

# 마이크로파 자유공간 전송을 이용한 산물벼 함수율 측정장치 개발†

## Development of Moisture Content Measurement Device for Paddy Rice using Microwave Free Space Transmission

김 기 복*	김 종 현**	노 상 하*
정회원		정회원
K. B. Kim	J. H. Kim	S. H. Noh

### ABSTRACT

This study was conducted to develop a grain moisture meter using microwave free space transmission technique at X-band frequency. The 10.5GHz microwave oscillator using a dielectric resonator was designed and fabricated to transmit electromagnetic wave through standard horn antenna to a sample holder with the wetted Hwasung and Chuchung rough rice(12.00~26.25%). To detect the output voltage of transmitted wave from receiving horn antenna, the detector was composed of shottkey diode and RF impedance matching circuit. The regression model for measurement of grain moisture content was developed. Its correlation coefficient and standard error of prediction (SEP) were found to be 0.9882 and 0.657 respectively between measured and predicted moisture contents.

**주요용어(Key Words):** 발진기(Oscillator), 검파기(Detector), 혼안테나(Horn antenna), 함수율(Moisture content), 수분밀도(Moisture density)

### 1. 서 론

수분은 대부분의 물질에 있어서 중요한 구성 성분 중의 하나이며 특히 농산물이나 식품 등에 함유된 수분 함량은 각 품질을 평가하는 데 있어서 중요한 인자가 된다. 또한 각종 농산물 및 식품 가공공정 뿐만 아니라 저장단계에서 정확한 함수율을 측정하기 위한 시스템의 개발이 필요하다. 함수율 측정 방법에는 전기 저항식과 콘덴서식 수분 측정방법이 주로 사용된다. 전기 저항식 수분측정기는 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 해야 한다. 이 경우, 시료에 가하는 압력의 변화에 따라 측정값의 변동이 나타날 수 있으며 20% 이상의 고 함수율 일 때에는 수분의 변화에 따른 전기 저항의 변화가 매우 작기 때문에 측정값의 오차가 크다는 단점이 있다. 콘덴서식은 시료의 함수율에 따라 변하는 유전율을 고주파 용량으로 변환시켜 함수율

† 본 연구는 한국학술진흥재단에서 지원하는 학제간 연구지원 사업으로 수행되었음.

\* 서울대학교 농업생명과학대학 생물자원공학부 농업기계전공

\*\* 광운대학교 공과대학 전파공학과

을 결정하는 방법으로 비교적 넓은 범위의 수분을 비파괴적으로 신속하고 정확하게 측정할 수 있으나 시료의 유전율이 주파수, 온도 및 밀도 등에 큰 영향을 받으므로 이들을 보상에 주어야 한다(Kandala, 1986).

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(Okamura, 1981, Nelson, 1990). 따라서 송수신 안테나를 이용하여 수분을 측정하는 방법이 제안되었는데(Kraszewski, 1991, 김, 1997) 시료의 함수율에 따라 투과된 마이크로파의 흡수에 의해서 발생하는 손실을 이용하여 넓은 범위의 함수율을 비파괴적으로 신속하게 온라인으로 측정할 수 있다는 장점이 있다. 마이크로파를 이용한 함수율 측정주파수는 주로 8~12GHz의 X밴드 주파수가 많이 이용되고 있는데 이 주파수대역에서 수분에 의한 마이크로파 에너지의 흡수가 크게 일어나기 때문이다(Miyai, 1978, Nelson, 1990).

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 기존의 관련 연구는 실제의 함수율 측정장치의 설계·제작보다는 회로망 분석기와 같은 정밀한 측정장비를 이용한 연구가 대부분이며 마이크로파를 이용한 함수율 측정센서 및 신호처리회로의 개발이 요구되고 있는 실정이다.

본 연구는 마이크로파 X-밴드 중심주파수인 10.5 GHz를 이용한 마이크로파 송수신 장치를 설계·제작하여 함수율 측정장치의 개발 가능성을 검토하기 위하여 수행되었다.

