

# 지반투과 레이더 시스템을 위한 SRD 임펄스 발생기 및 안테나의 설계 및 제작에 관한 연구

## A Study on Design and Fabrication of SRD Impulse Generator and Antenna for Ground Penetrating Radar System

김형종\*                      신석우\*                      최길웅\*                      최진주\*                      신상열\*\*  
 Hyoung-Jong Kim              Suk-Woo Shin              Gil-Wong Choi              Jin-Joo Choi              Shang-Youal Shin

### Abstract

In this paper, a ground penetrating radar(GPR) system is implemented for landmine detection. The performance of the GPR system is associated with the characteristics of local soil and buried target. The choice of the center frequency and the bandwidth of the GPR system are the key factors in the GPR system design. To detect a small and shallow target, the higher frequencies are needed for high depth resolution. We have been designed, fabricated and tested a new impulse generator using step recovery diodes. The measured impulse response has an amplitude of 6.2V and a pulse width of 250ps. The implemented GPR system has been tested real environmental conditions and has proved its ability to detect a small buried target.

Keywords : Ultra Wideband(초광대역), Ground Penetrating Radar(지반투과 레이더), Step Recovery Diode(계단 복구형 다이오드), Bow-tie Antenna(보우-타이 안테나)

### 1. 서론

지반투과 레이더(GPR) 시스템은 인공 구조물의 비파괴 진단 장비, 고고학의 유적 발굴, 아스팔트 포장층의 두께 조사 및 지질 구조 분석과 같이 활용되는 범위가 다양하기 때문에, 오랜 전부터 많이 연구되어 왔다<sup>[1~3]</sup>. 1990년대 후반부터는 군사용으로 개인용 발

목 지뢰와 같은 작은 금속 물체를 탐지하기 위해 해상도를 높이기 위한 연구도 진행되고 있다<sup>[4,5]</sup>.

지반투과 레이더 시스템은 지상 레이더의 기본 원리와는 같지만, 균일한 매질을 가지는 지상 레이더와는 달리 지반의 매질이 불균일하며 손실 및 비등방성 특성을 가지고 있기 때문에 보다 정밀한 자료 처리 및 해석 기법이 필요하게 된다. 또한, 매우 근거리에서 위치해 있는 목표물을 탐지해야 하므로 아주 짧은 폭을 가지는 펄스 신호를 사용하여야 한다. 이러한 관점에서 지반투과 레이더 시스템은 UWB(Ultra Wideband) 레이더와 유사하다고 볼 수 있다. 본 논문에서는 개인용 발목 지뢰와 같이 작은 금속 모형 탐지를 위한 지

† 2011년 1월 4일 접수~2011년 4월 15일 게재승인

\* 광운대학교(Kwangwoon University)

\*\* 삼성탈레스(Samsung Thales)

책임저자 : 김형종(hunkydory@kw.ac.kr)

반투과 레이더 시스템에 적용 가능한 임펄스 신호 발생기와 초광대역 안테나에 대하여 연구하였다.

## 2. 지반투과 레이더 시스템의 원리

지반투과 레이더는 전자파를 짧은 폭의 펄스 형태로 지표면 밑으로 방사시킨 후, 지하의 불균질면 또는 지하매질물 등 여러 가지 매질 경계면으로부터 반사되어 돌아오는 전자파를 수신하여, 다양한 신호 처리 과정을 거쳐 탐사 대상의 크기, 위치, 깊이 등의 정보를 알아낼 수 있는 시스템이다. Fig. 1은 임펄스 신호를 이용한 지하투과레이더 시스템의 구성도를 나타낸다. 지하투과레이더 시스템의 송신부는 임펄스 발생기와 초광대역 송신용 안테나로 구성되어 있으며, 수신부는 초광대역 수신용 안테나와 A/D변환기로 구성되어 있다. 그리고 송수신 신호를 제어하는 제어부와 신호 처리부, 영상 출력부로 구성되어 있다.

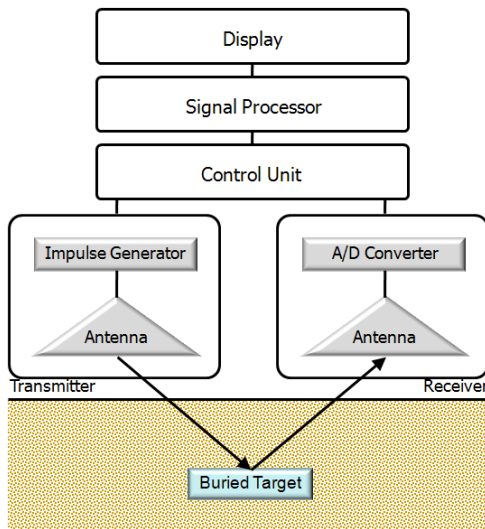


Fig. 1. 지하투과레이더 시스템 구성도

지반투과 레이더를 이용한 탐사법에는 4가지 방법이 있다<sup>[6]</sup>. 공통 소스(Common Source) 탐사법은 송신 안테나를 고정하고 수신 안테나를 송신 안테나 방향으로 이동하면서 탐사를 수행하는 방법이다. 공통 심도점(Common Depth Point) 탐사법은 기준점을 중심으로 송·수신 안테나를 각각 반대방향으로 일정하게 이동시켜 탐사를 수행하는 방법으로 지중에서의 전자파의

