

마이크로파 다중 주파수를 이용한 분말식품 수분측정기술 개발

Development of technology for measurement of moisture content in powdered food using multiple microwave frequencies

김기복* 박성운** 김종현*** 김만수** 최만용*
정희원 정희원 정희원
K. B. Kim S. Park J. H. Kim M. S. Kim M. Y. Choi

1. 서론

식품 및 농산물에 함유되어 있는 수분은 그 품질을 결정하는 주요 인자중의 하나이며 물리·화학적 특성에 큰 영향을 미치는 요인이다. 특히 농산물 및 식품의 가공공정 중 건조 저장단계에서 적절한 수분함량의 조절 및 측정은 제품의 생산성 향상과 가공기계의 효율성 증대에 반드시 필요하다. 또한 식품 가공공정, 화공분야 (원유 정제 공정 포함), 제약 분야 등에서는 공정소요 비용최소, 에너지 절감, 고품질의 제품 생산을 위해서는 공정의 첨단화 및 자동화가 요구되고 있다. 이러한 자동화의 선결과제로서 원료 제품의 물리·화학적 특성을 각 공정단계에서 수시로 검사하여 피드백 할 수 있는 온라인 수분 측정 기술의 개발이 필수적이다. 여러 가지 장점에도 불구하고 마이크로파를 이용한 수분측정기술을 적용할 경우의 문제점 중의 하나는 정지상태의 수분측정의 경우 산물밀도를 보정하는 문제이며 온라인 수분측정의 경우 시료이송속도에 따른 변이를 보정하는 문제이다. 산물밀도를 보정하기 위하여 다양한 기법들이 제안되고 있으나 (Trabelsi et al., 2001, Kim et al., 2002) 대부분 마이크로파 정밀측정 장치를 이용한 경우가 많아 실제 측정장치의 구성에 있어서 많은 제약이 따른다. 또한 수분측정 센서의 경우도 대부분 혼안테나를 사용한 경우가 대부분인데 이러한 혼 안테나의 장점은 비교적 낮은 출력의 마이크로파 신호를 마이크로파의 누설을 최소화하면서 충분히 송수신 할 수 있다는 점이다. 그러나 실제의 수분함량 측정장치 구성 면에서 보면 혼 안테나의 무게와 부피가 클 뿐만 아니라 여러 가지 다양한 시료의 유동형태에 등에 따른 센서의 적응성이 다소 감소할 것으로 생각된다.

본 연구는 마이크로파 다중 주파수를 이용하여 분말식품의 수분함량을 온라인으로 측정할 수 있는 기술을 개발하기 위하여 수행되었다. 이를 위하여 기 개발된 마이크로파 패치 어레이 안테나를 이용하여 3개의 서로 다른 마이크로파 측정주파수 대역에서 마이크로파 자유공간 전송기법을 적용하였다.

2. 다중주파수 측정장치 제작

2.1 자유공간에서의 마이크로파 감쇠

식품과 같은 유전체가 전자계 내에 있을 때의 복소유전율은 식 (1)과 같이 실수부와 허수부로 나타낸다. 실수부는 유전상수로서 유전체가 전기에너지를 저장하는 능력을 나타내고, 허수부인 손실계수는 유전체 내에서의 전기에너지 손실을 의미하며 열로 변환된다.

* 한국표준과학연구원 환경안전계측센터

** 충남대학교 생물산업기계학과

*** 광운대학교 전과공학과

+ 이 연구는 2002년도 농림부 농림기술관리센터의 농림기술개발사업에 의한 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (1)$$

여기서, ε 는 복소유전율, ε' 는 유전상수, ε'' 는 손실계수, j 는 $\sqrt{-1}$ 를 각각 나타낸다. 자유공간상에서 유전체에 마이크로파가 수직으로 입사할 때 자유공간과 유전체사이의 계면에서 파의 일부는 투과하고 일부는 반사하게 되는데 이들 관계로부터 마이크로파 감쇠량의 변화는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\Delta A = \frac{8.686 \pi d}{\lambda_0} \cdot \frac{\varepsilon''}{\sqrt{\varepsilon'}} \quad (2)$$

여기서, ΔA 는 유전체가 있을 때와 없을 때의 마이크로파의 위상차와 감쇠량 차, λ_0 는 마이크로파 파장, d 는 유전체의 두께를 각각 나타낸다.

