

마이크로파 비파괴 계측기술을 이용한 곡류의 유전율 측정 Measurement of Dielectric Properties of Cereal Grains by Nondestructive Microwave Measurement Technique

김기복*[†]
 Ki-Bok Kim*[†]

초 록 마이크로파 자유공간전송기법을 이용하여 생물자원인 곡류의 유전특성을 비파괴 방법으로 측정하였다. 마이크로파를 송신하고 수신할 수 있는 혼 안테나, 샘플홀더, network analyzer를 이용하여 9.5 GHz에서의 마이크로파 측정 시스템을 구성하였다. 여러 가지 수분함량에서 산물밀도가 서로 다른 시료를 투과하여 나오는 마이크로파의 감쇠와 위상 변이로부터 유전상수와 유전손실을 측정하였다. 시료의 유전상수와 유전손실은 샘플홀더 내에 충전되는 시료의 수분함량과 산물밀도가 증가함에 따라 증가하였으며 수분함량과 산물밀도의 곱으로 표시되는 수분밀도를 이용할 경우 산물밀도와 시료 품종의 변이를 보정할 수 있는 것으로 나타났다.

주요용어: 마이크로파, 자유공간전송, 유전상수, 유전손실, 곡류

Abstract The dielectric properties of cereal grains such as short-grain rough rice, brown rice and barley with various moisture contents were determined by measuring the attenuation and phase shift of the microwave signal through the grain samples at 9.5 GHz. The microwave free-space transmission measurement system consisted of sample holder, horn antenna and network analyzer. Dielectric constant and loss factor of grain samples increased with moisture content and bulk density and agreed well with previous research results. Moisture density, which is defined as the product of moisture content and bulk density, was proposed as a bulk density and variety compensation factor. The technique for measurement of dielectric properties based on free-space transmission may be useful for other particulate materials.

keywords: microwave, free-space transmission, dielectric constant, dielectric loss factor, bio-resources, cereal grains

1. 서 론

마이크로파 주파수는 일반적으로 1GHz~30GHz 정도로 주파수가 매우 높기 때문에 도체뿐만 아니라 절연체와 공기 중에서도 전류가 흐르는 성질을 갖는다. 자유공간에서의 마이크로파를 전자파라고도 하며 그 속도는 빛의 속도와 동일하며 자유공간에서 1cm~30cm 파장 범위를 가지므로 센티파라고도 한다. 전자방사(electromagnetic

radiation)은 공간을 통하여 시간에 따라 변하는 전자계(electric and magnetic field)에 의한 에너지의 전파(propagation)이며 파동이론(wave theory)과 미립자이론(corpuscular theory)에 의해 해석될 수 있다. 전자파 이론(electromagnetic wave theory)의 기초는 1864년 Maxwell이 전자기 현상에 관하여 지배방정식을 수립함으로써 정립되었으며 1888년 Hertz에 의해 마이크로파의 존재가 실험적으로 증명되었다. 이후 마이크로파 기술은 2 차 세계

대전을 거치면서 크게 발전하였으며 초기의 레이더 및 통신 등과 같은 군용 기술에서 마이크로파 건조 및 센싱과 같은 산업응용 기술로 발전하게 되었다. 특히 마이크로파 센서기술 및 가열기술은 농업 및 식품분야에 응용되어 마이크로파 응용제품을 선보이게 되었다 [1,2]

마이크로파를 이용한 비파괴계측 기술은 여러 가지 장점을 가지고 있다. 비접촉·비파괴적 방법으로 대상 물체를 감지할 수 있으며, 센서에 운동부가 없기 때문에 구조가 견고하며, 열악한 작동환경에서도 신뢰성이 높을 뿐만 아니라 먼지가 많고 오염되었거나 독성 환경, 저온(-55℃ 정도) 및 고온(125℃ 정도)의 온도 조건에서도 작동이 가능하며, 방사에너지가 매우 작고 마찰이나 정전기에 의한 불꽃방전이 없기 때문에 폭발성 환경에 매우 유용하다. 또한 감지거리가 25~45,000mm 정도로 매우 길며, 센서의 크기가 비교적 작다는 장점을 가지고 있다[2]. 특히, 마이크로파는 대상 물체의 전기적 성질에 따라 독특한 반응을 나타내므로[3,4] 이와 같은 특성에 의해 마이크로파를 이용하여 대상 재료를 비접촉 및 비파괴적으로 평가할 수 있다.

