

고주파 정전용량을 이용한 밀가루와 고춧가루의 수분함량 측정에 관한 연구

Moisture Content Measurement of Wheat Flour and Red-pepper Powder using RF Capacitance

김기복* 이종환** 노상하*

정희원 정희원 정희원

K.B.Kim J.W.Lee S.H.Noh

1. 서론

각종 식품류에 함유된 수분함량은 저장 안정성 및 가공성 뿐만아니라 유통단계에서 가장 중요한 품질인자이며 분말식품류의 경우 품질에 가장 큰 영향을 미치는 요인중의 하나이다. 포장재 내에서 분말 식품의 수분함량이 균일하지 않으면 유통과정 중에 응결현상(caking)이 발생하여 제품의 품질을 저하시킬 뿐만아니라 소비자의 제품에 대한 신뢰도를 저하시킴과 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 경제적인 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 측정하는 방법은 주로 정전용량식 측정방법이 많이 사용되고 있다. 이러한 장치는 주로 수입된 제품으로서 측정주파수와 신호처리회로는 거의 공개되고 있지 않고 있으며 국내의 경우 이러한 분말식품류의 함수율 측정장치에 대한 연구는 기초연구조차 미미한 실정이다. Shahab 등(1988)은 분쇄되지 않은 밀(3.4~24.2%)에 대하여 측정주파수 1, 18, 300, 2450MHz에서 함수율과 산물밀도에 따른 유전특성을 구명하였다. Kraszewski와 Nelson(1991)은 마이크로파 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 고주파와 마이크로파 유전특성을 구명한 다음 5MHz의 주파수를 이용하는 정전용량식 온라인 함수율 측정장치를 개발하였다.

본 연구는 분말식품의 고주파 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 수분함량 측정방법을 개발하기 위하여 수행되었다.

* 서울대학교 농업생명과학대학 생물자원공학부

** 한경대학교 생물자원기계학과

2. 재료 및 방법

2.1 공시재료

본 연구에 사용된 분말식품은 시중에 유통중인 밀가루와 고춧가루를 구입하여 사용하였으며 시료 구입시 밀가루와 고춧가루의 초기 함수율은 각각 5.93%w.b.와 10.78%w.b.였다. 밀가루의 입도는 서울대학교 농업생명과학대학 농업과학공동기기센터에 설치된 입자분석기(ELZONE 280PC, Particle Data Inc., USA)를 이용하여 분석한 결과 평균입도와 표준편차가 각각 $27.54\mu\text{m}$, $6.915\mu\text{m}$ 로 나타났으며 고춧가루의 경우는 표준진동체를 이용하여 기하평균 입경 및 기하표준편차를 각각 구한 결과 $406.35\mu\text{m}$ 와 $280.08\mu\text{m}$ 로 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 가지는 시료로 조절하였다. 표준함수율 결정은 곡류의 경우 일반적으로 135℃, 24시간의 상압 공기 오븐건조법이 많이 사용되나 분말식품에 이러한 방법을 적용할 경우 식품 성분의 열분해로 인하여 실제 수분함량보다 높은 결과를 나타내게 된다(권철성, 이동선, 1987). 따라서 본 연구에서는 진공 오븐을 이용하여 60℃의 온도조건에서 5개의 알루미늄 건조용기에 각각 2g의 시료를 넣은 다음 40시간 건조하여 습량기준 함수율을 결정하였다. 정전용량 측정시 시료의 온도는 주위온도인 27~28℃로 유지하였으며 산물밀도 수준은 각 함수율에서 3수준으로 하여 실험을 수행하였다.

2.2 수분함량 측정용 샘플홀더 및 정전용량 측정시스템

수분함량 측정용 샘플홀더는 구조가 간단하고 이론적인 분석이 용이한 평행평판형 극판을 Fig 1.과 같이 설계·제작하였다. 극판의 재질은 비교적 균일한 전계 강도를 유지할 수 있는 알루미늄을 사용하였으며 극판의 거리는 2cm, 부피는 412.5cm³로 제작하였다. 실험에 사용된 샘플홀더내의 유전체가 공기일 경우의 이론적인 정전용량은 다음과 같이 표시된다.

$$C_a = \epsilon_a \epsilon_o \frac{A}{d} \dots\dots\dots(1)$$

여기서, C_a = 유전체가 공기일 때의 정전용량(pF)

ϵ_a = 공기의 상대유전상수(1.00006)

ϵ_o = 진공에서의 유전율(8.854×10^{-12} F/m)

A = 극판의 면적(m²)

d = 극판의 거리(m)

분말식품의 고주파 정전용량은 22kHz~70MHz의 측정범위를 가지는 Q-meter(HP4342)에 샘플홀더를 연결하여 0.5~30MHz범위에서 분말식품의 산물밀도, 수분함량에 따른 고주파 정전용량을 측정하였다. 또한 본 연구자가 곡류의 함수율을 측정하기 위하여 개발한 LC발진장치(1997)을 이용하여 분말식품의 함수율 측정 가능성을 검토하였다.

