

산물벼 함수율 측정을 위한 2×2 마이크로스트립 패치 안테나 개발†

A 2×2 Microstrip Patch Antenna Array for Moisture Content Measurement of Paddy Rice

김기복*
정희원

김종현**
J. H. Kim

노상하***
정희원
S. H. Noh

SUMMARY

To develop the grain moisture meter using microwave free space transmission technique, a 10.5GHz microwave signal with the power of 11mW generated by an oscillator with a dielectric resonator is transmitted to an isolator and radiated from a transmitting 2×2 microstrip patch array antenna into the sample holder filled with the 12 to 26%w.b. of Korean Hwasung paddy rice. The microwave signal, attenuated through the grain with moisture, is collected by a receiving 2×2 microstrip patch array antenna and detected using a Shottky diode with excellent high frequency characteristic. A pair of light and simple microstrip patch array antenna for measurement of grain moisture content is designed and implemented on a teflon substrate with relative dielectric constant of 2.6 and thickness of 0.54mm by using Ensemble ver. 4.02 software. The aperture of micorstrip patch arrays is 41mm width and 24mm high. The characteristics of microstrip patch antenna such as gain, return loss, and bandwidth are 11.35dBi, -38dB and 0.35GHz(<VSWR2), respectively are obtained at 10.5GHz. The half beamwidth is 50° at far-field pattern of E and H plane. The width of the sample holder is large enough to cover the signal between the antennas and grater than one wavelength for the wave propagation. The output voltages are decreased with the grain temperature and bulk density respectively. The calibration model for measurement of grain moisture content is proposed to reduce th effects of fluctuations in bulk density and temperature which give serious errors for the measurements. From the results of regression analysis using the statistical analysis method, the moisture content of grain samples(MC(%)) is expressed in terms of the output voltage(v), temperature(t), and bulk density of samples(ρ_b) as follows;

$$MC(\%) = (-3.9838 \times 10^{-8} \times v^3 + 8.023 \times 10^{-6} \times v^2 - 0.0011 \times v - 0.0004 \times t + 0.1706) \frac{1}{\rho_b} \times 100$$

Its determination coefficient, standard error of prediction(SEP) and bias were found to be 0.9855, 0.479%w.b. and -0.0369%w.b. respectively between measured and predicted moisture contents of the grain samples.

주요용어(Key Words) : 마이크로스트립 패치 안테나(Microstrip patch antenna), 수분밀도(Moisture density), 함수율(Moisture content), 산물벼(Paddy rice)

† 본 연구는 한국학술진흥재단에서 지원하는 '98~'99 학제간 연구지원 사업으로 수행되었음.

* 한국표준과학연구원 비파괴평가그룹

** 광운대학교 공과대학 전파공학과

*** 서울대학교 농업생명과학대학 생물자원공학부

1. 서 론

각종 농산물이나 식품 등에 함유된 수분은 각종 품질을 평가하기 위한 중요한 인자중의 하나로서 각종 농산물 및 식품가공공정 및 저장단계에서 원료의 수분 함량을 온라인으로 신속·정확하게 측정할 수 있는 시스템의 개발이 요구되고 있다. 이러한 원료의 수분 함량을 간접적으로 측정하는 방법으로서 주로 직류전도도, 고주파 저항 및 정전용량, 근적외선, 마이크로파 등이 이용되고 있다.

마이크로파를 이용한 수분 측정은 주로 정밀한 분석장비를 이용하여 시료의 함수율에 따른 전자기파 특성인 유전특성을 구명한 다음 함수율과의 관계를 구명하는 연구가 주로 이루어져 왔으며 (Okamura, 1981, Nelson et al, 1990, Kraszewski et al, 1991) 이러한 연구는 시료의 전자기파 특성을 구명하는 연구로서 실제의 온라인 함수율 측정장치를 개발하는 측면에서는 다소 부적합할 것으로 생각된다. 또한 현재 상용화되고 있는 마이크로파를 이용한 곡류 함수율 측정장치에 관련된 마이크로 발진장치 및 주파수, 신호처리회로, 함수율 측정용 센서 등에 대한 자료는 거의 공개되고 있지 않은 실정이다. 비교적 최근에 유동상태에 있는 시료의 함수율을 비접촉식으로 측정하기 위한 방법으로 자유공간 전송방법이 여러 연구자에 의해 제안되고 있다(Kraszewski et al, 1991, Kim et al, 1997, 김 등, 1999). 그러나 지금까지의 연구들을 살펴보면 대체적으로 함수율 측정용 센서로서 혼

