

마이크로파 자유공간 전송방법을 이용한 함수율 측정장치 개발에 관한 연구

A Study on the Equipment for Moisture Content Measurement using Microwave Free Space Transmission Technique

김기복* 김중현** 노상하*

정희원 정희원

K.B.Kim J.H.Kim S.H.Noh

1. 서 론

수분은 대부분의 물질에 있어서 중요한 구성성분중의 하나이며 특히 농산물이나 식품 등에 함유된 수분함량은 각 품질을 평가하는 데 있어서 중요한 인자가 된다. 또한 각종 농산물 및 식품가공공정 뿐만 아니라 저장단계에서 정확한 함수율을 측정하기 위한 시스템의 개발이 필요하다. 함수율 측정 방법에는 전기 저항식과 콘덴서식 수분측정 방법이 주로 사용된다. 전기 저항식 수분 측정기는 시료의 함수율 증가에 따라 전기 저항이 대수적으로 감소하는 원리를 이용한 것으로 시료와 전극간의 접촉저항을 안정화시키기 위하여 별도의 시료분쇄기가 필요하며 이에 따라 측정시료의 양이 적어 수회 반복측정을 해야한다. 이 경우, 시료에 가하는 압력의 변화에 따라 측정값의 변동이 나타날 수 있으며 20% 이상의 고 함수율일 때에는 수분의 변화에 따른 전기 저항의 변화가 매우 작기 때문에 측정값의 오차가 크다는 단점이 있다. 콘덴서식은 시료의 함수율에 따라 변하는 유전율을 고주파 용량으로 변환시켜 함수율을 결정하는 방법으로 비교적 넓은 범위의 수분을 비파괴적으로 신속하고 정확하게 측정할 수 있으나 시료의 유전율이 주파수, 온도 및 밀도 등에 큰 영향을 받으므로 이들을 보상해주어야 한다.

마이크로파를 이용한 수분 측정 연구는 주로 도파관이나 공동 공진기 방법을 사용하여 왔는데 이를 위하여 정교한 샘플홀더가 제작되어야 하며 측정원리상 온라인 측정용으로는 다소 부적합할 것으로 생각된다(Nelson, 1990). 따라서 송수신 안테나를 이용하여 수분을 측정하는 방법이 제안되었는데(Kraszweski, 1991, Kim, 1997) 시료의 함수율에 따라 투과된 마이크로파의 흡수에 의해서 발생하는 손실을 이용하여 넓은 범위의 함수율을 비파괴적으로 신속하게 온라인으로 측정할 수 있다는 장점이 있다(Kim, 1997). 지금까지의 연구들은 대부분 곡물의 함수율과 전자파의 투과 또는 반사 특성과의 관계를 이용한 유전특성을 이용한 함수율 측정연구가 주로 이루어져 왔으며 정확도가 높은 함수율 측정이 가능한 것으로 보고되고 있다. 그러나 지금까지의 연구는 실제의 함수율 측정장치의 설계·제작보다는 기존의 정밀한 측정장비를 이용한 연구가 대부분이므로 전자파를 이용한 함수율 측정센서 및 신호처리회로의 개발이 요구되고 있는 실정이다.

본 논문에서는 이러한 연구의 필요성을 인식하여 보다 간편하게 곡물의 함수율을 측정할 수 있는 X-band 대역의 10.5GHz 주파수를 이용한 마이크로파 송수신 장치를 설계 및 제작하여 함수율 측정장치의 개발 가능성을 검토하기 위하여 수행되었다.

* 서울대학교 농업생명과학대학 생물자원공학부

** 광주대학교 공과대학 전파공학과

2. 재료 및 방법

2.1 합수율 측정 시스템 설계 · 제작

1) 송신부

마이크로파의 송신부는 발진기, 아이솔레이터, 그리고 송신용 혼안테나로 구성하였다. 마이크로파 발진기는 잡음과 온도특성이 우수하고 Q값이 큰 유전체 공진기를 사용하여 10.5GHz의 안정한 출력을 발진시킨 다음 아이솔레이터를 사용하여 신호가 한쪽 방향으로 일정하게 흐르게 함과 동시에 수신부로부터 반사되는 신호에 대하여 발진기의 손상을 보호하였다.

