

고주파 정전용량식 온라인 곡류 함수율 측정장치 개발

김기복·노상하
서울대학교 농공학과

Development of a Capacitance type On-line Grain Moisture Meter

Ki-Bok Kim and Sang-Ha Noh

Department of Agricultural Engineering, Seoul National University

Abstract

This study was conducted to develop an on-line grain moisture meter using RF impedance. An LC oscillator (1~15 MHz) was developed to detect the capacitance change of a parallel plate type sample holder depending on the moisture content. Effect of bulk density of grain on oscillation frequency was analyzed. A regression model including the frequency (F), moisture density (ρ_m), grain temperature (T_g) was developed as follows.

Model: $F = a\rho_m + bT_g + c$

At 5 MHz, the coefficients of determination of the model for rough rice, brown rice, barley and wheat were 0.9838, 0.9344, 0.9956 and 0.9905, respectively. Especially for rough rice, high accurate moisture content measurement was possible regardless of variety. Based on the results, an on-line prototype moisture meter consisting of a sample holder, an LC oscillator, weight and temperature sensing devices, grain discharger and I/O board was constructed and its performance and accuracy were evaluated. The mean square error of the difference in moisture contents determined by the prototype and the oven method was found to be 0.402%.

Key words: LC oscillator, moisture content, moisture density, on-line moisture meter

서 론

각종 농산물에 함유되어 있는 수분은 농산물의 물리적, 화학적 성질 및 생리적 작용에 큰 영향을 미칠 뿐만 아니라 농산물의 가공성 및 저장성 그리고 품질을 결정하는 매우 중요한 요인이다.

특히 최근의 농산물 및 식품의 가공 및 취급의 자동화에 대한 연구의 일환으로 각종 곡물의 저장, 건조 및 식품가공공정 등에서 유동상태에 있는 원료의 함수율 측정이 매우 중요한 문제점으로 대두되어 왔다. 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. 고주파

를 이용한 곡류의 함수율 측정방법은 곡류의 주파수에 따른 유전특성을 이용하는 것으로 이와 관련하여 외국의 경우 이미 많은 연구가 이루어지고 있다.

Nelson(1952, 1965, 1979, 1985)은 곡물의 유전특성을 여러 가지 주파수 대역에서 측정하였는데, 곡물의 유전특성 및 전기적인 특성 등은 곡물의 함수율, 산물 밀도, 온도, 주파수의 함수로 Table시된다고 하였다.

Kandala *et al.* (1989, 1991)은 작은 평행판 커패시터를 사용하여 평판사이에 있는 옥수수 단립의 수분을 측정하기 위하여 평판사이에 있는 단립의 두께, 투영면적, 무게를 측정한 다음 1 MHz와 4.5 MHz에서 단립이 있을 때와 없을 때의 용량을 측정하여 용량변화와 함수율 관계를 조사하여 함수율 예측방정식을 구하였다. 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 측정 장치를 개발하기 위하여 수행되었으며 구체적인 연구 목적은 첫째, 고주파 LC발진장치를 이용한 정전용량식 함수율 측정회로를 설계·제작하여, 둘째, 곡류의 함수율, 산물밀도, 수분밀도등에 따른 LC발진장치의 발진주파수 변화를 구명하고, 셋째, 이를 바탕으로 고주파 정전용량식 온라인 함수율 측정장치를 개발하고 평가한다.

재료 및 방법

공시재료

공시재료는 Table 1에서 보는바와 같다.

샘플홀더 설계 및 제작

정전용량식 함수율측정기를 구성하는 샘플홀더는 함수율 검출 정확도에 큰 영향을 미친다. Matthews (1968)에 따르면 샘플홀더의 극판 간격은 최대 곡물 크기의 2배 이상이 되어야만 브리지 현상을 방지할 수 있다고 하였으므로 극판 간격을 2.1 cm으로 하여 Fig. 1에서 보는바와 같이 평판형 샘플홀더를 설계·제작 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.
	Milyang 23	11~24% w.b.
Brown Rice	Hwasung/Ilpoom	11~18% w.b.
Barley	Jinyang	11~21% w.b.
Wheat	Olgroo	11~22% w.b.