## 2. 재료 및 방법

### 가. 함수율 측정 시스템 설계·제작

#### (1) 송신부

마이크로파의 송신부는 발진기, 아이솔레이터

(isolator), 그리고 송신용 혼안테나로 구성하였다. 마이크로파 발진기는 잡음과 온도특성이 우수하고 Q 값이 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 제작 후 튜닝이 용이한 공진기(KFR-0531-C-212-A-30C, (주)한원)를 사용하였다. 이 때, 공진기의 직경은 5.31mm, 두께는 3.62mm(Support 포함), 온도상수는 0ppm/°C, Q 값은 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 레완형으로 발진기를 설계하였다. 설계한 발진기를 유전율이 2.52, 두께가 0.54mm, 동판의 두께가 0.018mm인 Teflon 기판 위에 직접 인쇄 방식으로 제작하였다.

제작된 유전체 공진 발진기의 개략도는 그림 1에서 보는 바와 같다. 발진기에서 유전체 공진기의 위치는 출력전력과 위상 잡음에 큰 영향을 주므로

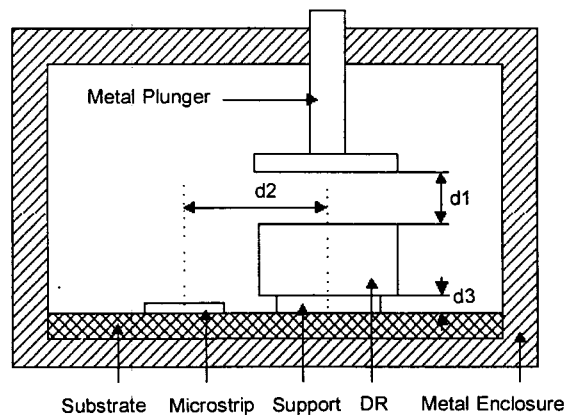


Fig. 1 Schematic diagram of dielectric resonator.

(Henaux, 1983) 마이크로스트립 선로와 결합되는 유전체 공진기의 상대적인 위치는 Metal plunger로 거리 d1을 3.07mm로 조절하여 중심주파수의 3% 정도 까지 주파수를 튜닝할 수 있게 하였으며 유전체 공진기와 스트립 라인과의 거리 d2와 유전체 공진기와 기관의 거리 d3는 각각 2.74mm, 1.5mm로 설정하였다(Trinogga, 1991).

본 연구에서 제작된 유전체 공진 발진기의 위상잡음을 회로망분석기(HP8510C)로 분석한 결과 그림 2에서 보는 바와 같이 중심 주파수에서 100kHz 떨어진 곳에서  $-107.8\text{dBc/Hz}$ 를 나타내어 외부잡음에

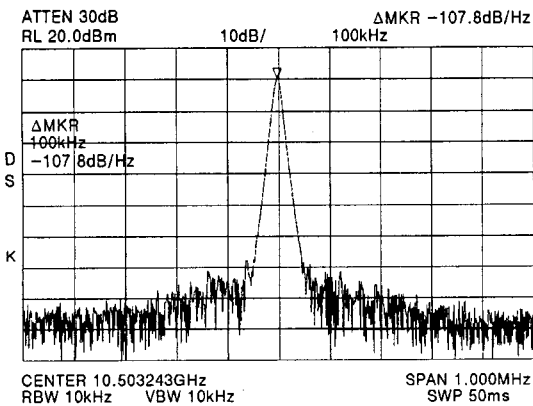


Fig. 2 Phase noise performance of the prototype oscillator.

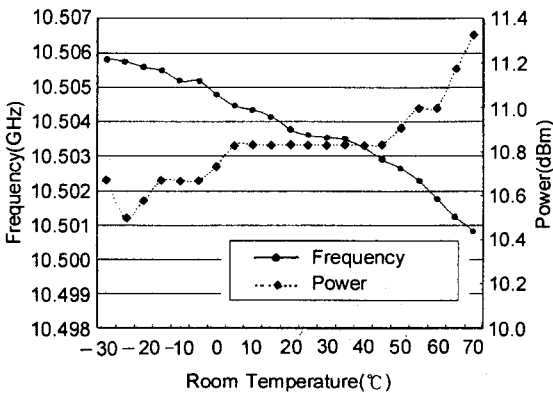


Fig. 3 Variations in frequency and power of the prototype oscillator depending on room temperature.

