

다양한 주파수 및 토양 조건에서 지뢰 탐지용 지표투과레이더 수신신호의 수치해석

Numerical Analysis of the Ground Penetrating Radar's Return Signal for Mine Detection at Various Frequencies and Soil Conditions

홍진영 · 주정명* · 한승훈** · 오이석*

Jin-Young Hong · Jung-Mung Ju* · Seung-Hoon Han** · Yisok Oh*

요 약

본 논문에서는 주파수 및 토양의 수분 함유량 변화에 따라 지뢰 탐지용 지표투과레이더의 수신신호를 분석하였다. 한국 표준 토양인 식양토를 기준으로 토양의 유전율, 도전율 및 전자파 감쇄 손실을 계산하였고, FDTD를 이용하여 다양한 주파수에 따른 지표투과레이더의 지뢰 탐지 영상을 생성하였다. 레이더의 표적 신호 대 클러터 신호 비(SCR) 및 수신 전력을 분석하였으며, 주파수 가변 채널 방식이 다양한 토양 조건에서 지뢰 탐지용 지표투과레이더에 적합함을 보였다.

Abstract

Return signals of a ground penetrating radar(GPR) for mine detection at various frequencies and soil moisture contents are analyzed in this paper. We first compute the dielectric constant, conductivity and attenuation loss based on clay loam which is Korea standard soil. The mine-detection images of GPR at various frequencies are also obtained using the finite-difference time-domain(FDTD) technique. Then, the signal-to-clutter ratio(SCR) and received power of the radar are studied. It is shown that the variable frequency channels are suitable for a GPR to detect landmines at various soil conditions.

Key words : GPR, Mine Detection, FDTD, Soil Moisture Content, Dielectric Constant

I. 서 론

최근 우리나라 전방 지역에서의 목함 지뢰 등에 의한 사고 발생에 따라 지뢰 탐지 및 제거에 대한 필요성이 강조되고 있는 상황이다. 지뢰 탐지는 레이더, 금속탐지기, 탄성파, 적외선, NQR, 중성자 탐지 등 많은 방법들이 있다. 가장 많은 연구 및 제품화가 실현된 분야가 레이더이며, 외국의 자연 환경에 적합

한 지뢰 탐지용 레이더 성능 연구가 매우 활발히 진행되어 오고 있다^[1]. 본 논문에서는 국내 토양 환경에 대해 분석한 자료를 바탕으로 토양의 전기적 성질을 계산하였고, 국내 토양환경 및 주파수 변화를 고려하여 지뢰 탐지용 레이더 성능을 처음으로 분석하였다.

지뢰 탐지용 레이더는 지표투과레이더(GPR: Ground Penetrating Radar) 기반의 한 응용 분야이며, 본 논문에서는 레이더의 시스템 내부 변수인 운용 주파

「이 연구는 2012년도 삼성탈레스의 연구비 지원으로 수행되었음.」

영진전문대학 국방전자통신과(Department of Military Electronic Communication, Yeungjin College)

*홍익대학교 전자정보통신공학과(Department of Electronic Information and Communication Engineering, Hongik University)

**삼성탈레스(주)(Samsung Thales Co., Ltd.)

· Manuscript received October 19, 2012 ; Revised November 16, 2012 ; Accepted December 10, 2012. (ID No. 20121019-117)

· Corresponding Author : Jin-Young Hong (e-mail : jinyoung hong@yjic.ac.kr)

수와 외부 변수인 토양 수분 함유량이 지뢰 탐지 성능을 결정하는 주요 변수임을 보여준다. 이를 위해 한국표준토양인 식양토(clay loam)의 토성비(soil texture)와 계절에 따른 수분 함유량을 정의하였고, 토양의 전기적 특성인 유전율, 도전율 및 주파수에 따른 감쇄 손실을 계산하였다. 한국표준토양을 바탕으로 전자파 수치해석 방법인 시간 영역 유한차분(FDTD: Finite-Difference Time-Domain)법을 이용하여 모의실험을 하였고, 주파수와 수분 함유량의 변화에 따른 레이더 수신 전력 및 표적 신호 대 클러터 신호비(SCR: Signal-to-Clutter Ratio)를 계산함으로써 지뢰 탐지 레이더의 탐지 성능을 예측하였다.

