

곡류의 고주파 유전특성 및 정전용량식 온라인 함수율 측정장치 개발에 관한 연구

Development of a capacitance type on-line grain moisture meter using RF dielectric property

김기복*	노상하*
정회원	정회원
K.B.Kim	S.H.Noh

1. 서론

최근 정부에서는 미질 향상과 생산비 절감을 통한 쌀의 경쟁력 강화, 수확후 작업의 기계화로 농촌노동력 부족의 해소, 유통구조 개선 등을 목적으로 미곡종합처리시설을 설치 운영하고 있으나 원료 및 가공 후의 품질검사 장치를 비롯한 대부분의 자동화 장치가 외국으로부터 수입되고 있는 실정이다. 곡류의 수확후 처리시스템에서 높은 기술수준(정확도 및 정밀도)과 자동화를 요하는 분야중의 하나는 건조와 저장단계에서의 자동수분측정 기술이다. 이에 따라 정지된 상태에 있는 곡류의 함수율 측정뿐만 아니라 유동상태에 있는 곡류의 함수율을 보다 신속하고 정확하게 측정할 수 있는 방법에 대한 연구가 시급할 것으로 판단된다. 이와 관련된 국내 기술현황은 함수율 측정기술의 경우 간이 자동수분측정기 등이 개발되어 일부 설치되어 가동되고 있으나 외국의 기기를 모방한 수준이며 장치의 정밀도 및 효율의 향상 그리고 비용의 저렴화 등이 요망되고 있다. 전기적인 특성을 이용한 함수율 측정장치 개발에 관한 연구는 국내의 경우 거의 발표된 것이 없으며, 기존의 상품화된 함수율 측정기의 경우 측정기의 개발에 관한 내용은 제작회사의 노-하우로서 거의 공개되지 않고 있는 실정이다. 상용화된 고주파 정전용량식 함수율 측정기에서는 주로 산물밀도의 영향을 보정하기 위하여 일정한 무게를 계량하여 항상 동일한 산물상태하에서 함수율을 측정하도록 하고 있으며 비교적 넓은 범위에서 정확하게 함수율을 측정할 수 있으나 측정원리상 유동상태에 있는 시료의 함수율을 온라인으로 측정하기가 어렵다는 단점이 있다.

본 연구는 고주파 정전용량식 온라인 함수율 측정장치를 개발하기 위하여 수행되었으며 구체적인 연구목적은 다음과 같다.

- 1) 곡류의 고주파 유전특성을 구명하며
- 2) 곡류의 함수율, 산물밀도, 수분밀도등에 따른 고주파 정전용량특성을 구명하고
- 3) 고주파 LC발진장치를 이용한 함수율 측정회로를 설계·제작하여 함수율 측정 가능성을 검토한 다음,
- 4) 이를 바탕으로 고주파 정전용량식 온라인 함수율 측정장치를 개발하고 평가한다.

* 본 연구는 농촌진흥청의 1995년도 농업특정연구과제 연구비 지원에 의하여 수행되었음.
* 서울대학교 농업생명과학대학 농공(기계)학과

2. 재료 및 방법

2.1 샘플홀더 설계 및 제작

곡류의 유전특성 및 정전용량을 검출하기 위하여 다음 그림1, 그림2에서 보는바와 같이 평판형 샘플홀더와 동축형 샘플홀더를 설계·제작하였다.

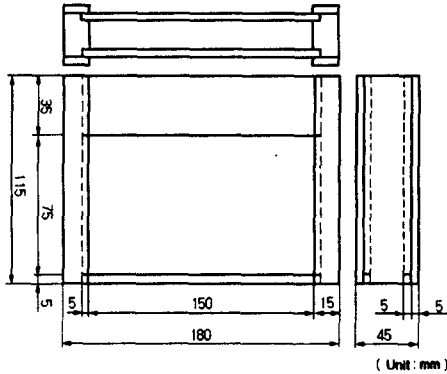


Fig. 1. Dimensions of parallel plate type sample holder.

