

# 마이크로파를 이용한 곡류의 함수율 측정장치 개발에 관한 기초연구

## Microwave dielectric property to develop a grain moisture meter

김기복\*    노상하\*    김종현\*\*  
정희원    정희원  
K.B.Kim    S.H.Noh    J.H.Kim

### 1. 서론

마이크로파를 이용한 곡류의 유전특성 및 함수율측정 연구는 주로 도파관이나 공동공진 방법을 이용하여 왔으며 이에 따라 전파의 손실이 없는 정교한 샘플홀더를 제작하여 곡립의 단립에 대하여 측정하였는데, 이때 사용된 샘플홀더는 그 구조가 유전특성 측정용으로서 함수율 측정장치의 센서로 이용되기에는 부적합한 것으로 판단된다. 이러한 한계를 극복함과 동시에 최근에 요구되고 있는 비파괴·비접촉 온라인 수분측정장치를 개발하기 위하여 마이크로스트립 선로형 센서를 이용하거나 (Miyai, 1978), 안테나를 이용하는 방법이 연구되고 있다(Kraszewski, 1991, Menke, 1995). 마이크로스트립 선로를 이용하는 방법은 곡물이 선로 위를 통과할 때 함수율에 따른 마이크로파 전파의 감쇠를 측정하는 방법이다. 안테나를 이용하는 방법은 안테나 사이에 시료를 놓고 송신안테나에서 방사된 마이크로파 신호가 시료를 투과하여 수신안테나에서 검파되는 신호의 감쇠와 위상변화를 이용하는 방법이다. 이 방법은 비교적 많은 양의 시료를 비접촉·비파괴적으로 측정할 수 있으며 주로 2~18GHz 범위의 주파수 대역에서 사용된다. 측정원리가 비교적 간단하고 온라인 함수율측정 시스템의 개발에 유리하다. 측정주파수는 8~12GHz인 X-band의 주파수가 많이 이용되고 있는데 그 이유는 이 대역의 주파수는 물분자의 쌍극자모멘트 회전에너지 주파수에 포함되는 영역으로 자유수에서 물분자의 마이크로파 에너지 흡수가 크게 나타나기 때문이다.

마이크로파를 이용한 곡류의 유전특성 및 함수율측정에 관한 연구는 이미 외국의 경우 많은 연구가 이루어졌으나 국내에서의 관련 연구는 거의 미미한 실정이며, 특히, 함수율 측정장치 개발에 필수적인 국내 품종에 관한 기초 연구자료는 거의 전무하다. 마이크로파를 이용한 유전특성 및 함수율 측정에서는 산물밀도가 큰 영향을 주는데, 외국의 경우 이러한 산물밀도에 무관한 수분측정방법을 개발하기 위한 많은 연구가 이루어지고 있다.

따라서 본 연구에서는 마이크로파 X-band에서의 곡류의 유전특성을 구명하고 마이크로파 전파특성을 이용하여 함수율 측정기의 개발 가능성을 검토한 다음 수분밀도를 이용한 산물밀도 보정모델을 개발하고 기존의 발표된 산물밀도 보정방법과 비교·평가하였다.

\* 서울대학교 농업생명과학대학 농공(기계)학과

\*\* 광운대학교 공과대학 전파공학과

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 공시재료

공시재료는 함수율 범위 11~25%w.b.의 단립종인 화성벼, 함수율 11~18%w.b.인 현미(일품), 그리고 함수율 11~21%w.b.인 보리를 사용하였으며 함수율은 10g, 135℃, 24시간 오븐건조법으로 결정하였다.

### 2.2 실험장치

#### 2.2.1 실험장치의 구성

전파의 투과를 이용한 곡류의 유전특성 및 함수율 측정시스템은 그림1에서 보는 바와 같이 Synthesized sweep generator(45MHz~20GHz) 및 회로망분석기(HP8510C), 혼안테나 및 샘플홀더로 구성하였으며 전송특성 출력값은 플로터(HP7475)로 출력하였다. 혼안테나의 Gain은  $16.5 \pm 1.5$ (dB), 개구부의 단면크기는  $5 \times 3.7$ cm이다.

