

고전압 펄스 전기장에 의한 *Saccharomyces cerevisiae*의 불활성화에 미치는 공정변수의 영향

신정규

전주대학교 문화관광대학 전통음식문화전공

The Effect of Operating Parameters on Inactivation of *Saccharomyces cerevisiae* by High Voltage Pulsed Electric Fields

Jung-Kue Shin

Department of Traditional Food Culture, College of Culture & Tourism, Jeonju University

Abstract

High voltage pulsed electric fields (PEF) treatment is one of the more promising non-thermal processing technology to replace or partially substitute thermal process. In this study, non-thermal inactivation of *Saccharomyces cerevisiae* cells as influenced by field strength and temperature of PEF was investigated to evaluate its potential use for the preservation of food and biological substance. The inactivation rate was accelerated with increasing electric field strength ranging of 30~50 kV/cm at 40°C. It took about 180 μ s to reduce the cells by 4~5 log cycles at 30 kV/cm, while it took less than 53 μ s at 50 kV/cm. And inactivation rates increased with increasing treatment temperature. Under constant treatment time, temperature raised about 50 kV/cm to reduce one log cycle of *S. cerevisiae* cells at 25°C, but it raised only about 25 kV/cm at 50°C. The microbial survival fraction, S , is related to the electric field strength and treatment time as following equation, $\ln S = k_E(t-t_C)$, $k_E = -2.6 \times 10^{-3} \cdot E + 5.05 \times 10^{-2}$. And inactivation kinetic model that relates microbial survival fraction, S , with electric field strength and treatment temperature in the form of $\ln S = -T_3(E-E_C)$, $T_3 = 7.2 \times 10^{-3} \cdot T - 1.31 \times 10^{-1}$.

Keywords: high voltage pulsed electric fields (PEF), *S. cerevisiae*, nonthermal processing, operating parameters

서 론

식품 산업에서는 제품의 보존을 위해 가열 조작이나 식품 보존제의 첨가등에 의한 조작에 의존을 하고 있다. 그러나 이러한 방법들은 제품의 품질을 저하시키거나 소비자들의 관능적 기호 만족도를 감소시킬 수 있다. 이에 따라 제품의 보존을 위해 제한적 열처리를 통한 고품질의 식품을 생산할 수 있는 방법의 개발에 많은 관심이 집중되고 있다(Mertens & Knorr, 1992; Ray, 1996). 이와 관련하여 직접적인 가열 살균에 의한 미생물의 완전 소멸을 얻기 보다는 몇 가지 개별 공정을 복합적으로 적용하여 미생물을 점진적으로 감소시키고자 하는 hurdle technology(Leistner & Goriss, 1995; Calderón-Miranda et al., 1999)의 개념이 도입되었다. Hurdle technology는 온도, 수분활성, pH, 산

화-환원 전위, 보존제 및 길항 관계의 식물체 균과 같은 여러 인자들을 적절히 조합하여 식품의 안전성을 얻고자 하는 것으로서 식물체 혹은 미생물 유래 항균제와 같은 천연 보존 시스템과 식품의 비가열 살균 분야가 주 연구 대상이다(Hong, 1997). 현재 식품의 보존 기간 연장을 위해 개발되고 있는 비가열 처리 기술(nonthermal process)은 고전압 펄스 전기장 (high voltage pulsed electric field), 진동 자기장(oscillating magnetic fields), 이온화 조사(ionizing radiation), 광펄스(intensed pulse light), 초고압(high hydrostatic pressure), 초음파(ultrasonification)등이 있다(Leistner & Goriss, 1995; Castro et al., 1993; Qin et al., 1995a). 이 중 고전압 펄스 전기장 기술은 미생물 세포에 수만 volt 이상의 전압을 순간적으로 인가하여 세포막 사이에 일정 이상의 전위차를 유도시켜 세포막을 파괴시키므로써 세포의 기능적 손실을 일으켜 사멸시키는 기술(Pothakamury et al., 1995; Harrison, 1996; Zimmerman et al., 1974)로서 식품의 처리 중 거의 온도가 상승하지 않고, 처리 시간이 짧으며, 연속 처리가 가능하고, 처리 후에도 식품의 물리적, 화학적 및 영양학적인 특성들이 거의 변하지 않는다. 고전압 펄스 전

Corresponding author: Jung-Kue Shin, Department of Traditional Food Culture, College of Culture & Tourism, Jeonju University, Jeonju, Jeonbuk 560-759, Korea
Tel: 82-63-220-3081; Fax: 82-63-220-2736
E-mail: sorilove@freechal.com, sorilove@jj.ac.kr

기장에 의한 미생물의 살균 실험은 주로 액상 식품이나 model 식품 내에서 미생물의 감소에 대한 것을 관점으로 하여 식품의 보존 기간 연장을 목적으로 수행되고 있다 (Barbosa-Cánovas et al., 1999).

