

고주파 임피던스를 이용한 곡류의 함수율 측정에 관한 연구 (I)

- 곡류의 전기적 특성 구명 -

Measurement of Grain Moisture Content using RF Impedance (I)

- Electrical Properties of Grain -

김기복* 노상하*
정회원 정회원
K. B. Kim S. H. Noh

ABSTRACT

The electrical properties such as dielectric constant, dielectric loss factor and AC conductivity of grain were presented to measure the moisture content of grain using RF impedance. At frequency ranging from 1 to 10MHz and room temperature, 20°C, vector network analyzer(HP4195) and coaxial type sample holder were used to analyze the electrical properties of paddy(11~24%w.b.), brown rice(11~18%w.b.), barley(11~21%w.b.) and wheat(11~23% w.b.) depending on the moisture content, frequency and bulk density. The dielectric constant and AC conductivity of grain samples increased with moisture content and bulk density. The dielectric constants decreased with frequency and could be expressed as function of the moisture density(decimal moisture content × bulk density).

주요용어(Key Words): 유전상수(Dielectric constant), 유전손실(Dielectric loss factor), 교류 전기전도도(AC conductivity), 고주파 임피던스(RF impedance), 함수율(Moisture content), 산물밀도(Bulk density)

1. 서 론

식품 및 농산물의 전기적인 특성에 관한 연구는 주로 유전체적 성질을 이용한 함수율 측정이나 가열·살균 등에 대한 기초연구로서 진행되어 왔으며 이러한 전기적 특성으로는 전기전도도, 정전용량, 유전 특성, 전자기적 특성 등이 있으며 이들 특성으로부터 식품이나 농산물 등의 물성을 일부 파악할 수 있다. 식품 및 농산물은 그 성분의 조성상 + 및 -의 전하를 가지는 미립자로 구성되어 있는데 교류전기장에 이들 물질이 놓여질 때 가해지는 전기장의 변화에 따라 전기적인 분극이 발생하게 된다. 이러한 분극이 전기장의 변화속도보다 느리게 되면 시료는

절연체적 성질을 띄게 되는데 이러한 현상은 식품 및 농산물의 수분의 양 또는 조성성분의 불균일 때문에 발생하기도 하며 전기적 분극 현상에 따라 가해지는 전자기장의 주파수에 따라 진동하면서 마찰하게 된다. 식품 및 농산물과 달리 순수한 물의 유전상수가 가장 높은 값을 가지는데 이것은 물의 경우 산소 한 원자와 수소 두 원자가 비대칭 구조로 결합하여 +, - 극이 존재하는 것과 같은 구조를 이루고 있어 수분을 함유한 유전체가 전기장에 놓여지면 이러한 쌍극자들은 전기장의 방향으로 배열되면서 발생하는 쌍극자 모멘트(dipole moment)가 식품 및 농산물의 수분 외 다른 성분보다 매우 크기 때문이다.

식품 및 농산물의 유전특성 측정은 측정주파수와

* 서울대학교 농업생명과학대학 생물자원공학부 농업기계전공

샘플홀더 등에 따라 여러 가지 측정방법이 있는데 농산물이 채워진 샘플홀더의 임피던스를 Q-meter 등을 이용하여 유전 특성을 구하는 방법이 주로 사용된다(Nelson, 1952, 1965, Whitney, 1967). 수분을 함유한 식품 및 농산물이 교류 전기장에 놓여질 때 콘덴서와 저항으로 이루어진 병렬 등가회로로 표현될 수 있으며 이때 유전상수는 복소수로서 식 (1)과 같이 표시되며(Nelson, 1965) 교류 전기장 하에서 유전체가 에너지를 저장하는 능력을 나타냄과 동시에 정전용량식 함수율 측정장치를 개발하기 위한 기초 데이터가 된다.

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'' \dots\dots\dots (1)$$

여기서, ϵ = 복소 상대유전상수
 ϵ' = 유전상수
 ϵ'' = 유전손실

유전손실은 유전체가 전기장에 놓여져 있을 때 손실되는 열에너지에 관계되며 이러한 손실을 나타내는 지수로 손실탄젠트를 다음과 같이 정의하며 유전손실은 유전체의 전기전도도 또는 비저항의 함수로 식 (2) 및 (3)과 같이 표시된다.

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \dots\dots\dots (2)$$

$$\sigma = 2\pi f \epsilon_0 \epsilon'' \dots\dots\dots (3)$$

여기서, σ = 교류 전기전도도($(\Omega m)^{-1}$)
 f = 주파수(Hz)
 ϵ_0 = 진공에서의 유전율(8.854×10^{-12} F/m)
 δ = 손실각(degree)

Nelson 등(1952, 1965)은 Q-meter를 이용하여 1~50MHz에서 샘플홀더의 리액턴스 변화를 이용하여 보리, 밀, 옥수수 등의 유전상수, 유전손실, 전기전도도 등을 측정하였다. Whitney (1967)는 Q-meter를 이용하여 1~50MHz 범위에서 peanuts의 유전특성을 조사하였는데 유전상수는 함수율에 따라 증가하나

주파수에 따라 감소하였으며 유전손실에 대한 경향은 뚜렷하게 나타나지 않았다. Noh와 Nelson(1989, 1992)은 5MHz~12GHz 범위에서 곡류 등의 유전상수를 예측하기 위한 통계적 모델을 개발하였으며 모델의 변수로는 주파수, 함수율, 산물밀도, 온도 등이며 3~5%의 오차가 있다고 하였다.

유전특성 및 교류 전기전도도는 전기장에 인가되는 주파수의 함수이고 식품 및 농산물의 형상, 함수율에 따라 그 값이 변하므로 각종 식품 및 농산물의 가공이나 함수율 측정에 이러한 성질을 이용할 수 있다. 외국의 경우 이러한 유전특성 측정에 관한 많은 연구가 이루어지고 있으나 국내의 경우 이에 대한 연구는 거의 미미한 실정이며 또한 외국의 식품 및 농산물을 대상으로 구명된 전기적 특성들을 이용하기에는 다소 무리가 따를 것으로 사료된다. 이에 따라 국내의 품종에 대한 전기적 특성의 구명이 필요하다고 판단된다. 고주파를 이용한 함수율 측정 주파수는 주로 1MHz 및 5MHz의 주파수가 이용되어 왔다(Kandala et al., 1990, 1991).

