

고주파 정전용량을 이용한 밀가루와 고춧가루의 수분함량 측정에 관한 연구(II)- LC 발진장치를 이용한 함수율 측정

김기복 · 이종환* · 노상하

서울대학교 농업생명과학대학 농공학과, *한경대학교 생물자원기계학과

Moisture Content Measurement of Wheat Flour and Red-pepper Powder using RF Capacitance (II)- Measurement of Moisture Content using LC Oscillator

Ki-Bok Kim, Jong Whan Lee* and Sang Ha Noh

Department of agricultural engineering, Seoul National University

*Department of bioresourcew machinery, Hankyung National University

Abstract

This study was conducted to measure the moisture content of wheat flour (5.9~17.07%w.b.) and red-pepper powder (10.87~27.36%w.b.) using 5 MHz LC oscillator which enable to detect the capacitance change of parallel plate type sample holder with food samples depending on the moisture content. The effects of bulk density and sample temperature on oscillation frequency were analyzed. To eliminate the effect of bulk density on oscillation frequency the moisture density was estimated to compensate the effect of bulk density on moisture content measurement. Various empirical models including frequency (F), moisture density (ρ_w) and sample temperature (T) as the variables were developed by regression analysis. The standard errors between measured moisture content and predicted moisture content of wheat flour and red-pepper powder by developed models were 0.609% and 0.632%, respectively.

Key words: LC oscillator, oscillation frequency, moisture content, moisture density, wheat flour, red-pepper powder

서 론

식품에 함유된 함수율 측정의 중요성에도 불구하고 간접적인 측정방법인 전기적인 특성을 이용한 함수율 측정장치 개발에 관한 연구는 국내의 경우 거의 발표된 것이 없으며, 기존의 상용화된 함수율 측정기의 경우 측정기의 개발에 관한 내용은 제작회사의 Know-How로서 거의 공개되지 않고 있는 실정이다. 본 연구(I)에서 분석된 결과를 근거로 시료가 샘플홀더 내에 충전될 때 함수율에 따른 샘플홀더의 정전용량 변화를 함수율 측정에 이용하기 위해서는 샘플홀더를 콘덴서로 하는 LC발진기를 구성하고 샘플홀더의 정전용량에 따른 발진주파수 차이를 검출함으로써 함수율을 측정하고자 하였다(김기복과 노상하, 1997). 이러한 방법 외에도 저항과 콘덴서를 이용한 RC 발진과 샘플홀더의 용량을 직접 측정하는 방법이 있으나 RC발진

을 이용한 수분측정은 LC발진보다 그 정확도가 낮은 것으로 나타났다(김우택, 1988). 정전용량을 직접 측정하는 방법은 원리상 측정에 필요한 별도의 고주파 신호발생기가 필요하며 따라서 LC발진기를 이용하는 것보다 장치의 구성이 복잡해진다. 샘플홀더의 용량을 직접 측정하는 방법에는 저주파 신호를 이용하는 방법도 고려해 볼 수 있으나 저주파가 인가된 교류전기장 내에서는 전기장의 변화가 고주파의 경우보다 느리기 때문에 물분자를 구성하고 있는 쌍극자의 배향이 매우 천천히 바뀌게 되어 이에 따라 검출되는 신호는 자유수 뿐만 아니라 결합수의 영향도 동시에 포함될 것으로 사료된다. 상용화된 고주파 정전용량식 함수율 측정기에서는 주로 산물밀도의 영향을 보정하기 위하여 일정한 무게를 계량하여 항상 동일한 산물상태하에서 함수율을 측정하도록 하고 있다. 측정에 필요한 주파수의 선정은 본 연구(I)에서 분석된 바와 같이 측정주파수 5 MHz에서 정확도가 다소 높은 함수율 측정이 가능할 것으로 분석되었다. 관련된 외국의 연구결과들은 주로 곡류를 대상으로 한 결과들이며 분말식품류에 대한 연구는 거의

Corresponding author : Ki-Bok Kim, Department of Agricultural Engineering, Seoul National University, Suwon 441-744, Korea

