

분말식품 비접촉 수분측정을 위한 마이크로파 패치 어레이 안테나 개발

Development of microwave patch array antenna for noncontact measurement of powdered food at microwave frequencies

김기복* 박성운** 김만수** 최만용*
정희원 정희원

K. B. Kim S. U. Park M. S. Kim M. Y. Choi

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 그 품질이 변화하게 된다. 특히 분말식품류의 경우 포장 재 내에서 분말식품의 수분함량이 균일하지 않으면 유통과정 중에 응결현상(caking)이 발생하여 제품의 품질을 저하시킬 뿐만 아니라 소비자의 제품에 대한 신뢰도를 저하시킴과 동시에 상품화에 큰 장애 요소가 된다. 또한 분말식품의 가공공정 중 건조 저장단계에서 적절한 수분함량의 조절 및 측정은 제품의 생산성 향상과 분말식품 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 계측 기술의 개발이 필수적이다. 현재 식품회사나 제약회사 등에서 공정 중 수분을 측정하기 위하여 적외선이나 근적외선 수분 측정기를 많이 사용하고 있는데 주로 오프라인에서 측정된다. 이들 방법을 온라인으로 적용할 경우 측정 원리상 분말 환경에 적합하지 않을 뿐만 아니라 설치비용도 비교적 고가이다. 마이크로파를 이용한 수분측정 연구는 곡물을 대상으로 한 경우가 많으며[1-6] 분말의 유전특성 측정에도 이용되고 있다[7,8].

지금까지의 연구를 살펴보면 대체적으로 수분측정 센서로서 혼 안테나가 많이 사용되고 있는데 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.

따라서 본 연구는 마이크로파를 이용한 분말식품의 온라인 수분함량 계측기술을 개발하기 위한 기초연구로서 온라인 수분측정에 적합한 마이크로파 안테나를 개발하기 위하여 수행되었다.

2. 안테나 설계를 위한 기초실험

2.1 분말식품의 마이크로파 특성측정

* 한국표준과학연구원 환경안전계측센터

** 충남대학교 생물산업기계학과

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

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. 자유공간상에서 유전체에 마이크로파가 수직으로 입사할 때 자유공간과 유전체사이의 계면에서 파의 일부는 투과하고 일부는 반사하게 되는데 이들 관계로부터 마이크로파 감쇠와 위상은 유전율의 함수로서 다음과 같이 나타낼 수 있다[4].

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

$$\Delta \phi = 360 (\sqrt{\epsilon} - 1) \frac{d}{\lambda_0} \quad (3)$$

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

따라서 상기 식 (2)와 (3)을 이용하여 분말식품의 수분함량에 따른 유전특성의 변화를 감쇠와 위상변화로 나타낼 수 있다. Fig. 1은 감쇠와 위상변화를 측정하기 위한 마이크로파 측정시스템을 나타낸다. 마이크로파 측정 주파수는 1~15GHz의 범위로 하였다. 측정 시스템은 50MHz~20GHz의 회로망분석기(HP8720D, Hewlett Packard, 미국), 혼 안테나(HRN0118, TDK RF Solutions Inc., 미국), 샘플홀더로 구성하였다. 혼 안테나의 이득은 5.3~11.1dBi이며 혼 안테나의 양 끝단은 network analyzer와의 임피던스 부정합을 최소화하기 위하여 N-type 50Ω test cable와 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 전파의 투과거리가 되는 샘플홀더의 너비는 측정주파수 범위인 1~12GHz를 고려하면 파장 범위가 200~25 mm이므로 최소한 한 파장의 1/4 배 정도를 고려하여 100 mm로 하였으며 따라서 샘플홀더의 내부크기는 34×24×10 (8160cm³)로 제작하였다. 샘플홀더를 투과하는 마이크로파의 전파특성은 먼저 샘플홀더에 시료가 없을 때 감쇠량과 위상변이를 측정한다. 다음, 샘플홀더에 시료를 충전하여 얻어지는 감쇠량과 위상변이를 측정하여 각각의 차이를 이용하여 분석하였다. 이때, S₂₁-parameter를 측정하기 위하여 network analyzer를 CW(continuous wave) transmission mode로 설정하였으며 측정된 S₂₁을 이용하여 마이크로파의 감쇠와 위상을 각각 구할 수 있다.

