

논문 2007-44TC-11-6

초광대역 임펄스 지반탐사레이더에서 지면의 영향에 따른 임펄스 전파 특성 연구

(Influence of lossy ground on impulse propagation in time domain for
impulse ground penetrating radar)

김관호*, 박영진*, 윤용중**

(Kwan-Ho Kim, Young-Jin Park, and Young-Joong Yoon)

요약

본 논문은 초광대역 임펄스를 이용한 지반탐사 레이더에 있어서 지면 및 지면과 안테나 사이의 간격에 따른 임펄스 전파에 미치는 영향을 기술한다. 영향 연구를 위해 평판형 초광대역 다이폴 안테나를 개발하였다. 우선, 수치해석 방법을 이용하여 지면의 유전을 변화 및 안테나와 지면 사이의 간격에 대한 영향을 시뮬레이션하였다. 결과를 비교하기 위하여 실제 모래 및 수분이 포함된 토양으로 구성된 시험장을 제작하여, 개발된 다이폴 안테나를 사용하여 주파수 영역에서의 지면의 변화 및 안테나와 지면의 간격 차이에 의한 주파수 영역에서의 투과 특성을 조사하였다. 역 푸리에 변환을 이용하여 주파수 영역에서 시뮬레이션 및 측정된 투과 특성을 시간 영역에서의 임펄스 응답 특성을 구하였다. 시뮬레이션과 측정 결과로부터 지면의 유전율이 높을수록 안테나와 지면과의 간격 변화가 클수록 최대 투과값이 생기는 주파수가 높아졌고, 투과 계수도 증가하였다, 시간 영역에서는 유전율이 높을수록 지표면의 직접 반사에 의해 수신되는 신호가 크게 증가하였고, 수신 신호의 모양은 완전히 변형되었다. 또한, 지면과 안테나 사이의 간격 변화로 시간영역 반사 신호의 첨두치의 시간 위치가 변경됨을 알 수 있었다.

Abstract

In this paper, influence of lossy ground and gap variation between lossy ground and UWB antenna on impulse propagation in time domain for impulse ground penetrating radar (GPR) is numerically and experimentally investigated. For this study, a novel planar UWB fat dipole antenna is developed. First, influence of lossy ground and gap variation between lossy ground and UWB antenna is simulated. For verification, a test field of sand and wet clay soil is built and using the developed dipole antenna, transmission behavior is investigated at the test field. With an aid of IDFT (inverse discrete Fourier transform), time domain impulse response for transmission coefficient measured and simulated in frequency domain is obtained. Measurement and simulation show that the frequency of maximum transmission coefficient and transmission coefficient are increased with higher dielectric constant and larger gap distance. In time domain, it is shown that for higher dielectric constant, the amplitude of the received signal in time domain is higher and reflected signals are seriously modified. Also, it is found that variation of gap between antenna and ground surface makes timing of peak value changed.

Keywords: impulse ground penetrating radar (GPR), fat dipole antenna, impulse propagation

I. 서론

최근, 시간영역에서 나노초 (nanosecond) 이하의 폭

을 갖는 임펄스 신호를 이용한 고해상도 임펄스 레이더 기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 시간영역 임펄스는 주파수 영역에서 수 GHz 주파수 대역폭을 가지고, 우수한 시간 정밀성을 갖기 때문에 기존의 협대역 레이더와 비교하여 우수한 분해능 및 해상도를 갖는다^[1-3].

극초단의 임펄스를 이용한 고해상도 초광대역 지반탐사 레이더의(ultra wideband ground penetrating

* 정회원, 한국전기연구원
(Korea Elcetrotechnology Research Institute)

** 평생회원, 연세대학교 전기전자공학과
(Dept. of Elecetrical and Electronic Engineering,
Yonsei University)

접수일자: 2007년8월27일, 수정완료일: 2007년11월15일

radar:UWB GPR) 설계를 위하여, 대개의 경우 주파수 영역에서의 주로 고려한다^[1]. 이러한 주파수 영역에서의 설계 방법은 매질의 감쇄 특성을 주요한 요소로 간주하여, 시간영역의 임펄스를 사용하는 지반탐사 레이더 설계 있어서, 고려되어야 할 시간지연, 분산, 떨림 현상등에 대한 영향이 고려되지 않고 있다.

