

Cocoa Bean의 유전 특성

이주희 · 김석신

가톨릭대학교 식품영양학과

Dielectric Properties of Cocoa Beans

Joo Hee Lee and Suk Shin Kim

Department of Food Science and Nutrition, The Catholic University of Korea

Abstract

Dielectric constant (ϵ') and loss factor (ϵ'') of cocoa beans were measured at 25°C~150°C using the open-ended coaxial probe technique at 915 and 2450 MHz. Moisture content of each sample was adjusted to $4.32 \pm 0.14\%$ before the experiment. Below 100°C dielectric constants of cocoa bean were 2~6 at 915 MHz and 2~3.3 at 2450 MHz, respectively. Loss factors ranged 0.4~1.5 at 915 MHz and 0.005~0.08 at 2450 MHz, respectively. Above 100°C, dielectric constants were 0.8~7 at 915 MHz and 0.1~0.7 at 2450 MHz, respectively. Dielectric constants were dependent upon temperature below 100°C; however, loss factors were independent except those at 35°C and 915 MHz. Dielectric constants decreased as temperature was increased, but loss factors increased at certain temperature ranges above 100°C. The dielectric properties of cocoa beans seemed to be related with the properties of cocoa butter. Especially, Loss factor of cocoa beans at 2450 MHz was similar to that of vegetable oil ($\epsilon'' < 0.1$). Penetration depth calculated based on dielectric properties increased above 130°C.

Key words: cocoa bean, dielectric properties

서 론

식품의 유전 특성은 마이크로파 가열시 대상물의 발열 거동을 이해하는데 필수적이다. 또한 유전특성을 수분함량이나 밀도 등의 물리적 성질과 연계시킴으로써 이들 물리적 특성을 비파괴적인 방법으로 측정하는데 사용될 수도 있으며, 마이크로파를 이용한 각종 장비의 설계 및 사용 조건의 설정에 필요한 주요 정보를 제공하기도 한다 (Tinga와 Nelson, 1973).

이러한 유전 특성은 측정하고자 하는 주파수 영역의 마이크로파를 발생시켜 대상물에 전자기적 신호를 직접 주입한 다음 물질에 의한 신호 변화를 감지하고 이로부터 유전상수(dielectric constant, ϵ')와 손실계수(dielectric loss factor, ϵ'')를 계산해낸다(Giese, 1992). 이의 측정 방법에는 여러 가지가 있으나 현재 가장 많이 사용되고 있는 것으로는 open-ended coaxial probe법, waveguide and coaxial transmission line법, resonant cavity법 등을 들 수 있다(홍석인, 1996). 이들 중 open-ended coaxial probe

법은 특별히 식품의 유전율을 측정하기에 적합한 방법으로서 폭넓은 주파수 범위에서 측정 시료의 형태에 구애받지 않기 때문에 각종 신선 과채류 및 동물조직 등의 유전 특성 측정에 널리 사용되어 왔다(홍석인 등, 1996; Mudgett, 1986). 이에 본 연구에서는 마이크로파를 이용한 cocoa bean의 roasting system 설계와 관련지어 cocoa bean의 유전적 성질에 대한 기본 자료를 얻고자 open-ended coaxial probe법을 이용하여 온도 조건에 따른 유전 특성 변화를 측정하였다.

재료 및 방법

Cocoa bean

Malaysia산 cocoa bean을 동양제과(주)로부터 공급받았으며 수작업을 통해 선별하여 크기가 고르며 껍질이 벗겨지지 않은 것만을 시료로 사용하였다. 사용한 cocoa bean의 대략적인 크기는 길이 25 ± 1 mm, 나비 14 ± 1 mm, 두께 10 ± 1 mm였다. 매 측정 2일전 시료를 desiccator에 넣어 수분함량을 $4.32 \pm 0.14\%$ 로 조절한 후 사용하였다.

