

유전가열을 이용한 식품살균장치의 온도특성 해석

이 달은\*, 주경돈\*, 김태진\*\*, 조기연\*\*, 백수현\*  
 동국대학교\*, 한국전기연구원\*\*

Temperature Characteristic Analysis of Food Sterilization Apparatus using dielectric heating

D.E.LEE\* K.D.JOO\* T.J.Kim\*\* K.Y.Joe\*\* S.H.Baek  
 Dongguk University\* KERI\*\*

**Abstract** - With development of Circuit technology, accuracy of dielectric or induction heating apparatus was developed. This study aims at realization of food insecticidal apparatus using dielectric heating. Equipment to measure grain's permittivity or vermin's permittivity and expectation for heating temperature by computer simulation is necessary for construction of the system. And the effect of extermination of vermin for food was confirmed by experiment using the system.

1. 서 론

회로기술의 발달로 유도가열 내지 유전가열 등의 가열방식을 적용한 장치의 가열온도의 조절이 용이해졌으며, 이에 따라 적용정도가 확산되고 있는 추세이다. 이중 가열을 통한 구제기술개발은 가열장치를 산업적으로 적용한 하나의 예라 할 수 있다.

유도가열의 경우, 와전류가 흐를 수 있어야하므로 금속과 같은 도체가 있어야 하나 절연물과 같이 저항이 큰 유전체의 경우에는 유도가열이 불가능하여 이와는 다른 방식인 보다 높은 고주파수에 의한 유전가열을 이용하면 부도체인 유전체에도 가열시킬 수 있다.

곡물 및 해충의 유전체 손을 이용한 구제기술개발 및 곡물 및 해충의 유전체 손실에 대한 자료 수집, 수분함유량과의 상관관계에 대하여 문헌 조사를 실시하였다.

시뮬레이션을 통하여 유전가열 전원장치의 챔버가 균형 있고 효율적인 가열구조를 가지도록 설계하였고, 극판간격에 따라 오염된 곡물의 온도 분포를 시뮬레이션을 통하여 분석하였다. 그리고 유전가열시 곡물 및 해충의 유전체 특성분석과 수분함유량과 유전손실간의 관계를 해석하였다.

실험은 감염된 곡물을 대상으로 행해졌으며, 표본들은 1에서 10[kV/cm]의 범위를 가지는 교류 전기장에 노출되었다. 전기장의 시뮬레이션 및 모델링은 이 방식의 효율성을 증명하기 위해 다양한 곡물의 특성을 고려하여 전염병을 방지, 관리하는 장치의 설계에 목적을 둔다. 적용된 자동화 곡물 살충 관리 설비는 1에서 10[kV]의 교류가 발전, 공급되는 극판 타입 커패시터로 구성된다.

2. 본 론

2.1 유전가열의 적용

유전가열의 원리는 전극간에 피 가열체를 넣고 양전극에 고주파 전압을 가하면 유전체를 구성하고 있는 쌍극자가 교류전계의 교변에 따라 방향을 변경하면서 인가 주파수와 동일한 진동을 일으키게 된다.

이 진동효과는 곧바로 열에너지로 변환되며 물질의 가열수단으로 활용할 수 있게 되는 것이다. 가열효과를 높이는 방안은 쌍극자의 진동을 빨리 그리고 인가전압을 높이면 된다. 그러므로 유도가열에 사용되는 주파수는 보통 500[kHz] 이하가 대부분이나 유전가열의 경우는 보통 10[MHz]정도로 아주 높은 주파수가 보통 사용된다.

다음 식은 대표적인 가열 전력식으로 유전가열이 전기

적인 주파수와 물질의 특성 파라미터에 의해 좌우됨을 알 수 있다.

$$W = 2\pi f C \epsilon \tan \delta E^2 \quad (2.1)$$

$\epsilon$ : 시편의 상대 투자율  $f$ : 동작주파수 [Hz]  
 $W$ : 가열전력  $E$ : 커패시터 안의 전가장 밀도[V/m]  
 $\tan \delta$ : 역률(손실인자, power factor)

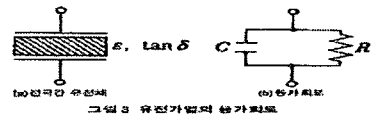
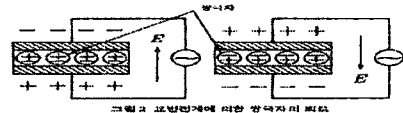