마이크로파를 이용한 비파괴 계측기술은 초음파 탐상이나 와전류 탐상과 같은 기존의 비파괴 탐상 기술의 적용이 곤란한 분야에 일부 적용 될 수 있다. 마이크로파 반사신호를 검출하여 금속재료 표면에서의 균열을 검출하기 위한 연구가 수행되고 있으며[5-7], 복합재료 내에서의 결함이나 균열 검출[8-11], IC package 내 박리 검출[12], 코팅 재료 하부 금속의 부식을 검출하기 위한 연구[13] 등이 수행되고 있다.

마이크로파를 이용한 비파괴 계측기술이 가장 활발하게 응용되고 있는 분야는 생물자원 내의 수분함량 측정이며[14-19] 여기에서 대상 물체의 전자기적 특성 구명이 필수적이다. 이러한 전자기적 특성으로서 복소유전율과 복소투자율이 있으며 일반적으로 생물자원의 경우 투자율은 진공에서의 투자율과 거의 동일한 값을 가지는 반면 생물자원의 유전율은 진공에서의 유전율보다 클 뿐만 아니라 물질의 온도 및 구성성분, 주파수 등에 의해 영향을 받는다. 따라서 생물자원에 대한 유전특성 측정 및 해석은 물질 내 수분 및 다른 구성 성분의 계측에 매우 유용하게 이용될 수 있다[17,20].

농업 생산물이나 식품과 같은 생물자원(bio-resources)은 다른 광물자원이나 공업용 재료와는 달리 주변 환경의 미소한 변화에도 물리·화학적 성질이 쉽게 변하는 특징을 가지고 있다. 생물자원의 경우 물질 내부에서 생

리적 변화 및 화학적 반응이 끊임없이 발생하여 물성의 변화를 야기하게 되고, 주변 환경의 변화에 따라서 흡습 또는 탈습에 의해 수분함량이 쉽게 변하기도 하며, 그에 따라 물리적 또는 화학적 변화를 초래하기도 하고, 미생물의 오염으로 인하여 부패하기도 한다. 또한 생물자원은 이방성(anisotropy)과 불균일성이 크다는 특징을 가지고 있기 때문에 초음파 탐상이나 와전류 탐상과 같은 산업 설비에 많이 적용되는 비파괴 탐상 기술의 적용이 어렵게 된다.

기존의 마이크로파를 이용한 비파괴 계측은 주로 개방 반사형 도파관을 사용하는 마이크로파의 반사법을 이용한 연구가 대부분이며[5,7,12,13,22,23] 대상 재료와 직접 접촉하여 마이크로파의 반사계수를 측정하게 되므로 생물자원의 여러 가지 특성상 접촉식 측정방법은 적합하지 않을 것으로 사료된다. 반면, 자유공간 상에서 대상체에 마이크로파를 입사한 후 반대편에서 투과되어 나오는 신호를 분석하는 자유공간 전송기법[16,19,24]은 마이크로파 송수신 안테나를 사용하므로 대상체와 직접 접촉하지 않는 비파괴적인 측정방법이기 때문에 대상체의 전자기파 물성 측정에 매우 유용할 것으로 생각된다.

본 연구에서는 마이크로파를 이용하여 곡류의 전자기적 특성 중의 하나인 유전특성을 측정하기 위하여 수행되었으며 이를 위하여 비접촉식 측정 방법인 마이크로파 자유공간 전송기법을 적용하였다.

2. 이론적 배경

생물자원과 같은 유전체가 전자계 내에 있을 때의 복소유전율은 유전율의 식 (1)과 같은 실수부와 허수부로 나타낸다. 실수부는 유전상수로서 유전체가 전기에너지를 저장하는 능력을 나타내고, 허수부인 손실계수는 유전체 내에서의 전기에너지 손실을 의미하며 열로 변환된다.

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

여기서, ϵ 는 복소유전율, ϵ' 는 유전상수, ϵ'' 는 손실계수, j 는 $\sqrt{-1}$ 를 각각 나타낸다.

자유공간상의 유전체에 Fig. 1에서 보는바와 같이 마이크로파가 수직으로 입사할 때 자유공간과 유전체 사이의 계면에서 파의 일부는 투과하고 파의 일부는 반사하게 되며 투과하는 파의 경우 감쇠와 위상변이가 발생한다.