없는 실정이며 곡류의 경우 고주파를 이용한 함수율 측정은 주로 1 MHz와 5 MHz의 2개 주파수에서의 정전용량, 위상변화, Q값 등을 이용하여 개발되었는데 이것은 이들 주파수에서 함수율의 증가에 따라 상대유전상수 값의 차이가 크게 나타나기 때문이며 개발된 함수율 예측모델의 결정계수는 0.92~0.97정도였으나 주로 곡류의 단립상태에서 측정하였으며 산물상태의 영향은 크게 고려되지 않았다(Kandala *et al.*, 1986, 1990, 1991; Nelson와 Kraszewski, 1990; Nelson *et al.*, 1990, 1991; Lawrence *et al.*, 1990, 1991).

한편, 국내의 경우 김기복과 노상하(1997)는 본 연구(I)에서 분석된 산물밀도의 보정인자인 수분밀도를 5MHz의 LC 발진기를 이용하여 곡류에 적용한 결과 함수율 예측 정확도가 0.402%로 나타나 매우 정확한 함수율 측정이 가능하다고 보고하였다.

따라서 본 연구에서는 본 연구(I)에서 분석한 내용을 근거로 하여 산물밀도의 영향을 보정할 수 있는 수분밀도와 5 MHz LC 발진기의 발진주파수 관계를 구명하고, 실제의 함수율 측정장치 구성에 필요한 인자 중의 하나인 시료의 온도와 발진주파수와의 관계를 검토한 다음 이들 요인들을 고려한 함수율 측정 속도설정식을 개발하기 위하여 수행되었다.

재료 및 방법

공시재료

공시재료인 밀가루와 고춧가루는 본 연구(I)에서 사용된 것을 그대로 사용하여 분석하였다.

샘플홀더 및 함수율 측정장치

LC 발진기의 공진소자중 콘덴서로 사용되는 샘플홀더는 본 연구(I)에서 사용된 평행 평판형 샘플홀더를 그대로 사용하였다. 본 연구에서 사용된 LC 발진기는 자체 온도보상회로가 내장되었으며 가변콘덴서를 조정하여 1~15MHz의 주파수 가변이 가능하다.

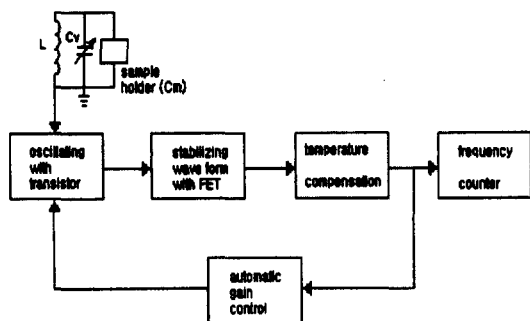


Fig. 1. Block diagram of the LC oscillator.

LC 발진기는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 가변콘덴서와 코일로 이루어진 공진소자에 샘플홀더를 병렬로 연결하면 코일과 콘덴서의 공진작용으로 발진이 일어나며 전계효과 트랜지스터(FET)를 이용하여 발진신호의 강도를 조절한 다음 다이오드를 이용하여 온도보상을 한 후 출력신호의 일부를 트랜지스터의 에미터에 귀환시켜 안정적인 발진을 유지하게 되며 발진주파수는 다음식 (1)과 같이 표현된다.

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(C_v + C_s)}} \tag{1}$$

- 여기서, f=발진주파수(MHz)
- L=인덕터(H)
- C_v=가변콘덴서(pF)
- C_s=샘플홀더의 정전용량(pF)

샘플홀더가 없는 상태에서 가변콘덴서를 5 MHz의 발진주파수로 조정한 후 본 연구(I)에서 분석된 밀가루와 고춧가루의 정전용량범위를 포함하는 표준 콘덴서소자를 샘플홀더 대신 병렬로 연결하여 발진주파수 변화를 측정하였을 때 Fig. 2에서 보는바와 같이 거의 직선적으로 발진주파수가 감소하여 분말식품의 함수율 측정이 가능할 것으로 판단되었다.

