

# Impedance Spectroscopy를 이용한 토양 수분함량 센서의 주요 설계인자 분석

이동훈 조용진 장영창 이규승

## Analysis of Main Design Factors for Developing a Soil Water Content Sensor Using Impedance Spectroscopy

D. H. Lee Y. J. Cho Y. C. Chang K. S. Lee

### Abstract

This study was conducted to design an impedance sensor that can measure soil water content of soils. Partial least square regression (PLSR) was applied to soil impedance data preprocessed with a smoothing method. An optimal sub-spectrum size and wavelength range were determined by comparing the coefficient of determination ( $R^2$ ) and root mean square error (RMSE) of the PLSR models obtained using soil impedance data. Various PLS analysis. Based on the PLSR analysis, it would be concluded that the optimal spectrum measurement range was 32.0~50.0 MHz with the optimal sub-spectrum size of about 18.5 MHz.

**Keywords :** Sensor design, Impedance spectroscopy, PLSR, Soil water content

### 1. 서론

생명 산업의 세계적인 품질 경쟁력 강화 필요성과 환경적 제약 조건 증가에 발맞추어 생산시스템을 연구하는 분야에서 학문의 경계를 뛰어넘어 다양하고 전문적인 기초기술과 최첨단 기술의 도입 및 응용이 활발하게 이루어지고 있다. 이러한 노력의 일환 중에 작물 생육의 기반이 되는 토양 환경에 대한 전사적인 관리, 처방, 보전 등에 대한 기법들이 다양하게 연구 되고 있는 실정이다.

토양 환경에 대한 계획적이고 효율적인 관리를 위해서 가장 기본이 되는 것은 토양 환경에 대한 구체적이고 정확한 이해이다. 관행적으로 전문가의 식견이나 시간과 비용의 소모가 많이 발생하는 실험실 분석법에 의존하던 토양 검정의 방법이 센서기술의 발달과 더불어 공간 데이터 분석 응용(GPS,

GIS, Database) 기술과의 접목을 통해 첨단화 되어 가고 있다.

특히 토양 수분은 여러 토양 환경 요인 중 복합적 기능을 띠는 주요 인자로서 중량법, 주파수 분석법, 중성자법 등의 방법을 통해 측정이 가능하지만 결과 확인에 소요되는 시간이 길거나 고가의 장비 필요를 하는 등 현실적으로 부족한 점이 있다.

이러한 토양 수분함량 측정을 위한 관행의 방법이 가지는 단점을 보완하기 위한 다양한 연구가 국내외에서 시도되었으며(Oh et al., 1998; Kim et al., 2003; Jackson et al., 2008), 측정방법론과 아울러 측정된 결과의 보정을 위한 다양한 연구가 수행되었다. 관련 연구로는 정전용량식 수분센서의 보정을 위해 자연 대수적인 보정식을 설정하여 검증한 연구(Morgan et al., 1999)와 TDR(Time-Domain Reflectometer)센서의 보정을 위하여 토양의 상태 및 토양에 함유되어 있는 수분의 양

태에 따라 회귀모델을 보정하는 연구(Quinones et al., 2003) 등이 있었다.

토양 내 수분을 측정하기 위한 다양한 방법 중에서 토양 함수율 변이에 따른 유전율의 변화를 impedance spectroscopy를 통하여 측정하고 응답주파수로부터 토양 함수율을 추정하는 것은 비교적 효과적인 방법으로 알려져 왔다(Kim et al., 2003). Impedance spectroscopy는 작은 진폭의 교류 신호에 대한 전극의 응답 신호를 여러 범위의 주파수 영역에 걸쳐 조사한 신호로서, 기존에 사용되고 있는 장비들은 대부분 해외 수입에 의존하고 있다.

Impedance spectroscopy를 이용한 측정법은 고주파 영역의 측정에 필수적인 고주파 회로의 안정성 확보 및 노이즈 및 에러 감소를 위한 정밀 전자회로로 인하여 매우 고가의 impedance analyzer를 필요로 하며 실외 운용에 부적합한 점이 있다. 따라서 impedance spectroscopy를 기반으로 효과적인 토양 수분함량의 현장 측정을 위해서는 impedance analyzer를 대체하여 현장에서 운영이 가능한 저가, 고효율의 센서가 필요한 실정이다.

