

원추 관입형 임피던스 수분센서 개발을 위한 기초 연구

이동훈 이규승 정선옥

Basic Study for Cone Penetrometer Type Soil Water Content Sensor using Impedance Spectroscopy

D. H. Lee K. S. Lee S. O. Chung

Abstract

This study was conducted to design an cone penetrometer type impedance sensor that could measure soil water content in realtime. The best width between electrical probe was determined as 5 mm. For optimization about realtime application device, linear regression analysis was applied between soil water content and impedance signal. It was concluded that proper combination of excitation frequency, impedance parameter, and model would provide acceptable performance of a soil water content sensor. Best model was obtained at a 36.5 MHz with $|Z|$ as a predictor variable, with a coefficient of determination of 0.96 (RMSE=1.35, RPD=4.98).

Keywords : Soil sensor, Sensor design, Impedance spectroscopy, Soil water content, Cone penetrometer

1. 서론

토양 수분은 여러 토양 환경 요인 중 주요 인자로서 작물 생육, 수확량, 품질에 큰 영향을 미치기 때문에 토양수분 함량 측정은 수분관리를 위해 필수적인 요소이다. 일반적으로 토양수분은 토양의 용적수분함량(%)이나 토양수분장력(kPa)으로 나타낸다. 수분함량을 측정하는데 전통적으로 오븐건조법을 사용되어 왔으나 토양샘플채취 및 분석의 비용과 시간을 최소화하기 위하여 현장에서 직접 빠르게 측정하는 센서가 다양하게 개발·이용되고 있다. 문헌에 따르면, 토양의 수분함량을 측정하는 방법에는 석고블럭 내에 설치된 전극판의 전기저항변화를 이용하는 방법, 중성자 산란을 이용한 방법, 발전회로에서 송신된 신호가 토양과 간섭한 후 수신된 신호의 주파수 특성으로 토양 정전용량 또는 임피던스를 측정하여 수분을 구하는 주파수영역법(frequency domain reflectometry) 센서, 신호의 송수신 시간으로 토양유전상수를 측정하는 시간영역법(time domain reflectometry) 센서 등이 있다(Soil Sci-

ence Society of America, 2002).

하지만, 중량법, 중성자법 등의 방법은 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 실시간 저가 측정방법론과 아울러 예측된 결과의 토양 조성비, 온도, 밀도 보정에 관한 연구가 국내외에서 시도되었다(Oh et al., 1998; Kim et al., 2003; Jackson et al., 2008). 정전용량식 수분센서의 보정을 위해 자연 대수적인 수식을 설정하여 검증한 연구(Morgan et al., 1999)와 TDR(Time-Domain Reflectometer)센서에 대하여 토양 상태 및 토양에 함유되어 있는 수분에 따라 회귀 모델을 보정하는 연구(Quinones et al., 2003)등이 있었다. 토양 내 수분을 측정하기 위한 다양한 방법 중에서 토양 함수율 변이에 따른 유전율의 변화를 임피던스(impedance spectroscopy)를 통하여 예측하고 응답주파수로부터 토양 함수율을 추정하는 것은 비교적 효과적인 방법으로 알려져 왔다(Kim et al., 2003).

This study was financially supported by research fund of Chungnam National University in 2007. The article was submitted for publication on 2009-11-27, reviewed on 2009-12-09, and approved for publication by the editorial board of KSAM on 2009-12-15. The authors are Donghoon Lee, Research Associate, KSAM member, Kyouseung Lee, Professor, KSAM member, Sungkyunkwan University, Suwon, and Sun-Ok Chung, Assistant Professor, KSAM member, Chungnam National University, Daejeon, Korea. Corresponding author: S. O. Chung, Assistant Professor, Dept. of Bioindustrial Machinery Engineering, Chungnam National University, Daejeon, Korea; Tel: +82-42-821-6712; E-mail: <sochung@cnu.ac.kr>.