따라서 본 연구는 1~10MHz의 측정 주파수에서 국내산 곡류들을 대상으로 하여 함수율을 측정하기 위한 기초 연구로서 함수율, 산물밀도 등에 따른 전기적인 특성 값들인 유전상수, 유전손실, 교류 전기전도도 등에 대한 기초자료를 제시하기 위하여 수행되었으며 기존의 발표된 전기적 특성 값들과 비교하였다.

2. 재료 및 방법

가. 공시재료

본 연구에서 사용된 공시재료 중 벼는 서울대학교 농업생명과학대학 부속농장에서 1996년에 수확된 단립종인 화성과 일품(11~24%w.b.), 중립종인 밀양23호(12~24%w.b.)를 정선기로 정선한 후, 사용하였으며 이들 중 화성과 일품벼를 시험용현미기(SATAKE, JAPAN)로 탈부하여 현미(11~18%w.b.)로 만들었으며 농촌진흥청 작물시험장에서 1996년에 수확된 보리(진양, 11~21%w.b.) 1품종, 밀(울그루, 11~23%w.b.) 1품종을 공시재료로 사용하였다.

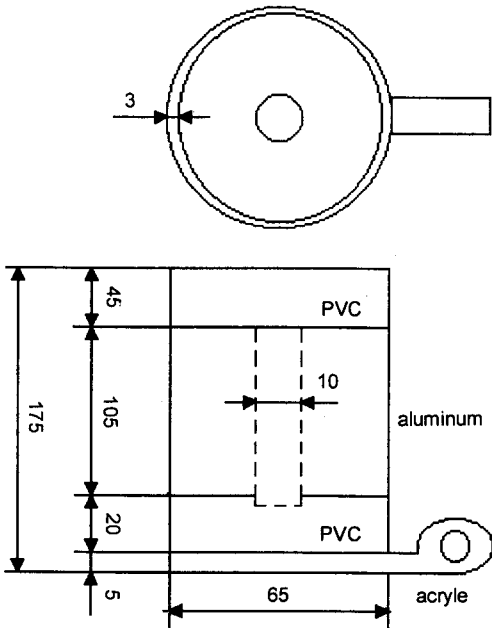


Fig. 1 Dimension of coaxial type sample holder.

나. 샘플홀더 설계 및 제작

Mathews(1963)는 극판의 재료를 알루미늄으로 하여 평행판과 원판형 전극의 크기에 대하여 연구한 결과, 씨앗에 대해서는 극판의 체적이 20~24cm³가 가장 적당하고 극판 간격은 최대 곡물 크기의 2배 이상이 되어야만 브릿지 현상을 방지할 수 있다고 하였다. 한편 Field(von Hippel, 1954a)에 의하면 극판 구조는 진공에서 용량값의 계산이 가능한 형상이어야 하며 극판의 가장자리 부분의 영향 때문에 이론적인 용량보다 실제 용량이 더 크다고 하였다. 따라서 본 연구에서는 이상의 내용을 고려하여 샘플홀더를 동축형으로 하여 그림 1과 같이 설계·제작하였다. 전극부의 체적은 223.12cm³로 하였으며 샘플홀더의 이론적인 정전 용량값은 3.424pF로 계산되었다.

다. 고주파 임피던스 측정 시스템

샘플홀더의 고주파 임피던스 측정시스템은 그림

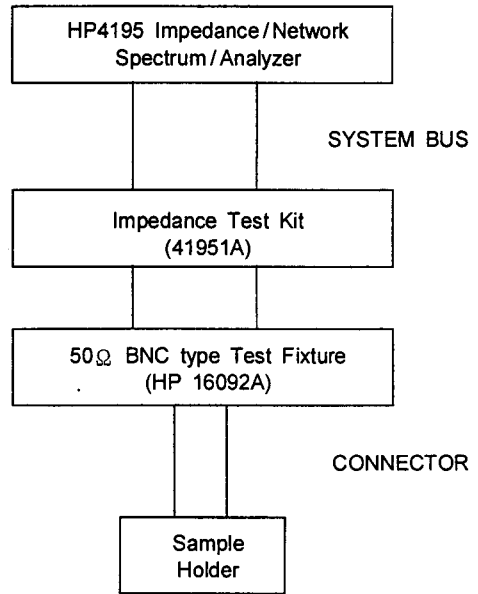


Fig. 2 Block diagram of the impedance measurement system.

2에서 보는 바와 같이 100kHz~500MHz의 측정범위의 회로망 분석기(HP4194A)와 Impedance Test Kit (HP41941A), Test Fixture(HP16092) 및 샘플홀더로 구성하였다.

라. 샘플홀더 분석 및 곡류의 전기적 특성 측정

일반적으로 상대 유전상수는 시료가 채워지는 커패시터(샘플홀더)의 정전용량과 시료가 없을 때의 정전 용량의 비로 식 (4)와 같이 나타낸다.

$$\epsilon' = \frac{C}{C_0} \dots\dots\dots (4)$$

여기서, C = 시료가 채워진 커패시터의 정전 용량(pF)

C₀ = 시료가 없을 때의 커패시터의 정전 용량(pF)

그러나, 식(4)는 커패시터가 손실이 없는 이상적인 경우이며, Field(von Hippel, 1954)가 밝혔듯이 실

Table 1 Capacitance of sample holders in frequency range of 0.5 to 30MHz

Frequency (MHz)	0.5	1	5	10	15	20	25	30
Capacitance (pF)	7.74	7.77	7.84	7.86	7.89	7.91	8.01	8.11

제의 커패시터는 가장자리 부분의 영향 때문에 이론적인 값보다 측정값이 더 크게 나타난다고 하였다. 측정된 샘플홀더의 용량은 표 1에서 보는 바와 같이 약 2배 정도로 크게 나타나고 있다. 이러한 차이는 샘플홀더의 가장자리의 영향뿐만 아니라 기계적 가공의 정밀도 등에 따라 샘플홀더에 존재하는 부유용량(浮遊容量)의 영향 때문인 것으로 생각되며 따라서 식(4)를 이용하여 유전특성을 구하면 매우 큰 오차가 발생할 것으로 판단된다.

또한, 주파수 증가에 따른 샘플홀더의 용량은 조금씩 증가하는 경향을 보이고 있으나 1~10MHz 범위에서 비교적 그 변이가 작게 나타나고 있으므로 유전특성의 측정은 1~10MHz의 주파수를 이용하였으며 이러한 주파수 범위는 외국의 경우 곡류와 같은 농산물의 함수율 측정에 많이 이용되는 주파수이다(Kandala et al. 1990, 1991).

