

## 초광대역 임펄스를 이용한 고해상도 지반탐사 이미지 레이더

박영진, 김관호, 박해수

한국전기연구원, 전기정보망기술연구 그룹

### High resolution ground penetrating image radar using an impulse waveform

Young-Jin Park, Kwan-Ho Kim, and Hae-soo Park

Power telecommunication network group, KERI

**Abstract** - 초광대역 임펄스를 이용한 비파괴 지중 매설물 탐지용 지반 탐사 레이더(Ground penetrating image radar:GPR)를 개발하였다. 최대 탐사 깊이를 고려하여, 900 picosecond(ps) 상승 시간을 갖는 초광대역 임펄스를 설계하였고, 임펄스 발생기의 주파수 특성을 고려하여, 소형 평판형 다이폴 안테나가 설계되었다. 또한, 지중으로부터 반사되는 신호를 수신하기 위해서 고속의 A/D를 사용하였다. 측정은 송수신 안테나의 간격을 고정된 Bistatic 방식을 사용하였으며, 지중 매설물의 영상처리 판별을 위해 마이그레이션(migration) 기법을 사용하였다. 개발된 시스템은 금속 물체와 비금속 물체가 매설된 실증 시험장에서 시험되었고, 평면 해상도 및 깊이에 대한 해상도가 우수함을 보였다.

### 1. 서 론

지반 탐사 레이더는 지중에 매설되어 있는 광물들의 탐사나, 군사용으로는 세계적으로 문제가 되고 있는 개인용 발목지뢰를 찾기 위한 중요한 수단으로 사용되고 있다 [1]. 최근에는 토목 시공에서 비파괴 진단용으로 도로나 건축물의 감리를 위해서 사용되고 있다. 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 고해상도의 특징을 갖는 초광대역(Ultra Wideband) 임펄스의 특징을 이용한 비파괴(Non-destructive) 지중 금속 가스관 및 전력 케이블 탐지용 지반 탐사 레이더에 대한 시스템 설계와 migration 기법을 이용한 지중 매설물 탐지를 위한 영상화 기법을 소개하고자 한다.

그림 1은 임펄스를 이용한 지반 탐사 레이더에 대한 구성을 보이고 있다. 지중 매설물 탐지용 고해상도 레이더는 임펄스 발생기와 초광대역 임펄스 방사를 위한 초광대역 안테나로 구성된 신호 전송부와 지중으로부터 반사된 광대역 신호 수신을 위한 초광대역 안테나 및 고속의 analog-to-digital(A/D) 변환기, 그리고 송수신 신호를 제어하고 수신된 신호를 저장하여 영상화하기 위한 신호처리부로 구성되어 있다. 그림에서처럼, 신호 송신부에서는 측정하고자 하는 토양의 유전율과 감쇄율을 고려하여 임펄스 발생기를 설계한다. 그리고 임펄스 발생기의 주파수 특성에 맞는 초광대역 안테나의 설계가 이루어져야 한다.

본문에서는 지반탐사 레이더 설계를 위한 각각의 구성 요소들에 대한 사양 및 방법들에 대해 설명하겠다.

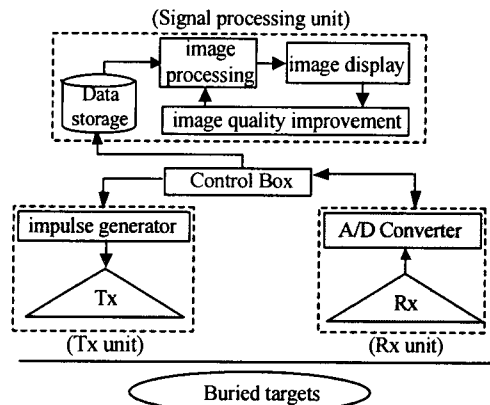


그림 1. 지중 매설물 비파괴 탐지용 지반 탐사 레이더 구성.