강한 특성을 나타내었다. 또한 주위온도 변화에 대한 발진주파수 변화를 측정한 결과 그림 3에서 보는 바와 같이  $4.8\text{ppm}/^\circ\text{C}$ 의 값을 나타내어 양호한 온도 특성을 나타내었다.

아이솔레이터는 아이솔레이션이 20dB이고 최대 정재파비가 1.25인 RADITEK사의 아이솔이터 모듈을 사용하였으며 마이크로파 송신 안테나는 주변 신호의 영향을 최소화하기 위하여 15~20dB의 이득을 갖는 X-band용 혼안테나를 사용하였다.

(2) 수신부

시료를 투과하는 마이크로파 신호를 수신하기 위한 검파기는 다이오드의 비선형 특성을 이용하여 안테나를 통하여 입력된 RF 신호를 DC 신호로 검파하는 회로로서 전기적 및 기계적 충격에 매우 안정하고 고주파 특성이 우수한 쇼트키 다이오드(MA40070, M/A-com사)와 임피던스 정합회로로 구성하였다.

검파기의 회로도에는 그림 4에서 보는 바와 같이 다이오드의 입력부에 인덕터(RF choke)를 연결하여 RF 신호에 대해 개방이 되어 한쪽 방향으로 신호가 흐르게 하였으며 출력부에 bypass 커패시터 및 저항을 연결하여 고주파 신호에 대하여 임피던스 정합이 되도록 구성하였다. Bypass 커패시터는 검파한 DC 신호를 출력으로 전달함과 동시에 RF 신호는 단락시키므로 저항에 인가되는 순수한 DC 출력전압을 측정할 수 있게 된다.

본 연구에서 설계·제작된 함수율 측정용 마이크로파 송수신장치는 그림 5에서 보는 바와 같다.

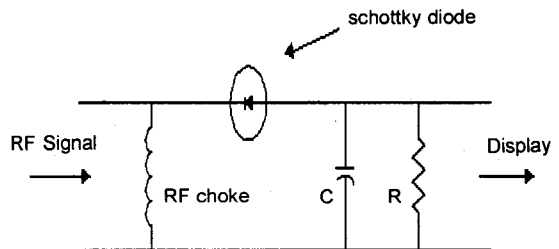


Fig. 4 Circuit diagram of detector.

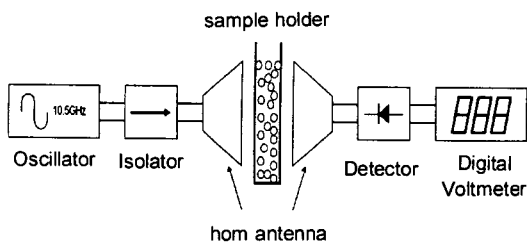


Fig. 5 Schematic diagram of the prototype moisture meter.

(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 혼 안테나 가로크기의 2배 이상인 15.52cm로 하였다. 이때 샘플홀더의 폭은 X-band에서의 파장범위가 2.5~3.75cm임을 감안하여 최소한 한 파장 이상의 투과길이를 고려하여 4.25cm로하였으며 샘플홀더의 크기는 4.25 × 11.96 × 15.52cm로 제작하였다(김, 1997).

나. 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 10 수준씩으로 하였다. 이때 표준함수율의 결정은 10g의 시료를 135℃의 공기오븐에서 24시간 건조하여 결정하였다.

다. 실험 방법

마이크로파 투과실험은 먼저 마이크로파 송수신 안테나 사이에 시료가 채워진 샘플홀더를 위치시킨 다음 수신안테나에서 감쇠되는 신호를 검출하였다. 이 때 샘플홀더 내에 채워지는 시료가 동일한 함수율에서 산물밀도에 따라 마이크로파의 감쇠가 다르게 나타나므로(김, 1997) 마이크로파 투과특성을 이