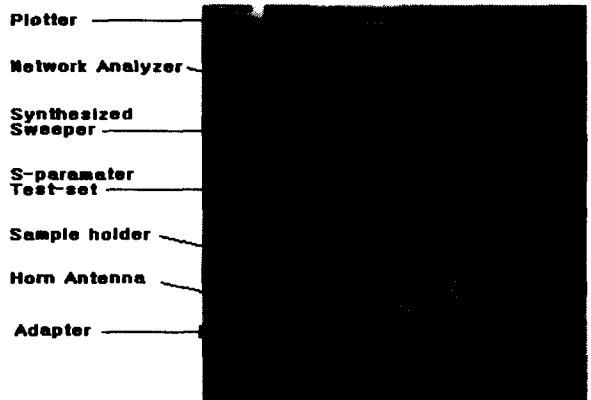


Fig. 1. Photograph of the attenuation and phase measurement system.

#### 2.2.2 샘플홀더 및 측정주파수

샘플홀더의 재질은 아크릴이며 전파가 투과할 때 발생하는 혼안테나의 누손(leakage)을 최소화하기 위하여 혼안테나 가로크기의 2배 이상인 15.52cm로 하였으며 두께를 0.2cm로 하였다(Nelson and Kraszwski, 1995). 이때 전파의 투과거리가 되는 샘플홀더의 너비는 X-band에서의 파장범위가 2.5~3.75cm이므로 최소한 한 파장 이상의 투과길이를 고려하여 4.25cm로 하였으며 샘플홀더의 크기는  $4.25 \times 11.96 \times 15.52$  (788.88cm<sup>3</sup>)로 제작하였다.

### 2.3. 전파특성 측정

먼저 샘플홀더에 시료가 없을 때 감쇠량과 위상을 측정한다. 다음, 샘플홀더에 시료를 충전하여 얻어지는 감쇠량과 위상을 측정하여 각각의 차이를 이용하여 분석하였다. 투과되는 파의 전송계수  $S_{21}$ 의 크기와 위상은 다음 식(1)과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned}
 S_{21} &= |S_{21}|e^{j\phi} \\
 A &= -20 \log |S_{21}| \\
 \phi &= \phi + 2\pi n
 \end{aligned} \tag{1}$$

여기서, A = 감쇠량(dB)  
 $\phi$  = 전체 위상각(degree)  
 $\phi$  = 위상변이(degree)  
 n = 정수

샘플홀더내에 시료가 없을 때, 각 측정주파수에서의 샘플홀더의 감쇠량과 위상은 표1에서 보는 바와 같다.

Table. 1. Attenuation and phase of the sample holder without samples.

Item	9.0Ghz	9.2Ghz	9.5Ghz	10Ghz	10.5Ghz
Attenuation(dB)	-2.47	-1.23	-2.82	-0.70	-4.25
Phase (degree)	-160	-138	146	130	121

2.4. 유전특성 측정

전자기파는 유전물질을 통과할 때 그림2에서 보는 바와 같이 감쇠 및 위상변이가 발생한다. 시료를 통과하는 마이크로파의 전파상수 ( $\gamma$ )는 식(2)와 같이 표현된다.

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (2)$$

여기서,  $\alpha$  = 감쇠상수(Neper/m)  
 $\beta$  = 위상상수(radian/m)

유전체의 복소유전율과 전파상수는 다음과 같은 관계를 가진다.

$$\alpha + j\beta = j\sqrt{\left(\frac{\omega}{c_0}\right)^2(\epsilon' - j\epsilon'') - k_c^2} \quad (3)$$

여기서,  $c_0$  = 빛의 속도( $3 \times 10^8$ m/sec)  
 $k_c$  = 도파관의 차단파수  
 $\lambda_0$  = 진공에서의 파장

이때, free space에서는  $k_c=0$ 이 되며, 위의 관계식들을 대입하면 식(3)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\gamma = \alpha + j\beta = j\frac{2\pi}{\lambda_0}\sqrt{\epsilon' - j\epsilon''} \quad (4)$$

곡류의 경우  $\epsilon''^2 \ll \epsilon'^2$  (Kraszewski, 1996)의 관계를 이용하면 유전상수와 유전손실은 Kraszewski(1996)가 제안한 식 (4)와 (5)과 같이 표현된다.

$$\epsilon' = \left(1 + \frac{\Delta\phi\lambda_0}{360d}\right)^2 \quad (5)$$

$$\epsilon'' = \frac{4A\lambda_0\sqrt{\epsilon'}}{8.686\pi d} \quad (6)$$

2.5. 수분밀도의 정의

유전물질이 곡물인 경우 곡물의 건물중량보다는 절대적인 수분량이 유전특성에 큰 영향을 미치므로 함수율과 산물밀도의 곱으로 정의되는 수분밀도를 새로운 인자로 정의 하여 수분밀도와 유전특성 및 전파 특성과의 관계를 구명하고 이 결과를 이용한 함수율 측정법을 제시하고자 하였다.