II. 한국표준토양의 전기적 특성 분석

지뢰 탐지용 레이더는 토양과 지뢰의 전기적 특성 차이에 의해 생성되는 반사파를 수신하여 신호처리함으로써 지뢰를 탐지한다. 레이더의 탐지 성능을 수치적으로 해석하기 위해 우선 고려되어야 할 사항은 지뢰가 매설된 환경 즉, 토양에 대한 전기적 특성을 정의하는 것이다. 토양에 대한 전기적 특성(유전율, 도전율)은 토성비와 수분 함유량(soil moisture contents)에 의해 결정된다. 우리나라의 표준토양은 식양토(clay loam)이며, 식양토의 토성비는 점토(clay, 지름 0.002 mm 이하): 25~35 %, 미사(silt, 지름 0.002~0.05 mm): 20~50 %, 모래(sand, 지름 0.05~2 mm): 25~45 %이다^[2]. 토양수분 함유량은 토양과 물의 부피 비(ratio)인 volumetric 수분 함유량 $Mv(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$ 으로 정의한다^[3]. 표 1은 토양 조건에 따른 수분 함유량을 나타낸 것으로 계절에 따른 일반토양 Mv 값과 토양이 메마르고 젖은 상태에서의 값을 나타낸다^[4].

토양의 전기적 특성은 다음 식과 같이 기존의 실험적 모델을 바탕으로 계산하였다^[5].

표 1. 토양 조건에 따른 수분 함유량
Table 1. Mv by soil conditions.

토양 조건		수분 함유량(Mv)
일반 토양	겨울	0.05~0.15
	봄/가을	0.1~0.2
	여름	0.2~0.35
메마른 토양		0.05 이하
진흙/젖은 토양		0.4 이상

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'' = \epsilon_0 \left(\epsilon_r - j \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0} \right) \quad (1)$$

$$\epsilon' = \left[1 + \frac{\rho_b}{\rho_s} (\epsilon_s)^\alpha + (Mv)^\beta (\epsilon'_{fw})^\alpha - Mv \right]^\alpha \quad (2)$$

$$\epsilon'' = [(\epsilon''_{fw})^\alpha (Mv)^\beta]^{1/\alpha} \quad (3)$$

여기서, ϵ 는 복소 유전율, ϵ_0 , ϵ_r , σ 는 각각 공기 유전율, 상대유전율, 도전율이며, ρ_b , ρ_s 는 토양의 실험적 밀도값, ϵ_s 는 토양의 유전율, Mv 는 수분 함유량, β , β' 은 토성비에 의한 실험적 상수값, ϵ'_{fw} , ϵ''_{fw} 는 물의 복소유전율 실수와 허수값을 의미한다.

식양토 토성비는 점토 30 %, 미사 30 %, 모래 40 %로 적용하였고, 수분 함유량 및 주파수 변화에 따른 토양의 전기적 특성 계산 결과는 그림 1, 2와 같다. 그림 1에서는 토양 수분 함유량이 증가함에 따라 상대유전율도 비례하여 증가하고, 주파수는 수분 함유량 0.2 이하에서 차이가 없다가 0.2 이상에서는 주파수에 따라 변화함을 알 수 있다. 그림 2에서는 수분 함유량이 증가함에 따라 도전율이 증가하며, 특히 낮은 주파수보다는 주파수가 높을수록 증가폭이 커짐을 확인할 수 있다.

