

## 고주파 정전용량을 이용한 밀가루와 고춧가루의 수분함량 측정에 관한 연구(I)- 시료의 고주파 정전용량특성

김기복 · 이종환\* · 노상하

서울대학교 농업생명과학대학 농공학과, \*한경대학교 생물자원기계학과

### Moisture Content Measurement of Wheat Flour and Red-pepper Powder using RF Capacitance (I)- Characterization of RF Capacitance of Samples

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

Department of agricultural engineering, Seoul National University

\*Department of bioresources machinery, Hankyung National University

#### Abstract

This study was conducted to measure the moisture content of wheat flour and red-pepper powder using RF capacitance in the range of 0.5 to 30 MHz. The capacitance of parallel plate type sample holder filled with each of wheat flour and red-pepper powder of which moisture content range were 5.93~17.07%w.b. and 10.87~27.36%w.b., respectively was measured by Q-meter(HP4342). To eliminate the effect of bulk density on moisture content measurement of samples, the regression model including capacitance( $C_s$ ) and moisture density( $\rho_m$ , moisture content(decimal) $\times$ bulk density) was developed as follows.

$$\text{Model: } C_s = a_0 \times \rho_m + a_1 \times \rho_m + a_2$$

At 5 MHz, the coefficients of determination of the model for wheat flour and red-pepper powder were 0.9903 and 0.9373, respectively. The standard errors between measured and predicted moisture content of wheat flour and red-pepper powder by above model were 0.302% and 0.801%, respectively.

Key words: RF capacitance, moisture content, moisture density, wheat flour, red-pepper powder, bulk density

## 서 론

각종 식품류에 함유된 수분은 저장 안정성 및 가공성 뿐만아니라 유통단계에서 가장 중요한 품질인자이며 분말 식품류의 경우 품질에 가장 큰 영향을 미치는 요인중의 하나이다. 포장재 내에서 분말식품의 수분함량이 균일하지 않으면 유통과정 중에 응결현상(caking)이 발생하여 제품의 품질을 저하시킬 뿐만아니라 소비자의 제품에 대한 신뢰도를 저하시킬과 동시에 상품화에 큰 장애요소가 된다. 또한 분말식품의 가공공정에서 필요한 건조·저장단계에서 적절한 수분함량의 조절 및 측정은 제품의 생산성 향상과 분말식품 가공기계의 효율성 증대에 반드시 필요하며 경제

적인 식품 가공공장 운영이 가능해진다. 또한 식품가공공정의 자동화에 따라 식품의 수분함량을 온라인으로 측정할 수 있는 기술의 개발이 절실히 요구되고 있다. 외국의 경우 식품의 수분함량을 측정할 수 있는 기기들이 많이 개발되어 있으나 국내의 경우 거의 수입에 의존하고 있으며 관련연구도 거의 미미한 실정이다.

현재 고춧가루 가공공장에서 온라인으로 함수율을 측정하기 위해 주로 정전용량식 측정장치가 많이 사용되고 있는데 전기저항식 함수율 측정방법과는 달리 함수율에 따라 변하는 유전율을 고주파 용량으로 변환하여 함수율을 결정하므로 유전율식이라고도 한다. 이러한 장치는 주로 수입된 제품으로서 측정주파수와 신호처리회로는 거의 공개되고 있지 않고 있으며 국내 식품의 특성이 외국의 경우와 다르기 때문에 국내 실정에 맞게 보정을 해주어야 하는 단점이 있다.

분쇄되지 않은 밀의 경우 상대유전상수는 1 MHz의 측

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

정주파수의 경우 3.4%의 함수율에서 2.95~3.30, 24.2%에서는 7.51~12.11 정도이며, 18 MHz의 측정주파수의 경우 3.4%의 함수율에서 2.67~2.95, 24.2%에서는 4.85~6.85로 보고되고 있으며(Sokhansanj와 Nelson, 1988) 이러한 상대유전상수의 차이를 이용하여 비교적 넓은 범위의 수분을 신속하고 정확하게 측정할 수 있으며, 가령면에서도 광학식과 핵자기 공명, 마이크로파 등을 이용한 수분측정기보다 유리하다는 장점을 가지고 있다. 그러나 시료의 유전율은 주파수, 식품의 종류, 온도, 산물밀도 등에 큰 영향을 받으므로 이들의 영향을 보정해야 하는 단점이 있다. 외국의 경우 곡류를 포함한 농산물 및 식품류에 대한 함수율 및 유전특성 측정에 관하여 이미 많은 연구가 이루어져 왔으나 고춧가루에 대한 연구는 거의 없는 것으로 조사되었다.