2.2 마이크로파 특성 측정결과

그림 1은 분유의 수분함량에 따른 마이크로파 감쇠와 위상변화를 나타낸다. 전체 측정 주파수범위에서 대체적으로 수분함량이 증가함에 따라 감쇠와 위상변화가 증가하는 것으로 나타났다. 또한 수분 측정 주파수로는 X-band 주파수인 10.0 GHz 대역의 주파수가 적당할 것으로 나타났다.

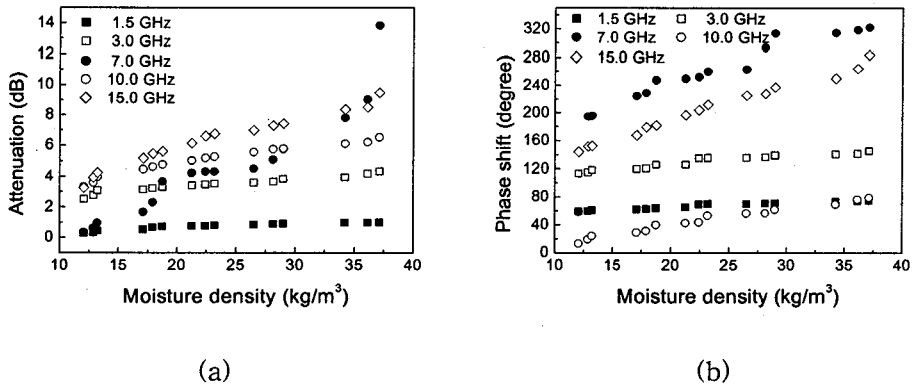


Fig. 1. Moisture density dependence of (a) attenuation and (b) phase shift for milk powder at indicating frequencies

3. 안테나 설계

본 연구에서 개발하고자 하는 마이크로파 안테나는 마이크로파의 자유공간 전송을 이용한 수분측정 장치로서 구조가 간단하고 가벼운 마이크로스트립 어레이 안테나를 고려하였다. 수분측정용 센서로서의 안테나는 측정주파수를 고려할 경우 안테나의 크기가 작아지게 되므로 많은 양의 시료를 측정하기 위해서는 높은 지향성과 이득을 가지는 안테나가 필요하므로 단일 소자 형태의 안테나로는 크기 면에서 불리하다. 따라서 이를 만족시키기 위해서는 여러 개의 단일 안테나를 두어 각각의 안테나에서 방사된 것을 합하여 높은 이득을 얻을 수 있는 어레이 안테나를 고려하여 보다 넓은 면적의 시료에 마이크로파가 투과할 수 있도록 하였다. 본 연구에서 제작하고자 하는 마이크로스트립 패치 안테나는 마이크로스트립 라인으로 만들어진 안테나로 안테나의 전파모드는 마이크로스트립의 전자장 분포로부터 얻어진다. 마이크로스트립 패치 안테나는 크게 안테나 아래 부분의 접지 반사판(ground plane)과 가운데 유전체 기판(dielectric substrate), 윗부분의 복사소자로 사용되는 도체의 세 부분으로 구성된다. 이러한 마이크로스트립 패치 안테나는 크게 유전체 기판과 복사소자, 즉 패치의 형태에 따라 직사각형, 원형, 타원형, 링형 등의 다양한 형태가 있으며 전파의 복사 모양은 안테나의 위치에 수직한 모양, 즉 Broadside 형태를 갖게 된다. 마이크로스트립 안테나는 집적도가 뛰어나며 비교적 저가로 구현할 수 있을 뿐만 아니라 무게가 가볍고 안테나의 크기가 매우 소형이라는 장점이 있는 반면 동작 대역폭이 좁고 전력제어가 힘들며 편파특성이 용이하지 못하고 지향성이 비교적 나쁜 broad 패턴을 갖기 때문에 이득이 다소 좋지 못하다는 단점이 있지만 성능보다는 경제성 및 회로와 동일한 기판 위에 집적화할 수 있다는 장점이 있다.

