

초광대역 기술을 이용한 고해상도 비파괴 진단용 지반 탐사 영상 레이더 개발

박 영 진, 김 관 호, 박해수  
한국전기연구원

Grand Penetrating Radar using Ultra Wideband Impulse Waveform for  
Nondestructive Testing of Underground Objects

Young-Jin Park, Kwan Ho Kim, Hae-Soo Park  
Korea Electrotechnology Research Institute

**Abstract** - 극 초단의 임펄스를 사용하여 지중 매설물을 탐색하기 위한 지반탐사 영상 레이더를 개발하였다. 개발된 지반 탐사 레이더는 Gaussian 임펄스, 임펄스 송수신을 위한 초 광대역 소형 모노폴 안테나, 수신 신호 저장을 위한 고속 A/D로 구성된다. 탐지 깊이와 시스템의 크기를 고려하여 임펄스 발생기 및 초광대역 안테나가 설계되었다. 지중 매설물의 영상화를 위해 여러 가지 이미징 기법이 사용되었다. 발표에서는 구현된 시스템의 시제품을 소개하고, 개발된 시제품을 사용하여 가상의 모래 시험장에서 측정된 결과를 보일 것이다.

1. Introduction

최근, 초광대역 임펄스 기술을 이용한 비파괴 진단 (Non Destructive Testing; NDT) 지중 매설물 탐지에 활용하기 위해 많은 연구가 진행 중이다. 이러한 시스템은 사용한 임펄스가 주파수 영역에서 초광대역 (Ultra wideband; UWB) 특성을 갖기 때문에 초광대역 지반탐사 레이더 (Ultra Wideband Ground Penetrating Radar : UWB GPR)라고도 말한다. 기존의 FMCW 레이더와 비교해 시간상의 극 초단의 임펄스를 사용하기 때문에 아주 높은 해상도와 상대적으로 간단한 하드웨어 구현에 유용한 특성을 가진다[1]-[3].

이러한 UWB GPR 장점을 이용하여, 최근에 저자들은 상업용 비파괴 진단 지중 금속 탐지용 UWB GPR 시스템을 개발하여 소개하였다 [4]. 개발된 GPR 시스템에서 보여진 것과 같이, GPR 시스템이 지반의 금속 물질을 찾기 위해 뛰어난 성능을 가진다는 것을 실험적으로 증명하였다. 이 논문에서는 지반의 금속 가스 파이프라인을 탐지하기 위한 새로운 UWB GPR이 소개한다. 개발된 UWB GPR은 기존 시스템에서 사용한 부피가 큰 평판형 다이폴 대신, 소형의 진행파 모노폴 안테나를 사용하여 시스템의 전체 크기를 더욱 소형화하였고 지중 매설물의 영상화를 위해, A-스캔 reference와 B-스캔 average를 제거하는 영상 처리 기법 이외에도, 지중 매설물의 영상을 더욱 선명하게 하기 위해 보간 (Interpolation) 및 임계기법 (Threshold)이 사용되었다. 또한, 시스템 검증을 위하여 모래 시험장을 제작하였다. 개발된 안테나와 임펄스 발생기를 사용하여 UWB GPR 시스템 최종 시제품을 완성하였고, 그 동작 성능을 시험장에서 테스트하였다.

다음 Section에서는, 진행파 모노폴 안테나와 시스템의 측정 결과가 포함된, 완성된 UWB GRP 시스템이 소개될 것이다.

2. UWB GPR 시스템의 구성

UWB GPR 시스템은 세 가지 주요 부분으로 구성되어 있다. 그 첫 번째는 임펄스 발생기와 임펄스를 전송하기 위한 UWB 안테나로 구성된 송신단이고, 두 번째는 반사된 신호를 받는 UWB 안테나와 고속의 Digitizer로 구성된 수신단이다. 마지막으로 지중 매설물의 영상 처리를 위한 신호 처리 부분으로 구성되어 있다. 본 연구에서는 샘플링이 5GS인 디지털 오실로스코프를 고속 Digitizer 로서 사용하였다.

를 고속 Digitizer 로서 사용하였다.

