

# 10.5GHz대 마이크로스트립 패치 안테나를 이용한 곡류의 함수율 측정장치 개발에 관한 연구

## A Study on Development of Grain Moisture Meter using Microstrip Patch Antenna at 10.5GHz

김기복\* 김중현\*\* 노상하\*\*\*  
K.B.Kim J.H.Kim S.H.Noh

### 1. 서론

대부분의 물질에 함유된 수분은 물질의 중요한 구성성분중의 하나이며 특히 농산물이나 식품 등에 함유된 수분은 각 품질을 평가하기 위한 중요한 인자중의 하나이다. 각종 농산물 및 식품가공과정 뿐만 아니라 저장단계에서 원료의 수분함량을 신속·정확하게 측정할 수 있는 시스템의 개발이 요구되고 있다. 이러한 원료의 수분함량을 간접적으로 측정하는 방법으로서 주로 전기저항, 고주파 정전용량, 근적외선, 마이크로파 등이 이용되고 있다.

마이크로파를 이용한 물질 내 수분측정 연구는 주로 X밴드 주파수대역(8~12GHz)에서 도파관이나 공동 공진기 방법을 이용하여 시료의 함수율에 따른 유전율을 측정하여 왔으나 이러한 방법은 시료의 전자기파 특성을 구명하는 연구로서 실제의 온라인 함수율 측정장치를 개발하는 측면에서는 다소 부적합할 것으로 생각된다. 이에 따라 마이크로파 송수신 혼 안테나를 이용하여 함수율을 측정하는 방법이 제안되었는데(Kraszweski et al, 1991, Kim et al, 1997) 이 방법은 시료의 함수율에 따라 투과되는 마이크로파 에너지의 흡수에 의해서 발생하는 손실을 이용하여 비교적 넓은 범위의 시료 함수율을 비접촉식으로 신속하게 측정할 수 있다(김기복 등, 1999). 지금까지의 연구들은 대부분 시료의 함수율에 따른 마이크로파 유전특성을 이용한 함수율 측정연구가 주로 이루어져 왔으며 정확도가 높은 함수율 측정이 가능한 것으로 보고되고 있으나 실제의 마이크로파를 이용한 함수율 측정장치의 설계·제작보다는 기존의 정밀한 측정장비를 이용한 연구가 대부분이다. 한편 김기복 등(1999)은 10.5GHz 마이크로파 송수신 장치와 혼 안테나를 이용한 곡류 함수율 측정장치를 개발하여 평가한 결과 구조가 비교적 간단하며 함수율 측정인자로서 수분밀도를 이용할 경우 정확도가 높은 함수율의 측정이 가능하다고 보고하였다.

수분측정용 센서로 사용된 마이크로파 송수신 안테나는 대부분 X-밴드에서 일정한 이득을 가지는 혼 안테나를 이용하였는데 실제 함수율 측정장치 구성 면에서 무게와 부피가 크기 때문에 온라인 센서로 사용하기 위해서는 다소 불편할 것으로 생각된다. 따라서 본 연구는 마이크로파 함수율 측정장치의 수분측정 센서로 사용하기 위하여 구조가 간단하고 가벼운 마이크로스트립 패치 안테나를 설계·제작하여 함수율 측정 가능성을 검토하기 위하여 수행되었으며 최종적으로 개발된 패치 안테나를 이용하여 곡류의 함수율 측정 측도설정식을 개발하였다.

\* 서울대학교 농업생명과학대학 농업개발연구소

\*\* 광운대학교 공과대학 전파공학과

\*\*\* 서울대학교 농업생명과학대학 생물자원공학부

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 패치 안테나 설계·제작

설계·제작된 마이크로스트립 패치 안테나는 그림 1과 같이 안테나의 종단이 개방되어 있는 길이  $L$ 과 폭  $W$ 를 가지고 있는 전송선로로 나타낸다. 본 연구에서 함수율 측정 주파수로 10.5GHz가 사용되므로 먼저 안테나 해석 simulator인 Ensemble ver. 4.02 소프트웨어를 이용하여 10.5GHz 마이크로파 신호와 안테나의 임피던스가 일치되는 길이와 폭을 simulation한 결과 안테나의 길이  $L=8.42\text{mm}$ , 폭  $W=14.5\text{mm}$ 가 적합한 것으로 나타났다. 설계된

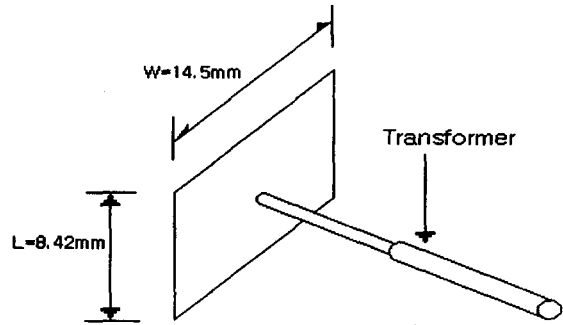


Fig. 1. Design of single microstrip patch antenna.