마이크로스트립 어레이 안테나는 적용 시스템에 따라 어떻게 어레이를 구성하느냐는 매우 중요한 문제이다. 병렬피드, 직렬피드, 단층구조, 다층구조 또는 유전체의 두께와 유전율 값 또는 단일 안테나의 모양이나 어레이 사이의 간격 등 여러 가지를 고려해야 한다. 이런 요소에 관계되는 인자로서는 안테나의 이득, 대역폭, 삽입손실, 빔각, 부엽 레벨, 편파 등을 들 수 있다.

본 연구에서는 어레이의 피드 방법으로서 직렬피드의 단점 중의 하나인 대역폭이 좁은 특성을 해결

하기 위한 방법으로 병렬피드 방법을 고려하였다. 마이크로스트립 어레이 간격은 수분측정용 송수신 목적으로 설계되기 때문에 최대의 지향성을 갖도록 설계하였다. 전체적인 구조는 2×2 어레이 형태로서 중심주파수는 10.5GHz에서 안테나의 크기를 작게하고 필요없는 기생방사 성분을 제거하기 위하여 유전율 2.6, 높이 0.54 mm, 동판의 두께가 0.018 mm인 테프론 기판을 사용하여 Table 1에서 보는바와 같은 사양을 가지도록 설계하였다.

Table 1. Design specifications of the micro-strip patch antenna

Item	Specifications
frequency	10.5 GHz
reflection coefficient	<-22 dB
gain	> 10 dBi
VSWR	1.2 : 1

마이크로스트립 패치 안테나 급전하는 방식으로는 첫째, 급전 선로를 방사 패치에 직접 연결하는 방법으로, 동일한 기판 위에서 특성 임피던스를 갖는 스트립선로를 방사소자에 연결하는 방법이다. 그러나 이 방법은 정확한 입력 임피던스 정합을 하기가 어려우며 방사소자와 급전선로가 동일한 유전체 위에 구성되기 때문에 동시에 효율적인 방사와 손실 없는 에너지 전달 조건 면에서 취약한 부분이 있다. 급전선로에 의한 기생방사는 안테나의 방사특성을 저하시키며 높은 Q값은 안테나의 대역폭 특성을 나쁘게 만든다. 또한 높은 유전율을 갖는 기판에서 요구되는 큰 입력임피던스 변화는 깊은 삽입(Inset)이 필요하며, 이것은 교차편파와 방사패턴 형태에 영향을 미친다.

동축선로를 사용해 급전하는 방법은 동축선로의 내부 도체(+)를 방사소자와 직접 연결하고 외부 도체(-)를 접지면에 연결하여 급전하는 방법이다. 이 방법은 안테나 제작 공정이 어려운 반면 정확한 50 Ω 급전이 가능하며 동축선로 상의 반사손실을 줄일 수 있다 [6]. 그러나 이 방법은 급전의 위치에 따라 입력 임피던스를 조절할 수 있지만 임피던스 정합회로와 같은 마이크로스트립 회로를 구성하기가 어렵다. 또한 유전체의 두께가 파장의 0.1배 이상으로 두꺼워지면 그 길이에 의한 인덕턴스 성분이 생겨, 패치 자체 공진 주파수에 영향을 주게 되며 프로브 방사는 교차편파의 원인이 될 수도 있다.

본 연구에서 설계·제작된 마이크로스트립 패치 안테나는 프로브 급전방식 안테나로서 안테나의 종단이 개방되어 있는 단일 패치를 먼저 설계하였다. 먼저 안테나 해석 프로그램인 Ensemble ver. 4.02 소프트웨어를 이용하여 10.5 GHz 마이크로파 신호와 안테나의 임피던스가 일치되는 길이와 폭을 시뮬레이션한 결과 안테나의 길이와 폭이 각각 8.42 mm와 14.5 mm일 때 가장 적합한 것으로 나타났다. 따라서 이러한 계산결과를 토대로 하여 단일 패치 안테나를 병렬로 결합하기 위한 T형 전력분배기를 설계하였다. 이때 50Ω의 임피던스를 갖는 스트립 라인 2개가 서로 병렬로 연결되므로 연결지점은 25Ω이 되고 1/4 임피던스 변환기를 이용하여 50Ω의 임피던스로 정합하도록 하였으며 1개의 입력단과 2개의 출력단이 만나는 점에서 발생하는 서셉턴스를 보상하기 위하여 45°의 notch를 가지도록 하였다. 전체적인 어레이 안테나의 설계도는 Fig. 2에서 보는바와 같다.