2.1 Impulse Generator

UWB GPR을 위한 최적의 임펄스 신호를 결정하기 위해 지중의 특성과 최대 측정 가능 깊이가 고려되어야 한다. 참고문헌 [4]에 언급되어진 것처럼, 국내 일반적인 토양 환경은 외국과 비교하여 다소 많은 수분을 함유하여 감쇄현상이 극심하다. 따라서 이러한 특성과 탐사 최대깊이를 고려하여, 최대 주파수는 약 400 MHz로 하였다. 또한 낮은 주파수일수록 더 깊은 특성이 있고, 탐지 능력이 좋으나, 안테나의 크기 제한 때문에 최저 주파수를 150MHz로 정하였다. 이로써 원하는 주파수 대역폭에 대한 임펄스 신호가 정해진다.

위에서 정해진 임펄스를 실제 설계하였다. 이 임펄스 신호는 약 2.5 ns 의 펄스 폭을 가진다. 임펄스의 주파수 특성은 계산된 Power Spectral Density (PSD)에 의해 알 수 있다. 초기 임펄스에 대한 미분형태가 실제 방사되기 때문에 펄스 모양의 미분형태에 대한 PSD를 구하여 임펄스의 주파수 특성을 조사하였다. 주파수 대역폭은 3 dB 선을 경계로 150 MHz~500 MHz 대역폭을 가짐을 보였다.

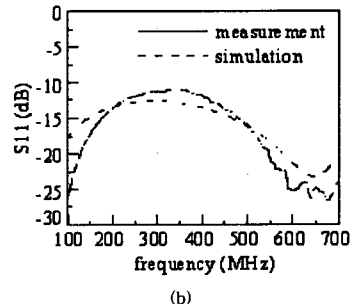
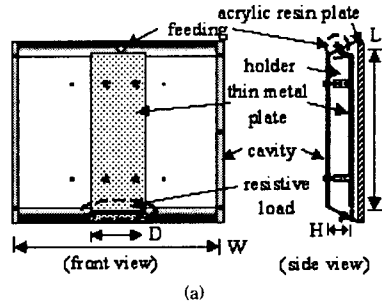


그림 1. (a) 진행파 모노폴 안테나. (b) 제작된 안테나의 시뮬레이션 및 측정된 S11.

2.2 UWB Antenna

극초단의 임펄스 방사와 반사된 신호의 수신을 위해 소형 진행파 UWB 안테나를 개발하였다. 그림 1(a)는

소형 진행파 안테나의 정면과 옆면의 도면을 보인다. 신호의 차폐를 위해 금속 Cavity를 사용하였고, 신호의 급전을 위해 Fat 압의 다른 한 쪽 끝은 모서리에서 발생하는 Ringing Effect를 막기 위해 저항성 부하가 연결 되어 있다. 또한 얇은 아크릴 수지 평면이 안테나 표면과 지면과의 접촉을 막기 위해 놓여 있다.

안테나의 효율적인 디자인을 위해 CST-MWS가 사용되었고 안테나의 최적 규격이 다음과 같이  $D=87\text{ mm}$ ,  $W=300\text{ mm}$ ,  $L=225\text{ mm}$ ,  $H=27\text{ mm}$  로 결정되었다. 그림 1(b)에 시뮬레이션 결과와 실제 측정된 반사 손실이 나타나 있다. 시뮬레이션 결과와 측정된 결과가 상당히 유사하며, 이 안테나가 반사 손실 관점에서 초 광대역 특성을 가짐을 알 수 있다. 또한 650 MHz 부근에서 공진이 생김을 관찰할 수 있다. 이는 Fat 모노폴 길이의 1/2배와 공진 주파수 파장이 같아진다는 사실 또한 주목할 만한 사항이다.