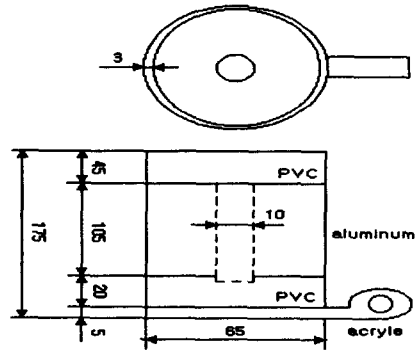


Fig. 2. Dimensions of coaxial type sample holder.

2.2. 공시재료 및 고주파 임피던스 측정시스템

실험에 사용된 공시재료는 표 1에서 보는바와 같으며 곡류의 유전특성과 정전용량을 측정하기 위한 시스템은 그림 3에서 보는바와 같다. 측정주파수는 1, 5, 10MHz로 하였다.

Table 1. Moisture contents of rough and brown rice, barley and wheat sample.

Item	Variety	Range of Moisture Content
Rough Rice	Hwasung	11~27%w.b.
	Ilpoom	12~28%w.b.
	Milyang23	11~24%w.b.
Brown Rice	Hwasung/Ilpoom	11~18%w.b.
Barley	Jinyang	11~21%w.b.
Wheat	Olgroo	11~22%w.b.

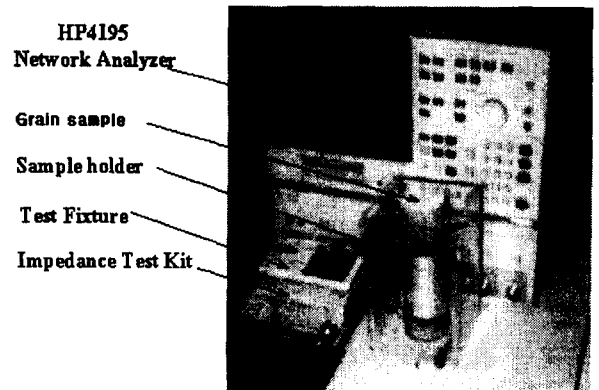


Fig.3. Photograph of the impedance measurement system and coaxial sample holder.

2.3. LC 발진기를 함수율 측정장치 설계 및 제작

그림 4에서 보는바와 같이 1~15MHz의 발진출력을 가지는 에미터 귀환형 LC발진기를 설계 제작하였으며 전체 함수율 측정시스템은 그림 5에서 보는바와 같다.

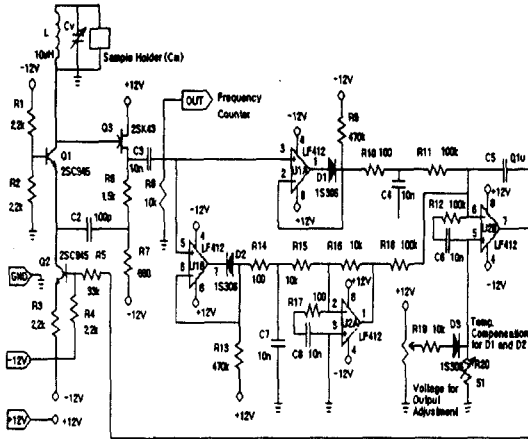


Fig. 4. Circuit diagram of the LC oscillator.

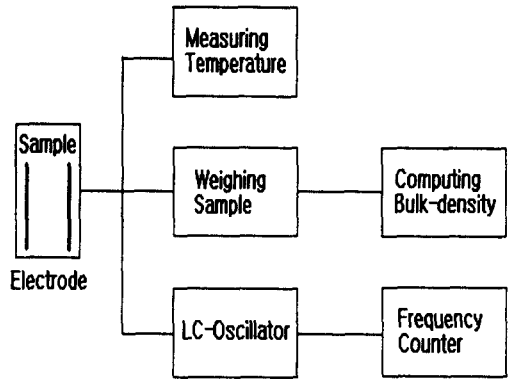


Fig. 5. Block diagram of the moisture measurement system.