속도 추정에 사용된다. 공통 수신(Common Receiver) 탐사법은 공통 소스 탐사법과 동일하나 수신 안테나를 고정하여 탐사를 수행하는 방법이다. 공통 오프셋(Common Offset) 탐사법은 송·수신 안테나의 거리가 일정하게 유지되고 이동거리가 동일하게 유지될 때 적용되는 방법으로 지반탐사 방법 중 가장 많이 적용되는 방법이다. 본 논문에서는 공통 오프셋 탐사법을 사용하였다.

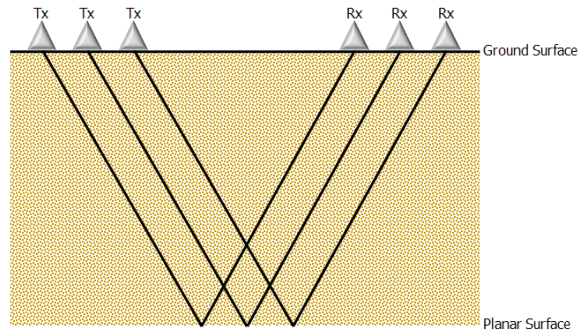


Fig. 2. 공통 오프셋 탐사법

송신 안테나에서 나오는 전자파는 흙이나 모래와 같은 지표면으로 들어가게 된다. 유전율을 가지는 매질 속에서의 전자파의 전파 속도는 자유 공간에서의 전파 속도보다 줄어들게 된다. 이러한 특성을 이용해 매질 내에서 상대 전파 속도를 측정하거나 유도된다면, 지표면에서 목표물까지의 거리나 두께 등을 알 수 있다.  $\epsilon_r$ 의 상대 유전율을 가지는 균일하고 등방체인 매질 내에서의 상대 전파 속도  $v_r$ 은 식 (1)과 같이 된다.

$$v_r = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad [m/s] \quad (1)$$

여기서  $c$ 는 자유 공간에서의 전자파 속도를 나타내고,  $\epsilon_r$ 은 상대 유전율 값을 나타낸다. 또한, 매질 내에서의 전자파의 진행거리  $d$ 는 전파 속도와 전파 시간으로 계산 할 수 있으며, 식 (2)와 같이 된다.

$$d = v_r \frac{t}{2} \quad [m] \quad (2)$$

여기서  $t$ 는 목표물까지의 전자파 왕복 시간을 나타낸다. Table 1은 이러한 파라미터를 감안하여 탐사 심도, 펄스폭, 중심 주파수와 심도 해상도와의 추정 상

관계를 보여주고 있으며, 펄스폭이 짧을수록 탐사 심도 깊이는 감소하는 반면, 심도 해상도는 좋아지는 특성을 가진다. 그리고 Table 2는 일반적인 토양 매질의 종류에 따른 상대 유전율을 나타내었다. 마른 모래인 경우 주파수에 대한 상대 유전율의 차이가 크지 않은 반면, 젖은 모래나 토양인 경우 수분 함유량에 따라서 주파수에 대한 상대 유전율의 차이가 발생하는 것을 알 수 있다<sup>6-9)</sup>.

Table 1. 탐사 심도, 펄스폭, 중심 주파수, 심도 해상도와의 추정 상관관계

탐사 심도 <sup>a</sup> (m)	펄스폭 <sup>b</sup> (ns)	중심주파수 <sup>c</sup> (MHz)	심도 해상도 <sup>d</sup> (cm)
<0.125	0.25	4000	1.25
<0.25	0.5	2000	2.5
<0.5	1	1000	5
<1	2	500	10
<2	4	250	20
<4	8	125	40
<8	16	62.5	80

- a 탐사 심도 : 중간 손실(<20dB/m 감쇠) 매질
- b 펄스폭 : 침투치의 50%에서의 폭
- c Rayleigh wavelet의 형태로 전송된 펄스로 가정
- d 토양 매질의 상대 유전율 값이 9라고 가정

Table 2. 매질 종류에 따른 상대 유전율†

매질	상대 유전율
공기	1
마른 모래 <sup>(a)</sup>	2.5~2.8
젖은 모래 <sup>(b)</sup>	3~15
젖은 토양 <sup>(c)</sup>	3~12

