

主題

# 초광대역(Ultra wideband : UWB) 기술과 고해상도 레이더

한국전기연구원 전기정보망기술연구그룹 박 영 진, 김 관 호 (주) 마이크로라인 윤 동 기

차 례

- I. 서론
- II. UWB 지반탐사 레이더(Ground Penetrating Radar : GPR)
- III. UWB GPR 시험 및 측정 결과
- IV. 결론

## 요 약

UWB 기술은 주파수 영역에서 광대역을 갖는 임펄스를 사용하므로 목표물로부터 많은 정보를 얻어, 고해상도 레이더 개발이 가능하다. 이러한 UWB 레이더의 특성을 이용하여 한국전기연구원에서는 지중 금속 물체를 탐지하기 위한 지반 탐사 레이더를 개발하였다. 개발된 레이더는 실제 환경에서 금속 물체를 탐지하기 위해서 시험되었다. 개발된 레이더는 물체의 깊이에 대해 고해상도를 가졌고, 동작 파장보다 훨씬 작은 금속 물체까지도 탐지가 가능함을 보였다. 본 논문에서는 개발된 지반 탐사 UWB 레이더 시스템을 소개하고, UWB 레이더의 특성 및 UWB 기술에 대해 기술하고자 한다.

Keywords : Ultra wideband (UWB), 지반 탐사 레이더, 고해상도 레이더.

## I. 서 론

최근 초광대역 (Ultra Wideband : UWB) 기술에 대한 관심이 국내외에서 아주 높다. 특히 지난 해에는 미국 FCC (Federal Communications Commission)에서 UWB기술 개발과 상용화를 부분적으로 승인해 UWB 기술 개발에 대한 관심을 더욱 고조시켰다. 또한 IEEE에서는 지난 해에 처음으로 UWB관련 학회를 개최하였다[1]. 국내에서도 여러 번의 세미나가 개최되었고, 한국전자파 학회지에 UWB에 대한 특별호가 발간될 정도로 UWB 기술 개발에 대한 높은 관심을 갖고 있다 [2][3].

UWB 기술은 그림 1에서 보이는 것처럼 시간 영역에서 아주 짧은 임펄스를 사용하는 것으로, 기존에 정현파를 사용한 방식과는 많은 차이가 있다. 실제로 레이더 응용 면에서는 주파수 대역에서 광대역 특성을 갖는 임펄스 신호를 사용하

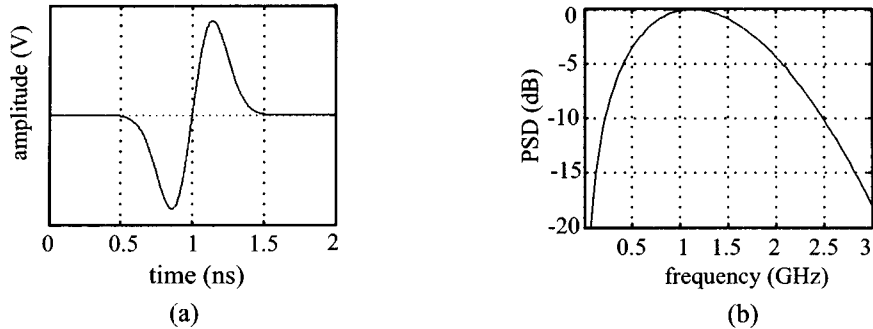


그림 1. (a) 시간영역에서 1ns 펄스 폭을 갖는 임펄스. (b) 그림 1(a) 임펄스의 전력밀도함수 (Power Spectral Density). 대역폭비율 (fractional bandwidth)  $\gg 25\%$ .

므로, 좁은 대역폭을 사용하는 FMCW (Frequency modulation continuous wave), 또는 많은 반송파를 사용하여 구현한 Stepped-FMCW의 협대역 문제점을 극복할 수 있다. 즉 UWB 레이더는 광대역에서 정보를 얻을 수가 있어 물체를 탐지하는데 다른 레이더 방식에 비해 우월한 잇점을 갖는다. 또한 아주 짧은 폭의 펄스를 사용하므로 움직이는 물체에 대한 정확한 시간에 대한 정보를 제공하는 장점이 있다 [4]-[6].

사실, 최근 칩셋 기술의 발전으로 UWB 기술을 근거리 무선 통신을 위해 사용하려는 연구가 활발히 진행되고 있지만, UWB 기술 응용의 시작은 고해상도 레이더 개발에 그 근거를 두고 있다. 특히 통신과 레이더에 사용되는 UWB 기술은 여러 면에서 공통 기술을 찾을 수가 있다. 레이더에 사용된 중요한 임펄스 열 (Impulse train) 발생 기술, 초광대역 송수신 안테나에 대한 기술은 UWB 통신을 위해서도 꼭 필요한 기술이다. 또한 UWB 레이더의 응용 범위는 비파괴 검사용 장비, 의료용 장비, 고정밀도를 요구하는 군사용 레이더 등에 광범위하게 사용될 수 있음을 여러 문헌에서 보여주고 있다 [6]-[8]. 따라서 UWB 레이더 기술 개발은 UWB 무선 통신 기술 개발에 병행하여 UWB 기술의 큰 응용분야로서

많은 관심을 갖고 지속적인 연구가 이루어져야 할 것이다.

