

논문 2005-42TC-11-13

초광대역 임펄스를 이용한 고해상도 지반탐사 이미지 레이더

(High resolution ground penetrating image radar using an ultra wideband (UWB) impulse waveform)

박 영 진*, 김 관 호*, 이 원 태*

(Young-Jin Park, Kwan-Ho Kim, and Won-Tae Lee)

요 약

초광대역 임펄스를 이용한 비파괴 지중 금속 매설물 탐지용 지반 탐사 레이더(Ground penetrating image radar:GPR)를 개발하였다. 탐사 지면의 상대 유전율을 측정하였고, 최대 탐사 깊이 1m 이내의 측정이 가능하도록 시스템을 설계하였다. 전체 경로 감쇄, 시스템의 크기, 해상도를 고려하여 최고 주파수 및 최저 주파수를 선택하였다. 선택된 주파수에 맞는 1 나노세컨디(ns) 이하의 상승 시간을 갖는 초광대역 임펄스를 선택하였으며, 사용한 임펄스의 주파수 범위를 고려하여 소형 평판형 초광대역 다이폴 안테나를 설계하였다. 또한, 지중으로부터 반사되는 신호를 수신하기 위해서 디지털 오실로스코프를 사용하였다. 측정은 monostatic 방식과 마이그레이션(migration) 기법을 사용하였다. 지중 매설물의 영상 처리를 위해서는 A-scan 및 B-scan 평균 제거 방식을 사용하였다. 개발된 시스템은 금속 물체와 비금속 물체가 매설된 실증 시험장에서 시험되었고, 수 센티미터 직경의 작은 지중 금속 매설물까지도 탐지할 수 있는 우수한 성능을 가짐을 보였다.

Abstract

A ground penetrating image radar (GPR) using an ultra wideband (UWB) impulse waveform is developed for non destructive detection of metallic pipelines buried under the ground. Dielectric constant of test field is measured and then a GPR system is designed for better detection up to 1 meter deep. By considering total path loss, volume of complete system, and resolution, upper and lower frequencies are chosen. First, a UWB impulse for the frequency bandwidth of the impulse is chosen with rising time less than 1 ns, and then compact planar UWB dipole antenna suitable for frequency bandwidth of a UWB impulse is designed. Also, to receive reflected signals, a digital storage oscilloscope is used. For measurement, a monostatic technique and a migration technique are used. For visualizing underground targets, simple image processing techniques of A-scan removal and B-scan average removal are applied. The prototype of the system is tested on a test field in wet clay soil and it is shown that the developed system has a good ability in detecting underground metal objects, even small targets of several centimeters.

Keywords : Ground Penetrating Radar (GPR), non destructive detection, migration technique

I. 서 론

지반 탐사 레이더는 오래 전부터 지중에 매설되어 있는 광물들의 탐사나 지층 구조 분석을 위해 사용되었다. 최근에는 군사용으로 세계적으로 문제가 되고 있는 개인용 발목지뢰를 찾기 위한 중요한 수단으로 사용되고 있으며, 상업용으로는 토목 시공 등에서 비파괴 진단용으로 도로나 건축물의 시공 감리를 위해 사용되기도 하고 수

도관 등과 같은 지중 매설물의 탐지를 위해 사용되고 있다^[1]. 특히, 국내의 경우는 지중에 매설된 다양한 통신선, 전력선, 금속 가스관들에 대한 정확한 정보가 없어, 건설 시공 시 큰 피해를 가져오는 경우가 있어, 지중 매설물들에 대한 비파괴 진단 장비에 대한 요구가 높아지고 있다.

이처럼 기술 개발에 대한 수요가 점차 증대되고 있어, 최근 미국 FCC(Federal communication committee)에서는 1GHz 이하의 주파수 대역에서, 임펄스를 이용한 지중 매설물 탐지를 위한 주파수 사용을 허락하여, 관련 기술 개발 활성화 및 기술 상용화를 돕고 있다^[2].