### 2. 본 론

#### 2.1 임펄스 발생기

임펄스 발생기는 흙의 유전율과 최대 측정 깊이에 따라 결정된다. 대개의 경우 지반 탐사 레이더는 배경 잡음에 비해 최소한 수 mV 이상의 전압차를 가져야 매설물의 탐지가 가능하다[1]. 또한 대개의 경우 지중 매설물은 1m 이내에 매설되므로 최대 탐지 깊이는 1m로 정하였다.

시스템의 전체 경로 손실을 계산하기 위해, 측정하고자 하는 시험장 토양을 개방형 동축선 프로브를 활용하여, 300MHz에서 토양의 상대 유전율  $\epsilon_r=20$ , 도전율  $0.0025S/m$ 를 얻었다. 이를 이용하여 지중 1m에 금속 가스관에 대한 전체 경로 손실은 대략 60dB 감쇄됨을 얻었다.

또한, 임펄스 발생기의 주파수 특성을 낮은 주파수로 옮기면, 지중 투과 깊이는 좋아지나, 이를 위한 광대역 안테나의 크기가 증대되어 시스템의 소형화가 어렵다. 따라서 이러한 시스템 조건을 고려하여, 중심 대역폭이 300MHz이며 임펄스 폭이 3ns 이하, 상승 시간이 1ns 이하의 임펄스로 결정하였다.

그림 2에 사용한 임펄스 파형을 나타내었다. 특히, 임펄스의 하강 시간에 의한 신호의 왜곡을 방지하기 위해, 임펄스 상승 과 하강 부분을 분리하였다.

실제 임펄스는 대역 통과 특성을 갖는 초광대역 안테나를 통과하면, 그림 2에서 주어진 신호의 미분 형태와 같게 된다[3]. 따라서 임펄스의 주파수 특성을 확인하기 위해, 그림 2의 미분 신호에 대한 전력 밀도 함수를 그림 3에 나타내었다. 그림에서처럼 실제 방사되는 임펄스의 중심주파수는 300MHz 근처이며, 약 550MHz@ 10dB를

가짐을 알 수 있다.

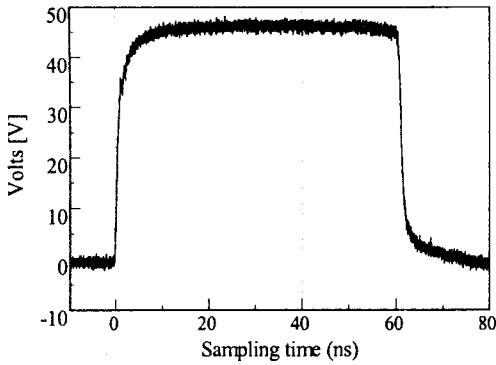


그림 2. 초광대역 임펄스 모양.

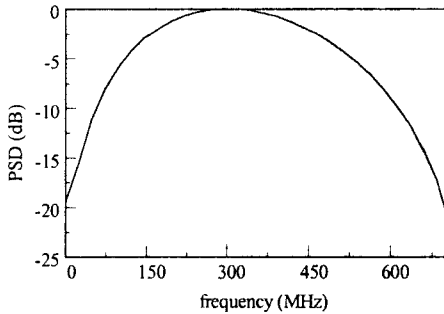


그림 3. 그림 2의 임펄스 발생기를 미분하여 구한 방사되는 임펄스의 전력밀도 (Power spectral density: PSD).

## 2.2 초광대역 안테나

광대역 임펄스를 방사하기 위해, 평판형 다이폴 안테나를 설계하였다. 다이폴 안테나는 공진형 안테나로 임펄스 방사 시, 수신 신호에 영향을 주는 Ringing이 생겨, 이를 방지하기 위해 저항을 다이폴의 모서리에 붙였다. 저항을 사용하므로 ringing 현상이나 안테나의 반사 특성은 향상시킬 수 있었으나, 안테나 효율을 저하시키는 역할을 하였다. 특히, 안테나에는 외부로부터의 방해 신호를 막고, 방사되는 신호를 포커싱하기 위해 파라볼릭형 금속 반사체가 부착되었다.