2.4. 정전용량식 온라인 함수율 측정 시작기 구성

LC 발진기 및 증폭회로, 샘플홀더, 온도 센서, 주파수카운터, 시료 자동배출장치, 무게 측정장치, 인터페이스카드(AX5411), 컴퓨터 등으로 구성되는 정전용량식 온라인 함수율 측정 시작기를 그림 6과 같이 구성하였다.

2.5. 수분밀도의 정의 및 표준 함수율 측정방법

샘플홀더내에 충전되는 시료의 산물밀도의 영향을 고려하여 함수율과 산물밀도의 곱으로 표시되는 수분밀도를 다음과 같이 정의하였다.

곡류의 함수율은 10g의 시료를 135℃의 오븐 건조기에서 24시간 건조하여 결정하였다.

2.6. 곡류의 유전특성

유전특성은 동축형 샘플홀더를 병렬등가 회로로 표현한 다음 샘플홀더내의 시료의 높이차(Δh)에 따른 용량차(ΔC), 시료의 손실계수(D)를 이용하여 유전상수와 유전손실을 식(2)와 같이 나타내었으며 유전상수가 2.28~2.3인 벤젠을 이용하여 식(2)를 검증하였다.

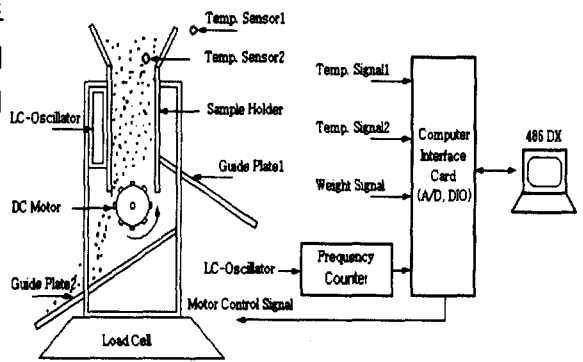


Fig. 6. Side view of the prototype on-line moisture measurement system.

$$\rho_m = MC_{w.b.} \times \rho_b \quad (1)$$

여기서, ρ_m = 수분밀도 (g/cm^3)
 $MC_{w.b.}$ = 함수율 (decimal)
 ρ_b = 산물밀도 (g/cm^3)

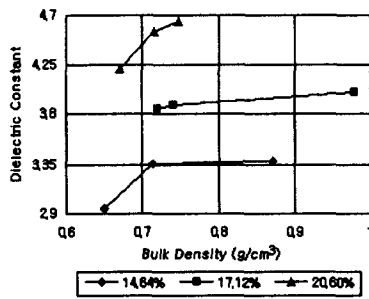
$$\epsilon' = \frac{\ln(d_o/d_i)}{2\pi\epsilon_0} \frac{\Delta C}{\Delta h} + 1 \quad (2)$$

여기서, d_o = 샘플홀더의 외부원통 지름
 d_i = 샘플홀더의 내부전극봉 지름
 ϵ_0 = 진공에서의 유전율

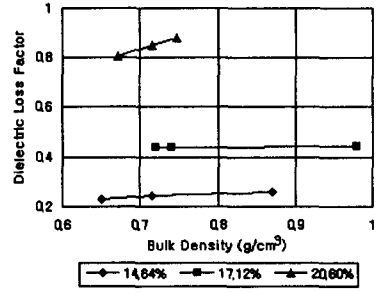
3. 결과 및 고찰

3.1. 산물밀도에 따른 벼와 현미의 유전특성

화성벼와 현미의 산물밀도에 따른 유전특성은 그림 7과 그림 8에서 보는바와 같이 산물밀도의 증가에 따라 증가함을 나타내어 기존의 연구 결과와 유사한 경향을 보였다.