먼저, 송신부의 핵심부품이라 할 수 있는 발진기는 우수한 출력과 잡음지수가 낮은 능동소자인 휴렛 팩커드사의 전계효과 트랜지스터(ATF-13786 MESFET)와 제작후 Tuning이 용이한 공진기(KFR-0531-C-212-A-30C, (주)한원)를 사용하였다. 이때, 공진기의 직경은 5.31mm, 두께는 3.62mm(Support 포함), 온도상수는 0ppm/°C, Q값은 6000, 그리고 유전율은 38이었다.

선정된 능동소자와 공진기의 특성 데이터를 이용하여 HP EEsos사의 회로설계 소프트웨어인 Libra ver. 6.1을 이용하여 유전체 공진 발진기를 설계하였다. 설계는 회로 구성이 간단하고 부하의 변동에 따른 발진주파수 및 출력의 변화가 적은 직렬 궤환형으로 발진기를 설계하였다. 설계한 발진기를 유전율이 2.52이고, 두께가 0.54mm, 동판의 두께가 0.018mm인 Teflon 기판 위에 직접 인쇄 방식으로 제작하였다.

아이솔레이터는 아이솔레이션이 20dB이고 최대 VSWR이 1.25인 RADITEK사의 아이솔레이터 모듈을 사용하였고 송신안테나는 주변신호의 영향을 최소화하기 위하여 15~20dB 이득을 갖는 X-band용 혼안테나를 사용하였다.

2) 수신부

시료를 투과하는 마이크로파 신호를 수신하기 위한 검파기는 다이오드의 비선형 특성을 이용하여 안테나를 통하여 입력된 RF신호를 DC신호로 검파하는 회로로서 전기적 및 기계적 충격에 매우 안정하고 고주파 특성이 우수한 쇼트키 다이오드(MA40070, M/A-com사)와 임피던스 정합회로로 구성하였다^[4]. 검파기의 회로 구성도는 그림 1에서 보는바와 같이 다이오드의 입력부에 인덕터(RF choke)와

출력부에 bypass 커패시터 및 저항을 연결하여 고주파 신호에 대하여 임피던스 정합이 되도록 구성하였다. 이 때 입력단의 인덕터는 RF신호에 대해 open이 되어 한쪽 방향으로 신호가 흐르게 하였고 반사계수를 줄이기 위해 인덕턴스와 전송선로 길이를 튜닝하여 임피던스 정합을 하였다^[5]. 또한 bypass 커패시터는 검파한 DC신호를 출력으로 전달하고, RF신호에 대해서는 short시켜 저항에 걸리는 순수한 DC전압을 측정하도록 하였다.

이상에서 본 연구에서 설계 · 제작된 합수율 측정용 마이크로파 송수신장치는 그림 2 및 3에서 보는바와 같다.

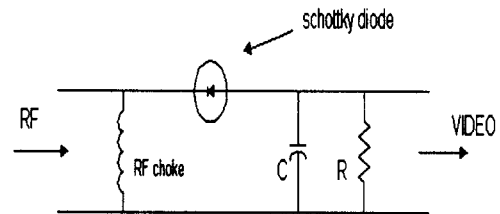


Fig. 1. Circuit diagram of detector.

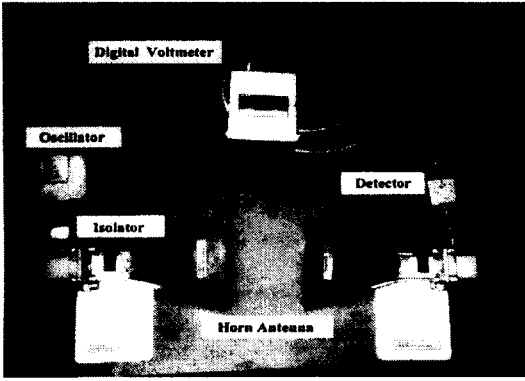


Fig. 2. Photo of prototype moisture meter.

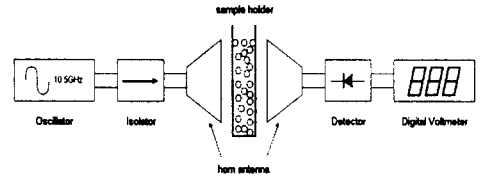


Fig. 3. Schematic diagram of prototype moisture meter.