상기 식(2)에서 입사되는 마이크로파의 파장과 매질의 두께가 일정할 경우 투과하여 나오는 마이크로파의 감쇠는 매질의 복소유전율에 의해 주로 결정되는데 복소유전율은 매질에 포함된 수분함량의 함수이다. 이때 마이크로파 감쇠량(A')은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$A' = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{V'}{V_0} \right) \quad (3)$$

여기서, A' 는 매질을 투과하여 나오는 마이크로파 감쇠(dB), V_0 는 매질에 입사되는 마이크로파의 침투전압 (V), V' 는 매질을 투과하여 나오는 마이크로파의 침투전압(V)를 각각 나타낸다. 따라서 식(2)와 (3)을 이용하여 투과되는 마이크로파 침투전압을 검출함으로써 전송선로 상에 놓여진 매질의 수분함량을 알 수 있게 된다.

2.2 다중주파수 측정장치

여러 연구결과에 의하면 마이크로파 주파수 대역별로 매질의 수분함량에 따른 마이크로파 에너지의 흡수가 다르게 나타난다. 따라서 본 연구에서는 마이크로파 대역별로 S-band에서 2.5 GHz, C-band에서 7.0 GHz, X-band에서 10.5 GHz의 주파수를 선정하여 다중주파수 측정시스템을 구성하였다. 기본적인 마이크로파 측정시스템은 그림 1에서 보는 바와 같다. 원하는 주파수를 발진시키는 발진부, 신호를 한쪽 방향으로만 전달하는 아이솔레이터와 패치안테나로 구성된 송신부와 패치안테나, 검파기(detector), 연산증폭기로 구성된 수신부로 구성하였다. 마이크로파 시스템은 시료를 이송하는 컨베이어 시스템에 제작하였으며 송수신 패치안테나의 거리는 30cm로 고정하였다. 검파기에서 검출된 직류 레벨의 마이크로파 투과전압은 연산증폭기를 통하여 증폭되어 마이크로프로세서, A/D 컨버터, display가 내장된 신호처리회로로 연결된다.

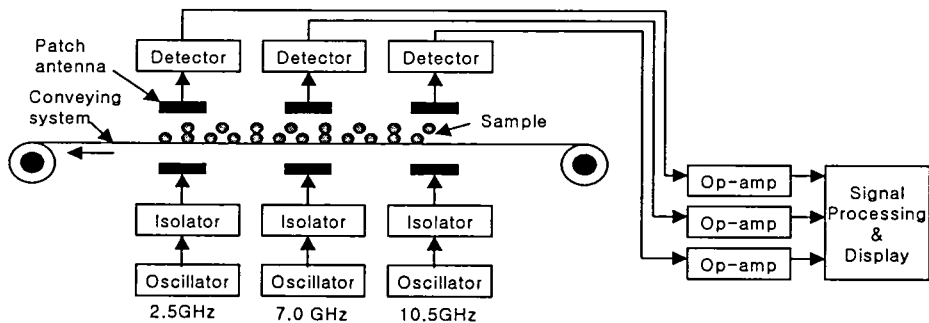


Fig. 1. Microwave measurement system for moisture content using multiple frequencies.

2.3 온라인 이송장치 제작

시료의 이송속도를 조절하기 위한 컨베이어 시스템은 그림 2에서 보는바와 같다. 전체적으로 시료 투입부, 시료 이송부, 시료 배출부로 제작하였으며 시료 높이를 일정하게 유지할 수 있도록 시료 투입부 바로 앞쪽에 안내판을 설치하였다. 이송속도를 조절하기 위하여 이송모터의 회전속도를 가변 할 수 있도록 하였으며 이송 컨베이어 벨트는 폭 30cm, 길이 200cm로 하였다. 투입되는 시료의 온도를 측정하기 위하여 Pt-100 온도센서를 시료 투입부에 설치하였으며 이송속도를 측정하기 위하여 타코미터를 설치하여 상기 그림 1의 신호처리 회로부로 연결되도록 하였다.