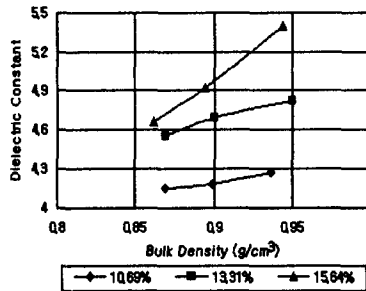


(a) Dielectric constant

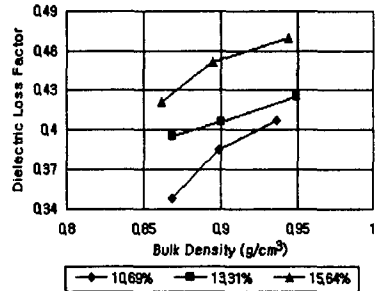


(b) Dielectric loss factor

Fig. 7. Bulk density dependence of the dielectric properties of Hwasung rough rice at the indicated moisture contents (5MHz and room temperature, 20°C).



(a) Dielectric constant

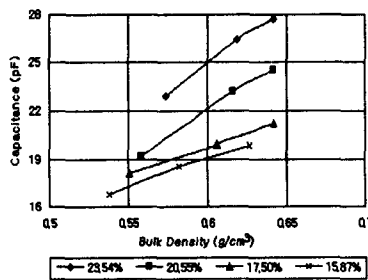


(b) Dielectric loss factor

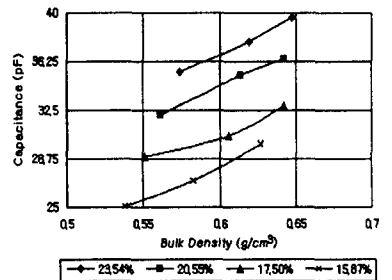
Fig. 8. Bulk density dependence of the dielectric properties of Hwasung and Ilpoom brown rice at the indicated moisture contents (5MHz and room temperature, 20°C).

3.2. 산물밀도에 따른 샘플홀더의 정전용량

벼의 산물밀도에 따른 동축형과 평판형 샘플홀더의 정전용량은 그림 9에서 보는바와 같이 각각 증가하는 경향을 보여 산물밀도의 영향이 크게 나타났다.



(a) Coaxial type sample holder.

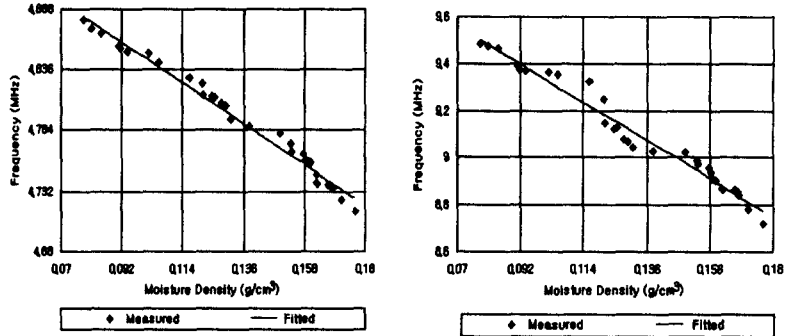


(b) Parallel plate type sample holder.

Fig. 9. Bulk density dependence of the capacitance of sample holder for Hwasung rough rice at the indicated moisture contents (5MHz and room temperature, 20°C).

3.4. 수분밀도에 따른 LC 발진기의 발진주파수 변화

샘플홀더의 정전용량 분석결과에서 나타나 바와 같이 산물밀도의 영향을 배제하기 위하여 5MHz와 10MHz를 기본 발진주파수로 하여 수분밀도에 따른 LC발진기의 발진주파수 변화를 나타낸 결과 그림 10에서 보는 바와 같이 수분밀도의 증가에 따라 발진주파수변화는 직선적으로 감소함을 보였다. 따라서 수분밀도를 함수율 측정의 주요 인자로 사용할 경우 산물밀도의 영향을 효과적으로 보상할 수 있을 것으로 판단된다.



(a) at 5MHz

(b) at 10MHz

Fig. 10. Moisture densitydependence of frequency variations of the LC oscillator including the parallel plate type sample holder filled with Hwasung and Ilpoom rough rice at 20°C.