유전상수의 측정방법은 식 (5)에 나타난 바와 같이 먼저 샘플홀더에 존재하는 부유용량(浮遊容量)의 영향을 배제하기 위하여 샘플홀더에 곡류를 일정한 높이(h₁) 만큼 채운 다음 이때의 용량(C₁)을 측정하고 다시 그 위에 높이가 h₂가 될 때까지 곡류를 채워 넣을 때의 용량(C₂)를 측정하여 각각의 시료가 채워진 높이에 따른 용량차이를 이용하여 유전상수를 계산하는 방법을 이용하였다. 이 방법은 Nelson(1965)과 Stetson(1972) 및 다수의 연구자가 Q-meter를 이용하여 50MHz 이하의 주파수에서 유전특성을 측정하는데 사용한 방법으로써 본 연구에서는 Q-meter 대신 회로망 분석기를 이용하여 상기의 방법을 응용하여 유전상수를 구하였으며 유전상수가 2.28~2.3인 벤젠을 이용하여 검증한 결과 시료의 높이 차가 4.6~6.4cm일 때 벤젠의 유전상수를 정확하게 계산할 수 있는 것으로 분석되었다.

$$\epsilon' = \frac{\ln(d_o/d_i)}{2\pi\epsilon_o} \frac{\Delta C}{\Delta h} + 1 \dots\dots\dots (5)$$

$$\begin{aligned} \text{여기서, } \Delta C &= C_2 - C_1 \\ \Delta h &= h_2 - h_1 \end{aligned}$$

유전손실의 측정은 기존의 Q-meter를 이용하는 방법(Nelson, 1965, Stetson et al., 1972)을 회로망 분석기에 응용하여 시료자체만의 손실계수(D)를 구한 다음 식 (5)에서 구해진 유전상수를 이용한 식(6)으로 유전손실을 계산하였다.

$$\begin{aligned} \epsilon'' &= \epsilon' \tan \delta \\ &= \epsilon' D \\ &= \epsilon' \frac{C_2 D_2 - C_1 D_1}{C_2 - C_1} \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

여기서, D = 시료의 높이차에 따른 시료자체의 손실계수

D₁ = 시료의 높이가 h₁일 때의 손실계수

D₂ = 시료의 높이가 h₂일 때의 손실계수

교류 전기전도도는 식(6)에서 구해진 유전손실을 식(3)에 대입하여 구하였으며 식(3)을 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\sigma = 2\pi f \epsilon_o \epsilon'' \dots\dots\dots (3)$$

3. 결과 및 고찰

가. 함수율 및 측정 주파수에 따른 각 곡류의 전기적 특성

산물밀도의 범위를 화성 비의 경우 0.640~0.693g/cm³, 밀양23의 경우 0.640~0.649g/cm³, 현미의 경우 0.862~0.884g/cm³, 보리의 경우 0.752~0.766g/cm³, 밀의 경우 0.745~0.764g/cm³의 수준에서 함수율에 따른 각 곡류의 유전상수, 유전손실, 교류 전기전도도를 나타낸 결과 그림 3~그림 7에서 보는 바와

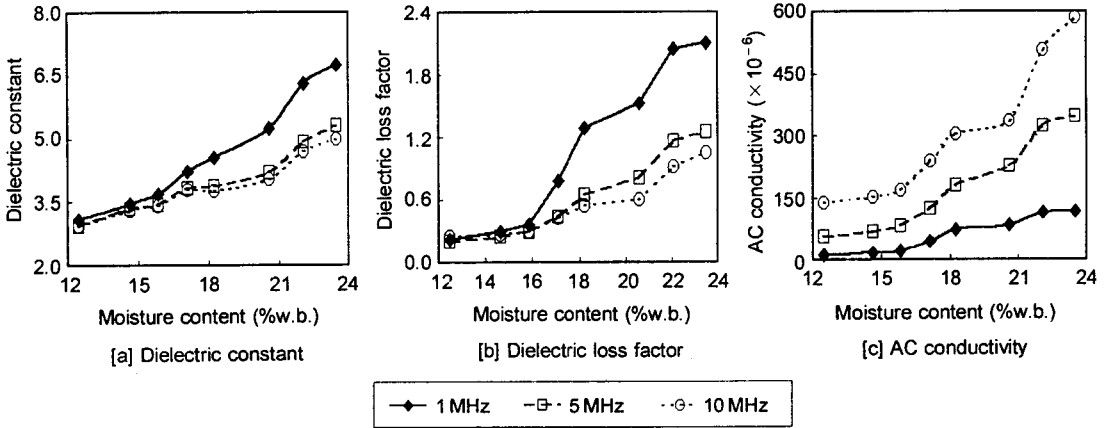


Fig. 3 Moisture content and frequency dependences of the electrical properties of Hwasung rough rice at room temperature, $20 \pm 0.5^\circ\text{C}$.

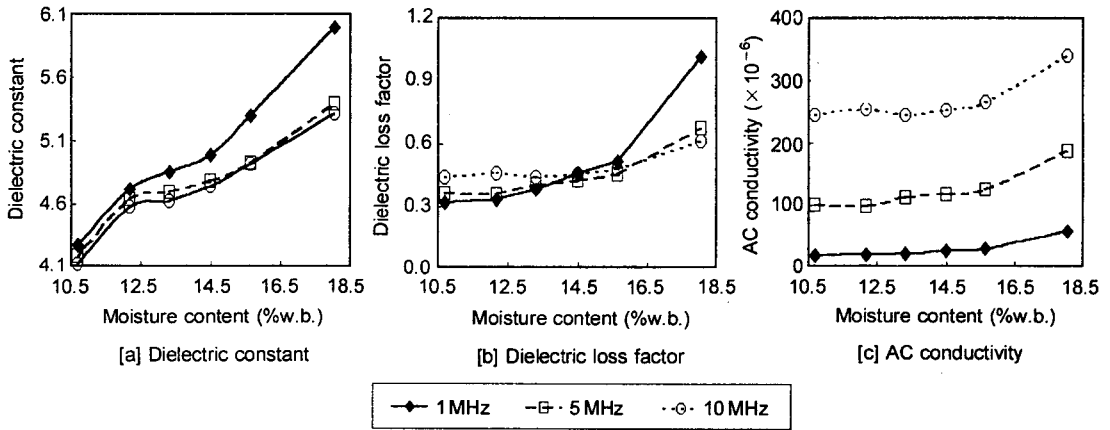


Fig. 4 Moisture content and frequency dependences of the electrical properties of Ilpoom brown rice at room temperature, $20 \pm 0.5^\circ\text{C}$.