3) 마이크로파 투과용 샘플홀더

마이크로파가 투과하게 되는 샘플홀더의 재질은 두께가 0.2cm인 아크릴을 사용하였으며 투과면의 넓이는 전파가 투과할 때 발생하는 혼 안테나의 누설을 최소화하기 위하여 혼안테나의 가로크기의 2배 이상인 15.52cm로 하였다. 이때 샘플홀더의 폭은 X-band에서의 파장범위가 2.5~3.75cm임을 감안하여 최소한 한 파장 이상의 투과길이를 고려하여 4.25cm로 하였으며 샘플홀더의 크기는 4.25×11.96×15.52cm로 제작하였다(김기복, 1997).

2.2 공시재료

실험에 사용된 공시재료는 경기도 화성군에서 1998년도에 수확된 단립종 벼인 화성벼와 추청벼를 사용하였으며 화성벼의 함수율 범위는 13.61~26.25%w.b., 추청벼의 함수율 범위는 12.03~26.00%w.b.로 하였으며 함수율의 수준은 각각 10수준씩으로 하였다. 이때 표준함수율의 결정은 10g의 시료를 135℃의 공기오븐에서 24시간 건조하여 결정하였다.

2.3 실험 방법

마이크로파 투과실험은 먼저 마이크로파 송수신 안테나 사이에 시료가 채워진 샘플홀더를 위치시킨 다음 수신안테나에서 감쇠되는 신호를 검출하였다. 이때 샘플홀더내에 채워지는 시료가 동일한 함수율에서 산물밀도에 따라 마이크로파의 감쇠가 다르게 나타나므로(김, 1997) 마이크로파 투과특성을 이용한 함수율 측정장치의 개발에서 이러한 산물밀도의 영향을 보다 명확하게 구명하기 위하여 동일한 함수율에서 산물밀도의 범위를 5수준으로하여 실험하였다. 또한 함수율 측정장치 개발에서 반드시 고려해야할 시료의 온도특성을 분석하기 위하여 온도 범위를 5~7℃, 17~19℃, 29~32℃, 40~42℃의 4수준으로 변화시키면서 실험을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 발진기의 특성분석

본 연구에서 설계·제작된 마이크로파(10.5GHz) 발진기의 함수율 측정 장치로서의 가능성을 검토

하기 위하여 발진기의 위상잡음과 온도특성을 측정하였다. 위상잡음을 회로망 분석기(HP8510C)로 분석한 결과 중심 주파수에서 100kHz 떨어진 곳에서 -107.8dBc/Hz를 나타내어 외부잡음에 강한 특성을 나타내었다. 또한 주위 온도 변화에 대한 주파수 변화를 검토하기 위하여 발진기를 온도가 조절되는 항온챔버에 넣고 -30℃에서 70℃까지 5℃씩 변화시켜 가면서 측정한 결과 그림 4에서 보는바와 같이 4.8ppm/℃의 값을 나타내어 온도특성이 우수한 것으로 나타나 함수용 측정장치로서의 사용이 가능할 것으로 분석되었다.

개발된 발진기의 출력전력을 스펙트럼 분석기(HP-8563E)로 측정한 결과 10.5GHz에서 Span 이 10MHz일 때 10.67dBm을 나타내었다. 표 1은 본 연구에서 제작한 발진기의 특성과 휴렛 팩커드사의 발진기(HP-Avantek)를 비교한 것으로 발진기의 여러 특성 값들이 잘 일치하여 본 연구에서 설계·제작한 발진기의 성능이 우수함을 나타내었다.

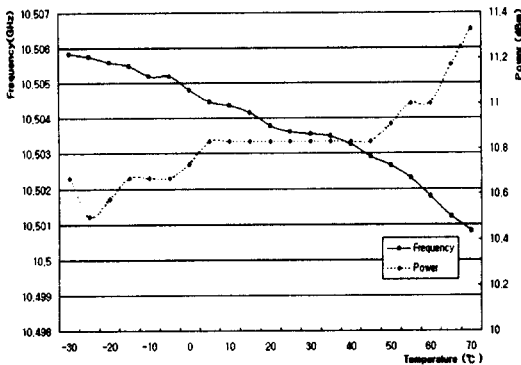


Fig. 4. Variations in frequency and power of oscillator.