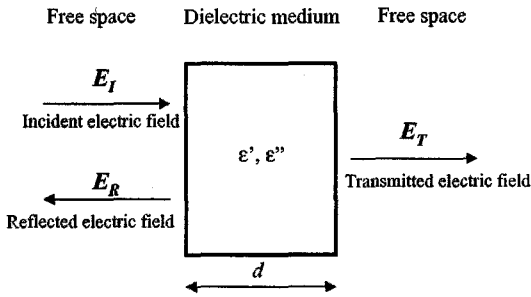


Fig. 1 A general schematic diagram of the electric field and dielectric material

이때 유전손실이 있는 유전체에서 평면파의 전파상수는 다음과 같이 주어진다 [21].

$$\gamma_s = \alpha_s + j\beta_s \tag{2}$$

여기서, γ_s 는 복소 전파상수, α_s 는 유전체가 있을 때의 감쇠상수 (Neper/m), β_s 는 유전체가 있을 때의 위상상수를 각각 나타낸다.

이때, 전파상수는 복소유전율을 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\alpha_s + j\beta_s = \sqrt{\left(\frac{\omega}{c_0}\right)^2(\epsilon' - j\epsilon'')} = j\frac{2\pi}{\lambda_0} \sqrt{\epsilon' - j\epsilon''} \tag{3}$$

여기서, c_0 는 자유공간에서의 전자기파 속도(=3×10⁸m/s), λ_0 는 자유공간에서의 파장, ω 는 주파수를 각각 나타낸다.

자유공간에서의 위상상수는 다음 식 (4)와 같이 정의된다.

$$\beta_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0} \tag{4}$$

식 (4)를 식 (3)에 대입하여 양변을 제곱한 후 실수부와 허수부로 나누어 유전상수와 유전손실 항으로 각각 정리하면 식 (5) 및 (6)과 같다.

$$\epsilon' = \frac{1}{\beta_0^2} (\beta_s^2 - \alpha_s^2) \tag{5}$$

$$\epsilon'' = \frac{1}{\beta_0^2} 2\alpha_s\beta_s \tag{6}$$

한편, 자유공간상에 유전체가 있을 때와 없을 때의 위상차 ($\Delta\Phi$)는 다음과 같다.

$$\Delta\Phi = \Phi_s - \Phi_0 = (\beta_s - \beta_0)d \tag{7}$$

여기서, Φ_s 는 유전체가 있을 때의 위상변이(radian), Φ_0 는 유전체가 없을 때의 위상변이(radian), d 는 유전체의 두께를 각각 나타낸다.

식 (7)을 β_s 에 관하여 정리한 다음 제곱하면 다음 식 (8)과 같이 된다.

$$\beta_s^2 = \left(\frac{\Delta\Phi}{d} + \beta_0\right)^2 = \beta_0^2\epsilon' + \alpha_s^2 \tag{8}$$

식 (8)을 유전상수에 관하여 정리하면

$$\epsilon' = 1 + \left(\frac{\Delta\Phi}{\beta_0 d}\right)^2 + 2\left(\frac{\Delta\Phi}{d}\right)\frac{1}{\beta_0} - \left(\frac{\alpha_s}{\beta_0}\right)^2 \tag{9}$$

이때 생물자원의 경우 대부분 다음 식 (9)와 같은 조건을 만족한다[17].

$$\left(\frac{\alpha_s}{\beta_0}\right) \ll 1 \tag{10}$$

따라서, 식 (4)와 식 (10)의 조건을 식 (9)에 대입하면 유전상수는 다음 식 (11)과 같이 위상차의 함수로 간략하게 표현된다.

$$\epsilon' \simeq \left(1 + \frac{\Delta\Phi\lambda_0}{360d}\right)^2 \tag{11}$$

한편, 자유공간 내에 유전체가 있을 때와 없을 때의 감쇠량의 차(dB)를 감쇠상수(Neper/m)와 유전체 두께(d)로 나타내면 dB와 Neper의 관계로부터 다음과 같이 표시된다.

$$\Delta A = A_s - A_0 = 8.686(\alpha_s - \alpha_0)d \tag{12}$$

여기서, ΔA 는 유전체가 있을 때와 없을 때의 감쇠량의 차이 (dB), A_s 는 유전체가 있을 때의 마이크로파 감쇠 (dB), A_0 는 유전체가 없을 때의 마이크로파 감쇠 (dB)를 각각 나타낸다.

최종적으로, 식 (4), (12)를 식 (6)에 대입한 다음 식 (10)의 조건을 이용하면 유전손실을 다음과 같이 얻어 진다.

$$\epsilon'' \approx \frac{\Delta A \lambda_0 \sqrt{\epsilon'}}{8.686 \pi d} \quad (13)$$

따라서 식 (11)과 식 (13)을 이용하여 자유공간상에서의 유전체를 투과하는 마이크로파의 감쇠와 위상차를 측정함으로써 물체의 유전율을 구할 수 있게 된다.