밀도

크기가 균일한 cocoa bean을 몇 개씩 무게를 재고 좁

Corresponding author: Suk Shin Kim, Department of Food Science and Nutrition, The Catholic University of Korea, 43-1 Yokkok-2-dong, Wonmi-gu, Puchon City, Kyonggi-do 420-743, Korea (032-340-3316, kimss@www.cuk.ac.kr)

쌀을 이용하여 부피를 측정 한 후 밀도를 계산하였다.

수분 함량

분쇄한 시료를 미리 항량을 구한 칭량병에 2 g씩 취해 105°C의 drying oven에서 4시간 건조한 후 desiccator에서 45분간 방냉하여 무게를 측정하였다. 항량에 이를 때까지 위의 방법을 반복하여 수분함량을 구하였다.

비열

분쇄한 cocoa bean을 60 mesh(0.25 mm)의 체로 균일하게 사별한 다음 differential scanning calorimeter (Netzsch, DSC 200cell, Germany)를 이용하여 측정하였으며 -10°C~170°C의 온도 범위에서 5°C 간격으로 data를 수신하였다.

온도 조건

Cocoa bean의 온도 조건에 따른 유전 특성 변화를 살펴보고자 전자 렌지(삼성전자, RE-490F)를 이용하여 원하는 온도로 가온한 후 측정하였다. 즉 100°C 이하의 온도 조건인 25°C, 35°C, 40°C, 60°C 및 80°C와 100°C 이상의 온도 조건인 110°C, 120°C, 130°C, 140°C 및 150°C에서 측정하였다. 이 때 cocoa bean의 내부 온도는 Chromel-Alumel 열전쌍 온도계(K type, Hanna, HI 9153K, Italy)를 사용하여 측정하였다.

유전 특성

Cocoa bean의 유전 특성은 open-ended coaxial probe 법(홍석인 등, 1996)으로 300 MHz~3 GHz 범위에서 측정하였다. 사용한 장비는 network analyzer(Hewlett Packard, HP 8753C, USA), s-parameter test set (Hewlett Packard, HP85046A, USA), dielectric probe kit(Hewlett Packard, HP85070A), plotter와 PC로 구성되었으며, 장비의 보정은 load/air/short 방법을 적용하였다. Cocoa bean의 외피에 open ended probe(3.6 mm)를 완전히 밀착시켜 시료와 probe 사이에 공기가 침입하지 않도록 한 상태에서 4회이상 반복하여 측정하였으며 측정 결과를 text file로 수신하여 통계 처리하였다.

침투 깊이

마이크로파 침투 깊이(penetration depth, Z)는 유전 특성에 따라 좌우되는 변수로서 다음 식을 이용하여 계산하였다(Mudgett, 1986).

$$Z(m) = \frac{\lambda}{2\pi} \sqrt{\frac{2}{\epsilon' \times (\sqrt{1 + \tan^2 \delta} - 1)}}$$

여기서 Z는 침투깊이(m)를, $\tan \delta$ 는 ϵ''/ϵ' 의 비율 가 르키며 이는 전자장에 대한 투과능과 전기 에너지를 열 에너지로 소모할 수 있는 능력과 관계가 있다. λ 는 대기 에서 전자기파의 파장(m)으로서 $\lambda = C_0/f$ (이때 $C_0 = 3 \times 10^8$ m/s, f = 사용 주파수, Hz)이다.

결과 및 고찰

100°C 이하의 온도범위에서의 유전특성의 변화

유전특성은 전기 에너지에 대해 어떤 물질이 갖는 특성으로 일반적으로 유전 상수(dielectric constant, ϵ')와 손실 계수(loss factor, ϵ'')를 말한다. 유전 상수는 물질이 전기적 에너지를 저장할 수 있는 능력과 관계 있고, 손실계수는 전기적 에너지를 소실(dissipate)할 수 있는 능력을 측정하는 수단으로 사용하며, loss tangent는 손실계수/유전상수, 즉 ϵ''/ϵ' 로 구해진 값으로서 전기장에 대한 투과능과 전기 에너지를 쓸 수 있는 능력과 관계가 있다(Tinga와 Nelson, 1973).