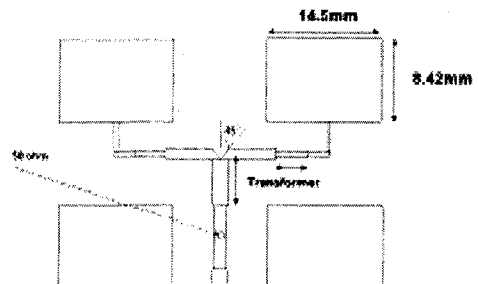


Fig. 2. Design of 2×2 patch array antenna

4. 안테나 제작 및 특성측정 결과

어레이 안테나를 시뮬레이션한 결과를 바탕으로 2x2 마이크로스트립 패치 안테나를 제작하였다. 안테나의 기판은 회로를 작게 구성하고 불필요한 기생 방사성분을 제거하기 위하여 유전율 2.6, 높이 0.54 mm, 동판의 두께가 0.018mm인 테프론 기판을 사용하였으며 안테나의 총 크기는 41.16 x 23.83 mm로 제작하였다. 제작된 어레이 안테나는 Fig. 3에서 보는 바와 같다. 실제 제작된 안테나의 임피던스정합 정도를 평가하기 위하여 회로망분석기(HP 8720D)를 사용하여 임피던스를 측정하였다. 안테나와 회로망분석기 사이에 50 Ω 전송선로를 연결하여 안테나의 입력반사손실 S_{11} 을 측정하였다. 입력반사계수는 중심주파수에서 -29 dB, 정재파비는 1.07, 안테나 이득은 11.3으로 각각 측정되어 Table 1의 설계기준을 만족하였다.

한편, 어레이 안테나의 방사패턴을 측정하기 위하여 Fig. 4와 같은 안테나 방사패턴 측정시스템을 사용하였다. 측정방법은 상대 비교법으로서 먼저 기준 혼 안테나를 수신과 송신 양쪽에 연결하여 수신 레벨을 측정한다. 그리고 제작한 안테나가 수신용일 때는 수신측에, 송신용일 때는 송신측에 혼 안테나 대신 연결하여 신호레벨을 측정하여 혼 안테나의 이득과 비교하여 측정된 안테나의 이득을 계산한다.

Fig. 5 및 6은 개발된 2x2 어레이 안테나의 H-plane과 E-plane 방사 패턴을 측정된 결과로서 11.30 dBi의 안테나 이득과, 50°의 half power beam-width를 나타내어 10.5 GHz에서 마이크로파 송수신 안테나로 충분히 사용 가능할 것으로 분석되었다.

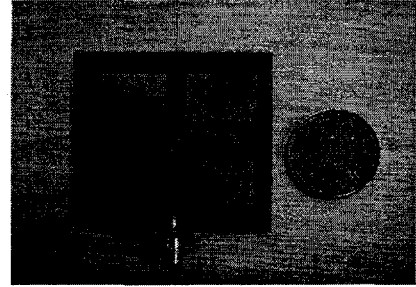


Fig. 3. The developed 2x2 patch antenna

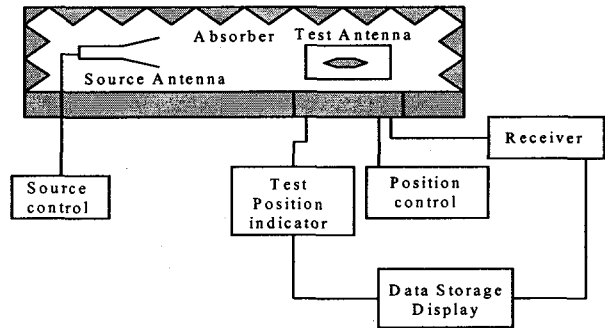


Fig. 4. Block diagram of the antenna beam pattern measurement system

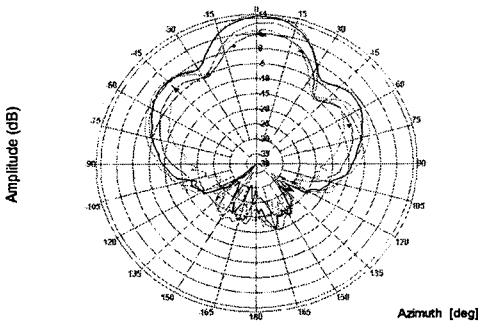


Fig. 5. Measured beam pattern of the developed 2x2 patch array antenna at H-plane.