3. 실험 장치 및 방법

3.1. 공시 재료

본 연구에서 사용된 공시재료는 대표적인 농산물 중의 하나인 곡물(벼, 현미, 보리)를 대상으로 하였으며 실험 조건은 Table 1에서 보는바와 같다. 곡류는 일반적으로 수분, 단백질, 탄수화물, 지질 등으로 구성되어 있으며 물과 같은 쌍극자를 가진 극성분자나 극성을 띤 이온이 비교적 자유롭게 움직일 수 있는 자유수 영역에서는 마이크로파에 의해 쌍극자회전(dipole rotation)과 이온분극(ionic polarization)이 발생하며 이러한 현상이 유전특성으로 나타난다. 단백질이나 탄수화물과 같이 수소결합(hydrogen bonding)에 의해 물분자가 강하게 결합된 구조에서는 마이크로파 영역에서 발생하는 쌍극자회전이나 이온분극이 거의 나타나지 않게 된다. 따라서 곡물의 경우 일종의 입자 재료(granular material)로서 살아 있는 생명체이며 내부에 수분을 함유하고 있기 때문에 수분함량에 따라 유전율이 크게 변하게 된다[16,17].

곡물이 함유하고 있는 수분함량은 다음 식 (14)와 같이 정의되며 수분함량의 조절은 항온항습기 내에서 온도와 습도를 적절히 조절하여 곡물이 수분을 자연스럽게 흡습하도록 하였다. 수분함량의 표준 측정방법으로서는 10g의 시료를 채취하여 질량을 측정한 다음 건조 오븐 내에서 135°C의 조건에서 24시간 건조한 후의 질량변화를 이용하여 수분함량을 결정하게 된다[25].

$$MC = \frac{m_w}{m_w + m_d} \times 100 (\%) \quad (14)$$

여기서, MC 는 습량기준 수분함량(%), m_w 는 시료 내에서 수분이 차지하는 질량, m_d 는 시료 내에서 수분이외의 질량을 각각 나타낸다.

Table 1 Moisture content of grain samples

Grain samples	Variety	MC	Density range(g/cm ³)
Rough rice	Hwasung (short-grain)	11-27 %	0.546~0.682
Brown rice		11-18 %	0.777~0.897
Barley	Jinyang	11-21 %	0.627~0.745

3.2. 마이크로파 측정 시스템

본 연구에서 사용된 마이크로파 측정 시스템은 Fig. 2에서 보는 바와 같다. 마이크로파 측정 주파수는 생물자원 내 물분자의 마이크로파 에너지 흡수가 크게 나타나는 8~12GHz의 X-band 주파수 대역으로 하였다. 측정 시스템은 45MHz~20GHz의 신호를 발생시키는 synthesized sweep generator, network analyzer(HF8510C, 미국), 혼 안테나, 샘플홀더로 구성하였으며 플로터와 컴퓨터로 전송특성 출력값을 각각 출력하고 저장하였다. 혼 안테나의 이득은 16.5±1.5(dBi), 개구부의 단면은 5×3.7cm이며 혼 안테나의 양 끝단은 network analyzer와의 임피던스 부합을 최소화하기 위하여 adapter를 연결하였다. 샘플홀더의 재질은 아크릴이며 전파가 투과할 때 발생하는 혼 안테나의 누설(leakage)을 최소화하기 위하여 혼 안테나 가로 크기의 2배 이상인 15.52cm로 하였으며 두께는 0.2cm로 하였다. 이때 전파의 투과거리가 되는 샘플홀더의 너비는 X-band에서의 파장 범위가 2.5~3.75cm이므로 최소한 한 파장 이상의 투과길이를 고려하여 4.25cm로 하였으며 샘플홀더의 크기는 4.25×11.96×15.52(788.88cm³)로 제작하였다. 샘플홀더를 투과하는 마이크로파의 전파특성은 먼저 샘플홀더에 시료가 없을 때 감쇠량과 위상변이를 측정한 다음, 샘플홀더에 시료를 충전하여 얻어지는 감쇠량과 위상변이를 측정하여 각각의 차이를 이용하여 분석하였다. 이때, S_{21} -parameter를 측정하기 위하여 network analyzer를 CW(continuous wave) transmission mode로 설정하였으며 측정된 S_{21} 을 이용하여 다음 식 (15)-(17)과 같이 마이크로파의 감쇠와 위상을 각각 구할 수 있다.

$$S_{21} = |S_{21}|e^{j\phi} \quad (15)$$

$$A = -20 \log |S_{21}| \quad (16)$$

$$\Phi = 2\pi n + \phi \quad (17)$$

여기서, A 는 마이크로파 감쇠(dB), Φ 는 전체 위상, ϕ 는 위상변이, n 은 정수를 각각 나타낸다.