그림1 교번전계에 의한 쌍극자 회로와 유전가열의 등가회로

유전가열에 의한 살균은 다음과 같은 장점이 있다. 마이크로파가 식품의 내·외부를 동시에 급속 가열하므로 살균 소요시간이 짧아지며, 단시간 살균으로 제품의 색택, 풍미변화가 최소화되어 고품질의 상품생산이 가능해진다. 포장된 상태로 살균할 수 있으므로 생산성이 뛰어나며 2차 오염이 없게 되고(금속포장제 제외), 연속식(컨베이어(conveyor)타입) 살균으로 생산량 극대화를 실현 가능하게 된다.

곡물을 다루는 기존의 방법은 화학적 물질을 이용하는 것으로 비싸고 토양에 해롭기 때문에 본 논문에서는 고밀도 전기장의 작용에 노출되도록 하는 것이 화학적 방식에 비해서 효과적일 수 있다는 것을 증명하는데 그 목적을 둔다.

2.2 수분함유량과 유전체 특성

식품 및 농산물의 유전특성 측정은 측정주파수와 샘플 홀더 등에 따라 여러 가지 측정방법이 있는데 농산물이 채워진 샘플홀더의 임피던스를 Q-meter등을 이용하여 유전 특성을 구하는 방법이 주로 사용된다[1][3]. 수분을 함유한 식품 및 농산물이 교류 전기장에 놓여질 때 콘덴서와 저항으로 이루어진 병렬 등가회로로 표현될 수 있으며 이때 유전상수는 복소수로서 식(2.2)과 같이 표시된다[3].

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (2.2)$$

$\epsilon$ : 복소상대유전상수,  $\epsilon'$ : 유전상수,  $\epsilon''$ : 유전손실

유전손실은 유전체가 전기장에 놓여져 있을 때 손실되는 열 에너지에 관계되며 이러한 손실을 나타내는 지수로 손실탄젠트를 다음과 같이 정의하며 유전손실은 유전체의 전기전도도 또는 비저항의 함수로 식 (2.3) 및 (2.4)과 같이 표시된다.

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (2.3)$$

$$\sigma = 2\pi f \epsilon_0 \epsilon'' \quad (2.4)$$

$\sigma$ : 교류전기전도도 [ $\Omega m$ ]<sup>-1</sup>],  $f$ : 주파수 [Hz]

$\epsilon_0$ : 진공시 유전율 ( $8.854 \times 10^{-12}$  [F/m])

$\delta$ : 손실각 (degree)

Q-meter를 이용하였을 경우, 1~50[MHz]에서 샘플홀더의 리액턴스 변화를 이용하여 유전상수, 유전손실, 전기전도도 등을 측정하며[3], 유전상수는 함수율에 따라 증가하나 주파수에 따라 감소하는 특성을 보이며, 유전손실에 대한 경향은 뚜렷하게 나타나지는 않는다[1][8]. 그림2는 함수율에 따른 유전체 특성의 일례를 보여준다.

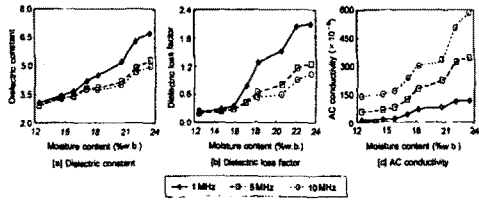


그림2 화성벼의 주파수 및 함수율에 따른 유전체 특성

물질의 근본적인 AC특성은 전자기 개념과 병렬 등가회로 개념과 관련하여 상세히 규정되어 있다. 실질적인 사용을 위해서 일반적인 관심의 대상인 유전특성은 상대복소유전율  $\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'' = |\epsilon| \exp(-j\delta)$ 의 실제부분과 가상부분인 유전율  $\epsilon'$ 과 유전손실율  $\epsilon''$ 이다. 여기서  $\delta$ 는 유전 손실각이다. 작물의 유전특성은 작물을 가열하거나 건조시키기 위해 RF 또는 초단파를 적용했을 때 작물의 움직임에 말해준다. 유전체에 단위 체적당 분산되는 힘[W/m<sup>3</sup>]은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P = E^2 \sigma = 55.63 \times 10^{-12} E^2 \epsilon'' \quad (2.5)$$

$P$ 는 발열량[W/m<sup>3</sup>],  $f$ : 주파수 [Hz]  
 $E$ 는 출력[kV/cm]  $\epsilon''$ : 유전체손

여기서  $E[V/m]$ 은 rms전계강도이다. 에너지를 작물의 전계에서 열로 변환시킬 때 나타나는 유전체내 온도증가 [ $^{\circ}C/s$ ]의 시간비율은 다음과 같다.