실험방법으로는 먼저 각 시료에서 산물밀도의 영향이 발진주파수에 미치는 영향을 구명하기 위하여 산물밀도의 범위를 3수준씩 변화시켜 가면서 발진주파수의 변화를 주파수 카운터((주)홍창, 1 Hz~1 GHz)로 측정하였다. 또한 시료의 온도에 따른 발진주파수 변화를 구명하기 위하여 항온습습기에서 시료의 온도를 동일한 함수율에서 각각 14~21°C, 24~28°C, 33~38°C의 3수준씩 조절하여 발진주파수 변화를 측정하였다.

결과 및 고찰

함수율 변화에 따른 발진주파수 변화

먼저 각 시료의 산물밀도의 범위를 밀가루의 경우

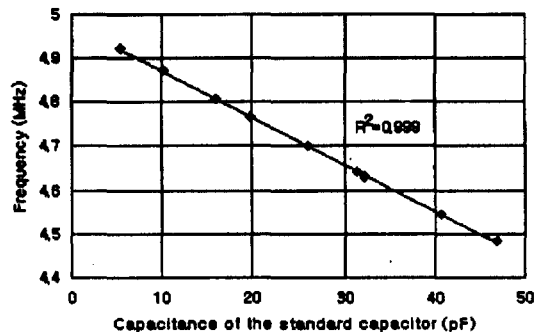


Fig. 2. Frequency variations of the LC oscillator depending on capacitance change at the initial frequency of 5 MHz.

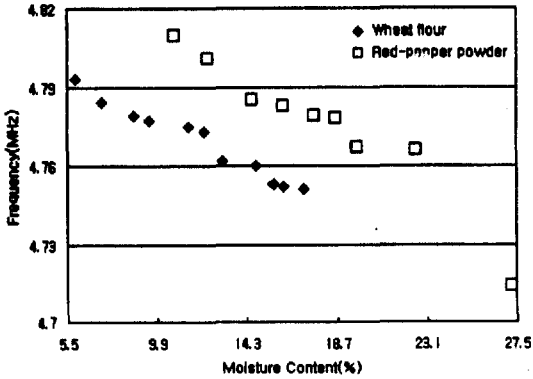


Fig. 3. Moisture content dependence of frequency variation of LC oscillator including sample holder filled with wheat flour and red-pepper powder at 5 MHz.

0.4921~0.6012 g/cm³, 고춧가루의 경우 0.4655~0.6521 g/cm³의 수준으로 유지한 다음 LC 발진기의 발진주파수를 측정하고 Fig. 3에서 보는 바와 같이 각 시료에서 거의 직선적으로 감소하는 경향을 나타내었다. 이것은 식(1)에서 샘플홀더의 정전용량이 증가함에 따라 발진주

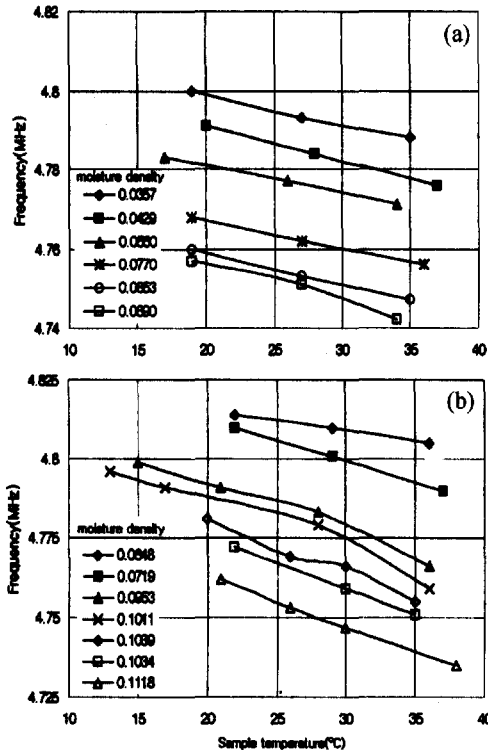


Fig. 4. Effect of sample temperature on frequency variations of the LC oscillator including sample holder having various moisture densities (at room temperature 28±0.5°C). (a): Wheat flour, (b): Red-pepper powder

파수가 감소하기 때문이며 따라서 산물밀도를 일정하게 유지할 경우 즉, 샘플홀더내 시료의 무게를 일정하게 유지할 경우 실험에 사용된 각 시료의 함수율 수준에서 LC 발진기를 이용한 분말식품의 함수율 측정이 가능할 것으로 판단되었다.

