

# 전기 자기장을 이용한 식품보존 신기술

원료 및 생산품의 고품질 신선도 유지와 식중독 및 부패 방지를 위한 전기 자기장을 이용한 식품보존 기술을 소개하며, 외부 자기장은 빙결정 크기 및 과냉각 크기를 감소시키는 것으로 밝혀졌다.

## 머리말

식품 산업에 있어서 가장 중요한 과제는 제품 유통 기간 중의 안전성과 안정성을 확보하는 것과 식품 본연의 품질을 유지한 상태로 유통 기한을 연장하는 것이라 하겠다. 원료와 생산품을 고품질의 신선도로 유지하면서 식중독과 부패를 방지하는 기술로 현재 가장 활발히 연구되고 있는 것은 최소가공기술(minimal process technology)이다. 최소가공기술이란, 식품 본래의 신선한 품질을 그대로 유지하면서 식중독 및 부패 미생물을 최소화시켜 저장수명을 연장시키는 최소 처리(the least possible treatment) 가공 기술을 말한다. 식품의 저장기간을 단축시키는 대표적인 원인으로 효소에 의한 품질 저하와 미생물에 의한 부패를 들 수 있으며, 식품의 보존성을 향상시키기 위하여 전통적으로 가열, 건조, 냉동 등의 물리적 방법이나 식품 보존제 첨가와 같은 화학적 방법을 사용하여 왔다. 그러나 가열 공정은 열에 의한 영양 성분의 파괴, 텍스처와 색의 변화, 향기 성분의 손실 등 품질 저하를 피할 수 없다. 냉동이나 건조의 방법은 장기간 저장할 경우 품질과 소비자 기호도를 감소시키며, 식품 보존제의 사용도 점점 기피하고 있다. 이에 따라 여러 가지 비가열 가공 기술(non-thermal process)과 무균 포

오종택

전남대학교 냉동공조공학과

ohjt@chonnam.ac.kr

장 기술이 활발히 연구되고 있다. 현재 식품 산업에서 개발되고 있는 비가열 가공 기술은 물리적 방법으로 초고압(high hydrostatic pressure, HHP), 고전압 펄스 전기장(high-voltage pulsed electric field, PEF), 진동 자기장(oscillating magnetic fields, OMF), 이온 조사법(ionizing radiation), 광 펄스(high-intensity pulsed light) 등이 활발히 연구되고 있다. 일반적으로 초고압은 액체 및 고체 식품, 광 펄스, 고전압 펄스 자기장은 액체식품, 이온 조사법은 고체 식품에 이용이 가능한 장치이다. 따라서 대상 식품에 따라 그 적용 기술이 다르며, 한 가지 기술을 모든 식품 분야에 적용할 수 없다는 단점을 가지고 있다. 화학적 방법으로는 이산화탄소, 오존, 박테리오파지, 양이온 다중 고분자(polycationic polymer)와 같은 화학물질, 세포벽 분해 효소(lytic enzyme) 등을 이용한다. 본 원고에서는 동결 동안 높은 전기장에서 과냉각도의 저하 및 전기 자기장에서 식품의 얼음 결정과 그것의 제어에 대해 소개하고자 한다.<sup>1-4)</sup>

### 고전압 펄스 전기장(High-voltage Pulsed Electric Fields, PEF)

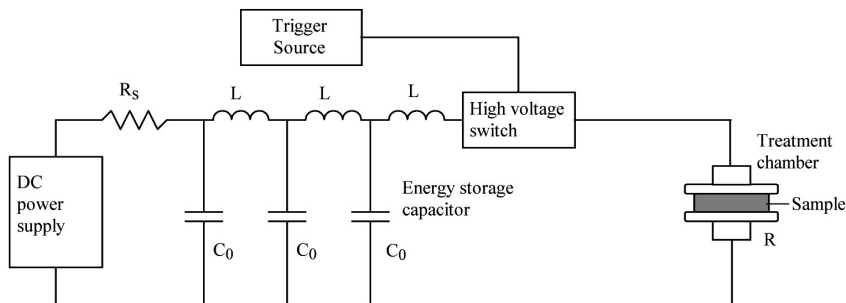
#### 고전압 펄스 전기장의 기본 원리

PEF(펄스 전기장) 방법의 식품에의 적용은 미국에서 1920년대 우유에 적용시킨 것이 최초라고 할 수 있다. PEF는 두 전극 사이에 매우 짧은 펄스