안테나가 많이 이용되고 있는데 이러한 혼 안테나의 장점은 비교적 낮은 출력의 마이크로파 신호를 마이크로파의 누설을 최소화하면서 충분히 송수신할 수 있다는 점이다. 김 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. 그러나 실제의 함수율 측정장치 구성 면에서 보면 혼 안테나의 무게와 부피가 클 뿐만 아니라 여러 가지 다양한 시료의 유동형태 등에 따른 센서로서의 적응성이 다소 감소할 것으로 생각된다. 한편 Miyai(1978)는 10.5GHz의 주파수와 유전체 기판 위에 마이크로스트립 라인을 구성한 다음 곡물이 마이크로스트립 라인 위를 지나갈 때 곡물의 함수율에 따른 유전율의 변화로 인한 마이크로파의 감쇠량을 쇼트키 다이오드로 검출하여 직류 전압으로 나타내었는데 비교적 정확한 함수율의 측정이 가능하다고 하였으나 곡물의 산물밀도 또는 유량의 변화에 따른 마이크로파 감쇠량의 오차가 크게 나타났다고 보고하였다.

본 연구는 10.5GHz의 마이크로파 자유공간 전송을 이용한 곡류 함수율 측정장치의 수분 측정 센서로서 구조가 간단하고 가벼운 마이크로스트립 패치 안테나를 설계·제작하여 함수율 측정 가능성을 검토한 다음 시료의 산물밀도 영향을 보정하기 위한 인자로서 수분밀도를 이용한 산물비의 함수율 측정 측도설정식을 개발하기 위하여 수행되

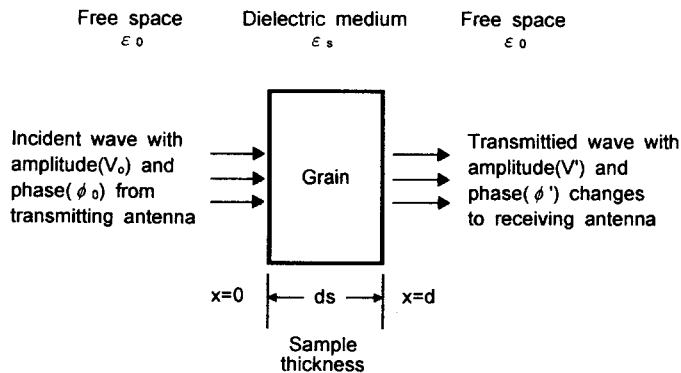


Fig. 1 Electromagnetic wave normally incident on the dielectric medium.

었다.

2. 안테나 및 자유공간 전송의 이론적 고찰

매질이 없는 자유공간에서 전자기파(wave)의 전파(propagation)는 송신 안테나에서 시간에 따라 정현적으로 발생하는 임의의 진폭과 위상을 가지는 전자기파가 방출될 때 송신 안테나 끝단에 전류가 흐르게 되고 이에 따라 송신안테나 주위에 자계가 발생하게 되며 전류가 증가하면 자계가 동시에 증가하여 Faraday의 전자 유도 법칙에 의하여 전계가 발생한다. 또한 안테나에 흐르는 전류가 감소하면 전계가 동시에 감소하게 되고 변위전류에 의한 자계가 다시 형성된다. 따라서 전류에 의한 자계의 변화는 전계의 변화를 유발하고 이러한 전계의 변화는 자계의 변화를 되풀이하면서 시간적으로 변화하는 전계와 자계가 점점 퍼져 나가게 되어 자유공간의 모든 방향으로 복사된다. 그러나 전파의 전송경로 즉, 자유공간상에 그림 1에서 보는 바와 같이 곡류와 같은 유전체가 놓여질 경우 유전체 내 극성물질인 물분자의 쌍극자 모멘트에 의한 회전 및 진동에 따라 전파의 일부가 반사되거나 투과하게 되어 전파의 감쇠 및 위상변이가 발생한다. 따라서 일정한 전압 진폭(V_0)과 위상(ψ_0)을 가지는 마이크로파가 매질을 투과하여 출력 전압 진폭과 위상이 V' 와 ψ' 로 변할 경우 감쇠량(A')과 위상변이($\Delta\psi$)는 다음과 같이 표현된다.

$$A' = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{V'}{V_0} \right) \dots\dots\dots (1)$$

$$\Delta\psi = \psi' - \psi_0 \dots\dots\dots (2)$$

여기서,

A' = 매질을 투과하여 나오는 마이크로파의 감쇠(dB)

V_0 = 매질에 입사되는 마이크로파의 첨두전압 (Volt)

V' = 매질을 투과하여 나오는 마이크로파의 첨두전압(Volt)