특히, 지면의 특성 변화 및 안테나와 지면간의 물리적 간격 변화에 의한 안테나와 지면과의 임펄스 신호 커플링 변화에 대한 연구는 임펄스 레이더 시스템 설계에 있어서 매우 중요하다. 이러한 현상들은 주파수 영역에서는 확인할 수 없는 결과들이지만, 임펄스 UWB GPR 활용시 매우 중요한 요소들이다. 즉, UWB GPR 시스템 측정시 지표면이 고르지 않거나, 지면의 유전율이 갑자기 바뀔 경우, 이를 고려하여 수신 신호를 신호처리 하여야 지중 매질물에 대한 영상을 구할 수 있어, 임펄스 GPR 시스템 설계에 있어 매우 중요한 요소이다.

현재까지 이와 관련한 연구로는, 손실 매질에 따른 주파수 영역에서의 임피던스 변화에 대한 연구를 들 수 있다^[2]. 안테나의 입력 임피던스의 변화는 지면과의 신호 결합 감쇄뿐 만 아니라 수신되는 파의 위상을 변화시킨다. 그러나 주파수 영역에서의 임피던스의 변화에 따른 특성은 보고되었으나, 실제 임펄스 지반탐사 레이더에 필요한 시간영역에서의 임펄스의 전파 특성 변화에 대해서는 보고되지 않았다.

본 논문에서는 손실 지면의 특성 변화 및 안테나와 지면간의 물리적 변화에 따른 시간영역에서의 임펄스 전파 특성 영향에 대하여 기술하고자 한다.

특성 해석을 위하여 CST MWS를 사용하였으며, 주파수 대역은 100MHz에서 400MHz을 사용한다. 해석을 위하여 초광대역 팻 다이폴 안테나를 설계 제작하였다. 임펄스 전파 특성 해석을 위하여, 주파수 영역에서의 투과 특성을 구하였고, 이를 역푸리에 변환을 이용하여 시간영역에서의 특성을 구하였다.

본문에서는 설계된 초광대역 평판형 안테나를 소개하고, 이를 이용하여 지면의 유전율에 따른 시간영역 특성을 해석하고, 실제 토양 환경으로 제작된 GPR 시험장에서 측정된 결과를 시뮬레이션 결과와 비교한다.

II. 본 론

1. 초광대역 임펄스 지반탐사레이더

그림 1은 임펄스 기반의 초광대역 지반탐사 레이더의 일반적인 구성을 나타낸다.

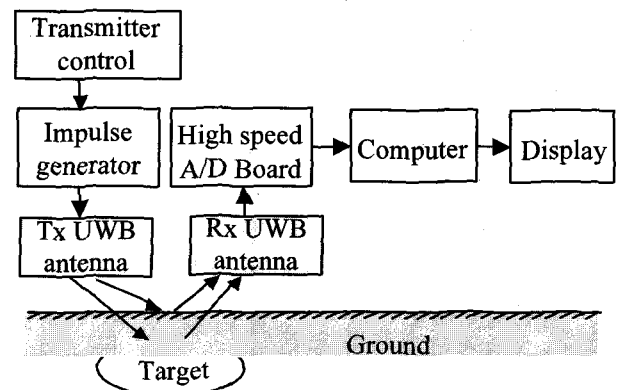


그림 1. 초광대역 임펄스 지반탐사레이더의 구성도.
Fig. 1. Configuration of UWB ground penetrating radar(GPR).

그림 1에서처럼 송수신부가 일정 간격을 유지하며, 송수신 안테나는 분리되어 있다. 송신부는 임펄스 발생기와 임펄스 반복 주기와 크기를 조절할 수 있는 제어부 및 임펄스를 지면에 방사시킬 수 있는 초광대역 안테나로 구성된다. 또한, 지표면에 의한 반사 신호 및 목표물에 의한 반사 신호를 초광대역 안테나를 통하여 수신된다. 수신된 신호는 수백 MHz 대역폭을 갖는 광대역 신호이므로, 신호의 저장을 위해 광대역 고속 Analog-to-Digital 변환기(ADC)를 사용하였고, 저장 장치에 수신된 신호들을 저장한다.