Impedance를 측정하는 장비로서 실제 현장에 지참이 가능한 형태를 취하기 위해선 무엇보다 장비의 부피 및 비용에 가장 큰 영향을 끼치는 요소인 고주파 발진회로의 경량화 및 저가화가 필수적이다. 또한 기존의 토양함수 측정법은 토양의 특성에서 기인되는 측정 오차가 많으며 측정 가능한 주파수 대역 모두를 측정하여 회귀모델에 대입, 분석하여 함수율을 추정하기 때문에 측정시간이 길고 주파수 대역 오차에 약한 단점이 있다. 이러한 단점은 주파수 대역 측정 자료를 구한 후 적절한 자료 전처리 방법을 선정함으로써 토양특성에 기인한 오차를 줄이고, 모든 주파수 대역을 사용하지 않고 회귀 모델에 적합한 최적의 주파수 대역을 결정함으로써 크게 감소시킬 수 있다.

본 연구의 목적은 impedance spectroscopy를 이용한 토양 수분 함량 측정센서의 개발을 위한 기초 연구로서 spectroscopy로 얻어진 측정 자료의 적합한 전처리 방법을 선정하고, 고주파 발진회로의 현실화를 위한 최적의 주파수 대역을 결정함으로써 센서 설계의 주요 인자를 제시하고자 하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 가. 토양 공시 재료 및 실험 환경

본 연구에서 사용된 토양은 생황토와 모래를 구입하여, 염분이 포함되지 않도록 흐르는 물에 3회 씻어 상온 통풍하여 완전히 건조하였다. 0.25 mm와 0.5 mm 체를 이용하여 황토, 모래를 각각 0.25~0.5 mm 사이의 입자토양만 선별하였으며, 동일질량비로 1:1 비율로 섞어 만들었다. 입정에 의한 토양의 분류표에서 미국 농무부법에 따르면 0.25~0.5 mm 사이는 중모래(medium sand)로 분류되어 있다. 미국 농무부법에 구분된 중모래의 범위에서 토성의 입자를 중모래로 고정시켜 토성의 요인 인자 없이 동일한 토성에서 실험을 하고자 위와 같이 분류하였다.

그림 1은 바닥에 반경 4 mm의 드릴로 토양통 바닥에 구멍을 50 mm마다 내고 거즈를 2겹 겹쳐서 깔고 완전히 건조한 토양시료를 자를 이용하여 표면을 평평하게 만들어 뚜껑을 닫은 후, 더 큰 용기에 담고 증류수를 부어 바닥에서부터 물을 흡수하여 토양시료의 포화용량까지 흡수할 수 있도록 2시간 상온에 놔두었다. 그 후 용기로부터 토양통을 꺼내어 증류수가 다 떨어질 때 까지 기다렸다가 상온보관 시켰으며 이때 부터 시간을 재었다.

위와 과정을 통하여 11개 수준의 토양 함수비를 조성하였다. 최대수분함수비를 가진 토양으로 시작하여 다양한 함수비를 조성하고자 48시간 간격으로 토양통을 2개씩 닫아 22일 동안 함수비를 조절하였다. 시료조제 중 토양 시료의 온도와 방의 온도는 18~25℃ 사이였고, 방의 습도범위는 40~90% 사이였다. 조성한 토양시료들의 수분함량 범위는 4~22%의 범위였으며 토양의 수분함량들은 토양 시료를 105℃ 24시간 공기 오븐건조법을 이용하여 결정하였으며, 실험당일의 토양 온도는 24℃이었으며, 방의 습도는 55%이었다.

### 나. 고주파 임피던스 측정시스템

본 연구에서 토양 수분 함량을 측정하기 위하여 사용한 고주파 임피던스 측정시스템은 1 MHz ~ 3 GHz의 측정범위를 가

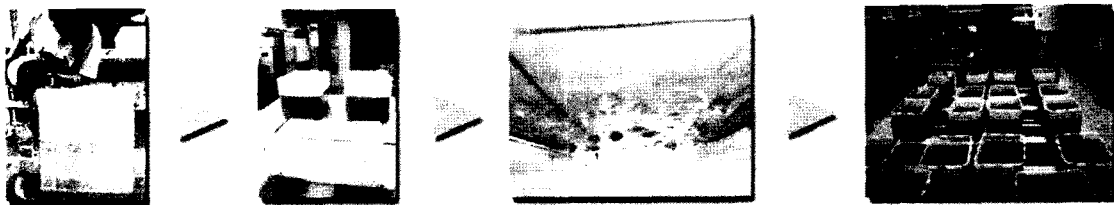


Fig. 1 Procedure for preparing soil samples.