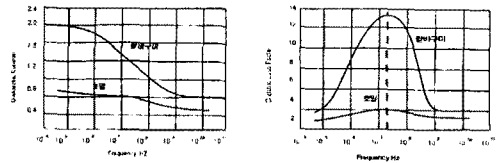
$$\frac{dT}{dt} = \frac{0.239P}{cp} \quad (2.6)$$

여기서  $c[K/kg^{\circ}C]$ 는 작물의 비열이며,  $\rho$ 는 밀도 [ $kg/m^3$ ]이다. 건조처리시 작물에서 제거되는 물의 잠재적 증발열도 고려해야 한다. 왜냐하면 그러한 목적으로 에너지가 공급되기 때문이다.

유전체의 영향은 전계와 상호 작용하는 질량의 양에 따라 다르기 때문에 단위 부피당 질량 또는 밀도는 유전특성에 영향을 준다. 측정에 사용되는 유전 샘플 홀더에 비해 곡물이 너무 작은 경우와 정제를 위해서 분쇄해야 하는 순수광물의 경우 곡물에 유전특성이 필요했다.

샘플홀더를 동축형으로 하여 설계, 제작한다. 전극부의 체적은 223.12[cm<sup>3</sup>], 샘플 홀더의 이론적인 정전용량값은 3.424[pF]로 계산된다.

그림3에서 보는 바와 같이 호밀과 쌀바구미와의 유전체 특성은 주파수대역별로 각각 다른 차이를 보이고 있다. 특히, 13[MHz] 부근(점선부근)에서의 유전체 손실은 호밀과 쌀바구미와 약 6배정도 차이가 난다. 이 경우 유전가열에 의한 발열량이 식(2.5)에 따라서 발열되는 발열량 P가 5배가 차이가 나서 쌀바구미만 선택적으로 발열되는 것이다.



a) 유전체 유효  $\epsilon'$       b) 유전체 손  $\epsilon''$

그림3 호밀과 쌀바구미의 유전체 및 유전체 손실 특성

### 2.3 시스템 구성 및 열특성 해석

그림 4는 본 연구에서 제시한 유전가열 장치 시스템의 개략도를 나타내며, 그림 5는 이러한 구조를 시뮬레이션 할 경우의 모델을 나타낸다. 40×40×4[cm<sup>3</sup>]인 두개의 전극 사이에(공간 80[cm], 50[cm]) 곡물(여기서는 현미)이 통과할 경우, 1 [kV], 13.56 [MHz]인 전원이 적용된 열분포 특성을 해석하였다

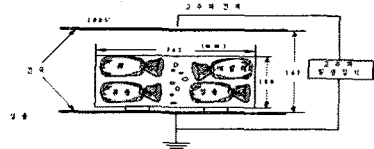


그림4 유전가열 시스템 적용

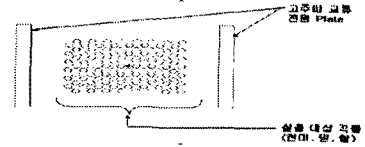


그림5 시뮬레이션 모델 (2차원)

가열 희망 온도를 맞추기 위해 피가열체의 유전율을 정하여 해석과정에 첨부해야 한다. 본 연구의 대상이 되는 곡물의 유전율은 온도와 전원주파수, 그리고 곡물 내의 수분함유량에 따라 각각 다르게 나타났으나 시뮬레이션 대상 곡물의 유전율 조건은 온도 25 $^{\circ}C$ 에서 전원주파수 10~13.56[MHz]인 경우를 참조하였다. 다음은 현미와 밀의 유전율에 대한 정보를 나타낸다.