Nelson(1984)은 11.67 GHz의 측정주파수에서 함수율 8.5%~14.7%의 겨울 밀과 밀가루에 대한 유전상수 및 유전손실을 측정하여 유전특성을 예측할 수 있는 통계모델을 개발하였다. 산물밀도 범위 0.51~1.22 g/cm<sup>3</sup>에서 밀의 유전상수는 1.93~4.47, 유전손실은 0.11~0.98 범위였다. Sokhansanj와 Nelson(1988)은 분쇄되지 않은 밀(3.4~24.2%)에 대하여 1, 18, 300, 2450 MHz의 측정주파수에서 함수율과 산물밀도에 따른 유전특성을 구명하였다. Kraszewski와 Nelson(1991)은 마이크로파 주파수 9.0GHz에서 밀(10.7%~20.4%)에 대한 마이크로파 감쇠와 위상변화의 비를 이용하여 산물밀도에 무관한 밀의 함수율 측정방법을 개발하였으며 실측값과 예측값의 오차는 0.26%였다. 한편 국내의 경우 김기복과 노상하(1997)는 국내산 주요 곡류의 고추파와 마이크로파 유전특성을 구명한 다음 5 MHz의 주파수를 이용하는 정전용량식 온라인 함수율 측정장치를 개발하였으며 노대현(1998)은 10 MHz pulsed NMR 기법을 이용하여 고춧가루의 함수율과 지방함량을 측정할 수 있는 방법을 개발하였다.

이상의 고찰에서 농산물 및 식품의 유전율은 인가되는 전기장의 주파수와 수분함량 등의 함수로 나타나게 되므로 수분함량에 따른 유전율의 변화를 측정하여 함수율을 결정할 수 있게 된다. 따라서 본 연구는 분말식품의 고추파 정전용량을 이용한 함수율 측정장치를 개발하기 위한 기초연구로서 밀가루와 고춧가루를 대상으로 하여 이들 식품에 함유된 수분함량의 측정에 적합한 주파수를 실험을 통해서 구명하고 시료의 산물밀도의 영향을 보정하면서 동시에 정확도가 높은 함수율 측정방법을 개발하기 위하여 수행되었다.

## 재료 및 방법

### 공시재료

본 연구에 사용된 분말식품은 시중에 유통중인 밀가루

와 고춧가루를 구입하여 사용하였으며 고춧가루는 고추장 용으로서 꼭지부분과 씨가 제거된 후 6회의 분쇄과정과 2회의 살균공정을 거쳐 자동포장된 것이며 시료구입시 밀가루와 고춧가루의 초기 함수율은 각각 5.93%w.b.와 10.78%w.b.였다.

밀가루의 입도는 서울대학교 농업생명과학대학 농업과 학공동기기센터에 설치된 입자분석기(ELZONE 280PC, Particle Data Inc., USA)를 이용하여 분석하였다. 사용된 입자분석기는 입자의 크기에 따른 전기저항을 측정하여 시료입자의 전기적인 저항차이를 부피로 환산한 후 이 부피를 구의 부피로 가정하여, 구에 상당하는 직경을 시료의 크기로 나타내는 기기로서 0.45~150 μm범위의 입자크기가 측정가능하며 밀가루의 입자크기는 평균입도와 표준편차가 각각 27.54 μm, 6.915 μm로 나타났으며 고춧가루의 경우는 Tyler의 표준진동체를 사용하여 미국 농공학회의 사료 입도 분석방법(미국농공학회연감 1983-1984:ASAE S319)을 이용하여 기하평균 입경 및 기하표준편차를 각각 구한 결과 406.35 μm와 280.08 μm로 나타났다.

시료의 함수율 조절은 분말식품의 경우 인위적인 증류수를 가할 경우 발생하는 시료의 caking 현상을 방지하기 위하여 온도와 습도가 조절되는 항온항습기에서 약 1주일 동안 넣어 시료가 수분을 자연스럽게 흡습하도록 하였으며 밀가루의 함수율 범위는 5.93~17.07%w.b.에서 11수준, 고춧가루의 경우 10.87~27.36%w.b.에서 9수준의 함수율을 가지도록 조절하였다.