**Table 1** Specification of experimental conditions

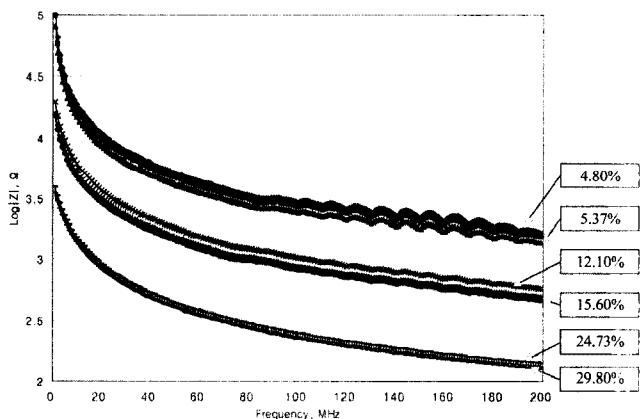
Temperature	Humidity	Soil particle size	Range of soil water content	No. of sample
24°C	55%	0.25~0.5 mm medium sand	4~22%	44

지는 RF(Radio Frequency) 임피던스 측정기(Model E4991A, Agilent Inc., USA)로서 구체적인 사양은 다음의 표 2와 같다. 해당 임피던스 측정기를 통해 3개의 주요 인자(임피던스  $|Z|$ , 위상차  $\theta_z$ , 공진저항 R)를 측정하였다.

**Table 2** Specification of the E4991A RF impedance analyzer

Model	Frequency (Hz)	Basic impedance accuracy	Measurement parameters
E4991A	1 M ~ 3 GHz	±0.8%	$ Z $ : Impedance absolute value $\theta_z$ : Impedance phase R : Resonance resistance

위의 계측 장치를 사용하여 토양수분별 취득한 impedance spectrum은 그림 2와 같다.



**Fig. 2** Impedance spectrum response from 4.8% to 29.8% (db) water content.

#### 다. Impedance spectroscopy 분석

주파수대역 200 Hz부터 120 MHz사이에서 4개의 전극을 이용하여 전도율(conductivity)을 수분함량, 염도도, 토성, 토양밀도에 따른 측정이 이루어졌고, PLS model을 이용하여 수분함량과의 상관계수 0.89를 구하였다(Zhang et al., 2004). 이에 따라 충분한 범위에서 측정하고자 200 MHz까지 spectrum을 획득하였다. 고주파 Impedance 측정시스템으로부터 획득한 spectrum은 1~200 MHz의 범위이며 측정 간격은 0.5 MHz로서 1회 측정에 대한 결과는 총 400개의 응답 spectrum으로 구성되어있다.

##### 1) 기본 데이터 분석

Impedance spectrum과 같이 다변량 회귀분석을 수행하는 대

표적 방법은 MLR(Multiple Linear Regression), PCR(Principal Component Regression), PLSR(Partial Least Square Regression)가 있다. 일반적으로 impedance spectrum analysis에서는 회귀모델 해석이 상대적으로 어려우나 모델의 성능이 우수한 PLSR 모델을 이용(Lee et al., 2007)한다. 본 연구에서도 PLSR 모델과 기존의 중량법에 의해 측정된 토양 수분함량 계측 결과와의 상관성 분석을 수행하였다. 분석 소프트웨어로서 Unscrambler 9.1(CAMO Inc., Norway)을 사용하였다.

본 연구에서는 PLSR 분석을 수행하고 중량법에 의한 수분함량과 PLSR 회귀 모델에 의한 예측 수분함량에 대한 회귀분석을 하여 두 변량간의 결정계수  $R^2$ (determinant coefficient)와 오차의 평균 RMSE(root mean squared error)을 얻었다. PLSR 회귀분석에 의해 생성된 초기 모델에 대하여 샘플 군을 테스트 군과 검증 군으로 나누어 교차하여 검증하는 방식을 cross-validation이라 한다. PLSR 분석을 위해 구해진 44개의 샘플에 대하여 무작위(random)에 의한 5개의 군으로 고르게 나눈 후 그 중 4개의 군으로 샘플 군을 구성하여 PLSR모델을 생성하고 나머지 1개의 군으로 검증하는 cross-validation을 수행하였다.

이러한 검증 방법을 통하여 적합한 PCs(number of principle components) 값을 선정하고 다시 샘플 군에 적용하여 계산한 결정계수와 오차의 평균을 얻어  $R_{cv}^2$ (determinant coefficient of cross-validation),  $RMSE_{cv}$ (root mean squared error of cross-validation)로 표시하였다. 또한 예측 값 변이의 정도에 대한 입력 값의 변이의 정도인 RPD(ratio of prediction to deviation)값을 기준으로 하여 모델의 성능 평가를 하였다.

표 3은 예비실험을 통하여 impedance 측정시스템이 측정할 수 있는 20개의 계측 인자들 중에서 임피던스  $|Z|$ , 위상차  $\theta_z$ , 공진저항 R에 대해 회귀모델로부터 도출된  $R_{cv}^2$ 와 RPD 값을 보여주고 있다. 표로부터 임피던스가 가장 높은 값을 보이고  $RMSE_{cv}$  값이 가장 작은 값을 보였기 때문에 본 연구에서는 분석의 단순함과 효율을 위해서 임피던스 절대 값  $|Z|$ 를 사용하여 회귀모델을 분석하였다.

