

분말식품의 마이크로파 유전율 및 수분함량 측정

김기복 김종헌 이진민

Measurement of Permittivity and Moisture Content of Powdered Food at Microwave Frequencies

K. B. Kim J. H. Kim J. M. Lee

Abstract

In this study, the microwave free-space transmission technique was used to measure the dielectric property of powdered food at microwave frequencies. The sample holder was designed and fabricated to transmit the microwave signals ranging from 1 to 15 GHz. From the microwave propagation theory the equation expressing the dielectric property of powdered food was derived and validated by standard dielectrics. The dielectric property of powdered food such as wheat flour, coffee powder and milk powder was measured and analyzed. In the uniform range of bulk density of material, the real parts of permittivity of the food samples increased with the increase of moisture content, bulk density and temperature of the samples. The propagation properties such as attenuation and phase shift increased linearly as the moisture density of the food samples increased. As a measuring frequency of the moisture content, the X-band was recommended.

Keywords : Microwave, Powdered food, Moisture constant, Permittivity

1. 서론

각종 식품 등에 함유되어 있는 수분은 제품의 물리적, 화학적 성질 및 생리적 작용에 큰 영향을 미칠 뿐만 아니라 가공성 및 저장성 그리고 품질을 결정하는 매우 중요한 요인이다. 보통 식품의 경우 종류에 따라 2.7~98.8% 정도의 수분을 함유하고 있다. 식품의 품질을 장기간 안전하게 보관하고 유통시키기 위해서는 적절한 수분의 조절이 요구되며 그렇지 못할 경우 품질이 변화하게 된다. 특히 분말식품류의 경우 포장재 내에서 분말식품의 수분함량이 균일하지 않으면 유통과정 중에 응결현상(caking)이 발생하여 제품의 품질을 저하시킬 뿐만 아니라 제품에 대한 소비자의 신뢰도를 저하시킬 뿐만 아니라 상품화에 큰 장애 요소가 된다. 또한 분말식품의 가공과정

중 건조, 저장단계에서 적절한 수분함량의 조절 및 측정은 제품의 생산성 향상과 분말식품 가공기계의 효율성 증대에 반드시 필요하다. 대부분의 농산물은 함수율이 10% 내외 정도에서 유통이 되지만 분말 식품의 경우는 함수율이 보통 5% 이내에서 유통된다. 현재 곡류 등과 같은 농산물의 수분 측정 장치는 분말류와 같은 함수율이 낮은 식품에는 적합하지 않으며, 따라서 이러한 저수분 식품의 수분을 측정하기 위한 장치 개발이 요구되고 있다. 이러한 수분측정기술로서는 여러 가지 다양한 방법이 적용되고 있지만 주로 마이크로파 기술이 많이 적용되고 있다. 마이크로파를 이용한 수분측정 연구는 곡물을 대상으로 한 경우가 많으며(Kraszewski et al., 1990; Nelson and Kraszewski, 1990; Nelson et al., 2000; Kim et al., 2002; Kim et al., 2006) 분말의 유전특성 측정에도 이용

되고 있다(Trabelsi et al., 2001; Wu et al., 2001).

마이크로파를 이용한 수분측정 기술은 원료 내 수분의 변화에 따라 마이크로파 대역에서 유전특성이 크게 변하게 되는데 이러한 수분에 따른 유전율의 차이를 이용하는 기술로서 대상 시료의 유전특성을 구명하는 것이 우선적으로 요구된다. 즉, 수분함량에 따른 유전특성 변화 범위를 알아야 측정용 마이크로파 안테나와 발진기와 같은 관련 소자들을 설계할 수 있다. 또한 마이크로파 유전특성은 측정 주파수에 따라 특성이 달라지므로 마이크로파 대역별로 유전특성을 측정해야 한다. 그러나 대부분 마이크로파 대역별로 적용되는 안테나의 크기가 달라지기 때문에 넓은 주파수 범위의 유전특성을 측정하기 위해서는 안테나와 시료의 두께를 주파수 대역별로 일일이 바꾸어주어야 한다. 따라서 본 연구는 마이크로파를 이용한 분말식품의 온라인 수분함량 측정기술을 개발하기 위한 기초연구로서 분말식품의 유전특성을 측정하였으며, 1~18 GHz의 광대역 마이크로파 혼안테나를 이용한 자유공간 전송기법을 적용하여 유전특성을 측정하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

가. 마이크로파 유전율 측정방법

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.

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

여기서, ϵ 는 복소유전율, ϵ' 는 유전상수, ϵ'' 는 손실계수, j 는 $\sqrt{-1}$ 를 각각 나타낸다.

마이크로파가 진행하는 경로에 식품과 같은 매질이 존재할 때 유전상수와 유전손실은 다음과 같이 표기된다(Kim et al., 2002).

$$\epsilon' = \left(1 + \frac{\Delta\Phi\lambda_0}{360d}\right)^2 \quad (2)$$

$$\epsilon'' = \frac{\Delta A\lambda_0\sqrt{\epsilon'}}{8.686\pi d} \quad (3)$$

여기서, λ_0 는 자유공간에서의 파장(m), d 는 매질의 두께(m), $\Delta\Phi$ 는 마이크로파의 위상변화(radian), ΔA 는 마이크로파 감쇠(dB)를 각각 나타낸다.

따라서 식 (2)와 식 (3)을 이용하여 자유공간상에서의 유전체를 투과하는 마이크로파의 감쇠와 위상차를 측정함으로써 물체의 유전율을 구할 수 있게 된다.

나. 마이크로파 측정 시스템

본 연구에서 사용된 마이크로파 측정 시스템은 그림 1에서 보는 바와 같으며 마이크로파 측정 주파수는 1~12 GHz의 범위로 하였다. 측정 시스템은 50 MHz~20 GHz의 회로망분석기(HP8720D, Hewlett Packard, 미국), 혼 안테나(HRN0118, TDK RF Solutions Inc., 미국), 샘플홀더로 구성하였다. 혼 안테나의 이득은 5.3~11.1 dBi이며 혼 안테나의 양 끝단은 network analyzer와의 임피던스 부정합을 최소화하기 위하여 N-type 50 Ω test cable과 연결되었다. 샘플홀더의 재질은 아크릴이며 전파가 투과할 때 발생하는 혼 안테나의 누설(leakage)을 최소화하기 위하여 혼 안테나 가로 크기의 2배 이상인 360 mm로 하였으며 두께는 10 mm로 하였다. 이때 전파 투과거리가 되는 샘플홀더의 너비는 측정주파수 범위인 1~12 GHz를 고려하면 파장 범위가 200~25 mm이므로 최소한 한 파장의 1/4배 정도를 고려하여 100 mm로 하였으며 샘플홀더의 내부크기는 340×240×100 mm³로 제작하였다. 샘플홀더를 투과하는 마이크로파의 전파특성은 먼저 샘플홀더에 시료가 없을 때의 감쇠량과 위상변화를 측정하고, 샘플홀더에 시료를 충전하여 얻어지는 감쇠량과 위상변화를 측정하여 각각의 차이를 이용하여 분석하였다. 이때, S_{21} -parameter를 측정하기 위하여 회로망분석기를 CW(continuous wave) transmission mode로 설정하였으며 측정된 S_{21} 을 이용하여 다음 식 (4)-(6)과 같이 마이크로파의 감쇠와 위상을 각각 구할 수 있다.