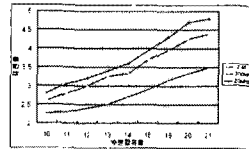


그림6 수분함유량과 전원 주파수에 따른 유전율(현미)

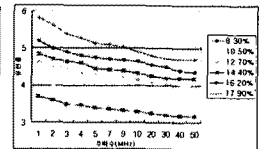


그림7 수분함유량과 전원 주파수에 따른 유전율(밀)

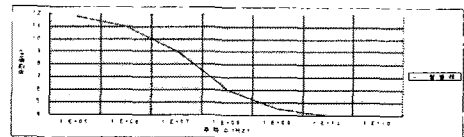


그림8 전원주파수에 따른 쌀벌레의 유전율

수분함유율이 15%인 현미, 밀의 유전율은 곡물 일 때 대략 3.5~4.5[F/m]로 나타났다. 곡물에 포함된 해충의 유전율은 'adult rice weevil'을 하나의 표본으로 삼아 고려하여 해석하였다. 전원주파수가 13.56[MHz]일 경우, 유전율은 대략, 3.7(현미), 4.3(밀), 7.5(쌀벌레) [F/m]로 불 수 있다.

가열되는 대상은 원형의 작은 입자들의 분포로 나타내

었다. 열 발생량이 곡물내에 있는 미생물 및 해충을 살균에 적합한 양이 되도록 적합한 열을 발생하도록 조절되어야 한다.

곡식(쌀이나 밀가루 등의 곡물을 예로 들면)에 있는 대부분의 해충들은 40℃이하에서 전계를 60~80초 동안을 조사하면 완전히 죽지만, 일부 해충은 음식물의 온도가 섭씨 60℃ 이상이 되어야 죽게 된다.

극판 사이에 해충(adult rice weevil)을 약 60%의 비율로 분포 시켰을 때 가열 대상 곡물의 유전율이 3[F/m]인 경우, 80[cm]와 50[cm] 간격의 교류 커패시터형 극판 장치에 AC 1[kV]에 13.56[MHz]인 전원을 인가할 경우의 시뮬레이션 결과이다. 극판 간격이 80[cm]일 경우의 시뮬레이션 결과는 아래 그림9와 그림11에 나타나 있다. 그림11에서 곡물 알갱이가 있는 부분의 온도가 40℃ 이상을 나타내고 있고, 곡물의 중앙부분의 온도는 최고 60℃까지 분포된다. 이에 비해 극판 간격이 50[cm]일 경우는 그림10과 그림12에 보여지며, 그림12에서 곡물 알갱이가 있는 부분은 60℃ 이상을 나타내고, 곡물의 중앙부분의 온도는 최고 75℃까지 분포되는 것을 볼 수 있다. 음식물의 온도가 60℃ 이상이 되어야 해충이 죽으므로 극판간격은 80[cm]보다 50[cm]일 때가 살균효과가 적합한 것을 시뮬레이션을 통하여 분석하였다.

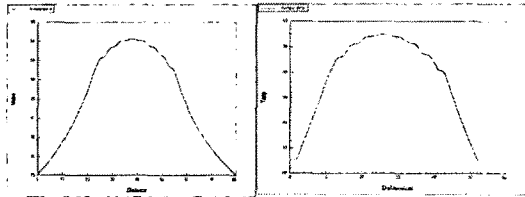


그림 11 극판 간격80cm에서 온도분포 그래프      그림10 극판 간격 50cm에서 온도분포 그래프

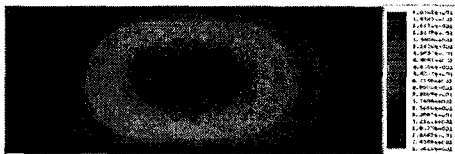


그림11 극판간격 80cm, 1kV\_13.56MHz인가시 해충에서 방사되는 온도분포도

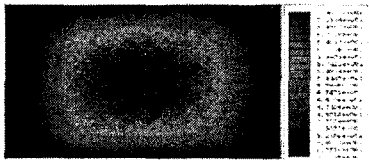


그림12. 극판간격 50cm, 1kV\_13.56MHz인가시 해충에서 방사되는 온도분포도.