본 연구에서는 일상 식품이나 alcohol 음료 등에 널리 산재하여 있는 효모(*Saccharomyces cerevisiae*)를 대상으로 하여 이 균주에 미치는 고전압 펄스 전기장 처리의 주요 공정 변수인 전기장의 세기, 처리 시간, 온도등의 영향을 살펴보고, 실험 결과를 바탕으로 kinetic model식을 통해 예측된 살균율과 실제 실험에서 얻은 살균율을 비교하여 보았다.

실험재료 및 방법

사용균주 및 배양조건

본 연구에 사용된 *Saccharomyces cerevisiae* 균주는 ATCC 4105로 한국 중균 협회(Korean Culture Center of Microorganisms, KCCM)로부터 분양 받아 사용을 하였다. 균주 보관용 평판배양은 YM agar (Difco Laboratories, Detroit, MI, USA)를 사용하였으며, 사용전까지 0에 보관하였다. 실험 균주의 생리적 상태를 동일하게 유지하기 위하여 접종균은 균주보관용 평판배지로부터 2~3백균이를 YM broth(0.3% yeast extract, 0.3% malt extract, 0.5% peptone, 1% dextrose) 100 mL가 들어있는 250 mL 삼각 플라스크에 접종한 후 26에서 24시간 전배양하였다. 전배양액 2 mL를 취하여 200 mL YM broth가 들어 있는 500 mL 삼각 플라스크에 접종하여 같은 온도에서 16시간 배양하여 대수 증식기 후반의 균주를 실험에 사용하였다. 배양한 배양액은 4°C에서 4000 rpm으로 원심분리(Sorvall RC2C plus, Dupont, USA)하여 완충 용액 (50 mM phosphate buffer pH 7.0)에 1회 세척한 후 현탁하여 사용하였다. 이때 최종 균체 농도는 $2.0 \times 10^7 \sim 3.0 \times 10^7$ 수준이었으며, 본 실험에 사용된 모든 균 시료액은 같은 방법으로 매번 새로이 배양한 것을 사용하였다.

고전압 펄스 전기장 장치

고전압 펄스 전기장 시스템은 실험실용 용량으로 설계하여 제작하였으며, 그 사양은 Table 1과 같다. 실험 장치의 전체적인 개략도는 Fig. 1에 나타난 바와 같다. 전체적인 시스템은 크게 전원 공급부(power supply, Model JP-PS2550, Jaepae Hi-Tec, Incheon, Korea), 펄스발생기(pulse generator, Model JP-PGT50, Jaepae Hi-Tec, Incheon, Korea), 처리용기(treatment chamber)의 세가지로 구성되어 있다. 전원 공급부는 220V AC의 입력 전원을 고전압 변압기를 통하여 승압하고 정류하여 최대 50 kV DC 전원을 발생시킬 수 있도록 하였으며 최대 허용치 전력은 50 kW 이다. 펄스 발생기는 펄스를 구성할 수 있는 펄스 발생망(pulse forming network, PFN)과 고전압의 전기를 순간적

Table 1. Specification of High Voltage Pulsed Electric Fields System

Device	Specification
Power Supply	Input : AC 220 V, 60 Hz, 40 kW Output voltage 5~50 kV
Capacitor	1,800 pF/each, 64 pieces
Switch	Thyratron, 10^9 /sec switching
Inductor	2 μ H ~ 20 μ H, 3 peiecs/each
Pulse Generator	Pulse rising time < 2nS/kV
	Pulse power variable
	Pulse duration 1 ~ 5 μ s
	Pulse repetition rate 10 ~ 5,000 pps
	Charging time 100 μ s
	Peak current 2,500 A

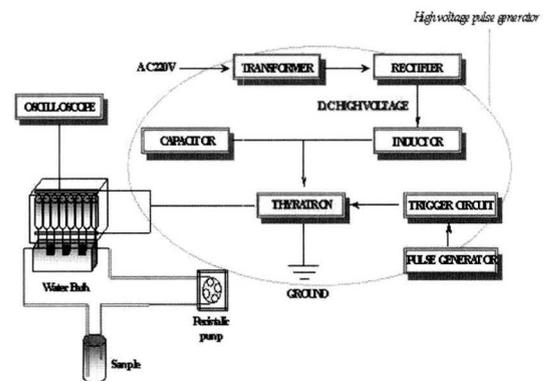


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental apparatus for high voltage pulsed electric fields treatment.