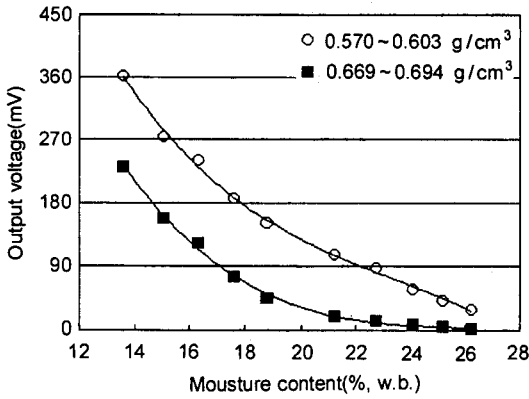
용한 함수율 측정장치의 개발에서 이러한 산물밀도의 영향을 보다 명확하게 구명하기 위하여 샘플홀더에 시료를 자연스럽게 부어 넣은 상태, 샘플홀더에 진동을 가하면서 부어 넣은 상태, 샘플홀더에 시료를 눌러 다지면서 충전하는 방법을 이용하여 산물밀도의 범위를 5수준으로 변화시켰다. 또한 함수율 측정장치 개발에서 반드시 고려해야 할 시료의 온도특성을 분석하기 위하여 주위온도를 대기중의 온도(17℃)로 한 다음 시료가 충전된 샘플홀더를 냉각 및 가열하여 시료의 온도 범위를 5~7℃, 17~19℃, 29~32℃, 40~42℃의 4수준으로 변화시키면서 실험을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

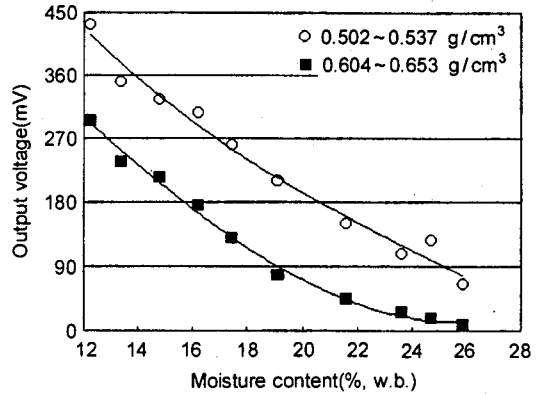
가. 함수율 및 산물밀도에 따른 검출전압의 변화

실험에 사용된 시료의 산물밀도 5수준 중에서 최소 및 최고의 두 범위로 구분한 다음 각 수준에서 함수율에 따른 검출전압을 나타낸 결과 그림 6에서 보는 바와 같이 함수율에 따라 거의 지수 함수적으로 감소함을 알 수 있으며 동일한 함수율에서도 산물밀도의 2수준에 따라 그 출력전압의 변화가 서로 다르게 나타남을 알 수 있다. 이러한 경향은 마이크로파를 이용한 함수율 측정연구에서 이미 많은 연구자가 구명한 바와 같다(Nelson, 1990 Kraszewski, 1991, 김, 1997). 그림 6에서 단립종인 화성벼와 추청벼의 특성이 다소 다르게 나타나고 있는데 이것은 화성벼와 추청벼의 정선상태의 차이에 따른 산물밀도의 차이 때문인 것으로 생각된다. 추청벼의 경우 까락의 수가 화성벼보다 많은 것으로 분석되었는데 각 시료의 천립중 무게에서 까락이 차지하는 비율은 화성벼 1.739%, 추청벼 2.933%였다. 따라서 정밀한 함수율 측정을 위해서는 시료의 정선상태가 양호해야 하거나 품종이 다른 경우에는 동일한 시료의 정선상태에서 함수율을 측정해야 할 것으로 판단된다.