본 논문은 토양강도를 측정하는 원추관입기(ASAE Standards, 2005)에 임피던스 방식의 수분센서를 통합하기 위한 기초연구로 수행되었다. 원추관입기에 수분센서를 통합하면 토양수분의 영향을 크게 받는 토양강도 자료를 해석하고 활용하는데 유용할 것이며, 작물이 자라는 토양근권 깊이까지 토양수분을 측정할 수 있을 것이다. 본연구와 관련하여 Lee 등(2008)은 토양수분 함량에 따른 임피던스 측정 데이터의 전처리 방법 및 최적 주파수 대역 선정에 관한 연구에서 32~50 MHz범위의 주파수 대역에서 토양 함수율 측정을 위한 PLSR 모델이 가장 안정적인 성능을 보임을 밝혀내었다. 본 연구의 목적은 Lee 등(2008)의 연구와 달리 실제 수분센서 제작 및 저가 보급을 위하여 단일주파수, 단일파라미터 측정으로 수분센서 제작 가능성을 고찰하기 위하여 실시하였으며, 원추관입기 원추부 상단에 설치하고자 하는 수분측정 전극 간격을 결정하고, 임피던스 측정기를 이용하여 수분측정을 위한 임피던스 관련 파라미터와 적정 주파수 대역을 탐색하는데 있었다.

2. 재료 및 방법

가. 토양 공시 재료 및 실험 환경

본 연구에서 사용된 토양은 Lee 등(2008)이 사용한 같은 샘플에 대한 데이터를 사용하였다. 토양 공시 재료는 생황토와 모래를 구입하여 0.25 mm, 0.5 mm체를 이용하여 황토, 모래를 각각 0.25~0.5 mm 사이의 입자토양만 선별하였으

며, 동일질량비로 1:1비율로 섞어 공시토양을 조제하였다. 조제된 공시토양에 수분함량을 조절하기 위하여 플라스틱 용기에 토양시료를 표면을 평평하게 만들어 투입한 후, 더 큰 용기에 담고 증류수를 부어 바닥에서부터 물을 흡수하고 다시 건조하면서 11 수준의 수분함량을 조성하였고, 11개 수준의 시료 용기 내 위치에 따라 수분함량이 2~3% 정도 차이를 보였으므로 용기별 4개 지점에서 측정하여 총 44개 수준의 수분함량 데이터를 얻었으며 각 수준에서 3반복 측정하여 평균값을 사용하였다 (Lee et al., 2008). 단, 측정값의 오류로 1개 수준의 데이터는 본 연구에서 제외하였다.

나. 임피던스 측정시스템

본 연구에서 사용한 임피던스 측정장비는 1MHz~3GHz의 측정범위를 가지는 RF(Radio Frequency) 임피던스 측정기(Model E4991A, Agilent Inc., USA)로서 구체적인 사양 및 20개 측정 인자에 대한 기술은 표 2와 같다. 임피던스 측정기로 획득한 spectrum은 1 MHz~200 MHz의 범위이며 측정 간격은 0.5 MHz로서 1회 측정에 대한 결과는 총 400개의 응답 spectrum으로 구성되어 있다.

다. 수분측정 프로브 설계 및 제작

실험에 사용한 프로브는 두 가지이다. 임피던스 측정기에서 제공하는 프로브는 그림 1과 같은 16094A(Agilent, USA)이었는데, 125 MHz까지 측정이 가능한 제품이다. 터미널 연결 커넥터 규격은 APC-7mm 이며, Dut 커넥터는 +, -의 2 터

Table 1 Specification of the soil samples used in the experiment (Lee et al., 2008)

Room temperature	Room humidity	Soil particle size	Range of soil water content	No. of sample
24°C	55%	0.25~0.5 mm medium sand	4~22%	43

Table 2 Specification of the E4991A RF impedance analyzer and description for parameters obtained with the impedance analyzer

Model name	Frequency (Hz)	Basic impedance accuracy
E4991A	1M~3GHz	± 0.8%
Parameter descriptions		
Z	Impedance absolute value	Γ_x Real part of reflection coefficient
θ_z	Impedance phase	Γ_y Imaginary part of reflection coefficient
R	Resonance resistance	C_p Equivalent parallel capacitance
X	Equivalent series reactance	C_s Equivalent series capacitance
Y	Absolute value of admittance	L_p Equivalent parallel inductance
θ_y	Phase of admittance	L_s Equivalent series inductance
G	Equivalent parallel conductance	R_p Equivalent series resistance
B	Equivalent parallel susceptance	R_s Equivalent parallel resistance
Γ	Reflection parameter	D Loss coefficient
θ_Γ	Phase of reflection parameter	Q Q value

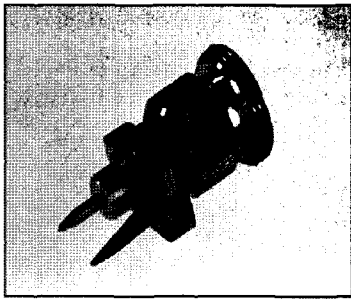


Fig. 1 16094A probe supplied from the manufacturer of the impedance analyzer.