본 논문에서는 초광대역(Ultra Wideband) 임펄스의 특징을 이용한 비파괴(Non-destructive) 지중 금속 가

* 정회원, 한국전기연구원
(Korea Electrotechnology Research Institute
(KERI))

접수일자: 2005년8월26일, 수정완료일: 2005년11월8일

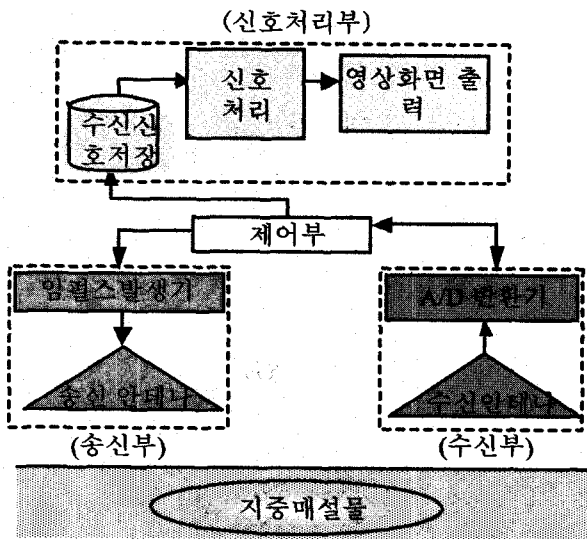


그림 1. 지중 매설물 비파괴 탐지용 지반 탐사 레이다 구성

Fig. 1. Configuration of ground penetrating radar for detecting underground target.

스판 및 전력 케이블 탐지용 지반 탐사 레이다에 대한 시스템 설계와 migration 기법을 이용한 지중 매설물 탐지를 위한 영상화 기법을 소개하고자 한다.

그림 1은 임펄스를 이용한 지반 탐사 레이다에 대한 구성을 나타낸다. 지중 매설물 탐지용 고해상도 레이다는 임펄스 발생기와 초광대역 임펄스 방사를 위한 초광대역 안테나로 구성된 신호 송신부와 지중으로부터 반사된 광대역 신호 수신을 위한 초광대역 안테나 및 고속의 analog-to-digital(A/D) 변환기로 구성된 수신부, 그리고 송수신 신호를 제어하고 수신된 신호를 저장하여 영상화하기 위한 신호처리 부로 구성되어 있다.

대개의 경우 지중 금속 가스관 및 전력 케이블은 지중 1m 이내에 묻혀 있기 때문에, 본 논문에서는 최대 탐사 깊이를 1m로 정하였으며, 전체 경로 손실을 고려하여 임펄스를 결정하였다. 또한, 주파수가 낮을수록 탐사 깊이는 증가하지만, 초광대역 안테나의 크기가 커지므로 최저 사용주파수는 탐사 깊이와 안테나의 크기를 고려하여 결정하였다.

본론에서는 지반탐사 레이다 설계를 위한 각각의 구성 요소들에 대해 설명하겠다.

II. 본 론

1. 임펄스 발생기

임펄스 발생기를 결정하기 위해서는, 시스템의 최대

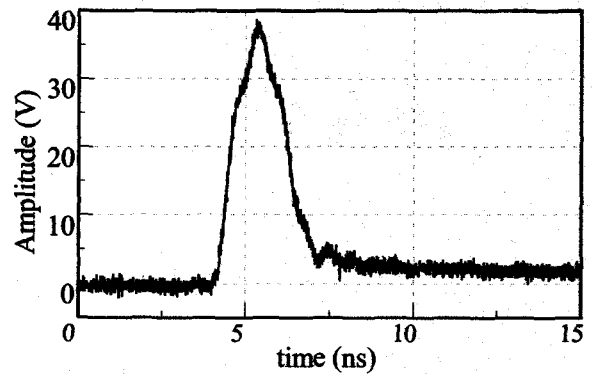


그림 2. 초광대역 임펄스
Fig. 2. Ultra wideband impulse.

탐사깊이 및 해상도를 고려하여야 한다. 높은 해상도를 얻기 위해서는 가능한 넓은 주파수 대역을 사용해야 하지만, 주파수가 높을수록 지중에서의 전체 경로 감쇄가 매우 높아 사용할 수가 없다. 또한, 임펄스 발생기의 주파수 특성을 낮은 주파수로 옮기면, 지중 투과 깊이는 좋아지나, 이를 위한 광대역 안테나의 크기가 증대되어 시스템의 소형화가 어렵다.