$\Delta\psi$ = 마이크로파의 위상변이(radian)

ψ' = 매질을 투과하여 나오는 마이크로파의

위상각(radian)

ψ_0 = 매질에 입사되는 마이크로파의 위상각 (radian)

이때 매질의 유전율은 다음과 같이 복소수로 표현된다.

$$\epsilon_s = \epsilon' - j\epsilon'' \dots\dots\dots (3)$$

여기서, ϵ_s = 복소유전율

ϵ' = 유전상수

ϵ'' = 유전손실

여러 연구자들에 의해 자유공간에서 마이크로파가 곡류와 같은 유전체에 입사될 때 유전상수와 유전손실은 다음과 같은 관계가 있음을 밝혔다 (Nelson et al, 1990, Kraszewski, 1991, 김, 1997, Kim et al, 1997).

$$\epsilon' = \left(1 + \frac{\Delta\psi \lambda_0}{360 d_s} \right)^2 \dots\dots\dots (4)$$

$$\epsilon'' = \frac{\Delta A \lambda_0 \sqrt{\epsilon'}}{8.686 \pi d_s} \dots\dots\dots (5)$$

여기서,

λ_0 = 자유공간에서의 파장(m)

d_s = 매질의 두께(m)

$\Delta\psi$ = 마이크로파의 위상변이(= $\psi' - \psi_0$, radian)

ΔA = 마이크로파의 감쇠량(= $A' - A_0$, dB)

A_0 = 마이크로파의 자유공간에서의 감쇠

상기 식 (5)에서 A_0 는 마이크로파의 자유공간에서의 감쇠이므로 일정한 값을 가지게 되며 따라서 매질을 투과하여 수신안테나에 의해 수신되는 마이크로파 감쇠량의 변화는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\Delta A = A' - A_0 = \frac{8.686 \pi}{\lambda_0} d_s \frac{\epsilon''}{\sqrt{\epsilon'}} \dots\dots(6)$$

따라서 상기 식(6)에서 입사되는 마이크로파의 파장과 매질의 두께가 일정할 경우 투과하여 나오는 마이크로파의 감쇠는 매질의 복소유전율에 의해 주로 결정되게 된다. 이에 따라 곡류를 포함한

농산물의 함수율이 변할 경우 유전특성이 달라지게 되므로(Nelson, 1990, 김, 1997) 식 (1)과 식 (6)을 이용하여 투과되는 마이크로파의 침투전압을 검출함으로써 전송선로 상에 놓여진 시료의 함수율을 측정할 수 있게 된다.

3. 재료 및 방법

가. 마이크로스트립 패치 안테나 설계 및 제작

마이크로스트립 패치 안테나는 크게 안테나 아래 부분의 접지 반사판(ground plane)과 가운데 유전체 기판(dielectric substrate), 윗 부분의 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 집적화 할 수 있다는 장점이 있다(Shimin, 1986). 마이크로스트립 패치 안테나의 급전 방식으로는 패치 소자와 같은 마이크로스트립 선로에 의한 급전방식, 접지면과 유전체 기판을 뚫고 동축케이블 형태의 프로브를 패치에 연결하는 프로브 급전방식, 두 개의 유전체 기판을 서로 포개어 놓은 형태의 근접 급전방식과 형태는 동일하지만 단지 두 개의 유전체 기판 사이에 슬롯을 갖는 접지면이 추가된 형태의 개구면(aperture) 결합 급전방식들이 있다(Balanis, 1982).

본 연구에서 설계·제작된 마이크로스트립 패치 안테나는 프로브 급전방식 안테나로서 그림 2에서 보는 바와 같이 안테나의 종단이 개방되어 있는 단일 패치를 먼저 설계하였다. 본 연구에서 함수율

측정 주파수로 10.5GHz의 주파수가 사용되므로 먼저 안테나 해석 simulator인 Ensemble ver. 4.02 소프트웨어를 이용하여 10.5GHz 마이크로파 신호와 안테나의 임피던스가 일치되는 길이와 폭을 시뮬레이션한 결과 안테나의 길이와 폭이 각각 8.42 mm와 14.5 mm 일 때 가장 적합한 것으로 나타났다. 설계된 단일 패치 안테나의 폭과 길이를 검토한 결과 실제의 함수율 측정 센서로 사용할 경우 안테나의 송수신 면적 즉, 시료에 전파되는 마이크로파의 투과 면적이 비교적 작기 때문에 보다 넓은 면적의 시료를 투과 할 수 있도록 단일 패치를 전력분배기를 이용하여 2×2 안테나 배열로 구성하여 송수신 안테나를 재 설계하여 그림 2와 3에서 보는 바와 같은 안테나 배열을 구성하였다.