그림 1에서처럼 UWB GPR은 지면과 송수신 안테나 사이의 간격을 두어 측정 속도를 빠르게 할 수 있다. 그러나 임펄스를 사용하는 UWB GPR은 지면과 안테나 사이의 간격 및 지면의 유전율에 따라 주파수 영역에서 안테나의 입력 임피던스가 변화되며, 시간영역에서 수신된 신호의 파형의 변화에도 영향을 준다.

2. 초광대역 평판형 팻 다이폴 안테나 (UWB planar fat dipole antenna)

그림 2에는 개발된 초광대역 평판형 팻 다이폴 안테나의 윗면과 측면을 나타내었다.

그림 2에서처럼 안테나는 인쇄기판(PCB)에 U자형의 금속 패턴을 갖는다. 안테나는 두 개의 다이폴 팻 arm을 갖는다. 각각의 arm은 아래 부분에서 연결되어 있다. 급전을 위하여, BNC 커넥터와 외부 절연체를 제거한 동축선을 사용한다. 동축선의 외부 금속은 다이폴 안테나의 팻 arm에 접촉되어 있다. 급전선을 다이폴 팻 arm에 접촉하여 급전하는 방식은 임펄스 방사 및 수신에서 급전선의 영향을 제거할 수 있다. 일반적으로 다이폴 안테나의 급전은 다이폴 면에 수직되게 급전선이

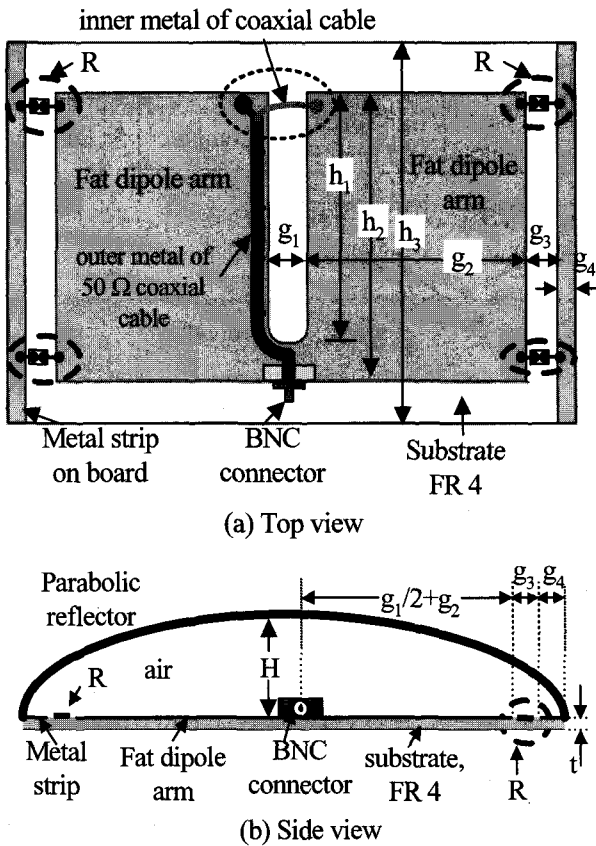


그림 2. 초광대역 평판형 팻 다이폴 안테나.
Fig. 2. Planar UWB fat dipole antenna.

연결되게 되어, 지중 매질물에 의해 반사되는 수십 mV 이하의 신호에 급전선에 의한 재방사 및 간섭이 생겨 GPR 시스템의 성능을 열화시킨다. 제안된 안테나는 이러한 급전선의 문제점을 제거하면서, 광대역 특성을 얻을 수 있다. 또한, 안테나에는 다이폴 모서리 부분에서의 재방사 또는 펄스를 방지하기 위하여 저항을 사용하였다. 급전부의 임피던스가 50Ω이므로 각 모서리에 R=100Ω 저항을 병렬로 연결하였다. 광대역 안테나는 금속 반사체를 사용하여 외부로부터의 방해 신호를 차단하며, 안테나의 이득을 높이기 위하여 사용하였다.

