

유전체장벽방전 플라즈마를 이용한 *Escherichia coli* 살균

목철균* · 이태훈

경원대학교 공과대학 식품생물공학과

Dielectric Barrier Discharge Plasma Inactivation of *Escherichia coli*

Chulkyoon Mok* and Taehoon Lee

Department of Food Science and Biotechnology, College of Engineering, Kyungwon University

Abstract

Inactivation of *Escherichia coli* was attempted using dielectric barrier discharge plasma (DBDP) generated at different currents and electrode-gaps in order to explore its potential as a nonthermal sterilization technology for food products. DBDP showed a potent inactivation power against *Escherichia coli* especially in initial treatment stage up to 4 min although the effect retarded afterward, indicating that the inactivation pattern deviated from first order reaction kinetics. Instead, the inactivation pattern fitted well to Singh-Heldman model showing shape factors of 0.545-0.783 and D'-values of 0.565-3.268 min at different currents and electrode-gaps with a fixed sample treatment method. The greatest inactivation power of DBDP showing the smallest D'-value was observed at 1.25 A current and 2.65 mm electrode-gap. The inactivation effect was improved by uniaxially moving samples during the treatment. DBDP treatment with a biaxial movement of the samples boosted the inactivation power furthermore.

Key words: dielectric barrier discharge plasma(DBDP), *Escherichia coli*, inactivation, sample movement

서 론

경제발전에 따라 소득이 증가할수록 신선하고 영양성분이 풍부하며 맛있는 식품에 대한 요구가 증대된다. 이러한 수요에 부응하려면 소위 최소가공(minimal processing)이 필요한데 이 경우 비용 증가와 함께 식품안전 문제가 발생할 수 있다(Mok & Lee, 2011). 식품안전을 위협하는 요인에는 원료의 오염, 불충분한 살균, 생산과 유통과정 중의 오염 등이 있으며, 안전한 식품생산을 위해서는 기계기구, 식품포장재의 살균·소독과 함께 원료 및 식품의 살균이 필수적이다(Mok & Lee, 2009).

식품살균에는 가열살균법이 오랫동안 사용되어 왔으나 에너지 소비가 많고 영양성분의 파괴와 함께 관능적 품질을 저하시키는 문제점이 있다. 가열살균의 단점을 보완하기 위해 화학적 살균법이 시도되었지만 약품사용에 따른 부작용과 소비자의 부정적 인식 때문에 점차 그 활용이 줄

어 들고 있다.

이러한 문제를 해결하기 위하여 물리적 비열살균법에 대한 관심이 높아지고 있다. 대표적인 비열살균법으로 방사선 조사가 있으나 고가의 장비가 필요하고 방사선 누출 위험과 함께 소비자의 기피의식이 이 기술의 확대 적용에 장애물로 작용하고 있다. 그 외의 비가열살균기술로는 초고압, 고전압 펄스전기장 등이 개발되었지만 이 역시 고가의 장비 사용에 따른 경제성 결여로 인해 아직까지 크게 활용되지 못하고 있다. 이러한 점을 보완하기 위한 방안으로 장비의 가격이 낮고 간편한 조작으로 처리할 수 있는 비열플라즈마(nonthermal plasma, NTP) 또는 저온플라즈마(cold plasma)에 대한 관심이 증대되고 있다(Moisan et al., 2002; Fridman et al., 2005; Laroussi & Lu, 2005; Mok & Song, 2010).

플라즈마는 기체를 방전하여 생성하는데 그 안에는 다양한 들뜬상태의 이온, 자유라디칼, 전자, 광자 등이 존재하며 자외선도 다량 포함한다(Deng et al., 2007). 이들 물질은 저온에서 미생물을 성장을 억제하고 불활성화 시키는 생물학적 작용이 있으며, 이러한 특징을 이용하여 다양한 물체의 표면 살균 및 처리에 NTP가 사용될 수 있다(Lerouge et al., 2001; Moisan et al., 2002). NTP에 포함된 라디칼, 들뜬 상태의 분자, 전하입자 등이 세포막을 파괴하고 자외선이 DNA를 변형시킴으로써 미생물을 사멸시킨다(Laroussi et al., 2003).

*Corresponding author: Chulkyoon Mok, Department of Food Science and Biotechnology, Kyungwon University, Seongnam, Gyeonggi-do, 461-701, Korea
Tel: +82-31-750-5403; Fax: +82-31-750-5273
E-mail: E-mail: mokck@kyungwon.ac.kr
Received January 18, 2012; revised February 8, 2012; accepted February 8, 2012

NTP 생성에 가장 널리 사용되는 유전체장벽방전 (dielectric barrier discharge, DBD)은 전극 사이에 대기압 상태의 공기 또는 특정 기체를 통과시키면서 글로우방전하여 플라즈마를 생성하는데 전류를 차단하면 플라즈마 생성이 중지되고 활성상태의 입자들이 곧바로 사라지기 때문에 제어가 간단하고 잔류물질을 남기지 않으므로 대상물체의 성질에 영향을 주지 않으면서 처리하거나 살균할 수 있다 (Montie et al., 2000; Montenegro et al., 2002; Becker et al., 2005; Deng et al., 2007; Niemira & Gutsol, 2011).