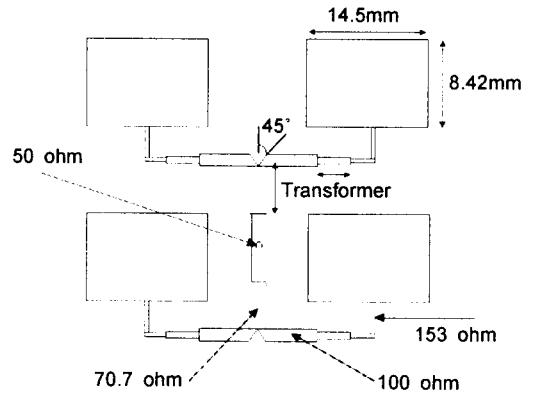


Fig. 2 Design of 2×2 array patch antenna.

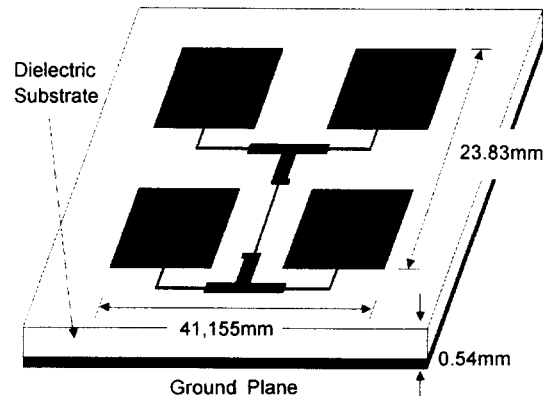


Fig. 3 2×2 array microstrip patch antenna.

이때 각 단일 패치 안테나의 연결은 T형 전력분배기를 이용하였으며 1개의 입력단과 2개의 출력단이 만나는 점에서 발생하는 서셉턴스를 보상하기 위하여 45°의 notch를 가지도록 하였다 (Trinogga, 1991).

설계된 안테나의 시뮬레이션 결과를 이용하여 2×2 array 안테나를 제작하였다. 안테나 기판은 회로를 작게 구성할 수 있으며 불필요한 안테나의 기생방사 성분을 제거하기 위하여 유전율이 2.6, 높이가 0.54mm, 동판의 두께가 0.018mm인 테프론 기판을 사용하였으며 그림 3에서 보는 바와 같이 안테나의 총 크기는 41.16×23.83mm로 제작하였다.

나. 함수율 측정 시스템

설계·제작된 마이크로스트립 패치 안테나를 송수신 안테나로 하여 그림 4에서 보는 바와 같은 함수율 측정 시스템을 구성하였으며 마이크로파 송수신부 및 검파기, 샘플홀더(4.25×11.96×15.52cm)는 김 등(1999)에 의해 개발된 시스템을 그대로 이용하였다. 여기서 마이크로파 발진기의 최대출력은 11mW이며, 침두전압은 1V로서 검파기는 곡물을 투과하여 나오는 마이크로파의 침두 전압을 검파하여 0~1 Volt의 직류 레벨로 출력함과 동시에 디지털 전압계로 표시된다.

다. 공시재료

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

라. 실험방법

마이크로파 투과실험은 먼저 마이크로파 송수신 패치 안테나 사이에 시료가 채워진 샘플홀더를 위치시킨 다음 수신안테나에서 감쇠되는 신호를 검출하였다. 이때 샘플홀더 내에 채워지는 시료가 각각의 함수율에서 산물밀도에 따라 마이크로파의 감쇠가 다르게 나타나므로(김, 1997, 김 등, 1999) 산물밀도의 영향을 구명하기 위하여 동일한 함수율에서 산물밀도를 3수준으로 변화시키면서 실험하였다(김 등, 1999). 실험에 사용된 샘플홀더의 폭은 10.5GHz의 마이크로파가 최소한 한 파장이 상 투과할 수 있도록 4.25cm로 하였다(김 등, 1999). 또한 함수율 측정장치 개발에서 반드시 고려해야 할 시료의 온도특성을 분석하기 위하여 주위온도를 대기중의 온도(17±0.5°C)로 한 다음 시료가 채워진 샘플홀더를 냉각 및 가열하여 시료의 온도 범위를 7±0.5°C, 16±0.5°C, 31±0.5°C, 38±0.5°C의 4수준씩 변화시키면서 실험을 수행하였다.