**Table 3** Result statistics of PLSR analysis about all parameters from device

Parameter	$R^2$	RMSE	$R_{cv}^2$	$RMSE_{cv}$	RPD	PCs
$ Z $	0.9457	1.5522	0.9411	1.6174	4.1686	2
$\theta_z$	0.9125	1.9710	0.9072	2.0304	3.3208	2
R	0.5158	4.6368	0.4462	5.1081	1.3199	2

PLSR 모델을 기준으로 토양수분함량의 추정을 비교 검증하기 위한 기존 측정 방법 중에서 중량법에 의하여 측정된 토양 샘플의 함수량에 대한 실험 결과는 표 4와 같다. 이 추정 검증 실험은 1회 실험에 3~4개의 샘플의 수를 취하여 총 11회의 실험을 수행하였으며, 전체 실험에서 샘플의 수는 총 43개였다. 표 4에서 보는 바와 같이 토양 샘플들의 함수량은 4.14%부터 22.09%까지 고르게 분포 하고 있다.

**Table 4** Water contents in soil samples measured with dry oven method

Serial number of experiment	Serial sample number in total samples	Water content (%)
1	1	4.14
2	6	4.81
4	12	3.12
8	28	12.92
11	42	22.09

### 2) 전처리 방법

토양 샘플로부터 취득한 spectrum data의 통계적 회귀모델을 만들기 전에 수행하는 전처리 과정은 계측 장치로부터 발생 가능한 잡음이나 예측 불가능한 요인에 기인하는 오류에 대한 모델의 성능 저하를 최소화하기 위하여 필수적이다.

이러한 전처리의 방법에는 smoothing, normalization, Savitzky-Golay derivatives(Cozzolino et al., 2003; Mouazen et al., 2005) 등이 있다. 특히 Mouazen의 연구에서는 토양의 속성에 따라 전처리 과정을 다르게 적용하면서 토양 속성 별로 적합한 전처리 과정을 제시하기도 하였다. 본 연구에서도 각기 다른 전처리 과정을 조합하여 성능의 향상 정도를 추적하는 연구를 수행하였다.

이와 같은 전처리 과정에 있어서 과정의 종류, 과정의 순서, 입력 매개변수에 따라 회귀모델의 성능이 차이를 보일 수 있다(Dalal et al., 1986). 본 연구에서는 예비 실험을 통하여 회귀모델의 대표적인 성능의 지수로 사용할 수 있는  $R_{cv}^2$ ,  $RMSE_{cv}$  등을 기준으로 PLSR 모델에 적합한 전처리 과정을 선정하였다.

Smoothing은 moving average 방법과 Savitzky-Golay 방법이 있으며 기초 분석을 통해 상대적으로 우수한 성능을 보이는 moving average 방법을 선정하였다. Moving average는 식 1에 의해 구해진다.

$$M_i = \frac{X_i + X_{i-1} + X_{i-2} + \dots + X_{i-N-1}}{N} \quad (1)$$

where  $N$  is segment size

$X_i$  is spectrum value at  $i$ th wavelength

$M_i$  is moving average value at  $i$ th wavelength

Normalization 방법은 mean normalization, maximum normalization, range normalization으로 세 가지 방법이 있으나 식 2와 같이 스펙트럼 데이터가 처리에 용이한 range normalization 방법(식 2)을 선정하였다.

$$X(i, k)' = \frac{X(i, k)}{Max(Abs(X(i, *))) - Min(Abs(X(i, *)))} \quad (2)$$

where  $i$  and  $j$  represent sample sequences

$k$  represents wavelength sequence

$X(i, k)'$  is the range normalized spectrum

$X(i, k)$  is the spectrum of sample

$Max(Abs(X(i, *)))$  is a max. absolute spectrum value at  $i$ 'th sample

$Min(Abs(X(i, *)))$  is a min. absolute spectrum value at  $i$ 'th sample

또한 2차원 미분을 수행하기 위하여 Savitzky-Golay 계수(2nd order)를 사용하였다. Savitzky-Golay 계수는 일반적으로 한 변수의 좌측, 우측 폭을 지정하고 그 범위내의 값들과 위치별 가중치간의 곱의 합을 계산하여 smoothing을 수행하는 filter이며 이 filter를 정의하는 행렬의  $n$ 번째 계수로부터  $n$ 차원 미분을 수행할 수 있다.