### 2.3 Visualization of Buried Targets

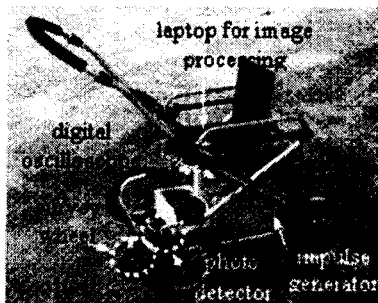
수신된 데이터 형태에는 각 샘플링 지점에서의 A 스캔 데이터와 각 샘플링 위치에서의 B 스캔 데이터가 있다 [1]. 지중 매설물의 2차원 영상 처리는 주로 2단계로 나눈다. 첫째로, A 스캔 Reference 데이터가 영상 처리 단계 전에 원래의 데이터로부터 제거되는 단계이다. 직관적으로도, A 스캔 reference를 선택하는 방법은 여러 가지가 있지만, 본 논문에서는 A 스캔 reference로써 첫 번째 A 스캔 데이터를 사용하였다. 이를 위해 지중에 어떤 표적도 없고 처음 샘플링 위치에서 주변에 다른 표적에 영향을 주지 않는다고 가정하였다. 다음으로 A 스캔 reference에 값이 제거된 원래 데이터는, B 스캔 average 데이터에 의해 제거 되어진다. 아울러 더욱 선명한 시각효과를 얻기 위해서 보간법과 임계법이 사용될 수 있다.

## 3. UWB GPR 시스템과 성능 테스트

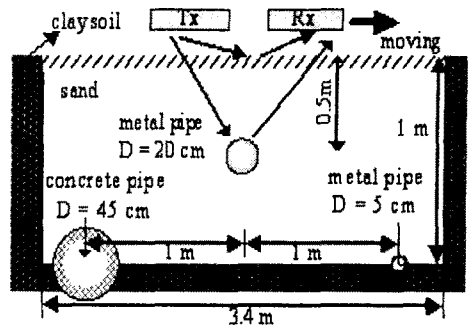
### 3.1 Developed UWB GPR System

그림 2(a)는 개발된 UWB GPR의 시제품이다. 구조를 보면 송수신 안테나는 구별되어 있고, 안테나 사이의 간격은 시스템이 테스트되는 동안 일정하게 유지되는 Bistatic 방식이다. 안테나의 편파를 고려하여 안테나의 Fat 압은 표적에 평행하게 놓여져야 한다.

이 시스템에는 측량 수레와 자동적으로 수신된 신호를 모아주는 포토 센서도 사용되어진다. 즉, 장착된 랩톱은 이동거리를 측정하면서 정해진 샘플링 거리마다 수신된 신호를 얻는다. 디지털 오실로스코프는 UTP 케이블로 랩톱에 접속되어 있고 이는 그래픽 유저 인터페이스(GUI)에 의해 제어된다. 그림에서 볼 수 있는 것처럼 완성된 UWB GPR 시스템은 간단하고 이동성이 뛰어나지만 아니라 시각처리가 거의 실시간으로 수행되는 장점을 가진다.



(a)



(b)

그림 2. (a)개발된 UWB GPR 시제품 사진과 (b)테스트 필드 구성.

### 3.2 Test field

그림 2(b)에 개발된 UWB GPR 시제품의 성능을 테스트하기 위한 모래 시험장이 도식적으로 그려져 있다. 테스트 영역은 습기가 있는 흙에 의해 둘러싸여 있고 직경 5 cm와 20 cm의 두 금속 파이프가 1m, 0.5m 깊이로 각각 묻혀있다. 또한 직경 45 cm의 콘크리트 파이프를 매설하여 금속과 비금속 매설물의 비교할 수 있도록 하였다. 지중 매설물의 길이는 2 m이다.

### 3.3 Measurement results

디지털 오실로스코프의 최고 샘플링 성능과 수신 신호의 길이에 의해 A 스캔 데이터 수가 결정된다. 여기서는 최고 0.2ns의 샘플링 기능을 갖는 것을 사용하였고, 수신신호 전체 길이는 100ns로 하였다. 따라서 모든 A 스캔 지점에서 100 ns 에 대한 데이터 500 포인트를 저장한다. 또한 3.4 m의 테스트 영역에서 A 스캔 측정값이 각 5.4 cm 마다 수행 되고 70번의 B 스캔이 행해진다.