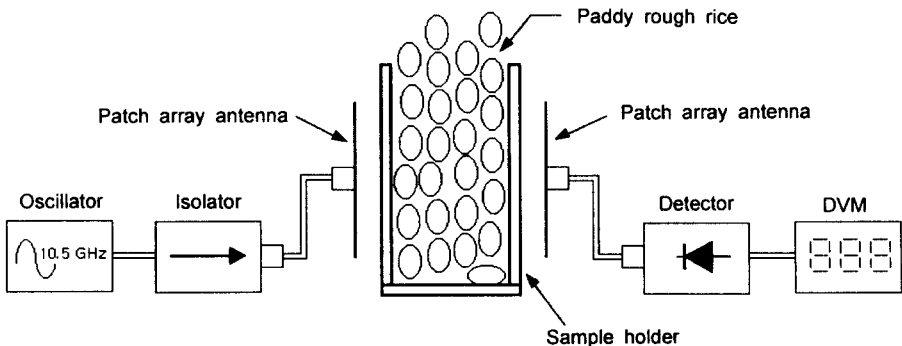


Fig. 4 Schematic diagram of the microwave transceiver and sample holder.

4. 결과 및 고찰

가. 패치 안테나 특성 분석

본 연구에서 설계·제작된 2×2 array 패치 안테나에 대하여 함수율 측정센서로서의 가능성을 검토하기 위하여 회로망 분석기(HP8510C, Hewlett Packard)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 0.35GHz를 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 보는 바와 같이 거리가 증가할수록 검출전압은 감소하였다. 따라서 샘플홀더의 폭이 4.25cm이므로 안테나 사이의 거리는 5~6cm로 고정한 다음 샘플홀더를 송수신 안테나의 중간에 위치시켜 실험을 수행하였다.

나. 함수율에 따른 검출전압 변화

시료의 산물밀도를 0.536~0.545g/cm²의 비슷한 범위로 유지한 다음 시료의 함수율에 따른 검출전압을 나타낸 결과 그림 6에서 보는 바와 같이 함수율이 증가함에 따라 검출전압은 거의 다항 함수적으로 감소함을 나타내었다. 여기서 함수율에 따른 검출전압은 샘플홀더의 두께(2mm)에 의한 감쇠의 영향을 포함하는 것으로서 식(4)와 (5)를 이용하여 단순히 시료의 정밀한 유전특성을 측정할 경우에는 이러한 샘플홀더의 두께에 따른 영향을 반드시 보정해야 하지만(김, 1997) 함수율 측정 장치 개발 측면에서 고려해 보면 함수율 측정에 사용하는 마이크로파 주파수가 일정하고 그에 따라 파장이 일정하기 때문에 전체 함수율 범위에서 이러한 샘플홀더의 두께에 따른 마이크로파 감쇠

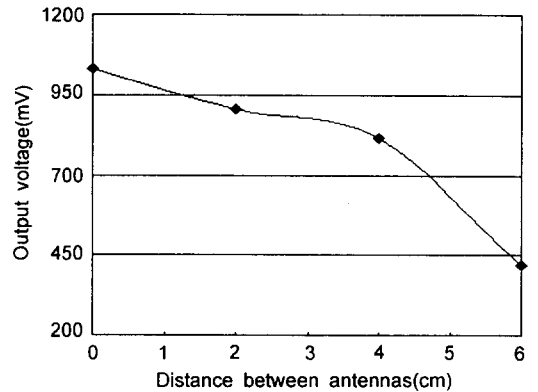


Fig. 5 Variations in output voltage on distance between antennas without sample holder.

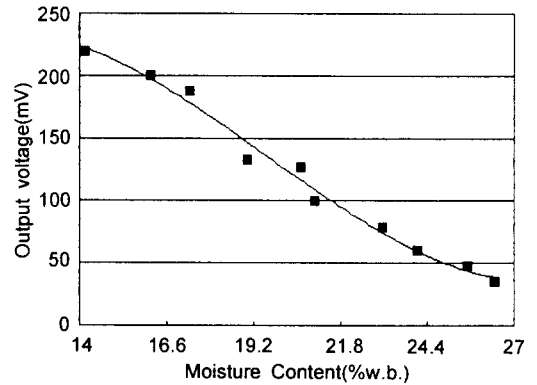


Fig. 6 Output voltage vs. moisture content of grain sample at room temperature, 17°C.

는 거의 일정할 것으로 생각된다. 따라서 시료의 산물밀도를 비슷한 수준으로 유지할 경우 개발된 패치 안테나를 이용하여 정확도가 높은 함수율의 측정이 가능할 것으로 판단된다.