식품의 유전 특성(dielectric property)에 미치는 온도의 영향은 아직까지 명확하게 밝혀지지 않았으나 Schiffmann(1996)에 의하면 순수한 물의 경우 0°C 이상의 온도에서는 온도가 증가할수록 유전 상수와 손실 계수가 감소하고, 수분 함량이 높은 식품에 있어서도 물과 마찬가지로 온도 증가에 따라 유전 상수 및 손실 계수 값이 감소하는 것이 일반적인 현상으로 되어 있다. 그러나 햄, 소시지 등 염분이 높은 식품은 이온 전도(ionic conduction)의 영향으로 온도가 증가할수록 유전 특성 값이 급격히 상승한다(Mudgett, 1986). 이와 같이 유전특성은 마이크로파 가열을 이용하기 위해서 반드시 필요한 정보이며 구성 성분과 주변 조건에 의해 좌우되므로 식품가공에 마이크로파를 활용하기 위해서는 이를 측정할 필요가 있다.

Table 1은 온도에 따른 cocoa bean의 유전특성 변화를 측정 한 결과이다. 이 때 사용한 cocoa bean의 크기는 나비 14~15 mm, 두께 7~11 mm, 길이 22~27 mm로 크기에 따른 유전특성 값의 차이는 나타나지 않았다. 전체적인 경향을 살펴보면 915 MHz보다 2450 MHz에서의 측정값이 상대적으로 낮았으며 915 MHz의 경우 35°C에서 유전 상수와 손실 계수 값이 갑자기 증가하는 것을 관찰할 수 있었다(Fig. 1, Fig. 2). 이것을 DSC로 측정 한 비열 값(Table 1)과 비교해보면 35°C의 온도에서 비열이 증가하는 것을 볼 수 있었다. 이는 cocoa bean을 구성하는 주 구성성분 중의 하나인 cocoa butter의 녹는점이 30~34°C라는 것에 비추어 볼 때 상변화가 일어나 유전특성에 반영된 것으로 추측된다. Pace 등은 상업적으로 판매되고 있는 oil과 fat의 유전특성을 측정하

Table 1. Dielectric properties of cocoa beans at various temperatures

Temperature (°C)	Density (kg/m ³)	CP ¹⁾ (kJ/kgK)	915 MHz			2450 MHz		
			ϵ'' ²⁾	ϵ'' ³⁾	dp ⁴⁾ (m)	ϵ'	ϵ''	dp (m)
25	1.5144		3.7664±0.2248	0.4675±0.0455	0.4302±0.0309	2.7653±0.1073	0.0839±0.0059	0.8293±0.0581
35	8.4393		6.2773±0.2648	1.546±0.5067	0.1797±0.0554	3.0329±0.1278	0.0577±0.0196	1.4389±0.1528
40	0.6823		2.3793±0.1310	0.5433±0.0251	0.2947±0.0212	2.9143±0.2941	0.02875±0.0155	1.4143±0.2393
60	0.3620		2.1935±0.4745	0.5502±0.0415	0.2783±0.0087	3.0107±0.1152	0.0249±0.001	2.4252±0.5255
80	0.8495	0.6354	4.0155±0.1500	0.4493±0.0378	0.4622±0.0345	3.2814±0.1186	0.0058±0.0017	11.3444±3.8457
110	1.5375		6.6893±0.0622	2.7894±0.0546	0.098±0.0022	4.9230±0.1112	0.2259±0.008	0.3853±0.0093
120	1.9085		5.8425±0.2901	1.0437±0.0128	0.2395±0.0088	4.1625±0.5624	0.1573±0.0122	0.3693±0.0178
130	2.3424		7.8994±0.8032	1.1776±0.0602	0.247±0.025	5.3178±0.0468	0.1331±0.0069	0.6804±0.032
140	2.7320		3.9542±0.0706	1.588±0.0526	0.1315±0.0031	2.1715±0.0884	0.7760±0.1949	0.0778±0.0175
150	2.9299		0.8860±0.2348	5.4175±0.6565	0.0341±0.0031	1.3071±0.0219	0.4862±0.0385	0.0915±0.0098

¹⁾ Specific heat.