안테나 설계를 위하여 CST MWS를 사용하였다. 사용 주파수인 100MHz와 400MHz를 부합되도록 안테나의 치수를 결정하였다. 시뮬레이션을 위하여 지면의 유전율을 변화시켜가며, 반사특성을 관찰하였다. 설계를 위하여 일반적인 팻 다이폴 안테나의 치수 관계인 $h_2 \approx 1.1g_2$, $g_1 \approx 0.1g_2$, $2g_2 + g_1 = \lambda_0/2$ (λ_0 : 사용 주파수 대역의 중심 주파수 파장)를 사용하였으며, 최적의 결과를 위하여 시뮬레이션을 통하여 각 치수를 튜닝하였다. 실제 시험장에서 사용할 안테나 제작을 위하여, 시험장에 사용된 실제 토양의 유전율을 개방형 동축 프로브 방법을

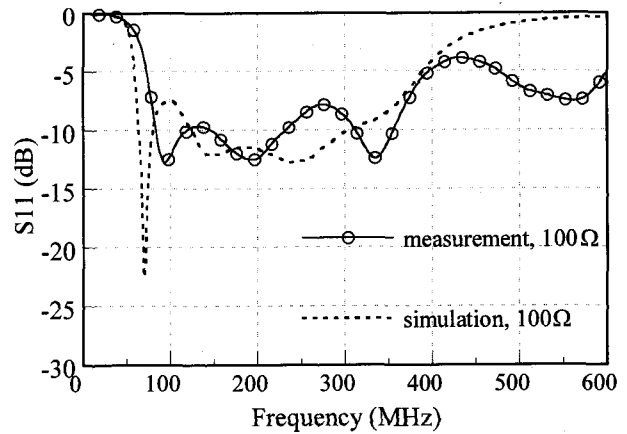


그림 3. 초광대역 평판형 팻 다이폴 안테나의 반사특성 시뮬레이션 및 측정.
Fig. 3. Measured and simulated reflection behavior of the planar UWB fat dipole antenna.

사용하여 측정하여 토양의 경우 300MHz에서 상대 유전율 $\epsilon_r=15$, 도전율 0.0025S/m를 얻었다. 사용 주파수와 측정된 상대유전율 값을 고려하여 시뮬레이션을 통하여 얻어진, 안테나의 최종 치수는 다음과 같다. $g_1=16\text{mm}$, $g_2=192\text{mm}$, $g_3=10\text{mm}$, $g_4=25\text{mm}$, $H=100\text{mm}$, $h_1=262\text{mm}$, $h_2=300\text{mm}$, $h_3=480\text{mm}$.

그림 3은 제작된 안테나와 시뮬레이션 안테나의 반사특성을 비교하여 나타내었다. 측정은 제작된 실제 모양으로 구성된 시험장에서 이루어졌다. 그림 3에서처럼 시뮬레이션결과로부터 75MHz 부근에서 첫 번째 공진점이 생기며, 측정에서는 이보다 조금 더 높은 90MHz 근처에서 공진이 생긴다. 측정 결과로부터 제작된 안테나는 대략 80MHz부터 370MHz까지의 대역폭을 가짐을 알 수 있다. 또한, 시뮬레이션과 측정치가 근사하게 일치함을 보인다.

3. 시뮬레이션 및 측정

설계된 안테나를 사용하여, 유전율의 변화 및 지면과 안테나의 간격의 변화에 따른 안테나의 반사특성 및 투과특성의 변화에 대해 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션을 위하여 지면은 단일 매질로 구성하였다. 따라서, 매질의 불연속에 의한 반사는 안테나와 지면의 경계면에서만 발생하는 것으로 한다.

시험장은 그림 4에 나타낸 것과 같이, 수분이 약간 포함된 모래($\epsilon_r=3.5$)의 경우와 일반 토양(유전율 $\epsilon_r=15$, 도전율 0.0025S/m)으로 구성되어 있다. 그림 4에서처럼 모래 속에만 직경 5cm 금속 관을 매설하였다. 송수신 안테나 사이의 간격은 25cm이다. 주파수 영역에서의

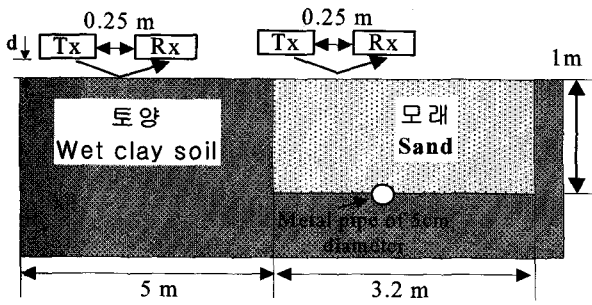


그림 4. 지반탐사레이더 측정 시험장 구성도.
Fig. 4. Configuration of impulse GPR test field.

