membranes	• Enzymes • Supercritical fluids	• Heat • High Pressure • PEF
Meat	• PEF • Transglutaminase • Extruder	• Drying /PEF • Automation • Robotics	• Nitrite • CO • Shock Waves	• Fermentation • MAP • High Pressure • pH / aW
Convenience	• Mixing • Extruder	• Moisture barrier		• Heat / Freeze • High Pressure • MAP
Cereals	• Extruder • Coatings		• Starch gelatinitation	• Baking • Drying • Vacuum drying
Chocolate	• Milling • Ultrasound		• Polymorphism $\gamma \rightarrow \beta$	• Shear stress • Magnetic fields
Dairy	• High Pressure	• Membrane technology	• Enzymatic lactose conversion	• PEF (raw milk cheese)

다고 사료된다. 최근 EU와 미국 등 주요 선진국에서는 국가 간 network을 형성하여 신기술 개발에 주력하고 있으며, 소비자들도 편리하고 저장하기 쉬운 새로운 식품 및 안전한 식품에 대한 선호도가 높아지고 있다. 국내 식품 관련 행정, 연구 및 산업계도 이러한 변화에 적극 대처하여야 식품산업이 성장할 수 있다고 본다. 이와 같은 시대적 요구를 충족하기 위한 여러 가지 기술 중 비가열기술(Nonthermal technology)의 발전 가능성이 높게 평가되고 있으며 그 예는 Table 1과 같다. 본고에서는 비가열기술 가운데 고전압 펄스 전기장 기술(High Intensity Pulsed Electric Fields Technology, PEF)에 대하여 서술하고자 한다.

고전압 펄스 전기장 기술이란

비가열 공정 기술의 하나인 PEF는 1960년대 주로 미생물 살균에 집중되어 시도되었으나 전기장이 식품 세포막에 작용하면 기존의 방법과 비교하여 대사체의 추출율이 크게 향상되어 가공수율이 증가하기 때문에 식품가공기술로 새롭게 부각되고 있다. 공학적인 측면에서도 treatment chamber가 발달되고 공정 향상성이 개선되어 식품 산업 적용 가능성이 매우 높아졌다. PEF의 원리는 매우 짧은 2개의 전극 사이에 식품을 넣고 고전압(일반적으로 20~80 KV/cm) 전기장을 순간적(1초 미만)으로 방전시켜 저온 살균에 상당하는 효과를 유도하는 기술로 고전압이 미생물 세포에 순간적으로 걸려 세포

Table 2. Factors affecting the microbial inactivation with pulsed electric fields (PEF)

- Electric field intensity
- Pulse width
- Treatment time
- Treatment temperature
- Pulse wave-shapes
- Type of microorganism
- Concentration and growth stage of microorganism
- pH
- Presence or absence of antimicrobials and ionic compounds
- Medium conductivity
- Medium ionic strength

(Source: Barbosa-Cánovas et al., 1998)

막 사이에 일정 이상의 전위차를 유도하고 전하를 띤 분자 사이의 반발력에 의하여 세포막에 세공(pores) 형성하여 비가역적 세포벽 파괴를 유도하여 미생물을 사멸시킬 수 있다. PEF에 의한 미생물 불활성화에 영향을 미치는 요인들은 Table 2와 같다.

PEF에 의한 살균 기작

세포가 전기장에 노출되면 세포의 가역적 투과가 유도되어 미생물의 불활성화가 일어난다. Electroporation과 미생물 불활성화의 작용기작에 대한 설명은 이중 지질막이 세포막과 비슷한 특성을 보이기 때문에 리포솜, 평면 이중층, 인지질 vesicles과 같은 모델 시스템을 기본으로 상세하게 연구되었다. 이중 지질막과 생물학적 세포막의 절단은 다음과 같은 작용에 근거한다.

1. 막 이동 전위 한계치

강한 전기장에 노출되면 이중막 인지질 소포체는 전기장 선을 따라 이온의 이동 때문에 극성을 띤다. 지질 이중층은 전기 전도도가 낮은 물질이기 때문에 이중층의 표면에 이온이 축적되고 막 이동 전위차를 형성한다. 유도된 막 이동 전위차가 세포의 자연적 전위차(~1 V)보다 클 경우 세포가 파괴된다.

2. 이중층 또는 세포막의 압축

간단한 모델에서 세포막은 낮은 유전체 상수를 갖는 유전체 물질로 채워진 축전기로서 간주된다. 세포막의 이중층 구조의 전형적인 유전체 상수는 2이다. 세포의 내부 유전체 상수는 세포막보다 훨씬 크다. 만일 세포내부 매개의 유전체 상수가 높다면 자유 전하가 막 표면의 내·외부 모두 축적될 것이다. 축적된 막 내·외부 전극은 반대이고 서로를 잡아당겨 세포막

을 압축할 것이다.