$$S_{21} = |S_{21}|e^{j\Phi} \quad (4)$$

$$A = -20 \log|S_{21}| \quad (5)$$

$$\Phi = 2n\pi + \psi \quad (6)$$

여기서, A 는 마이크로파 감쇠(dB), Φ 는 전체 위상(degree), ψ 는 위상변화(degree), n 은 정수를 각각 나타낸다.

상기 식 (5)와 (6)에서 측정된 시료의 감쇠 및 위상변화를 식 (2)와 (3)에 대입하여 유전상수와 유전손실을 구할 수 있다. 한편, 마이크로파 측정주파수는 L band에서 1.5 GHz, S band에서 3 GHz, C band에서 7 GHz, X band에서 10 GHz, K band에서 15 GHz를 선택하였다. 본 연구의 측정 시스템에서 유전율 측정 시 샘플홀더 두께의 영향을 보정하기 위하여 샘플홀더 내에 시료가 없는 상태에서 감쇠량과 위상을 미리 측정해 두었

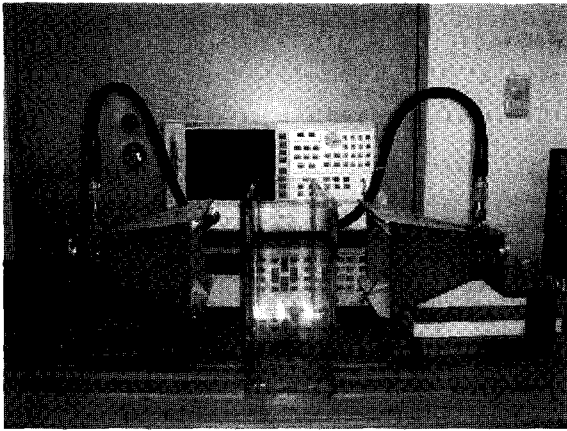


Fig. 1 Microwave free-space transmission measurement system.

으며 유전율이 알려진 아크릴과 테프론을 대상으로 식 (2)와 (3)을 검증하였다.

다. 공시 재료

실험에 사용된 분말식품은 시중에 유통되는 제품으로서 밀가루, 분유, 분말커피를 대상으로 하였으며 분말시료의 수분함량은 항온항습기 내에서 온도 35°C, 상대습도 75% 조건에서 조절하였다. 시료의 수분함량은 진공건조 오븐에서 102°C의 온도조건에서 2시간 동안 건조하여 측정하였으며 습량기준수율을 계산하였다. 마이크로파 측정 시 주위온도를 24 ± 1°C로 일정하게 유지하였으며 실험이 수행되는 동안 수분함량이 변할 수 있기 때문에 수분 이내에 측정을 하였다. 시료의 조건은 산물밀도 3수준, 시료온도 3수준으로 하여 실험을 수행하였다.

라. 수분함량 측정모델 개발

실제의 마이크로파 수분측정 장치개발에서 시료의 유전특성 변화를 측정하기 위해서는 신호처리회로와 알고리즘과 같은 부가적 노력이 요구된다. 따라서 마이크로파 감쇠와 위상변화를 검출할 수 있는 하나의 통합 시스템을 구현하는 것이 바람직하다.

일정한 전압진폭(V_0)과 위상(ψ_0)을 갖는 마이크로파가 매질을 투과하여 출력 전압 진폭과 위상이 변할 경우 감쇠량(A')과 위상변화($\Delta\psi$)는 다음과 같이 표현된다(Kim et al., 2006).

$$A' = -20 \cdot \log_{10} \left(\frac{V'}{V_0} \right) \quad (7)$$

$$\Delta\psi = \psi' - \psi_0 \quad (8)$$

여기서,

- A' = 매질을 투과하여 나오는 마이크로파의 감쇠(dB)
- V_0 = 매질에 입사되는 마이크로파 첨두전압(V)
- V' = 매질을 투과하여 나오는 마이크로파 첨두전압(V)
- $\Delta\psi$ = 마이크로파 위상변화(radian)
- ψ' = 매질을 투과하여 나오는 마이크로파 위상(radian)
- ψ_0 = 매질에 입사되는 마이크로파 위상(radian)

따라서 상기 식 (7) 및 식 (8)로 표현되는 마이크로파 감쇠와 위상변화가 회로망분석기로 측정되므로 분말시료의 수분에 따른 측정값과의 비교를 통하여 수분측정 주파수를 선정하고자 하였다. 이때 시료의 산물밀도 범위의 영향을 보정하기 위하여 함수율과 산물밀도의 곱으로 표시되는 수분밀도를 이용하였다. 수분밀도는 다음과 같이 표시되며 단위부피당 수분의 절대량을 나타낼 수 있다(Kim et al., 2006).

$$\rho_m = MC(decimal) \times \frac{W_t}{V_s} \quad (9)$$

여기서, ρ_m 은 수분밀도 (kg/m^3), $MC(decimal)$ 는 시료의 습량기준 수분함량, W_t 는 시료의 무게, V_s 는 샘플홀더의 부피 (m^3)를 각각 나타낸다.

수분측정에 적합한 주파수를 분석하기 위하여 수분밀도를 종속변수, 마이크로파 감쇠 및 위상변화를 독립변수로 하여 선형회귀분석을 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

가. 수분함량에 따른 유전특성 변화

그림 2~4는 측정된 시료의 유전특성으로서 밀가루의 경우 시료의 산물밀도범위 3수준 중 중간범위에 해당되는 960~992 kg/m^3 범위, 분유의 경우 874~931 kg/m^3 범위, 분말커피의 경우 639~776 kg/m^3 범위의 조건에서 시료의 수분함량 변화에 따라 유전특성의 변화를 나타낸 결과이다. 대체적으로 유전상수는 수분함량 증가에 따라 증가하는 경향을 나타내었으며 주파수가 증가할수록 감소하는 경향을 나타내었다. 반면 유전손실은 대체적으로 수분함량에 따라 그 값들이 증가하기는 하지만 각 분말식품의 종류에 따라 측정주파수 대역에 따라 약간씩 다른 특성을 나타내는 것으로 분석되었다.