본 연구에서는 유전체장벽방전 플라즈마(dielectric barrier discharge plasma, DBDP)를 식품살균에 활용하기 위한 기초자료를 제시하고자 자체 제작한 DBDP장치를 사용하여 *Escherichia coli*를 대상으로 살균력을 검정하고, 처리시간에 따른 살균패턴을 파악함과 함께 전극간격 및 전류세기가 플라즈마 살균력에 미치는 영향을 조사하였다.

재료 및 방법

사용균주

본 연구에 사용한 균주는 *Escherichia coli* ATCC 1175 이었고, tryptic soy broth(Becton, Dickinson and Company, Le Pont de Claix, France)를 사용하여 증균배양 후 실험에 공시하였다.

유전체 장벽 플라즈마 장치

DBDP장치의 기본구조는 Fig. 1과 같이 전원장치, 변압기, 방전전극, 시료처리판(접지판) 등 4 부분으로 구성되었다(Mok & Lee, 2011). 전극과 접지판 사이의 간격(이하 전극간격)은 수동으로 조절할 수 있으며, 접지판은 선형구동방식으로 이동속도를 조절할 수 있도록 하였다. 전원은 220 V 단상 교류를 사용하였고, 변압기를 통하여 증폭한 후 주파수 10.0-50.0 kHz인 펄스형 구형파 형태로 전류를 공급하여 플라즈마를 발생시키고 주파수 연동 전류를 조절하여 플라즈마 강도를 조절하였다. 플라즈마 생성에 소비되는 전력은 전산전력계(Model WL13S, LSIS Co., Ltd., Anyang, Gyeonggi-do, Korea)를 사용하여 전력량(kWh)을 측정하고, 이를 처리시간으로 나누어 평균소비전력(W)을 산출하였다.

DBDP 살균처리

Tryptic soy broth에 *E. coli*를 접종하여 37°C에서 20 시간 증균한 배양액 20 μ L를 자동피펫을 사용하여 slide glass(두께: 1 mm) 위에 분주하고 팁 말단을 이용하여 직경 15 mm의 원형으로 분산도포한 후 상온에서 90 분간 건조하였다. DBDP 처리는 고정식과 이동식으로 나누어 시행하였다. 고정식 DBDP처리는 접지판 위에 slide glass를 놓고 전극 바로 밑에 시료가 위치하도록 접지판을 이동한 후

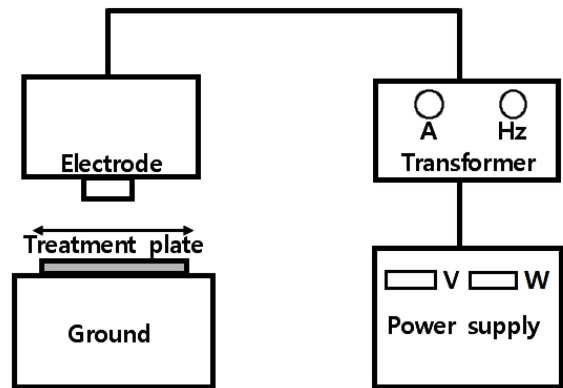


Fig. 1. Schematic diagram of DBDP treatment system.

전류세기(0.75 A, 1.00 A, 1.25 A) 및 전극간격(1.85 mm, 2.65 mm, 3.33 mm)을 달리하여 일정시간 처리하는 방식으로 3 회 반복하여 처리하였다.

이동식 DBDP처리는 다시 단일방향 처리와 양방향 처리로 나누어 처리시간별로 3 회 반복 실시하였다. 단일방향 처리는 접지판 위에 slide glass를 위치하고 접지판을 15 mm/s의 속도로 왕복하며 처리하는 방식으로 일정 횟수 처리한 후 누적처리 시간에 따른 살균효과를 조사하였다. 양방향 처리는 slide glass를 횡으로 놓고 처리한 후 방향을 90° 바꾸어 종으로 처리하는 과정을 교대로 반복하여 처리하는 방식으로 시행하였다.

균수측정

평균 생리식염수 10 mL를 담은 시험관 위에 DBDP처리한 slide glass를 위치하고 자동피펫을 사용하여 식염수를 1 mL씩 흡입하여 균체를 씻어내어 시험관에 받아내는 조작을 5 회 반복 실시하여 균체를 회수하였다. 회수한 시료는 Vortex Mixer(MaxiMix II, Barnstead International, Dubuque, Iowa, U.S.A.)로 10 초간 교반하고 10 진 희석한 후 eosin methylene blue(EMB) agar(BD company)에 도말하여 37°C에서 24 시간 배양 후 생성 집락수를 계수하였다(KDFA, 2005).