나. 시료의 온도변화에 따른 검출전압의 변화

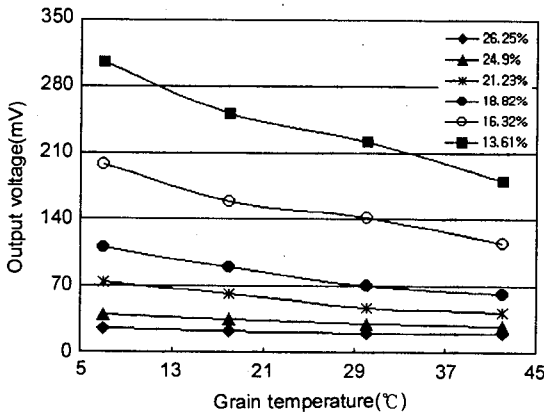


[a] Hwasung rough rice

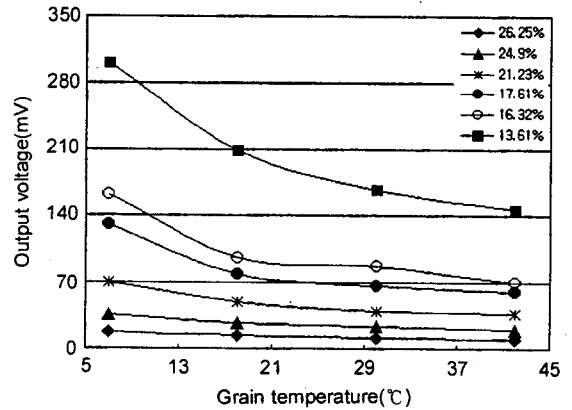


[b] Chuchung rough rice

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



[a] 0.530~0.572g/cm<sup>3</sup>



[b] 0.586~0.604g/cm<sup>3</sup>

Fig. 7 Effect of Hwasung rough rice temperature on output voltage at indicated moisture content levels.

화성벼를 이용하여 주위온도를 17°C, 시료의 산물 밀도를 비슷한 2수준인 0.530~0.572g/cm<sup>3</sup> 및 0.586~0.604g/cm<sup>3</sup>으로 유지한 다음 각각의 산물밀도 수준에서 시료의 온도를 5~42°C의 범위에서 각각 4수준으로 변화시키면서 샘플홀더를 투과하는 신호의 출력변화를 나타낸 결과 그림 7에서 보는 바와 같이 각 함수율에서 시료의 온도증가에 따라 검출전압은 감소하는 경향을 나타내었다. 낮은 함수율로 갈수록 감소하는 경향이 크게 나타나고 있음을 알 수 있는

데 전반적으로 시료온도 증가에 따른 출력전압의 감소경향은 동일한 함수율 내에서 산물밀도가 일정할 때 시료의 온도가 증가하면 시료 내에 함유된 물분자의 수분 활성도가 증가하여 마이크로파 에너지의 흡수가 크게 일어나기 때문인 것으로 생각된다. 따라서 마이크로파를 이용한 함수율 측정장치의 개발에서는 이러한 시료의 온도에 대한 영향을 반드시 보정해야 할 것으로 판단된다.

다. 수분 밀도를 이용한 함수율 측정 가능성 검토

시료의 산물밀도에 따른 출력전압의 변동을 보정하기 위하여 기존의 제안된(김, 1997) 수분 밀도를 이용하였다. 수분 밀도는 다음 식(1)과 같이 함수율과 산물밀도의 곱으로 표현되기 때문에 샘플홀더내 시료의 절대적인 수분량을 나타내게 된다.

$$\rho_m = MC(decimal) \times \rho_b \dots\dots\dots (1)$$

여기서,  $\rho_m$  = 수분밀도(g/cm<sup>3</sup>)  
 MC(decimal) = 시료의 함수율  
 $\rho_b$  = 산물밀도(g/cm<sup>3</sup>)

시료의 수분 밀도에 따른 출력전압은 화성벼와 충청벼의 각각에서 그림 8에서 보는 바와 같이 거의 지수 함수적인 관계를 나타내었다. 이러한 결과는 기존의 벼, 현미, 보리 등에 대하여 회로망분석기(HP8510C)로 분석한 결과(김, 1997)인 1차의 선형 관계가 아닌 지수 함수적인 관계를 보이는 것은 샘플홀더를 투과하여 나오는 마이크로파 신호를 검파하는 쇼트키 다이오드의 전류 포화특성 때문인 것으로 생각된다.