나. 산물밀도 변화에 따른 유전특성 변화

샘플홀더 내 시료의 산물밀도 변화에 따른 유전특성 변화를 분석하였다. 전술한 바와 같이 샘플홀더에 충전되는 시료의 충전방법을 다르게 하여 산물밀도의 범위를 880~1080 kg/m^3 로 조절하였으며 약 3수준 정도로 샘플홀더 내 시료의

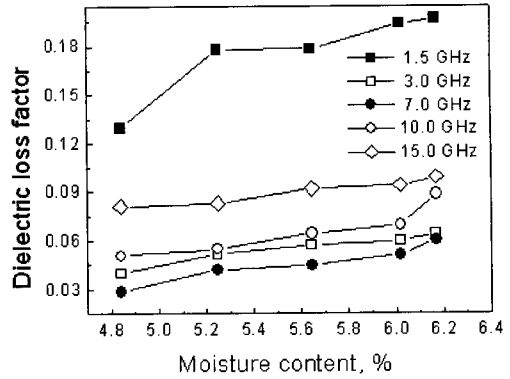
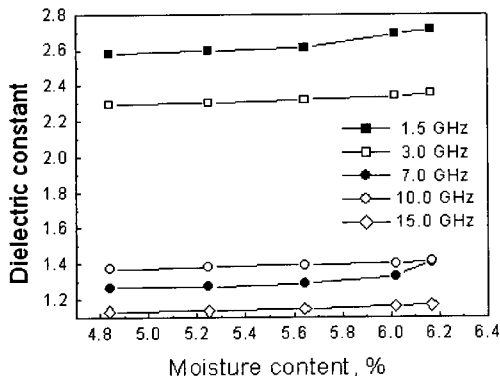


Fig. 2 Dielectric constant (left) and loss factor (right) of the wheat flour at several frequencies.

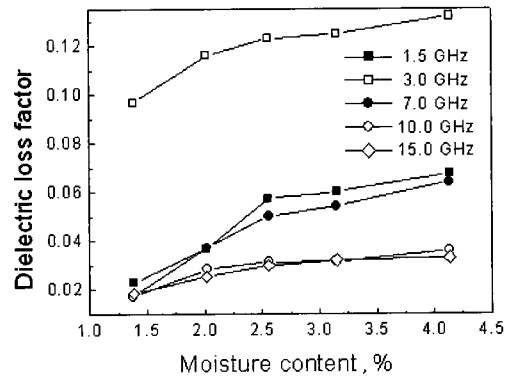
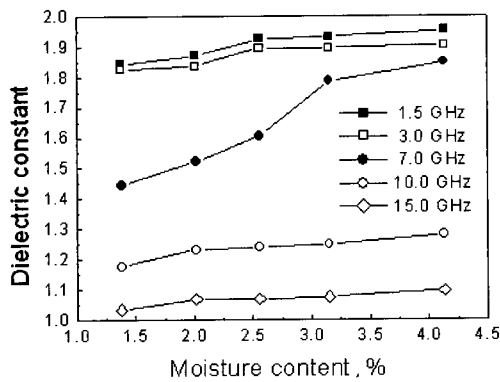


Fig. 3 Dielectric constant (left) and loss factor (right) of the milk powder at several frequencies.

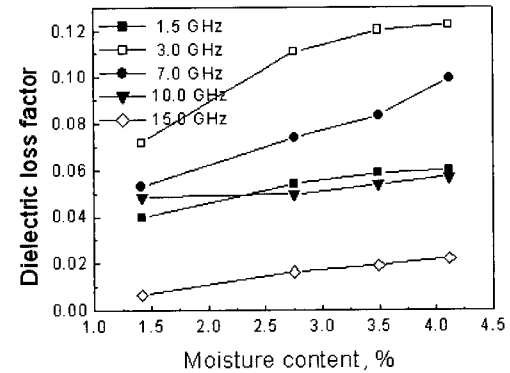
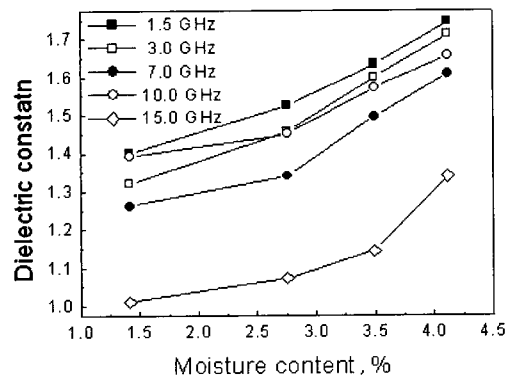


Fig. 4 Dielectric constant (left) and loss factor (right) of the coffee powder at several frequencies.

산물밀도를 변화시켰다. 그림 5~7은 전체 측정 주파수 중 3 GHz, 7 GHz, 10 GHz에서의 측정 결과로서 대체적으로 각 측정 주파수 대역에서 산물밀도가 증가함에 따라 유전율은 증가하는 경향을 나타내었다. 반면, 유전손실은 뚜렷한 경향을 나타내지 않는 것으로 분석되었다. 이러한 유전상수가 증가하는 경향은 동일한 수분함량 조건이라도 부피가 일정한 샘플홀더 내에 투입되는 시료의 양이 많아짐에 따라 유전상수가 증가하는 것이므로 이러한 산물밀도의 영향이 수분측정장치의 정확도에 큰 영향을 줄 것으로 판단된다.

다. 시료 온도변화에 따른 유전특성 변화

샘플홀더 내 시료의 온도변화에 따른 유전특성 변화를 분석하였다. 샘플홀더 내에 시료의 산물밀도를 일정하게 유지한 후 시료가 담겨진 샘플홀더를 항온항습기 내에 넣고 습도를 고정한 다음 온도를 3수준으로 변화시켰다. 항온항습기 내에서 일정 시간이 지난 후 온도계를 이용하여 시료의 온도를 측정하였다. 각각의 시료에 대하여 온도에 따른 유전특성 변화는 그림 8~10에서 보는 바와 같다. 각 함수율 조건에서 유전상수의 경우 시료의 온도가 증가함에 따라 대체적으로 증가하