본 연구에서는 smoothing, normalization, derivatives의 3가지 전처리 방법에 대하여 각기 한 가지씩 독립적인 처리방법에 대하여 PLSR 모델을 분석하고 전처리를 하지 않는 경우와 비교하였다. 또한 선정된 전처리 방법을 동시에 사용하되 순서를 바꾸어 보는 방식을 취하여 비교 분석하였다. 개별 전처리에 의한 모델의 성능이 전처리를 하지 않는 PLSR 모델보다 모두 우수한 경우에 대하여 분석 가능한 PLSR 모델의 경우의 수는  $9(3!)$ 가지였으며 모든 경우의 수를 분석하였다.

### 3) 스펙트럼 분리 방법

일반적으로 모든 주파수 대역을 사용하지 않고 PLSR 회귀 모델에 적합한 최적의 주파수 대역을 결정하고자 1 MHz~200 MHz에 해당하는 응답 주파수 영역 중에서 가장 반응성이 우수한 영역을 탐색하였다. 10 MHz부터 50 MHz까지 5 MHz 간격으로 인접한 소구간의 영역을 설정한 후에 각 소구간의 크기에 대하여 시작 주파수 값을 변화시켜가며 전체 스펙트

럼 영역에 대하여 PLSR 모델의 성능을 나타내는 주요인자인  $R^2$ , RMSE,  $R_{cv}^2$ ,  $RMSE_{cv}$ , PCs, 그리고 RPD를 분석하여 최적 주파수를 결정하고자 하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 가. 전처리 기법에 대한 PLSR모델의 전처리 기법의 결정

표 5는 전처리를 하지 않았을 때와 smoothing, normalizing, derivatives를 적용하였을 때, 그리고 smoothing 후 normalizing, normalizing 후 smoothing 등과 같은 복합 처리에 대한 주요 분석인자의 결과 값을 보여주고 있다.  $R_{cv}^2$ , RPD값이 높게 나타나고  $RMSE_{cv}$  작을수록 회귀모델의 성능이 상대적으로 우수하며, 한편 PCs값이 다를 경우 PCs 크기를 동일하게 맞추어야 회귀모델 간의 성능 비교가 가능한 점에 비추어 볼 때, smoothing 전처리 방법 하나만을 단독으로 수행하는 것이 PLSR 모델의 성능 향상이 가장 좋은 것으로 나타났다.

**Table 5** Result statistics of PLS regression analysis for various preprocessing method

Preprocessing method	$R^2$	RMSE	$R_{cv}^2$	$RMSE_{cv}$	RPD	PCs
No preprocessing	0.9457	1.5522	0.9411	1.6174	4.1686	2
Smoothing	<b>0.9549</b>	<b>1.4150</b>	<b>0.9453</b>	<b>1.5590</b>	<b>4.3247</b>	<b>2</b>
Normalizing	0.9468	1.5380	0.9422	1.6022	4.2081	2
Derivatives	0.9263	1.8093	0.9179	1.9107	3.5288	2
1 : Smoothing 2 : Normalizing	0.9538	1.4317	0.9440	1.5772	4.2750	2
1 : Normalizing 2 : Smoothing	0.9538	1.4317	0.9440	1.5773	4.2747	2

#### 나. PLSR 모델을 위한 spectrum의 최적 구간크기 결정

Impedance spectrum에서 wavelength 소구간의 크기를 지정하고 전체 스펙트럼 영역에 대하여 범위를 변화시켜가며 PLSR 분석을 수행한 후 도출한 각 PLSR 모델의 주요 성능 변화를 분석하였다.

먼저 회귀모델 분석을 위한 입력 주파수의 소구간 크기를 10 MHz로 하여 1 MHz부터 190 MHz까지 총 190가지의 PLSR모델을 만들고 그에 따른 모델의 성능 지수를 구하였다. 표 6은 총 측정 주파수 범위에서 초기 영역부분을 사용한 모델의 결과를 보여주고 있다. 표 7은 이와 마찬가지로 초기 영역 부분에 대하여 입력 주파수의 소구간 크기를 50 MHz로 하여 분석한 총 150가지 경우에 대한 PLSR모델의 분석 결과를 보여주고 있다.

