

고주파 임피던스를 이용한 벼의 함수율 측정

- 산물밀도 보정방법을 중심으로

Comparison of Density Independent Functions for Determination of Moisture Content of Rough Rice using RF Impedance

김기복* 노상하*

K.B.Kim S.H.Noh

1. 서론

최근 각종 식품 및 농산물 가공 및 유통에 관련된 기계장치 및 시설에 대한 자동화 요구가 증가하고 있으며 특히 곡물의 건조, 저장 및 가공공정 등에서 유동상태에 있는 원료의 함수율을 비파괴적·비접촉식으로 측정할 수 있는 기술의 개발이 크게 요구되고 있다. 이러한 함수율 측정장치는 주로 직류저항을 이용한 전기저항식 함수율 측정장치 및 고주파 유전 특성을 이용한 정전용량식 함수율 측정장치가 이용되고 있다. 전기저항식 함수율 측정장치는 직류 및 직류에 가까운 저주파를 이용하므로 시료내부 물질의 구성성분 중 수분 외에 다른 요인들 특히 염류 등과 같은 이온성 물질에 대한 영향을 무시할 수 없게 된다.(1972, Nelson), 이것은 직류 및 직류에 가까운 저주파가 인가된 전기장 내에서는 전기장의 변화가 고주파의 경우보다 느려 물분자를 구성하고 있는 쌍극자의 배향이 매우 느리기 때문에 검출되는 신호는 자유수 뿐만 아니라 결합수의 영향도 동시에 포함하게 될 것으로 사료된다. 즉 ionic conductivity의 영향이 함수율 측정의 정확도에 영향을 주는데 이러한 영향은 Nelson(1973)에 의해 지적된 바 있다. 반면 고주파 정전용량식 함수율 측정장치의 경우는 원료내 수분활성도와 밀접한 관계가 있는 유전율을 이용하기 때문에 수분 외의 다른 구성성분들의 영향이 전기저항식에 비해 상대적으로 낮은 것으로 보고되고 있다(Nelson, 1973). 그러나 전기적인 방법을 이용한 함수율 측정방법 중 함수율 측정 정확도에 영향을 미치는 다른 어떤 요인들 보다 원료의 산물밀도가 가장 큰 영향을 미치고 있다. 이와 관련하여 국내외의 많은 연구자들에 의해 여러 측정 주파수에서 산물밀도의 영향을 배제할 수 있는 여러 가지 방법들이 제시되고 있다. (Meyer and Shiltz, 1980, Kraszewski, 1990, Lawrence and Nelson, 1993, Berbert and Stenning, 1996, Lawrence and Nelson, 1998, Kim and Noh, 1997) 그러나 기존의 여러 연구자들에 의해 개발된 산물밀도 보정 방법들은 주로 밀을 대상으로 개발되어 국내의 주요 농산물인 벼에 적용하기 위해서는 별도의 측도설정 과정이 필요

* 서울대학교 농업생명과학대학 생물자원공학부 농업기계학과

할 것으로 판단된다. 또한 밀도보정 모델에 이용된 변수들은 시료의 상대유전상수 및 유전손실 항으로서 실제의 함수율 측정장치의 개발측면에서는 검출되는 각종 임피던스를 이용하여 유전상수와 유전손실을 계산하는 별도의 과정이 필요하다. 이에 따라 본 연구에서는 고주파(1~50MHz)영역에서 기존의 여러 제시된 유전율을 인자로 하는 밀도보정 모델을 임피던스항으로 변환한 다음 국내산 벼에 적용하여 함수율 측정가능성을 검토하고 김(1997)등에 의해 개발된 수분밀도를 주요 인자로 이용하는 함수율 측정모델과 비교하였다.

2. 이론적 배경

극성을 띤 물분자가 고주파 전기장에 놓여지면 변화하는 전기장의 방향에 따라 물분자를 구성하는 극성분자들은 분극을 하게 되며 이러한 분극의 영향이 유전율로 나타나게 된다. 따라서 수분을 함유한 농산물이 교류전기장에 놓여질 때 콘덴서와 저항으로 이루어진 병렬 등가회로로 표현될 수 있으며 이때 유전율은 복소수로서 다음 식 (1)과 같이 표시된다.