3. 세포막의 점탄성 특성

막 절단은 다음과 같은 세 단계 즉 ① 막 표면 변화 증가, ② 막을 비연속성으로 만드는 분자 재배열, ③ 세포의 기계적 절단을 야기하는 세공의 팽창에 의해 이루어지는 것으로 추측된다.

4. 세포막에서 지질과 단백질의 유동 모자이크 배열

세포막의 유동 모자이크 모델에서 세포막은 이 중의 지질층에 단백질 단위가 박혀져 있다고 가정하는데 전기장이 없으면 단백질 단위는 막을 통한 채널을 형성할 수가 없다. 전기장의 노출은 세포막의 압축을 일으키고 단백질 단위는 막

을 통한 채널을 형성하여 막투과성을 증가시킨다.

5. 막에서 구조적 손상

이중 지질층의 비가역적 손상은 막에서 구조적 결함을 근거로 설명할 수 있다. 적용된 고강도 전자장이 이동 막 전위차의 한계를 초과하였다면 구조적 결함에 기인하여 막에 원래 존재하는 세공이 구멍으로 발달한다. 세포막의 절단은 구조적인 결함에 근거하여 설명할 수 있지만 세포막에 있는 지질의 한계 전위차가 인위적으로 조성된 이중 지질층과 비교하여 훨씬 낮을 수 있다.

6. 콜로이드 삼투성 팽창

전기적으로 구멍이 뚫린 세포막은 이온과 작

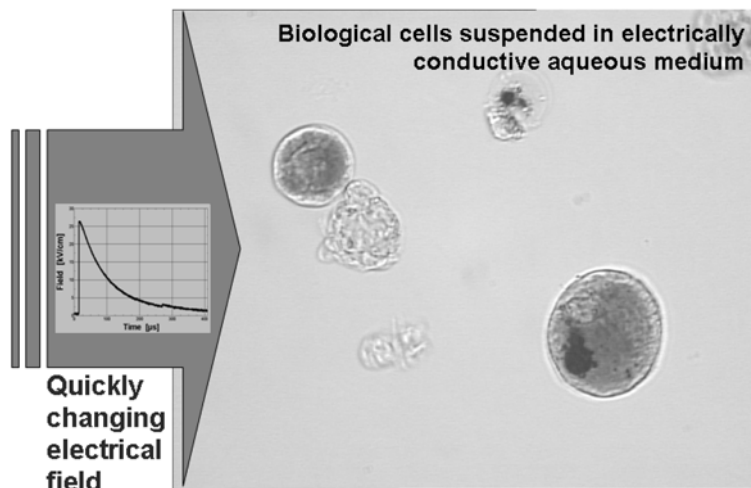


Fig. 1. Pulsed Electric Fields and Membrane Permeabilization

Table 3. Estimation of total treatment costs–Preservation by PEF

Nr.	Cost	Unit	PEF
1	production per a	t	18.750
2	investment	EUR	500.000
3	residual value	EUR	-
3.1	replacement value	EUR	600.000
4	expenditure	EUR	600.000
5	depreciation range	years	7
5	interest	%	7
6	depreciation	EUR/a	85.714
7	interest	EUR/a	42.000
8	maintenance	EUR/a	20.000
9	fixed costs p.a.	EUR/a	147.714
10	variable costs p.a.	EUR/a	24.750
11	Total costs. p.a.	EUR/a	172.464
12	Variable costs p.t	EUR/t	1,32
13	Total costs p.t	EUR/t	9,19
14	Total costs p. kg	EUR/kg	0,009

Production scale
10 t/h, 18750 t/a

Treatment parameters
40 kV/cm, 50 kJ/kg

Equipment parameters
Treatment chamber DN
20
Chamber volume 0,006 l
Residence time 0,021 s
Repetition >1 kHz
Load voltage 80 kV
Average power 150 kW
Investment ca. 500 k€

(Source: Dr. Volker Heinz, German Institute of Food Technology, Germany, Presentation material for Korea Food Research Institute)

은 프로브 분자를 투과할 수 있게 된다. 세공은 헤모글로빈이 통과할 수 없을 정도로 작다. 그래서 헤모글로빈의 콜로이드 삼투압은 물의 유입을 유도한다. 물의 유입에 의한 세포의 팽창과 세포부피가 원래 부피와 비교하여 155% 증가하였을 때 세포의 팽창이 일어나고 이로 인해 세포막의 붕괴를 가져오고 세포질의 내용물을 방출하게 된다.