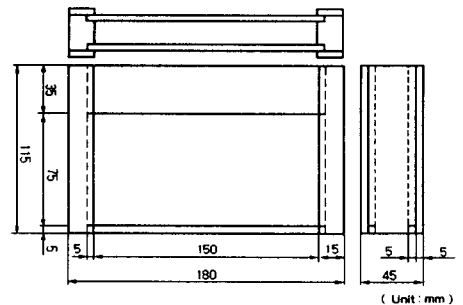
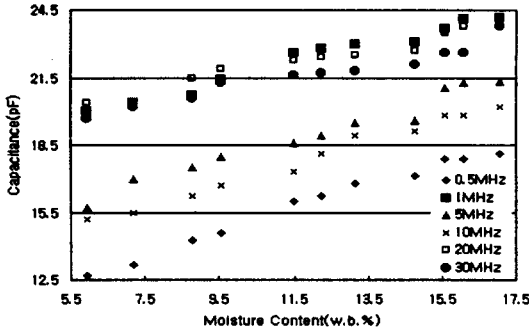


Fig. 1. Parallel plate type sample holder.

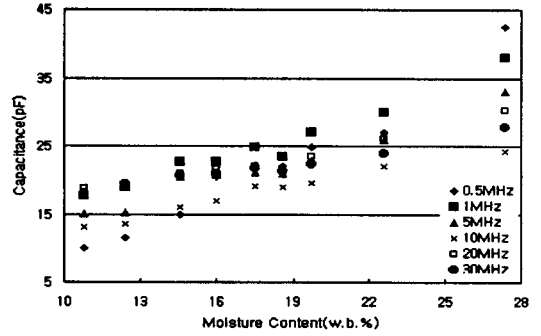
3. 결과 및 고찰

3.1 함수율에 따른 샘플홀더의 정전용량

샘플홀더내에 시료의 산물밀도 범위를 밀가루의 경우 0.492~0.602g/cm³, 고춧가루의 경우 0.465~0.652g/cm³의 수준으로 유지한 다음 수분함량 변화에 따른 샘플홀더의 정전용량을 분석한 결과 Fig. 2에서 보는바와 같이 각 측정주파수에서 함수율에 따라 증가하는 경향을 나타내었다.



(a) Wheat flour

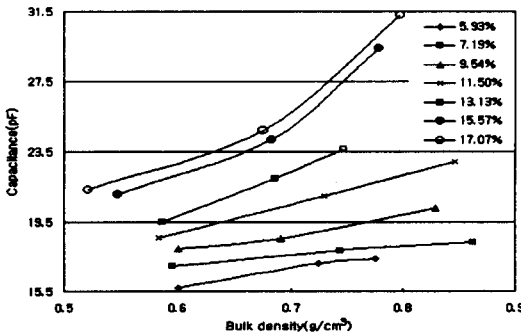


(b) Red-pepper powder

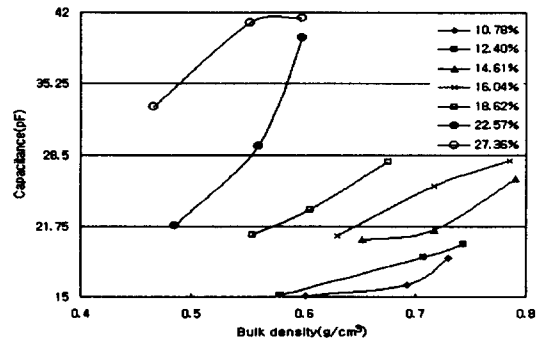
Fig. 2. Moisture content dependence of sample holder filled with wheat flour and red-pepper powder at indicated frequencies.

3.2 산물밀도에 따른 정전용량

샘플홀더내 시료의 산물밀도에 따른 정전용량변화는 Fig. 3에서 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. 따라서 고주파 정전용량을 이용한 분말식품의 함수율 측정에는 이러한 산물밀도의 영향을 반드시 보정해주어야 함을 알 수 있다.



(a) Wheat flour



(b) Red-pepper powder

Fig. 3. Bulk density dependance of sample holder filled with samples at indicated moisture contents and 5MHz.