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

여기서, ϵ = 복소유전율
 ϵ' = 상대유전상수
 ϵ'' = 상대유전손실

유전손실은 유전체가 전기장에 놓여져 있을 때 손실되는 열에너지에 관계되며 이러한 손실을 나타내는 지수로 손실탄젠트를 다음과 같이 정의하며 유전손실은 유전체의 전기전도도 또는 비저항의 함수로 다음과 같이 표시된다.

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

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

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

3. 재료 및 방법

3.1 공시재료

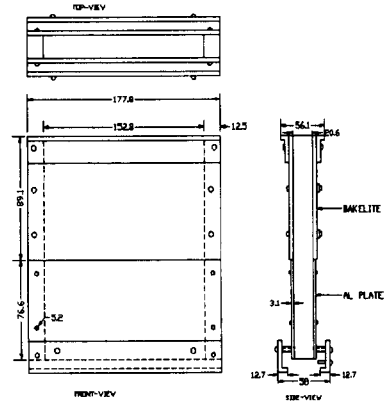
본 연구에서 사용된 공시재료는 1995년도에 경기도 화성군에서 수확된 단립종인 화성벼를 이용하여 함수율 범위 11~22%(w.b.)에서 실험하였다. 산물밀도의 변화는 전국판내에 시료의 투입속도를 다르게 하여 4수준으로 유지하였으며 으며 함수율 결정은 10g의 시료를 135℃에서 24시간 오븐건조하여 결정하였다. 여기서 시료의 온도는 주위온도(20~24℃)와 같게 유지하여 실험을 수행하였다.

3.2 고주파 임피던스 측정 시스템

벼의 고주파 임피던스 측정 시스템은 100kHz~500MHz의 측정범위를 가지는 임피던스 측정기(HP4195A)와 Impedance Test Kit (HP41941A), Test Fixture(HP16092A) 및 전극판(샘플홀더)로 구성하여 1~50MHz범위에서 벼의 산물밀도, 함수율에 따른 전극판의 임피던스를 측정하였다.

3.3 함수율 측정용 전극판 및 분석

본 연구에서 사용된 함수율 측정용 전극판은 그림1에서 보는바와 같이 평판형 전극으로서 극판 면적은 117cm², 극판간 거리는 2.06cm인 샘플홀더로 구성하였다. 극판내에 유전체가 공기인 상태에서의 이론적인 용량값은 5pF로 계산되었으나 실제의 용량측정값은 표 1에서 보는 바와같이 크게 차이가 남을 알수 있으며 주파수에 따라서도 용량값이 일정하지 않음을 알수 있다. 이것은 극판에 존재하는 부유용량 및 연결 커넥터의 용량등에 의한 영향이 포함되기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 시료가 충전되는 전극판의 고주파 임피던스는 1~50MHz의 범위의 주파수에서 측정하여 분석에 이용하였다.



[Fig. 1] Parallel plate type electrode.

따라서 시료가 충전되는 전극판의 고주파 임피던스는 1~50MHz의 범위의 주파수에서 측정하여 분석에 이용하였다.

[Table 1.] Capacitance of electrode in frequency range of 0.5 to 50MHz.

Frequency(MHz)	0.5	1	5	10	25	50
Capacitance(pF)	85.318	48.321	46.835	46.58	48.842	62.539

3.4 산물밀도 보정모델

기존의 산물밀도 보정방법은 Meyer(1980)등이 다음 식 (4)로 표시되는 항이 마이크로파 영역에서 시료의 산물밀도에 일정하게 나타남을 발견한 후 Lawrence등(1993, 1998)과 Bebert(1996)등에 의해 이러한 인자를 곡류에 적용하여 산물밀도 보정방법에 이용하여 왔다.

$$\frac{\epsilon' - 1}{\epsilon''} \quad (4)$$

Lawrence등(1993, 1998)등은 1~100MHz의 주파수에서 평판형 전극판을 이용하여 밀의 함수율을 예측할 수 있는 다음과 같은 함수를 가정한 다음 여러 가지 주파수에서 나타나는 $(\epsilon' - 1)/\epsilon''$ 의 항들을 이용하여 산물밀도를 보정할 수 있는 함수율 측정식들을 개발하였다.

$$MC(\%) = f([\frac{\epsilon' - 1}{\epsilon''}], [\frac{\epsilon' - 1}{\epsilon''}], \dots) \quad (5)$$

여기서, MC(%) = 습량기준 함수율(%)
i, j = 측정주파수(MHz)