Table 1. Characteristics of the prototype and commercial type oscillator.

Item	prototype	HP -Avantek ^[7]
Output Power (dBm)	10.67 dBm	10 dBm
Frequency Stability (ppm/℃)	4.8 ppm/℃	10 ppm/℃
Frequency Pulling (%)	± 0.03%	± 0.02%
Frequency Pushing (%)	± 0.0006%	± 0.001%
2nd Harmonics (dBc)	-27 dBc	-20 dBc
Phase Noise@100kHz (dBc/Hz)	-107.8 dBc/Hz	-95 dBc/Hz

3.2 검파기의 특성분석

본 연구에서 설계한 검파기는 Hybrid MIC(Microwave Integrated Circuit)로 제작되었으며 검파기의 입력반사손실을 회로망 분석기(HP8510C)로 분석한 결과 10.5GHz에서 -20.424dB를 나타내었으며 정재파비(VSWR)는 1.2096를 나타내었다. 또한 검파기의 voltage sensitivity를 분석하기 위하여 10.5GHz의 power를 검파기에 가변 입력하여 출력되는 DC전압을 디지털 전압측정기로 측정한 결과 그림 5에서 보는바와 같이 낮은 레벨의 신호가 입력되더라도 DC전압으로 충분히 검파할 수 있는 것으로 나타났다.

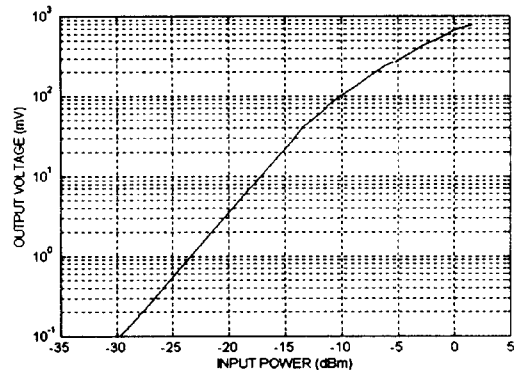
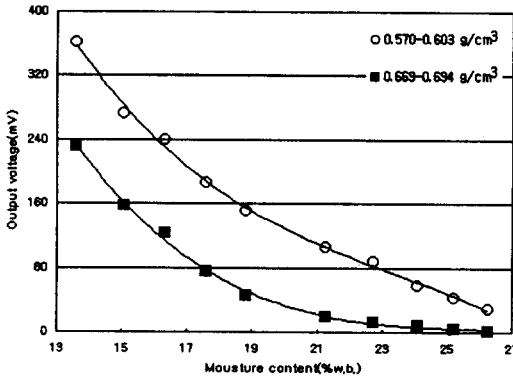


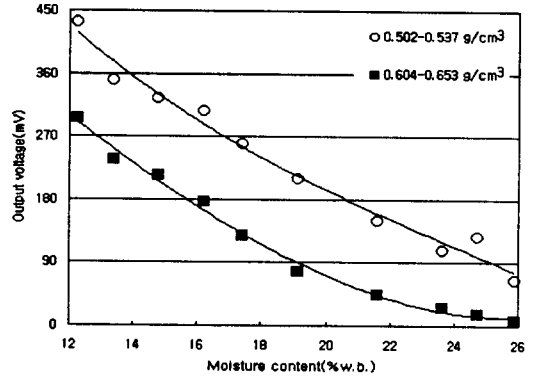
Fig. 5. Voltage sensitivity of detector.

3.3 함수율 및 산물밀도에 따른 검출전압의 변화

실험에 사용된 시료의 산물밀도 5수준 중에서 최소 및 최고의 두 범위로 구분한 다음 각 수준에서 함수율에 따른 검출전압을 나타낸 결과 그림 6에서 보는바와 같이 함수율에 따라 거의 다항 함수적으로 감소함을 알 수 있으며 동일한 함수율에서도 산물밀도의 2 수준에 따라 그 출력전압의 변화가 서로 다르게 나타남을 알 수 있다. 이러한 경향은 마이크로파를 이용한 함수율 측정연구에서 이미 많은 연구자가 구명한 바와 같다(Nelson, 1990, Kraszbwski. 1991, 김기복, 1977).