상기 식 (16)과 (17)에서 측정된 시료의 감쇠 및 위상 변화를 식 (11)과 (13)에 대입함으로써 유전상수와 유전손실을 각각 구할 수 있게 되며 측정 주파수로는 9.5GHz 를 설정하였다.

본 연구의 측정 시스템에서 유전을 측정시 샘플홀더 두께의 영향을 보정하기 위하여 샘플홀더 내에 시료가 없는 상태에서 감쇠량과 위상을 미리 측정해 두었으며 유전율이 알려진 증류수와 벤젠을 대상으로 식 (11)과 (13)을 검증하였다. 한편, 마이크로파 측정 시 주위온도를 $24 \pm 1^\circ\text{C}$ 로 일정하게 유지하여 실험을 수행하였다.

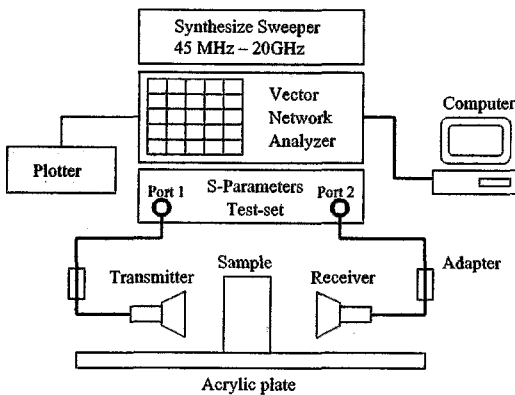


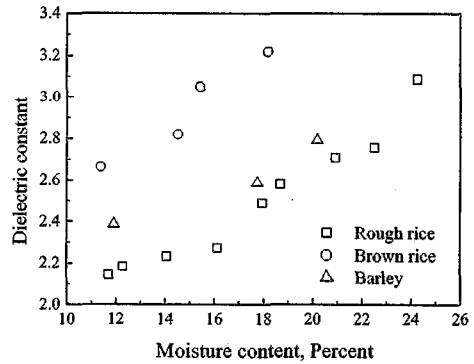
Fig. 2 Free-space transmission measurement system

4. 결과 및 고찰

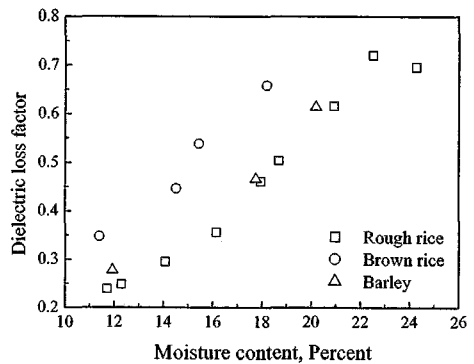
샘플홀더 내 시료의 산물밀도를 벼의 경우 $0.546 \sim 0.606\text{g/cm}^3$, 현미의 경우 $0.777 \sim 0.808\text{g/cm}^3$, 보리의 경우 $0.627 \sim 0.697\text{g/cm}^3$ 의 범위로 유지한 다음 시료의 수분함량에 따른 유전특성을 나타낸 결과는 Fig. 3에서 보는바와 같다. 각 곡류에서 시료의 수분함량이 증가함에 따라 유전상수 및 유전손실이 증가함을 나타내었다. 반면 시료의 종류에 따른 유전상수 및 유전손실 변화는 벼, 보리, 현미의 순으로 증가함을 알 수 있는데 이것은 벼, 보리, 현미의 순으로 산물밀도가 증가하기 때문이다. 즉, 부피가 일정한 샘플홀더 내에 입자가 작은 현미가 상대적으로 많이 충전 되기 때문에 샘플홀더 내의 절대적인 수분량이 벼 및 보

리 보다 상대적으로 많아지기 때문에 유전상수 및 유전손실이 증가하는 것으로 판단된다. 이것은 농산물 내에서 품종 및 종류에 따라 유전특성이 차이가 남을 의미하며 이러한 결과는 기존의 외국의 쌀, 밀, 옥수수 등에 대한 연구결과와 거의 유사한 것으로 나타났다[16].