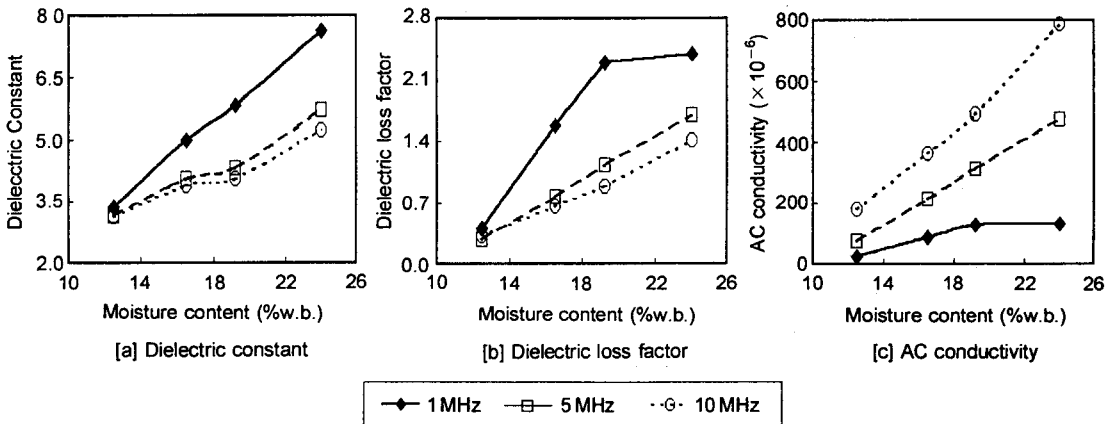


Fig. 5 Moisture content and frequency dependences of the electrical properties of Milyang23 rough rice at room temperature, $20 \pm 0.5^\circ\text{C}$.

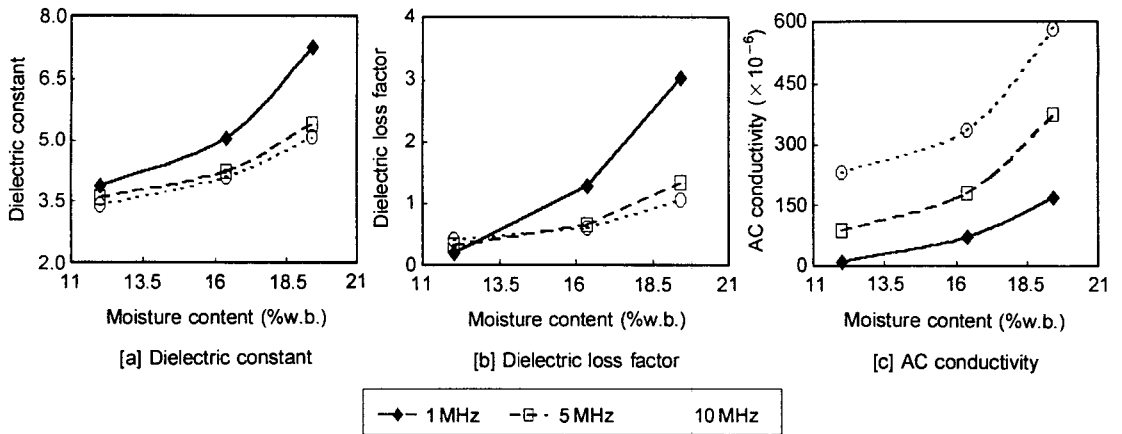


Fig. 6 Moisture content and frequency dependences of the electrical properties of Jinyang barley at room temperature, $20 \pm 0.5^\circ\text{C}$.

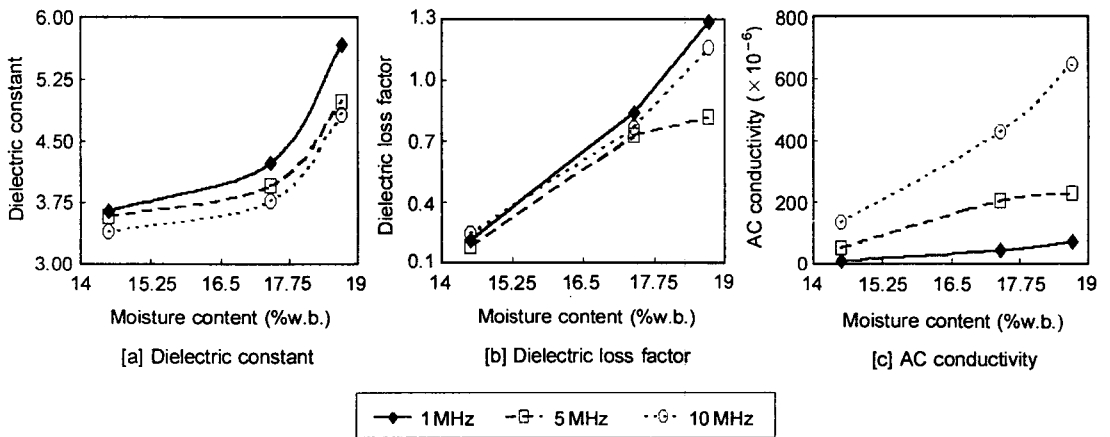


Fig. 7 Moisture content and frequency dependences of the electrical properties of Olgroo wheat at room temperature, $20 \pm 0.5^\circ\text{C}$.

같이 대체적으로 증가하는 경향을 나타내었다. 이러한 경향은 샘플홀더내 시료의 함수율 증가에 따라 극성 물질인 수분의 양이 증가하기 때문에 시료의 유전특성에 큰 영향을 미치는 것으로서 기존의 여러 연구결과들과 유사한 결과를 나타내었다. 한편 유전상수의 경우 주파수가 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내었으며 교류 전기전도도의 경우는 주파수에 따라 증가하는 경향을 나타내었다.