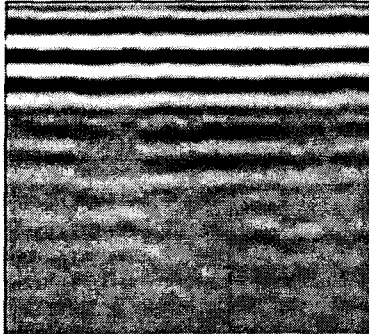
그림 3(a)는 어떤 영상처리도 없이 얻어진 원래 데이터의 영상을 그대로 나타낸 것이다. 표면 근처에서 강한 반사가 일어남을 알 수 있다. 이 초기 데이터에 A 스캔 Reference를 제거 한 결과가 그림 3(b)에 나타나 있다. 직경 20 cm의 금속파이프가 선명하게 보이지만, 나머지는 아직 선명하지 못하다. 마지막으로 그림 3(c)에 B 스캔 평균 데이터를 제거한 영상이 보여진다. 그림 3(c)의 결과를 얻기 위해 B 스캔 평균 데이터를 제거하는 과정 이외에도 포물선 모양을 더욱 부드럽고 깨끗하게 처리하고, 영상을 더욱 선명하게 개선시켜 주는 보간법이 적용되었다. 포물선 형태인 표적의 영상이 세 개의 다른 표적과 깨끗하게 구별될 뿐만 아니라 깊이와 치의 차이 또한 구별할 수 있다. 그것은 이 UWB GRP 시스템이 매우 우수한 공간과 깊이 분해 능력을 가진다는 것을 의미한다. 또한 흙과 모래의 경계면에서는 지중 매설물이 분명하지가 못하다. 이는 B 스캔 값들이 흙과 모래에서 큰 차이가 나기 때문이다. 그러나 실험을 통하여 증명된 것처럼, 시스템은 모래와 같은 균질의 층에서 파워선 같은 얇은 금속선뿐만 아니라 비금속 물질을 아주 잘 탐지해 낼 수 있음을 보여준다.

## 4. 결 론

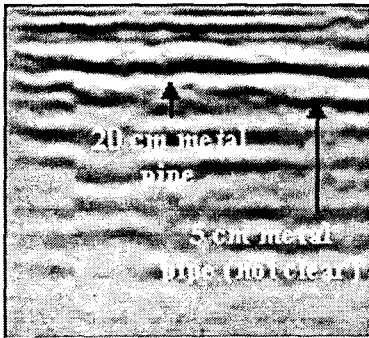
지중 매설물의 탐지를 위한 새로운 소형 UWB GRP가 소개되었다. 특히 임펄스 신호를 송신하기 위해서와 반사된 신호를 받기위해서 진행파 모노폴 안테나가 제안되었고 또한 지중 매설물의 영상화 기술이 단계적으로 선명 되었다. 이 시스템은 매우 뛰어난 공간과 깊이 분

해능력을 가지고 있음이 확인 되었으며 이러한 결과를 통해 이 시스템이 비파괴 지반 표적 탐사에 적용 가능성이 크다는 것을 알 수 있었다. 나아가 앞으로의 과제로써 이 시스템은 진흙과 같은 다른 물질에서도 테스트 되어 질 것이다.

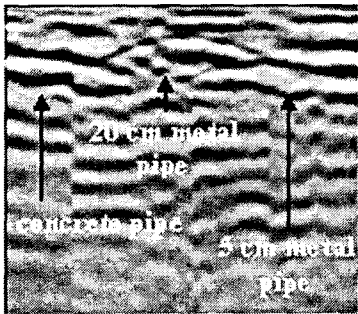
[4] Y.J.Park, et al, "Development of a UWB GPR system for detecting small objects buried under ground", IEEE Conference on Ultra Wideband System and Technologies (UWBST2003), pp.384 388 , 2003



(a)



(b)



(c)

그림 3. 지중 금속 매설물과 비금속성 매설물의 2차원 영상. (a) 어떤 영상 처리도 하지 않을 경우. (b) 원래 측정 데이터를 A 스캔 Reference값으로 제거했을 때의 영상. (c) (b)의 결과로부터, B 스캔 데이터의 평균값을 제거한 영상.

#### [참 고 문 헌]

- [1] D. J. Daniels, "Surface Penetrating Radar", IEE, 1996
- [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