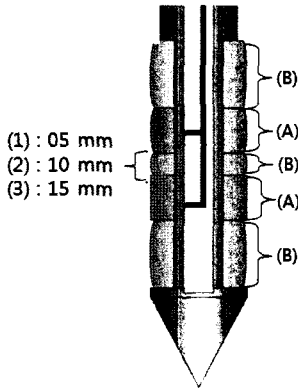


Fig. 2 Design of the probe for measuring water content in soil (A: electrodes, B: insulator parts).

미널을 주고받을 수 있는 구조로 되어있다. 측정전극부분의 길이는 23.2 mm이었다.

작물 근권부 깊이인 약 50 cm 깊이까지 관입하면서 토양 수분함량을 측정하는 수분센서를 원추관입기와 통합하기 위한 기초시험용으로 기존의 프로브는 구조상 수직 관입형으로 활용하기 어렵기 때문에 프로브를 원추관입기 원추부 상단에 설치하는 형태로 제작하였다. 제작된 프로브는 그림 2와 같이 원추와 축으로 이루어져 있으며, 원추를 교체가능 하도록 관입봉과 원추는 분리가능 하도록 하였다. 원추 및 봉(shaft)은 부도체로서 세라믹 및 폴리우레탄 재질로 하였으며 토양 표면 접촉이 우수하도록 4° 경사를 주었으며, 전극간 거리는 5, 10, 15 mm로 3가지로 제작하였다. 전극부분(도체부)은 AISI 416 stainless steel보다 강도가 큰 금속재로 결정하였다. 하단부는 도체(+) 전극에, 상단부는 도체(-) 전극으로 동축케이블로 연결하였다.

라. 데이터 분석 방법

특정 주파수 대역에서의 임피던스 값과 토양 함수율 간의 관계를 고찰하기 위하여 예비시험 결과를 토대로 표 3과 같은 모델을 설정하였다. 데이터 분석을 위하여 Matlab(ver 7.6, Mathwork, USA)을 이용하였다.

Table 3 List of model function for linear regression analysis

Model description	Regression model		
	Model function	Predictor signal (x)	Response signal (y)
Linear	$\beta x + e$	Impedance at each frequency (Ω)	Water content (%)
Poly2	$y = \beta_1 x^1 + \beta_2 x^2 + e$		
Poly3	$y = \beta_1 x^1 + \beta_2 x^2 + \beta_3 x^3 + e$		
exp (x)	$y = \beta e^x + e$		
1/x	$\beta \frac{1}{x} + e$		

3. 결과 및 고찰

가. 전극 거리 결정

그림 3과 4는 공시토양에 대한 임피던스 3반복 측정 평균 값 스펙트럼의 예이다. 16094A 프로브는 안정적인 상태 신호를 받고 있으나, 130 MHz범위에서 공진주파수가 발생하였다. 이는 측정범위가 125 MHz까지 인 제품의 특성으로 인

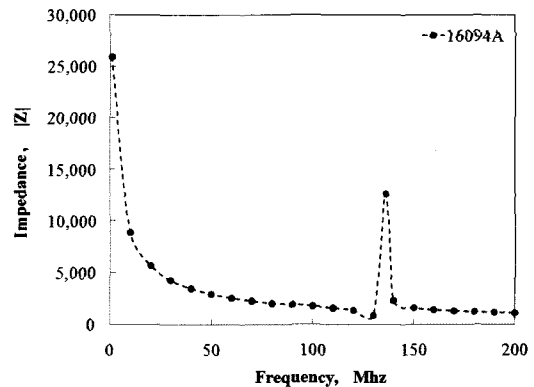


Fig. 3 Plots of impedance response signal with respect 16094A probe.