으로 발생할 수 있는 스위치로 구성되어 있다. 펄스 발생망은 펄스의 형태와 길이를 결정하는 중요한 부분으로서 전원 공급부에서 공급된 전압을 충전하고 rising time을 결정하는 축전지(capacitor, 1800 pF/each), 펄스의 길이와 falling time을 조절하는 방전 지연 inductor(discharge delay inductor, 2 μ H~20 μ H)로 되어 있으며, exponential decay pulse와 square wave pulse를 발생시킬 수 있도록 구성되었다. 충전 방식은 resonance charging을 택하였으며, 축전지에 충전된 고전압을 순간적으로 방전하는 switch로는 열음극 방전관(thyratron, 50 kV, 2500A)을 사용하였으며, 방전시에 발생하는 열을 식히기 위하여 cooling device를 사용하여 열을 방출하였다. 축전지는 corona와 arching을 방지하기 위하여 절연유(제 1 종 silicon oil)에 담았다. 처리용기(treatment chamber, Fig. 2)는 co-field 개념을 도입하여 시료가 전극과 직접 접촉하는 면적을 최소화하여 불균일한 전기장의 형성을 없애고 시료의 흐름에 edge를 제거하여 spark에 의한 유전파괴 현상이 일어나지 않도록 설계·제작하였으며, 전극 간격 2 mm, 2 mm의 전극 hole을 갖도록 하고 7개를 병렬로 연결하여 전체 처리 용적이 0.175 mL가 되도록 하였다. 처리 용기에 인가되는 전기장의 세기와 파형은 oscilloscope(Lecroy Digital Oscilloscope, Model

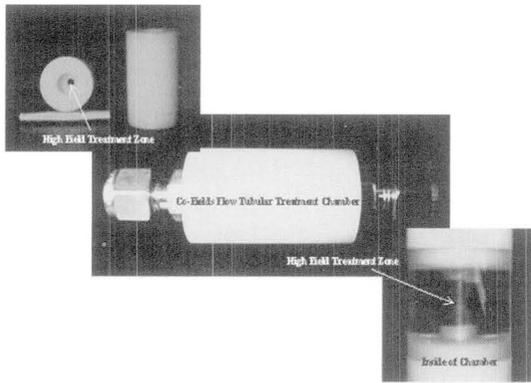


Fig. 2. Treatment chamber with co-fields concept for high voltage pulsed electric fields treatment.

9300 AM, Dual 400 MHz, Switzerland)로, 전류는 전압-저항 converting을 이용하여 측정할 수 있도록 자체 제작하여 측정하였다. 처리 용기에 인가되는 square wave의 파형은 Fig. 3와 같다.

고전압 펄스 전기장 처리

배양액 200 mL를 시료 용기에 넣고 밀봉한 다음 연동 펌프(peristaltic pump)를 사용하여 시료를 처리 라인에 채웠다. 처리 라인은 일정한 온도(20~40°C)로 유지한 항온 수조에 담겨 시료의 온도를 일정하게 유지시켰다. 시료의 온도가 일정한 온도에 도달하게 하고, 전원 공급부에 전원을 공급하고 power supply의 변수를 조정하여 맞추었다. 미리 계산된 처리 시간에 따라 주파수와 시료의 유속을 조정하고 처리하고자 하는 전압까지 전원을 공급하여 처리 용기내에 전기장을 형성시켜 시료를 처리한다. 일정 시간 시료를 처리한 후 처리 라인에서 나오는 시료를 일정량 수거하여 다음 분석을 위해 사용하였다.

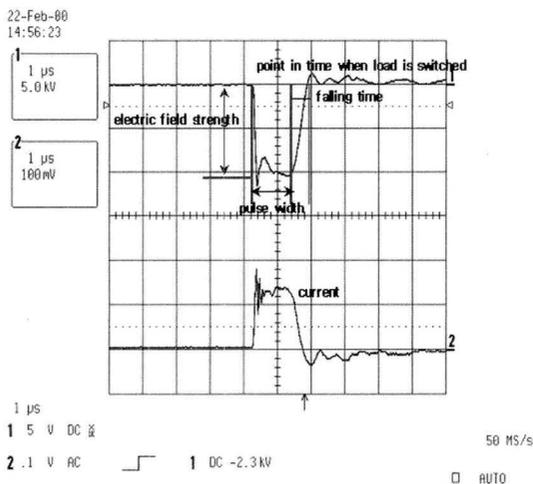


Fig. 3. Generated wave-form from pulse generator for high voltage pulsed electric fields treatment. This wave is square wave with 1 μs pulse width.

생균수의 측정

고전압 펄스 전기장 처리를 마친 효모 현탁액을 멸균된 생리 식염수(0.85% NaCl) 수용액에 단계별로 희석한 후 potato dextrose agar (PDA; Difco Laboratories, Detroit, MI, USA; potatoes 20%, dextrose 2%, agar 1.5%)에 0.1 mL씩 도말하였다. 이를 26°C에서 48시간동안 평판 배양한 다음 생성된 colony를 계수하여 생균수를 측정하였다(Lin et al., 1993). 고전압 펄스 전기장 처리에 따른 균체의 생존율은 초기 생균수 (N_0)에 대한 처리 후 생균수 (N)의 비율로 표시하였으며, 최소 3회 이상의 반복 실험 결과를 평균하여 나타내었다.