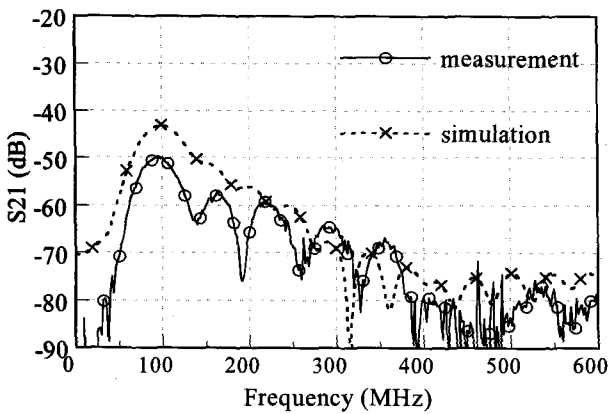


그림 5. 안테나가 토양 면에 직접 붙은 경우 (d=0)에 대한 시뮬레이션 및 측정 결과.
Fig. 5. Simulated and measured result for for the case of UWB antenna on clay soil (d=0cm).

측정을 위하여 벡터 회로망분석기 HP8753D를 사용하였다.

그림 5는 일반 토양의 경우에 대해서 지면과 안테나 사이의 간격이 없는 경우(d=0cm)에 대한 투과 특성을 시뮬레이션 및 측정된 결과이다. 지면을 단일 매질로 고려하였기 때문에 수신되는 신호는 안테나와 안테나 사이에 직접 결합되는 신호이다. 100MHz 근처에서 최대값을 가짐을 알 수 있다.

그림 6은 지면과 안테나 간격을 7cm로 하였을 때의 시뮬레이션 및 측정 결과이다. 시뮬레이션 및 측정 결과는 잘 일치함을 관찰할 수 있다. 그러나 안테나가 토양면에 붙어있는 경우와 비교할 때, 최대 수신 주파수는 180MHz 근처로 이동하며, 수신 신호 크기도 대략 10dB 이상임을 알 수 있다. 이러한 특성은 토양의 유전율이 높아, 안테나의 임피던스를 변화시켰고, 지면을 통하여 수신되는 신호보다는 지면과 안테나 사이의 공간을 통하여 직접 결합되는 신호가 매우 크기 때문이다. 또한, 550MHz 근처에서도 수신신호가 관찰된다. 이는 그림 3의 안테나의 반사특성에서 보이는 것처럼

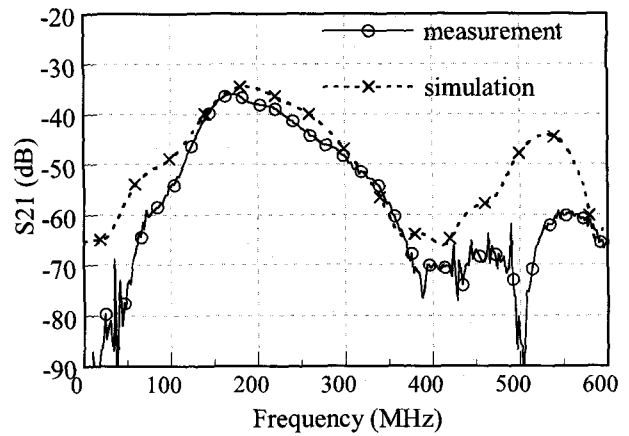


그림 6. 안테나가 토양 사이의 간격이 7cm 떨어진 경우 (d=7cm)에 대한 시뮬레이션 및 측정 결과.
Fig. 6. Simulated and measured result for the gap of 7cm between UWB antenna and clay soil (d=7cm)