토양의 수분 함유량 및 주파수에 따른 감쇄 손실 α 는 식 (1)으로부터 구할 수 있다.

$$\alpha = \frac{2\pi f}{c} \sqrt{\frac{\epsilon'}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\epsilon''}{\epsilon'} \right)^2} - 1 \right)} \quad (4)$$

그림 3은 주파수 및 토양의 수분 함유량에 따른 감쇄 손실을 나타낸 것으로 주파수가 높을수록, 수분 함유량이 증가할수록 감쇄 손실이 높다는 것을

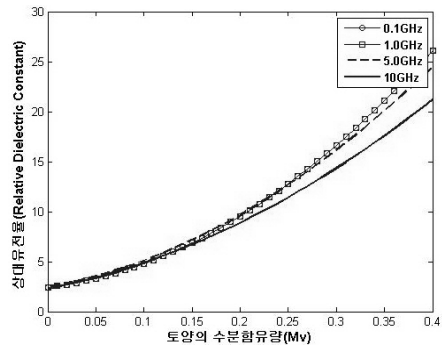


그림 1. 식양토의 수분 함유량 변화에 따른 상대유전율
Fig. 1. Relative dielectric constants of the clay loam at various soil moisture contents.

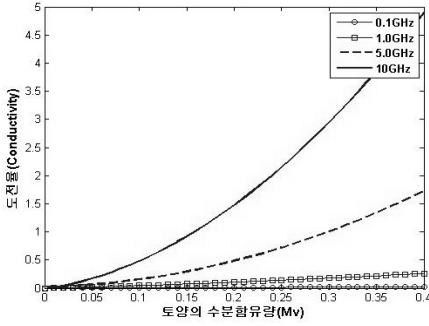


그림 2. 식양토의 수분 함유량 변화에 따른 도전을
Fig. 2. Conductivities of the clay loam at various volumetric soil moisture contents.

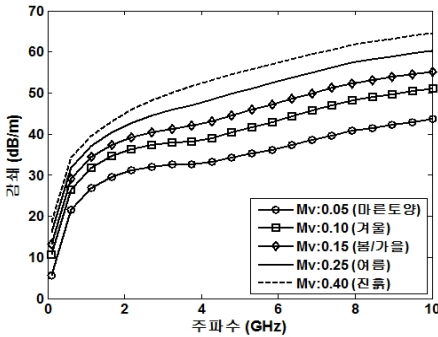


그림 3. 주파수 및 토양 조건에 따른 감쇄
Fig. 3. Attenuation losses at the various frequencies and soil conditions.

알 수 있다. 이는 레이더의 운용 주파수가 높을수록, 지뢰 매설 지역의 수분 함유량이 증가할수록 땅속 매설 지뢰에 대한 탐지 가능성이 낮아짐을 의미한다.

III. FDTD 수치해석 결과

우리나라 환경에서의 지뢰 탐지용 레이더의 탐지 성능을 확인하기 위해, 수치해석 방법은 2차원 FDTD, 표적은 20 cm×10 cm의 금속 원통형 대인 지뢰 (M-16), 환경은 우리나라 표준토양인 식양토(점토 30 %, 미사 30 %, 모래 40 %)를 선정하였다. 대인 지뢰는 지표에 매설되지만, 폭우, 산사태 등 환경 변화에 따라 땅속에 매설될 수 있으며, 매설된 가장 작은 위협체를 M-16으로 가정하여 그림 4와 같이 구성하였다. 지표면 50 cm 깊이에 매설하였고, 전체 해석공간은 1.2 m×1.2 m, 지표면 35 cm 위에서 6 cm 간격으로 총 21개의 신호를 송수신하였다. 토양의 전기적 특성은 2장의 실험적 모델을 적용하였고, 입사파는 변조

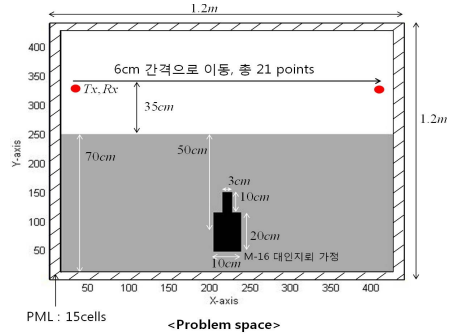


그림 4. 지뢰 탐지를 위한 FDTD 시뮬레이션 구성
Fig. 4. Simulation configuration of FDTD for the landmine detection.