3.5. LC발진장치를 이용한 함수율 측정 속도설정

LC발진장치와 샘플홀더를 이용하여 시료의 함수율을 측정 할 수 있는 속도 설정식을 구하기 위하여 식(3)과 같은 수분밀도와 곡류의 온도를 종속변수로 한 모델을 가정하여 회귀분석을 실시하였다. 회귀분석 결과는 표 2에서 보는 바와 같으며 비의 경우는 5MHz 발진주파수에서 결정계수가 0.98이상으로 높게 나타나 수분밀도를 함수율 측정의 인자로 사용한다면 품종에 관계없이 정확도가 높은 함수율 측정이 가능할 것으로 분석되었다.

$$F = a\rho_m + bT_g + c \quad (3)$$

여기서, F = 발진주파수 변화
 a, b, c = 회귀계수
 T_g = 곡물온도(°C)

Table 5-5. Regression analysis expressing the moisture density (ρ_m) and grain temperature (T_g) dependence of the oscillation frequency (F) at room temperature, 20°C (parallel plate type sample holder).

Item	Grain	Regression Coefficients			R ²	SEC	SEC/ \bar{y}
		a	b	c			
5MHz	Rough rice	-1.43472	-0.001085	5.02744	0.9838	0.0057	0.0012
	Brown rice	-1.00272	-0.001195	4.94735	0.9344	0.0072	0.0015
	Barley	-1.96691	-0.001576	5.03654	0.9956	0.0035	0.0007
	Wheat	-1.5726	-0.002041	5.01649	0.9905	0.0038	0.0008
10MHz	Rough rice	-4.5985	-0.005990	9.98982	0.9768	0.0158	0.0017
	Brown rice	-4.17561	-0.00322	9.65200	0.9209	0.0456	0.0050
	Barley	-8.60826	-0.007276	10.04725	0.9936	0.0128	0.0014
	Wheat	-7.70880	-0.007207	9.97140	0.9575	0.0346	0.0039

*Regression model : $F = a\rho_m + bT_g + c$

표 2에서 분석된 결과를 기초로 하여 벼의 함수율 측도설정식을 다음 식(4)와 같이 나타내어 개발된 온라인 함수율 측정장치에서 함수율을 계산하도록 하였다.

$$MC(\%) = (3.5041 - 0.697F - 0.000756T_g) \times \frac{100}{\rho_b} \quad (4)$$

3.6. 온라인 함수율 측정장치의 성능평가

개발된 함수율 측정장치에서 시료의 투입을 수동을 한 후 무게계량→온도측정→주파수측정→함수율 계산→자동배출의 과정은 큰 오동작 없이 수행되었으며 시료의 투입 후부터 배출까지 약 2~3초 이내에 수행되어 온라인 시스템화의 가능성을 보여 주었다.

함수율 측정장치의 성능과 수분밀도를 이용한 함수율 측정 측도설정식을 평가하기 위하여 함수율 10~24%의 화성벼를 7수준으로 하여 오븐값과 비교한 결과 평균자승오차가 ±0.402%로 나타나 정확한 함수율 측정이 가능할 것으로 판단되었다.

4. 요약 및 결론

본 연구는 고주파(1~10MHz) 임피던스를 이용한 곡류용 온라인 함수율 측정기를 개발하기 위하여 수행되었다. 평판형과 동축형 샘플홀더와 임피던스측정기를 이용하여 벼, 현미, 보리, 밀을 대상으로 이들 곡류의 함수율, 산물밀도, 수분밀도 등과 같은 주요 인자들이 유전특성, 고주파 정전용량에 미치는 영향을 구명하였다. 샘플홀더(평판형과 동축형)내의 시료의 함수율, 산물밀도, 온도, 수분밀도 등이 발진주파수에 미치는 영향을 구명하였으며, 수분밀도를 이용하여 함수율 측정 측도설정모델을 개발하였다. 이를 바탕으로 고주파 정전용량식 온라인 함수율 측정장치를 개발하고 평가하였으며 주요 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 고주파(1~10MHz)에서 각 곡류의 유전상수는 함수율 및 산물밀도에 따라 증가하였으며 기존의 연구결과와 유사한 경향을 나타내었다.
- 2) 시료의 함수율과 산물밀도의 곱으로 정의된 수분밀도와 각 시료의 유전상수와 시료가 충전된 샘플홀더의 고주파 정전용량은 선형적인 관계를 나타내어 시료의 수분밀도의 함수율로 표현될 수 있는 것으로 분석되었다.
- 3) 벼, 보리, 밀을 시료로 사용하여 샘플홀더내의 수분밀도와 고주파 정전용량과의 상관관계를 구명한 결과 상관계수가 0.98이상을 나타내었다.
- 4) 고주파에서 샘플홀더의 함수율에 따른 정전용량의 변화를 감지하기 위해 LC발진기를 개발하였으며 벼, 현미, 보리, 밀의 산물밀도가 LC발진기의 발진주파수에 미치는 영향을 구명하고 주파수(F), 수분밀도(ρ_m), 곡류온도(T_g)로 표시되는 다음과 같은 함수율 예측모델을 개발하였다.