나. 산물밀도에 따른 각 곡류의 전기적 특성

샘플홀더내 시료의 산물밀도는 샘플홀더에 시료를 자연스럽게 투입한 상태, 샘플홀더를 1~2회 흔들어 주면서 시료를 투입한 상태, 샘플홀더내 시료를 인위적으로 눌러 다지는 3가지 방법을 이용하여 산물밀도를 변화시켰다. 산물밀도에 따른 각 곡류의 전기적 특성은 5MHz의 측정주파수를 중심으로 하여 분석하였으며 그림 8~그림 12에서 보는 바와 같다. 여기서 교류 전기전도도의 경우는 식(3)에서 정의된 바와 같이 유전손실의 함수로 나타내므로 유전손실의 경향과 동일한 특성을 나타내므로 분석에서 제외하였다. 분석결과 유전상수의 경우 산물밀도에

따라 증가하는 경향을 나타내었으며 다른 주파수 대역에서도 마찬가지로 동일한 결과를 나타내었는데 이러한 이유는 산물밀도가 증가할 경우 단위체적당 수분의 양이 증가하기 때문에 이러한 수분의 증가가 유전상수에 영향을 미치게 된다. 그러나 유전손실의 경우 산물밀도에 따라 증가하는 경향이 뚜렷하지 않은 것으로 나타났는데 이러한 경향

은 곡류를 대상으로 한 기존의 여러 문헌의 연구 결과(Nelson, 1965, Sokhansanj, 1988)와 거의 일치하는 결과이다. 따라서 전기적인 특성을 이용하여 곡류의 함수율을 측정하기 위해서는 시료의 산물밀도의 영향을 반드시 보정해야 할 것으로 판단된다.

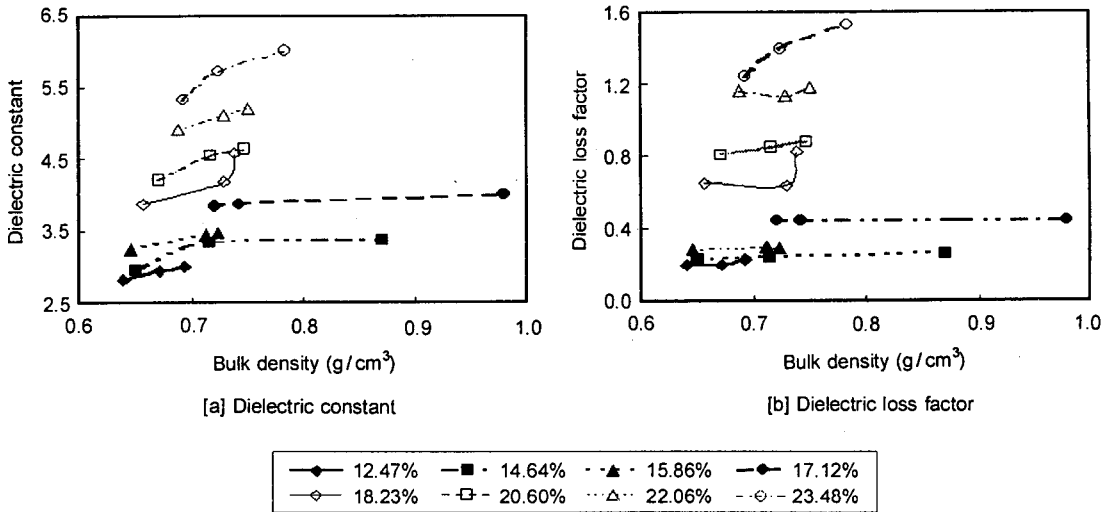


Fig. 8 Bulk density dependence of the dielectric properties of Hwasung rough rice at the indicated moisture contents (5MHz and room temperature, $20 \pm 0.5^\circ\text{C}$).

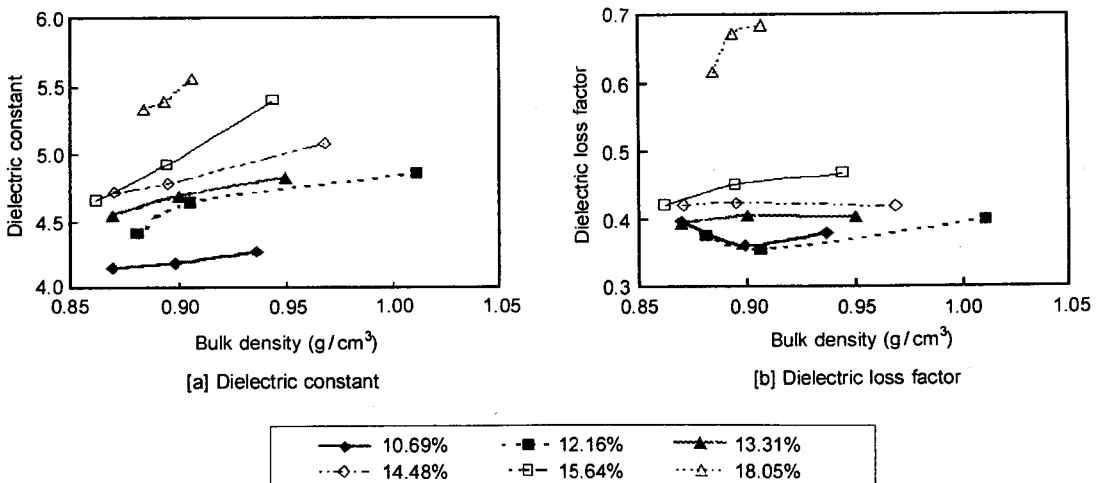


Fig. 9 Bulk density dependence of the dielectric properties of Ilpoom brown rough rice at the indicated moisture contents (5MHz and room temperature, $20 \pm 0.5^\circ\text{C}$).

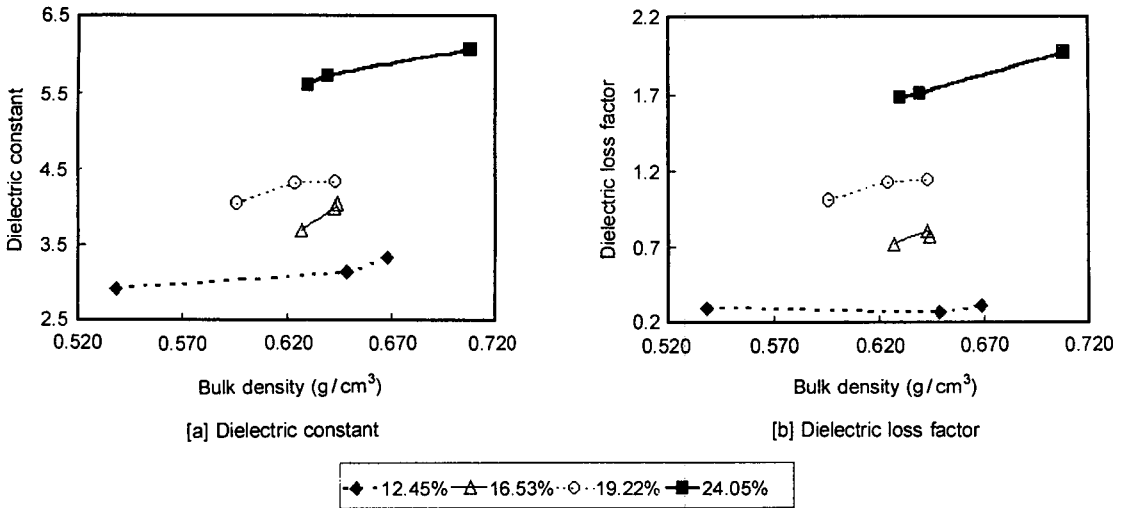


Fig. 10 Bulk density dependence of the dielectric properties of Milyang 23 rough rice at the indicated moisture contents (5MHz and room temperature, $20 \pm 0.5^\circ\text{C}$).