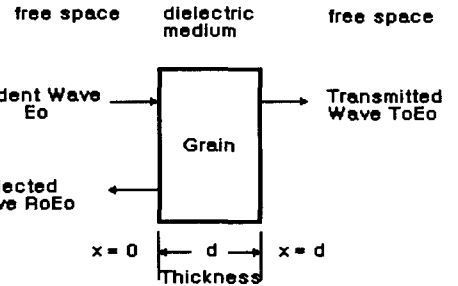


Fig. 2 Electromagnetic wave normally incident on the dielectric medium.

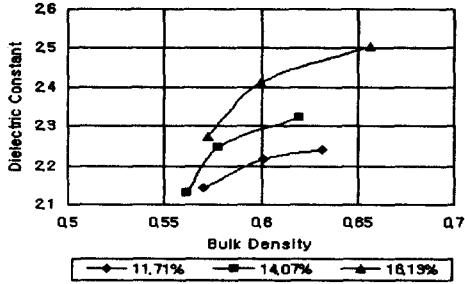
$$\rho_m = MC_{w.b.} \times \rho_b \quad (6)$$

여기서,  $\rho_m$  = 수분밀도(g/cm<sup>3</sup>)  
 $MC_{w.b.}$  = 함수율(decimal)  
 $\rho_b$  = 산물밀도(g/cm<sup>3</sup>)

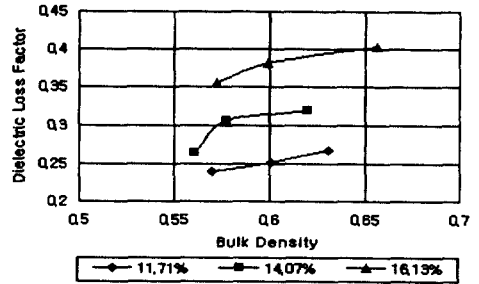
### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 산물밀도에 따른 곡류의 유전특성

산물밀도에 따른 각 곡류의 유전상수 및 유전손실은 그림2에서 보는 바와같이 산물밀도에 따라 증가하였다.

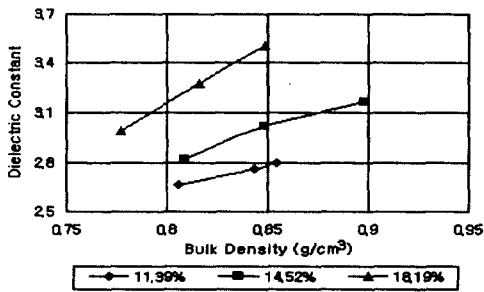


(a) Dielectric constant

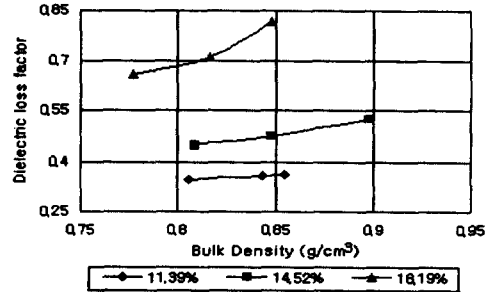


(b) Dielectric loss factor

Fig. 3. Bulk density dependence of the dielectric properties of Hwasung rough rice at indicated moisture contents, 9.5GHz and 24°C.

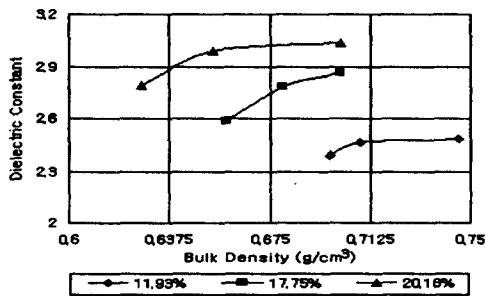


(a) Dielectric constant

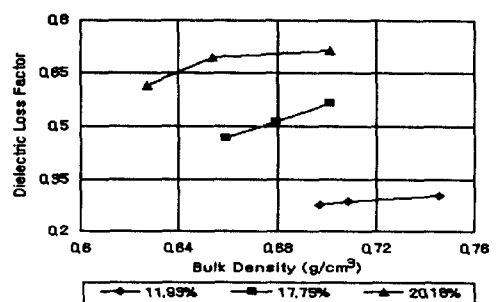


(b) Dielectric loss factor

Fig. 4. Bulk density dependence of the dielectric properties of Ilpoom brown rice at the indicated moisture contents, 9.5GHz and 24°C.