시스템의 전체 경로 손실을 계산하기 위해, 우선 개방형 동축선 프로브 (Open-ended coaxial probe)를 활용하여 측정하고자 하는 시험장 토양의 상대 유전율을 구했다^[3]. 측정 결과 300MHz에서 상대 유전율 $\epsilon_r=15$, 도전율 0.0025S/m를 얻었다. 이를 이용하여 지중 1m에 매설되어 있는 금속 가스관에 대한 전체 경로 손실은 300MHz에서 대략 60dB 감쇄함을 얻었다. 계산을 위해, 안테나는 다이폴로 고려하였고, 지면과 안테나 사이의 간격은 없는 것으로 간주하였다. 또한, 탐사를 위한 수신 신호의 강도는 대개의 경우 지반 탐사 레이다에서는

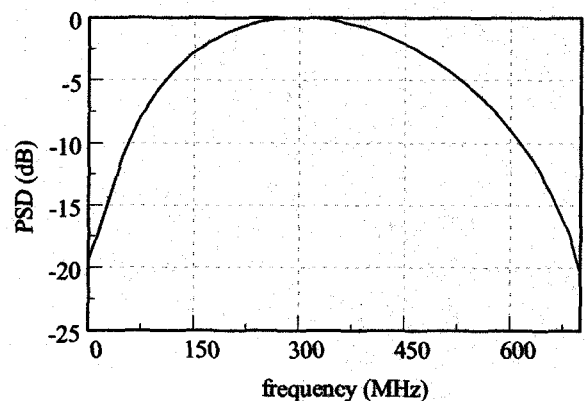


그림 3. 그림 2의 임펄스 발생기를 미분 한 임펄스의 전력밀도 (Power spectral density:PSD)
Fig. 3. Power spectral density of the derivative impulse of the impulse in Fig. 2.

배경 잡음에 비해 수신 신호가 최소한 수 mV 이상의 전압차를 가져야 매설물의 탐지가 가능하다^[1].

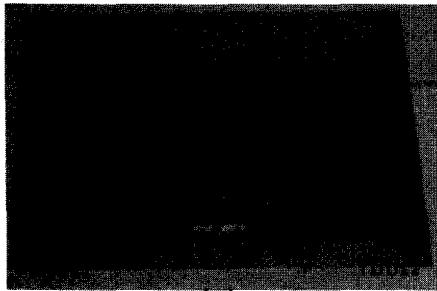
본 논문에서는 임펄스 발생기 Picosecond impulse generator 2600C를 사용하였다. 그림 2에 사용한 임펄스 파형을 나타내었다. 그림에서 처럼 펄스 첨두치는 40V, 상승 시간 800ps의 특성을 갖는다. 그러나 실제 안테나를 통하여 방사되는 신호는 초광대역 안테나의 대역통과 특성 때문에, 그림2의 임펄스를 미분한 형태가 될 것이다^[4].

그림 3은 방사되는 임펄스의 주파수 특성을 보인다. 그림에서처럼 실제 방사되는 임펄스의 중심주파수는 300MHz 근처이며, -10dB에서 약 550MHz를 가짐을 알 수 있다.

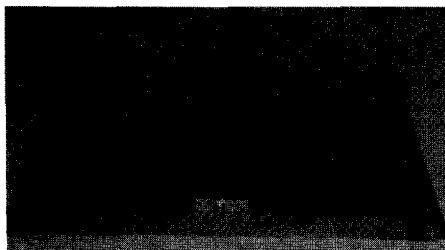
2. 초광대역 평판형 다이폴 안테나

사용된 광대역 주파수 특성을 갖는 임펄스를 지중으로 왜곡없이 방사하기 위해서는 주파수 대역에 맞는 초광대역 안테나가 필요하다. 본 논문에서는 제작이 용이하고, 부피가 작은 평판형 다이폴 안테나를 설계하였다.