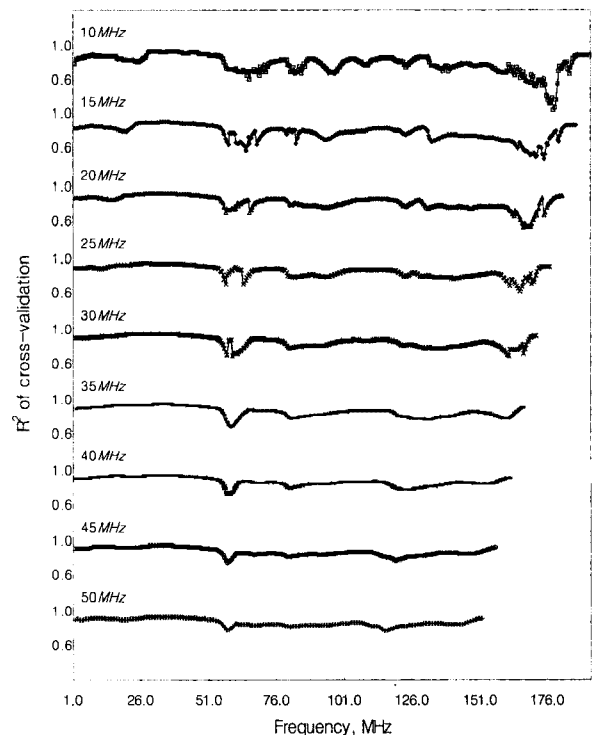
**Table 6** Result statistics of PLSR analysis with sub-spectrum of 10 MHz range

Sub-spectrum range (MHz)	$R^2$	RMSE	$R_{cv}^2$	$RMSE_{cv}$	RPD	PCs
1~11	0.9032	2.0737	0.8961	2.1503	3.1356	2
2~12	0.9309	1.7521	0.9228	1.8522	3.6401	2
3~13	0.9277	1.7920	0.9194	1.8926	3.5625	2
4~14	0.9309	1.7518	0.9234	1.8441	3.6562	2

**Table 7** Result statistics of PLSR analysis with sub-spectrum of 50 MHz range

Sub-spectrum range (MHz)	$R^2$	RMSE	$R_{cv}^2$	$RMSE_{cv}$	RPD	PCs
1~51	0.9514	1.4685	0.9464	1.5427	4.3705	2
2~52	0.9521	1.4578	0.9471	1.5329	4.3985	2
3~53	0.9523	1.4552	0.9472	1.5315	4.4025	2
4~54	0.9518	1.4633	0.9466	1.5397	4.3790	2

이러한 방식으로 구한 여러 가지 PLSR 모델들의 전반적인 변화 양상을 파악하고자 각 구간의 크기에 따른 모델의 성능 지수 중에서 대표적으로  $R_{cv}^2$ 값의 변화를 하나의 그래프에 도시한 그림 3은 spectrum 소구간의 크기와 시작 주파수를 변경하면서 PLSR 분석을 수행하고 각 회귀모델의  $R_{cv}^2$ 의 변화를 비교 가능하게 도시한 그래프이다. 그림에서 x축은 각 소구간의 시작 주파수 값이며 y축은 개별 소구간에 대한 PLSR 모델의  $R_{cv}^2$ 값을 순서대로 도시한 것이다.



**Fig. 3** Comparison of  $R_{cv}^2$  for various sub-spectrum sizes.

이 비교 그래프에 따르면 입력 주파수 구간이 작을수록 회귀 모델의 성능의 변이가 크고 반대로 입력 주파수 구간이 커질수록 회귀모델의 성능의 변이가 상대적으로 적어짐을 알 수 있다.

이 중에서 가장 성능이 우수한 모델을 찾기 위하여 각 입력 주파수 소구간의 크기 별로  $R_{CV}^2$ 와 RPD의 최대값과 최소값을 표 8과 같이 정리하였다. 표 8의 분석에 따르면 입력 주파수의 소구간 크기가 20 MHz인 경우에 가장 우수한 회귀 성능을 보였으며, 한편으로 최소값을 살펴보면 소구간의 크기가 큰 경우보다 회귀 성능이 작게 나타남을 확인할 수 있다. 이를 통하여 회귀 성능이 가장 우수한 소구간의 크기는 20 MHz인 경우로 판단하였다.

**다. PLSR 모델을 위한 소구간 spectrum의 최적 주파수 영역 결정**

선행된 분석을 통하여 spectrum의 소구간의 크기는 20 MHz인 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 20 MHz의 크기에 해당하는 주파수 소구간을 가질 때, 전체 측정영역 중에서 어떤 주파수 영역에서 PLSR 모델의 성능 향상이 가장 우수한 회귀 성능을 보이는지 결정하고자 각 모델에 대해 그림 4와 같이  $R_{CV}^2$ 을 도시하여 분석하였다. 그림에서 보는 바와 같이, 31~50 MHz 구간에서  $R_{CV}^2 = 0.9645$ 로 가장 높은 결정 계수를 보이고 있다.