시료 온도에 따른 발진주파수 변화

주위온도와 함수율 측정장치의 온도가 28±0.5°C로 일정하게 유지된 상태에서 각 시료의 온도변화에 따른 발진주파수는 Fig. 4에서 보는바와 같이 시료의 수분밀도가 일정하게 유지될 경우 온도가 증가함에 따라 발진주파수는 거의 직선적으로 감소하며, 수분밀도가 증가함에 따라 발진주파수는 거의 평행이동하며 감소하였는데 이러한 결과는 김기복과 노상하(1997)가 곡류에 대하여 실험한 결과와 유사하게 나타났다. 이상의 분석 결과를 기초로 하여 함수율 측정시 영향을 미치는 밀가루와 고춧가루의 온도보정계수를 구한 결과 각각 0.101%/w.b./°C와 0.134%/w.b./°C로 나타났다. 밀가루의 경우 김기복(1997)이

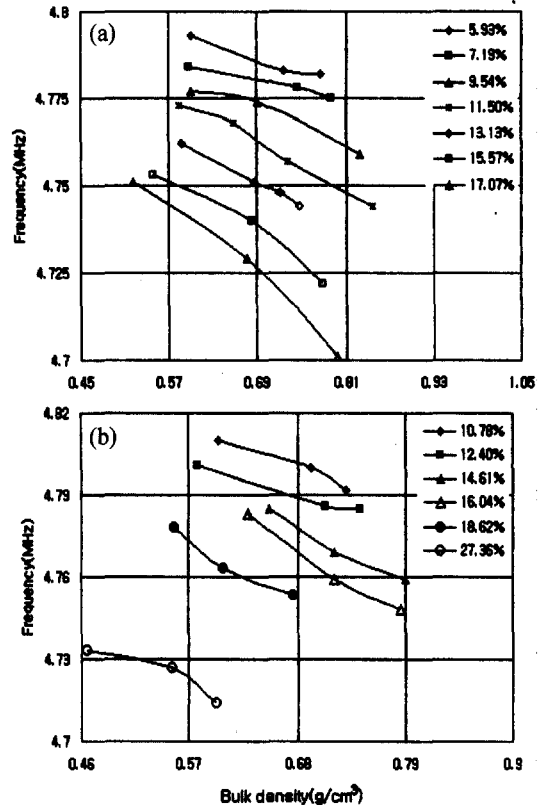


Fig. 5. Bulk density dependence of frequency variations of LC oscillator including sample holder filled with wheat flour and red-pepper powder having the various moisture contents (at room temperature 28±0.5°C). (a): Wheat flour, (b): Red-pepper powder

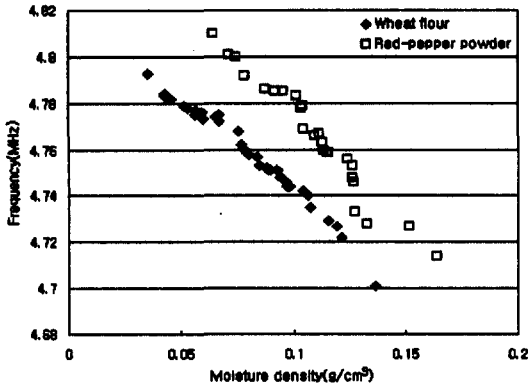


Fig. 6. Moisture density dependence of frequency variations of the LC oscillator including the sample holder with samples at room temperature $28\pm 0.5^{\circ}\text{C}$.

5MHz 측정주파수에서 분쇄되지 않은 밀에 대하여 구명한 온도보정계수인 $0.149\%w.b./^{\circ}\text{C}$ 보다 낮게 나타났는데 이것은 밀가루와 분쇄되지 않은 밀의 기하학적 특성 및 물리적인 특성 차이 때문인 것으로 생각된다.