실험에 사용된 공시재료의 함수율 및 산물밀도 수준, 입도는 Table 1에서 보는바와 같다.

표준함수율 결정은 곡류의 경우 일반적으로 104°C, 24시간의 상압 공기 오븐건조법(국립농산물 검사규격, 1991)이 많이 사용되나 식품류 등에 이러한 방법을 적용할 경우 식품 성분의 열분해로 인하여 실제 수분함량보다 높은 결과를 나타내게 된다(권칠성과 이동선, 1987). 따라서 본 연구에서는 진공 오븐을 이용하여 60°C의 온도조건에서 5개의 알루미늄 건조용기에 각각 2 g의 시료를 넣은 다음 40시간 건조하여 습량기준 함수율을 결정하였다.

한편, 정전용량 측정시 시료의 온도는 주위온도인 27~28°C로 유지하였다.

### 수분함량 측정용 샘플홀더 및 정전용량 측정시스템

수분함량 측정용 샘플홀더는 구조가 간단하고 이론적인 분석이 용이한 평행평판형 극판을 Fig. 1과 같이 설계·제작하였다. 극판의 재질은 비교적 균일한 전계강도를 유지할 수 있는 알루미늄을 사용하였으며 극판의 거리는 2 cm, 부피는 412.5 cm<sup>3</sup>로 제작하였다. 실험에 사용된 샘플홀더내의 유전체가 공기일 경우의 이론적인 정전용량

**Table 1. Moisture contents, bulk densities and particle size of samples**

Wheat flour				Red-pepper powder				
Moisture content (%w.b.)	Bulk density (g/cm <sup>3</sup> )			Particle size (μm)	Moisture content (%w.b.)	Bulk density (g/cm <sup>3</sup> )		Particle size (μm)
5.93	0.6012	0.7248	0.7758		10.78	0.6012	0.6933	0.7297
7.19	0.5964	0.7442	0.8630		12.40	0.5794	0.7079	0.7442
8.78	0.5867	0.6836	0.7685		14.61	0.6521	0.7176	0.7903
9.54	0.6012	0.6909	0.8291		16.04	0.6303	0.7175	0.7855
11.50	0.5842	0.6594	0.7297	27.54	17.57	0.5915	0.6448	0.7200
12.23	0.4921	0.6545	0.7588	± 6.915	18.62	0.5552	0.6061	0.6764
13.13	0.5867	0.6861	0.7467		19.71	0.5673	0.6279	0.6715
14.77	0.5333	0.6521	0.7055		22.57	0.4848	0.5600	0.5988
15.57	0.5479	0.6836	0.7782		27.36	0.4655	0.5527	0.5988
16.08	0.5503	0.6557	0.7418					
17.07	0.5212	0.6764	0.7976					

은 다음과 같이 표시된다.

$$C_s = \epsilon_s \epsilon_0 \frac{A}{d} \tag{1}$$

여기서, C<sub>s</sub>=유전체가 공기일 때의 정전용량(F)  
 ε<sub>s</sub>=공기의 상대유전상수(1.00006)  
 ε<sub>0</sub>=진공에서의 유전율(8.854×10<sup>-12</sup>F/m)  
 A=극판의 면적(m<sup>2</sup>)  
 d=극판의 거리(m)

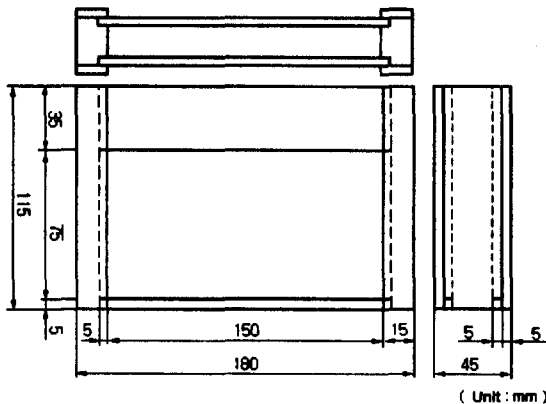
분말식품의 고주파 정전용량 측정은 22 kHz~70 MHz의 측정범위를 가지는 Q-meter(Hewlett Packard, HP4342)에 본 연구에서 설계·제작된 센서를 연결하여 0.5~30 MHz범위의 주파수 영역에서 분말식품의 산물밀도, 수분함량에 따른 샘플홀더의 고주파 정전용량을 측정

하였다. 이러한 측정범위의 선정은 Table 2에서 나타난 바와 같이 샘플홀더의 적정 작동 범위가 30 MHz까지 안정된 결과를 나타내기 때문이며 30 MHz이상 고주파의 경우 실제 함수율 측정장치의 구성상 별도의 노이즈 방지 회로 및 신호처리회로의 어려움 때문에 측정주파수는 최대 30 MHz까지로 하였다.