이러한 분석을 바탕으로 31~50 MHz 구간에서 보인 회귀 모델의 성능을 비교 분석하기 위해서 인접한 영역에 대한 회귀모델의 성능을 표 9에 정리하였다. 표에 보는 바와 같이

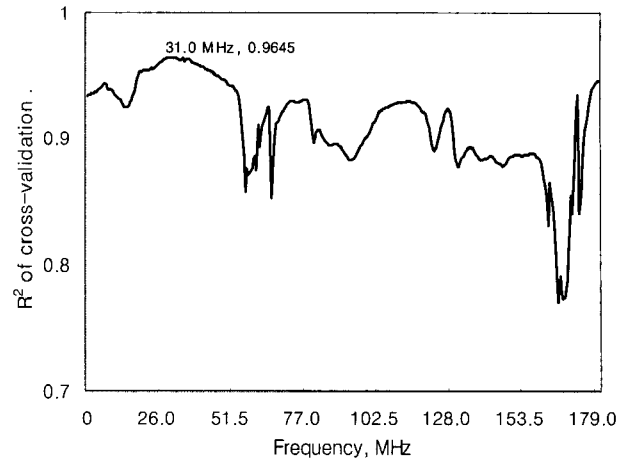


Fig. 4 Distribution of  $R_{CV}^2$  for 20 MHz sub-spectrum size.

$R_{CV}^2$ 와 RPD값이 최대이며  $RMSE_{CV}$ 값이 최소인 구간이 30.5~50.0 MHz임을 확인 할 수 있으며 근소한 차이지만 31.0~50.5 MHz 구간에서도 우수한 회귀 성능을 보임을 확인할 수 있다.

본 연구에서는 모델링을 통한 토양함수율의 추정속도를 높이기 위해 가능한 상기의 영역 내에서 더 우수한 회귀 성능을 보이는 더 작은 영역이 존재하는지 결정하고자 하였다. 따라서 해당 소구간의 크기를 20 MHz보다 작게 입력 주파수의 범위를 미세 조절해가며 인접한 주파수 영역의 회귀 모델의 성능 변화를 분석하였으며 그 결과를 표 10에 요약하였다.

이 결과를 분석하여 보면 32.0~49.5 MHz 영역 및 이를 포함하는 인접한 주파수 영역을 입력으로 분석한 회귀모델의 경우  $R_{CV}^2$  이 0.9646로서 보다 안정적으로 나타났다. 특히 RPD

Table 8 Comparison of regression performance for various sub-spectrum sizes

Sub-spectrum size (MHz)	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Max of $R_{CV}^2$	0.964	0.964	<b>0.965</b>	0.963	0.962	0.962	0.962	0.962	0.961
Min of $R_{CV}^2$	0.629	0.758	<b>0.771</b>	0.804	0.837	0.837	0.851	0.869	0.881
Max of RPD	5.346	5.353	<b>5.370</b>	5.267	5.175	5.169	5.164	5.158	5.154
Min of RPD	1.554	1.996	<b>2.089</b>	2.278	2.500	2.506	2.620	2.795	2.927

Table 9 Result statistics of PLSR analysis in the frequency range of 29.5~51.5 MHz for sub-spectrum of 20 MHz range

Sub-spectrum range (MHz)	$R^2$	RMSE	$R_{CV}^2$	$RMSE_{CV}$	RPD	PCs
29.5~49.0	0.9667	1.2167	0.9642	1.2601	5.3509	2
30.0~49.5	0.9668	1.2147	0.9644	1.2574	5.3621	2
30.5~50.0	<b>0.9669</b>	<b>1.2131</b>	<b>0.9645</b>	<b>1.2555</b>	<b>5.3703</b>	2
31.0~50.5	<b>0.9668</b>	<b>1.2135</b>	<b>0.9645</b>	<b>1.2555</b>	<b>5.3702</b>	2
31.5~51.0	0.9667	1.2162	0.9644	1.2582	5.3587	2
32.0~51.5	0.9665	1.2198	0.9641	1.2623	5.3414	2

**Table 10** Result statistics of PLSR analysis with sub-spectrums from 20.5 MHz to 16.5 MHz range for minor tuning of sub-spectrum size

Sub spectrum size (MHz)	Calibration range (MHz)	$R_{cv}^2$	RPD
20.5	30.5~50.5	0.9645	5.3669
20.0	30.5~50.0	0.9645	5.3703
19.5	31.0~50.0	0.9646	5.3739
19.0	31.5~50.0	0.9646	5.3755
<b>18.5</b>	<b>32.0~50.0</b>	<b>0.9646</b>	<b>5.3763</b>
18.0	32.0~49.5	0.9646	5.3749
17.5	32.0~49.0	0.9645	5.3730
17.0	32.0~48.5	0.9645	5.3709
16.5	32.5~48.5	0.9644	5.3644

수치가 5.3763으로 가장 큰 값을 보이는 32.0~50.0 MHz 영역에서 상대적으로 가장 우수한 회귀 성능을 보임을 알 수 있다.