다이폴 안테나는 공진형 안테나로 임펄스 방사 시, 수신 신호에 영향을 주는 떨림 (Ringing) 현상이 생긴다. 이러한 떨림 현상은 지중 매설물에 반사된 신호와



(a)



(b)

그림 4. 제작된 초광대역 다이폴 안테나. (a) 다이폴 안테나, (b) 파라볼릭 반사체로 싸여진 안테나 사진

Fig. 4. Fabricated UWB dipole antenna. (a) Photograph of dipole antenna, and (b) photograph of that with parabolic reflector.

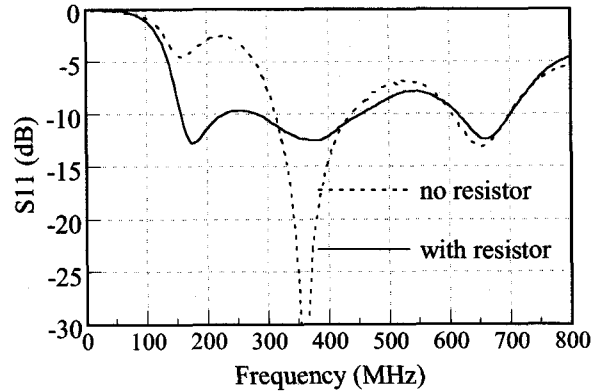


그림 5. 광대역 다이폴 안테나의 반사 특성. 점선은 저항을 제거한 경우, 실선은 저항을 붙여 측정.

Fig. 5. Reflection behavior of ultra wideband antenna without resistors (dotted line) and with resistors (solid line).

중첩되어, 원래의 신호를 구별하는데 문제점을 준다. 이를 방지하기 위해 다이폴의 네 모서리에 저항을 부착하여 떨림 현상을 줄였다. 그러나, 저항을 사용하여, 떨림 현상이나 안테나의 반사 특성은 향상시킬 수 있었으나, 안테나 효율을 저하시키는 단점도 있다.

또한, 안테나에는 외부로부터의 방해 신호를 막고, 방사되는 신호를 집중시키기 위해 파라볼릭 형 금속 반사체를 부착하였다.

그림 5는 설계된 안테나의 반사 특성을 보인다. HP8753D를 사용하여 안테나를 측정하였다. 또한, 실제 환경인 시험장에서 안테나의 반사 특성을 측정하였다. 저항 없는 경우 (점선)는 대역폭이 저항이 있는 경우와 비교해 좁다. 또한, 저항의 있는 경우는 상대적으로 원하는 주파수 대역내에서 안정된 반사 특성을 가짐을 보여주고 있다.

2. 지중 매설물 영상화 신호처리 기법

그림 6은 Migration 기법을 이용한 지중 매설물 탐사 방법을 나타내었다. 즉, 송신과 수신 안테나는 분리되어 있고, 일정한 간격을 유지하며, 시험장을 이동하며 측정하게 된다.

측정 데이터는 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 첫째는 각 지점에서 측정한 깊이에 대한 데이터인 A-scan 데이터 (D_{A-scan})이다. 왜곡 없는 A-scan 데이터를 얻기 위해서는 샘플링 이론으로부터, 방사된 초광대역 임펄스 대역폭의 두 배 이상이 되도록 샘플링하여야 한다. 둘째는 동일한 깊이 또는 반사된 신호의 시간에 따라 A-scan 데이터를 분리하여 얻은 B-scan 데이터

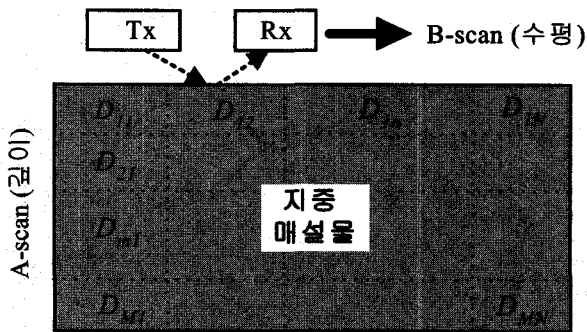


그림 6. 지중 매설물 비파괴 탐지용 지반 탐사 레이더 구성.
 Fig. 6. Schematic diagram of ground penetrating radar for non-destructive testing (NDT).