측정방법으로는 Fig. 2에서와 같이 인덕턴스 L<sub>0</sub>, 손실 저항 R<sub>0</sub>인 표준코일을 Q-meter에 연결한 후 측정하고자 하는 주파수(f)를 맞춘 다음 Q-meter 내부의 가변콘덴서를 조절하여 공진을 시킨다. 이때의 가변콘덴서 용량을 C<sub>0</sub>라 하면 LCR 직렬공진회로의 공진 조건으로부터 공진주파수 f는 식 (2)로 표현된다.

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0C_0}} \tag{2}$$

그 다음 시료가 채워진 샘플홀더를 Q-meter에 연결하면 샘플홀더내 시료의 영향으로 인한 센서의 정전용량 변화 때문에 Q-meter의 공진점이 변하게 되며 이 상태에서 Q-meter의 가변콘덴서를 조정하여 다시 공진시킨다. 이때의 가변콘덴서의 정전용량 C<sub>0</sub>'를 이용하여 다음 식(3)과 같이 시료가 채워진 샘플홀더의 고주파 정전용량(C<sub>s</sub>)을 구할 수 있다.



**Fig. 1. Parallel plate type sample holder.**

**Table 2. Capacitance of sample holder in frequency range of 0.5 to 30 MHz**

Frequency (MHz)	0.5	1	5	10	20	30
Capacitance (pF)	14.4	14.6	14.4	14.3	14.6	14.7

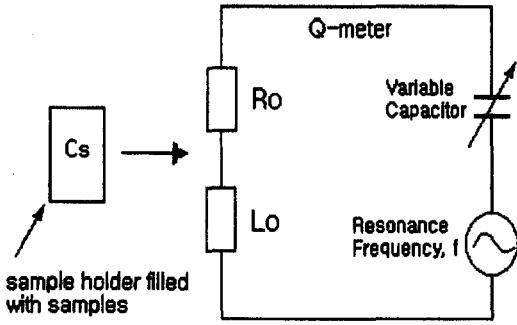


Fig. 2. RF capacitance measurement of sample holder filled with samples using Q-meter.

$$C_s = C_o - C_o' \quad (3)$$

여기서,  $C_s$  = 시료가 채워진 샘플홀더의 정전용량(pF)  
고주파 정전용량의 측정주파수 수준은 Q-meter의 특성

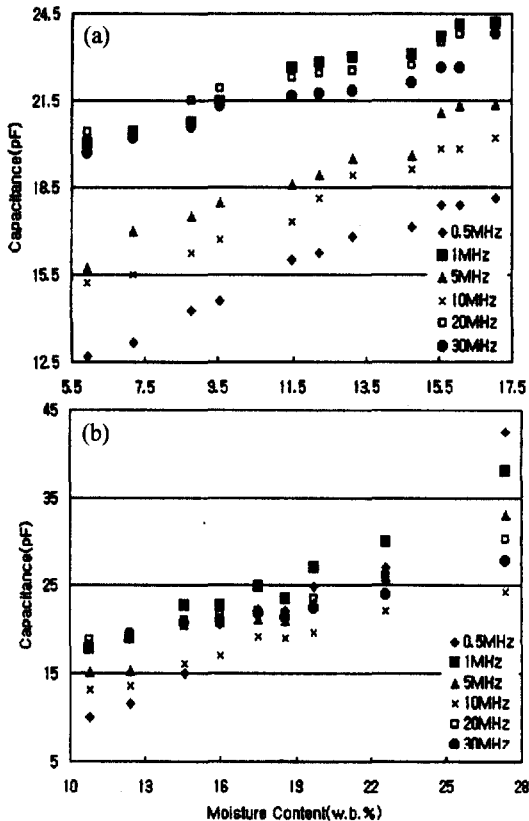


Fig. 3. Plot of moisture content vs. capacitance of sample holder filled with wheat flour and red-pepper powder at several frequencies. (a): Wheat flour, (b): Red-pepper powder.