DBDP살균 패턴

DBDP 살균패턴은 먼저 식 (1)과 같은 1 차 반응으로 해석하였다(Chun et al., 2002). 살균패턴이 구간에 따라 2 개의 직선으로 나뉘진 경우는 구간별 회귀직선 기울기로부터 각각의 살균속도상수(k_1 , k_2)를 구하고, 식 (2)를 적용하여 구간별 D-value(D_1 , D_2)를 계산하였다. 또한 전 구간에 걸쳐 적용하도록 제안된 식 (3)과 같은 Singh-Heldman(2009) 모델을 식 (4)와 같이 변형하여 $\log(t)$ vs. $\log[\log(N_0/N)]$ 에 대한 회귀직선을 구하고, 절편과 기울기로부터 곡선형상계수 n 과 D-like value(D' -value)를 산출하였다.

$$\ln \frac{N_0}{N} = kt \tag{1}$$

$$D = \frac{2.303}{k} \tag{2}$$

$$\log \frac{N_0}{N} = \left[\frac{t}{D'} \right]^n \tag{3}$$

$$\log \left[\log \left(\frac{N_0}{N} \right) \right] = n \log(t) - n \log(D') \tag{4}$$

여기서

No : initial microbial number

N : microbial number at time t

t : time (min)

D : D-value (min)

D' : D-like value (min)

n : curve shape factor

결과 및 고찰

전류세기가 DBDP 살균력에 미치는 영향

전극간격을 1.85 mm로 고정하고 전류세기를 달리하여 시간별로 *E.coli*를 살균한 결과 Fig. 2와 같이 전류세기와 처리시간에 따라 살균치가 증가하였다. 전류세기에 따라 살균력이 높아진 이유는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 전류세기가 높아질수록 DBDP 생성전력이 직선적으로 증가하였고, 이에 따라 에너지가 커지기 때문이다.

NTP의 생물작용은 라디칼, 들뜬 상태의 분자, 전하입자 등에 의한 세포막 파괴, 플라즈마에 포함된 자외선에 의한 세포막과 세포물질의 침식 및 DNA 파괴 등에 기인하고 (Moisan et al., 2002; Laroussi et al., 2003), NTP의 살균력

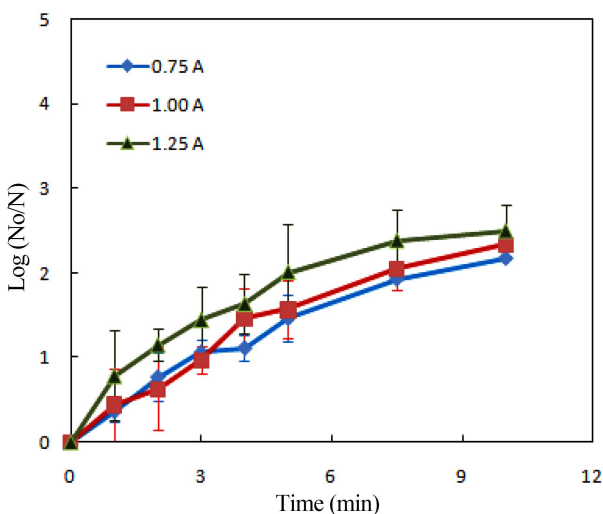


Fig. 2. Inactivation of *E. coli* by DBDP with 1.85 mm electrode-gap at different currents.

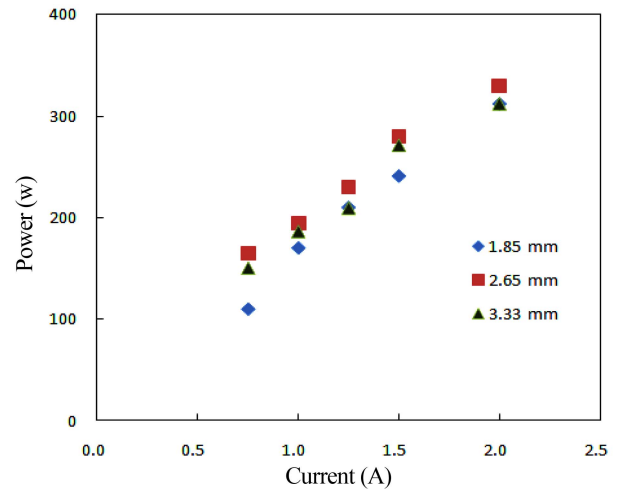


Fig. 3. Power for DBDP generation at different currents.