고전압을 식품에 걸어주어 저온살균에 상당하는 효과를 가지게 하는 방법이다. PEF에 의한 미생물의 불활성화는 처리 중 온도가 거의 상승하지 않고 처리 시간이 짧으며 연속 처리가 가능하고 처리 후에 식품의 물리·화학적 또는 영양학 적 특성이 거의 변하지 않기 때문에 최근 관심이 집중되고 있는 신기술이다. PEF는 미생물의 비열 살균뿐만 아니라 식물이나 미생물로부터 유용 성분의 추출에도 이용할 수 있는 등 그 응용 범위가 확대되고 있다. PEF 처리는 임의의 온도에서 단시간에 행할 수 있으며, 식품의 가열에 의한 에너지의 손실을 최소화하게 한다. PEF 살균을 할 경우 열처리에 비해 10% 이상 에너지 절감 효과가 있는 것으로 나타났다.<sup>2)</sup> PEF 살균이 현재 파일럿 규모에서 행해지고 있지만 산업적인 응용이 가능할 것으로 기대된다.

#### PEF 발생 장치

2개의 전극 사이에 식품을 넣고 10 kV/cm 이상의 고전압 전기장을 순간적으로 방전시켜 처리하는 것이 PEF 기술이다. 고전압 펄스를 발생하는 일반적인 장치는 그림 1과 같다. 이 장치의 기본적인 요소는 직류전원 장치(DC power supply), 에너지를 저장하기 위한 충전기(capacitor), 저장된 에너지를 순간적으로 방전하는 switching 장치, 그리고 식품의 처리를 위한 용기(chamber)로 이루어져 있다. 직류 전원 장치에서 발생된 고전압의 전류는 충전기에 충전된



[그림 1] Layout of a square generator using a pulse forming network of three capacitor-inductor units

다. 충전이 끝난 후 방전 스위치가 접촉되면 두 전극 사이의 식품을 통하여 방전된다. 일반적으로 액체 식품은 자신이 갖고 있는 이온 때문에 식품 내에 고전압 펄스를 걸어주면 순간적으로(수 microsecond 내에) 용기 내의 식품 속으로 고 전류가 흐르게 된다. 방전이 끝나면 방전 스위치는 다시 떨어지고 충전기는 다시 충전된다. 이와 같은 충전·방전 사이클이 매우 짧은 시간에 반복된다. 이때 순간적인 방전이란 millisecond(ms)에서 microsecond( $\mu s$ ) 단위에서 일어나며, 펄스와 펄스 사이의 간격은 펄스 폭보다 훨씬 길게 만든다. 식품에 펄스를 반복 처리하여도 실제 처리 시간은 매우 짧기(1초 이하) 때문에 식품은 거의 가열되지 않는다.

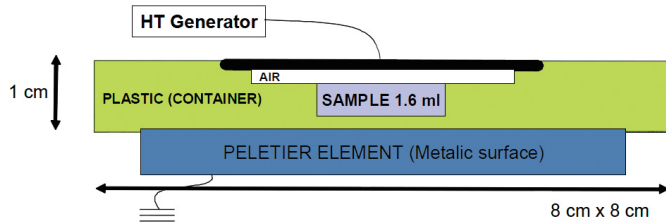
최근의 연구에서는 얼음물에 외부 전기장을 작용시키는 동력학적 물 분자 시뮬레이션에서 임계 전기장 강도(Critical electrostatic field)  $E=1.5 \times 10^7$  V/m을 밝혔으며, 또한 실험을 통해  $E=1.5 \times 10^6$  V/m에서도 얻을 수 있었다.<sup>4)</sup>

## 실험 장치 및 방법

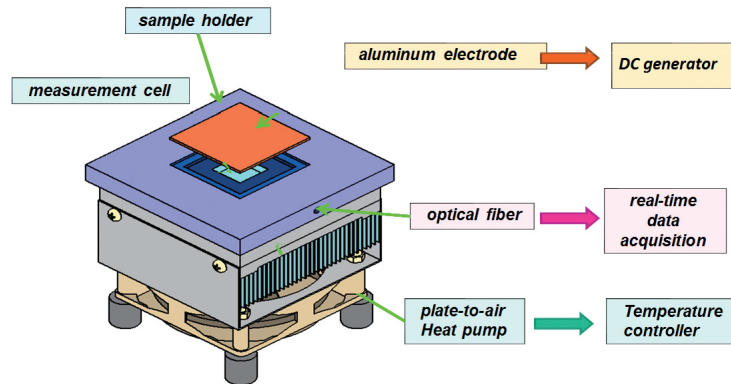
그림 2는 PFE 실험을 위해 DC generator(전압장치)와 실시간 온도측정 장치 그리고 전기장의 상호 작용을 방지하기 위하여 광섬유를 이용한 장치 개략을 나타낸 것이다. 그림 2의 샘플 용기는 유전체(Acetal Ertacetal-내전압 20 KV/mm)이며, 용기 중간에  $20 \times 20 \times 51$  mm 크기의 사각 구멍을 설치하였다. 알루미늄 전극은 샘플 용기 표면 위의 2 mm 위치에 설치하였고, 시스템 온도제어에 사용하는 접지 전극은 Peletier 소