3.3 LC발진장치와 수분밀도를 이용한 함수율 측정 가능성 검토

본 연구자가 곡류를 대상으로 샘플홀더의 정전용량 변화를 주파수 변화로 검출하기 위하여 개발한 LC발진장치(1997)을 이용하여 분말식품의 함수율 측정가능성을 검토하였다. 상기의 산물밀도의 영향을 보정하기 위하여 함수율과 산물밀도의 곱으로 표현되는 수분밀도를 함수율 측정의 인자로 사용하였다. 본 연구에서 사용된 LC 발진장치는 자체 온도보상회로가 내장되었으며 가변콘덴서를 조정하여 1~15MHz의 주파수 가변이 가능하다. (그림 4 참조)

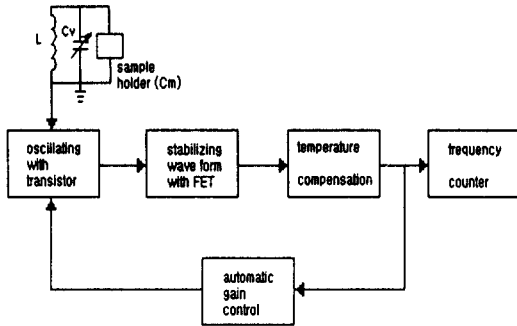


Fig. 4. Block diagram of the LC oscillator.

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

함수율 측정시 시료의 산물밀도의 영향을 보정하기 위하여 수분밀도와 발진주파수와의 관계를 나타낸 결과는 그림 6에서 보는바와 같이 거의 다항 함수적인 관계를 나타내었으며 산물밀도의 변이를 감소시킬 수 있는 것으로 분석되었다.

상기의 분석 결과를 토대로 하여 수분밀도와 시료의 온도를 독립변수로 하여 실제의 함수율 측정장치에 포함되는 함수율 측정 측도설정식을 개발하였다.

$$F = a_0 \times \rho_m + a_1 \times T + a_2 \dots\dots\dots(2)$$

$$F = a_0 \times \rho_m^2 + a_1 \times \rho_m + a_2 \times T + a_3 \dots\dots\dots(3)$$

여기서, ρ_m =수분밀도(g/cm^3), T =시료의 온도($^{\circ}C$), F =발진파수변화(MHz)

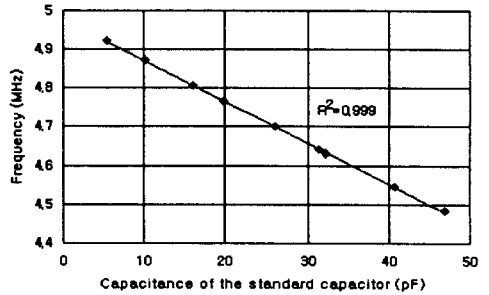


Fig. 5. Frequency variations of the LC oscillator depending on capacitance change at the initial frequency of 5MHz.

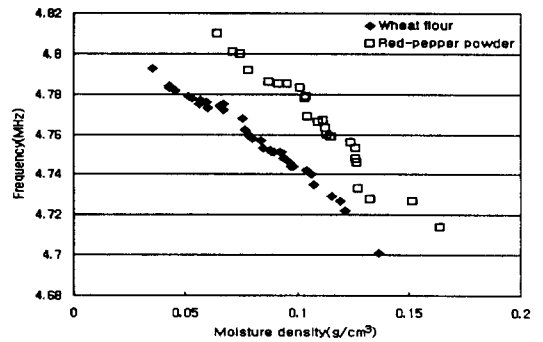


Fig. 6. Moisture density dependence of frequency variations of the LC oscillator including the sample holder with samples at $28 \pm 0.5^{\circ}C$.

회귀분석결과는 표 1에서 보는 바와 같으며 다음과 같이 밀가루와 고춧가루에 대한 함수율 측정 속도 설정식 (4)와 (5)를 개발하였다.

Table 1. Regression analysis expressing the moisture density(ρ_m) and sample temperature(T) dependence of the oscillation frequency(F) at room temperature, $28 \pm 0.5^\circ\text{C}$.

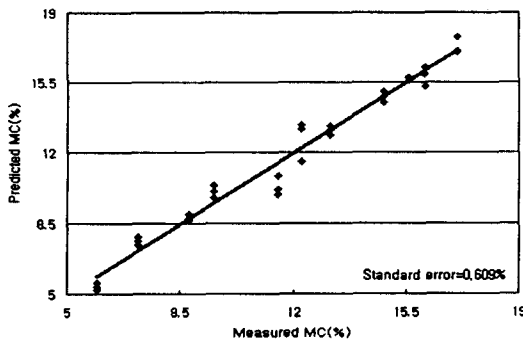
Item	Model	Regression coefficients				R ²	RMSE
		a ₀	a ₁	a ₂	a ₃		
Wheat flour	$F = a_0 \rho_m + a_1 T + a_2$	-0.77282	-0.00078	4.84141		0.9714	0.0026
	$F = a_0 \rho_m^2 + a_1 \rho_m + a_2 T + a_3$	-1.96376	-0.52054	-0.00078	4.83377	0.9727	0.0026
Red-pepper powder	$F = a_0 \rho_m + a_1 T + a_2$	-1.21177	-0.00162	4.93685		0.9567	0.0049
	$F = a_0 \rho_m^2 + a_1 \rho_m + a_2 T + a_3$	-16.99908	1.76288	-0.00154	4.80956	0.9749	0.0038