다. 시료 온도 및 산물밀도에 따른 검출전압 변화

각각의 시료 함수율에서 시료의 온도를 7~38°C의 범위에서 4수준씩 변화시켜 가면서 검출전압을

분석한 결과 그림 7에서 보는 바와 같이 온도가 증가함에 따라 검출전압이 감소함을 알 수 있는데 이러한 경향은 김 등(1999)이 혼 안테나를 이용하여 분석한 결과와 거의 동일한 온도 경향을 나타내었다. 마찬가지로 동일한 함수율에서 샘플홀더 내 시료의 산물밀도를 임의로 3수준씩 변화시켰을 때 검출전압은 그림 8에서 보는 바와 같이 산물밀도의 증가에 따라 감소하였다. 또한 그림 7 및 8에서 함수율이 증가함에 따라 출력전압은 거의 평행이동하며 감소하는 것으로 나타났다. 특히, 산물밀도의 경우 그림 8에서 19.01%의 함수율일 때 산물밀도가 0.62g/cm³에서의 출력값이 함수율이 20.61% 보다 낮게 나타났는데 이것은 함수율 20.61%와 19.01%의 차이는 0.4% 정도로 작을 뿐만 아니라 산물밀도 차이는 0.2g/cm³으로서 함수율의 차이가 작을 경우 산물밀도의 영향에 따라서 출력전압이 큰 영향을 받는 것으로 생각된다. 따라서 정확한 함수율 측정을 위해서는 시료의 온도와 샘플홀더내 산물밀도의 영향을 반드시 보정해야 할 것으로 분석되었다.

라. 수분밀도에 따른 검출전압 변화

샘플홀더내 시료의 산물밀도 변화에 따른 마이

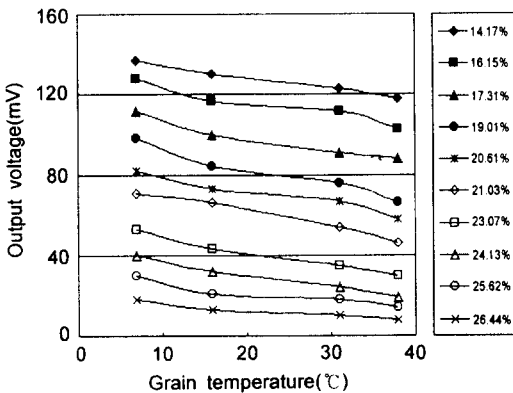


Fig. 7 Effect of grain sample temperature on the output voltage at indicated moisture content levels (room temperature, 17°C).

크로와 출력 전압의 변동을 보정하기 위하여 수분 밀도를 이용하였다. 수분밀도는 다음과 같이 함수율과 산물밀도의 곱으로 표현된다(김, 1997, 김 등, 1999).

$$\rho_m = MC(decimal) \times \rho_b \dots\dots\dots (7)$$

여기서, ρ_m = 수분밀도(g/cm³)

MC(decimal) = 시료의 함수율

ρ_b = 산물밀도(g/cm³)

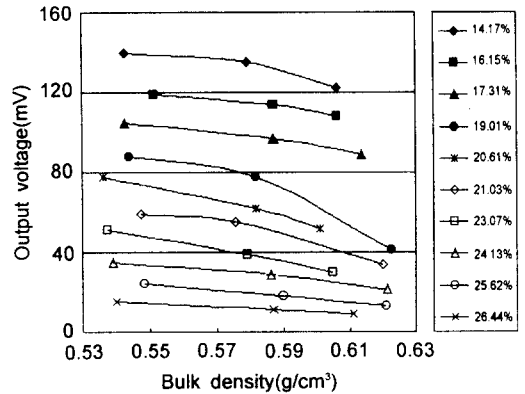


Fig. 8 Bulk density dependance on the output voltage at indicated moisture content levels (room temperature, 17°C).

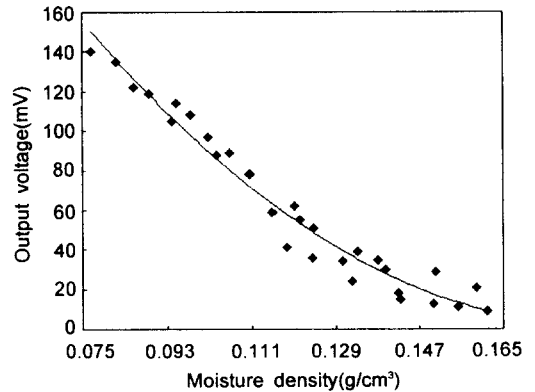


Fig. 9 Relationship between output voltage and moisture density of grain samples.