통계처리

본 실험은 3회 이상 반복 실시하여 그 평균값을 사용하였으며, 선형 회귀법(linear regression)과 다중 선형 회귀법(multiple linear regression)을 사용하여 상관 관계를 비교하였다.

결과 및 고찰

처리 용기내 전기장 분포의 영향

고전압 펄스 전기장 처리에 의한 미생물의 불활성화에 미치는 주요 인자는 처리 용기 내 전기장의 분포, 전기장의 세기, 처리 시간, 처리 온도등의 실제 공정상 변화시킬 수 있는 변수, medium의 pH, 전기 전도도, medium내의 이온 농도등의 환경인자와 미생물의 종류, 생육 조건 및 생육 단계등의 미생물 자체에 의한 요인 등으로 구분할 수 있다. 이 중 공정 변수들은 실 공정에 적용할 경우 직접 장치적인 면에서 조절할 수 있는 인자들로서 미생물의 사멸에 직접적인 영향을 주며, 또한 공정 비용을 결정짓는 중요한 변수들이다.

고전압 펄스 전기장에 의한 미생물의 사멸은 우선 처리 용기내에 형성되는 전기장의 분포와 세기에 의해 결정된다. 지금까지 보고된 고전압 펄스 전기장의 살균 기작은 앞서 언급하였듯이 세포 현탁액에 순간적으로 수만 volt이상의 전압을 가하여 세포막 사이에 일정 이상의 전위차를 유도하여 세포막을 파괴시키고 기능적 손실을 일으켜 사멸시키는 것으로 알려져 있다(Pothakamury et al., 1995; Harrison, 1996; Zimmerman et al., 1974). 세포막이 파괴되는 임계 세포막 전위차는 약 1 V(Zimmerman, 1986)로서 이 이상의 세포막 전위차를 유도하기 위해서는 실제 세포막사이에 인가되어지는 전기장의 세기는 약 100만 volt이상이 된다(Matsumoto et al., 1991). 이처럼 순간적으로 처리 용기에 걸어주는 전압이 크기때문에 만약 처리 용기내에 유전 상수의 차이가 큰 다른 물질이 혼입 (특히 공기의 혼입) 되면 전기장이 불균일하게 형성되고, 단락으로 인한 전기장의 집중 현상으로, 결국에는 스파크가 발생된다. 스파크가

생기면 열이 발생되고, 에너지 소비가 커지며, 미생물의 사멸에 역효과를 준다(Gallagher, 1975; Krasuchi, 1968). 또한 스파크 발생으로 전기 분해물이나 전극 분해물의 유출등의 문제가 발생할 수도 있다. Donsi et al. (2007)의 보고에 의하면 좁은 간극을 가진 batch 처리용기 내에서 mixing이나 교반없이 *S. cerevisia*를 처리하였을 경우 전기장 형성이 불균일하여 초기에는 빠른 사멸율을 보였지만 tailing effect에 의해 사멸되지 않은 균이 많이 존재하였다. 그러나 mixing이나 교반에 의해 전기장 분포의 균일성을 높였을 경우 tailing effect는 크게 감소하였으며 사멸을 또한 크게 나타냈다. 본 실험에서도 같은 전기장에서 스파크가 발생하였을 경우 스파크가 발생하지 않았을 경우에 비해 온도 상승이 약 20°C 이상(40 항온 실험시 60±3°C) 높게 나타났으며, 미생물의 최종 사멸율도 처리 온도가 상승하여 높은 사멸율을 나타낼 것으로 예상되었으나 실제로는 약 1~2 log 낮게 나타났다(data not shown).

전기장 세기와 처리시간의 영향

일반적으로 고전압 펄스 전기장 처리시 전기장의 세기는 앞서 언급한 기작과 관련하여 미생물의 불활성화와 아주 밀접한 관계를 갖고 있다. 미생물 세포의 세포막 전위차는 인가되는 전기장의 세기가 커짐에 따라서 비례하여 증가한다. Fig. 4는 전기장의 세기에 따른 *S. cerevisiae*의 생존수 감소를 나타내었다. 그림에서 보듯이 40에서 고전압 펄스 전기장을 30~50 kV/cm로 증가시킴에 따라서 사멸 속도가 점차 증가하여 전체적인 균체 사멸율이 현저하게 가하고, 임계 처리 시간(사멸 지연 시간)이 관찰되지 않았으며 처리 시간에 따라 직선적으로 사멸하는 경향을 나타내었다.