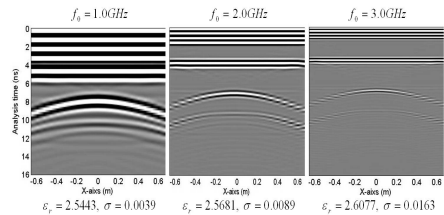


그림 5. FDTD 시뮬레이션 결과
Fig. 5. FDTD simulation results.

된 가우시안 펄스(modulated Gaussian pulse), 대역폭 500 MHz, 중심 주파수 1, 2, 3 GHz, 토양의 수분 함유량 0.01~0.4로 변화시키면서 모의실험을 실시하였다.

그림 5는 모의실험 B-scan 결과를 나타낸 것으로 x축은 해석 공간 내에서 안테나가 이동한 거리를 나타내며, y축은 총 해석 시간을 의미한다. 대인 지뢰는 주 원통과 보조 원통(신관)으로 구성되어 있으며, 모의 실험 결과, B-scan 이미지에 보조 원통과 주 원통에서 각각 반사된 포물선 형태의 신호가 나타난다.

그림 6은 표적 신호 대 클러터 신호 비(SCR)의 모의실험 결과이다. 클러터 신호는 표적이 없는 환경에서의 모의실험 수신신호로, 표적 신호는 표적이 있는 환경에서의 수신신호로 정의하여 계산하였다. SCR이 높을수록 레이더의 지뢰 탐지 가능성이 높아지며, SCR이 낮을수록 탐지 가능성은 낮아진다. 토양의 수분 함유량 및 주파수가 커질수록 SCR은 낮아지며, 이는 그림 3의 수분 함유량 및 주파수에 따라 감쇄 손실이 증가하는 것과 일치한다. 시뮬레이션 결과, 진흙/젖은 흙의 경우에는 약 1 GHz 이상의 주파수 신호는 감쇄 손실에 의해 표적 신호와 클러터 신호의 구분이 불가능하지만, 마른 토양의 경우에는 3 GHz

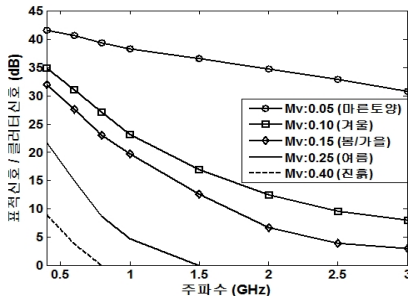


그림 6. 토양 조건에 따른 표적 신호 대 클러터 신호 비
Fig. 6. Signal to clutter ratio under soil conditions.

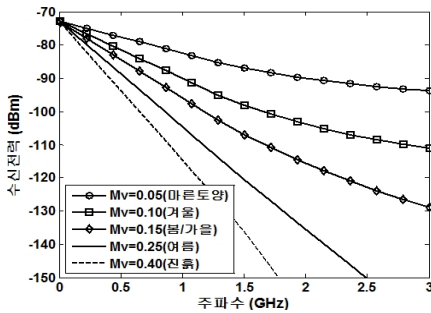


그림 7. 주파수 및 수분 함유량에 따른 레이더 수신 전력
Fig. 7. Radar received power at various frequencies and soil moisture contents.

이상의 주파수 신호에서도 표적 신호와 클러터 신호의 구분이 가능하여 지뢰 탐지가 가능함을 알 수 있다.