이를 통하여 표 3에 기술된 바와 같이 전처리를 수행하지 않고 전체 주파수 영역을 입력으로 하여 분석한 PLSR 모델의 성능 평가지수( $R_{cv}^2=0.9411$ ,  $RPD=4.1686$ )에 비하여 적정 주파수 대역의 선정을 통한 PLSR 분석을 통해 회귀 모델의 성능 향상이 이루어짐을 알 수 있었다. 즉 PLSR 모델 분석을 통하여 토양 수분함량을 예측함에 있어 계속 장비로부터 입력된 200 MHz에 달하는 모든 주파수 영역을 이용하는 방식에 비하여 입력 주파수 구간의 크기와 영역을 조절하여 최적의 주파수 구간을 탐색한 후 이를 입력으로 하는 회귀 모델 분석을 통해서 회귀 모델의 성능을 충분히 확보할 수 있음을 확인할 수 있다.

#### 4. 요약 및 결론

본 연구에서는 impedance spectroscopy를 이용한 토양 수분 함량 측정센서의 개발을 위한 기초 연구로서 impedance spectroscopy로 얻어진 측정 자료의 적합한 전처리 방법을 선정하고, 고주파 발진회로의 간소화를 위한 최적의 주파수 대역을 결정함으로써 센서 설계의 주요 인자를 제시하고자 하였다. 따라서 토양 내의 수분 함량과 높은 상관성을 보이는 1~200 MHz 범위에 해당하는 spectrum 데이터 대한 PLSR 회귀 모델 분석을 수행하였다. 이러한 내용을 정리하면 다음과 같다.

- (1) Spectrum 데이터 대한 회귀모델 분석을 위한 전처리는 moving average 기법을 이용한 smoothing 방법으로 충분하였다.

- (2) 토양 함수율 예측을 위한 회귀모델로 PLSR 모델을 사용하였으며 측정 주파수의 전 구간에 대하여 약 30~51 MHz인 주파수 영역에서 생성한 회귀 모델의 성능이 우수한 것으로 나타났다.
- (3) 측정 주파수의 영역이 32.0~50.0 MHz인 구간에서  $R_{cv}^2=0.9646$ ,  $RPD=5.3763$ 으로 가장 우수한 회귀 성능을 보여 기존의 회귀모델의 성능( $R_{cv}^2=0.9411$ ,  $RPD=4.1686$ )을 충분히 개선할 수 있었다.
- (4) 본 연구를 통하여 선정된 최적의 주파수 영역의 크기는 18.5 MHz이며 범위는 32.0~50.0 MHz로 나타났다. 따라서 3 GHz까지 측정 가능한 정밀 고주파 발진회로에 비하여 간단한 구성으로 센서를 설계할 수 있으며 데이터 처리 속도 또한 소형 MCU(Micro Controller Unit)만으로 충분하다고 판단하였다.

#### 참고문헌

1. Cozzolino, D. and A. Morón. 2003. The potential of near-infrared reflectance spectroscopy to analyse soil chemical and physical characteristics. *J. Agri. Sci.* 140:65-71.
2. Dalal, R. C. and R. J. Henry. 1986. Simultaneous determination of moisture, organic carbon, and total nitrogen by near infrared reflectance spectrophotometry. *Soil Sci. Soc. of Am. J.* 50:120-123.
3. Jackson T., K. Mansfield, M. Saafi, T. colman and P. Romine. 2008. Measuring soil temperature and moisture using wireless MEMS sensors. *Measurement* 41:381-390.
4. Kim, K. B., S. C. Kim, D. S. Joo and D. J. Yoon. 2003. Precision measurement of water content in soil using dual RF impedance changes. *J. of KSAM* 28(4):369-376. (In Korean)
5. Lee, K. S., D. H. Lee, K. A. Sudduth, S. O. Chung and S. T. Drummond. 2007. Wavelength selection for reflectance estimation of surface and subsurface soil properties. *ASABE Conference Paper No. 071046*. ASABE, St. Joseph, Mich.
6. Morgan K. T., L. R. Parsons, T. A. Wheaton, D. J. Pitts and T. A. Obreza. 1999. Field calibration of a capacitance water content probe in fine sand soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63:987-989.
7. Mouazen, A. M., J. De Baerdemaeker and H. Ramon. 2005. Towards development of on-line soil moisture content sensor using a fibre-type NIR spectrophotometer. *Soil Till. Res.* 80:171-183.
8. Oh, Y. T., D. S. Oh, K. C. Song, J. S. Shin and J. N. Im. 1998. Application of dielectric sensor for soil moisture measurement. *J. Soil Sci. Fert.* 31(2):85-94. (In Korean)
9. Quinones H, P. Ruelle and I. Nemeth. 2003. Comparison of three calibration procedures for TDR soil moisture sensors. *Irrig. and Drain.* 52(3):203-217.