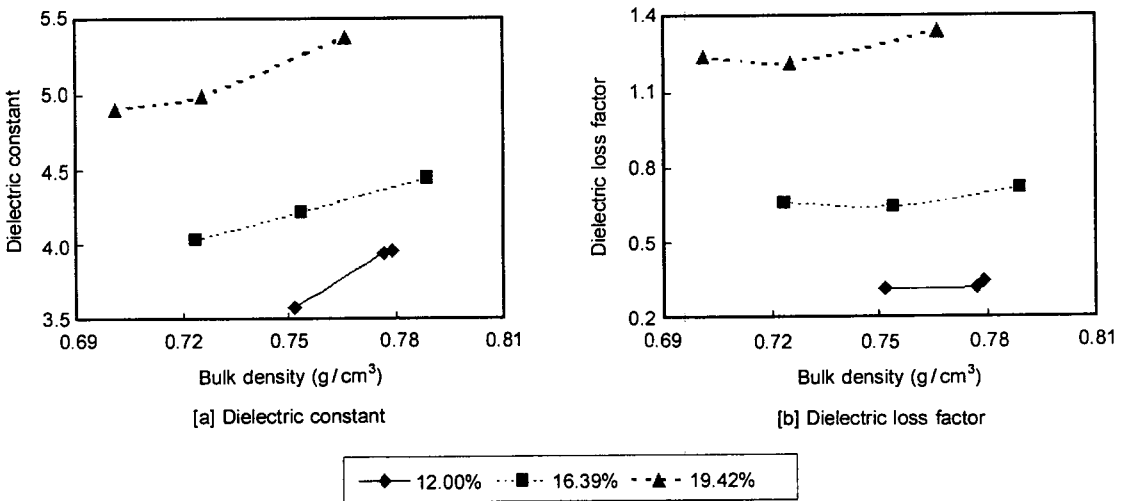


Fig. 11 Bulk density dependence of the dielectric properties of Jinyang barley at the indicated moisture contents (5MHz and room temperature, $20 \pm 0.5^\circ\text{C}$).

다. 각 시료간의 전기적 특성 비교 및 함수율 측정 가능성 검토

본 연구에서 구명된 각 곡류에 대한 전기적 특성 값들을 서로 비교하기 위하여 식 (7)과 같은 함수율과 산물밀도의 곱으로 표시되는 수분밀도(김기복, 1997)를 이용하였다. 수분밀도는 샘플홀더 내에 채

워지는 시료가 포함하는 수분의 절대량을 나타내며 따라서 측정되는 전기적인 특성 값들은 이러한 수분의 양과 밀접한 관계가 있을 것으로 판단되기 때문이다. 또한 수분밀도에 산물밀도가 포함되어 있으므로 함수율 측정시 산물밀도의 영향을 감소시킬 수 있을 것으로 생각된다.

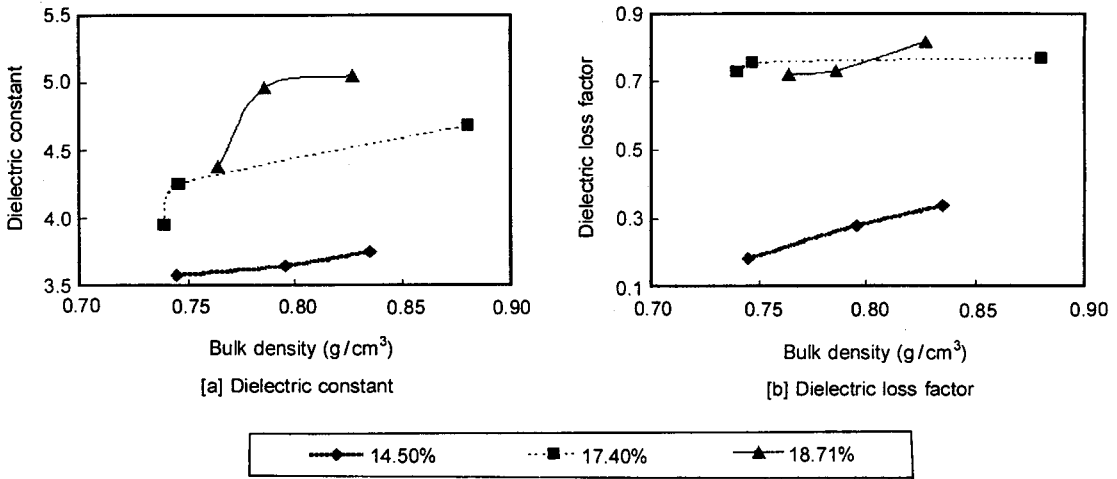


Fig. 12 Bulk density dependence of the dielectric properties of Olgroo wheat at the indicated moisture contents (5MHz and room temperature, $20 \pm 0.5^\circ\text{C}$).