²⁾ Dielectric constant (ϵ').

³⁾ Loss factor (ϵ'').

⁴⁾ Penetration depth.

여 이들간에 나타나는 유전특성의 차이는 물질의 상(phase)에 기인한 것으로 보고하였다. 또한 홍 등(1996)의 결과에서도 수삼을 절단하여 측정된 유전상수가 온도에 따라서 증가하다가 67°C에서 급격히 감소하는 경향을 보였으며 이는 전분의 호화로 인한 상전이(phase transition) 때문으로 보고한 바 있다. 유전상수의 경우 2450 MHz에서는 915 MHz의 경우와 마찬가지로 35°C에서 상승을 보이는 반면 손실계수는 거의 변화가 없는 것을 관찰할 수 있었다.

100°C 이상의 온도 범위에서의 유전 특성

100°C보다 높은 온도범위에서의 경향은 915 MHz의 경우 유전 상수 값이 130°C에서 갑작스런 상승을 보일 뿐 그 이후의 온도에서는 점차 감소하는 경향을 보이며 이것은 2450 MHz의 경우와도 일치한다(Fig. 3). 손실계수 값에 있어서는 915 MHz의 경우 150°C의 경우를 제외하면 110°C에서 감소 후 그 이외의 온도에서 약간의 증가를 보이지만 유의적이진 않았다(Fig. 4). 그러나 915 MHz에서 볼 수 있었던 150°C에서의 손실 계수값의 상승은 2450 MHz에서

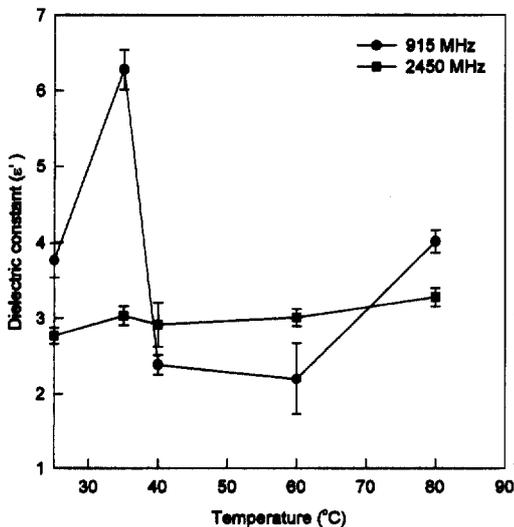


Fig. 1. Dielectric constant (ϵ') of cocoa beans at 915 and 2450 MHz as a function of temperature below 100°C.

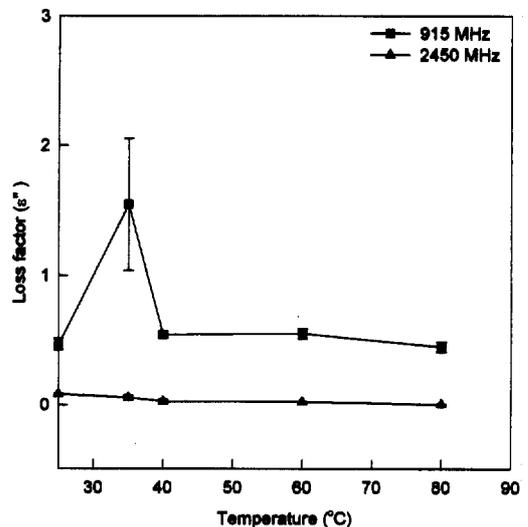


Fig. 2. Loss factor (ϵ'') of cocoa beans at 915 and 2450 MHz as a function of temperature below 100°C.