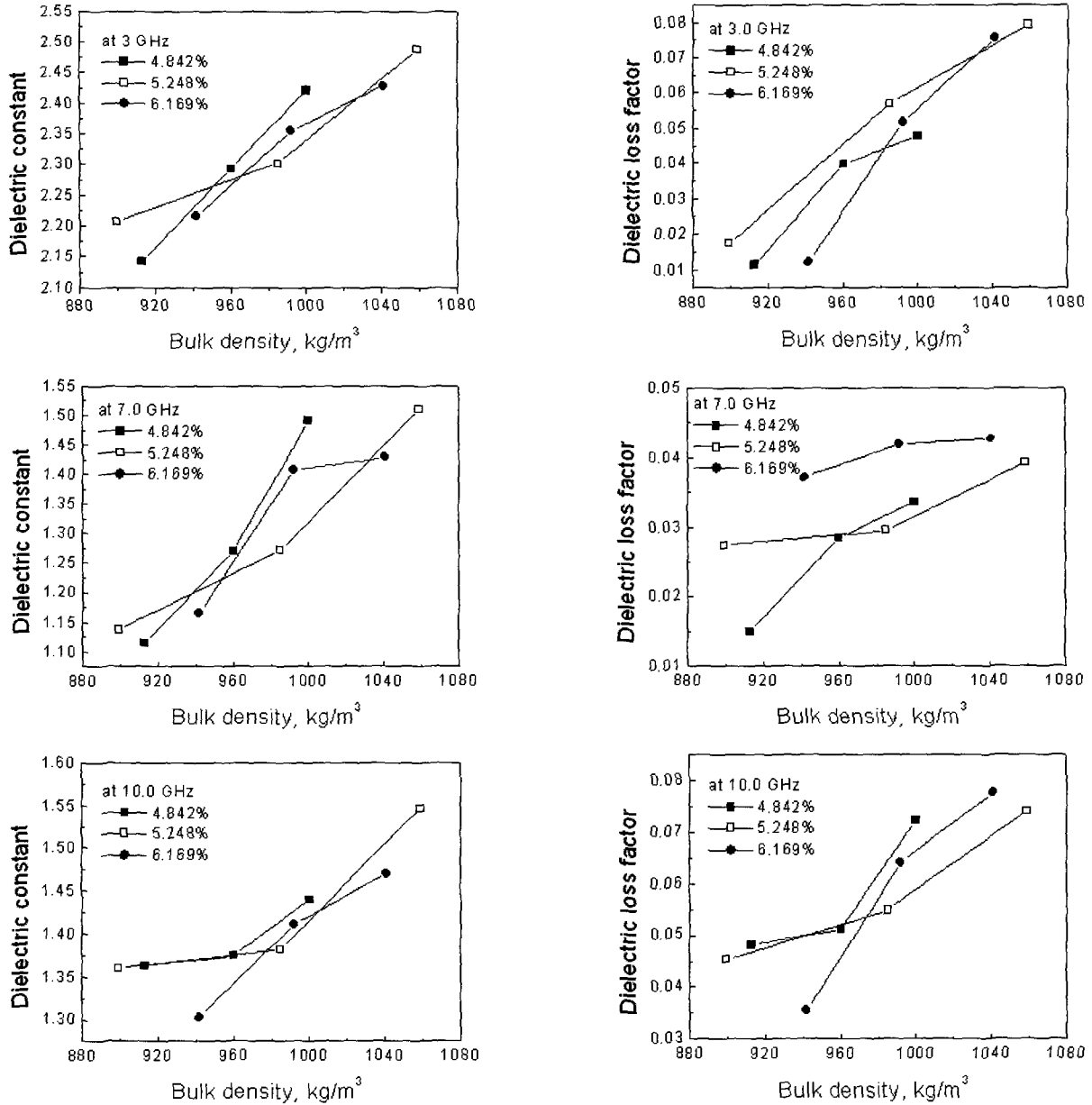


Fig. 5 Dielectric constant (left) and loss factor (right) vs. bulk density of the wheal flour at several moisture contents and measuring frequencies. 3.0 GHz (top) 7.0 GHz (middle) and 10.0 GHz (bottom).

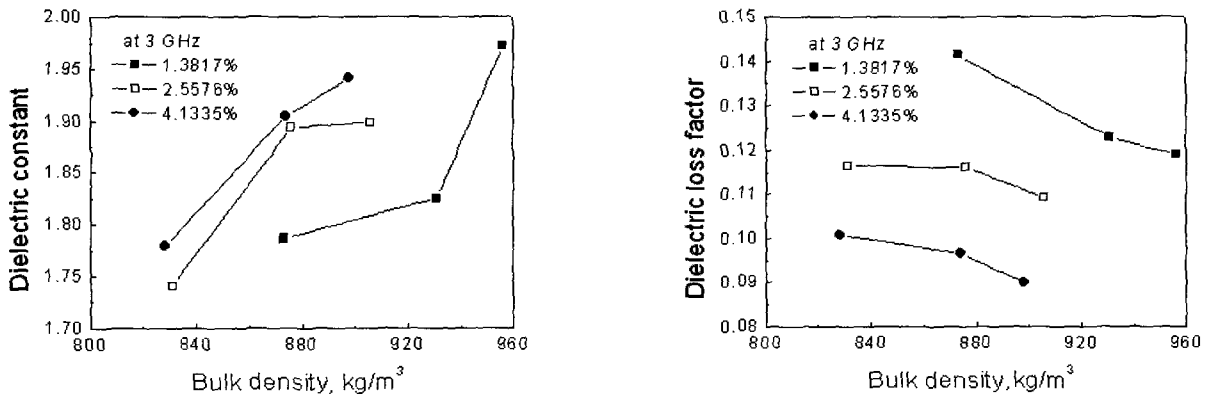


Fig. 6 Dielectric constant (left) and loss factor (right) vs. bulk density of the milk powder at several moisture contents and measuring frequencies. 3.0 GHz (top) 7.0 GHz (middle) and 10.0 GHz (bottom).