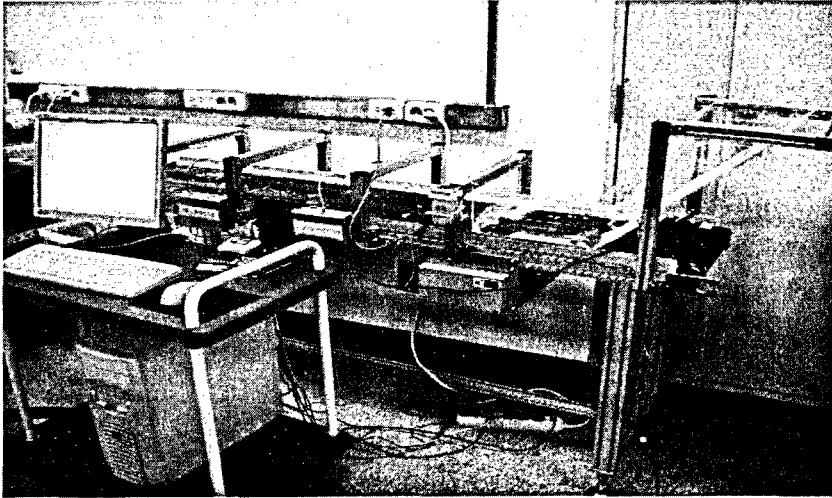


Fig. 2. Photo of conveying system and microwave measurement system

3. 실험재료 및 방법

3.1 공시재료

공시재료로는 밀가루를 이용하였으며 시중에서 유통되는 제품으로서 향온함습기에서 수분함량을 조절하였다. 수분함량의 표시는 습량기준함수율로 하였으며 수분함량 측정은 진공건조 오븐에서 135℃, 2시간 건조조건을 적용하였다.

3.2 실험방법

밀가루의 수분함량을 7~14%의 범위에서 약 8수준으로 조절하면서 실험을 수행하였다. 향온함습기에서 조절된 시료를 이송장치의 시료투입부에 투입하여 온도를 측정하고 다음 이송장치의 이송속도를 3수준으로 가변하면서 마이크로파 측정장치의 출력전압을 측정하였다. 실험 시 발생하는 여러 가지 오차요인이 마이크로파 측정장치에 미칠 수 있는 영향을 고려하여 이송장치에 시료가 없을 때와 시료가 있을 때의 마이크로파 출력전압의 차이 값을 측정값으로 하여 분석하고자 하였다. 이때 시료의 온도는 2수준으로 조절하여 온도에 따른 영향을 분석하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 시료함수율에 따른 출력전압변화

시료이송장치의 컨베이어 속도를 5.8 cm/s로 고정하고 시료의 온도를 주위온도인 25°C로 유지한 후 시료의 함수율에 따른 출력전압의 변화를 측정된 결과는 그림에서 보는바와 같다. 각 측정주파수 대역에서 시료의 함수율이 증가함에 따라 각 측정 주파수에서의 출력전압 변화는 증가하는 것으로 나타났다. 대체적으로 10.5GHz에서 그 증가폭이 크게 나타났는데 이러한 이유로서는 10.5GHz가 포함되는 X-band 주파수 대역이 수분에 따른 에너지 흡수가 크게 나타나며 이에 따라 감쇠량이 증가하기 때문이다.

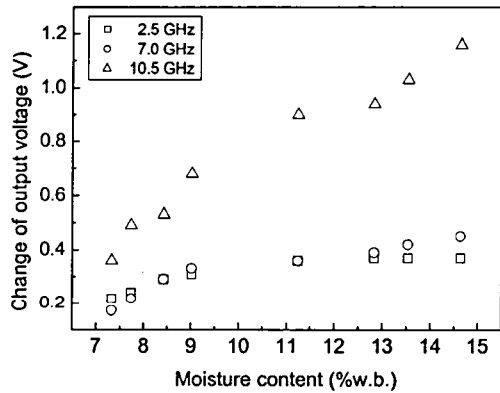


Fig. 3. Plot for change of output voltage v.s. moisture content at indicated frequencies.

4.2 시료온도에 따른 출력전압변화

시료의 이송속도를 고정시키고 각 측정주파수에서 시료의 온도변화에 따른 마이크로파 출력전압을 측정된 결과 그림 4에서 보는바와 같다. 각각의 시료 함수율에서 대체적으로 시료의 온도가 증가함에 따라 마이크로파 출력전압의 차이값은 증가하는 경향을 나타내었다. 대체적으로 시료의 온도가 증가할 경우 유전율이 증가하게 되며 이에 따라 마이크로파 감쇠가 증가하게 되는데 이러한 감쇠량의 증가에 따라 마이크로파 출력전압의 변화폭도 커지게 된다. 그림 4의 결과로부터 정확한 수분측정을 위해서는 시료의 온도특성이 반드시 고려되어야 함을 알 수 있다.