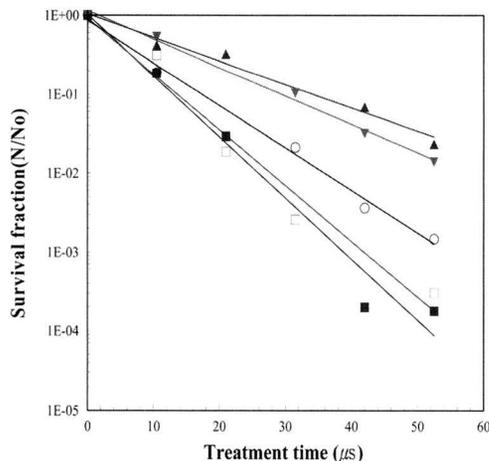


Fig. 4. Inactivation of *S. cerevisiae* cells as a function of electric fields strengths. High voltage pulsed electric fields treatments were carried out at 40°C.

▲ 30 kV/cm ($R^2=0.9798$), ▼ 35 kV/cm ($R^2=0.9932$),
○ 40 kV/cm ($R^2=0.9935$), □ 45 kV/cm ($R^2=0.9668$)
■ 50 kV/cm ($R^2=0.9664$)

기존의 실험 결과에 의하면 *S. cerevisiae*는 5~12 kV/cm의 임계 전기장을 갖는 것으로 알려져 있다(Gould, 1995). 본 실험에서는 실험 장치상 파형과 전기장 형성의 불균형으로 인하여 30 kV/cm 이하의 전기장에서는 실험을 실시하지 않았다. 일반적으로 고전압 펄스 전기장에 의한 미생물의 살균 효과는 미생물의 종류에 따라 다르다. Zimmerman et al.(1974)에 의하면 미생물의 세포막 전위차 (V)는 다음 식에 의해 구할 수 있다.

$$V = F \times a \times E \times \cos a \quad (1)$$

F 는 shape factor로서 미생물의 형태에 따라 그 값이 다르며 효모와 같은 구형의 세포일 경우 대개 1의 값을 갖는다. 그리고 a 는 세포의 반경, E 는 전기장의 세기, a 는 세포 표면과 전기장이 형성되는 streamline과의 각을 나타낸다. 이 식에 의해 구해진 세포막 전위차 값이 1 V를 넘게 되면 세포는 세포막에 세공 (pore)을 형성하면서 사멸이 시작된다. 따라서 세포의 크기가 커지면 임계 전기장의 세기가 작아지며, 효모와 같이 세포가 큰 경우에는 작은 전기장으로 쉽게 사멸을 유도할 수 있게 된다. 본 실험에서 사용된 30 kV/cm이상의 전기장의 세기는 기존에 보고된 임계 전기장의 세기에 비해 높은 전기장의 세기이며, 또한 효모와 같이 큰 세포를 사용하였기 때문에 임계처리 시간없이 직선적으로 사멸되는 것을 볼 수 있다.

전기장의 세기와 사멸 속도와의 관계를 Fig. 5에 나타내었다. *S. cerevisiae*를 고전압 펄스 전기장 처리하였을 경우, 연속 처리 시스템에서는 전기장의 세기와 사멸 속도와의 관계에 대한 기존의 실험 결과를 보면 임계 전기장 세기 이하인 10 kV/cm 이하에서는 완만한 사멸을 보이다가 임계 전기장을 크게 넘어선 20 kV/cm이상에서는 직선 또는 급격한 사멸 효과를 나타내었으나(Kristina et al., 2005; Cserhalmi et al, 2002), batch 시스템에서는 처리 용기와 장치에 따라 다른 사멸의 형태를 보였다(Schrive et al., 2006; Donsi et al., 2007; Qin et al., 1995b). 본 실험에서는 30 kV/cm 이상에서 연속 처리 용기를 이용하여 처리하였는데 전기장의 세기가 커짐에 따라서 효모의 사멸 속도는 직선적으로 증가하는 양상을 보였다. Fig. 5에서 나타난 전기장의 세기와 사멸 속도로부터 전기장의 세기, 처리 시간과 사멸 속도간의 관계를 통해 사멸 예측식을 예측해 보면 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$\log s = k_E(t-t_c) \quad (2)$$

s 는 survival fraction (N/No), k_E 는 사멸 속도로서 전기장의 세기와 비례하는 값으로 $-0.0026E+0.050485$ 이고, t 는 처리 시간, t_c 는 임계 처리 시간으로 본 실험의 범위에서는 $t_c=0$ 이다. 이 관계식에 의해 예측된 살균 정도와 실제 살

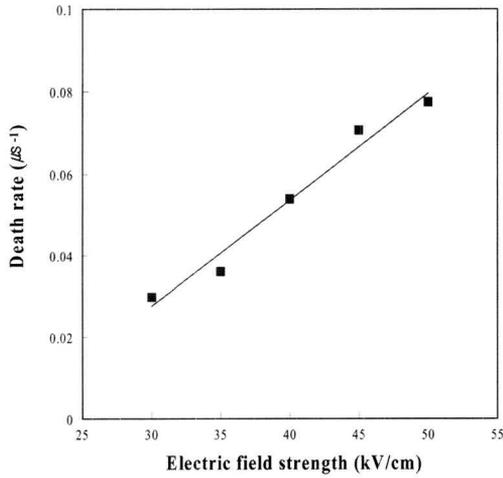


Fig. 5. Dependence of the death rate of *S. cerevisiae* by high voltage pulsed electric fields treatment on electric fields strength.