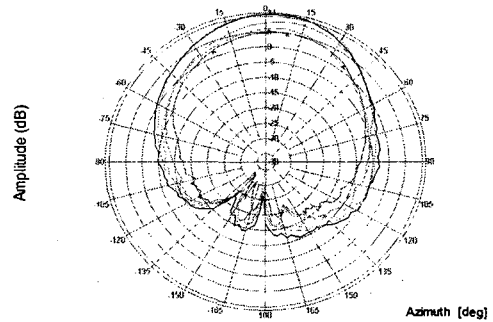


Fig. 6. Measured beam pattern of the developed 2x2 patch array antenna at E-plane.

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 투과법을 이용한 마이크로파를 이용한 분말식품의 수분함량 측정용 안테나를 개발하기 위하여 수행되었다. 이를 위하여 분유를 대상으로 마이크로파 투과실험을 수행하여 수분에 따른 마이크로파 감쇠와 위상변화를 측정하였으며 수분측정 주파수로는 X band 인 10 GHz 주파수 대역을 선정하였다. 분말식품의 수분측정 장치의 센서부분인 송수신용 안테나를 마이크로스트립 2×2 패치 어레이 안테나로 설계 및 제작하였다. 패치 안테나는 유전율이 2.6, 기판의 높이 0.54 mm, 동판의 두께 0.018 mm인 테프론 기판을 이용하여 전체 크기가 42×24 mm로 설계, 제작되었으며 어레이를 형성하기 위해서 전력 분배기를 설계하여 각각 동위상으로 연결하였다. 2×2 어레이 안테나 제작을 위해 먼저 전력분배기 및 단일 패치 안테나를 각각 설계하여 최적화하였으며 이러한 설계 결과를 기초로 하여 최종적으로 4개의 단일 패치와 두 개의 전력 분배기로 구성된 2×2 어레이 안테나를 제작하였다. 제작된 2x2 어레이 안테나의 특성을 측정한 결과 안테나의 입력반사손실은 -29dB, 정재파비는 1.07로 측정되었으며 측정 결과는 시뮬레이션 결과보다 조금 더 우수한 특성을 나타내었다. 안테나의 방사 패턴 측정의 경우, 10.5GHz에서 11.3dBi의 안테나 이득과 안테나의 방사각은 E와 H의 Far-field 패턴을 측정하였을 때 약 50°의 Half power Beam-width를 나타내어 분말식품의 수분함량 측정을 위한 10.5 GHz의 마이크로파 신호를 충분히 송수신 할 수 있는 것으로 나타났다.

참고문헌

1. 김기복. 2004. 마이크로파 기술을 이용한 분말식품 온라인 수분함량 측정시스템 개발, 한국표준과학연구원, 농림기술관리센터 1년차 연구보고서
2. Noh. S. H. and S. O. Nelson. 1989. Dielectric properties of rice at frequencies from 50 Hz to 12 GHz, Trans. ASAE, 32(3): 991-998
3. A. W. Kraszewski, S. O. Nelson, and T. S. You. 1990. Use of a Microwave cavity for sensing properties of arbitrarily shaped biological objects, IEEE Trans. MTT, 38(77): 77-87
4. S. O. Nelson, A. W. Kraszewski, S. Trabelsi, and K. C. Lawrence. 2000. Using cereal grain permittivity for sensing moisture content, IEEE Transactions on I&M, 49: 470-475
5. K. B. Kim. 1997. RF and Microwave dielectric properties of grain and development of capacitance type on-line moisture meter, Ph.D. Dissert. Seoul National University, Seoul, Korea
6. 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
7. K. B. Kim. 2002. Measurement of dielectric properties of grain using microwave nondestructive measurement technique, J. KSNT, 22(4): 369-376
8. S. Trabelsi, A. W. Kraszewski, and S. O. Nelson. 2001. Microwave dielectric sensing of bulk density of granular materials. Meas. Sci. Technol. 12: 2192-2197
9. M. Wu, X. Yao, J. Zhai and L. Zhang. 2001. Determination of microwave complex permittivity of particulate materials, Meas. Sci. Technol, 12: 1932-1937