샘플홀더 내 시료의 산물밀도 변화에 따른 유전특성 변화는 Fig. 4 및 5에서 보는바와 같다. 샘플홀더 내 시료의 산물밀도 변화는 인위적으로 조절하였으며 그 범위는 표 1에서 나타난 바와 같다. 샘플홀더 내 시료의 산물밀도가 증가함에 따라 유전상수 및 유전손실이 증가하는 경향을 나타내었다. 이러한 경향은 Fig. 3에서 품종 차이에 따른 유전특성 변화를 분석한 바와 같이 산물밀도가 증가할수록 샘플홀더 내에서 차지하는 수분의 양이 증가하게 되어 전체적으로 유전상수 및 유전손실이 증가하게 된다.

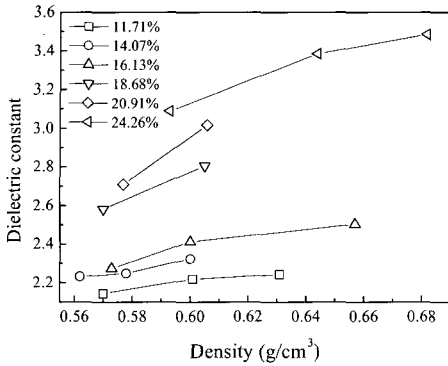


(a)

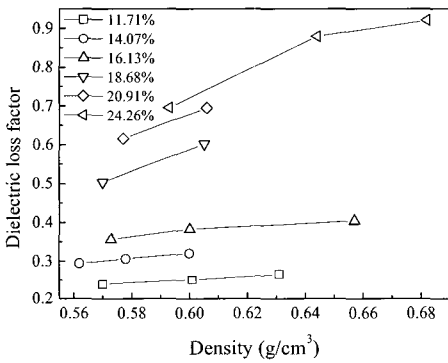


(b)

Fig. 3 Moisture content dependence of (a) the dielectric constant and (b) dielectric loss factor of rough rice, brown rice, and barley samples at 9.5 GHz and $24 \pm 1^\circ\text{C}$



(a)



(b)

Fig. 4 Effects of density on (a) dielectric constant and (b) dielectric loss factor of rough rice samples at various moisture content levels, 9.5GHz and 20±1°C

이상의 분석결과에서 곡류와 같은 생물자원의 유전특성에 수분뿐만 아니라 품종 및 종류, 시료의 산물밀도가 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 그 외 측정 주파수 및 시료의 온도 등도 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다[15-17]. 따라서 유전특성 측정 시 산물밀도의 영향을 보정하기 위하여 다음 식 (18)로 표시되는 수분밀도를 이용하여 유전특성을 분석하였다[18].

$$\rho_m = \frac{MC \times \rho_s}{100} \quad (18)$$

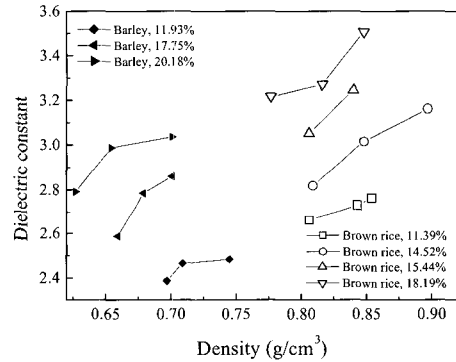
여기서, ρ_m 은 수분밀도(g/cm^3), ρ_s 은 샘플홀더 내 시료의 산물밀도(g/cm^3)를 나타낸다.

식 (18)에서, 수분밀도는 수분함량과 산물밀도의 곱

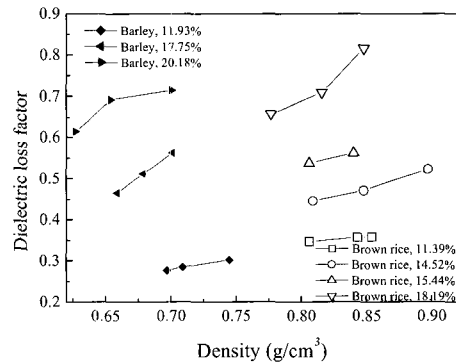
으로 표현되기 때문에 그 단위는 산물밀도와 같게 되며 단위 부피 당 수분의 무게를 의미하므로 샘플홀더 내에서 수분의 절대적인 양을 나타낸다. 따라서 수분밀도를 이용할 경우 유전특성에 미치는 산물밀도의 변이를 어느 정도 보정할 수 있을 것으로 생각한다. 분석결과 Fig. 6에서 보는바와 같이 Fig. 5 및 6에서 나타난 산물밀도의 변이가 매우 감소되는 것으로 나타났으며 시료의 종류나 품종에 따른 변이도 감소시킬 수 있는 것으로 분석되었다.