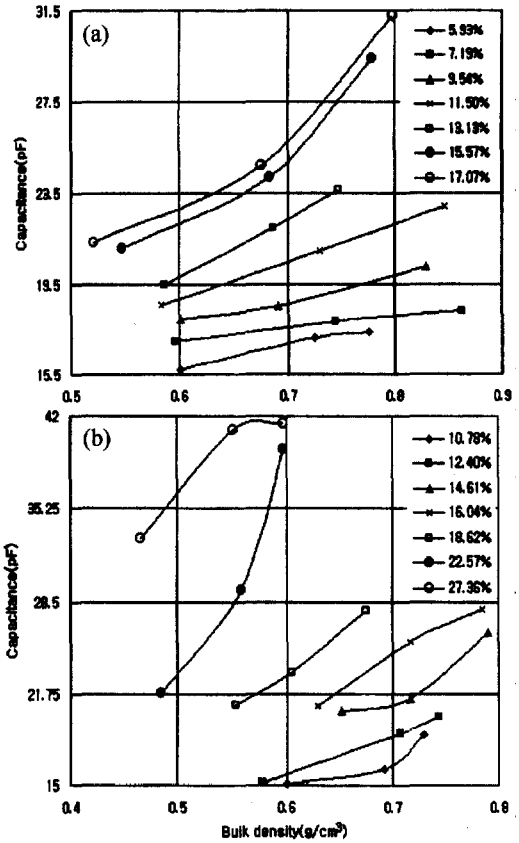


Fig. 4. Bulk density dependence of sample holder filled with samples at indicated moisture contents at 5 MHz. (a): Wheat flour, (b): Red-pepper powder.

상 연속적인 주파수 가변이 불가능하므로 0.5, 1, 5, 10, 20, 30 MHz의 6개 수준으로 고정하여 측정하였다.

### 결과 및 고찰

#### 함수율에 따른 샘플홀더의 정전용량

샘플홀더내에 시료의 산물밀도 범위를 밀가루의 경우 0.492~0.602 g/cm<sup>3</sup>, 고춧가루의 경우 0.465~0.652g/cm<sup>3</sup>의 수준으로 유지한 다음 수분함량 변화에 따른 샘플홀더의 정전용량을 분석한 결과 Fig. 3에서 보듯이와 같이 각 측정주파수에서 함수율에 따라 증가하는 경향을 나타내었다. 그러나 동일한 수분함량에서는 각 측정주파수에 따른 정전용량은 일정한 경향을 나타내지 않으므로 분석되었다.

#### 산물밀도에 따른 정전용량

샘플홀더내 시료의 산물밀도에 따른 정전용량변화는

Fig. 4의 5 MHz의 경우에서 보는 바와 같이 동일한 수분함량의 시료에서 산물밀도가 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타내었는데 이러한 결과는 시료의 산물밀도가 증가하면 주어진 체적 내에서 단위체적당 수분의 양이 증가하게 되므로 수분의 증가에 따른 유전율의 변화가 크게 나타나기 때문이다. 이러한 경향은 실험에 사용된 모든 측정주파수에서 유사한 결과를 나타내었으며 곡류를 대상으로 정전용량 특성을 분석한 결과(김기복, 1997)와 거의 유사한 경향을 나타내고 있는 것으로 분석되었다. 따라서 고주파 정전용량을 이용한 분말식품의 함수율 측정에는 이러한 산물밀도의 영향을 반드시 보정해주어야 함을 알 수 있다.

**함수율 측정 모델 개발**

이상의 요인분석에서 분말식품의 고주파 정전용량에 함수율변화 뿐만아니라 시료의 산물밀도 변화가 큰 영향을 미치는 것으로 분석되어 함수율 측정모델의 개발시 이러한 산물밀도의 영향을 보정하기 위하여 다음과 같이 함수율과 산물밀도의 곱으로 표현되는 수분밀도(김기복과 노상하, 1997)를 사용하여 함수율 측정 모델을 개발하였다.

$$\rho_m = MC(\text{decimal}) \times \rho_b \tag{4}$$

여기서,  $\rho_m$ =수분밀도( $g/cm^3$ ),  $MC(\text{decimal})$ =습량기준 함수율(w.b),  $\rho_b$ =산물밀도( $g/cm^3$ )