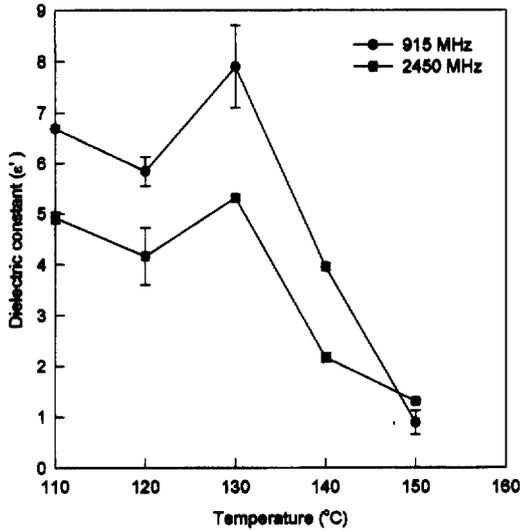


Fig. 3. Dielectric constant (ϵ') of cocoa beans at 915 and 2450 MHz as a function of temperature above 100°C.

는 볼 수 없었다. 일반적으로 수분이 많을수록 손실계수가 상승하고 마이크로파 내에서의 가열도 더 잘된다. 그런데 cocoa bean은 수분함량이 4.32%로 낮은 편이며 또한 100°C 이하에서는 손실계수는 가열이 진행됨에 따라 거의 변화를 보이지 않았다. 그러나 실제로는 마이크로파에 의해 매우 가열이 잘되었는데 이는 cocoa bean이 함유하고 있는 유지의 발열 특성과 관계가 있다고 생각된다. 즉 비극성 분자라 해도 마이크로파장내에서 극성이 유도된다(Rosenthal, 1992). 일반적인 상태에서 전기적으로 평형을 이룬 구조를 가지고 있지만 전기장 내

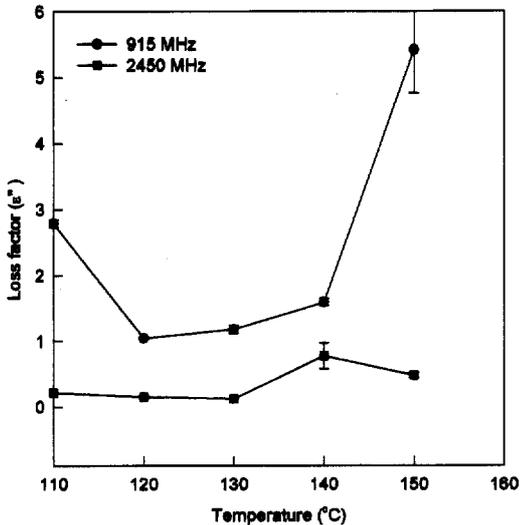


Fig. 4. Loss factor (ϵ'') of cocoa beans at 915 and 2450 MHz as a function of temperature above 100°C.

서는 분극이 일어나게 된다. 이 기작은 마이크로파로부터 기름과 fatty tissue로의 에너지 전이를 설명할 수 있다. 또한 기름의 경우 물에 비해 유전상수와 손실계수가 매우 작다($\epsilon' < 3$, $\epsilon'' < 0.1$). 그러나 실험상의 결과를 보면 온도상승이 물에 비해 매우 빨리 일어난다. 이는 기름의 비열이 작기 때문이다(Schiffmann, 1986). Cocoa bean의 경우도 이런 유지의 발열 특성에 영향을 받은 것으로 생각된다.