5. 요약 및 결론

본 연구는 대표적인 생물자원의 하나인 곡류(벼, 현미, 보리)의 유전특성을 비접촉·비파괴적인 방법으로 측정하



(a)



(b)

Fig. 5 Effects of density on (a) dielectric constant and (b) dielectric loss factor of brown rice, barley samples at various moisture content levels, 9.5GHz and 20±1°C

기 위하여 자유공간전송기법을 적용하였다. 이를 위하여 마이크로파를 송신하고 수신할 수 있는 혼 안테나, 샘플 홀더, network analyzer를 이용하여 9.5GHz의 마이크로파 자유공간 전송 시스템을 구성하였다. 여러 가지 수분함량에서 산물밀도가 서로 다른 시료를 투과하여 나오는 마이크로파의 감쇠와 위상 변이를 측정하여 유전상수와 유전손실을 각각 계산한 결과 시료의 유전상수와 유전손실은 수분함량과 산물밀도가 증가함에 따라 증가하였으며 이러한 결과는 기존의 다른 곡류의 연구결과와 거의 유사한 것으로 분석되었다.

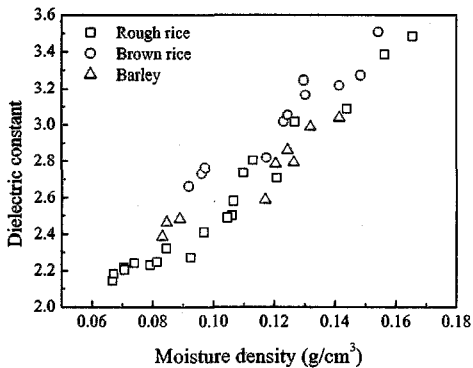
시료의 수분함량과 산물밀도의 곱을 수분밀도로 정의한 후 수분밀도에 따른 유전상수와 유전손실을 각각 분석한 결과 수분밀도가 증가함에 따라 유전상수와 유전손실은 거의 선형적으로 증가하는 것으로 나타났으며 산물

밀도와 시료의 품종의 영향을 동시에 보정할 수 있는 것으로 분석되었다.

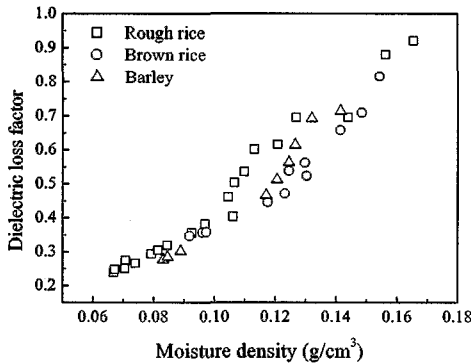
본 연구에서 곡류의 유전특성을 측정하기 위하여 응용된 마이크로파 자유공간 전송기법은 추후 광물자원 뿐만 아니라 여러 가지 입자형태의 화학제품, 공업용 재료 등의 유전을 측정에 매우 유용하게 적용될 것으로 생각된다.

참고문헌

- [1] N. Mohsenin, "Electromagnetic Radiation properties of Foods and Agricultural Products," Gordon and Breach Science Publishers, Inc., New York, chapter 10, pp. 520-539, (1984)
- [2] A. W. Kraszewski, "Microwave Aquametry-Electromagnetic Wave Interaction with Water Containing Materials", IEEE Press, New York, chapter 21, pp. 363-371, (1996)
- [3] D. E. Bray, and D. McBride, "Nondestructive Testing Techniques," John Wiley & Sons, Inc., New York, pp. 669-696, (1992)
- [4] M. Kent, "Microwave Measurements of Products Variables, In "Instrumentation and Sensors for the Food Industry" ed. by E. Kress-Rogers," Butterworth-Heinemann Ltd, Oxford, pp. 189-235, (1993)
- [5] C. Huber, H. Abiri, S. Ganchev, and R. Zoughi, "Electromagnetic Modeling of the Interaction of Cracks in Metallic Surfaces with Open-ended Waveguides using an Equivalent Magnetic Current," Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol. 15, pp. 719-726, (1996)
- [6] N. Wang, K. Donnell, M. Castle, R. Zoughi, and M. Novack, "Microwave Detection of Covered Surface Cracks in Metals," Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol. 20, pp. 430-437, (2001)
- [7] S. H. H. Sadeghi, R. Moini, and A. Mahanfar, "An Improved Generalized Network Formulation of Electromagnetic Fields for Crack Detection and Sizing in Metals, using Open-ended Waveguides," Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol. 20, pp. 319-325, (2001)
- [8] S. Bakhtiari, N. Qaddourni, S. I. Ganchev, and R.