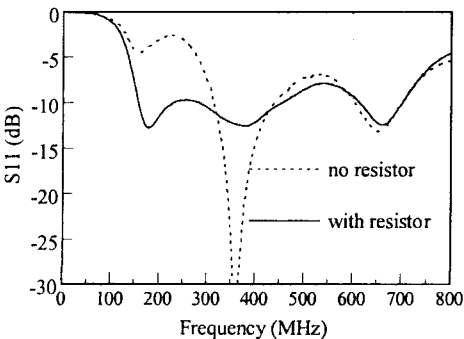


그림 4. 광대역 다이폴 안테나의 반사 특성. 점선은 저항을 제거한 경우, 실선은 저항을 붙여 측정된 경우.

그림 4는 설계된 안테나의 반사 특성을 보인다. 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.

## 2.2 지중 매설물 영상화 신호처리

그림 5는 migration 기법을 이용한 지중 매설물 탐사법을 나타내었다. 즉, 송신과 수신 안테나는 분리되어 있고, 일정한 간격을 유지하며, 시험장을 이동하며 측정하게 된다.

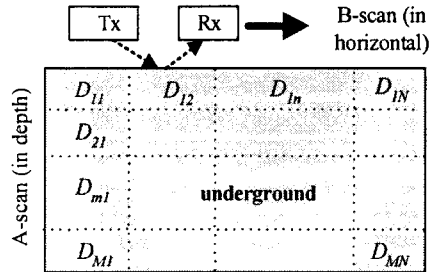


그림 5. 신호처리를 위한 측정 데이터 저장 형태.

측정 데이터는 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 첫째는 각 지점에서 측정된 깊이에 대한 데이터인 A-scan 데이터 ( $D_{A-scan}$ )이다. 왜곡없는 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 ( $D_{B-scan}$ )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( $D_i$ ), A-scan 데이터 ( $D_{A-scan}$ ) 및 B-scan 데이터( $D_{B-scan}$ )를 아래와 같이 표현할 수 있다.

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

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

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

여기서 변수 M 과 N은 각각 최대 A-scan 과 B-scan 수이다. 수신된 신호의 영상화를 위해, A-scan, B-scan 신호처리 방법을 사용하였다. 우선, A-scan 데이터,  $D_{A-scan}$ 으로부터 지중 매설물에 의한 신호만을 얻기 위해 배경 잡음을 제거한 데이터인  $D_{11}$ 을 식(4)를 이용하여 계산한다. 배경 잡음으로는 지중 매설물이 존재하지 않는 A-scan의 첫번째 데이터를 사용하였다. 배경 잡음의 제거는 송수신 안테나 사이에 직접 전파되는 신호 성분도 제거되어 이론적으로는 순수하게 목표물에 의한 반사 신호만이 있게 된다.

$$D_{i1} = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M (D_{mn} - D_{m1}) \quad (4)$$

그러나, 서두에서 언급한 것과 같이 배경잡음이 제거된 A-scan 데이터  $D_{i1}$ 에는 안테나 시스템과 지중 매질물 사이의 약간의 공간적인 변화에 의한 지중 매질물에 대한 영상의 흐려지는 현상이 존재하여, B-scan 신호처리 데이터  $D_{i2}$ 를 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$D_{i2} = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M (D_{i1\_mn} - \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N D_{i1\_mn}) \quad (5)$$

### 2.3 실증 시험

#### 2.3.1 실증시험장 구성

수신된 신호의 저장을 위해, 5GS/s 디지털 오실로스코프가 사용되었다. 펄스 간의 간격을 10kHz로 낮추어 전체 평균 방산 전력을 낮추었다.

그림 6에 시험장 구성을 나타낸다. 그림에서처럼 시험장에는 다양한 형태의 금속 물질 뿐만 아니라 비금속 물체들을 매설하였다. 시험장 전체는 길이는 10m로 하였다.