균 정도(Fig. 6)를 비교한 결과, 두 값 사이의 상관 계수는 모두 0.975이상으로 예측한 관계식과 실제 살균율이 거의 일치함을 알 수 있었다.

온도의 영향

처리 시간이 일정한 상태에서 미생물의 사멸율은 처리 온도에 따라 크게 변한다. 고전압 펄스 전기장 처리시 세포 현탁액의 온도는 미생물 세포벽의 유연성과 밀접한 관계가 있다. 낮은 온도에서 세포벽 또는 세포막 구성 요소인 phospholipids는 견고한 gel 구조로 촘촘하게 압축된 형태를 갖는 반면 높은 온도에서는 덜 정돈된 liquid crystalline 구조를 갖게 된다. Gel 구조에서 liquid crystalline 구조로의 상(phase)의 변화는 온도와 큰 상관 관계가 있으며, 따라서 온도의 변화는 세포막의 물리적 안정성에 영향을 준

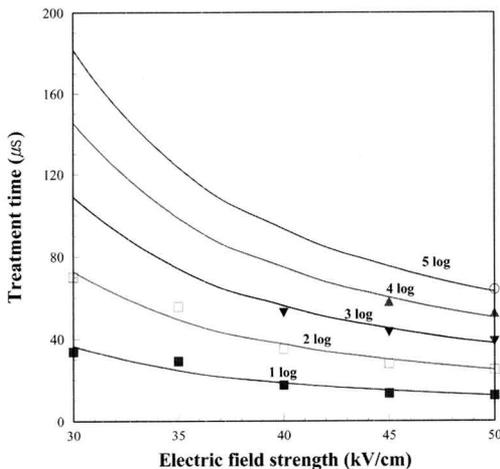


Fig. 6. Estimation of the field strength and treatment time required for log cycle inactivation of *S. cerevisiae* at 40°C. ○, ▲, ▼, □, ■ : experiment data — : estimated value

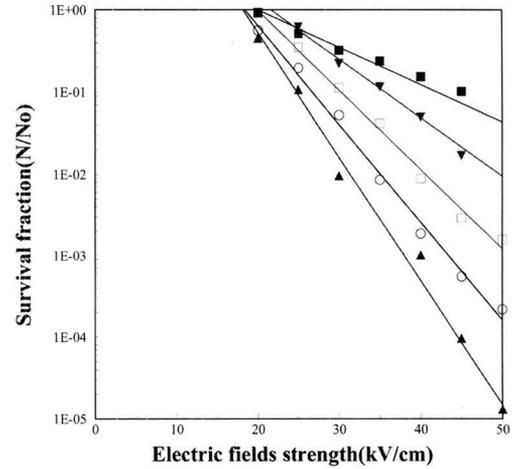


Fig. 7. Inactivation of *S. cerevisiae* cells as a function of treatment temperature. High voltage pulsed electric fields treatments were carried out for 53 μs. ■ 23°C (R²=0.9980) ▼ 29°C (R²=0.9965) □ 32°C (R²=0.9966) ○ 35°C (R²=0.9966) ▲ 39°C (R²=0.9708)

다. 온도가 상승하면 세포막 구성 성분인 lipid의 측면 확산 속도(lateral diffusion rate)가 증가되고 gel 구조에서 liquid crystalline 구조로 변하는 것으로 알려져 있다 (Zimmerman, 1986; Jayaram et al., 1992). Fig. 7에서 보는 것처럼 *S. cerevisiae*의 사멸율은 일정한 처리 시간 및 일정한 전기장 세기에서 세포 현탁액의 온도가 높아짐에 따라 증가하는 양상을 보였다. 즉, 처리 시간이 일정할 경우 25°C에서는 1 log의 생균수 감소를 얻기 위해서는 약 50 kV/cm이상의 전기장의 세기가 필요하였으나 50°C에서는 25 kV/cm의 전기장 세기만으로 같은 사멸율을 얻을 수 있었다.