시료의 수분밀도에 따른 출력 전압은 그림 9에서 보는 바와 같이 거의 2차 및 3차의 다항 함수적인 관계를 나타내었다. 이러한 결과는 김 등(1999)에 의해 혼 안테나를 이용한 연구결과와 유사한 경향을 나타내는 것으로 분석되었으며 수분 밀도를 이용할 경우 샘플홀더내 시료의 산물밀도의 영향을 다소 보정할 수 있을 것으로 판단되며 이 경우 실제 함수율 측정장치를 개발할 경우 샘플홀더내에 채워지는 시료의 무게를 계량하는 별도의 장치가 필요하게 된다.

마. 함수율 측정 모델 개발

개발된 마이크로스트립 패치 안테나를 이용하여 산물벼의 함수율을 측정할 수 있는 측도 설정식을 구하기 위하여 지금까지의 분석 결과인 마이크로파 출력전압과 수분밀도의 3차 다항식 관계와 산물벼의 온도 및 산물밀도 등을 고려하여 마이크로파 출력전압과 산물벼의 온도를 독립변수로 하여 수분밀도를 예측할 수 있는 모델을 다음 식(8)과 같이 가정한 다음 회귀분석을 실시하였다. 일반적으로 모델에 추가되는 항이 증가할수록 결정계수 값은 증가하지만 본 연구에서는 실제의 마이크로파 장치의 구성을 고려하여 최소한의 변수들을 포함하는 모델로 구성하였다.

$$\rho_m = a \times v^3 + b \times v^2 + c \times v + d \times t + e \dots\dots\dots (8)$$

여기서, v = 마이크로파 출력전압(mV)
 t = 산물벼의 온도(°C)
 a~e = 회귀계수

상기의 모델 개발에서 전체 70개의 측정 데이터

40개의 데이터로 모델을 개발하였으며 모델 개발에 사용되지 않은 나머지 30개의 데이터로 개발된 모델을 평가하였다. 회귀분석 결과 표 1에서 보는 바와 같이 수분밀도를 예측하기 위한 모델의 결정계수는 0.9858, RMS 오차는 0.00278로 나타났으며 표 1의 결과와 수분밀도의 정의(식(7))을 이용하여 다음 식 (9)와 같은 함수를 측정 측도 설정식을 개발하였다.

$$MC(\%) = (-3.3983 \times 10^{-8} \times v^3 + 8.023 \times 10^{-6} \times v^2 - 0.0011 \times v - 0.0004 \times t + 0.1706) \frac{V}{W} \times 100 \dots\dots\dots (9)$$

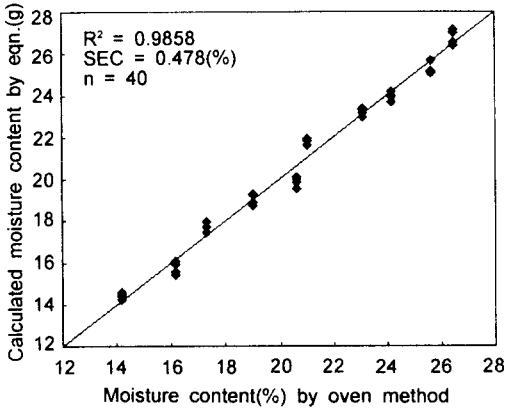
여기서, V = 샘플홀더의 부피(cm³)
 W = 샘플홀더 내 벼의 무게(g)

개발된 상기 측도 설정식 (9)에 포함되는 항 중 샘플홀더의 부피는 고정되어 있으므로 샘플홀더에 투입되는 시료의 무게를 계량함과 동시에 출력전압과 시료 온도를 측정하여 시료의 함수율을 계산할 수 있게 된다. 개발된 상기식 (9)를 이용하여 함수율의 예측값과 실측값을 비교한 결과 그림 10(b)에서 보는 바와 같이 결정계수, SEP, bias가 각각 0.9855, 0.479%w.b., -0.0369%w.b.의 정확도로 함수율 측정이 가능할 것으로 분석되었다. 이 값들은 김 등(1999)이 혼 안테나를 이용한 결과인 결정계수, SEP가 각각 0.9765 및 0.657%w.b. 보다 정확한 것으로 나타났는데 이러한 이유는 김 등(1999)이 분석한 산물벼는 정선상태가 서로 차이가 나는 두 개의 벼 품종(화성과 추청)을 하나의 측도 설정식으로 나타낸 결과이며 따라서 본 연구에서는 화성벼 하나의 품종만을 대상으로 했기 때