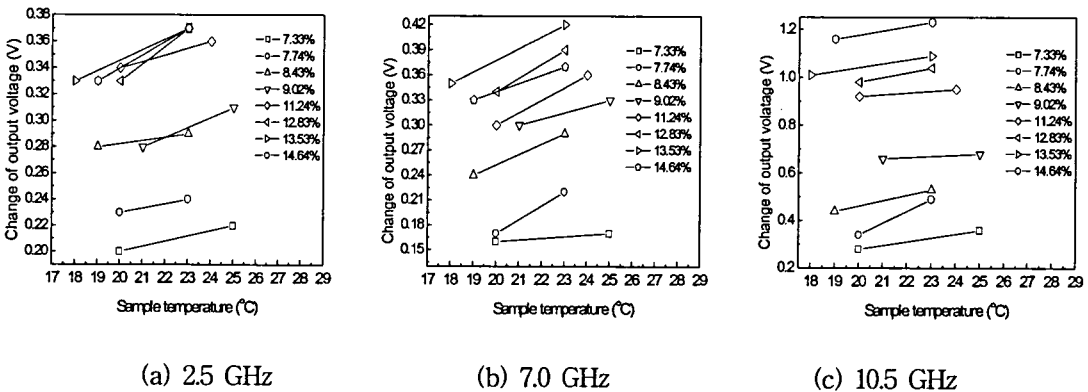
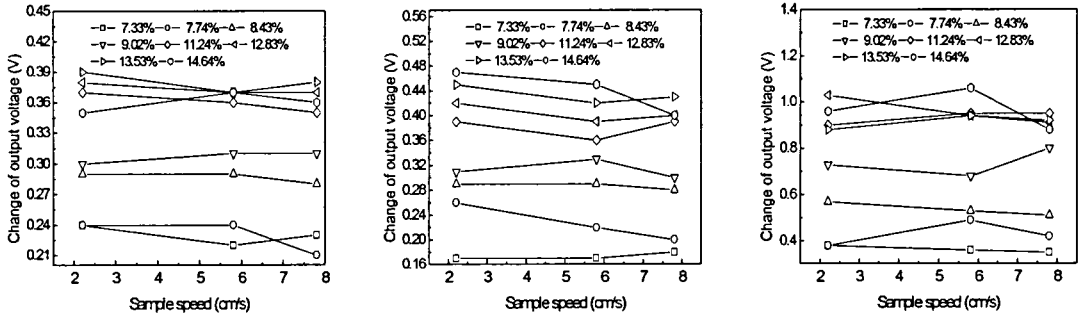


Fig. 4. Plot for change of output voltage v.s. sample temperature at indicated moisture content of wheat flour. (a) 2.5 GHz, (b) 7.0 GHz, and (c) 10.5 GHz

4.3 시료이송속도에 따른 전압변화

그림 5는 시료의 이송속도를 3수준으로 변화시켰을 때 각 측정주파수와 수분함량에서 출력전압의 변화를 나타낸 그림이다. 전체 측정주파수에서 대체적으로 시료 이송속도에 따른 출력전압의 변화는 뚜렷한 경향이 없는 것으로 나타났다.



(a) 2.5 GHz

(b) 7.0 GHz

(c) 10.5 GHz

Fig. 5. Plot for change of output voltage v.s. sample speed at indicated moisture content. (a) 2.5 GHz, (b) 7.0 GHz, and (c) 10.5 GHz.

4.4 수분측정 모델 개발

본 연구에서 수분측정에 사용된 다중주파수 시스템을 수분측정 모델을 개발하였다. 수분측정 모델의 독립변수로는 시료의 온도와 각 측정주파수에서의 출력전압변화를 이용하였다. 여기서 시료 이송속도는 독립변수로 포함하지 않았는데 그 이유는 시료의 속도에 무관한 수분측정 모델을 개발하기 위함이다. 실제 수분측정 시스템 개발을 고려하여 측정 주파수는 2개 주파수의 조합으로 하여 다음과 같은 모델을 가정하여 중회귀분석을 실시하였다.

$$MC(\%) = a \cdot T + b \cdot \Delta V_1 + c \cdot \Delta V_2 + d \quad (4)$$

여기서, $MC(\%)$ =수분함량(%w.b.), $a \sim d$ 는 중회귀계수, ΔV_1 및 ΔV_2 는 각각의 측정주파수에서의 출력전압의 변화를 각각 나타낸다.