온도에 따른 침투 깊이의 변화

침투깊이는 마이크로파 에너지가 표면값의 $1/e$ 로 감소되는 즉 63%의 에너지를 소모하는 거리로서 마이크로파 가열 양상을 결정하는 주요 인자이다(Mudgett, 1986). 100°C 이하의 온도의 경우 915 MHz에서는 상온(25°C)에서 침투깊이가 0.4302 m였으나 온도가 상승함에 따라 점차 감소하였다(Fig. 5). 특히 35°C에서는 0.1797 m로서 가장 작은 침투 깊이를 나타냈고 2450 MHz의 경우 상온(25°C)에서는 0.8293 m로 915 MHz의 경우와 비교할 때 2배가량 큰 값을 보인다. 이는 일반적으로 파장이 길수록 투과도가 높다는 것과 일치하지 않는다. 이것은 시료 자체의 특성이 반영된 것으로 추측된다. 즉 cocoa bean의 표면을 차지한 껍질이 내부의 nib과 재질이 달랐다는 점이다. Nib을 구성하고 있는 지방이 가온이 됨에 따라 껍질로 전이되는 한편 nib과 껍질 사이에 공간이 생겨 결국 이중막의 구조를 갖게 된다. 이 결과 두 층사이에서 마이크로파의 반사가 일어나는데 이때 층의 두께에 의해 좌우되며 주파수간의 차이는 파장의 길이와 관계가 있다(Rosenthal, 1992). 파장이 길수록 반사되는 양

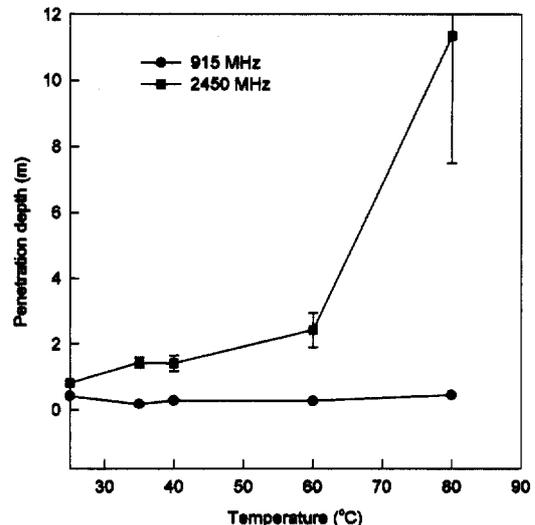


Fig. 5. Penetration depth of cocoa beans at 915 and 2450 MHz as a function of temperature below 100°C.

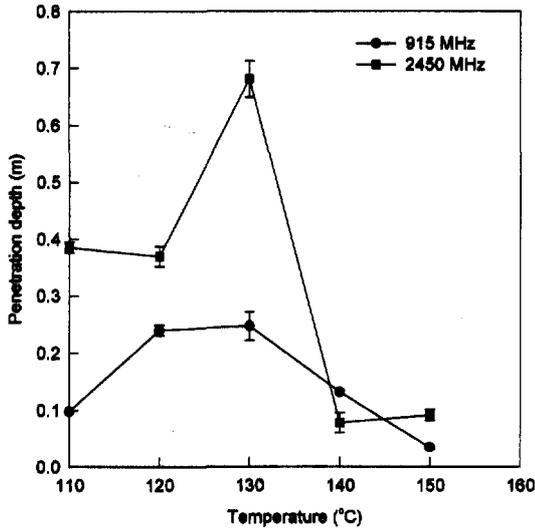


Fig. 6. Penetration depth of cocoa beans at 915 and 2450 MHz as a function of temperature above 100°C.

이 적다. 이런 까닭으로 껍질이 가온이 되면서 침투 깊이는 점점 커져 80°C에서 11 m의 침투 깊이를 나타낸 것으로 생각된다.

100°C보다 높은 온도에서는 두 주파수에서 모두 온도 상승에 따라 침투 깊이가 감소하였다(Fig. 6). 150°C의 경우 915 MHz에서 0.034 m로 감소하였고 2450 MHz는 0.091 m로 감소하였다. 이는 유전상수의 증가와 손실계수의 감소에 기인된 것으로 보이며 가열에 의해 수분이 소실되고 cocoa bean 자체의 온도가 높기 때문에 마이크로파에 의한 발열이 점점 줄어들었기 때문이라 생각된다.