온도와 사멸 속도와의 상관 관계를 Fig. 8에 나타내었다. 처리 온도가 증가함에 따라 효모의 사멸 속도는 직선적으로

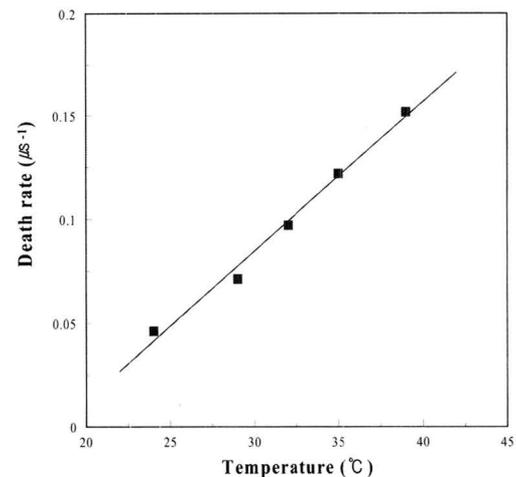


Fig. 8. Dependence of the death rate of *S. cerevisiae* by high voltage pulsed electric fields treatment on treatment temperature.

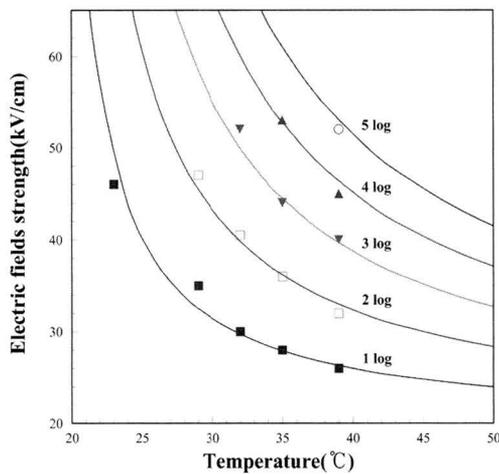


Fig. 9. Estimation of the temperature and electric field strength required for log cycle inactivation of *S. cerevisiae* with treatment time of 53 μ s.

○, ▲, ▼, □, ■ : experiment data — : estimated value

로 증가하게 되며, 전기장의 세기, 처리 온도와 사멸 속도에 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$\log s = - (E - E_c) T_s \quad (3)$$

여기서 E 는 전기장의 세기, E_c 는 임계 전기장이며, T_s 는 온도와 사멸속도간의 관계로서 $T_s = 0.0072T - 0.13141$ 의 값을 갖는다. 이 관계식에 의해서 예측된 사멸율을 Fig. 9에 나타내었으며, 이 식에 의해 얻어진 값과 실제 실험 자료와의 상관 관계는 모두 0.980이상의 값을 갖는 것으로 나타났다.

요 약

고전압 펄스 전기장(high voltage pulsed electric fields) 기술은 식품 산업에서 기존의 가열 공정을 부분적으로 대체할 수 있는 비가열 공정으로서 주목받고 있는 기술이다. 본 연구는 *Saccharomyces cerevisiae*를 대상으로 하여 고전압 펄스 전기장의 주요 공정 변수인 전기장의 세기, 처리 시간 및 처리 온도의 영향을 조사하여 살균의 효과를 검토하였다. 일정한 온도(40°C)하에서 30~50 kV/cm의 전기장의 세기 범위내에서 *S. cerevisiae*를 살균 처리 하였을 경우 전기장의 세기가 증가함에 따라 살균 정도는 크게 증가하였으며, 4~5 log 사멸 시키는데 30 kV/cm에서는 약 180 μ s의 처리 시간이 필요하였으나 50 kV/cm에서는 53 μ s의 처리시간으로도 같은 살균효과를 얻을 수 있었다. 동일한 전기장의 세기에서는 처리온도와 처리시간이 커질수록 높은 살균 효과를 얻을 수 있었으며, 동일한 처리 시간에서 1 log의 생존수 감소를 위해서 25°C에서는 50 kV/cm의 전기장의 세기가 필요하였으나, 50°C에서는 25 kV/cm의 전

기장 세기만으로는 같은 살균 효과를 얻을 수 있었다. 실험에서 얻은 자료를 바탕으로 사멸식을 통해 사멸율을 예측한 결과 고전압 펄스 전기장에 의한 살균은 전기장의 세기, 처리 시간 그리고 온도에 의한 식으로 표현할 수 있었으며, 실제 사멸율과 사멸식을 통해 얻은 예측된 살균율의 상관관계수가 0.97 이상으로 잘 맞았다. 이러한 실험 결과는 50미만의 낮은 온도에서도 고전압 펄스 전기장에 의해 충분한 살균 효과를 얻을 수 있었으며, 살균 예측식을 통해 실제 비가열 공정으로서의 예측 살균 적용이 가능함을 알 수 있었다.