산물밀도에 따른 발진주파수 변화

주위온도를 $28\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 로 고정된 후 샘플홀더내 시료의 산물밀도에 따른 발진주파수 변화는 Fig. 5에서 보는바와 같이 각 시료에서 산물밀도의 증가에 따라 발진주파수는 감소하는 경향을 나타내었는데 이것은 본 연구(I)에서 분석된 바와 같이 산물밀도에 따라 정전용량이 증가하여 발진주파수에 영향을 미치기 때문이다. 따라서 LC발진기를 이용하여 분말식품의 함수율을 측정하기 위해서는 이러한 산물밀도의 영향을 보정하는 방법이 필요함을 알 수 있다.

수분밀도를 이용한 산물밀도 보정

상기의 분석에서 본 연구(I)에서의 결과와 마찬가지로 발진주파수 변화에 미치는 산물밀도의 영향이 매우 크므로 이러한 산물밀도의 영향을 보정하기 위한 인자로 수분밀도를 이용하여 발진주파수와와의 관계를 나타낸 결과 Fig. 6에서 보는바와 같이 수분밀도에 따라 발진주파수는 각각 감소하는 경향을 나타내었으며 밀가루와 고춧가루의 각 시료에 따라 개별적인 발진주파수 예측모델을 개발해야 할 것으로 판단된다. 따라서 다음과 같은 발진주파수 예측 모델을 가정한 다음 밀가루와 고춧가루에 대하여 각각 회귀분석을 실시하였다.

$$F = a_0 \times \rho_m^a + a_1 \times \rho_m^{a-1} + \dots + a_{n-1} \times \rho_m + a_n \quad (2)$$

여기서, F=발진주파수(MHz)
 ρ_m =수분밀도(g/cm³)

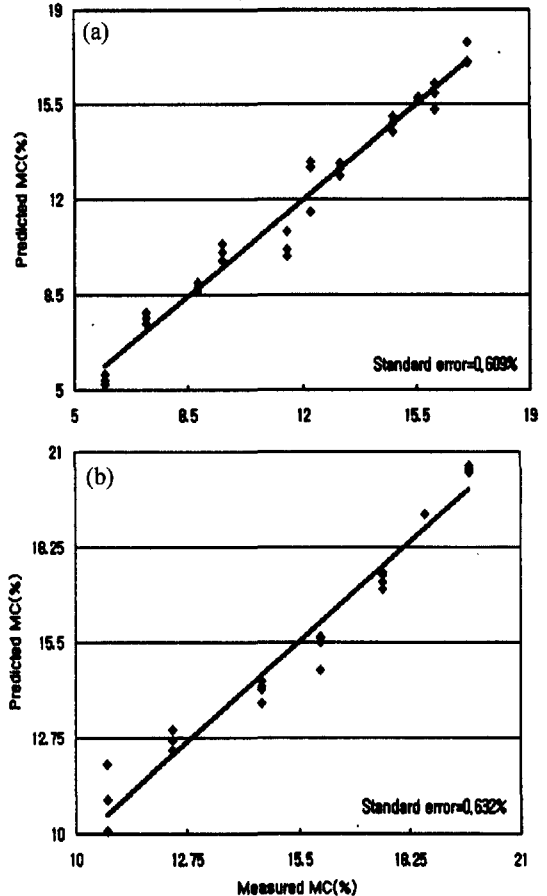


Fig. 7. Relation between measured moisture content and predicted moisture content by equation (5) and (6). (a): Wheat flour, (b): Red-pepper powder

$a_0 \dots a_n$ =회귀계수
 n=모델의 차수

Table 1에서 보는바와 같이 수분밀도를 이용할 경우 산물밀도의 영향을 보정함과 동시에 정확도가 향상된 함수율 측정이 가능한 것으로 분석되었다.