$$\text{모델 : } F = a\rho_m + bT_g + c$$

개발된 모델에서 LC발진주파수 5MHz, 평판형 샘플홀더에서 벼, 현미, 밀, 보리의 경우 각 모델의 결정계수는 각각 0.9838, 0.9344, 0.9956, 0.9905로 나타났다. 특히 벼의 경우 품종

에 관계없이 정확한 함수율 측정이 가능한 것으로 분석되었다.

- 5) 상기 4)의 연구결과를 바탕으로 평판형 샘플홀더, LC발진기, 무게 및 온도 계측장치, 자동배출장치, 컴퓨터 인터페이스카드 등으로 구성된 온라인 함수율 측정장치를 개발하고, 측정 정밀도를 오븐건조법과 비교한 결과 평균자승오차(mean square error)가 0.402%로서 정확한 함수율 측정이 가능한 것으로 판단되었다.

참고문헌

1. 김우택, 1988, 콘덴서식 곡물 수분측정기 개선에 관한 연구. 서울대학교 석사학위 논문
2. 김정기, 박영기 공저, 1994, RF 회로설계, 도서출판 우신.
3. 허명희, 서혜선 共著. 1992. SAS 회귀분석. 自由아카데미.
4. *ASAE Standards*, 41st ed. 1994. ASAE 5352.2 Moisture measurement—unground grain and seeds, 353. St. Joseph, MI:ASAE.
5. Kandala, C.V.K., R.G. Leffler, S.O. Nelson and K.C. Lawrence. 1991. RF impedance instrument for corn kernel moisture measurement. ASAE Paper No. 91-6058.
6. Kraszewski, A. and S.O. Nelson. 1989. Composite model of the complex permittivity of cereal grain. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 43 : 211-219.
7. Lawrence, K. C., S. O. Nelson and A. W. Kraszewski. 1991. Temperature dependance of the dielectric properties of pecans. ASAE Paper No. 91-3007.
8. Matthews, J. 1968. The design of an electrical capacitance-type moisture meter for agricultural Use. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 8 : 17-30.
9. Nelson, S. O. 1952. A method for determining the dielectric properties of grain. Unpublished M.S. thesis, University of Nebraska Library, Lincoln, Nebr.
10. Nelson, S. O. 1965. Dielectric properties of grain and seed in the 1 to 50-MC. *Transactions of the ASAE*, 8(1) : 38-48.
11. Nelson S.O. 1979. Improved sample holder for Q-meter dielectric measurements. *Transactions of the ASAE*, 22(4) : 950-954.
12. Nelson, S. O. 1985. A model for estimating the dielectric constant of soybeans. *Transactions of ASAE*, 28(6) : 2047-2050.
13. Nelson S. O. and K. C. Lawrence. 1992. RF impedance sensing of moisture content in individual dates. ASAE Paper No. 92-6507.
14. Noh, S.H. and S.O. Nelson. 1989. Dielectric properties of rice at frequencies from 50Hz to 12GHz. *Transactions of the ASAE*, 32(3) : 991-998.
15. Noh, S.H. and S.O. Nelson. 1992. Mathematical models for the dielectric constants of rice. *Transactions of the ASAE*, 35(5) : 1553-1536.