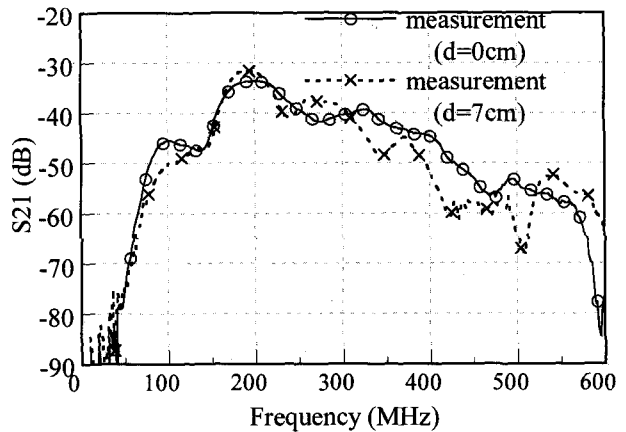


그림 7. 모래의 경우에 대한 안테나와 지면 간격에 따른 투과 특성 변화.
Fig. 7. Variation of transmission coefficient for different gaps between antenna and sand in sand test field.

550MHz 근처에서 공진점이 생기기 때문이다.

그림 7은 모래 시험장에서 안테나와 모래의 간격을 달리하여 측정된 것으로, 안테나와 지면의 간격 변화에도 투과 특성에는 큰 차이가 없음을 알 수 있다.

따라서 그림 5, 6, 7로부터 유전율이 높을수록 지면과 안테나의 사이의 간격 변화가 안테나의 투과 특성에 많은 영향을 주는 것을 알 수 있다.

이처럼, 주파수 영역에서의 투과 특성은 시간영역에서의 임펄스 신호의 전파 특성 변화에 대한 현상을 관찰할 수 없다.

4. 임펄스 전파 특성 해석

시간 영역에서의 임펄스 전파 특성을 해석하기 위해,

주파수 영역에서 얻어진 이산신호를 적절하게 시간영역으로 변환하는 과정이 필요하다. 주파수 영역에서의 값들을 단순히 IDFT(Inverse discrete Fourier transform)해서는 정확한 결과를 얻을 수 없기 때문에, 주파수 영역의 값들을 이용하여 유사 해석적 이산 시간 신호(analytic-like discrete-time signal), $z(t_m)=z[n]$ 를 구해야 한다. 즉, 벡터 회로망 분석기를 이용하여 얻어진 측정값 $X(f_m)=X(m)$ 을 이용하여, 유사 이산 시간 신호 $z[n]$ 을 얻기 위해, $Z[m]=DFT(z[m])$ 을 아래와 같이 만들 수 있다.

$$Z[m] = \begin{cases} X[m] & \text{for } m = 0 \\ 2X[m] & \text{for } 1 \leq m \leq N-1 \\ X[N] & \text{for } m = N \\ 0 & \text{for } N+1 \leq m \leq 2N-1 \end{cases} \quad (1)$$

식 (1)에서 구한 주파수 영역의 신호 $Z[m]$ 을 IDFT를 수행하여 시간영역으로 변환하게 되면, 복소수 값을 갖는 유사 해석 이산신호, $z[n]=z_r[n]+jz_i[n]$ 을 얻는다. 여기서, $z_r[n]$ 은 $z[n]$ 의 실수부 $Re\{z[n]\}$ 를 말하며, $z_i[n]$ 은 $z[n]$ 의 허수부 $Im\{z[n]\}$ 를 말한다. 이 중에 실제 측정되는 신호는 $z_r[n]$ 이며, $z_i[n]$ 는 실제 신호의 Hilbert transform한 신호이다. 그러므로 구하고자 하는 $X[m]$ 의 시간 영역에서의 신호, $x[n]$ 은 식(2)와 같이 $Z[m]$ 의 IDFT의 실수부로 구할 수 있다. 즉,