(a) Dielectric constant

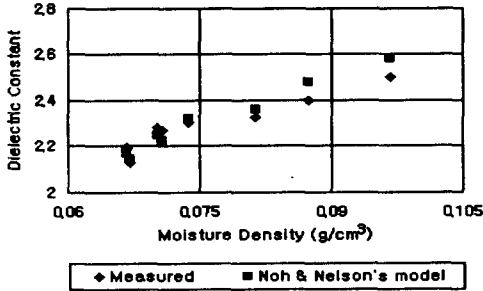


(b) Dielectric loss factor

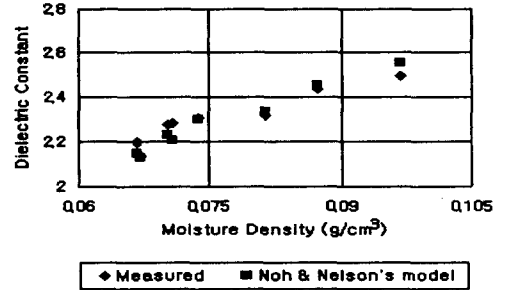
Fig. 5. Bulk density dependence of the dielectric properties of Jinyang barley at the indicated moisture contents, 9.5GHz and 24°C.

### 3.2. 기존 연구결과와의 비교

본 연구에서 분석된 유전상수를 기존의 연구결과인 Noh와 Nelson(1992)의 데이터와 비교하였다. 그림 6에서 보는바와 같이 수분밀도에 따른 유전상수의 변화로 나타내었으며 9 GHz 와 10.5GHz에서 기존의 연구결과와 거의 유사한 경향을 나타내었으며 다른 측정주파수에서도 유사한 경향을 나타내었다.



(a) at 9GHz



(b) at 10.5GHz

Fig. 6-8. Comparison of dielectric constants for the measured and Noh & Nelson's results for Hwasung rough rice.

### 3.3. 전파특성을 이용한 함수율 측정 모델 개발

전파가 시료를 투과할 때 시료의 산물밀도에 따라 유전특성이 달라지므로 이에 따라 측정되는 감쇠량과 위상변이가 크게 된다. 이러한 산물밀도의 영향은 다음 식 (7)로 표현되는 항이 산물밀도에 일정함을 여러 연구자가 구명하였다(Meyer, 1981, Nelson, Kraszewski, 1992, etc.).

$$\frac{(\epsilon' - 1)}{\epsilon''} \approx \frac{\phi}{A} \quad (7)$$

그러나 상기식(7)을 이용하여 함수율 측정장치를 개발할 경우 감쇠와 위상을 모두 측정하는 회로를 구현해야 하는데 감쇠량 측정회로보다 위상측정회로의 개발이 상대적으로 어렵고 비용이 많이 든다는 단점이 있다. 이러한 점을 고려하여 본 연구에서는 수분밀도와 감쇠량과의 관계를 이용하여 산물밀도를 보정하고자 하였다. 따라서 다음과 같은 함수율 측정 모델 I · II를 가정하여 회귀분석을 실시하여 산물밀도의 영향이 고려된 벼의 함수율 측정 모델을 개발하였다.

$$\text{모델 I : } (\phi/A) = a \times MC(\%) + b$$

$$\text{모델 II : } A = a \times \rho_m + b$$

여기서, a, b = 회귀계수

회귀분석 결과는 표2 및 표3에서 보는바와 같이 전반적으로 모델II의 결정계수가 모델 I의 결정계수보다 높게 나타났다. 따라서 수분밀도와 감쇠량을 함수율 측정의 주요 인자로 이용할 경우 정확도가 높은 함수율의 측정이 가능할 것으로 판단되었다.