(D_{B-scan})들이다. B-scan 방식은 레이더 안테나 시스템과 지중 매설물 사이의 약간의 공간적인 변화에 의한 지중 매설물에 대한 영상의 흐려지는 현상을 막기 위해서이다.

따라서 전체 측정된 데이터(D_t), A-scan 데이터(D_{A-scan}) 및 B-scan 데이터(D_{B-scan})를 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$D_t = \sum_{m=1, n=1}^{M, N} D_{mn} \quad (1)$$

$$D_{A-scan} = \sum_{m=1}^M D_{mn} \Big|_{n=fixed} \quad (2)$$

$$D_{B-scan} = \sum_{n=1}^N D_{mn} \Big|_{m=fixed} \quad (3)$$

여기서 변수 M 과 N은 각각 최대 A-scan 과 B-scan 수이다.

수신된 신호의 영상화를 위해, A-scan, B-scan 신호 처리 방법을 사용하였다. 우선, A-scan 데이터, DA-scan으로부터 지중 매설물에 의한 신호만을 얻기 위해 배경 잡음을 제거한 데이터인 D_{t1} 을 식(4)를 이용하여 계산한다. 배경 잡음으로는 지중 매설물이 존재하지 않는 A-scan의 첫 번째 데이터를 사용하였다. 배경 잡음의 제거는 송수신 안테나 사이에 직접 전파되는 신호 성분도 제거되어 이론적으로는 순수하게, 목표물에 의한 반사 신호만이 있게 된다.

$$D_{t1} = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M (D_{mn} - D_{m1}) \quad (4)$$

그러나 서두에서 언급한 것과 같이 배경잡음이 제거

된 A-scan 데이터 D_{t1} 에는 안테나와 지면 사이의 간격이 약간씩 달라져 지중 매설물에 대한 영상의 흐려지는 현상이 존재한다. 이러한 흐려짐을 해결하기 위해, B-scan 신호처리를 수행한다. B-scan 신호처리 데이터 D_{t2} 는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$D_{t2} = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M (D_{t1_mn} - \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N D_{t1_mn}) \quad (5)$$

3. 실증시험

가. 실증시험장 구성

그림 7에 시험장 구성을 보이고 있다. 그림에서처럼 시험장에는 다양한 형태의 금속 물질 뿐만 아니라 비금속 물체를 매설하였다. 시험장 전체는 길이는 10m이다.

그림 8은 제작된 지반탐사 레이더의 시제품을 나타낸다. 그림에서처럼 두 안테나 사이는 일정한 간격을 유지하도록 하였다. 또한, 측정 시 레이더의 이동성을 원활하게 하기 위해 바퀴를 사용하였다. 반사된 신호의 측정을 위해, 5GS/s 디지털 오실로스코프를 사용하였고, 수신된 데이터 저장을 위해 랩톱을 사용하였다. 펄스 간의 간격을 100kHz로 낮추었으며, 수평 해상도를 높이기 위해, 5cm마다 B-scan을 수행하도록 하였다.

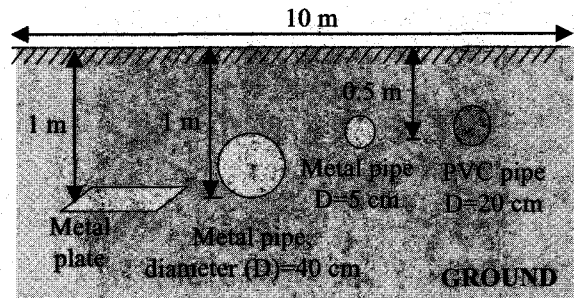


그림 7. 지반탐사 레이더 시험장구성
 Fig. 7. Configuration of test field for ground penetrating radar.