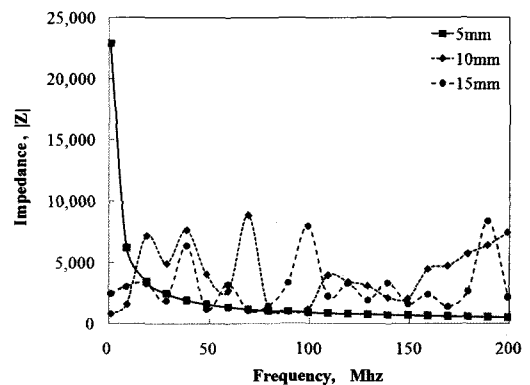


Fig. 4 Plots of impedance response signal with respect to designed probe.

하여 피크점이 발생하는 것으로 판단된다. 주파수가 130 MHz 이상에서는 노이즈 등으로 인하여 공진이 일어나며 안정적인 측정이 어렵다고 판단하였다.

전극 간의 간격이 5, 10, 15 mm 일 때 각각의 임피던스 스펙트럼을 검토한 결과, 5 mm 간격의 경우를 제외하고는 제작된 관입형 센서의 전극간의 공진 주파수 발생으로 인하여 토양수분에 대한 안정적인 상태 신호 측정이 난해함을 발견하였다. 이는 전극간 거리가 증가함에 따라 측정하고자 하는 고주파 신호 전달이 어렵고 임피던스 파라미터 외에 노이즈 성분이 증가하기 때문인 것으로 판단하였다. 따라서, 다양한 주파수 대역에서의 안정적인 수분측정을 위한 전극간 거리는 본 연구에서 사용한 임피던스 측정기의 경우 10 mm 이하인 것이 바람직하였으므로 5 mm로 결정하였다.

나. 주파수 대역, 측정인자별 토양수분 측정 성능

그림 5는 임피던스(Z)를 독립변수로 한 경우, 주파수에 따른 각 모델에 대한 선형 결정계수의 변화를 보여주고 있다. 파라미터 종류에 따라 패턴은 다르게 나타났으나, 각 파라미터에 대하여 모델이 다르더라도 결정계수의 변화경향은 유사하였다. 이는 센서개발을 위하여 사용하고자 하는 임피던스 관련 파라미터, 주파수, 모델을 적절하게 선정하면 목표로 하는 성능을 얻을 수 있음을 시사한다.

표 4와 5는 프로브 16094A와 제작된 5 mm 전극 간격을 가진 프로브를 이용한 파라미터 측정값과 토양수분과의 회귀성능이 가장 우수한 경우를 사용 주파수 20, 40, 60, 80 MHz에 대하여 요약한 것이다. 프로브가 달라짐에 따라 우수한 회귀성능을 보이는 파라미터의 종류와 결정계수가 달라지는 것을 확인하였다. 프로브 16094A를 이용하여 모든 모델에 대하여 0.95 이상의 결정계수를 얻었으며, 제작된 프로브를 이용하

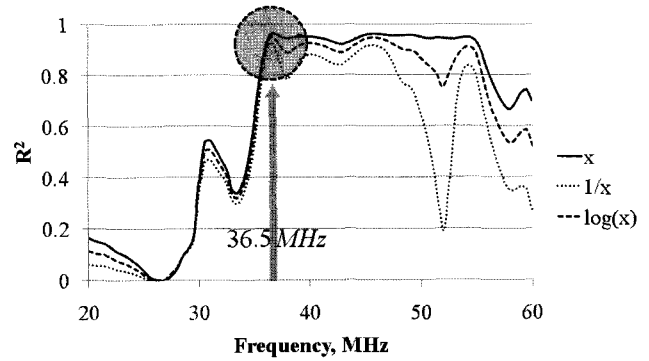


Fig. 5 Plots of regression coefficient from 3 regression analysis between impedance(Z) and water content.

여 0.86 이상의 결정계수를 얻었다.

분석된 회귀성능 결과를 살펴보면 회귀 방정식의 형태와 무관하게 40 MHz 영역에서 가장 높은 성능을 보였으며 관련된 파라미터는 |Z|, Q, Rp, G 등 다양하게 나타났다. 즉 본 연구를 통하여 개발된 센서는 40 MHz의 영역에서 토양함수율과 임피던스 신호간의 유의성이 가장 높게 나타나는 특성을 보이고 있음을 확인할 수 있다.