$$x[n]=IDFT\{X[m]\}=\text{Re}\{IDFT\{Z[m]\}\} \quad (2)$$

그림 8은 그림 5와 6에 나타난 토양에 대한 투과 특성에 대한 측정 결과를 식 (1) 과 (2)를 사용하여 시간영역으로 나타낸 결과이다. 지면으로부터 7cm 떨어진 경우의 출력 크기가 직접 지면에서 사용한 경우와 비교하면 대략 10 배 이상임을 관찰할 수 있다. 그림으로부터 지면과 안테나 사이의 간격이 7cm 떨어진 경우는 지면에 의해 큰 반사 신호가 생긴다. 안테나를 직접 지면에 붙인 경우와 간격을 둔 경우 토양 내부로부터 반사 신호를 관찰할 수 있으나, 신호의 크기 및 시간이 다를 수 있다. 이러한 결과는 임펄스 UWB GPR에서 실제 지중 매질물에 대한 이미지화를 위해서는 지면에 의해 반사되는 신호는 배경잡음과 함께 제거한다. 이때, 지면의 간격이 변함에 따른 반사 신호의 시간 지연 효과는 이미지를 흐리게 할 수 있다.

그림 9는 그림 7에 보인 모래의 투과 특성에 대한 측정 결과를 식 (1)과 (2)를 사용하여 시간영역으로 표시한 결과이다. 반사 신호의 크기는 토양의 경우와는 달

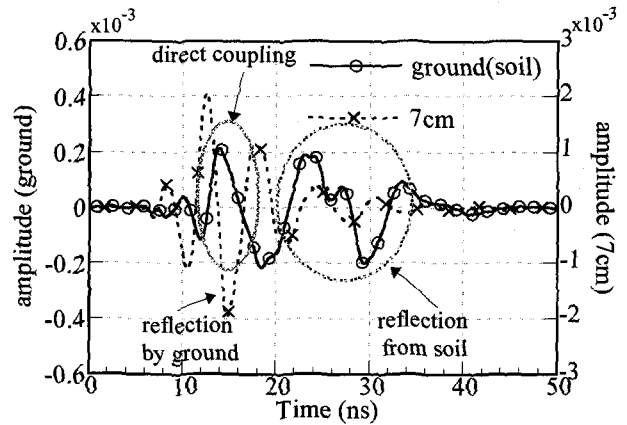


그림 8. 토양의 경우 측정된 투과 특성에 대한 시간영역 임펄스 응답 특성. 실선 (d=0), 점선 (d=7cm).

Fig. 8. Time domain impulse response of measured transmission for soil. Solid curve of d=0 and dotted curve of d=7cm.

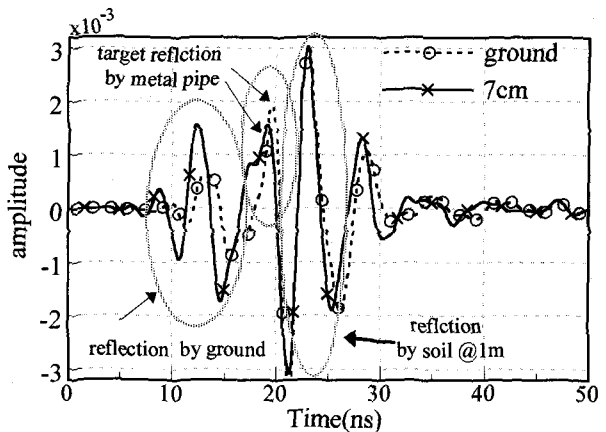


그림 9. 모래의 경우 측정된 투과 특성에 대한 시간영역 임펄스 응답 특성. 실선 (d=0), 점선 (d=7cm).

Fig. 9. Time domain impulse response of measured transmission for sand. Solid curve of d=0 and dotted curve of d=7cm.

리 지면과의 간격에 상대적으로 적은 영향을 받을 수 있다. 이는 상대적으로 유전율이 낮아, 안테나의 지면에 의한 특성의 영향이 적기 때문이다. 그림 9로부터, 수신되는 신호는 크게 세 부분으로 나눌 수 있다. 첫 번째는 지표면에 의한 반사 신호 부분, 직경 5cm 금속에 의한 반사부분, 모래와 토양의 경계면에서 발생하는 반사 신호로 구분할 수 있다. 각각의 위치에서의 침투치의 시간은 약간씩 달라짐을 알 수 있다. 특히, 목표물에 의한 반사 부분은 지면의 간격에 따라 반사 신호의 모양이 달라짐을 알 수 있다.