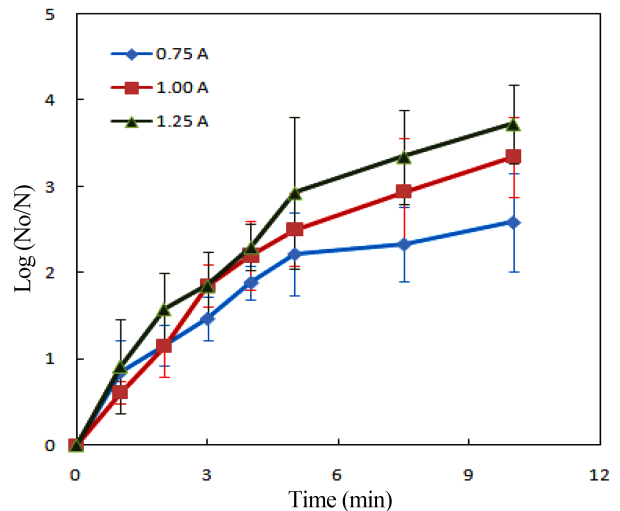


Fig. 4. Inactivation of *E. coli* by DBDP with 2.65 mm electrode-gap at different currents.

은 전력에 비례한다(Niemira & Gutsol, 2011). 즉 전류세기가 커짐에 따라 에너지투입속도(동력)가 커져 살균력이 증가하는 것으로 여겨진다.

전극간격이 DBDP 살균력에 미치는 영향

전극간격을 2.65 mm로 하여 살균한 경우도 Fig. 4에서와 같이 전류세기에 따라 살균력이 증가하였으며, 전극간격 1.85 mm(Fig. 2)에 비해서 전반적으로 살균치가 높아졌다. NTP의 살균력은 파워레벨 이외에도 플라즈마 체적과 속도 및 처리위치 등에도 영향을 받는 것으로 보고되고 있는데 (Niemira & Gutsol, 2011), 전극간격이 2.65 mm로 늘어남에 따라 1.85 mm의 경우보다 더 큰 플라즈마 체적을 갖기 때문에 살균력이 증가하는 것으로 생각된다.

하지만 전극간격을 3.33 mm로 하여 DBDP 처리한 경우

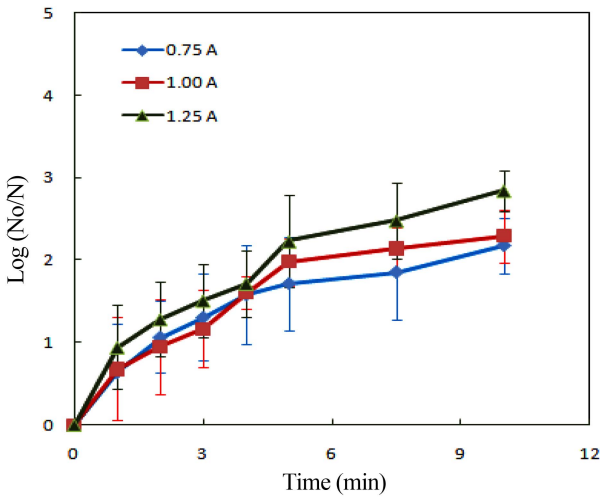


Fig. 5. Inactivation of *E. coli* by DBDP with 3.33 mm electrode-gap at different currents.

는 Fig. 5와 같이 전극간격 2.65 mm에 비하여 살균력이 전반적으로 감소하였다. 이러한 경향은 전극간격을 너무 넓어지면 플라즈마 체적은 커지나 NTP 밀도와 자외선 강도가 감소하게 되므로 살균력이 낮아지기 때문에 나타난 현상으로 추정된다. 따라서 본 장비를 사용하여 DBDP 살균할 경우 적정 전극간격은 2.65 mm임을 알 수 있었다.

전극간격에 따른 DBDP 성상은 Fig. 6에서 보는 바와 같이 전극간격 1.85 mm의 경우 전류세기 1.00-1.50 A 범위에서 청색이 강한 DBDP가 생성되었고, 전극간격 2.65 mm에서는 전류 0.75-1.50 A 범위에서 자색 톤의 DBDP가 생성되었다. 전극간격 3.33 mm의 경우는 0.75-1.25 A에서는 자색 DBDP가 생성되었으나 전류세기를 1.50 A로 높이면 아크가 발생하기 시작하였다. 통상 공기를 이용한 DBDP는 붉은색 톤의 자색을 띠는 것으로 알려져 있는데(Mok & Song, 2010; Mok & Lee, 2011) 본 연구에서도 안정된 DBDP 생성 시 자색 톤을 띠는 것으로 확

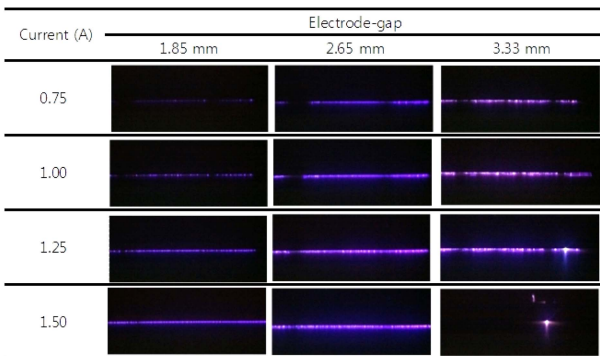


Fig. 6. Appearance of DBDP at different currents and electrode-gaps.