수분밀도는 단위체적당 시료내에 포함된 수분의 절대적인 양을 나타내게 된다. Fig. 5에서 보는바와 같이 5 MHz 측정주파수에서 밀가루와 고춧가루의 수분밀도 증가에 따라 샘플홀더의 고주파 정전용량은 거의 다항 함수적으로 증가하는 경향을 나타내었다. 이것은 샘플홀더 내 수분밀도에 따른 유전율의 증가로 인하여 샘플홀더의 정전용량이 증가하기 때문이다. 따라서 함수율 측정시 산물밀도의 영향을 보정하기 위하여 수분밀도를 독립변수로 하여 샘플홀더내 시료의 함수율과 산물밀도에 따른 정전용량을 예측할 수 있는 모델을 다음과 같이 가정한다. SAS version 6.1을 이용하여 회귀분석을 실시하였다.

$$\text{모델: } C_s = a_0 \times \rho_m^n + a_1 \times \rho_m^{n-1} \dots + a_{n-1} \times \rho_m + a_n \tag{5}$$

여기서,  $\rho_m$ =수분밀도( $g/cm^3$ )  
 $C_s$ =샘플홀더의 정전용량(pF)  
 $a_0 \dots a_n$ =회귀계수  
 $n$ =모델의 차수

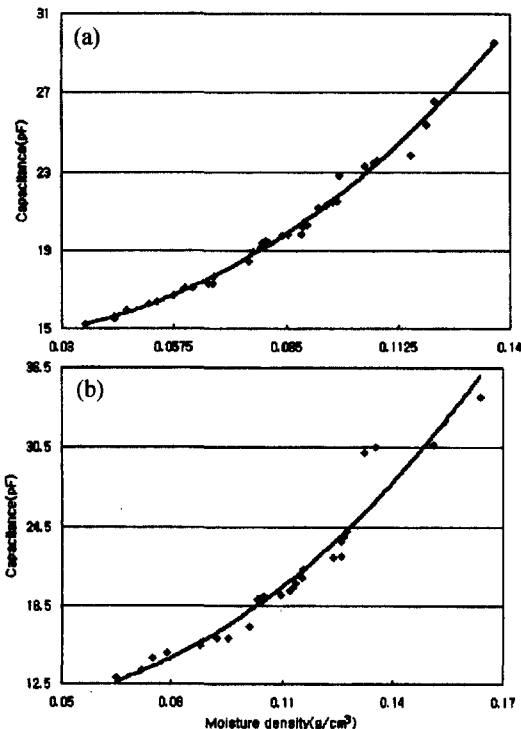
일반적으로 회귀모델의 개발시 모델에 포함되는 독립변수의 차수를 높이면 모델의 정확도는 다소 향상시킬 수 있으나 포함되는 독립변수의 항이 증가하게 됨에 따라 모델의 해석이 힘들 뿐만아니라 실제의 함수율 측정장치의 개발 측면에서는 포함되는 독립변수의 개수가 작은 것이 바람직하기 때문에 독립변수로 사용되는 수분밀도의 차수는 2차로 제한하여 회귀분석을 실시하였다.

회귀분석 결과는 Table 3에서 보는바와 같이 각 측정주파수에서 밀가루의 경우는 대체적으로 모델의 결정계수가 0.954~0.990으로서 높게 나타났으나 고춧가루의 경우는 0.897~0.937로 밀가루의 경우보다 다소 낮게 나타났는데 이러한 이유로는 밀가루와 고춧가루의 성분의 차이로 생각되며 고춧가루의 경우 함유하고 있는 수분 이외의 다른 요인이 정전용량에 영향을 미치는 것이라고 생각된다. 한편 밀가루와 고춧가루의 데이터를 합하여 회귀분석한 결과 결정계수가 0.761~0.906의 범위로 나타나 정확도가 높은 함수율을 측정하기 위해서는 각각의 시료에 대한 함수율 측정 모델을 개발해야 할 것으로 판단된다.

Table 3에서 모델의 결정계수가 높게 나타난 5 MHz의 측정주파수에서 결과를 이용하여 수분밀도를 독립변수로 하여 정전용량을 예측할 수 있는 모델식은 다음과 같이 표현된다.