Table 2. Regression analysis expressing relationship between the ratio of phase shift ( $\phi$ ) to attenuation (A) and moisture content of Hwasung rough rice at different frequencies.

Frequency (GHz)	Regression Coefficients		R <sup>2</sup>	SEC	SEC/ $\bar{y}$
	a	b			
9	-1.579	60.147	0.9369	1.986	0.065
9.2	-2.000	69.548	0.9134	2.987	0.094
9.5	-1.290	51.970	0.9363	1.632	0.059
10.0	-2.527	86.000	0.9181	3.903	0.088
10.5	-2.185	78.002	0.9325	3.040	0.073

\*Regression Model I :  $(\phi/A) = a \times MC(\%) + b$

Table 3. Regression analysis expressing relationship between the moisture density ( $\rho_m$ ) and attenuation (A) of Hwasung rough rice at different frequencies.

Frequency (GHz)	Regression Coefficients		R <sup>2</sup>	SEC	SEC/ $\bar{y}$
	a	b			
9	156.091	-6.346	0.9849	0.533	0.051
9.2	162.962	-7.218	0.9925	0.437	0.042
9.5	160.545	-5.813	0.9919	0.446	0.039
10.0	179.175	-9.099	0.9894	0.574	0.056
10.5	194.262	-9.519	0.9878	0.665	0.059

\* Regression Model II :  $A = a \times \rho_m + b$

#### 4. 요약 및 결론

본 연구는 마이크로파 X-band에서 회로망분석기와 혼안테나를 이용하여 벼의 함수율 11~25%w.b., 현미의 함수율 11~18%w.b., 보리의 함수율 11~21%w.b. 에 대한 각 곡류의 유전특성을 구명하고 수분밀도를 이용하여 산물밀도를 보정하기 위한 함수율 예측모델을 개발하여 기존의 밀도보정 방법과 비교·평가하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 산물밀도의 증가에 따라 각 곡류의 유전상수와 유전손실은 증가하였으며 유전상수의 경우 기존의 연구결과인 Noh와 Nelson(1992)의 결과와 유사한 결과를 나타내었다.
- 2) 함수율 예측모델의 개발에서 산물밀도의 영향을 보정하기 위한 방법으로 기존 연구결과인 위상과 감쇠량의 비를 이용한 모델 ( $(\phi/A) = a \times MC(\%) + b$ )과 본 연구에서 시도된 수분밀도와 감쇠량을 이용한 모델 ( $A = a \times \rho_m + b$ )을 비교한 결과 벼의 경우 전자의 결정계수는 0.91~0.93, 후자의 결정계수는 0.98이상으로 더 높게 나타나 수분밀도와 감쇠량을 함수율 측정의 인자로 이용한다면 산물밀도의 영향을 효과적으로 보상하면서 정확도가 높은 함수율 측정장치의 개발이 가능할 것으로 판단되었다.

#### 참고문헌

1. Kraszewski, A. 1996. *Microwave Aquametry - Electromagnetic Wave Interaction with Water - Containing Materials*. IEEE Press, Piscataway, NJ.
2. Kraszewski, A.W. and S. O. Nelson. 1991. Density-independent moisture determination in wheat by microwave measurement. *Trans. ASAE* 34(4):1776-1783.
3. Kraszewski, A.W. and S.O. Nelson. 1992. Resonant microwave cavities for sensing properties of agricultural products. *Trans. ASAE* 35(4):1315-1321.
4. Kraszewski, A.W. and S. O. Nelson. 1993. Nondestructive microwave measurement of

- moisture content and mass of single peanut kernels. *Trans. ASAE* 36(1):127-134.
5. Menke, F., T. Hinz, R. Eggers and R. Knöchel. 1996. Moisture-dependent structural behavior and permittivity model for granular materials. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 31(1):23-29.
  6. Meyer, W. and W. Schilz. 1981. Feasibility study of density-independent determination of the moisture content of solids. *J. Phys. D:Appl. Phys.* 13:1823-1830.
  7. Miyai, Y. 1978. A new microwave moisture meter for grains. *Journal of Microwave Power*, 13(2):163-166.
  8. Nelson, S. O. 1982. Factors affecting the dielectric properties of grain. *Trans. 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. ASAE* 32(3):991-998.
  10. Noh, S.H. and S.O. Nelson. 1992. Mathematical models for the dielectric constants of rice. *Trans. ASAE* 35(5):1553-1536.