또한 그림 8에서 알 수 있듯이 정선 상태가 다른

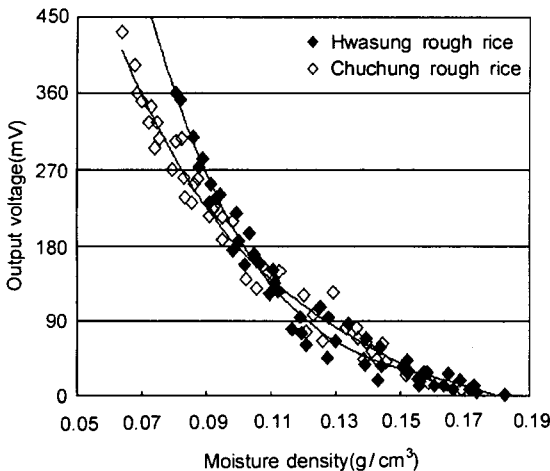


Fig. 8 Relationship between output voltage and moisture density of grain samples.

화성벼와 충청벼를 합할 경우에도 수분밀도에 따른 검파전압은 하나의 회귀식으로 표현이 가능할 것으로 생각된다. 따라서 시료의 정선상태가 다소 다르거나 혹은 품종이 다를 경우에도 수분밀도를 함수율 측정의 인자로 이용할 경우 비교적 정확한 함수율의 측정이 가능할 것으로 생각된다.

라. 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 마이크로파 출력전압에 영향을 미치는 인자로서 샘플홀더의 수분 밀도와 시료의 온도를 독립변수로 하여 출력전압을 예측할 수 있는 함수를 다음 식(2)와 같이 가정하였다.

$$v = f(e^{\rho_m}, t) \dots\dots\dots (2)$$

여기서,  $v$  = 출력전압(mV)  
 $\rho_m$  = 수분 밀도(g/cm<sup>3</sup>)  
 $t$  = 시료온도(°C)

상기 함수에서 출력전압과 수분밀도는 지수 함수적인 관계를, 출력전압과 시료온도는 일차 함수적인 관계를 가정하여 다음 식(3)과 같이 표현하였다.

$$v = a \times e^{\rho_m} + b \times t + c \dots\dots\dots (3)$$

여기서, a, b, c = 모델의 계수

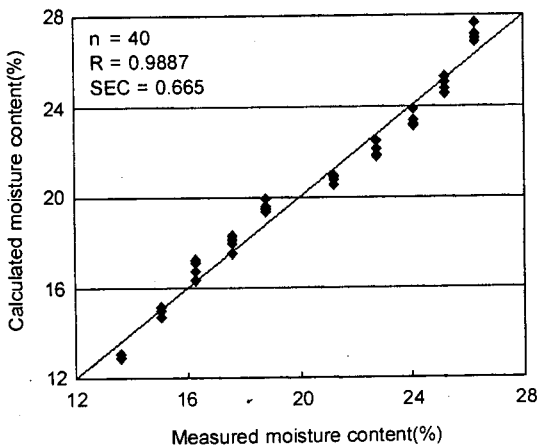
따라서 상기 식(3)의 양변에 자연로그를 취하여 다음 식(4)와 같은 모델로 변환한 다음 중회귀분석을 실시하였다. 모델의 개발에서 전체 80개의 측정 데이터 중 40개의 데이터로 모델을 개발하였으며 모델 개발에 사용되지 않은 나머지 40개의 데이터로 개발된 모델을 평가하였다.

$$V = A \times \rho_m + B \times T + C \dots\dots\dots (4)$$

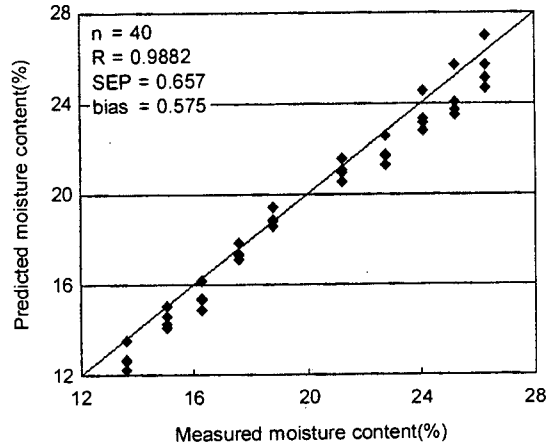
Table 1 Regression analysis expressing the moisture density( $\rho_m$ ) and logarithm of grain temperature(T) dependence of the logarithm of output voltage(V) at Hwasung rough rice and room temperature (17℃)

Regression Coefficients			R <sup>2</sup>	Root MSE
A	B	C		
-32.0615	-0.3843	8.9103	0.9809	0.1265

Regression model :  $V = A \times \rho_m + B \times T + C$



[a] Calibration



[b] Prediction

Fig. 9 Plot of measured moisture content vs. calculated and predicted moisture content by equation(5).