[밀가루]:

$$C_s = 922.967 \times \rho_m^2 - 17.095 \times \rho_m + 14.634 \tag{6}$$



**Fig. 5. Relationship between capacitance of the sample holder and moisture density of wheat flour and red-pepper powder at 5 MHz.**

Table 3. Regression analysis expressing between the capacitance of sample holder and moisture density of samples

Item(MHz)	Frequency(MHz)	Regression coefficient			R <sup>2</sup>	RMSE
		a <sub>0</sub>	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>		
Wheat flour	0.5	1803.121	-134.449	16.174	0.9710	0.751
	1	437.569	19.513	18.872	0.9805	0.333
	5	922.967	-17.095	14.634	0.9903	0.347
	10	1086.782	-42.344	16.716	0.9762	0.558
	20	1152.307	-94.359	23.132	0.9535	0.568
	30	884.269	-48.315	20.777	0.9778	0.386
Red-pepper powder	0.5	3038.563	-123.546	2.633	0.9316	3.683
	1	2203.117	-154.329	17.944	0.9236	2.388
	5	1350.661	-74.944	11.863	0.9373	1.438
	10	1882.485	-111.155	13.681	0.8972	2.570
	20	1200.057	-85.734	18.972	0.8983	1.509
	30	1868.938	-240.410	26.562	0.8969	1.514
All samples	0.5	4465.200	-519.763	28.317	0.9063	3.295
	1	2666.448	-313.978	29.841	0.8784	2.243
	5	2154.513	-216.413	22.606	0.8925	2.031
	10	1293.150	-110.823	18.270	0.7943	2.050
	20	1296.345	-140.238	24.929	0.8021	1.617
	30	1307.917	-147.660	24.780	0.7605	1.752

Model :  $C_s = a_0 \times \rho_m^2 + a_1 \times \rho_m + a_2$

[고춧가루]:

$$C_s = 1350.661 \times \rho_m^2 - 74.944 \times \rho_m + 11.863 \quad (7)$$

여기서,  $C_s=5$  MHz에서의 정전용량

따라서 식 (5)에서 정의한 바와 같은 수분밀도를 식 (6) 및 (7)에 각각 대입하여 함수율에 관한 식으로 나타내어 다음 식 (8) 및 (9)와 같은 함수율 측정식을 개발하였다.

[밀가루]:

$$MC(\%) = \left( 0.926 + \frac{\sqrt{C_s - 14.553}}{3.292} \right) \times \frac{1}{\rho_b} \quad (8)$$

[고춧가루]:

$$MC(\%) = \left( 2.774 + \frac{\sqrt{C_s - 10.820}}{2.721} \right) \times \frac{1}{\rho_b} \quad (9)$$

여기서,  $MC(\%)=습량기준$  함수율(%w.b.),  $C_s=5$  MHz에서의 정전용량(pF),  $\rho_b =$  산물밀도( $g/cm^3$ ).

개발된 함수율 측정식 (8)과 (9)를 이용하여 각각의 시료에 대한 함수율의 예측값과 실측값을 Fig. 6에 나타내었다. 밀가루의 경우 실측값과 예측값과의 표준오차

는 0.320%, 고춧가루의 경우는 0.801%로 나타나 수분 밀도를 산물밀도 보정인자로 이용할 경우 비교적 정확한 함수율의 측정이 가능할 것으로 판단된다.

## 요 약

본 연구는 분말식품의 고주파 정전용량을 이용한 함수율 측정장치를 개발하기 위한 기초자료를 제시하기 위하여 수행되었다. 평행평판형 샘플홀더와 Q-meter(HP-4342)를 이용하여 측정주파수 0.5~30 MHz에서 함수율 범위 5.93~17.07%w.b.의 밀가루와 10.87~27.36%w.b. 범위의 고춧가루의 고주파 정전용량을 측정 후 시료의 함수율과 산물밀도의 곱으로 표현되는 수분밀도를 이용하여 산물밀도의 보정 방법에 대해 고찰하였으며 이를 바탕으로 분말식품의 함수율 측정 모델을 개발하였다. 전체 측정주파수에서 시료의 함수율 증가에 따라 샘플홀더의 정전용량은 증가하는 경향을 나타내어 평행평판형 샘플홀더는 분말식품의 함수율을 비교적 잘 측정할 수 있는 것으로 분석되어 고주파 정전용량을 이용한 함수율 측정 가능성을 보여주었다. 시료의 산물밀도에 따라 고주파 정전용량은 증가하는 경향을 나타내었으며 산물밀도의 영향