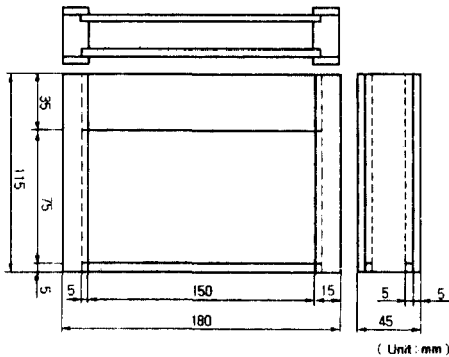


Fig. 1. Dimensions of parallel plate type sample holder.

LC발진기를 이용한 함수율 측정장치 구성

Fig. 2에서 보는바와 같이 1~15MHz의 발진출력을 가지는 에미터 귀환형 LC발진기를 설계 제작하였으며 전체 함수율 측정시스템은 Fig. 3에서 보는바와 같다.

정전용량식 온라인 함수율 측정 시작기 구성

LC 발진기 및 증폭회로, 샘플홀더, 온도센서, 주파수카운터, 시료 자동배출장치, 무게계측장치, 인터페이스카드(AX5411), 컴퓨터 등으로 구성되는 정전용량식 온라인 함수율측정 시작기를 Fig. 4와 같이 구성 하였다.

수분밀도의 정의 및 표준 함수율 측정방법

샘플홀더내에 충전되는 시료의 산물밀도의 영향을 고려하여 함수율과 산물밀도의 곱으로 Table시되는

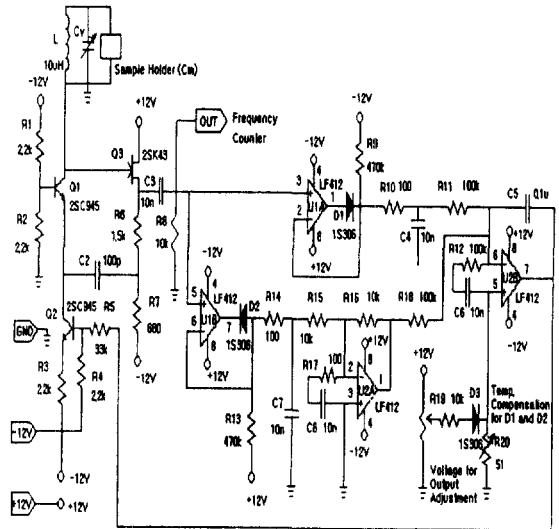


Fig. 2. Circuit diagram of the LC oscillator.

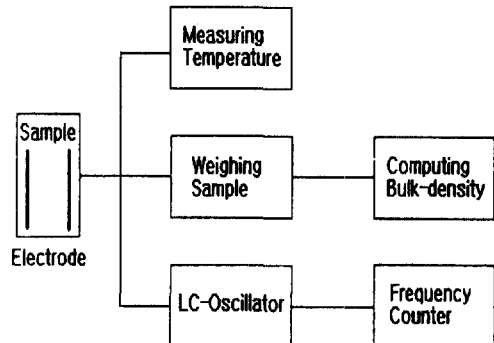


Fig. 3. Block diagram of the moisture measurement system.

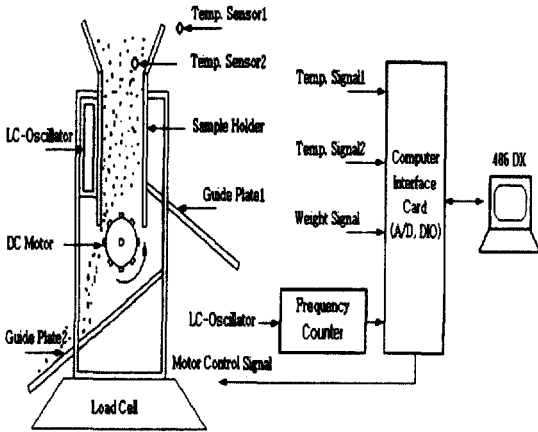


Fig. 4. Side view of the prototype on-line moisture measurement system.

수분밀도를 다음과 같이 정의하였다.

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

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

곡류의 함수율은 10 g의 시료를 135°C의 오븐 건조기에서 24시간 건조하여 결정하였다.