(a) Hwasung rough rice



(b) Chuchung rough rice

Fig. 6. Moisture content dependence of the output voltage at indicated bulk density levels at room temperature(17°C).

3.4 수분밀도를 이용한 산물밀도 보정 가능성 검토

시료의 산물밀도에 따른 출력전압의 변동을 보정하기 위하여 기존의 제안된(김기복, 노상하, 1997) 수분밀도를 이용하여 산물밀도의 보정 가능성을 검토하였다. 시료의 수분밀도에 따른 출력전압은 화성벼와 추청벼의 각각에서 그림 7에서 보는바와 같이 수분밀도와 출력전압은 거의 다항 함수적인 관계를 나타내었다. 이러한 결과는 투과되는 신호를 검파하는 쇼트키 다이오드의 전류 포화특성 때문인 것으로 판단된다. 한편, 화성벼와 추청벼에 대한 데이터를 합하여 수분밀도에 따른 검출전압을 분석한 결과 그림 7에서 보는바와 같이 하나의 회귀식으로 표현이 가능할 것으로 분석되었다.

이상의 결과를 미루어 볼 때 수분밀도를 함수율 측정의 한 인자로 이용할 경우 산물밀도의 영향을 충분히 보정하면서 정확도가 높은 함수율의 측정이 가능한 것으로 판단된다.

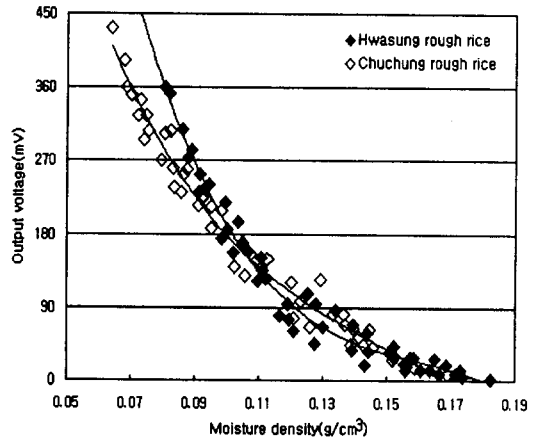


Fig. 7. Relationship between output voltage and moisture density of grain samples.

3.5 마이크로파 투과특성을 이용한 함수율 측정 모델 개발

혼 안테나를 이용하여 시료의 함수율을 측정할 수 있는 측도 설정식을 구하기 위하여 지금까지의 각각의 요인분석 결과를 근거로 하여 화성벼에 대하여 다음과 같은 출력전압과 시료의 온도를 독립변수로 한 모델을 이용하여 회귀분석을 실시하였다.

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

여기서, v =출력전압(V), t =시료의 온도(°C), ρ_m =수분밀도(g/cm³), a ~ e =회귀계수

Table 2. Regression analysis expressing the output voltage(v) and grain temperature(t) dependence of the moisture density(ρ_m) at Hwasung rough rice and room temperature, 17°C

Regression Coefficients					R ²	Root MSE
a	b	c	d	e		
-10.9332	6.4771	-1.3082	-0.0005	0.1845	0.9761	0.00407

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

회귀분석 결과 함수율 측정 모델의 결정계수는 0.9761로 비교적 높게 나타나 산물밀도와 온도의 영향을 보정하면서 정확도가 높은 함수율 측정이 가능할 것으로 판단되었다. 상기의 분석결과를 토대로 다음과 같은 함수율 예측방정식을 개발하였다.

$$MC(\%) = (-10.9332v^3 + 6.4771v^2 - 1.3082v - 0.0005t) \times \frac{1}{\rho_b} \dots\dots\dots(1)$$

여기서, MC(%)=함수율(%w.b.), ρ_b =산물밀도(g/cm³)

상기의 개발된 함수율 측도설정식을 이용하여 함수율의 예측값과 실측값을 비교한 결과 그림 8에서 보는바와 같이 상관계수는 0.9868, RMS 오차는 0.682%로 나타나 비교적 정확도가 높은 함수율 측정이 가능할 것으로 판단되었다.