패치 안테나의 폭과 길이를 고려한 결과 실제의 함수율 측정 센서로 사용할 경우 안테나의 송수신 면적 즉, 시료에 전파되는 마이크로파의 투과 면적이 비교적 작기 때문에 보다 넓은 면적을 투과 할 수 있도록 단일 패치를 전력분배기를 이용하여  $2 \times 2$  안테나 배열로 구성하여 송수신 안테나를 재 설계하였으며 단일 패치에 대한 simulation 결과를 이용하여 그림 2에서 보는바와 같은 안테나 배열을 구성하였다. 이때 각 단일 패치 안테나의 연결은 T형 전력분배기를 이용하였으며 1개의 입력단과 2개의 출력단이 만나는 점에서 발생하는 서셉턴스를 보상하기 위하여  $45^\circ$ 의 notch를 가지도록 하였다 (Pozar, 1985).

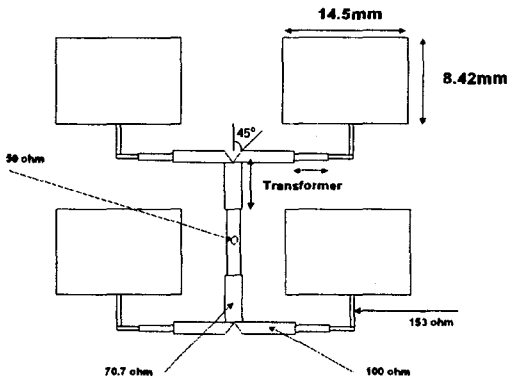


Fig. 2. Design of  $2 \times 2$  array patch antenna.

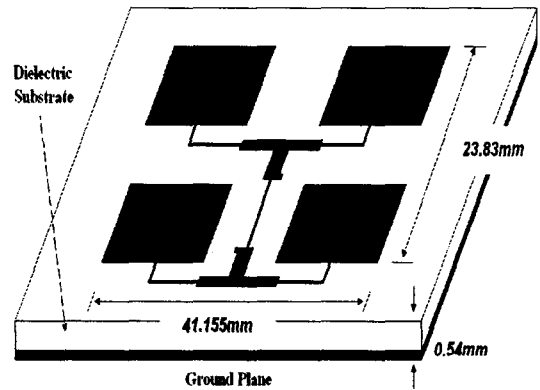


Fig. 3.  $2 \times 2$  array microstrip patch antenna.

### 2.2 $2 \times 2$ array 패치 안테나 제작

설계된 안테나의 simulation 결과를 이용하여  $2 \times 2$  array 안테나를 제작하였다. 안테나 기판은 회로를 작게 구성할 수 있으며 불필요한 안테나의 기생방사 성분을 제거할 수 있는 유전율이 2.6, 높이 0.54mm, 동판의 두께가 0.018mm인 테프론 기판을 사용하였으며 그림 3과 같이 안테나의 총 크기는  $41.16 \times 23.83\text{mm}$ 로 제작하였다.

### 2.3 함수율 측정 시스템

제작된 마이크로스트립 패치 안테나를 송수신 안테나로 하여 그림 4에서 보는바와 같은 함수율 측정 시스템을 구성하였다. 여기서 마이크로파 송수신부 및 검파기는 김기복 등(1999)에 의해 개발된 시스템을 그대로 이용하였다.

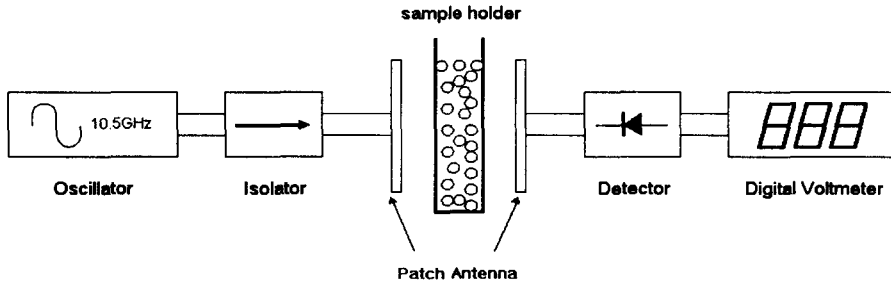


Fig. 4. Schematic diagram of prototype grain moisture meter.