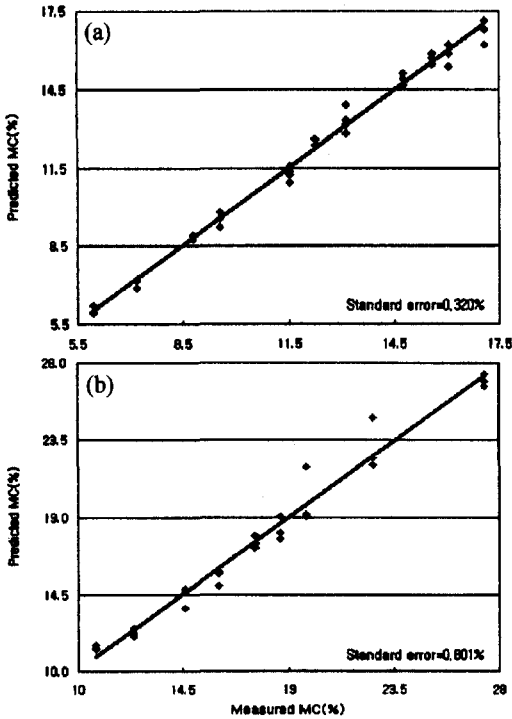


Fig. 6. Relation between measured moisture content and predicted moisture content by equation (5). (a): Wheat flour, (b): Red-pepper powder.

을 보정하기 위하여 수분밀도를 함수율 측정인자로 사용하여 정전용량을 예측할 수 있는 모델을 개발한 결과 결정계수는 밀가루의 경우 0.95~0.97, 고춧가루의 경우 0.89~0.93으로 나타나 각각의 시료에 대하여 비교적 정확한 함수율 측정이 가능할 것으로 분석되었다. 그러나 실험에 사용된 전체 시료를 대상으로 분석한 결과 정확도가 낮게 나타나 분말식품의 경우 시료에 따라 각각 개별적인 함수율 측정모델을 개발해야 할 것으로 분석되었다. 측정주파수 5 MHz에서의 회귀분석 결과를 이용하여 함수율 측정식을 개발한 다음 예측값과 실측값을 비교한 결과 밀가루의 경우 표준오차는 0.302%, 고춧가루의 경우 0.801%로 나타나 수분밀도를 이용할 경우 산물밀도

의 변이를 어느정도 보정할 수 있을 것으로 분석되었다. 본 연구에서 개발된 함수율 측정모델을 적용하기 위해서는 측정주파수에 따른 정전용량을 전기적인 신호로 검출하기 위한 신호처리회로 및 시료의 무게를 측정하는 장치가 필요하며 수분측정의 정확도를 향상시키기 위해서는 정전용량에 영향을 미치는 수분의 다른 요인들에 대한 영향을 구명하기 위한 추후연구가 필요할 것으로 생각된다.

## 감사의 글

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

## 문헌

- 권철성, 이동선. 1987. 건조채소의 수분측정방법 비교. 한국농업기계학회지 **12**(1): 30-44
- 국립농산물 검사소. 1991. 농산물검사수첩
- 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. 한국산업식품공학회지 **1**(1): 11-15
- 노대현. 1998. 수소 핵자기 공명을 이용한 고춧가루의 수분 및 지방함량 측정 알고리즘개발. 서울대학교 석사학위 논문
- Agricultural Engineering Yearbook of Standards. 1993-1994. Published by the American Society of Agricultural Engineers.
- Kraszewski, A.W. and S.O. Nelson. 1991. Density-independent moisture determination in wheat by microwave measurement. *Transactions of the ASAE* **34**(4): 1776-1783
- Nelson, S.O. 1982. Factors affecting the dielectric properties of grain. *Transactions of the ASAE* **25**(4): 1045-1049, 1056
- Nelson, S.O. 1984. Density dependence of the dielectric properties of wheat and whole-wheat flour. *Journal of Microwave Power* **19**(1): 55-64
- Sokhansanj, S. and S.O. Nelson. 1988. Dependence of dielectric properties of whole-grain wheat on bulk density. *Journal of Agricultural Engineering Res.* **39**: 173-179