나. 측정 결과 및 해석

그림 9는 측정 데이터를 신호 처리하여 영상화한 결과이다. 그림에서처럼 Migration 기법을 사용하였기 때문에, 금속 매설물에 대한 형상은 파라볼릭 형태다. 또한, 그림으로부터 깊이에 대한 해상도가 아주 우수함을 알 수 있다. 즉, 실증 시험장 구성도에서 보이는 것과 같이 각 금속 물체들은 금속 표면에서 지면까지의 높이의 차별이 영상 이미지에서도 확인이 가능하다. 그러나

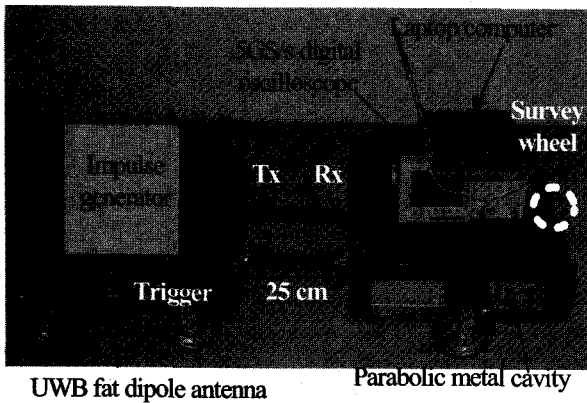


그림 8. 지반탐사 레이더의 시제품.
Fig. 8. Prototype of ground penetrating radar.

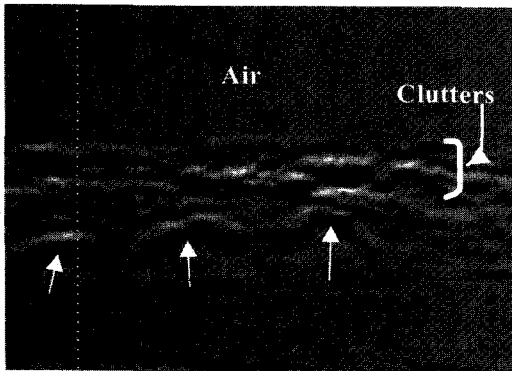


그림 9. 지중 매설물 영상화
Fig. 9. Visualization of underground targets.

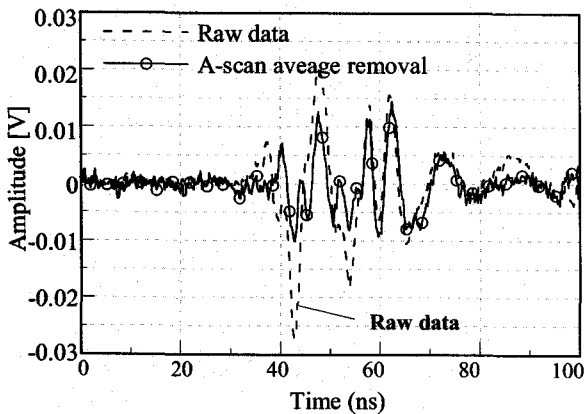


그림 10. 금속판에서 반사된 원래 신호 및 A-scan 신호 처리 후 파형
Fig. 10. Original received signal reflected by metal plate and the signal made by A-scan processing.

비금속 매설물에 대해서는 확인이 되지 않는다. 이는 반사 신호가 금속에 의한 것보다 상대적으로 작기 때문이다.

그림 10과 11은 지중 매설물 영상에서 매설물이 있는 곳 (그림에서 N1)의 원래 수신된 파형 및 신호처리 후

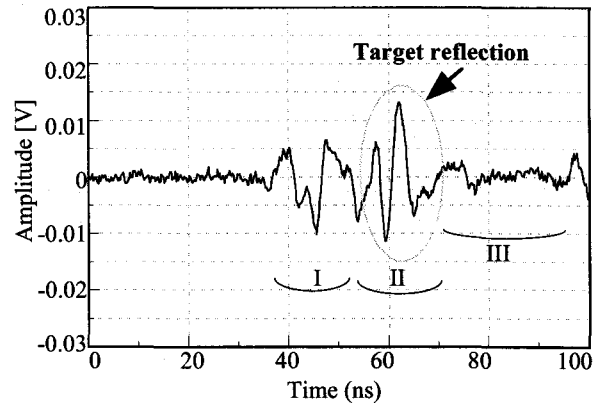


그림 11. B-scan 신호처리 후 파형
Fig. 11. Signal made by B-scan processing.