한편, kraszewski등(1991)은 시료의 유전율은 시료가 포함하고 있는 수분의 양에 밀접한 관계가 있다는 점에 착안하여 유전상수와 유전손실이 다음 식 6과 같이 시료의 건물무게 및 수분무게의 함수로 나타남을 보였다.

$$\begin{aligned} \epsilon' &= f(W_d, W_w) \\ \epsilon'' &= f(W_d, W_w) \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, W_d = 시료의 건물무게(g)
 W_w = 시료의 수분무게(g)

이상의 밀도보정 방법들을 이용하여 상기에서 제시된 모델 (5), (6) 및 수분밀도(김과 노, 1997)를 이용하여 고주파 임피던스를 이용한 함수율 측정에서의 산물밀도 보정방안에 대하여 고찰하였다.

상기의 샘플홀더의 정전용량분석에서 나타난 바와같이 이론적인 용량계산값 보다 실제의 용량이 더 크게 나타나므로 기존의 제시된 모델 (5)와 (6)을 이용하기 위하여 Bebert(1996) 및 Lawrence등(1998)에 의해 평판형 전극판의 해석에 사용된 방법을 적용하였다. 즉, 유전상수 및 유전손실항을 포함하는 상기에 제시된 각 모델 (5) 및 (6)을 유전상수와 유전손실에 관계되는 임피던스의 항으로 변환하여 커패시턴스와 컨덕턴스의 비로 표현되는 식 (7)과 시료의 건물무게와 수분무게로 나타나는 식 (8)을 밀도보정 방법으로 이용하였다.

$$\frac{\epsilon' - 1}{\epsilon''} \cong 2\pi f \frac{C_m - C_a}{G_m - G_a} \quad (7)$$

여기서, C_m = 시료가 채워져 있을 때의 측정된 전극판의 전체 용량(pF)
 C_a = 공기가 채워져 있을 때의 측정된 전극판의 전체 용량(pF)
 G_m = 시료가 채워져 있을 때의 측정된 전극판의 전체 커패시턴스(mS)
 G_a = 공기가 채워져 있을 때의 측정된 전극판의 전체 커패시턴스(mS)

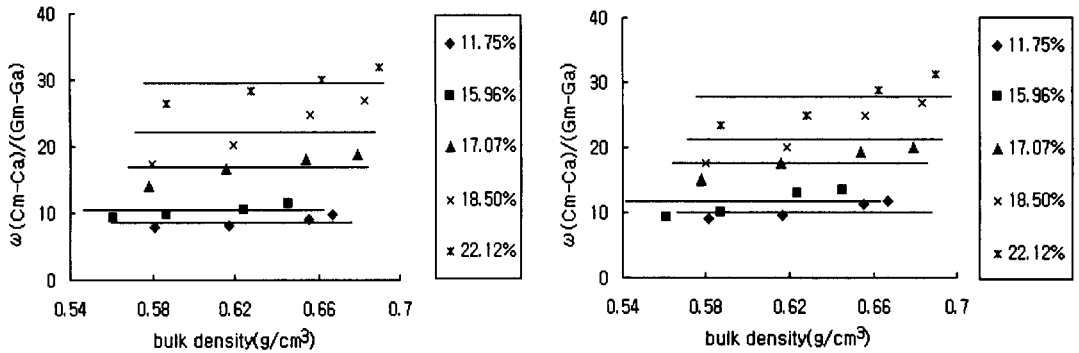
$$\begin{aligned} \epsilon' \propto C_m - C_a &= a_1 W_d + a_2 W_w + a_3 \\ \epsilon'' \propto G_m - G_a &= b_1 W_d + b_2 W_w + b_3 \end{aligned} \quad (8)$$

여기서, W_d = 시료의 건물무게(g)
 W_w = 시료의 수분무게(g)
 $a_1 \sim b_3$ = 모델의 계수

4. 결과 및 고찰

4.1 커패시턴스와 컨덕턴스의 비를 이용한 산물밀도보정

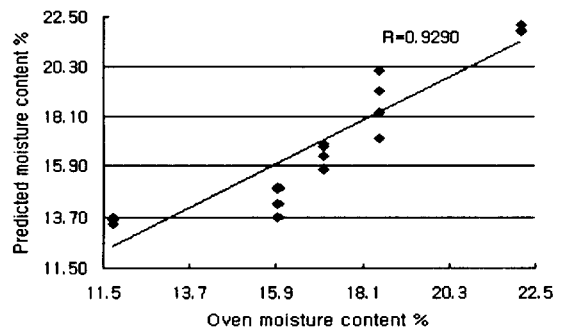
측정주파수 10MHz 및 25MHz에서 산물밀도에 따른 커패시턴스와 컨덕턴스의 비는 그림 3과 4에서 보는 바와같이 낮은 함수율(11~15%)범위에서는 산물밀도에 따라 대체적으로 일정한 값을 나타내었으나 함수율이 커짐에 따라 약간씩 증가하는 경향을 나타내었다.