(a)



(b)

Fig. 6 Moisture-density dependence of (a) the dielectric constants and (b) the dielectric loss factor of rough rice, brown rice, and barley samples at 9.5GHz and 24±1°C

- Zoughi, "Microwave Noncontact Examination of Disbond and Thickness Variation in Stratified Composite Media," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 42, No. 3, pp. 389-395, (1994)
- [9] M. Werner and R. King, "Microwave Sensors for Imaging Moisture and Flaws in Advanced Composites," *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol. 15, pp. 693-699, (1996)
- [10] R. P. Flam, and D. J. Farina, "Detection/Location of Small Flaws in Composite Structures using Microwaves," *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol. 15, pp. 679-685, (1996)
- [11] M. J. Roberts, "Temporal Microwave Nondestructive Evaluation for Material Characterization, Void and Moisture Detection in Layered Structures," *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol. 20, pp. 414-421, (2001)
- [12] Y. Ju, M. Saka and H. Abe, "Microwave Nondestructive Detection of Delamination in IC Packages utilizing Open-ended Coaxial Line Sensor," *NDT & E International*, Vol. 32, No. 5, pp. 259-264, (1999)
- [13] D. Hughes, N. Wang, T. Case, K. Donnell, R. Zoughi, R. Austin, and M. Novack, "Detection of Corrosion in Aluminum Panels under Paint and Primer," *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol. 20, pp. 460-466, (2001)
- [14] S. H. Noh and S. O. Nelson, "Dielectric Properties for Rice at Frequencies from 50 Hz to 12GHz," *Transactions of the ASAE*, Vol. 32, No. 3, pp. 991-998, (1989)
- [15] A. W. Kraszewski, S. O. Nelson, and T. S. You, "Use of a Microwave Cavity for Sensing Properties of Arbitrarily Shaped Biological Objects," *IEEE Transactions on Microwave Theory Techniques*, Vol. 38, No. 7, pp. 77-87, (1990)
- [16] S. O. Nelson, A. W. Kraszewski, S. Trabelsi, and K. C. Lawrence, "Using Cereal Grain Permittivity for Sensing Moisture Content", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 49, No. 3, pp. 470-475, (2000)
- [17] K. B. Kim, "RF and Microwave Dielectric Properties of Grain and Development of Capacitance Type On-line Moisture Meter", Ph.D. Dissertation, Seoul National University, Seoul, Korea, (1997)
- [18] K. B. Kim, J. H. Kim, S. S. Lee and S. H. Noh, "Measurement of Grain Moisture Content Using Microwave Attenuation at 10.5 GHz and Moisture Density", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 51, No. 1, pp. 72-77, (2002)
- [19] K. B. Kim, J. H. Kim, S. S. Lee and S. H. Noh, "Simple Instrument of Moisture Content in Grain by Free-space Microwave Transmission," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, in print, (2002)
- [20] S. O. Nelson, "Microwave Dielectric Properties of Fresh Fruits and Vegetables", *Transactions of the ASAE*, Vol. 23, No. 5, pp. 1314-1317, (1980)
- [21] A. von Hippel, "Dielectrics and waves", Wiley, New York, pp. 20, (1954)
- [22] S. I. Ganchev, S. Bakhtiari, and R. Zoughi, "A Novel Numerical Techniques for Dielectric Measurement of Generally Lossy Dielectric", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 41, No. 3, pp. 361-365, (1992)
- [23] S. Bakhtiari, S. I. Ganchev and R. Zoughi, "Open-ended Rectangular Waveguide for Nondestructive Thickness Measurement and Variation Detection of Lossy Dielectric Slabs Backed by a Conducting Plate," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 42, No. 1, pp. 19-24, (1993)
- [24] D. K. Ghodgaonkar, V. V. Varadan, and V. K. Varadan, "Free-Space Measurement of Complex Permittivity and Complex Permeability of Magnetic Materials at Microwave Frequencies," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 39, No. 2, pp. 387-394, (1990)
- [25] KSAE, "Agricultural Machinery Handbook", J. KSAE Press, Seoul, Korea, pp. 587, (2000)