결과 및 고찰

산물밀도에 따른 LC 발진기의 발진주파수 변화

주위온도 및 곡물온도를 $20 \pm 0.5^\circ C$ 로 고정한 다음 화성벼의 함수율 15.8~23.6% w.b.일 때 평판형 샘플홀더에서 산물밀도에 따른 발진주파수는 Fig. 5에서 보는바와 같이 크게 감소하였으며 현미, 밀, 보리의 경우도 동일한 결과를 나타내었다. 따라서 정전용량식 함수율측정기의 개발에서 이러한 산물밀도의 영향을 보상하는 것이 함수율측정기의 정확도를 높이는 가장 중요한 요인이 된다.

곡류온도에 따른 LC 발진기의 발진주파수 변화

주위온도와 계측기의 온도가 $20 \pm 0.5^\circ C$ 로 일정하게 유지된 상태에서 5MHz 발진주파수에서 각 곡류의 온도 변화에 따른 발진주파수는 Fig. 6에서 보는바와 같이 품종이 동일한 시료의 수분밀도가 일정하게 유지될 경우 온도가 증가함에 따라 발진주파수는 거의 직선적으로 감소하며, 수분밀도가 증가함에 따라 발진주파수는 거의 평행이동하며 감소하였는데 이러한 결과는 김(1988)의 실험결과와 유사하였다.

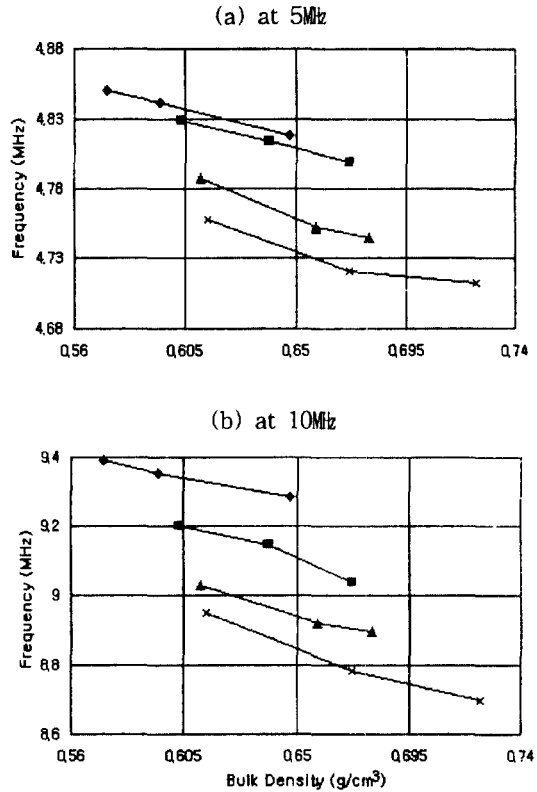


Fig. 5. Bulk density dependence of frequency variations of LC oscillator including parallel plate type sample holder filled with Hwasung rough rice having the indicated moisture contents, at 20°C. ◆—◆: 15.87%, ■—■: 17.50%, ▲—▲: 20.55%, ×—×: 23.54%.

수분밀도에 따른 LC 발진기의 발진주파수 변화

샘플홀더의 정전용량 분석결과에서 나타나 바와 같이 산물밀도의 영향을 배제하기 위하여 5 MHz와 10 MHz를 기본 발진주파수로 하여 수분밀도에 따른 LC 발진기의 발진주파수 변화를 나타낸 결과 Fig. 7에서 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.

LC발진기를 이용한 함수율측정 속도설정

LC발진장치와 샘플홀더를 이용하여 시료의 함수율을 측정할 수 있는 속도 설정식을 구하기 위하여 지금까지의 요인분석을 근거로 하여 식(2)와 같은 수분밀도와 곡류의 온도를 종속변수로 한 모델을 가정하여 회귀분석을 실시하였다.