[Fig.2] Density independent function proposed by Lawrence and Nelson(1993), vs. bulk density for Hwasung rough rice at 10MHz. [Fig.3] Density independent function proposed by Lawrence and Nelson(1993), vs. bulk density for Hwasung rough rice at 25MHz.

10MHz와 25MHz의 측정주파수에서 각각 측정된 커패시턴스와 컨덕턴스의 비를 이용하여 중회귀 분석을 실시한 결과 모델의 결정계수는 0.8632, SEC는 0.312%로 비교적 낮게 나타났으며 개발된 예측식(9)를 이용하여 함수율을 예측한 결과 그림 4에서 보는바와 같이 상관계수가 0.9411로서 함수율 측정정밀도가 낮게 나타나는 것으로 분석되었다.

$$\begin{aligned}
 MC(\%) = & 9.978 \times 10^4 \left[\frac{C_m - C_a}{G_m - G_a} \right]_{10} \\
 & - 17.7675 \times 10^4 \left[\frac{C_m - C_a}{G_m - G_a} \right]_{25} \\
 & + 0.123268 \quad (9)
 \end{aligned}$$



[Fig 4] Relationship between oven moisture content and moisture content predicted by equation 9.

기존의 Nelson등(1993,1998)과 Bebert등(1996)이 제시한 모델들은 포함되는 측정주파수가 거의 모두 3개 이상이며 이때의 결정계수들은 대체적으로 0.96이상을 나타내고 있는 점을 고려해볼 때 측정주파수 대역을 좀더 넓히고 포함되는 항을 늘리면 정확도가 다소 향상될 것으로 생각된다.

4.2 건물무게와 수분무게를 이용한 모델

상기 식 8에서 제시된 모델을 이용하여 각 측정주파수에서 시료의 건물무게와 수분무게로 표현되는 커패시턴스와 컨덕턴스 변화 예측식을 개발하였으며(식10) 회귀 분석결과 결정계수가 5MHz에서 가장 높은 조합을 나타내었다.

$$C_m - C_a = 0.0491 W_d + 0.3466 W_w - 14.8625 \quad (R^2 = 0.9381)$$

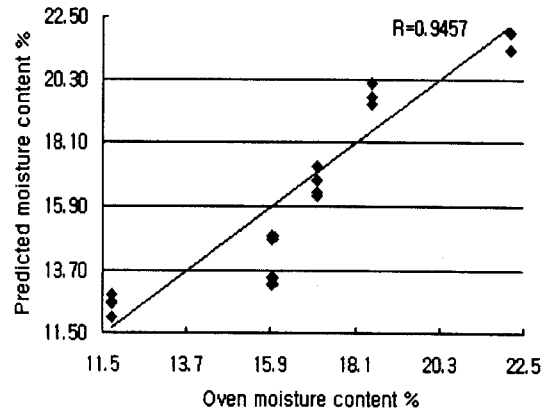
$$G_m - G_a = -0.0395 W_d + 0.8080 W_w - 17.8838 \quad (R^2 = 0.9138)$$

(10)

상기 식(10)을 이용하여 다음식 (11)과 같은 함수를 예측방정식으로 나타내었다.

$$MC(\%) = \frac{0.0395(C_m - C_a) + 0.0491(G_m - G_a) + 1.4651}{0.8475(C_m - C_a) - 0.2974(G_m - G_a) + 7.2758} \times 100 \quad (11)$$

상기 식(11)을 이용하여 함수를 예측한 결과 그림 5에서 보는바와 같이 상관계수가 0.9457로서 함수를 측정의 정확도가 다소 낮은 것으로 판단된다.



[Fig.5] Relationship between oven moisture content and moisture content predicted by equation 11.