자의 금속판이다. 고전압은 DC generator에서 공급되고, 측정된 온도는 데이터 로거에 연결되어 PC에 저장된다. 백금 표준 온도계로 보정된 온도 센서는 시료 1 mm 중앙 하부의 측정 셀(cell)에 설치하였으며, 실험 장치는 주위 공기로부터 열을 차단하기 위하여 10°C 냉각 기내에서 수행하였다. 1.6 ml 샘플을 3°C/min 속도로 -22°C까지 하강시켰으며 주어진 실험 조건에서 10회 반복 측정하였고 각 실험마다 새로운 샘플을 사용하였다. 그림 3은 실험에 이용한 장치이다.

기존 연구자들 대부분은 균일한 실험 샘플을 이용하여 전기장의 강도를 두 전극의 전위차를 전극 사이의 거리로 나눈 V/m로 나타내었으며, 본 실험에서는 두 전극 사이의 거리를 2 mm로 하였다. 실험에 사용된 시료수는 17,000이고 유전체의 유전율은 공기 1, 아세탈(acetal) 3.6 및 물 80으로 나타났다. 표 1에 전압차와 유효 전기장을 나타내었다.



[그림 2] Cut view of the experimental set up



[그림 3] Experimental Facilities

(표 1) Applied voltage differences and effective electrostatic field in the sample

Voltage difference(kV)	Effective electrostatic field(V/m)
2	$1.0 \times 10^6$
5	$2.5 \times 10^6$
10	$5.0 \times 10^6$
12	$6.0 \times 10^6$

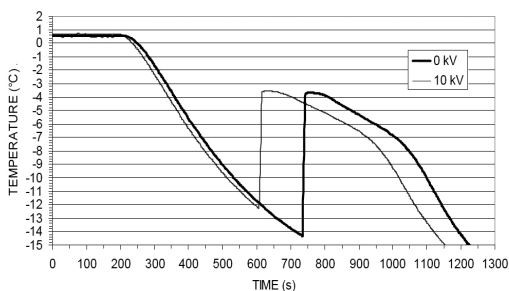
(표 2) Average values of the nucleation temperature(TN) and corresponding standard deviations under different electrostatic field conditions

Voltage difference(kV)	Electrostatic field(V/m)	TN(°C)
0	0	$-12.28 \pm 2.19$
2	$1.0 \times 10^6$	$-9.16 \pm 0.72$
5	$2.5 \times 10^6$	$-7.36 \pm 1.13$
10	$5.0 \times 10^6$	$-6.64 \pm 0.95$
12	$6.0 \times 10^6$	$-5.90 \pm 1.39$

## 실험 결과

### 중류수의 동결 과정 중 과냉각에 미치는 전기장의 영향

물 동결에 미치는 전기장의 영향에 대해 그동안 발표된 바가 없으며, 본 실험에서는 전압차 0~12kV에서 과냉각을 관찰하였다. 두 전극 사이의 전위차를 증가시켰을 때 과냉각의 크기는 영향을 받았으며 전위차가 클수록 과냉각은 더 저하되었다. 핵 생성 온도  $T_N$ 은 전위차의 함수로서 표 2에 나타내었다.



(그림 4) Freezing of propanediol aqueous solution (10% v/v) with and without electric field

### 프로판디올(propanediol) 수용액 동결 과정 중 과냉각에 미치는 전기장의 영향

그림 4는 프로판디올 동결 과정 중에 전기장이 미치는 영향을 나타낸 것이다. 중류수 동결 과정과 마찬가지로 중요한 과냉각이 관찰되었으며, 전극 사이의 전압을 10 kV 증가시키면 과냉각의 크기는 감소하였다. 핵 생성 온도  $T_N$ 은 0 kV와 비교했을 때 CA 2°C까지 증가하였으며, 그 차이는 통계적으로 95%의 신뢰를 나타내었다.