인되었다. 한편 아크 발생은 전류가 과다하게 유입될 경우 또는 전기가 전극 전체에 고르게 분포하지 않고 일정 부위에 밀집하여 흐를 경우 발생하는데 전극간격 3.33 mm에서는 전류 1.5 A 이상에서 아크가 발생하였다. 결론적으로 전극간격 2.65 mm에서 가장 넓은 전류범위에서 균일하고 안정된 DBDP가 생성되었으며, 이에 따라 살균력도 가장 크게 나타난 것으로 추정된다.

동일한 전류세기에서 전극간격에 따른 DBDP 생성전력 역시 2.65 mm에서 가장 높게 나타났고, 다음으로 3.33 mm, 1.85 mm 순으로 낮아졌는데(Fig. 3), 이러한 경향도 전극간격 2.65 mm에서의 높은 살균력을 뒷받침하고 있다. 특정 전극간격에서 높은 살균력이 발생하는 현상은 Tanino et al.(2007)의 연구결과에서도 관측된 바 있으며, 전극간격 2 mm > 1 mm > 3 mm 순으로 살균력이 감소함을 보고하였다.

한편 DBDP 처리에 의한 온도상승은 20°C 이내로서 상온에서 처리할 경우에도 최고온도는 45-50°C에 불과하므로 열에 의한 생물학적 효과는 무시할 수 있으며, 본 장치에서 생성한 DBDP는 NTP 조건에 부합함을 확인한 바 있다 (Mok & Lee, 2011).

DBDP 살균모델

DBDP 살균패턴을 1차 반응으로 해석한 경우 Fig. 7과 같이 2 구간으로 구분되었다. 즉, 처리시간 4분까지는 기울기가 큰 직선으로 작도된 반면, 5분 이후부터는 기울기가 작아져 후반부에는 살균효과가 저하하는 것으로 확인되었다. 이에 기초하여 처리시간 4분을 경계로 전반부(1 구간)와 후반부(2 구간)로 나누어 구간별 살균속도상수 k_1 과 k_2 및 구간별 D-value D_1 , D_2 를 산출하였다. 살균속도상수는 Table 1과 같이 k_1 은 전류세기에 따라 증가하였으나 k_2 는 전류세기에 따라 일률적인 경향을 보이지 않았다. 전극간격

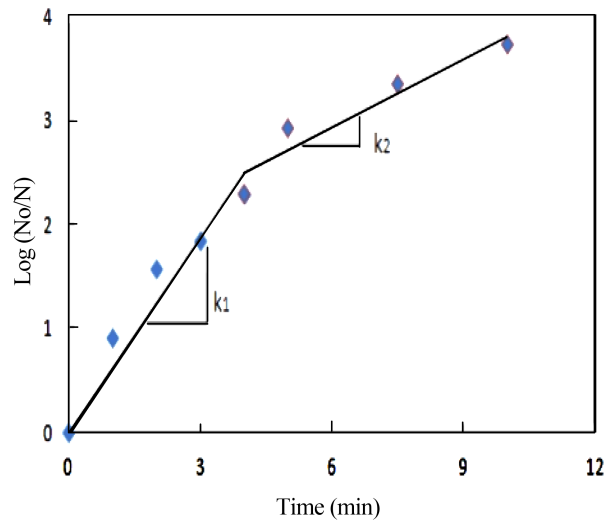


Fig. 7. First-order reaction kinetics of DBDP inactivation of *E. coli* at 1.25 A with 2.65 mm electrode-gap.

Table 1. Inactivation rate constants and decimal reduction times of *E. coli* by DBDP with different electrode-gaps at different currents.

Electrode-gap(mm)	Current (A)	Inactivation rate constant (min ⁻¹)		Decimal reduction time (min)	
		k ₁	k ₂	D ₁	D ₂
1.85	0.75	0.73±0.12	0.37±0.13	3.19±0.47	6.81±2.84
	1	0.86±0.15	0.35±0.18	2.75±0.81	7.76±3.48
	1.25	1.07±0.26	0.31±0.08	2.24±0.59	7.65±2.02
2.65	0.75	1.16±0.13	0.23±0.12	2.01±0.25	11.69±5.75
	1	1.32±0.22	0.43±0.00	1.77±0.32	5.47±0.80
	1.25	1.44±0.15	0.50±0.09	1.61±0.16	4.69±0.79
3.33	0.75	1.00±0.22	0.40±0.13	2.56±0.93	15.4±12.48
	1	0.96±0.23	0.305±0.04	2.54±0.69	10.24±2.17
	1.25	1.14±0.39	0.33±0.09	2.14±0.66	6.14±1.23

별 k₁은 2.65 mm에서 가장 높은 값을 보였고, 3.33 mm, 1.85 mm 순으로 낮아졌다. 최대 k₁은 전극간격 2.65 mm에서 전류 1.25 A에서 관측되었으며 1.44±0.15 min⁻¹을 보였다.