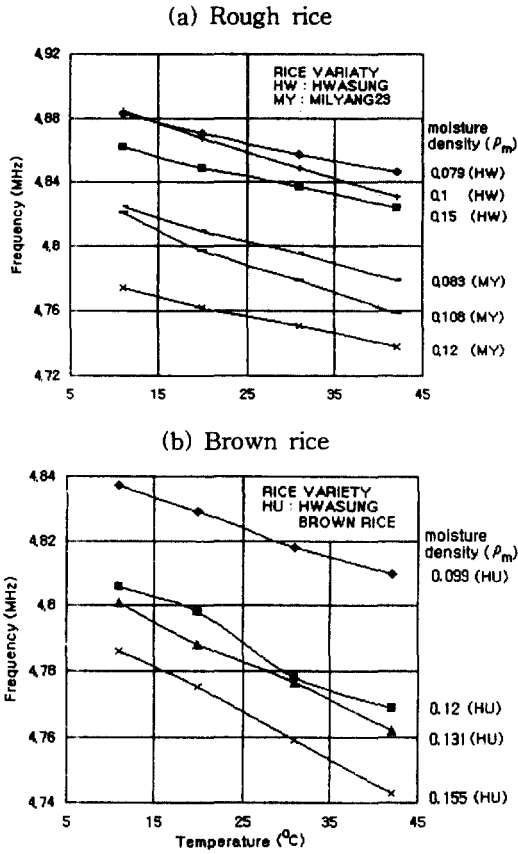


Fig. 6. Effect of grain temperature on frequency variations of the LC oscillator including parallel plate type sample holder having various moisture densities (room temperature, $20 \pm 0.5^\circ\text{C}$).

$$F = a\rho_m + bT_g + c \quad (2)$$

여기서, F=발진주파수 변화

a,b,c=회귀계수

T_g =곡물온도($^\circ\text{C}$)

회귀분석 결과는 Table 2에서 보는바와 같으며 특히, 벼의 경우는 5 MHz 발진주파수에서 결정계수가 0.98이상으로 높게 나타나 수분밀도를 함수를 측정의 인자로 사용한다면 품종에 관계없이 정확도가 높은 함수를 측정이 가능할 것으로 분석되었다.

Table 2에서 분석된 결과를 기초로 하여 벼의 함수를 측정설정식을 다음 식 (3)과 같이 나타내어 개발된 온라인 함수를 측정장치에서 함수를 계산하도록 하였다.

$$MC(\%) = (3.5041 - 0.697F - 0.000756T_g) \times \frac{100}{\rho_b} \quad (3)$$

온라인 함수를 측정장치의 성능평가

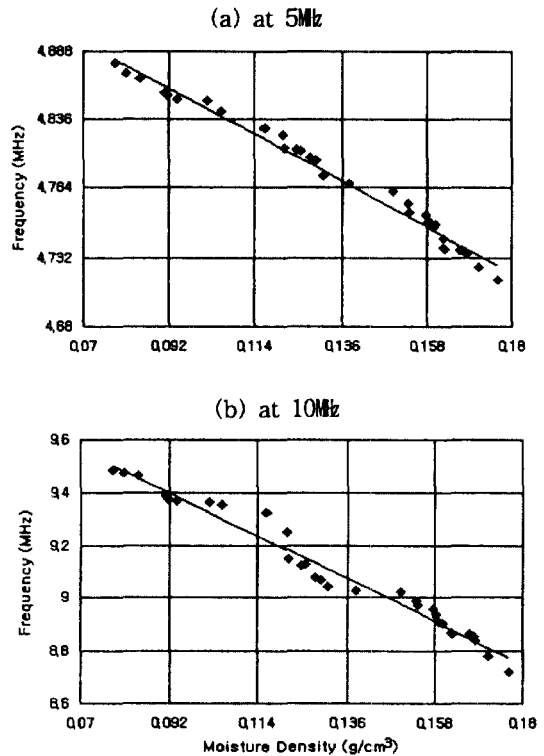


Fig. 7. Moisture density dependence of frequency variations of the LC oscillator including the parallel plate type sample holder filled with Hwasung and Ilpoom rough rice at 20°C . \blacklozenge : Measured, —: Fitted.