그림 7은 주파수 및 토양의 수분 함유량에 따른 지뢰 탐지 레이더의 수신 전력을 계산한 것으로 기본적인 지뢰 탐지용 레이더 방정식을 이용하였다^[6].

$$P_r = P_t \frac{G_t G_r}{(4\pi R^2)^2} \frac{\lambda^2 \sigma}{4\pi} e^{-2\alpha R} \quad (5)$$

여기서, P_t , P_r 는 송/수신 전력, G_t , G_r 은 송/수신 안테나 이득, λ 는 파장, R 은 거리, α 는 감쇄 손실로 식 (4)에 의해 결정된다. σ 는 표적의 RCS로 금속 원형 판모델($4\pi^3 a^4/\lambda^2$)을 적용, 안테나 이득 3 dBi, 송신 출력 20 dBm, 시스템 손실 6 dB 등 일반적인 지뢰 탐지용 레이더 값을 적용하였다.

주파수가 높을수록 토양의 수분 함유량이 증가할수록 수신 전력이 낮아지며, 이는 지뢰 탐지 가능성이 낮아짐을 의미한다. 마른 토양의 경우 3 GHz에서 지뢰의 반사 신호 전력이 -85 dBm 이상이나, 진흙/젖은 흙의 경우 1 GHz 이상의 수신신호 전력은 -120 dBm 이하이다. 수신기 설계(잡음 지수, 대역폭 등)

에 따라 MDS(Minimum Detectable Signal)값이 결정되지만, 레이더가 -120 dBm 이하의 전력을 수신하기는 어렵다. 따라서, 진흙/젖은 흙에서는 1 GHz 이하의 주파수를 적용해야 함을 알 수 있다.

IV. 결 론

한국표준토양인 식양토를 기준으로 모의실험한 결과, 지뢰 탐지용 지표투과레이더 시스템 내부 변수인 운용 주파수와 외부 변수인 토양 수분 함유량이 지뢰 탐지 성능을 결정하는 주요 변수임을 확인하였다. 마른 토양의 경우, 3 GHz 이상의 주파수 신호에서도 표적 신호와 클러터 신호의 구분이 가능하나, 젖은 토양의 경우, 약 1 GHz 이상의 주파수 신호는 감쇄 손실에 의해 표적 신호와 클러터 신호의 구분이 불가능하였고, 수신 전력 또한 -120 dBm 이하로 탐지하기 힘들다. 시험 환경 조건에 따라 즉, 겨울/마른 토양 환경에서는 2~3 GHz 이상의 중심 주파수를 사용하여 탐지 분해능을 높이고, 여름/젖은 토양 환경에서는 1 GHz 이하의 중심 주파수를 사용하면 지뢰 탐지 가능성을 높일 수 있다. 이 연구 결과는 주파수 채널 가변 구조의 지뢰 탐지용 레이더 시스템을 설계하는 데 기본 자료로 활용될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] M. Metwaly, A. Ismail and U. Matsushima, "Evaluating some factors that affect feasibility of using ground penetrating radar for landmine detection", *Applied Geophysics*, vol. 4, no. 3, pp. 221-230, 2007.
- [2] 농촌진흥청 농업기술연구소, 한국토양총설, 1992.
- [3] F. T. Ulaby, R. K. Moore, and A. K. Fung, *Microwave Remote Sensing Active and Passive*, vol. III, Artech House, 1986.
- [4] P. Symes, M. Dalton, and P. Buss, "Developments in soil moisture sensing for improved landscape water management", <http://www.irrigation.org.au>
- [5] M. C. Dobson, F. T. Ulaby, M. T. Hallikainen, and M. A. EL-Rayes, "Microwave dielectric behavior of wet soil-part II: Dielectric mixing models", *IEEE TGRS*, vol. 23, no. 1, pp. 35-46, Jan. 1985.
- [6] M. I. Skolnik, *Radar Handbook*, McGrawHill, ch 21.8, 2008.