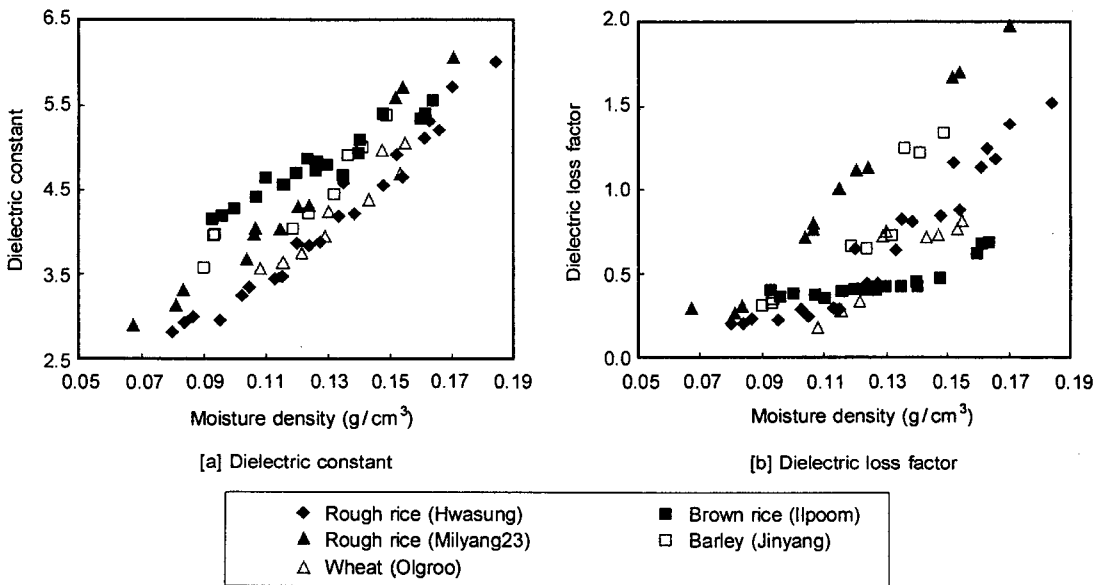


Fig. 13 Moisture density dependence on the dielectric properties of grains at indicated varieties (5MHz and room temperature $20 \pm 0.5^\circ\text{C}$).

$$\rho_m = MC \times \rho_b \dots\dots\dots (7)$$

여기서, ρ_m = moisture density (g/cm³)
 MC = moisture content (decimal)
 ρ_b = bulk density (g/cm³)

수분밀도에 따른 각 곡류의 유전상수 변화를 나타낸 결과 그림 13에서 보는 바와 같이 5MHz 측정주파수에서 대체적으로 현미의 유전상수가 크게 나타났는데 이것은 현미 외 다른 곡류의 경우 왕겨와 같은 겉질이 유전율에 영향을 미치는 것으로 판단되며 벼의 경우 중립종인 밀양23이 단립종인 화성보다 높

은 것으로 나타났는데 이러한 이유로는 중립종인 밀 양23호의 경우 단립종인 화성보다 길이가 더 길고 두께가 얇아 샘플홀더 내에 충전될 때 공극의 크기가 상대적으로 더 작기 때문에 이러한 공극의 차이가 유전율에 영향을 미치는 것으로 생각된다. 또한 보리의 경우 밀보다 약간 높은 값을 나타내는 것으로 분석되었다. 한편, 유전손실의 경우 전반적으로 현미가 가장 낮은 값을 나타내는 것으로 나타났으며 밀양23호가 가장 높은 값을 나타내었다.

상기의 분석결과를 근거로 하여 고주파 정전용량식 함수율 측정장치 개발에 필요한 곡류의 유전상수에 대하여 수분밀도와외의 상관계수를 구한 결과, 다음 표 2에서 보는 바와 같이 전체 공시재료와 측정주파수에서 0.92 이상을 나타내어 비교적 정확한 함수율 측정이 가능할 것으로 생각된다. 그러나 각 시료별로 상관계수가 다르게 나타나고 있는데 이것은

본 분석에서 사용한 수분밀도가 정확도가 높은 함수율의 측정인자로서의 사용은 가능하지만 전체 품종을 대상으로 상관분석을 실시할 경우 정확도가 낮게 나타날 것으로 생각된다.

라. 기존 연구 결과와의 비교

본 연구에서 분석된 각 곡류에 대한 전기적 특성들에 대한 국내 자료가 없는 실정이기 때문에 기존에 발표된 외국의 유사한 품종의 유전특성을 밀과벼를 중심으로 비교하였다.

밀의 경우 기존의 Sokhansanj와 Nelson(1988)이 분석한 미국의 네브라스카산 겨울 밀의 유전상수 및 유전손실에 대한 값들 중 본 연구에서의 함수율과 산물밀도의 비슷한 범위에서의 결과를 비교하였다. 표 3에서 보는 바와 같이 1MHz의 측정주파수에서

Table 2 Correlation coefficients and standard errors between dielectric constant of grain samples and moisture density

Grain	1 MHz		5 MHz		10 MHz	
	R*	S.E.*	R	S.E.	R	S.E.
Rough rice (Hwasung)	0.9709	0.384	0.9830	0.179	0.9890	0.128
Brown rice (Ilpoom)	0.9768	0.131	0.9625	0.115	0.9651	0.112
Rough rice (Milyang23)	0.9983	0.153	0.9885	0.163	0.9877	0.139
Barley (Jinyang)	0.9524	0.406	0.9215	0.246	0.9837	0.114
Wheat (Olgroo)	0.9596	0.259	0.9532	0.181	0.9335	0.211

* R and S.E. stand correlation coefficient and standard error, respectively.

Table 3 Comparison of dielectric property between measured and Sokhansanj & Nelson's data (1988) at 1MHz

This study					Sokhansanj & Nelson's data (1988)				
Cultivar	Moisture content (%w.b.)	Bulk density (g/cm ³)	Dielectric constant	Dielectric loss factor	Cultivar	Moisture content (%w.b.)	Bulk density (g/cm ³)	Dielectric constant	Dielectric loss factor
Olgoo Wheat (Suwon, Korea)	14.5	0.745	3.65	0.21	Hard red winter wheat (Nebraska, USA)	14.5	0.720	4.29	0.42
		0.835	3.91	0.40			0.827	5.44	0.55
	18.7	0.764	5.32	1.24		18.2	0.700	4.51	1.34
		0.827	5.91	1.45			0.816	7.10	2.21

전반적으로 유전상수 및 유전손실이 약간의 차이를 보이고 있으나 이러한 차이는 품종간의 차이 때문인 것으로 생각된다.