$$[\text{밀가루}] : \text{MC}(\%) = (-0.13254 + \sqrt{2.47906 - 0.0004T - 0.50923F}) \times \frac{100}{\rho_b} \dots\dots\dots(5)$$

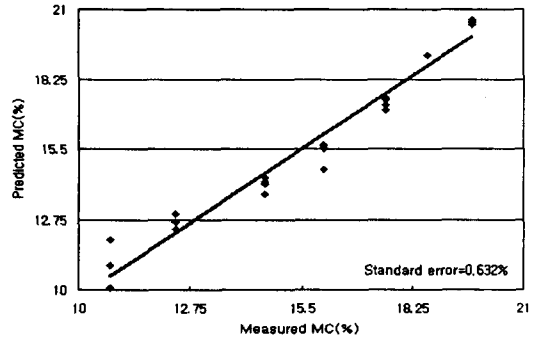
$$[\text{고춧가루}] : \text{MC}(\%) = (4.07408 - 0.00134T - 0.82524F) \times \frac{100}{\rho_b} \dots\dots\dots(6)$$

여기서, MC(%)=습량기준 함수율(%), ρ_b = 산물밀도(g/cm³)

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



(a) Wheat flour



(b) Red-pepper powder

Fig. 7. Relation between measured and predicted moisture content by equation (5) and (6).

4. 요약 및 결론

본 연구는 분말식품의 고주파 정전용량을 이용한 함수율 측정장치를 개발하기 위한 기초자료를 제시하기 위하여 수행되었다. 평행평판형 샘플홀더와 Q-meter(HP4342)를 이용하여 측정주파수 0.5~30MHz에서 함수율 범위 5.93~17.07%w.b.의 밀가루와 10.87~27.36%w.b. 범위의 고춧가루의 고주파

정전용량을 측정하여 함수율 측정 가능성을 검토하였다. LC발진장치(5MHz)와 시료의 함수율과 산물 밀도의 곱으로 표현되는 수분밀도를 이용하여 산물밀도의 보정 방법에 대해 고찰하였다. 수분밀도와 시료온도를 독립변수로 사용하여 밀가루와 고춧가루의 함수율을 측정할 수 있는 측도설정식을 개발하여 실측값과 예측값을 비교한 결과 표준오차는 각각 0.609%와 0.632%로 나타났으며 본 연구에서 개발된 함수율 측도설정식을 이용할 경우 산물밀도의 영향을 보정하면서 비교적 정확한 분말식품의 함수율 측정이 가능할 것으로 분석되었다.

(이 논문은 서울대학교 농업생명과학대학 농축산물 비파괴 품질평가 기술연구센터의 연구비 지원에 의해 수행되었음)

5. 참고문헌

1. 권칠성, 이동선. 1987. 건조채소의 수분측정방법 비교. 한국농업기계학회지. Vol. 12, No.1:39-44.
2. 김기복. 1997. 곡류의 고주파와 마이크로파 유전특성 및 정전용량식 온라인 함수율 측정장치 개발에 관한 연구. 서울대학교 공학박사 학위논문.
3. 김기복, 노상하. 1997. 고주파 정전용량식 곡류 함수율 측정장치 개발. 한국산업식품공학회지. 1(1):11-15.
4. 김기복, 노상하. 1998. 고주파 임피던스를 이용한 벼의 함수율 측정-산물밀도 보정방법을 중심으로 -. 한국농업기계학회 하계학술대회논문집. Vol. 3. No. 2 : 234-240.
5. 송재철, 박현정. 1995. 식품물성학. 울산대학교 출판부.
6. 허명희, 서혜선 공저. 1992. SAS 회귀분석. 자유아카데미.
7. 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.
8. Lawrence, K.C., S.O. Nelson and A.W. Kraszewski. 1990. Temperature-dependent model for the dielectric constant of soft red winter wheat. ASAE St. Joseph, MI 49085-9659.
9. Nelson. S.O. 1982. Factors affecting the dielectric properties of grain. Transactions of the ASAE, 25(4) : 1045-1049, 1056.
10. Nelson, S. O. 1984. Density dependence of the dielectric properties of wheat and whole-wheat flour. Journal of Microwave Power, 19(1): 55-64.
11. Shahab, 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.