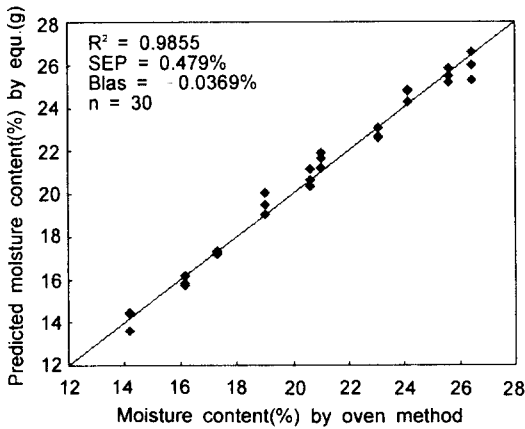
Table 1 Regression analysis expressing the moisture density(ρ_m) and output voltage(v) and grain temperature(t) at Hwasung rough rice and room temperature(17°C)

Regression Coefficient					R ²	Root MSE
a	b	c	d	e		
-3.983808E-8	8.023E-6	-0.001100	-0.000399	0.170610	0.9858	0.00278

Regression model : $\rho_m = a \times v^3 + b \times v^2 + c \times v + d \times t + e$



[a] Calibration



[b] Prediction

Fig. 10 Plot of measured moisture content vs. calculated and predicted moisture content by equation (9).

문에 측도 설정식의 정확도가 다소 향상된 것으로 분석되었다. 또한 그림 10에서 보는 바와 같이 개발된 측도 설정식을 이용할 경우 시료의 산물밀도의 변이를 완전히 보정할 수는 없을 것으로 분석되었는데 보다 정밀하고 정확한 함수율 측정을 위해서는 시료의 산물밀도를 보정할 수 있는 연구가 보완되어야 할 것으로 생각된다.

5. 요약 및 결론

본 연구는 마이크로파 10.5GHz 주파수를 이용한 곡류의 함수율 측정 센서로서 마이크로스트립 2×2 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 측정한 결과 안테나 이득은 10.5GHz에서 11.35dBi, 입력반사손실은 -38dB, 대역폭은 0.35GHz를 나타내었으며 안테나의 방사각은 E와 H-plane의 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 14.17~26.44%의 화성벼에 대한 마이크로파 투과특성을 측정한 결과 함수율, 산물밀도, 시료온도가 증가함에 따라 시료를 투과하여 나오는 마이크로파 출력전압은 감소하는 것으로 나타났다.

시료의 온도와 마이크로파 출력전압을 독립변수, 수분밀도를 종속변수로 하여 3차 다항 함수로 표시되는 벼의 함수율 측정 측도 설정식을 개발하여 함수율의 예측값과 실측값을 비교한 결과 결정계수, SEP, bias가 각각 0.9855, 0.479%w.b., -0.0369%w.b.로 나타나 시료의 산물밀도의 영향을 보정함과 동시에 정확도가 높은 산물벼의 함수율 측정이 가능할 것으로 분석되었다.

참고 문헌

1. 김기복. 1997. 곡류의 고주파와 마이크로파 유전특성 및 정전용량식 온라인 함수율 측정장치 개발에 관한 연구. 서울대학교 공학박사 학위논문.
2. 김기복, 김종현, 노상하. 1999. 마이크로파 자유공간 전송을 이용한 산물벼 함수율 측정장치 개발. 한국농업기계학회지 24(3):235-242

3. 김기복, 김종현, 노상하. 1999. 10.5GHz대 마이크로스트립 패치 안테나를 이용한 곡류의 함수율 측정장치 개발에 관한 연구. 한국농업기계학회 하계 학술대회 논문집 4(2):185-190.
4. Balanis, C. A. 1982. *Antenna Theory : Analysis and Design*, John Wiley & Sons, Inc.
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* 2(4):72-78.
6. 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.
7. Miyai, Y. 1978. A new microwave moisture meter for grains. *Journal of Microwave Power* 13:163-166.
8. Nelson, S. O. and A. W. Kraszewski. 1990. Grain moisture content determination by microwave measurements. *Transactions of the ASAE* 33(4):1303-1306.
9. Okamura, S. 1981. High-moisture content measurement of grain by microwave. *Journal of Microwave Power* 16(3&4):253-256.
10. Pozar, D. M. 1985. *Microwave Engineering*. Addison-Wesley.
11. Shimin, D. 1986. A new method for measuring dielectric constant using the resonant frequency of a patch antenna. *IEEE Trans. Microwave theory and technique* 34(9):923-931.
12. Trinogga, L. A., G. Kaizhou and I. C. Hunter. 1991. *Practical microstrip circuit design*. Ellis Horwood Limited. p. 311-313.