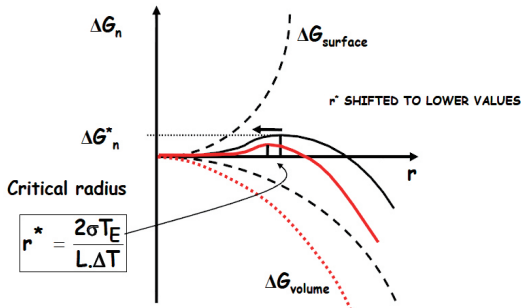
### 빙 핵과 고압 전기장과와의 관계

식 (1)은 빙 결정이 구형이라고 가정했을 때 동결 과정 중 자유에너지(free energy)의 변화를 나타낸 것이다. 즉 방정식 (1)은 빙 결정( $r$ ), 표면장력  $\sigma$  및 상변화 에너지의 함수이며 전기장에 적용시켰을 때 잠열 항은 수정된다. 아래의 식 (2)에 나타난 P,E(Polarizability multiplied by the the electric field, 전기장을 곱한 분극)는 외부 전기장에 의해 정상적인 모양의 형태가 전하의 분포에 따라 상대적으로 변화될 수 있음을 의미한다. 그림 5는 빙결정의 반경 함수인  $\Delta G_n$ 에 미치는 변수들의 영향을 나타낸 것이다. 빙결정이 안정화되는 임계 반경(critical radius)은 감소됨을 알 수 있다.

$$\Delta G_n = 4\pi r^2 \sigma - 4/3\pi r^2 \Delta G_p \quad (1)$$

$$\Delta G_n = 4\pi r^2 \sigma - 4/3\pi r^2 (\Delta G_p + P.E) \quad (2)$$

안정된 빙 결정 크기에 상응하는  $T_E, L$  및  $\Delta T$ 는 각각 임계 반경은 초기 동결온도(K), 물-얼음 천이 과정 잠열(kJ/kg)과 과냉각도(K)와 관계를 가진다고 할 수 있다. 위의 방정식 (2)는 물 프로판디올 수용액 및 에탄올 수용액에서 관찰되는 현상에 대한 이론식을 나타낸 것이다. 앞으로의 연구는 만약 빙 결정의 크기 및 동결 식품의 구조에 영향을 미치는 것이 있다면 현장의 음식 시스템에 영향을 주는 정적



[그림 5] Free energy variation during nucleation  $\Delta G_n$  in function of the radius of an ice crystal. Impact of an external electrostatic field on the shift of the critical radius  $r^*$  for ice nucleation

전기장의 영향에 대해 연구되어야 할 것이다.

## 맺음말

외부 전기장이 적용되었을 때 빙 결정 현상에 대해 나타내었으며, 증류수 및 10% v/v 프로판디올 수용액은 외부 전기장 하에서 과냉각의 크기가 감소함을 알 수 있었다. 이것은 에탄올 수용액에서 관찰된 것과 같은 현상이며, 만약 이 현상이 지속적으로 식품 시스템 대해 유효하다면 다시 말해 빙 결정 크기와 식품의 미세구조에 영향을 준다면 실험적 연구는 더 계속되어야 할 것이다. 그리고 외부 전기장은 빙 결정 크기를 감소시키는 것으로 밝혀졌다.

## 참고문헌

1. 강동현, 2003, 식품으로부터 병원균 제어기술 연구 동향, 보건산업기술동향, 겨울호.
2. 박지용, 나상열, 이연, 2010, 비가열 식품가공기술의 현재와 미래, 식품과학과 산업, 3월호, pp. 2-20.
3. 하상도, 박지영, 2006, 식품위해미생물의 제어법 연구 동향, Safe Food, Vol. 1, No. 3, pp. 8-18.
4. Le-BailL, A., Orłowska, M. and Havet, M., 2013, POSSIBLE INTEREST OF ELECTRIC FIELD DURING FOOD FREEZING; A REVIEW ON ELECTROFREEZING, 3rd ICCO 2014, England, pp. 1-7.
5. Orłowska, M., M. Havet, and A. Le-Bail, 2009, Controlled ice nucleation under high voltage DC electrostatic field conditions. Food Research International, Vol. 42, No. 7, pp. 879-884.
6. Pham, Q.T., A. Le-Bail, and B. Tremeac, 2006, Analysis of stresses during the freezing of spherical foods. International Journal of Refrigeration, Vol. 29, No. 1, pp. 125-133.
7. 조권석, 2013, 세포활성화 식품보존 장치, 특허청, 발행번호 WO2014148676 A1. 