이러한 변화는 온도 상승에 따라 수분의 소실과 cocoa butter의 용융, 구성성분의 변화에 의해서 일어난 것으로 보이며 마이크로파를 이용한 cocoa bean roasting에 있어서 온도 변화에 따라 마이크로파 내에서의 시료의 두께를 적절히 조절해야 함을 시사하는 결과로 해석된다. 즉 약 4%의 수분을 가진 시료의 경우 시료 두께는 40 cm 이하가 되어야 시료 부위별 온도 차이를 극소화시킬 수 있다고 판단되었다.

결 론

마이크로파 내에서 cocoa bean의 발열 특성은 cocoa bean의 주 구성 요소인 cocoa butter의 발열 특성을 반영하며 수분함량이 적고 껍질을 갖고 있는 이중 구조로 껍질과 내부의 성분이 다르고 가온됨에 따라 껍질과 mb

의 분리가 이루어져 예외적인 특성을 보인 것으로 추측된다. 즉 915 MHz보다 2450 MHz에서의 침투깊이가 더 큰 값을 나타내었다.

요 약

마이크로파를 이용한 cocoa bean의 roasting system 설계와 관련지어 cocoa bean의 유전적 성질에 대한 기본 자료를 얻고자 open-ended coaxial probe법을 이용하여 온도 조건에 따른 유전 특성 변화를 측정하였다. Malaysia산 cocoa bean을 선별하여 사용하였으며 cocoa bean의 대략적인 크기는 길이 25±1 mm, 나비 14±1 mm, 두께 10±1 mm, 수분함량은 4.32±0.14%였다. 밀도와 비열을 측정하였고 측정된 유전상수와 손실계수로 침투깊이를 계산하였다. 100°C 이하의 온도범위에서 유전상수는 915 MHz와 2450 MHz의 경우 모두 35°C에서 증가하였지만 손실계수는 2450 MHz의 경우 거의 증가하지 않았다. 100°C보다 높은 온도범위에서의 경향은 915 MHz의 경우 유전 상수 값이 130°C에서 갑작스런 상승을 보일 뿐 그 이후의 온도에서는 점차 감소하는 경향을 보이며 이것은 2450 MHz의 경우와도 일치한다. 손실계수 값에 있어서는 915 MHz의 경우 150°C의 경우를 제외하면 110°C에서 감소 후 그 이외의 온도에서 약간의 증가를 보이지만 유의적이진 않았다. 100°C 이하의 온도의 경우 915 MHz에서는 상온(25°C)에서 침투깊이가 0.4302 m였으나 온도가 상승함에 따라 점차 감소하였다. 100°C보다 높은 온도에서는 두 주파수에서 모두 온도 상승에 따라 침투 깊이가 감소하였다.

문 헌

- 홍석인. 1996. 마이크로파 가열특성. 식품기술 9(1): 144-150
 홍석인, 이부용, 박동준, 오승용. 1996. 수삼의 마이크로파 유전특성. 한국식품과학회지 28(3): 470-473
 Giese, J. 1992. Advances in microwave food processing. *Food Technol.* 46(9): 118-122
 Mudegett, R. E. 1985. Dielectric properties of foods. In *Microwave in the Food Processing Industry*. Academic press, pp15-37
 Mudegett, R. E. 1986. Microwave properties and heating characteristics of foods. *Food Technol.* 40(6): 84-93
 Rosenthal, I. 1992. Microwave radiation. In *Electromagnetic Radiations in Food Science*. Advanced Series in Agricultural Science, AVI, N.Y., 19, pp146-152
 Schiffmann, R.F. 1986. Food product development for microwave processing. *Food Technol.* 40(6): 94-98
 Tinga, W. R. and S. O. Nelson, 1973. Dielectric properties of materials for microwave processing-tabulated. *J. Microwave Power* 8(1): 23-65