한편, 벼에 대해서는 Noh와 Nelson(1992)이 5MHz ~ 12GHz 범위에서 함수율, 주파수, 산물밀도로 표시되는 다음 식(8) 및 (9)과 같은 벼, 현미, 백미의 유전상수 예측모델을 실험적으로 개발하였다.

$$\epsilon' = [1 + (a_2 - b_2 \log f + c_2 m - d_2 \text{molg } f) \rho]^2$$

(Quadratic Model) (8)

$$\epsilon' = [1 + (a_3 - b_3 \log f + c_3 m - d_3 \text{molg } f) \rho]^3$$

(Cubic Model) (9)

여기서, a, b, c, d = 벼 품종에 따른 모델의 상수
 f = 주파수(MHz)
 m = 함수율(%w.b.)
 ρ = 산물밀도(g/cm³)

상기 모델은 중립종 벼에 대한 모델이므로 본 연구에서 사용된 공시재료 중 중립종인 밀양23호를 선택하여 함수율 12~18%w.b.의 범위의 시료를 이용하여 상기의 Quadratic Model과 5MHz의 측정 주파수에서 유전상수를 계산하였다. 이때 모델에 의해 계산된 유전상수를 비교하기 위하여 수분밀도에 따른 유전상수 변화를 나타낸 결과 그림 14에서 보는 바와 같이 Noh와 Nelson의 모델을 이용한 유전상수

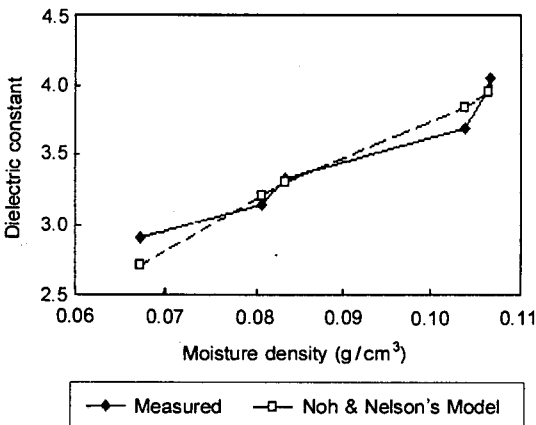


Fig. 14 Comparison of the dielectric constants measured and Noh & Nelson's results for rough rice at 5MHz.

의 예측값에 어느 정도 근사한 값을 나타내었다. 따라서 Noh와 Nelson의 모델이 통계 모델임을 감안하면 본 연구에서 분석된 유전특성은 기존의 실험결과와 거의 유사할 것으로 판단된다.

4. 요약 및 결론

본 연구는 고주파 임피던스를 이용한 함수율 측정을 위한 기초연구로서 샘플홀더를 동축형으로 설계·제작하여 단립종인 화성, 일품의 함수율 11~24% w.b., 중립종인 밀양23호의 함수율 12~24%w.b., 현미의 함수율 11~18%w.b., 걸보리의 함수율 11~21% w.b., 밀의 함수율 11~23%w.b.에서 곡류에 대한 1~10.0MHz 범위의 고주파 정전용량과 손실계수를 측정하여 유전상수, 유전손실, 교류 전기전도도를 구명한 다음 기존의 연구결과와 비교하였으며 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 산물밀도를 비슷한 범위로 유지할 때 각 곡류의 유전상수와 교류 전기전도도는 함수율의 증가에 따라 증가하는 경향을 나타내었으며 주파수가 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내어 기존의 여러 연구결과와 유사한 경향을 나타내는 것으로 분석되었다.

2) 산물밀도의 증가에 따라 각 곡류의 유전손실은 대체적으로 증가하는 경향을 나타내었지만 주파수에 따른 경향은 거의 없는 것으로 분석되었다.

3) 함수율과 산물밀도의 곱으로 표현되는 수분 밀도를 이용하여 각 측정주파수와 시료에 대하여 상관 분석을 실시한 결과 상관계수가 대체적으로 0.92 이상을 나타내어 수분밀도를 이용할 경우 비교적 정확한 함수율 측정이 가능할 것으로 분석되었다.

4) 밀의 경우 기존의 발표된 유전상수 및 유전손실과 비슷한 값을 나타내는 것으로 분석되었으며, 중립종 벼인 밀양23호의 유전상수는 Noh와 Nelson의 유전상수 예측모델의 결과와 거의 일치하는 것으로 분석되었다.

5) 본 연구에서 구명된 각 곡류의 전기적 특성들은 곡류의 함수율 측정 연구의 기초 자료뿐만 아니라 농산물 및 식품의 건조 및 살균공정에서 최근 많이 이용되고 있는 통전가열(Ohmic heating) 장치 개발 등에 대한 기초 자료를 제공할 수 있을 것으로 생

각된다.

참 고 문 헌

1. 김기복. 1997. 곡류의 고주파와 마이크로파 유전 특성 및 정전용량식 온라인 함수율 측정장치 개발에 관한 연구. 서울대학교 공학박사 학위 논문.
2. Kandala, C. V. K., R. G. Leffler, S. O. Nelson and K. C. Lawrence. 1990. Measurement of moisture content in single kernel of peanuts : A nondestructive electrical method. Trans. of the ASAE 33(2):567-571.
3. Kandala, C. V. K., R. G. Leffler, S. O. Nelson and K. C. Lawrence. 1991. Nondestructive moisture determination in single kernels of popcorn by impedance measurement. ASAE Paper No. 91-6567.
4. Matthews, J. 1968. The design of an electrical capacitance-type moisture meter for agricultural use. J. Agri. Eng. Res. 8(1):17-30.
5. Nelson, S. O. 1952. A method for determining the dielectric properties of grain. Unpublished M.S. thesis, University of Nebraska Library, Lincoln, Nebraska.
6. Nelson, S. O. 1965. Dielectric properties of grain and seed in the 1 to 50-MC. Trans. of the ASAE 8 (1):38-48.
7. Nelson, S. O. 1979. Improved sample holder for Q-meter dielectric measurements. Trans. of the ASAE 22(4):950-954.
8. Nelson, S. O. 1982. Factors affecting the dielectric properties of grain. Trans. of the ASAE 25(4):1045-1049, 1056.
9. Noh, S. H. and S. O. Nelson. 1989. Dielectric properties of rice at frequencies from 50Hz to 12GHz. Trans. of the ASAE 32(3):991-998.
10. Noh, S. H. and S. O. Nelson. 1992. Mathematical models for the dielectric constants of rice. Trans. of the ASAE 35(5):1553-1536.
11. Sokhansanj, S. and S. O. Nelson. 1988. Transient dielectric properties of wheat associated with nonequilibrium kernel moisture conditions. Trans. of the ASAE 31(4):1251-1254.
12. Stetson, L. E. and S. O. Nelson. 1972. Audiofrequency dielectric properties of grain and seed. Trans. of the ASAE 15(1):180-184, 188.
13. von Hippel, A. 1954. Dielectric Materials and Applications. The Technology Press of M.I.T. and John Wiley & Sons, New York.
14. Whitney, J. D. and J. G. Porterfield. 1967. Dielectric properties of peanuts. Trans. of the ASAE 10(1):38-39, 42.