최종 신호의 파형을 나타낸다. 그림10으로부터 원본 데이터 자체로서는 매설물의 유무를 확인할 수 없으나, A-scan 신호처리 후의 파형으로부터 지중 매설물에 의한 신호를 구분할 수 있다. A-scan 신호처리 후 파형으로부터, 전체 수신 신호는 세 부분으로 나눌 수 있다. 즉, 아직 완전히 제거되지 않은 배경잡음 부분인 영역 I, 금속판에 의해 반사된 신호인 영역 II, 배경잡음 부분인 영역 III으로 나눌 수 있다.

그림 11에는 B-scan 신호처리 과정을 거쳐, 얻어진 최종 신호의 모양을 보인다. 그림에서처럼 영역 II에서의 지중 매설물에 의한 신호를 잘 구분할 수 있다.

III. 결 론

초광대역 임펄스를 이용한 고해상도 지반 탐사 레이더를 개발하였다. 지중 매설물 영상 처리를 위해 Migration 기법을 사용하였고, 지반탐사 레이더 시스템 설계에 대해 구체적으로 기술하였다. 개발된 시제품은 실증 시험장에서 성능을 평가하였다. 실험으로부터, 지반 탐사 레이더는 수평 및 깊이에 대한 해상도가 아주 우수했으며, 특히 직경이 작은 물체도 탐지해 낼 수 있음을 확인했다. 따라서, 개발된 지반 탐사 레이더는 직경이 상대적으로 큰 물체뿐만 아니라, 지중 송전케이블과 같은 작은 금속 물체 탐지에도 활용될 수 있을 것이다.

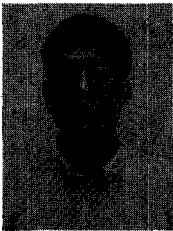
참 고 문 헌

[1] D. J. Daniels, Surface Penetrating Radar. IEE: London, UK, 1996.
[2] Federal Communication Commission (FCC),

"Revision of Part 15 of the Commission's Rules regarding Ultra Wideband Transmission systems," FCC 02-48; Adopted Feb. 14, 2002.

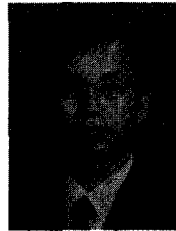
- [3] H.-C. Oh, Y.-S. Jo, S.-Y. Hyun, and S.-Y. Kim "Modeling of electrical property of background medium applied to ground penetrating radar," Proc. of Asia-Pacific Microwave Conference, Seoul, Korea, Nov. 2003, pp. 921-924.
- [4] E. G. Farr and C. E. Baum, "Time domain characterization of antennas with TEM feeds", *Sensor and simulation Notes*, Note 426, Oct. 1998.

저 자 소 개



박 영 진(정회원)
 1997년 중앙대학교
 전자공학과 학사졸업
 1999년 한국과학기술원
 전기전자과 석사졸업
 2002년 University of Karlsruhe
 전기전자과 박사 졸업
 2002년 11월 ~ 현재 한국전기연구원 전기정보망
 기술연구그룹 근무.

<주관심분야: Impulse radio propagation, UWB image radar, short range automotive radar, digital beam forming, power line communications (PLC)>



김 관 호(정회원)
 1978년 송전대학교
 전자공학과 학사 졸업
 1980년 연세대학교
 전자공학과 석사졸업.
 1980년 ~ 1983년 한국전력공사.
 1983년 ~ 현재 한국전기연구원
 전기정보망 기술연구그룹
 그룹장.

<주관심분야 : 전파통신, 전력선통신시스템, 무선 에너지 전송, UWB 레이더 및 센서>



이 원 태(정회원)
 1983년 연세대학교
 전기공학과 학사졸업
 1985년 연세대학교
 전기공학과 석사졸업
 2003년 경남대학교
 전자공학과 박사수료

<주관심분야 : 무선통신, 전력선 통신, 통신망 관리>