참고문헌

- Barbosa-Cánovas GV, Góngora-Nieto MM, Pothakamury UR and Swanson BG. 1999. Food Processing by PEF. In: Preservation of Food with Pulsed Electric Fields. (Taylor, S.L. eds) Academic Press, San Diego, pp 156-171
- Calderón-Miranda ML, Barbosa-Cánovas GV and Swanson BG. 1999. Inactivation of *Listeria innocua* in liquid whole egg by pulsed electric fields and nisin. Intl. J. Food Microbiol. **51**: 7-17
- Castro AJ, Barbosa-Cánovas GV and Swanson BG. 1993. Microbial inactivation of Foods by Pulsed Electric Field. J. Food Proc. Preserv. **17**: 47-73
- Cserhalmi Zs, Vidacs I, Beczner J and Czukur B. 2002. Inactivation of *Saccharomyces cerevisiae* and *Bacillus cereus* by pulsed electric fields technology. Innovat. Food Sci. Emerg. Tech. **3**: 41-45
- Donsi G, Ferrari G and Pataro G. 2007. Inactivation kinetics of *Saccharomyces cerevisiae* by pulsed electric fields in a batch treatment chamber: The effect of electric field unevenness and initial cell concentration. J. Food Engineer. **78**: 784-792
- Gallagher TJ. 1975. Simple dielectric liquids, mobility, conduction and breakdown. Oxford University Press, London
- Gould GW. 1995. High voltage pulse techniques for food preservation. In: New Methods of Food Preservation. Black Academic & Professional, New York, pp 236-252
- Harrison SL. 1996. High intensity pulsed electric field and high hydrostatic pressure processing of apple juice. Ph. D. Thesis, Washington State University, USA
- Hong SI. 1997. Inactivation of *Lactobacillus plantarum* by high pressure carbon dioxide. Ph. D. Thesis, Yonsei University, KOREA
- Jayaram S, Castle GSP and Margaritis A. 1992. Kinetic of sterilization of *Lactobacillus brevis* cells by the application of high voltages pulses. Biotech. Bioeng. **40**: 1412-1420
- Krasuchi Z. 1968. Breakdown of commercial liquid and liquid-solid dielectrics. In: High voltage technology. Alston LL(ed.). Oxford University Press, London, pp 129-143
- Kristina A, Ulf R and Elisabeth B. 2005. Inactivation of *Escherichia coli*, *Listeria innocua* and *Saccharomyces cerevisiae* in relation to membrane permeabilization and subsequent leakage of intracellular compounds due to pulsed electric field processing. Intl. J. Food Microbiol. **99**: 19-32
- Leistner G and Goriss LGM. 1995. Food preservation by combined processes. Final Report FLAIR Concentrated Action N0.

- 7, Subgroup B, Eur 15776 EN
- Lin HM, Yang Z and Chen LF. 1993. Inactivation of *Leuconostoc dextranicum* with carbon dioxide under pressure. Chem. Engineer. J. **52(1)**: B29-B34
- Matsumoto Y, Shioji N, Satake T and Sakuma A. 1991. Inactivation of microorganisms by pulse high voltage application. IEEE Conf. Rec. Ind. Appl. Soc. Anu. 28 Sep. - 4 Oct. 1991, Dearborn, MI, USA, pp652-659
- Mertens B and Knorr D. 1992. Development of nonthermal processes for food preservation. Food Technol. **46(5)**: 124-130
- Pothakamury UR, Monsalve-Gonzalez A, Barbosa-Cánovas GV and Swanson BG. 1995. High voltage pulsed electric field inactivation of *Bacillus subtilis* and *Lactobacillus delbrueckii*. Rev. Esp. Cienc. Technol. Aliment. **35**: 557-565
- Qin BL, Pothakamury UR, Martin H, Barbosa-Cánovas GV and Swanson BG. 1995a. Food pasteurization using high-intensity pulsed electric fields. Food Technol. **49(2)**: 55-60
- Qin BL, Chang FJ, Barbosa-Cánovas GV and Swanson BG. 1995b. Nonthermal inactivation of *Saccharomyces cerevisiae* in apple juice using pulsed electric fields. Lebensm.-Wiss. u.-Technol. **28**: 564-568
- Ray B. 1996. Control by new nonthermal methods. In: Fundamental food Microbiology. Ray B. (eds.). CRC Press, New York, pp 441-446
- Schrive L, Grasmick A, Moussiere S and Sarrade S. 2006. Pulsed electric field treatment of *Saccharomyces cerevisiae* suspensions: A mechanistic approach coupling energy transfer, mass transfer and hydrodynamics. Biochem. Eng. J. **27**: 212-224
- Zimmermann U, Pilwat G and Riemann F. 1974. Dielectric breakdown of cell membranes. Biophys. J. **14**: 881-899
- Zimmermann U. 1986. Electrical breakdown, electropermeabilization and electrofusion. Rev. Physiol. Biochem. Pharmacol. **105**: 176-250

(접수 2008년 3월 19일, 채택 2008년 5월 2일)