4.3 수분밀도를 함수예측 모델

김과 노(1997)가 제시한 시료의 함수율과 산물밀도의 곱으로 표현되는 수분밀도를 이용하여 다음과 같은 커패시턴스변화 예측모델을 가정한 다음 회귀분석을 실시한 결과는 표 2에서 보는바와 같이 대체적으로 모델의 결정계수가 0.96이상으로 높게 나타나 기존의 김(1997)의 연구결과와 유사한 결과를 보이는 것으로 판단된다.

$$C_m - C_a = a \rho_m + b \quad (12)$$

여기서, a, b = 회귀계수

[Table 2] Regression analysis expressing relationship between the capacitance change of electrode($C_m - C_a$) and the moisture density(ρ_m) of Hwasung rough rice.

Item	Regression Coefficient		R ²	SEC
	a	b		
5 MHz	162.851	0.6760	0.9827	0.534
10 MHz	159.322	0.4334	0.9690	0.702
25 MHz	178.332	1.244	0.9679	0.801

5. 요약 및 결론

본 연구는 주위온도를 20~24℃로 고정한 상태에서 함수율 범위 11~22%인 단립종 벼의 고주파(1~50MHz) 임피던스를 이용한 함수율 측정장치의 개발에서 함수율 측정 정확도에 큰 영향을 미치는 산물밀도 보정방법에 대하여 고찰하기 위하여 기존의 연구결과인 유전율

의 함수로 표현되는 밀도보정 인자인 $((\epsilon' - 1)/\epsilon'')$ 와 유전율을 시료의 건물무게와 수분무게의 함수로 나타내는 방법과 수분밀도를 이용한 밀도보정 방법을 비교하였다. 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 10 및 25MHz의 2개 주파수에서 $((\epsilon' - 1)/\epsilon'')$ 로 표현되는 밀도보정 인자를 임피던스의 함수로 변환한 다음 함수율을 예측한 결과 실측값과의 상관계수가 0.929로서 기존의 1~100MHz와 밀을 대상으로 한 결과(0.979이상)보다 낮게 나타났다.
- 2) 유전율을 시료의 건물무게와 수분무게의 함수로 나타내어 함수율을 예측한 결과 5MHz 측정주파수에서 예측값과 실측값 사이의 상관계수가 0.946으로 다소 낮게 나타났다.
- 3) 수분밀도를 이용한 전극판의 커패시턴스 변화를 예측한 모델은 모델의 결정계수가 0.96 이상을 나타내어 기존의 결과와 유사한 결과를 나타내었다.

6. 참고문헌

1. 김기복. 1997. 곡류의 고주파와 마이크로파 유전특성 및 정전용량식 온라인 함수율 측정 장치 개발에 관한 연구. 서울대학교 공학박사 학위논문.
2. 김기복, 노상하. 1997. 고주파 정전용량식 곡류함수율 측정장치 개발. 한국산업식품공학 회지. 1(1):11-15.
3. Bebert, P.A. and B.C.Stenning. 1996. On-line Moisture Content Measurement of Wheat. J. agric. Engng. Res. 65: 287-296.
4. Kraszewski, A.W. 1996. Microwave Auametry-Electromagnetic Wave Interaction with Water-Containing Materials. IEEE Press, Piscataway, NJ.
5. Kraszewski, A.W., S.Kulinski, and A.Stosio. 1977. A preliminary study on microwave monitering of moisture content in wheat. Journal of Microwave Power 12(3):241-251.
6. Kraszewski, A.W.1991. Microwave aquametry - need and perspective. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 39: 828-835.
7. Lawrence, K.C. and S.O.Nelson. 1993. Radio-frequency density independent moisture determination in wheat. Transactions of the ASAE. 36(2):477-483.
8. Lawrence, K.C., S.O.Nelson, and P.G.Bartley Jr.1998. Measuring dielectric properties of hard red winter wheat from 1 to 350MHz with a flow-through coaxial sample holder. Transaction of the ASAE. 41(1)143-150.
9. Meyer, W. and W. Schilz. 1980. A microwave method for density independent determination of the moisture content of solids. J. Phys. D:Appl. Phys. 13: 1823-1820.
10. Nelson, S.O. 1973. Electrical properties of agricultural products-A critical review. Transaction of the ASAE. 16(2):384-400.
11. Nelson, S.O. 1982. Factors affecting the dielectric propeties of grain. Transaction of the ASAE. 25(4):1045-1049, 1056.
12. Nelson, S.O. 1984. Density dependence of the dielectric properties of wheat and whole-wheat flour. Journal of Microwave Power. 19:55-64.