### 2.3 공시재료

실험에 사용된 공시재료는 경기도 화성군에서 1998년도에 수확된 단립종인 화성벼를 사용하였으며 함수율은 14.17~26.44%w.b.의 범위에서 10수준을 하였으며 친립중에서 차지하는 까락의 비율은 1.74%였다. 시료의 표준함수율은 10g의 시료를 135℃의 공기오븐에서 24시간 건조하여 결정하였다.

### 2.4 실험방법

마이크로파 투과실험은 먼저 마이크로파 송수신 패치 안테나 사이에 시료가 채워진 샘플홀더를 위치시킨 다음 수신안테나에서 감쇠되는 신호를 검출하였다. 이때 샘플홀더 내에 채워지는 시료가 동일한 함수율에서 산물밀도에 따라 마이크로파의 감쇠가 다르게 나타나므로(김, 1997) 산물밀도의 영향을 구명하기 위하여 동일한 함수율에서 산물밀도를 4수준으로 변화시키면서 실험하였다. 또한 함수율 측정장치 개발에서 반드시 고려해야 할 시료의 온도특성을 분석하기 위하여 온도를 7~38℃ 범위에서 4수준씩 변화시키면서 실험을 수행하였으며 주위온도는 17℃로 고정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 패치 안테나 특성 분석

본 연구에서 설계·제작된 2×2 array 패치 안테나에 대하여 함수율 측정센서로서의 가능성을 검토하기 위하여 회로망 분석기(HP8510C)를 이용하여 기본적인 안테나의 특성 값들을 측정하였다. 먼저 안테나의 지향성을 나타내는 지수인 E-plane과 H-plane에서의 far field pattern을 분석한 결과 50°의 Half Beam-width를 나타내었으며 측정주파수 10.5GHz에서 이득은 11.35dBi, 입력반사손실은 -38dB, 대역폭은 350MHz를 나타내어 10.5GHz에서 마이크로파 송수신 안테나로 충분히 사용가능 할 것으로 분석되었다. 한편 함수율 측정에 적합한 패치 안테나의 송수신 거리를 결정하기 위하여 안테나 사이에

샘플홀더가 없는 상태에서 안테나 사이의 거리를 변화시켜 가면서 마이크로파 신호를 검출한 결과 그림 5에서 보는바와 같이 거리가 증가할수록 검출전압은 감소하였다. 따라서 샘플홀더의 폭이 4.25cm 이므로 안테나 사이의 거리는 5~6cm로 고정한 다음 샘플홀더를 송수신 안테나의 중간에 위치시켜 실험을 수행하였다.

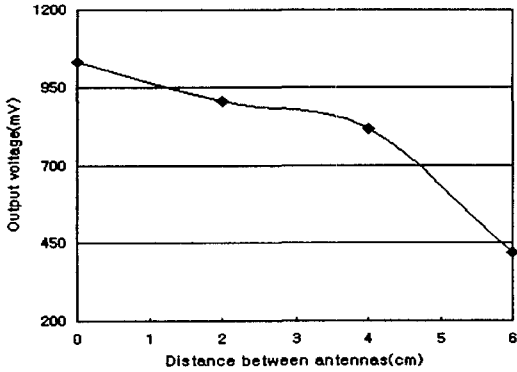


Fig 5. Variations in output voltage on distance between antennas without sample holder.

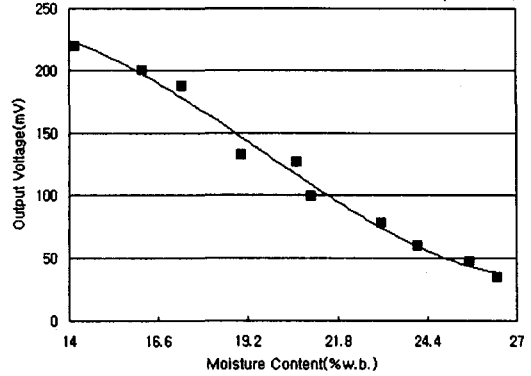


Fig. 6. Output voltage vs. moisture content of grain sample at room temperature, 17 °C.