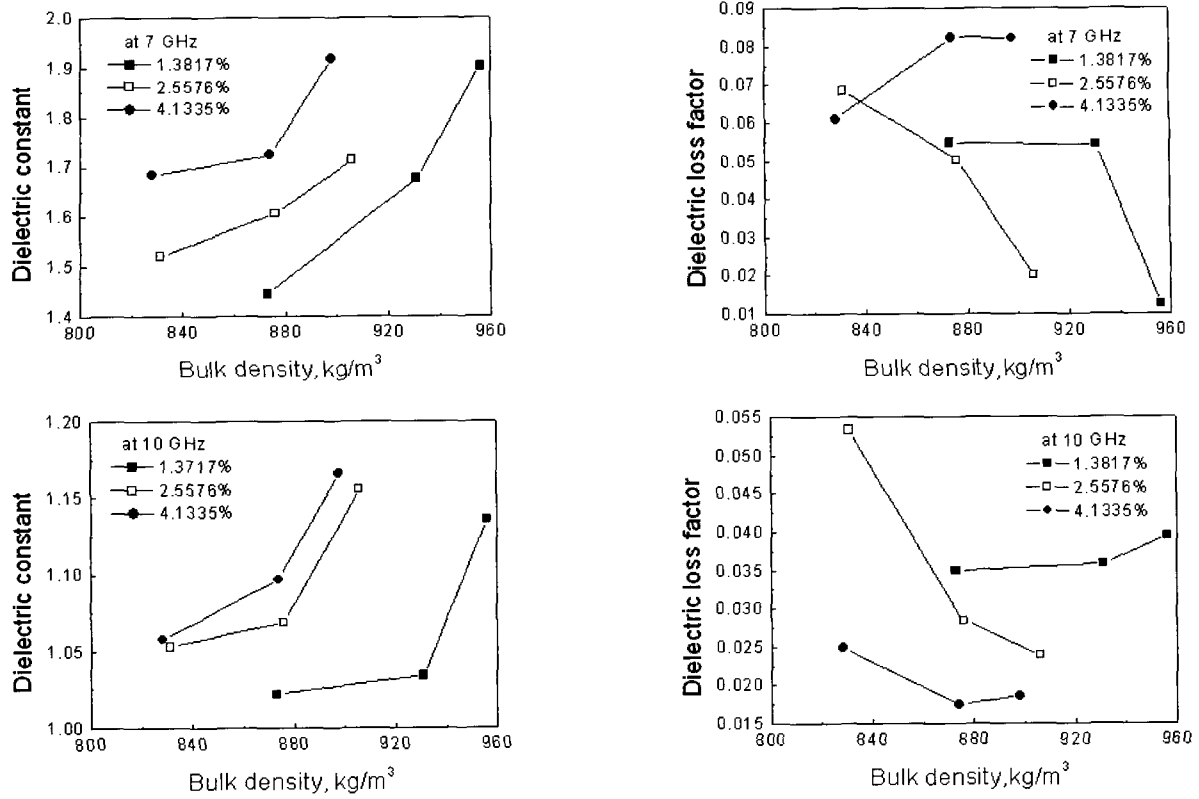


Fig. 6 Dielectric constant (left) and loss factor (right) vs. bulk density of the milk powder at several moisture contents and measuring frequencies. 3.0 GHz (top) 7.0 GHz (middle) and 10.0 GHz (bottom) (continued).

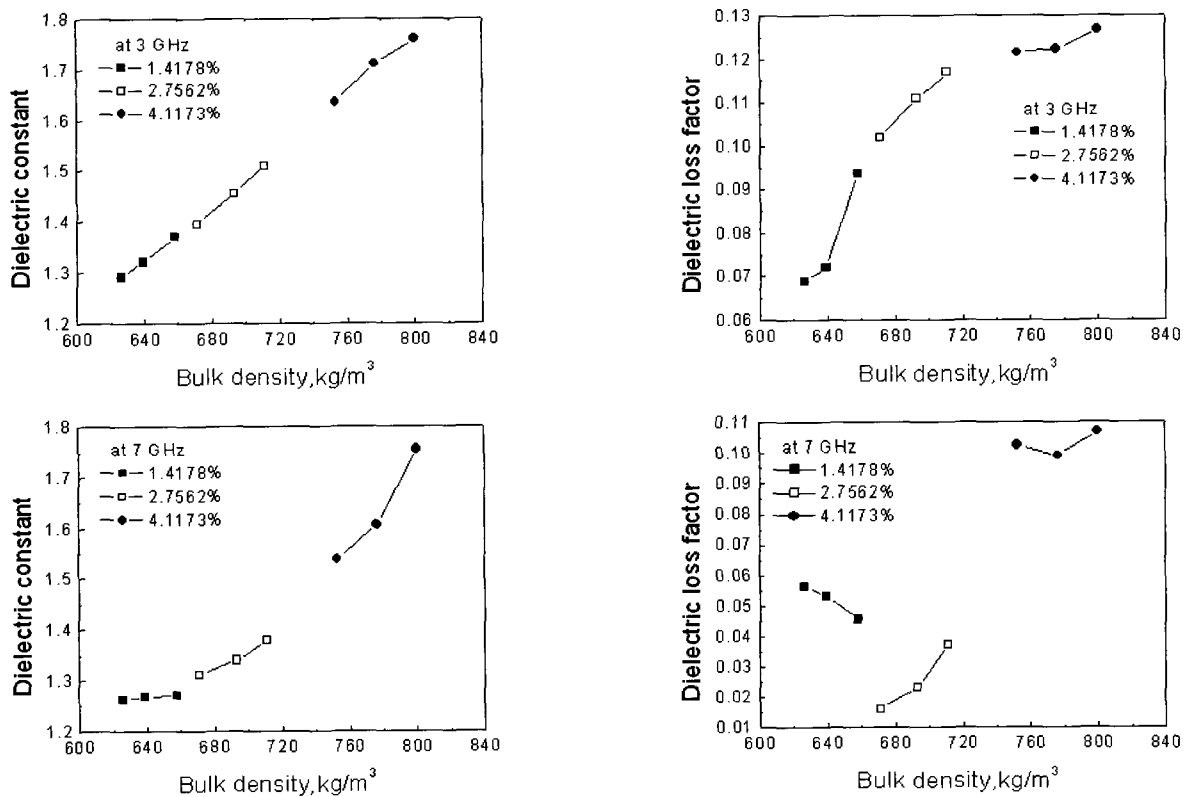


Fig. 7 Dielectric constant (left) and loss factor (right) vs. bulk density of coffee powder at several moisture contents and measuring frequencies. 3.0 GHz (top) 7.0 GHz (middle) and 10.0 GHz (bottom).

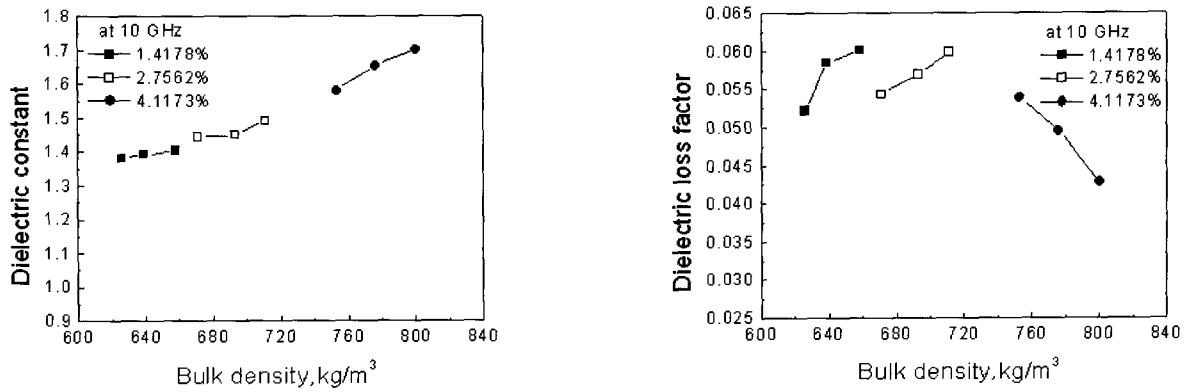


Fig. 7 Dielectric constant (left) and loss factor (right) vs. bulk density of coffee powder at several moisture contents and measuring frequencies. 3.0 GHz (top) 7.0 GHz (middle) and 10.0 GHz (bottom) (continued).