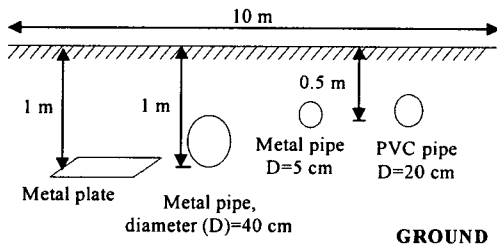


그림 6. 지반탐사 레이더 시험장 구성도.

#### 2.3.2 측정 결과

그림 7은 측정 데이터를 신호 처리하여 영상화한 결과이다. 그림에서처럼 금속 매질물에 대한 형상은 파라볼릭 형태로 얻어짐을 알 수가 있다. 또한, 깊이에 대한 해상도가 아주 우수함을 알 수 있다. 즉, 실증 시험장 구성도에서 보이는 것과 같이 각 금속 물체들은 금속 표면에서 지면까지의 높이의 차이가 영상이미지에서도 확인이 가능하다. 그러나, 비금속 매질물에 대해서는 확인이 되지 않는다. 이는 반사 신호가 상대적으로 적어, A-scan 신호처리 때에 원래 데이터가 손상된 것으로 생각된다.

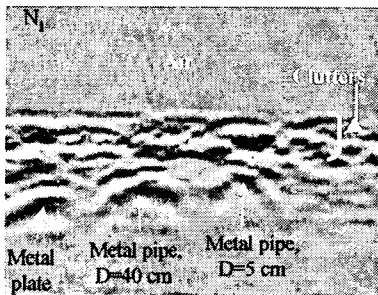


그림 7. 지중 매질물 영상.

그림 8과 9는 지중 매질물 영상에서 매질물이 있는 곳(그림에서  $N_1$ )의 A-scan 원본 데이터를 이용하여,

A-scan과 B-scan 신호처리 결과를 나타낸다. 그림으로부터 원본 데이터 자체로서는 매질물의 유무를 확인할 수 없으나, 신호처리를 거쳐 두 번째 영역에서 원하는 신호를 확인할 수 있다.

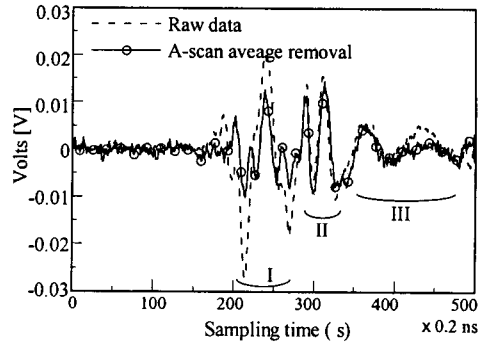


그림 8. 측정 원본 데이터 와 A-scan 신호처리 결과

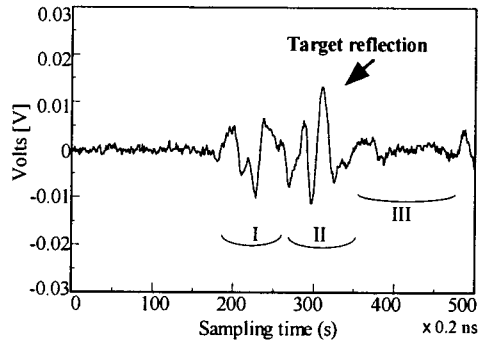


그림 9. B-scan 신호처리 결과.

### 3. 결 론

초광대역 임펄스를 이용한 고해상도 지반 탐사 레이더가 개발되었다. 레이더 시스템의 설계 방법에 대하여 구체적으로 기술하였고, 특히, 지중 매질물 영상 처리를 위한 간단한 알고리즘이 제안되었고 실제 시험장에서 검증되었다. 지반 탐사 레이더는 수평 및 10센티미터 정도의 깊이에 대한 해상도를 가짐을 알 수 있었다.

#### [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] E.G.Farr and C.E.Baum, "Time domain characterization of antennas with TEM feeds", *Sensor and simulation Notes*, Note 426, Oct. 1998.