그림 8과 9의 결과로부터, 지표면과 안테나 사이의 간격에 의한 시간영역에서의 투과 특성 변화는 유전율

이 높을 수록 침투치에 영향을 많이 주었고, 특히 약간의 간격 변화에도 수신 파형의 침투치의 시간 위치를 이동시키는 현상을 보였다. 또한, 유전율이 낮은 경우에도 반사 신호의 시간이 지표면과 안테나 사이의 간격에 따라 수신되는 반사 신호에 영향을 끼침을 확인하였다. 이러한 현상들은 주파수 영역에서는 확인할 수 없는 결과들이지만, 임펄스 UWB GPR 활용시 매우 중요한 요소들이다. 즉, UWB GPR시스템 측정시 지표면이 고르지 않거나, 지면의 유전율이 갑자기 바뀔 경우, 이를 고려하여 수신 신호를 신호처리 하여야 지중 매질물에 대한 영상을 구할 수 있다. 또한, 측정시 지표면과 안테나 사이의 간격이 일정하도록 측정 셋업을 구성할 필요도 있다.

VI. 결 론

초광대역 임펄스 지반탐사레이더를 위하여 시간영역에서 안테나와 지면 사이의 간격에 의한 특성 변화를 실험과 시뮬레이션을 통하여 고찰하였다. 이를 위하여 새로운 초광대역 평판형 팻 다이폴 안테나를 제안하였다. 시뮬레이션 및 측정 결과로부터, 측정 매질의 변화 및 지면과 안테나 사이의 간격 변화에 따라 주파수 영역에서는 최대 수신 신호 주파수가 이동되었고, 시간영역에서는 침투치의 크기 및 시간 위치 변화를 초래하였다. 이러한 결과는 특히, 지면의 유전율이 높을수록 지면과 안테나 사이의 간격에 의한 영향으로 침투치 값이 지면과의 간격이 작을수록 지연되는 결과를 얻었다. 제안된 결과는 임펄스 지반탐사레이더 및 through-wall image 레이더와 같이 지면과의 근접 거리에서 활용되는 임펄스 이미지 UWB 레이더 시스템의 성능 개선에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] D. J. Daniels, "Ground penetrating radar (2nd Ed.)", IEE press, 2004.
- [2] J. D. Taylor(Ed.), "Introduction to Ultra-Wide Radar Systems", CRC press, 1995.
- [3] A. G. Yarovoy, et al., "Ground penetrating impulse radar detection of small and shallow buried objects", Proc. of IGA RSS'99, Vol.5, pp.2468-2470, 1999.
- [4] A. A. Lestari, A. G. Yarovoy, and L. P. Ligthart, "Ground influence on the input

impedance of transient dipole and bow-tie antennas," IEEE Trans. on Antennas and propagation, Vol. 52, No. 8, pp. 1970-1975, Aug. 2004.

저 자 소 개



김 관 호(정회원)

1978년 숭전대학교 전자공학과 (공학사)

1980년 연세대학교 전자공학과 (공학석사)

1980년~1983년 한국전력공사

1983년~현재 한국전기연구원

전기정보망그룹 그룹장

<주관심분야 : 전파통신, 전력선통신 시스템, 무선에너지 전송, UWB레이더 및 센서>



박 영 진(정회원)

1997년 중앙대학교 전자공학과 (공학사)

1999년 한국과학기술원 전기전자과 (공학석사)

2002년 Universitaet Karlsruhe 전기전자과 (공학박사)

2002년~ 현재 한국전기연구원

<주관심분야 : 임펄스 통신 시스템, 임펄스 레이더, 전파전파, 밀리미터파 차량용 레이더, 전력선 통신>



윤 영 중(평생회원)

1981년 연세대학교 전자공학과 (공학사)

1986년 연세대학교 전자공학과 (공학석사)

1991년 Georgia Institute of Technology (공학박사)

1992년~1993년 한국전자통신연구원 위성통신 기술연구단

1993년~ 현재 연세대학교 전기전자공학과 교수

<주관심분야 : 마이크로파 소자, 안테나, 전파전파, EMI/EMC>