D-value의 경우 D₁은 1.61-3.19 min의 범위를 보였고, 전류세기에 따라 감소하는 경향을 보였으며, 최소 D₁은 전극간격 2.65 mm/전류 1.25 A에서 1.61 min을 나타냈다. D₂는 전극간격 1.85 mm에서는 전류세기에 따라 큰 차이를 보이지 않았으나, 2.65 mm와 3.33 mm인 경우에는 전류세기에 따라 감소하였다.

이와 같은 2 구간 1 차 반응 패턴은 NTP(Moisan et al., 2001; Mok & Song, 2010) 뿐만 아니라 자외선(Mok & Lee, 2009), 고전장펄스(Oshima & Sato, 2004) 등 각종 비열살균에서 보편적으로 관측되는 현상이다. 이러한 경향은 NTP 살균효과는 살균대상물체의 표면에 있는 미생물에는 매우 효과적이어서 단시간 처리로 살균이 가능하지만 NTP의 침투력이 낮아 내부에 있는 미생물은 장시간 처리해야

사멸되기 때문에 나타나는 현상으로 추정된 바 있다(Mok & Song, 2010).

이러한 2 구간 1 차 반응 패턴을 단일 모델로 해석하기 위하여 식 (4)와 같은 Singh-Heldman 모델을 적용한 결과 Fig. 8에서 보는 바와 같이 결정계수 0.982의 직선으로 작도되어 *E.coli*의 DBDP 살균패턴이 이 모델에 잘 적용되는 것으로 확인되었다. Singh-Heldman 모델의 곡선형상계수 (n)와 D'-value를 산출하여 Table 2에 나타내었다. 곡선형상계수는 0.55-0.78으로 1보다 작은 값을 보여 처리시간에 따른 살균치 곡선은 위로 볼록한 convex형의 그래프로 그려지며 살균패턴은 1 차 반응으로부터 벗어남을 알 수 있다. D'-value는 전류세기에 따라 뚜렷하게 낮아졌으며, 전극간격에 따라서는 2.65 mm < 3.33 mm < 1.85 mm 순으로 나타났다. 최소 D'-value는 전극간격 2.65 mm, 전류세기 1.25 A에서 0.57±0.12 min이었다.

처리방식별 살균효과 비교

DBDP 처리방식을 고정식과 이동식, 이동식은 다시 단일 방향 처리와 양방향 처리로 나누어 실시하고 살균효과를 비교하였다. DBDP 살균효과는 Fig. 9에서 보는 바와 같이

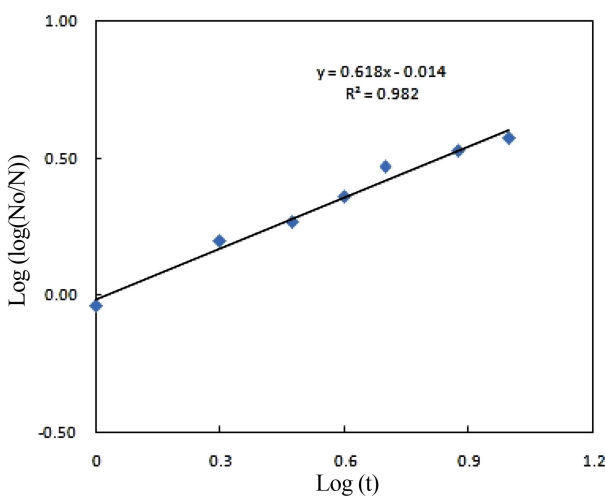


Fig. 8. DBDP inactivation kinetics of *E. coli* at 1.25 A with 2.65 mm electrode-gap based on Singh-Heldman model.

Table 2. Curve shape factor(n) and D'-value in Singh-Heldman model.

Electrode-gap (mm)	Current (A)	n	D'-value (min)
1.85	0.75	0.78±0.16	3.27±0.51
	1	0.60±0.09	2.45±0.63
	1.25	0.62±0.33	1.77±1.48
2.65	0.75	0.53±0.27	1.37±0.81
	1	0.75±0.03	1.69±0.29
	1.25	0.68±0.41	0.57±0.12
3.33	0.75	0.68±0.49	2.61±1.87
	1	0.74±0.56	2.27±1.72
	1.25	0.55±0.23	1.46±1.25