여기서, V = 출력전압의 자연로그 값  
 T = 시료온도의 자연로그 값  
 A, B, C = 회귀계수

여기서, MC(%) = 습량기준 함수율(%)

개발된 상기 식(5)를 이용하여 함수율의 예측값과 실측값을 비교한 결과 그림 9(b)에서 보는 바와 같이 상관계수, SEP, bias가 각각 0.9882, 0.657, 0.575의 정확도로 함수율 측정이 가능할 것으로 분석되었다.

회귀분석 결과 표 1에서 보는 바와 같이 함수율 측정 모델의 결정계수는 0.9809, RMS 오차는 0.1257로 나타나 산물밀도와 온도의 영향을 보정할 수 있는 함수율 측정이 가능할 것으로 판단되었다. 상기의 분석결과와 수분 밀도의 정의(식(1))를 이용하여 다음 식(5)와 같은 함수율 측정 속도설정식을 개발하였다.

#### 4. 요약 및 결론

본 연구는 X-band 대역의 10.5GHz 주파수를 이용하여 시료의 함수율을 측정하기 위한 마이크로파 송수신 장치를 설계·제작한 다음 함수율 범위가 각각 13.61~26.25%w.b., 12.03~26.00%w.b.인 화성벼와 추청벼를 대상으로 하여 함수율 측정장치로서의 가능성을 검토하기 위하여 수행되었다. 이를 위하여 먼

$$MC(\%) = (0.2779 - 0.0120T - 0.0312V) \times \frac{100}{\rho_b} \dots\dots\dots (5)$$

저 마이크로파 송신부의 발진기를 설계·제작하여 평가한 결과 위상잡음과 온도특성이 우수한 성능을 나타내었다. 마이크로파 신호의 수신부 검파기는 쇼트키 다이오드를 이용하여 제작하였다. 개발된 마이크로파 송수신 장치를 이용하여 벼의 함수율에 따른 마이크로파 투과특성을 측정 한 결과 함수율과 산물 밀도가 증가함에 따라 출력전압은 거의 지수 함수적으로 감소하였으며 동일한 함수율에서 시료의 온도 증가에 따라서도 대체적으로 감소하는 경향을 나타내었다. 산물밀도를 보정하기 위한 인자로서 함수율과 산물밀도의 곱으로 표현되는 수분밀도를 이용하여 출력전압과의 관계를 분석한 결과 정확도가 높은 함수율 측정이 가능할 것으로 분석되었다. 시료의 온도와 수분밀도를 독립변수로 하여 출력전압을 예측할 수 있는 모델을 개발한 다음 함수율 측정 측도 설정식으로 변환하였으며 개발된 설정식을 이용하여 함수율의 실측값과 계산값을 비교한 결과 상관계수와 SEC가 각각 0.9887과 0.665로 나타났으며 미지의 데이터를 이용하여 예측값과 실측값을 비교한 결과 상관계수와 SEP가 각각 0.9882와 0.657로 나타났다.

### 참 고 문 헌

1. 김기복. 1997. 곡류의 고주파와 마이크로파 유전 특성 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. pp. 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. 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.
8. Kraszewski, A. W. and S. O. Nelson. 1991. Density-independent moisture determination in wheat by microwave measurement. *Transaction of the ASAE* 34(4):1776-1783.
9. Miyai, Y. 1978. A new microwave moisture meter for grains. *Journal of Microwave Power* 13:163-166.
10. Nelson, S. O. and A. W. Kraszewski. 1990. Grain moisture content determination by microwave measurements. *Transaction of the ASAE* 33(4): 1303-1306.
11. Okamura, S. 1981. High-moisture content measurement of grain by microwave. *Journal of Microwave Power* 16(3&4):253-256.
12. Trinogga, L. A., G. Kaizhou and I. C. Hunter. 1991. Practical microstrip circuit design. Ellis Horwood Limited. 311-313.