함수율 측정 속도설정식 개발

지금까지 발진주파수에 영향을 미치는 시료의 온도와 산물밀도를 보정하기 위한 수분밀도의 분석결과를 근거로 하여 수분밀도와 시료의 온도를 독립변수로 하여 실제의 함수율 측정장치에 포함되는 함수율 측정 속도설정식을 개발하였다. 이때 속도설정식에 포함되는 수분밀도의 차수는 Table 1의 2차와 3차의 분석에서 나타난 바와 같이 RMSE는 큰 차이가 없으므로 속도 설정식은 1차와 2차 모델을 이용하여 개발하였으며 LC 발진기의 발진주파수는

Table 1. Regression analysis on the relationship between the frequency change of the LC oscillator(F) and the moisture density(ρ_m) of the wheat flour and red-pepper powder

Item	Model	Regression coefficients				R^2	RMSE
		a_0	a_1	a_2	a_3		
Wheat flour	$F=a_0\rho_m + a_1$	-0.81458	4.82346			0.0034	0.0034
	$F=a_0\rho_m^2 + a_1\rho_m + a_2$	-3.55378	-0.22959	4.80153		0.9879	0.0023
	$F=a_0\rho_m^3 + a_1\rho_m^2 + a_2\rho_m + a_3$	-26.12387	3.12165	-0.76121	4.81453	0.9885	0.0023
Red-pepper powder	$F=a_0\rho_m + a_1$	-1.01853	4.87725			0.9486	0.0057
	$F=a_0\rho_m^2 + a_1\rho_m + a_2$	-0.36992	-0.93649	4.87290		0.9487	0.0058
	$F=a_0\rho_m^3 + a_1\rho_m^2 + a_2\rho_m + a_3$	132.73643	-45.85833	4.404645	4.69921	0.9591	0.0053

Table 2. Regression analysis on the moisture density(ρ_m) and sample temperature(T) dependence of the oscillation frequency(F) at room temperature, $28 \pm 0.5^\circ\text{C}$

Item	Model	Regression coefficients				R^2	RMSE
		a_0	a_1	a_2	a_3		
Wheat flour	$F=a_0\rho_m + a_1T + a_2$	-0.77282	-0.00078	4.84141		0.9714	0.0026
	$F=a_0\rho_m^2 + a_1\rho_m + a_2T + a_3$	-1.96376	0.52054	-0.00078	4.83377	0.9727	0.0026
Red-pepper powder	$F=a_0\rho_m + a_1T + a_2$	-1.21177	-0.00162	4.93685		0.9567	0.0049
	$F=a_0\rho_m^2 + a_1\rho_m + a_2T + a_3$	-16.99908	1.76288	-0.00154	4.80956	0.9749	0.0038

다음과 같이 표시된다고 가정하여 회귀분석을 실시하였다.

$$F = a_0 \times \rho_m + a_1 \times T + a_2 \quad (3)$$

$$F = a_0 \times \rho_m^2 + a_1 \times \rho_m + a_2 \times T + a_3 \quad (4)$$

여기서, T=시료의 온도($^\circ\text{C}$)

회귀분석결과는 Table 2에서 보는 바와 같으며 다음과 같이 밀가루와 고춧가루에 대한 함수를 측정 측도설정식을 개발하였다.

밀가루의 경우는 2차 모델식의 결과를 이용하여 수분 밀도에 관한 식으로 변환한 다음 함수를 측정식을 개발 하였으며 고춧가루의 경우 개발된 2차 모델식은 제품근 내의 값이 음수가 되는 경우가 발생하여 함수의 예측이 불가능하였다. 따라서 고춧가루에 대해서는 1차 회귀 분석 결과를 이용하여 함수를 예측식을 개발하였다.

[밀가루]

MC(%)=

$$(-0.13254 + \sqrt{2.47906 - 0.0004T - 0.50923F}) \frac{100}{\rho_b} \quad (5)$$

[고춧가루]

$$MC(%) = 4.07408 - 0.00134T - 0.82524F \times \frac{100}{\rho_b} \quad (6)$$

여기서, MC(%)=습량기준 함수율(%)

ρ_b =산물밀도(g/cm^3)

상기의 측도설정식을 이용하여 함수율의 실측값과 예측값을 비교한 결과는 Fig. 7에서 보는 바와 같이 밀가루와 고춧가루 각각의 표준오차는 0.609% 및 0.632%로 나타나 산물밀도의 영향을 보정하면서 정확도가 향상된 함수율 측정이 가능할 것으로 분석되었다.