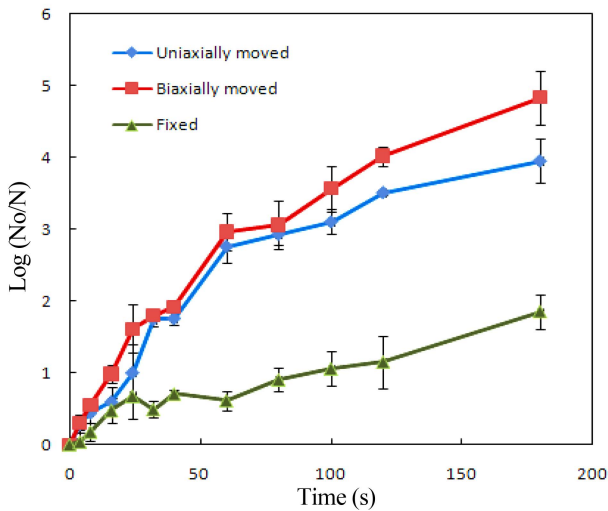


Fig. 9. Effects of DBDP treatment methods on inactivation of *E. coli* at 1.00 A with 2.65 mm electrode-gap.

Table 3. Effects of treatment methods on DBDP inactivation rate constants and D-values at 1.00 A with 2.65 mm electrode-gap.

Treatment method	Inactivation rate constant (min^{-1})		Decimal reduction time (min)	
	k_1	k_2	D_1	D_2
Fixed	2.05 ± 0.30	1.37 ± 0.20	1.14 ± 0.16	1.71 ± 0.27
Uniaxially moved	6.40 ± 0.65	1.42 ± 0.27	0.36 ± 0.04	1.67 ± 0.36
Biaxially moved	7.20 ± 0.58	2.28 ± 0.56	0.32 ± 0.03	1.06 ± 0.28

이동식 처리가 고정식 처리보다 월등히 좋았으며, 이동식 처리방식 간에는 양방향 처리가 단일방향 처리에 비해 살균효과가 우수하였다. 이러한 차이는 전극에서 플라즈마가 발생하는 지점은 불연속적으로 위치하고, 플라즈마 발생지점에 에너지가 집중되어 불균일한 NTP 밀도를 갖기 때문에 나타나는 현상으로 생각되며, 이러한 불균일성은 시료를 이동시키면서 처리함으로써 개선됨을 알 수 있었다.

처리방식이 살균속도상수와 D-value에 미치는 영향을 조사하기 위하여 전극간격 2.65 mm에서 전류를 1.0 A로 고정하고 처리방식별 살균속도상수와 D-value를 측정된 결과 Table 3과 같이 각 구간에서 이동식 처리가 고정식 처리에 비해 훨씬 큰 살균속도상수와 작은 D-value를 보임으로써 DBDP 처리 시 시료의 이동이 효과적인 살균에 기여함을 알 수 있었다. 이동식 처리방법 중에는 양방향 처리가 단일방향 처리보다 높은 살균효과를 보였다.

위의 살균 결과를 Singh-Heldman 모델에 적용하여 곡선형상계수와 D'-value를 산출한 결과 Table 4와 같이 곡선형상계수는 양방향 이동식 처리 > 단일방향 이동식 처리 > 고정식 처리 순으로 큰 값을 보여 양방향 이동식 처리가

Table 4. Effects of treatment methods on DBDP inactivation parameters of Singh-Heldman model against *E. coli* at 1.00 A with 2.65 mm electrode-gap.

Treatment method	n	D'
Fixed	0.63 ± 0.09	1.93 ± 0.50
Uniaxially moved	0.73 ± 0.04	0.28 ± 0.04
Biaxially moved	0.78 ± 0.13	0.37 ± 0.10

가장 직선에 근접한 경향을 나타냄으로써 살균효과의 지속력이 큼을 알 수 있었으며, 고정식 처리는 가장 작은 값을 보여 처리시간이 경과함에 따라 살균효과 크게 저하됨을 알 수 있었다.

D'-value는 고정식 처리 >> 양방향 이동식 처리 > 단일방향 이동식 처리 순으로 값이 작아져 이동식 처리가 고정식 처리에 비해 살균효과가 우수한 것으로 나타났다. 이동식 처리방식 간에는 단일방향 처리가 양방향 처리보다 약간 작은 값을 보였는데 단일방향 처리의 경우 곡선형상계수 역시 낮은 값을 나타내었다.

이상의 결과로부터 DBDP는 효과적인 생물학적 NTP로서 비열살균기술로서의 적용 가능성이 확인되었으며, 향후 식품의 열에 의한 손상을 줄이면서 안전성을 높이는 새로운 살균기술로서의 이용이 기대된다.