Table 2. Regression analysis expressing the moisture density (ρ_m) and grain temperature (T_g) dependence of the oscillation frequency (F) at room temperature, 20°C

Item	Grain	Regression Coefficients			R^2
		a	b	c	
5 MHz	Rough rice	-1.4347	-0.0011	5.0274	0.9838
	Brown rice	-1.0027	-0.0012	4.9474	0.9344
	Barley	-1.9669	-0.0016	5.0365	0.9956
10 MHz	Rough rice	-4.5985	-0.0060	9.9898	0.9768
	Brown rice	-4.1756	-0.0032	9.6520	0.9209
	Barley	-8.6083	-0.0073	10.0476	0.9936
	Wheat	-7.7088	-0.0072	9.9714	0.9575

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

함수를 측정장치의 성능과 수분밀도를 이용한 함수를 측정 측정설정식을 평가하기 위하여 함수를 10~24%의 화성비를 7수준으로 하여 오븐값과 비교한 결

Table 3. Validation results for the prototype on-line moisture meter on Hwasung rough rice

Bulk density (g/cm ³)	Prototype		Error ((1)-(2))
	Measured MC (%) ⁽¹⁾	MC (%) of Oven Method ⁽²⁾	
0.735	24.43		0.68
0.738	24.29	23.75	0.54
0.743	23.92		0.17
0.724	19.22		0.27
0.727	18.99	18.95	0.04
0.724	19.22		0.27
0.740	18.53		0.18
0.746	18.48	18.35	0.13
0.743	18.73		0.38
0.738	15.29		-0.23
0.771	15.12	15.52	-0.40
0.765	15.23		-0.29
0.721	14.37		0.06
0.727	14.05	14.31	-0.26
0.724	14.9		0.59
0.754	13.67		-0.26
0.751	13.68	13.93	-0.25
0.760	13.91		-0.02
0.751	9.65		-0.61
0.757	9.52	10.26	-0.74
0.765	9.55		-0.71
MSE (Mean Square Error)			0.402%

과 Table 3에서 보는바와 같이 평균자승오차가 $\pm 0.402\%$ 로 나타나 정확한 함수율 측정이 가능할 것으로 판단되었다.

요 약

본 연구는 고주파(1~10 MHz)를 이용한 곡류용 온라인 함수율 측정기를 개발하기 위하여 수행되었다. 평판형 샘플홀더와 LC발진장치(1~15 MHz)를 이용하여 벼, 현미, 보리, 밀을 대상으로 이들 곡류의 함수율, 산물밀도, 수분밀도, 온도 등과 같은 주요 인자들이 발

진장치의 발진주파수에 미치는 영향을 구명하였으며 수분밀도를 이용하여 함수율 측정 속도설정모델을 개발하였다. 개발된 모델의 결정계수는 5 MHz 발진주파수에서 벼, 현미, 보리, 밀의 경우 각각 0.9832, 0.9344, 0.9956, 0.9905로 나타났으며 특히 벼의 경우 품종에 관계없이 정확한 함수율 측정이 가능할 것으로 분석되었다. 이를 바탕으로 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.

문 헌

- 김우택. 1988. 콘덴서식 곡물 수분측정기 개선에 관한 연구. 서울대학교 석사학위 논문.
- 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. ASAE, St. Joseph, Michigan, USA.
- Matthews, J. 1968. The design of an electrical capacitance-type moisture meter for agricultural Use. J. of Agricultural Engineering Research 8: 17-30.
- Nelson, S.O. 1952. A method for determining the dielectric properties of grain. Unpublished M.S. thesis, University of Nebraska. Lincoln, USA.
- Nelson, S.O. 1965. Dielectric properties of grain and seed in the 1 to 50-MC. Transactions of the ASAE 8(1): 38-48.
- Nelson S.O. 1979. Improved sample holder for Q-meter dielectric measurements. Transactions of the ASAE 22(4): 950-954.
- Nelson, S.O. 1985. A model for estimating the dielectric constant of soybeans. Transactions of ASAE 28(6): 2047-2050.
- Nelson S.O. and K.C. Lawrence. 1992. RF impedance sensing of moisture content in individual dates. ASAE Paper No. 92-6507. ASAE, St. Joseph, Michigan, USA.
- Noh, S.H. and S.O. Nelson. 1989. Dielectric properties of rice at frequencies from 50 Hz to 12 GHz. Transactions of the ASAE 32(3): 991-998.