주파수 : (a) 0.1~10GHz, (b) 0.1~2.7GHz, (c) 1~18GHz

### 3. 지반투과 레이더 시스템의 설계 및 구현

#### 가. Step Recovery Diode 임펄스 발생기

SRD를 이용하여 임펄스 신호를 발생시키기 위해서는 여러 방법들이 있으나<sup>10,11)</sup>, 본 논문에서는 500ps이

하의 짧은 펄스폭을 가지는 임펄스를 만들기 위해 2단으로 구성된 SRD 임펄스 발생기를 설계하였다. SRD 임펄스 발생기는 1차적으로 짧은 임펄스를 발생시킨 후 이를 다시 2차 SRD 임펄스 발생 회로의 구동 신호로 이용함으로써 아주 짧은 임펄스 신호를 발생시키는 방법이다. 본 논문에서 제안된 SRD 임펄스 발생기의 원리 및 설계에 관한 내용은 참고 문헌 [12]에 자세하게 서술되어 있다. 또한, 아주 짧은 임펄스를 만들기 위해서는 SRD의 소자 선정하는 것도 중요한 요소이며<sup>13)</sup>, 본 논문에서 사용된 SRD는 70ps의 전이 시간(Transition Time)과 10ns의 소수 캐리어 생명 시간(Minority Carrier Lifetime)을 가지는 Aeroflex사의 SMM840-SOD323을 이용하였다.

Fig. 3은 제작된 SRD 임펄스 발생기를 보여준다. SRD 임펄스 발생기는 임펄스를 발생시키는 펄스 정형 회로(Pulse Shaping Circuit)와 이를 구동시키기 위한 클럭 구동 회로(Clock Driving Circuit)로 구성되어 있다. 클럭 신호 입력단에 5ns의 상승/하강 시간과 40ns의 펄스폭, 10MHz의 펄스 반복 주파수(Pulse Repetition Frequency), 0-5V의 진폭을 가지는 신호를 인가시키게 된다.

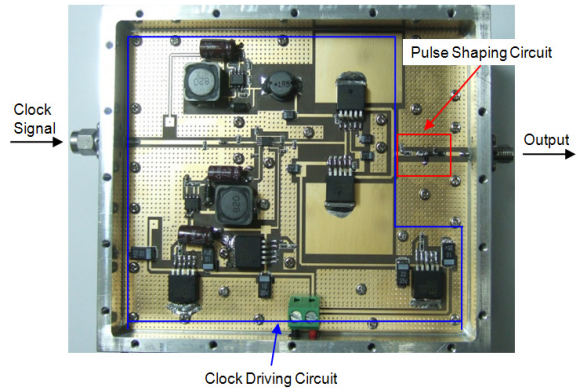


Fig. 3. SRD 임펄스 발생기의 제작 사진

Fig. 4는 제작된 SRD 임펄스 발생기의 측정 결과를 나타낸다. SRD 임펄스 발생기를 측정하기 위해 LeCroy사의 WaveMaster 8620A 디지털 오실로스코프(샘플링 속도 : 20GS/s(Real-time), 200GS/s(RIS), 대역폭 : 6GHz)를 사용하였고 SRD 임펄스 발생기의 출력단에 20dB 감쇠기를 연결하였다. Fig. 4에서 보는 것처럼 제작된 SRD 임펄스 발생기는 침투치의 10%값을 기준으로 했을 때, 250ps의 짧은 펄스폭과 6.2V의 침투값을 가지

는 것을 확인하였다. 그리고 주파수 스펙트럼 특성은 -3dB의 대역폭을 기준으로 했을 때, 3.942GHz의 대역폭을 가지는 것을 확인하였다.

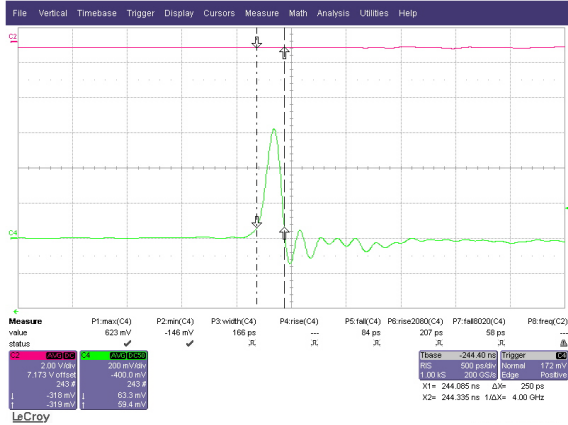


Fig. 4. 제작된 SRD 임펄스 발생기의 출력 파형

나. 초광대역 보우-타이 안테나

임펄스 신호를 이용하는 지반투과 레이더 시스템의 경우 사용하는 임펄스 신호를 손실이나 왜곡 없이 송수신하기 위해서는 임펄스 신호의 주파수 대역을 만족시킬 수 있는 초광대역 안테나가 필요하게 된다.