요 약

본 연구는 분말식품의 고주파 정전용량을 이용한 함수율 측정장치를 개발하기 위하여 수행된 기초연구(I)의 연구결과를 이용하여 5 MHz의 LC 발진기를 이용한 함수율 측정장치의 개발 가능성을 검토하기 위하여 수행되었다. 평행평판형 샘플홀더를 LC 발진기의 발진소자로 하여 샘플홀더내에 충전되는 밀가루(5.9%~17.07%)와 고춧가루(10.87%~27.36%)의 정전용량 변화에 따른 발진주파수의 변화를 구명하였으며 시료의 온도변화가 LC발진기의 발진 주파수에 미치는 영향을 구명하였다. 샘플홀더내 시료의 산물밀도에 따른 발진주파수 변화를 고찰하였으며 수분밀도를 함수율 측정의 인자로 사용할 경우 산물밀도의 영향을 보정할 수 있는 것으로 분석되었다. 수분밀도와 시료 온도를 독립변수로 사용하여 밀가루와 고춧가루의 함수율을 측정할 수 있는 측도설정식을 개발하여 실측값과 예측

값을 비교한 결과 표준오차는 각각 0.609%와 0.632%로 나타났으며 본 연구에서 개발된 함수율 측도설정식을 이용할 경우 산물밀도의 영향을 보정함과 동시에 비교적 정확한 함수율 측정이 가능할 것으로 분석되었다.

감사의 글

본 연구는 서울대학교 농업생명과학대학 농축산물 비파괴 및 안전성 품질평가 기술연구센터(NDQERC)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

문헌

- 김우택, 1988. 콘덴서식 곡물 수분측정기 개선에 관한 연구. 서울대학교 석사학위 논문
- 김기복, 1997. 곡류의 고주파와 마이크로파 유전특성 및 정전용량식 온라인 함수율 측정장치 개발에 관한 연구. 서울대학교 공학박사 학위논문
- 김기복, 노상하, 1997. 고주파 정전용량식 곡류 함수율 측정장치 개발. *산업식품공학* 1(1): 11-15
- Kandala, C.V.K., R.G. Leffler, S.O. Nelson and K.C. Lawrence. 1986. Capacitive sensors for measuring single-kernal moisture content in corn. ASAE, Paper No. 86-3004
- Kandala, C.V.K., R.G. Leffler, S.O. Nelson and K.C. Lawrence. 1990. Measurement of moisture content in single kernel of peanuts: A nondestructive electrical method. *Transactions of the ASAE*, 33(2): 567-571
- Kandala, C.V.K., R.G. Leffler, S.O. Nelson and K.C. Lawrence. 1991. Nondestructive moisture determination in single kernels of popcorn by impedance measurement. ASAE Paper No. 91-6567
- Nelson S.O. and A.W. Kraszewski. 1990. Grain moisture content determination by microwave measurements. *Transactions of the ASAE* 33(4): 1303-1306
- Nelson S.O., A.W. Kraszewski, C.V.K. Kandala. and K.C. Lawrence. 1991. High-frequency and microwave single-kernel moistures. *Transactions of ASAE*. Paper No. 913526
- Nelson S.O., C.V.K. Kandala and K.C. Lawrence, 1990. Single-Kernel Moisture Determination in Peanuts by Complex RF Impedance Measurement. *Transactions of the ASAE* 33(4): 637-641
- Lawrence K.C., S.O. Nelson and A.W. Kraszewski. 1990. Temperature-dependent model for the dielectric constant of soft red winter wheat. ASAE, paper No. 90-6062
- Lawrence K. C., S.O. Nelson and A.W. Kraszewski. 1991. Temperature dependance of the dielectric properties of pecans. ASAE, Paper No. 913007