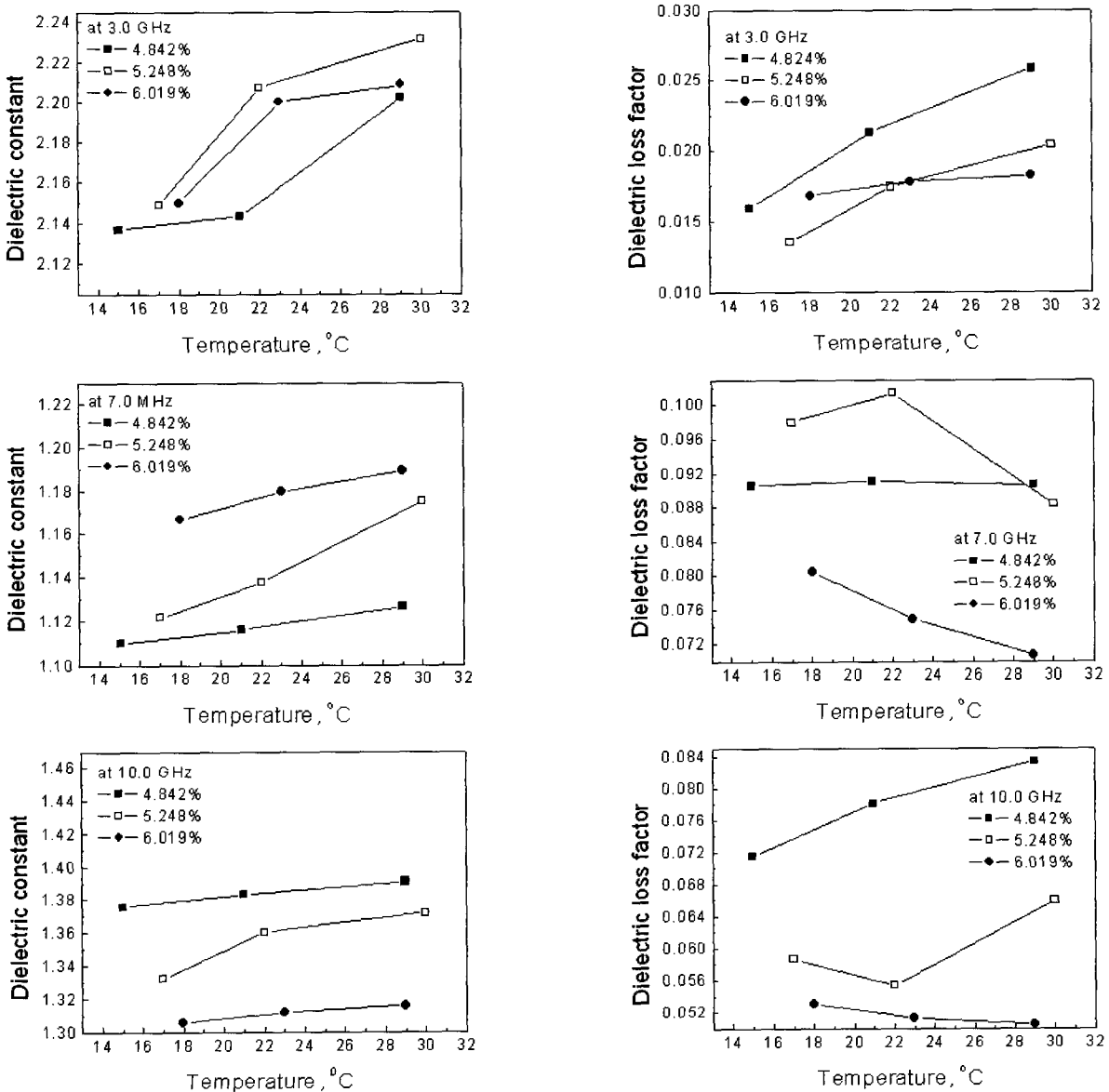


Fig. 8 Dielectric constant (left) and loss factor (right) vs. temperature of wheat flour at several moisture contents and measuring frequencies. 3.0 GHz (top) 7.0 GHz (middle) and 10.0 GHz (bottom).