Fig. 5는 설계된 초광대역 보우-타이 안테나의 구조를 보여주고 있다. 시뮬레이션은 CST사의 MWS 코드를 이용하였으며, 안테나 특성을 최적화하기 위해 주파수 영역의 전달 함수 특성과 시간 영역의 임펄스 응답 특성들을 고려하였다. Fig. 6에서 보는 것처럼, 안테나는 두 개의 삼각형 날개를 갖고 있으며, 평판형 발룬(Balun)을 이용해서 수직으로 급전되는 형태를 갖는다. 또한, 다중 공진에 의해 발생하는 재반사 또는 떨림 현상을 방지하기 위해 보우-타이의 날개 모서리 부분에는 저항을 삽입하였다. 삽입된 저항은 안테나의 급전부 임피던스가 50Ω이기 때문에 각 모서리 부분에 병렬 형태로 100Ω( $R_i$ )의 저항을 연결하였다. 그리고 광대역 안테나 주변에는 사각 박스 구조의 금속 반사체(Reflector)를 사용하여 외부로부터의 간섭 신호를 차단시키며, 안테나 정면과 후면으로도 방사하는 다이폴의 특성상 낮은 이득을 향상시켰다. 이동탐사 운영 시 안테나 패턴이 손상되는 것을 방지하기 위해 패턴을 반사체 안쪽을 향하도록 설계하였으며 최적화된 안테나의 값은  $R=176\text{mm}$ ,  $\Theta=65^\circ$ ,  $L=360\text{mm}$ ,  $W=260\text{mm}$ ,  $H=85\text{mm}$ 이다.

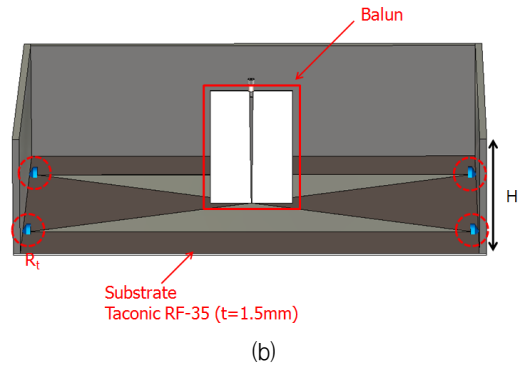
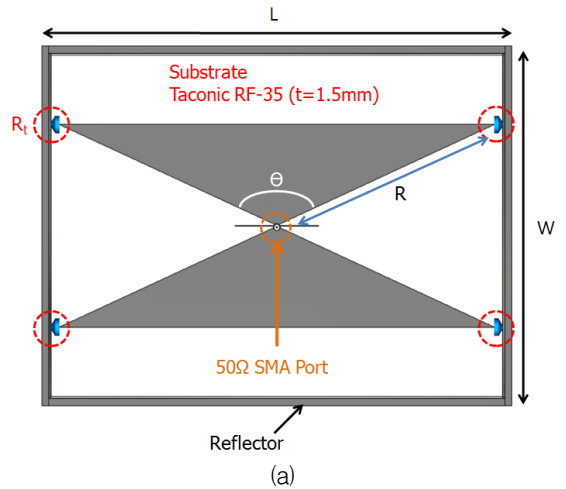
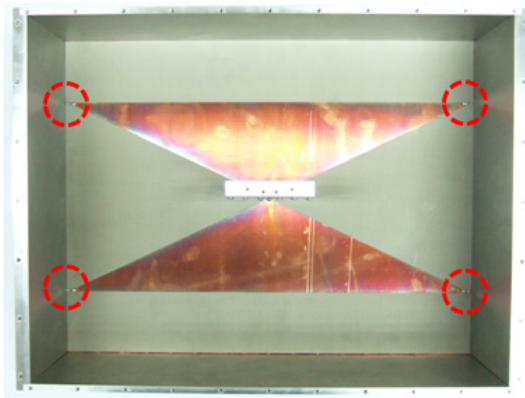


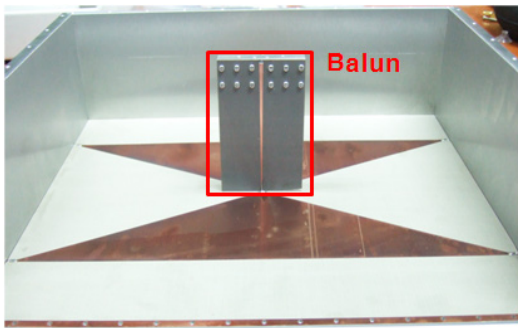
Fig. 5. 초광대역 보우-타이 안테나의 3D 모델 : (a) 윗면, (b) 측면

Fig. 6은 제작된 초광대역 안테나의 내부 모습을 나타낸다. 발룬 상단부의 50Ω포트를 통해 신호가 인가되며, 하단부는 안테나 패턴을 보호하기 위해 패턴을 안쪽에 위치시켰다. 그리고 안테나 패턴의 각 모서리 부분에 병렬 형태로 100Ω의 저항을 삽입하였다. 제작된 안테나의 전체 크기는 360×250mm이며 제작에 사용된 안테나 기판은 3.5의 유전율과 1.5mm의 두께를 가지는 Taconic RF-35기판을 사용하였다.