### 3.2 함수율에 따른 검출전압 변화

시료의 산물밀도를 0.536~0.545g/cm<sup>3</sup>로 일정하게 유지한 다음 함수율에 따른 검출전압을 나타낸 결과 그림 6에서 보는 바와 같이 함수율이 증가함에 따라 검출전압은 거의 선형적으로 감소함을 나타내어 시료의 산물밀도 영향을 고정할 경우 정확도가 높은 함수율 측정이 가능할 것으로 판단된다.

### 3.3 시료 온도 및 산물밀도에 따른 검출전압 변화

동일한 함수율에서 시료의 온도를 7~38°C의 범위에서 4수준씩 변화시켜 가면서 검출전압을 분석한 결과 그림 7에서 보는바와 같이 온도가 증가함에 따라 검출전압이 감소함을 나타내었으며 마찬가지로 동일한 함수율에서 샘플홀더내 시료의 산물밀도를 4수준씩 변화시켰을 때 검출전압은 그림 8에서 보는바와 같이 산물밀도에 따라 감소하였다. 또한 그림 7 및 8에서 함수율이 증가함에 따라 출력전압은 거의 평행이동하며 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 정확한 함수율 측정을 위해서는 시료의 온도와 산물밀도의 영향을 반드시 보정해야 할 것으로 분석되었다.

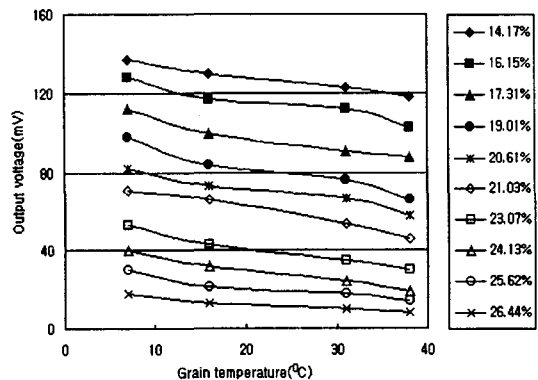


Fig. 7. Effect of grain sample temperature on output voltage at indicated moisture content levels (room temperature, 17°C).

### 3.4 함수율 측정 속도설정식 개발

본 연구에서 설계·제작된 2×2 array 마이크로 스트립 패치 안테나를 이용한 함수율 측정 모델을 개발하기 위하여 기존의 제안된 수분밀도(김기복, 노상하, 1997)를 이용하여 다음 식(1)과 같은 함수율 측정 모델을 가정한 다음 SAS ver 6.21을 이용하여 중회귀분석을 실시하였다.

$$\rho_m = a \times V + b \times T_g + c \quad (1)$$

여기서,  $\rho_m$  = 수분밀도

(= 함수율 × 산물밀도, g/cm<sup>3</sup>)

V = 마이크로파 출력전압(mV)

T<sub>g</sub> = 시료온도(°C)

a, b, c = 회귀계수

회귀분석결과 모델의 결정계수는 0.9794, RMS 오차는 0.00325로 나타났으며 개발된 회귀모델식을 이용하여 다음 식(2)와 같은 함수율 측정 속도설정식을 개발한 다음 함수율의 실측값과 예측값을 비교한 결과 그림 9에서 보는 바와 같이 상관계수와 표준오차가 각각 0.989 및 0.577%로 나타나 산물밀도의 영향을 보정함과 동시에 정확도가 높은 함수율 측정이 가능할 것으로 분석되었다.

$$MC(\%) = (-0.057V - 0.038T + 16.163) / \rho_b \quad (2)$$

여기서, MC(%) = 습량기준 함수율

$\rho_b$  = 산물밀도(g/cm<sup>3</sup>)

## 4. 요약 및 결론

본 연구는 마이크로파 10.5GHz 주파수를 이용한 곡류의 함수율 측정 센서로서 마이크로스트립 2x2 array 패치 안테나를 설계·제작하여 함수율 측정 가능성을 검토하기 위하여 수행되었다. 패치 안테나는 유전율이 2.6, 기판의 높이 0.54mm, 동판의 두께 0.0118mm인 테프론 기판을 이용하여 전체 크기가 42mm×24mm로 설계·제작되었으며 안테나 특성을 측정된 결과 안테나 이득은 10.5GHz에서 11.35dBi, 입력반사손실은 -38dB, 대역폭은 350MHz를 나타내었으며 안테나의 방사각은 E와 H-plane