그림 5의 경우 40 MHz보다 높은 결정계수를 나타내는 주파수가 있음을 보여주고 있다. 분석결과 임피던스 |Z|의 경우, 주파수 36.5 MHz에서 R²=0.96 (RMSE=1.35, RPD=4.98, n=43)으로 가장 우수한 회귀성능을 보임을 확인할 수 있었으며 회귀 방정식은 다음과 같이 도출 되었다.

$$WC = -15.8325 + 0.3811Z_{36.5} \tag{1}$$

Where, WC : soil water content of 4-22%

Z_{36.5} : amplitude of impedance response at 36.5 MHz

Table 4 Summarized results of linear regression analysis with Agilent (16094A)

Frequency (MHz)	R ² (parameter)	Regression model				
		Linear	Poly2	Poly3	Exp(x)	1/x
20	0.95 (Y)	0.98 (B)	0.99 (B)	0.99 (B)	0.99 (B)	0.95 (Z)
40	0.95 (Y)	0.98 (B)	0.99 (B)	0.99 (B)	0.99 (B)	0.95 (X)
60	0.95 (R)	0.98 (B)	0.99 (Γy)	0.99 (B)	0.99 (B)	0.95 (X)
80	0.94 (Γ)	0.98 (B)	0.99 (Γy)	0.99 (B)	0.99 (B)	0.94 (X)

Table 5 Summarized results of linear regression analysis with designed probe (5 mm)

Frequency(MHz)	R ² (parameter)	Regression model				
		Linear	Poly2	Poly3	Exp (x)	1/x
20	0.89 (Ls)	0.95 (X)	0.96 (Cp)	0.93 (Rs)	0.89 (Cs)	
40	0.95 (Z)	0.97 (Q)	0.97 (Rp)	0.97 (G)	0.95 (Y)	
60	0.87 (Ls)	0.97 (Γy)	0.97 (Γy)	0.90 (R)	0.88 (Cs)	
80	0.86 (Ls)	0.93 (Ls)	0.93 (Ls)	0.88 (Rp)	0.86 (Cs)	

4. 요약 및 결론

본 연구는 현장에서 실시간으로 수분 함량 측정이 가능한 원추 관입형 센서 제작을 위한 기초 연구로서 수행이 되었다.

- (1) 임피던스를 측정할 수 있는 전극을 내장한 관입형 센서를 제작하였으며 토양 함수율에 대한 반응성이 우수하게 나타내는 전극간의 간격을 5 mm로 결정 할 수 있었다.
- (2) 임피던스 파라미터를 이용한 수분 센서 개발 가능성 고찰 결과, 주파수, 파라미터 종류, 모델을 적절히 선정하여 주어진 토양과 수분함량에 대하여 우수한 성능의 센서 개발이 가능함을 고찰하였으며, 본 연구의 경우 36.5 MHz의 주파수에서 회귀성능이 $R^2=0.96$ (RMSE=1.35, RPD=4.98)인 모델을 얻을 수 있었다.

이러한 결과가 가지는 의미는 반응성이 우수한 특정 주파수에 대한 정확한 관찰을 통해 신뢰할 만한 토양 함수율 측정 장치 제작이 가능하다는 점을 시사함과 동시에 현장에서 실시간용으로 운용이 되는 센서에 충분히 채용할 수 있다는 점을 보이는 것이라 할 수 있다.

Acknowledgement

본 연구는 농촌진흥청 국립농업과학원 농업공학부의 정인규 연구사와 홍영기 연구사의 장비 및 실험 협조를 받아 수행되었음.

참고 문헌

1. ASAE Standards. 2005. S313.3: Soil Cone Penetrometer. ASAE, St. Joseph, Michigan, USA.
2. 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.
3. 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. *Journal of KSAM* 28(4):369-376. (In Korean).
4. Lee, D. H., Y. J. Cho, Y. C. Chang and K. S. Lee. 2008. Analysis of main design factors for developing a soil water content sensor using impedance spectroscopy. *Journal of Biosystems Engineering* 33(4):269-375. (In Korean)
5. 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 Science Society America Journal* 63:987-989.
6. 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. *Journal of Soil Science and Fertilizer* 31(2):85-94. (In Korean)
7. Quinones, H, P. Ruelle and I. Nemeth. 2003. Comparison of three calibration procedures for TDR soil moisture sensors. *Irrigation and Drainage* 52(3):203-217.
8. Soil Science Society of America. 2002. *Methods of Soil Analysis: Part 4 - Physical Methods*. SSSA, Madison, Wisconsin, USA.