Fig. 7은 제작된 보우-타이 안테나의 시뮬레이션 및 측정 결과를 나타내었다. Fig. 7에서 보는 것처럼, 시뮬레이션 결과와 측정 결과가 전반적으로 비슷한 특성을 가지는 것을 볼 수 있고, 1.5GHz와 3GHz대역에서 다소 임피던스 정합 특성을 만족하지 못하지만 0.6~4GHz의 주파수 대역에서 -10dB이하의 반사 손실 특성을 가지는 것을 확인하였다.



(a)



(b)

Fig. 6. 초광대역 보우-타이 안테나의 제작 내부 모습 : (a) 윗면, (b) 측면

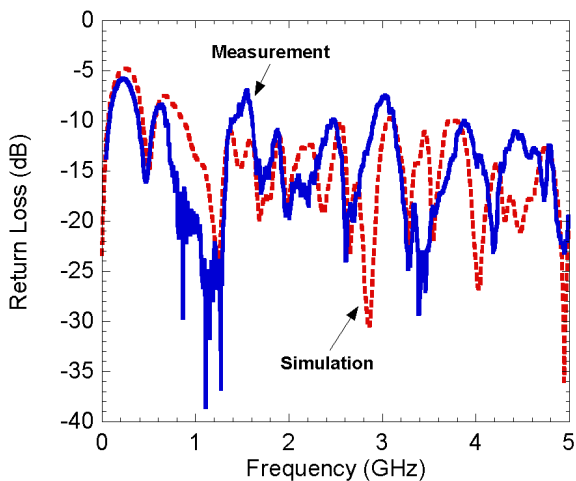


Fig. 7. 초광대역 보우-타이 안테나의 반사 손실 특성 비교

#### 4. 실험 결과

Fig. 8은 지뢰 탐지를 위한 지반투과 레이더 시스템의 실험 구성도를 나타낸다. Fig. 8에서 보는 것처럼 전체 지반투과 레이더 시스템은 임펄스 발생기, 송·수신 안테나, 오실로스코프로 구성되어 있다. 실험에서 사용된 오실로스코프는 LeCroy사의 WaveSurfer 62Xs (샘플링 속도 : 2.5GS/s(Real-time), 50GS/s(RIS), 대역폭 : 600MHz)이며, 금속 모형 지뢰는 대인지뢰의 한 종류인 M74와 크기를 같도록 하였으며 높이는 6cm, 직경은 12cm을 가진다.

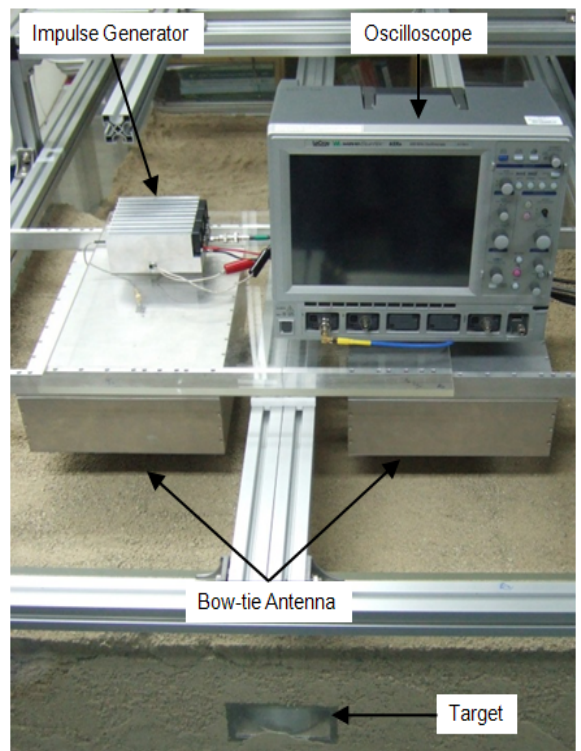


Fig. 8. 지뢰 탐지를 위한 GPR 시스템의 실험 구성도

Fig. 9는 지뢰 탐지를 위한 지반투과 레이더 시스템의 실험 모식도를 나타낸다. Fig. 9에서 보는 것처럼 송·수신 안테나는 지표면과 6.8cm가량 떨어져 있고, 지뢰 모형은 송·수신 안테나의 중심에 위치해 있으며, 지표면을 기준으로 11.5cm 밑에 묻혀 있다. 송·수신 안테나사이의 간격은 16cm이며, 측정 방법은 x축 방향으로 0에서 60cm까지 1cm씩 간격으로 측정하기로 한다.