요 약

식품의 열에 의한 손상을 줄이고 안전성을 높이기 위한 비열살균기술로 유전체장벽방전 플라즈마(DBDP) 이용 가능성을 타진하기 위하여 *E. coli*에 대한 살균효과를 전류세기와 전극간격을 달리하여 조사하였다. DBDP 살균효과는 초기에는 크게 나타나다가 이후 감소하는 2 구간으로 구성된 1차 반응으로 나타났고, 전류세기에 따라 살균효과가 증가하였다. 전극간격에 따른 살균력은 2.65 mm에서 가장 높았으며, 3.33 mm, 1.85 mm 순으로 감소하였다. DBDP 살균패턴은 Singh-Heldman 모델에 적합하였으며, 시료를 고정하고 DBDP를 처리한 경우 곡선형상계수(n)는 0.545-0.783 범위의 값을, D'-value는 0.565-3.268 min의 값을 보였다. 최소 D'-value는 전극간격 2.65 mm, 전류 1.25 A에서 나타나 가장 우수한 살균력을 보이는 조건으로 확인되었다. DBDP 처리 시 시료를 이동시키면 고정하여 처리한 경우에 비하여 살균효과는 크게 향상되었으며, 양방향 이동식 처리가 단일방향 이동식 처리에 비하여 양호한 살균력을 보였다.

감사의 글

본 연구는 농림수산식품부 고부가식품기술개발사업과 농촌진흥청 국제기술개발사업의 지원으로 이루어진 것으로서 이에 감사드립니다.

참고문헌

- Becker N, Schmidt M, Viggiano AA, Dresslar R, Williams S. 2005. Air plasma chemistry. In: Non-equilibrium Air Plasmas at Atmospheric Pressure. Becker KM, Kogelschartz U, Schoenback KH, Barker RJ (eds.). IOP Publishing Ltd., London, England, pp. 124-182.
- Chun JK, Kim KH, Mok C, Lee SJ, Kwon YA. 2002. Food Engineering. McGraw-Hill Korea, Seoul, Korea, pp. 114-115.
- Deng S, Ruan R, Mok C, Huang G, Lin X, Chen P. 2007. Inactivation of *Escherichia coli* on almonds using nonthermal plasma. *J. Food Sci.* 72: M62-M65.
- Fridman A, Chiroukov A, Gutsol A. 2005. Non-thermal atmospheric pressure discharges. *J. Physics D: Appl. Physics* 38: R1-R24.
- KFDA. 2005. Food Codes Vol. II. Korea Food and Drug Administration, Seoul, Korea, p. 97.
- Laroussi M, Lu X. 2005. Room-temperature atmospheric pressure plasma plume for biomedical applications. *Appl. Phys. Lett.* 87: 113902-113903.
- Laroussi M, Mendis DA, Rosenberg M. 2003. Plasma interaction with microbes. *New J. Physics* 5: 41.1-41.10.
- Lerouge S, Wertheimer MR, Yahia L. 2001. Plasma sterilization: a review of parameters, mechanisms, and limitations. *Plasmas Polym.* 6: 175-188.
- Moisan M, Berbeau J, Crevier MC, Pelletier J, Philip N, Saoudi B. 2002. Plasma sterilization: methods and mechanisms. *Pure Appl. Chem.* 74: 349-358.
- Moisan M, Barbeau J, Moreau S, Pelletier J, Tabrizian M, Yahia LH. 2001. Low-temperature sterilization using gas plasmas: a review of the experiments and an analysis of the inactivation mechanisms. *Int. J. Pharm.* 226: 1-21.
- Mok C, Lee NH. 2009. Ultraviolet inactivation of *Escherichia coli* in stainless steel cups. *Food Eng. Prog.* 13: 122-129.
- Mok C, Song DM. 2010. Low-pressure plasma inactivation of *Escherichia coli*. *Food Eng. Prog.* 14: 202-207.
- Mok C, Lee T. 2011. Operational properties and microbial inactivation performance of dielectric barrier discharge plasma treatment system. *Food Eng. Prog.* 15: 398-403.
- Montenegro J, Ruan R, Ma H, Chen P. 2002. Inactivation of *E. coli* O157:H7 using a pulsed nonthermal plasma system. *J. Food Sci.* 67: 646-648.
- Montie TC, Kelly-Winternberg K, Roth JR. 2000. An overview of research using the one atmosphere uniform glow discharge plasma (OAUGDP) for sterilization of surfaces and materials. *IEEE Trans. Plasma Sci.* 28: 41-50.
- Neimira BA, Gutsol A. 2011. Nonthermal plasma as a novel food processing technology. In: Nonthermal Processing Technologies for Food. Zhang HQ, Barbosa-Cnovas GV, Balasubramaniam VM, Patrick Dunne C, Farkas D, Yuan TC (eds.), Wiley-Blackwell Ltd. Hoboken, NJ, USA, pp. 271-288.
- Oshima T, Sato M. 2004. Bacterial sterilization and intracellular protein release by a pulsed electric field. *Adv. Biochem. Eng. Biotechnol.* 90: 113-133.
- Singh RP, Heldman DR. 2009. Introduction to Food Engineering, 4th Edition. Academic Press, Burlington, MA, USA, p. 417.
- Tanino M, Xilu W, Takashima K, Katsura S, Mizuno A. 2007. Sterilization using dielectric barrier discharge at atmospheric pressure. *Int. J. Plasma Environ. Sci. Technol.* 1: 102-107.