#### 2.4 실험결과 및 분석

실험장치의 전원 topology는 경제성을 고려한 고효율 직접 가열 시스템 방식을 선정하였다. 입력전압 380[V]는 AVR과 변압기를 거쳐서 다이오드 정류 방식으로 부하단과 직접 결합된 회로방식을 선택했고, 고주파 발생부는 고효율 진공관을 이용하여 부하단과 효율적인 임피던스 매칭을 갖는 전력전달 특성을 갖도록 하였다.

3[kW]급 6[kV] 60[MHz]의 고주파 유전자열장치를 이용한 실험을 통하여 쌀벌레를 관찰한 결과를 실험하였다. 그림13(a)는 가열 후의 쌀벌레 외관을 촬영한 사진이며, 그림13(b)는 쌀벌레의 온도 분포를 열화상 카메라로 촬영한 그림이다. 약 5초간 유전자열한 결과 쌀의 경우 약37℃까지 상승하고 쌀벌레는 50℃ 이상 상승하고 90% 이상이 활동을 정지하는 결과를 얻어 해충구제에 효과가

있다고 판단된다. 또 유전자열하는 시간과 곡물량에 비례하여 상승 온도가 선형적으로 상승하는 결과를 얻었다.

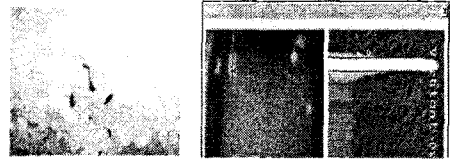


그림13 유전자열후 쌀 벌레 사진 및 온도분포 (유전자열 조건 : 5초, 해충온도는 25℃ >50℃)

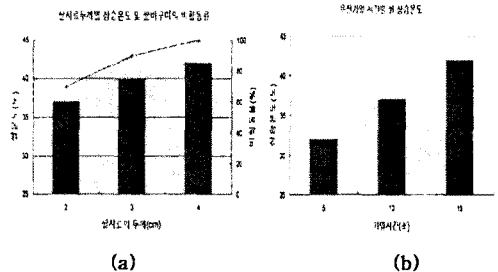


그림14 (a)쌀시료 두께별 상승온도 및 쌀바구미의 비활등을 (b)유전자열 시간별 쌀 상승온도

그림14는 쌀의 온도가 25℃에서 10초간 각각 쌀 시료의 두께를 다르게 하여 쌀을 가열하였을 때의 온도와 그에 따른 쌀바구미의 활동정도를 나타내고 있다. 온도가 증가한다 하더라도 쌀 시료의 두께가 두꺼워지면 구제율이 떨어지는 것을 확인할 수 있었다.

### 3. 결 론

해충 및 곡물의 유전을 측정과 더불어 열분포 예상을 위한 시뮬레이션을 통해 유전자열을 이용한 해충구제장치를 설계하였으며, 극판간격을 50[cm]와 80[cm]로 시뮬레이션을 수행한 결과 극판간격이 50[cm]일 경우 충분한 살균 효과를 얻을 수 있다는 것을 분석하였고, 실험을 통하여 효과를 확인하였다.

앞으로 다양한 종류의 곡물과 벌레에 대한 해충구제를 할 경우 곡물의 수분함유량과 유전율의 DB구축이 필요하며, 에너지 전달 효율이 보다 높은 전원장치 및 시스템을 개발하여 소형화 하는 것이 필요할 것으로 보인다.

#### [참고문헌]

- [1] NELSON, S.O. : "Pest Control," ed by Kilgore, W.W. and Douth. R.L. (Academic Press New York) p. 87 (1967)
- [2] HEADLEE, T. J. : J. Econ. Entomol., 24, 427 (1931)
- [3] NELSON, S.O. and KANTACK, B. H. : J. Econ. Entomol., 50, 588 (1965)
- [4] NELSON, S.O. : J. Microwave Power, 7, 231 (1972)
- [5] 川村光男, マイクロ波基礎工學, 昭晃堂, (1981)
- [6] 森本英男, 首藤邦夫 "食品のマイクロ波加熱, 建邦社, (1974)
- [7] 한국전기연구소전력전자연구부, "정전계응용(농업분야)", 한국전기연구소, (1996)
- [8] 일본식품공업학회지 제36권 제4호 (1989. 4)
- [9] CHAMP, B. R. and RYTE, C.E. : FAO Plant Prot. Serv., No. 5, p. 297 (1976)