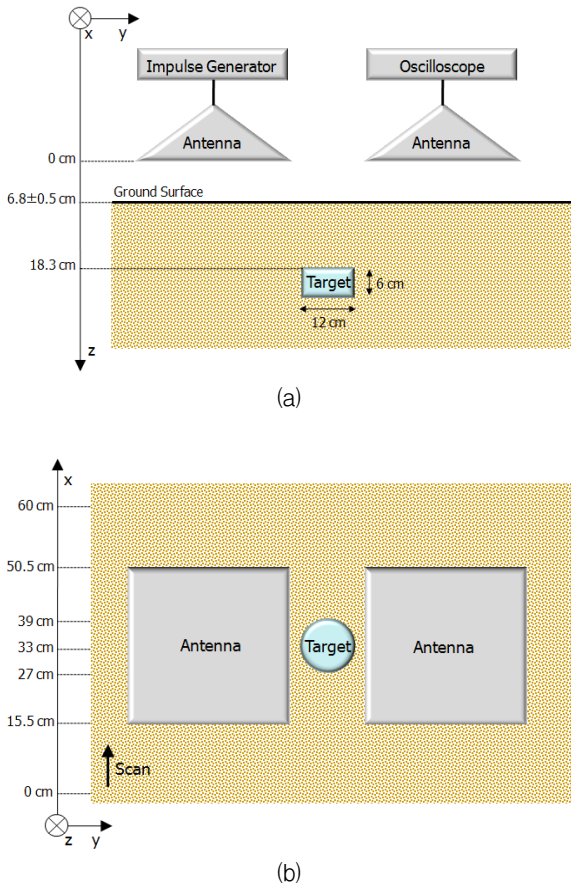


Fig. 9. 지뢰 탐지를 위한 GPR 시스템의 실험 모식도 : (a) 측면, (b) 윗면

지표면에서 목표물까지의 거리 및 위치를 파악하기 위해서는 식 (2)에서 보는 것처럼 전자파의 왕복 시간을 측정하여야 한다. Fig. 10은 송신 안테나에서 전자파가 방사되기 시작하는 순간의 시간을 측정하기 위한 실험 구성도와 측정 결과를 나타낸다. Fig. 10 (a)에서 보는 것처럼, 금속판을 송·수신 안테나의 원거리장(Far-field) 거리인 40~70cm에서 0.2cm간격으로 이동시키면서 임펄스 신호의 왕복시간을 측정하였다. 여기서, 금속판이 송·수신 안테나에 너무 근접하면, 안테나의 성능에 영향을 끼치기 때문에, 원거리장 거리에서만 측정하였다. Fig. 10 (b)는 금속판과 송·수신 안테나사이의 거리 D에 따른 임펄스 신호의 왕복 시간을 나타내었고, 이러한 측정된 결과를 이용하여, 식 (3)과 같은 방정식을 유추해 낼 수 있다. 따라서 D=0인 지점에서의 시간은 26.42ns임을 알 수 있다.

$$f(D) = 0.058956D + 26.421 \quad (3)$$

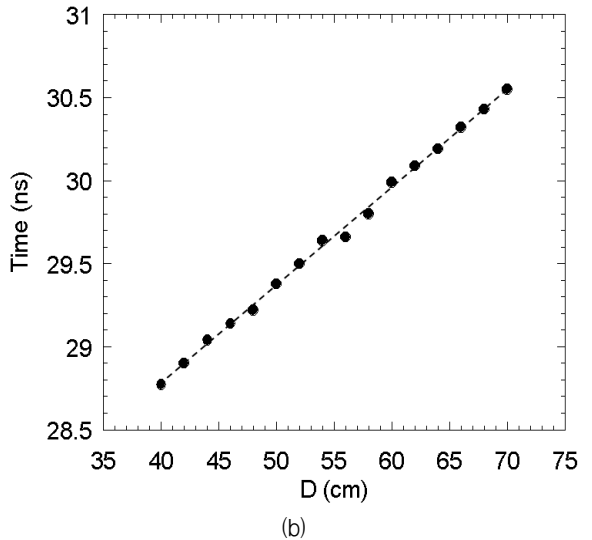
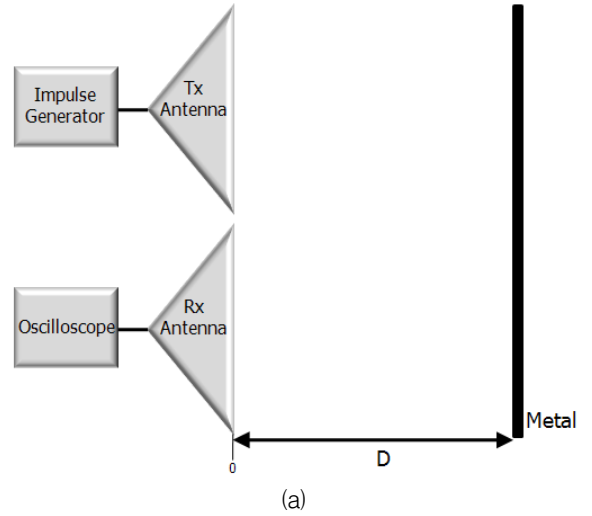