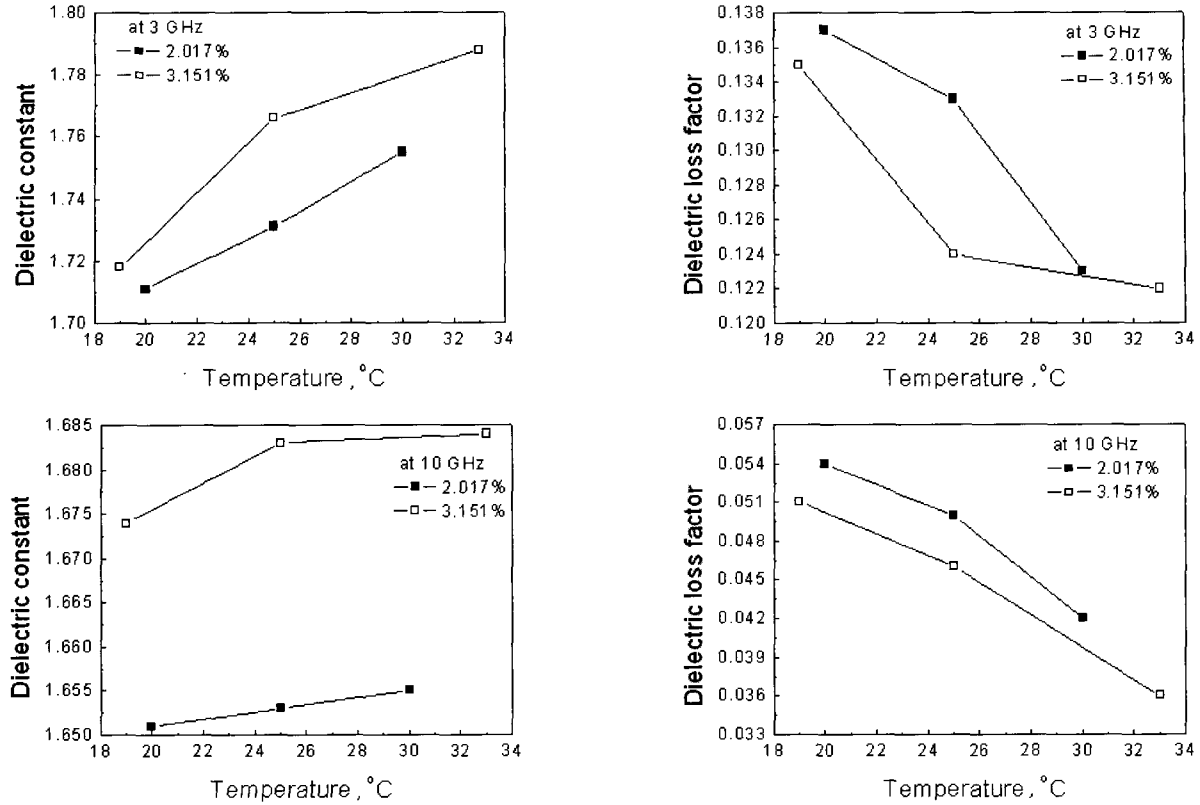


Fig. 9 Dielectric constant (left) and loss factor (right) vs. temperature of milk powder at several moisture contents and measuring frequencies. 3.0 GHz (top) and 10.0 GHz (bottom).

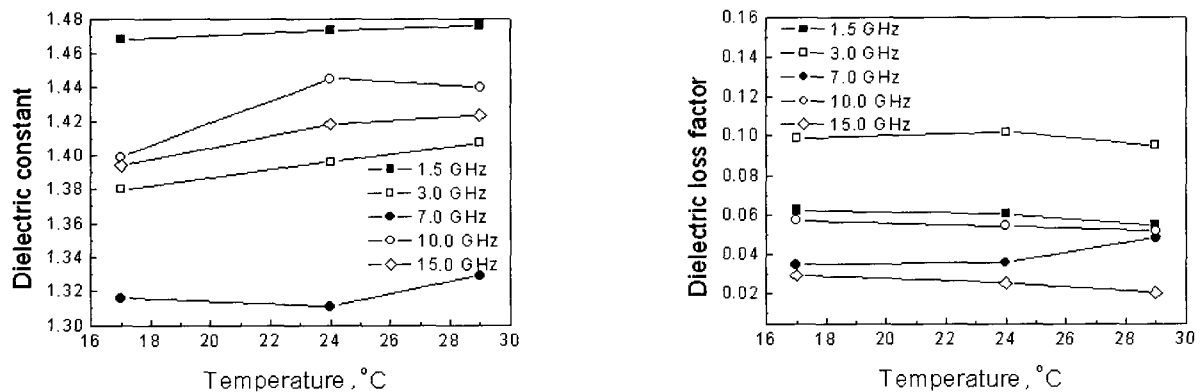


Fig. 10 Dielectric constant (left) and loss factor (right) vs. temperature of coffee powder at several frequencies. The moisture content of coffee powder is 2.756% w.b.

는 것으로 나타났다. 전체 측정주파수에서 온도에 따른 유전 상수의 변화가 나타났으나, 유전손실의 경우는 뚜렷한 경향을 나타내지 않았다. 따라서 산물밀도의 영향과 마찬가지로 분말 식품의 수분함량 측정장치의 개발에 있어서 이러한 시료의 온도변화를 반드시 보정할 수 있는 방법을 개발해야 할 것으로 판단된다.

라. 수분측정 주파수 분석

분말식품의 수분측정에 적절한 측정주파수를 분석하기 위하여 수분밀도를 종속변수, 마이크로파 감쇠와 위상변화를 각각 독립변수로 하는 3종류의 다항 회귀모형을 가정하여 회귀 분석을 실시하였으며 그 결과는 표 1에서 보는바와 같으며 a_0, a_1, a_2, a_3 는 회귀계수를 각각 나타낸다.

회귀 모형의 독립변수는 감쇠와 위상을 독립적으로 사용하였으며 이것은 추후 개발될 수분측정 시스템에서 감쇠나 위상변화의 한 가지 인자만을 이용하여 수분측정 시스템에 적용하기 위함이다. 이것은 일반적으로 수분에 민감한 변수들이 많

을수록 시스템의 정확성은 증가하지만 실제 장치 개발에 있어서는 회로의 구현과 비용적인 측면에서는 다소 불리할 것으로 생각된다.

표 1은 각 측정주파수에서의 회귀분석 결과 중 결정계수만을 비교하여 나타낸 결과로서 대체적으로 전체 측정주파수에서 결정계수는 0.9이상을 나타내었다. 따라서 본 연구에서 적용된 측정주파수 대역에서 대체적으로 정확한 수분 측정이 가능한 것으로 분석되었다. 특히 X-band인 10.0 GHz에서 대체적으로 결정계수가 높게 나타났는데 이러한 결과는 기존의 연구결과와 거의 일치하는 것으로 X-band에서는 수분에 따른 마이크로파 에너지의 흡수가 크게 일어나기 때문에 수분측정 주파수로 많이 사용된다. 한편, 본 연구에서 설정

한 주파수보다 높은 대역인 15.0 GHz에서의 결과도 매우 양호하게 나타났으며 수분 측정주파수로 활용 가능한 것으로 나타났다.

한편 L-band인 1.5 GHz 대역에서의 결과도 상당히 양호한 것으로 분석되었는데 수분측정 시스템 개발 측면에서 보면 주파수가 낮을수록 개발이 용이하므로 수분 측정 주파수로서 가능성이 매우 클 것으로 사료된다. 반면 전체시료에 대한 회귀분석 결과는 상당히 저조한 것으로 나타났는데 이것은 각 분말시료별로 별도의 회귀분석모델이 개발되어야 하는 것을 의미한다. 한편 15.0 GHz에서의 회귀분석 결과도 매우 양호하게 나타나 추후 마이크로파 수분측정 주파수에 활용이 가능할 것으로 분석되었다.