4. 요약 및 결론

본 논문에서는 X-band 대역의 10.5GHz 주파수를 이용하여 곡물의 함수율을 측정하기 위한 마이크로파 송수신 장치를 설계·제작한 다음 함수율 범위가 각각 13.61~26.25%w.b.인 화성벼와 12.03~26.00%w.b.인 추청벼를 대상으로 하여 함수율 측정장치로서의 가능성을 검토하기 위하여 수행되었다. 이를 위하여 먼저 마이크로파 송신부의 발진기를 설계·제작하여 평가한 결과 10.503GHz에서 10.67dBm의 출력전력을 나타내었으며 위상잡음과 온도특성이 우수한 성능을 나타내었다. 마이크로파 신호의 수신부 검파기는 쇼트키 다이오드를 이용하여 제작하였으며 신호의 입력에 대한 임피던스 정합을 하여 반사손실은 -20.424dB, VSWR은 1.2096를 나타내었으며 충분히 높은 voltage sensitivity를

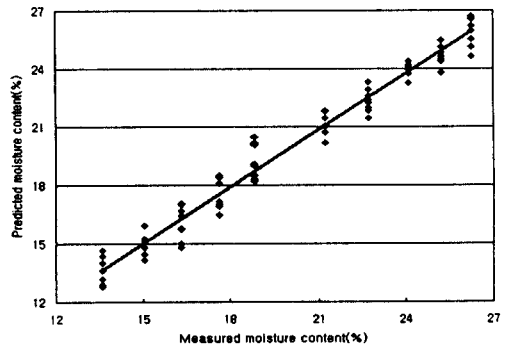


Fig. 8. Relation between measured and predicted moisture content by equation(1).

나타내었다. 개발된 마이크로파 송수신 장치를 이용하여 벼의 전파 투과특성을 측정한 결과 함수율, 산물밀도, 시료온도가 증가함에 따라 출력전압은 감소하였다. 시료의 온도와 출력전압을 독립변수, 수분밀도를 종속변수로 하여 함수율을 측정할 수 있는 측도설정식을 개발하여 함수율의 예측값과 실측값을 비교한 결과 상관계수는 0.9868, 표준오차는 0.682%로 나타나 정확도가 높은 벼의 함수율 측정이 가능한 것으로 분석되었다.

참 고 문 헌

1. 김기복. 1997. 곡류의 고주파와 마이크로파 유전특성 및 정전용량식 온라인 함수율 측정장치 개발에 관한 연구. 서울대학교 공학박사 학위논문.
2. Floch, J. M. 1995. Technique allows simple design of microwave DROs. *Microwaves & RF*. 107-112.
3. Henaux, J. C., G. Vernet and R. Adde. 1983. Synchronization Effects in a Submillimeter Josephson Self-oscillator. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech*, Vol. MTT-31. No. 2. : 177-183.
4. Hewlett-Packard. Designing detectors for RF/ID Tags. HP Application Note 1089.
5. Hewlett-Packard. The zero bias schottky detector diode. HP Application Note 969.
6. Kandala, C. V. K., R. G. Leffler, S. O. Nelson and K. C. Lawrence. 1986. Capacitive sensors for measuring single-kernel moisture content in corn. *ASAE Paper No.* 86-3004.
7. Khanna, A. P. S. 1989. Introduction to DROs. HP-Avantaek Application Note. No. AN-M003 : 1-15.
8. Kim, J. H., K. B. Kim and S. H. Noh. 1997. New density-independent model for measurement of grain moisture content using microwave techniques. *J. Electrical Engineering and Information Science*. 2(4) : 72-73.
9. 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.
10. Miyai, Y. 1978. A new microwave moisture meter for grains. *J. Microwave Power*. Vol. 13 : 163-166.
11. Nelson, S. O. and A. W. Kraszewski. 1990. Grain moisture content determination by microwave measurements. *Trans. of the ASAE*, 33(4):1303-1306.
12. Okamura, S. 1981. High-moisture content measurement of grain by microwave. *J. Microwave Power*. 16(3&4) : 253-256.
13. Trinogga, L. A., G. Kaizhou and I. C. Hunter. 1991. *Practical microstrip circuit design*. Ellis Horwood Limited. 311-313.