Fig. 10. 임펄스 신호 왕복 시간 측정을 위한 실험 : (a) 구성도, (b) 측정 결과

일반적으로 탐사되는 물체를 영상화하기 위하여 x, y, z 좌표축을 따라 신호를 스캔하게 된다. 이러한 방법에는 크게 세 가지로 나눌 수 있으며, 1차원 영상화를 위한 A-스캔, 2차원의 영상화를 위한 B-스캔, 3차원적인 공간 영상을 얻기 위한 C-스캔으로 구분된다<sup>[6]</sup>. Fig. 11은 송·수신 안테나가 지뢰 모형의 중심(x=33cm) 지점에 위치했을 때 A-스캔하여 측정된 원

신호와 배경 잡음 신호를 나타낸다. 여기서 x축은 송·수신 안테나에서 임펄스 신호의 왕복 시간이다. Fig. 12는 송·수신 안테나가 지뢰모형의 중심(x=33cm) 지점에 위치했을 때 측정된 신호들을 이용하여 신호 처리된 파형을 나타낸다. 측정된 원 신호에서 송·수신 안테나 사이에 직접 전파되는 신호 및 외부 클러터 신호와 같은 배경 잡음 신호를 제거함으로써 순수한 지뢰 모형에 의한 반사 신호 성분만을 추출해 낼 수 있다.

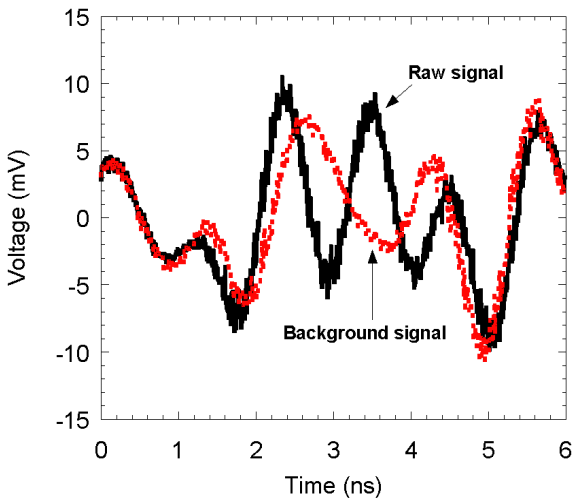


Fig. 11. 지뢰 모형의 중심(x=33cm) 지점에서의 A-스캔 후 측정된 원 신호와 배경 잡음 신호

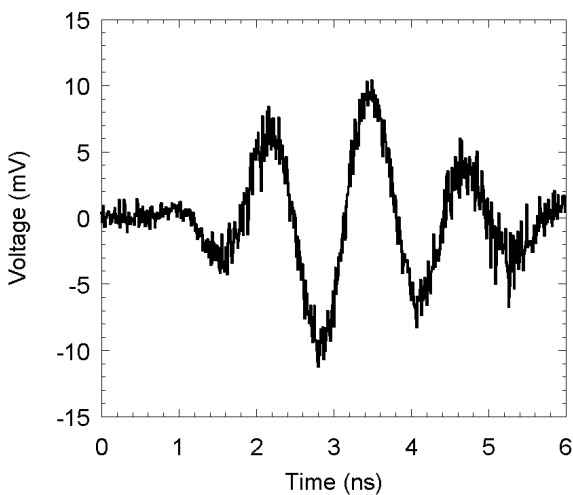


Fig. 12. 지뢰 모형의 중심(x=33cm) 지점에서의 신호 처리된 파형

Fig. 13은 송·수신 안테나를 x=0에서 60cm까지 B-스캔하여 측정된 결과를 나타낸다. 지뢰모형은 Fig. 9 (b)에서 보는 것처럼, 27~39cm 지점에 위치해 있으며, 지반투과 레이더 시스템에 의해 측정된 위치와 비교했을 때 실제 위치와 거의 똑같은 곳에 위치해 있는 것을 확인하였다. 또한 Table 2에 나타난 모래의 상대 유전율 값을 근거로 했을 때, x=33cm에서 측정된 왕복 시간인 2.8ns와 식 (1)과 (2)에 의해 추정된 안테나와 지뢰 모형 사이의 거리가 근사하게 나오는 것을 확인하였다.