Table 1 Determination coefficients of the regression models for moisture density

Samples	Independent variable	Model	Determination coefficients				
			1.5 GHz	3.0 GHz	7.0 GHz	10.0 GHz	15.0 GHz
Wheat flour	Attenuation	$\rho_m = a_1 \Delta A + a_0$	0.981	0.961	0.901	0.982	0.940
		$\rho_m = a_2 \Delta A^2 + a_1 \Delta A + a_0$	0.981	0.963	0.964	0.990	0.957
		$\rho_m = a_3 \Delta A^3 + a_2 \Delta A^2 + a_1 \Delta A + a_0$	0.981	0.964	0.984	0.990	0.976
	Phase shift	$\rho_m = a_1 \Delta \psi + a_0$	0.960	0.963	0.964	0.951	0.862
		$\rho_m = a_2 \Delta \psi^2 + a_1 \Delta \psi + a_0$	0.960	0.963	0.967	0.960	0.939
		$\rho_m = a_3 \Delta \psi^3 + a_2 \Delta \psi^2 + a_1 \Delta \psi + a_0$	0.961	0.963	0.972	0.992	0.967
Milk powder	Attenuation	$\rho_m = a_1 \Delta A + a_0$	0.866	0.940	0.875	0.946	0.963
		$\rho_m = a_2 \Delta A^2 + a_1 \Delta A + a_0$	0.970	0.945	0.902	0.986	0.977
		$\rho_m = a_3 \Delta A^3 + a_2 \Delta A^2 + a_1 \Delta A + a_0$	0.980	0.965	0.946	0.992	0.984
	Phase shift	$\rho_m = a_1 \Delta \psi + a_0$	0.939	0.910	0.926	0.973	0.986
		$\rho_m = a_2 \Delta \psi^2 + a_1 \Delta \psi + a_0$	0.966	0.951	0.957	0.981	0.987
		$\rho_m = a_3 \Delta \psi^3 + a_2 \Delta \psi^2 + a_1 \Delta \psi + a_0$	0.968	0.952	0.957	0.981	0.987
Coffee powder	Attenuation	$\rho_m = a_1 \Delta A + a_0$	0.832	0.727	0.922	0.921	0.960
		$\rho_m = a_2 \Delta A^2 + a_1 \Delta A + a_0$	0.865	0.823	0.926	0.929	0.974
		$\rho_m = a_3 \Delta A^3 + a_2 \Delta A^2 + a_1 \Delta A + a_0$	0.865	0.832	0.926	0.931	0.976
	Phase shift	$\rho_m = a_1 \Delta \psi + a_0$	0.945	0.945	0.880	0.911	0.942
		$\rho_m = a_2 \Delta \psi^2 + a_1 \Delta \psi + a_0$	0.954	0.953	0.977	0.951	0.964
		$\rho_m = a_3 \Delta \psi^3 + a_2 \Delta \psi^2 + a_1 \Delta \psi + a_0$	0.954	0.954	0.974	0.951	0.993
All samples	Attenuation	$\rho_m = a_1 \Delta A + a_0$	0.785	0.431	0.378	0.673	0.939
		$\rho_m = a_2 \Delta A^2 + a_1 \Delta A + a_0$	0.879	0.475	0.761	0.858	0.962
		$\rho_m = a_3 \Delta A^3 + a_2 \Delta A^2 + a_1 \Delta A + a_0$	0.914	0.721	0.454	0.953	0.967
	Phase shift	$\rho_m = a_1 \Delta \psi + a_0$	0.892	0.833	0.663	0.187	0.001
		$\rho_m = a_2 \Delta \psi^2 + a_1 \Delta \psi + a_0$	0.902	0.833	0.206	0.194	0.065
		$\rho_m = a_3 \Delta \psi^3 + a_2 \Delta \psi^2 + a_1 \Delta \psi + a_0$	0.902	0.834	0.502	0.196	0.132

4. 요약 및 결론

본 연구는 마이크로파 기술을 이용한 분말식품의 온라인 수분함량 측정기술을 개발하기 위한 기초연구로서 수분측정장치를 구성하는 각종 마이크로파 회로-센서, 발전기, 서클레이터, 검파기 등의 설계에 기초가 되는 분말식품의 유전율을 측정하기 위하여 수행되었으며 동시에 분말식품에 대한 마이크로파 유전특성을 제시하고자 하였다. 마이크로파의 넓은 범위에서 유전율을 측정하기 위하여 광대역 혼 안테나와 마이크로파 자유공간 전송기법을 적용하였다. 분말식품은 밀가루, 분유, 분말커피를 선정하여 시료의 수분을 항온항습기에서 조절해가면서 마이크로파 측정 주파수 대역별로 유전특성을 측정하였다. 주요 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 분말식품의 유전상수는 대체적으로 수분함량 증가에 따라 증가하는 경향을 나타내었으며 주파수가 증가할수록 감소하는 경향을 나타내었다. 시료의 밀도가 일정한 범위에서 시료의 수분함량에 따른 유전상수는 대체적으로 증가하는 경향을 나타냈으며 유전손실의 경우는 뚜렷한 경향이 나타나지 않았다.
2. 동일한 수분함량에서 시료의 산물밀도와 온도가 증가함에 따라 유전상수가 증가함을 나타내었으며 마이크로파를 이용하여 수분함량 측정장치를 개발하기 위해서는 산물밀도와 온도의 영향을 보정해 줄 수 있는 방법을 개발해야 될 것으로 판단되었다.
3. 수분측정에 적합한 주파수를 분석하기 위하여 다항 회귀모형을 이용하여 마이크로파 감쇠와 위상변화를 독립변수, 수분밀도를 종속변수로 하여 회귀분석을 실시한 결과

X-band 주파수인 10.0 GHz가 적합할 것으로 나타났다. 또한 L-band인 1.5 GHz의 주파수에서도 높은 결정계수를 나타내어 추후 X-band의 주파수와 함께 적절히 이용할 경우 정확도가 높은 수분측정이 가능할 것으로 판단되었다.

참고 문헌

1. Kim, K. B., J. H. Kim, S. S. Lee and S. H. Noh. 2002. Measurement of grain content using microwave attenuation at 10.5 GHz and moisture density. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 51(1):72-77.
2. Kim, K. B., J. H. Kim, C. J. Lee, S. H. Noh and M. S. Kim. 2006. Simple instrument for moisture measurement in grain by free-space microwave transmission. *Transactions of the ASABE* 49(4):1089-1093.
3. Kraszewski, A. W., S. O. Nelson and T. S. You. 1990. Use of a Microwave cavity for sensing properties of arbitrarily shaped biological objects. *IEEE Transaction on Microwave Theory Techniques* 38:77-78.
4. Nelson, S. O. and A. W. Kraszewski. 1990. Grain moisture content determination by microwave measurements. *Transactions of the ASAE* 33(4):1303-1306.
5. Nelson, S. O., A. W. Kraszewski, S. Trabelsi and K. C. Lawrence. 2000. Using cereal grain permittivity for sensing moisture content. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 49:470-475.
6. Trabelsi, S. A., W. Kraszewski and S. O. Nelson. 2001. Microwave dielectric sensing of bulk density of granular materials. *Meas. Sci. Technol.* 12:2192-2197.
7. Wu, M., X. Yao, J. Zhai and L. Zhang. 2001. Determination of microwave complex permittivity of particulate materials. *Meas. Sci. Technol.* 12:1932-1937.