표 1은 중회귀분석의 결과로서 측정주파수가 7.0 및 10.5 GHz일 때 가장 양호한 결과를 나타내었다.

Table 1. Results of multiple linear regression for moisture content model

Model	Frequency	Regression coefficients				R ²
		a	b	c	d	
Eq.(4)	2.5 & 7.0 GHz	-0.378	14.760	17.003	9.181	0.877
	2.5 & 10.5 GHz	-0.262	4.804	7.746	9.262	0.920
	7.0 & 10.5 GHz	-0.281	6.484	6.659	9.939	0.925

상기 표 1의 결과를 토대로 하여 수분측정 모델 개발에 사용하지 않은 자료를 이용하여 수분함량을 예측한 결과는 그림 6에서 보는바와 같다. 오븐건조법에 의한 수분측정값과 개발된 모델식에 의한 수분측정값을 비교한 결과 결정계수는 0.9235, bias는 0.25%, SEP는 0.867%로서 7.0 GHz와 10.5 GHz 의 2개 주파수를 이용할 경우 시료의 이송속도를 고려하지 않더라도 비교적 양호한 수분측정 정확도를 얻을 수 있을 것으로 나타났다.

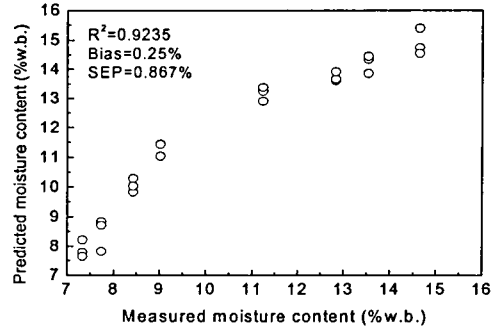


Fig. 5. Relationship between moisture content by oven method and predicted by developed model.

4. 요약 및 결론

본 연구는 마이크로파 다중주파수를 이용하여 분말식품의 수분함량을 측정하기 위한 기술을 개발하기 위하여 수행되었다. 이를 위하여 마이크로파 측정주파수 대역을 고려하여 2.5, 7.0, 10.5GHz의 3개 주파수를 선정한 다음 마이크로파 자유공간전송기술을 적용하였다. 송수신 안테나 사이에 시료이송 컨베이어 벨트 시스템을 구현하여 이송중의 분말식품의 수분을 측정할 수 있는 실험장치를 제작하였다. 밀가루를 대상으로 수분함량 범위를 7~14%w.b.에서 8수준, 시료 이송속도를 3수준, 온도를 2 수준으로 하여 실험을 수행하였다. 온도와 시료 이송속도를 고정한 상태에서 수분함량에 따른 마이크로파 출력전압의 변화를 측정하고 결과 수분함량이 증가함에 따라 출력전압의 변화도 증가하였다. 전체적으로 증가하는 기울기는 10.5 GHz에서 크게 나타났다. 시료의 온도증가에 따라서는 모든 측정주파수에서 대체적으로 출력전압의 변화가 증가하는 것으로 나타났다. 반면 시료 이송속도의 변화에 따라서는 뚜렷한 경향을 나타내지 않았다. 2개 측정주파수를 이용하여 분말식품의 수분을 측정할 수 있는 모델을 개발하고 평가한 결과 7.0 GHz와 10.5 GHz의 2개 주파수를 이용할 경우 시료의 이송속도에 크게 영향을 받지 않는 수분측정이 가능한 것으로 분석되었다.

참고문헌

1. K. B. Kim, J. H. Kim, S. S. Lee and S. H. Noh. 2002. Measurement of grain moisture content using microwave attenuation at 10.5 GHz and moisture density. *IEEE Transactions on I&M*, 51(1): 72-77
2. S. Trabelsi, A. W. Kraszewski, and S. O. Nelson. 2001. Universal calibration method for microwave moisture sensing in granular materials. *Transactions of the ASAE* 44(3):731-736