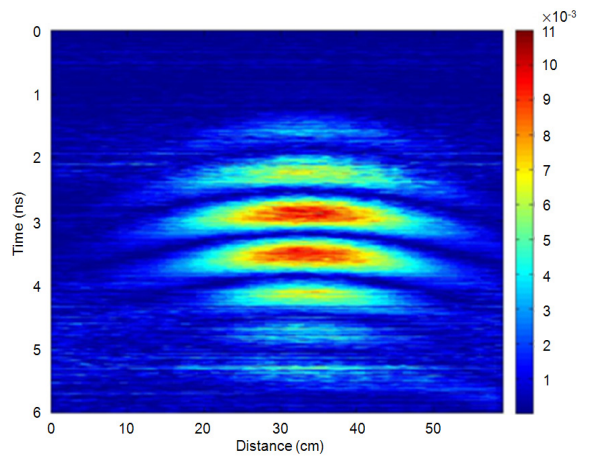


Fig. 13. B-스캔 후 측정 결과

## 5. 결론

본 논문에서는 지뢰 탐지를 위한 지반투과 레이더 시스템에 적용 가능한 임펄스 신호 발생기와 초광대역 안테나에 관하여 살펴보았다. 지표면 기준으로부터 근거리에서 위치해 있는 곳에서 지뢰와 같은 작은 크기의 목표물을 탐지하기 위해서는 임펄스 발생기의 펄스폭이 짧아야 한다. 짧은 펄스폭의 임펄스를 만들기 위해 2단으로 구성된 SRD 임펄스 발생기를 설계 및 제작하였으며 측정 결과 250ps의 펄스폭을 가졌다. 제작된 지반투과 레이더 시스템은 직경이 12cm, 높이가 6cm인 금속 모형 지뢰를 지표면에서 11.5cm 아래인 지점에 놓고, 실험한 결과, 금속 모형 지뢰의 근사적인 위치를 찾아낼 수 있었다. 앞으로 초광대역 샘플러(sampler)와 초소형 광대역 안테나가 개발된다면, 이동성이 용이해지면서 실제 상용화가 가능한 지뢰 탐지

용 지반투과 레이더 시스템을 구축하는데 많은 도움이 될 것으로 판단된다.

## 후 기

본 연구는 삼성 탈레스의 연구비 지원으로 수행되었음.

## References

- [1] Botros A. Z., Olver A. D., Cuthbert L. G., Farmer G., "Microwave Detection of Hidden Objects in Walls", *Electronics Letters*, Vol. 20, No. 9, pp. 379~380, April 1984.
- [2] M. Pirri, P. Lombardo, T. Bucciarelli, "Performance Assessment of Wide-Band Pulsed GPR for Archaeological Applications", *Proceedings of Geoscience and Remote Sensing Symposium*, pp. 2385~2387, July 2000.
- [3] Umberto Spagnolini and Vittorio Rampa, "Multitarget Detection/Tracking for Monostatic Ground Penetrating Radar : Application to Pavement Profiling", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 37, No. 1, pp. 383~394, January 1999.
- [4] Ryohei Tanaka and Motoyuki Sato, "A GPR System Using a Broadband Passive Optical Sensor for Land Mine Detection", *Tenth International Conference on Ground Penetrating Radar*, pp. 171~174, June 2004.
- [5] Jeroen Groenenboom and Alexander Yarovoy, "Data Processing and Imaging in GPR System Dedicated for Landmine Detection", *Subsurface Sensing Technologies and Applications*, Vol. 3, No. 4, pp. 387~402, October 2002.
- [6] David J. Daniels, "Ground Penetrating Radar, 2nd edition", *The Institution of Engineering and Technology*, 2004.
- [7] Christian Matzler, "Microwave Permittivity of Dry Sand", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 36, No. 1, January 1998.
- [8] Doudou Ba and Pierre Sabouroux, "A Toolkit for Permittivity and Permeability Measurement in Microwave Domain at Real Time of All Materials: Applications To Solid and Semisolid Materials", *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 52, No. 12, pp. 2643~2648, December 2010.
- [9] Martti T. Hallikainen, Fawwaz T. Ulaby, Myron C. Dobson, Mohamed A. El-Rayes, and Lin-Kun Wu, "Microwave Dielectric Behavior of Wet Soil-Part 1 : Empirical Models and Experimental Observations", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. GE-23, No. 1, January 1985.
- [10] Meng Miao and Cam Nguyen, "A Uniplanar Picosecond Impulse Generator Based on MESFET and SRD", *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 39, No. 6, pp. 470~472, December 2003.
- [11] Pawel Rulikowski and John Barrett, "Truly Balanced Step Recovery Diode Pulse Generator with Single Power Supply", *IEEE Radio and Wireless Conference*, pp. 347~350, September 2004.
- [12] Gil Wong Choi, Jin Joo Choi, and Seung Hoon Han, "Picosecond Impulse Generator Driven by Cascaded Step Recovery Diode Pulse Shaping Circuit", *Review of Scientific Instruments*, Vol. 82, pp. 016106, January 2011.
- [13] Hewlett-Packard Application Note AN918, "Pulse and Waveform Generation with Step Recovery Diodes", *Hewlett-Packard*, 1984.