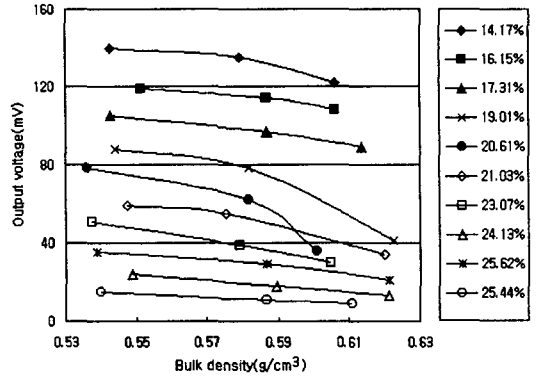


Fig. 8. Bulk density dependance of output voltage at indicated moisture content levels (room temperature, 17°C).

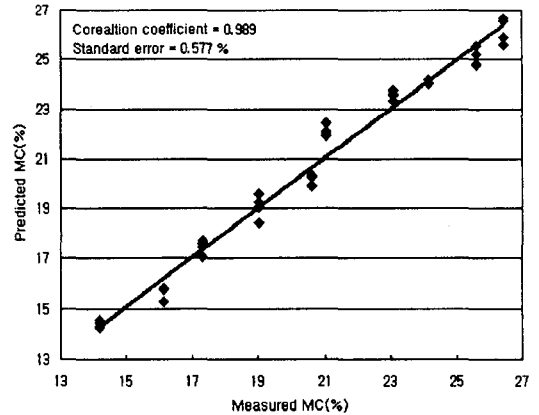


Fig. 9. Relationship between measured and predicted moisture content by equation(2).

의 Far-field pattern을 측정하였을 때 50° Half Beam-width를 나타내어 곡류 함수율 측정을 위한 10.5GHz의 마이크로파 신호를 충분히 송수신 할 수 있는 것으로 분석되었다. 설계·제작된 패치 안테나를 함수율 측정 센서로 하여 함수율 측정장치를 구성한 다음 함수율 범위 14~27%의 화성비에 대한 마이크로파 투과특성을 측정한 결과 함수율, 산물밀도, 시료온도가 증가함에 따라 시료를 투과하여 나오는 마이크로파 출력전압은 감소하는 것으로 나타났다. 시료의 온도와 마이크로파 출력전압을 독립 변수, 수분밀도를 종속변수로 하여 벼의 함수율을 측정할 수 있는 측도 설정식을 개발하여 함수율의 예측값과 실측값을 비교한 결과 상관계수 및 표준오차가 각각 0.989 및 0.577%로 나타나 시료의 산물 밀도의 영향을 보정함과 동시에 정확도가 높은 함수율 측정이 가능할 것으로 분석되었다.

## 5. 참고문헌

1. 김기복. 1997. 곡류의 고주파와 마이크로파 유전특성 및 정전용량식 온라인 함수율 측정장치 개발에 관한 연구. 서울대학교 공학박사 학위논문.
2. 김기복, 노상하. 1997. 고주파 정전용량식 온라인 곡류 함수율 측정장치 개발. 한국산업식품공학회지. Vol. 1(1) : 11~15.
3. 김기복, 김종현, 노상하. 1999. 마이크로파 자유공간 전송방법을 이용한 함수율 측정장치 개발에 관한 연구. 한국농업기계학회 동계학술대회 논문집. Vol.4(1) : 632-638.
4. 岡本 次雄, 편집부 譯. 1992. 아마츄어의 안테나 설계. 도서출판 세운.
5. Kim, J. H., K. B. Kim and S. H. Noh. 1997. New Density-Independent Model for Measurement of Grain Moisture Meter using Microwave Technique. Journal of Electrical Engineering and Information Science. Vol.2(4) : 72~78.
6. Kraszewski, A. W. and S. O. Nelson. 1991. Density-independent moisture determination in wheat by microwave measurement. Trans. of the ASAE, 34(4) : 1776-1783.
7. Miyai, Y. 1978. A new microwave moisture meter for grains. J. Microwave Power. Vol. 13 : 163-166.
8. Nelson, S. O. and A. W. Kraszewski. 1990. Grain moisture content determination by microwave measurements. Trans. of the ASAE, 33(4) : 1303-1306.
9. Okamura, S. 1981. High-moisture content measurement of grain by microwave. J. Microwave Power. 16(3&4) : 253-256.
10. Pozar, D, M. 1985. Microwave Engineering. Addison-Wesley.
11. Trinogga, L. A., G. Kaizhou and I. C. Hunter. 1991. Practical microstrip circuit design. Ellis Horwood Limited. 311-313.