활용방안

PEF 기술은 식품가공에 적용할 경우 최소한의 온도 상승이 발생하며 처리시간이 매우 짧고 연속처리가 가능하다는 장점을 갖고 있다.

또한 처리 후 식품의 물리적, 화학적, 영양학적 특성들이 거의 변하지 않으므로 소비자들의 요구에 부합할 수 있는 매우 중요한 장점이 있다. PEF 적용 가능 식품류는 액체식품(과일 및 야채 주스, 유제품, 액상 난제품 등) 가공 시 미생물의 비열 살균뿐만 아니라 식품의 변패와 관련된 효소의 불활성화, 과채류로부터 주스 추출, 미생물로부터의 유용성분의 추출 등으로 그 응용 범위가 넓어지고 있다. 특히 식품산업에서는 저산성 식품에 PEF 처리를 할 경우 미생물학적 저장성이 크게 향상되기 때문에 많은 관심을 가지고 있다. 오렌지, 사과, 토마토, 멜론, 수박 주스류에 PEF 처리를 하여 수율이 크게 향상되었고 냉장온도 저장 동안 미생물학적 저장성이 크게 향상되었음이 여러 보고에서 입증

된바 관련 산업에서의 활용가능성이 높다고 사
료된다.

참고문헌

1. 권재한, 녹색성장을 위한 국가식품시스템의 미래 비전, 녹색성장을 위한 국가식품시스템의 미래전략 국제 심포지움, 서울, 51-72, 2009
2. Barbosa-Cánovas G, Pothkamury UR, Palou E, Swanson BG, Nonthermal preservation of foods, Marcel Dekker, Inc., Newyork, 1999
3. Calderon ML, Barbosa-Canovas 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, 1999
4. Gould GW, New processing technologies: an overview, Proceedings of the Nutrition Society, **60**, 463-474, 2001
5. Knorr D, Novel approaches in food--processing technology: new technologies for preserving foods and modifying function, Current Opinion in Biotechnology, **10**, 485-491, 1999
6. Loginova KV, Shynkaryk MV, Lebovka NI, Vorobiev E, Acceleration of soluble matter extraction from chicory with pulsed electric fields, Journal of Food Engineering, **96**, 374-379, 2010
7. Maria S, Daza T, Combination of preservation factors applied to minimal processing of foods, Critical Reviews in Food Science and Nutrition, **36**(6), 629-659, 1996
8. Mosqueda-Melgar J, Elez-Martinez P, Raybaudi-Massilia R, Martin-belloso O, Effects of pulsed electric fields on pathogenic microorganisms of major concern in fluid foods: a review, Critical Reviews in Food Science and Nutrition, **48**, 747-759, 2008
9. Nielsen HB, Sonne A, Grunert KG, Banati D, Pollak-Toth A, Lanker Z, Olsen NV, Zontar TP, Peterman M, Consumer perception of the use of high-pressure processing and pulsed electric field technologies in food production, Appetite, **52**, 115-126, 2009
10. Qin B, Pothakamury UR, Barbosa-Canovas GV, Swanson BG, Nonthermal pasteurization of liquid foods using high-intensity pulsed electric fields, Critical Reviews in Food Science and Nutrition, **36**(6), 603-627, 1996
11. Raso J, Barbosa-Canovas V, Nonthermal preservation of foods using combined processing techniques, Critical Reviews in Food Science and Nutrition, **43**(3), 265-285, 2003
12. Schilling S, Schmid S, Jager H, Ludwig M, Deitrich H, Toefl A, Knorr D, Neidhart S, Schieber A, Carle R, Comparative study of pulsed electric field and thermal processing of apple juice with particular consideration of juice quality and enzyme deactivation, Journal of Agricultural and Food Chemistry, **56**, 4545-4554, 2008

13. Senorans FJ, Ibanez E, Cifuentes A, New trends in food processing, *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, **43**(5), 507-526, 2003
14. Shin JK, shin HH, sterilization and storage of liquid Kimchi sauce by high voltage pulsed electric fields, *Food Engineering Progress*, **10**(4), 262-268, 2006
15. Torregrosa F, Cortes C, Esteve MJ, Frigola A, Effect of high-intensity pulsed electric fields processing and conventional het treatment on orange-carrot juice carotenoids, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **53**, 9519-9525, 2005
16. Zhao W, Yang R, Wang M, Cold storage temperature following pulsed electric fields treatment to inactivate sublethally injured microorganisms and extend the shelf life of green tea infusions, *International Journal of Food Microbiology*, **129**, 204-208, 2009

김윤지 이학박사

- 소속 한국식품연구원 안전성연구단
- 전문분야 식품위생, 병원성 미생물 저감화 기술
- E-mail yunji@kfri.re.kr
- TEL 031-780-9085