본 논문에서는 한국전기연구원(KERI)에서 국내 최초로 개발한 UWB 지반 탐사 레이더(Ground Penetrating Radar : GPR)를 소개하며, UWB 레이더 시스템의 핵심 부분인 임펄스 발생기 및 광대역 송수신 안테나의 설계 및 제작방법을 기술하며, 제작된 레이더를 사용하여 실제 토양 환경에서 측정된 결과를 바탕으로 UWB 지반 탐사 레이더의 특성을 기술하고자한다.

## II. UWB 지반탐사 레이더(Ground Penetrating Radar : GPR)

GPR은 다양한 응용 범위를 갖기 때문에 GPR에 대한 연구는 오래 전부터 수행되어 왔었다[9][10]. 지하 광물을 찾기 위해서 사용되기도 하고, 최근에는 개인 발목용 지뢰 탐지 및 제거를 위해서도 GPR이 사용되었다. GPR용으로는 임펄스 신호 이외에도 협대역의 FMCW를 사용할 수가 있으나, 사용 대역폭이 제한적이어서 많은 정보를 잃게 되는 단점이 있어, 고해상도 이미지를 얻기 위해서 임펄스 신호를 선호한다.

그림 2에는 일반적인 UWB GPR에 대한 전체

시스템을 간단히 보여주고 있다. 전체 시스템은 임펄스 발생기 (Impulse generator), 임펄스를 보내기 위한 초광대역 송신안테나, 그리고 산란과 반사된 신호를 수신하기 위한 광대역 수신 안테나, 마지막으로 수신된 신호를 받아 이미지로 변환시키는 디지털 신호 처리기 (Digital Signal Processor)로 나누어진다.

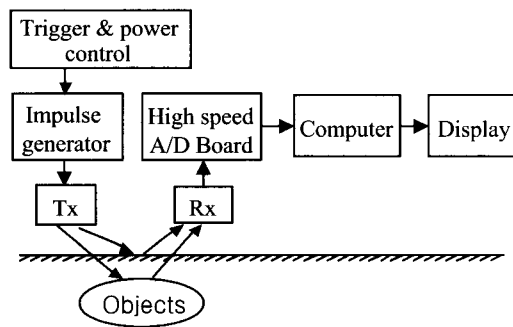


그림 2. GPR의 전체 시스템 구성도. 임펄스 발생기, 임펄스 송신기, 반사파 수신기, 그리고 디지털 신호처리기.

송수신 안테나의 구성에 따라 송수신 안테나를 공용하는 Monostatic 방식, 구분하는 Bistatic 방식이 있다. GPR용으로는 주로 송수신이 구분되는 Bistatic이 사용된다. Bistatic의 경우는 측정하는 방법에 따라 네가지로 나눌 수 있고, 목표물에 의해 반사되어 수신된 신호를 일정 시간 간격으로 배열하면 수신된 신호는 쌍곡선 모양 (Hyperbolic spreading function)을 이룬다[9].

GPR의 중요한 성능 평가인 해상도에는, 깊이에 대한 해상도 (수직방향)와 수평방향에 대한 해상도로 나눌 수가 있다. 깊이에 대한 고해상도를 위해서는 넓은 주파수 대역폭을 가진 신호를 사용해야 한다. 따라서 서두에 언급했듯이 주파수 영역에서 광대역 특성을 갖는 임펄스 신호가 필요하게 된다. 특히 수분이 많이 포함된 지반일수록 감쇄율이 크지만, 깊이에 대한 해상도는 반대로 증대된다. 그 이유는 매질 속의 파장 ( $\lambda_m$ )

은 식 (1)처럼 매질의 유전율 ( $\epsilon_r$ ) 제공근에 반비례하므로, 습기가 많은 흙의 경우가 습기가 적은 흙의 경우보다 유전율이 높아져 감쇄율이 증가하지만 매질의 파장이 짧아지므로 해상도가 향상된다고 생각할 수 있다[9].

$$\lambda_m = \frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1)$$

수평방향으로의 해상도는 안테나의 이득 (gain)이 클수록 향상된다. 그러나 지중으로의 투과성을 증가시키기 위해 낮은 주파수를 사용해야 하고, 낮은 주파수에서 고이득 안테나를 위해서는 전체 안테나의 부피가 커져 실제 안테나를 구현하는데 어려움이 따르므로 두 조건에 대한 적절한 보상관계 (trade-off)가 필요하다.

다음으로는 UWB GPR 시스템을 구성하는 각 부분들에 대해 기술하도록 한다.

## 2.1. 임펄스 발생기

원하는 주파수 대역폭을 갖는 임펄스 발생기 제작 및 확보는 UWB GPR의 가장 핵심적인 부분이다. 임펄스의 반복 주기 (Pulse Repetition Frequency : PRF) 또한 GPR의 해상도 및 성능을 결정하는 중요한 요소이다. 통신용 임펄스 및 레이더용 임펄스에 대한 설명은 참고문헌 [5] 와 [8]에 잘 설명되어 있다.

본 논문에서 사용된 UWB GPR용 임펄스는 그림 3에 보여지는 것처럼 펄스의 첨두치가 45볼트이고 rising time은 700ps, 펄스 폭은 3ns이다. 임펄스 모양의 결정은 GPR이 요구하는 최대 깊이와 해상도에 의해서 좌우된다. 일반적으로 GPR에 사용되는 주파수는 1GHz 이하로 정하고 있는데 이것은 고주파일수록 지중에서의 감쇄율이 지수함수적으로 증가해서 탐지할 수 있는 깊이가 줄어들기 때문이다. 특히 국내의 토양처럼 수분이

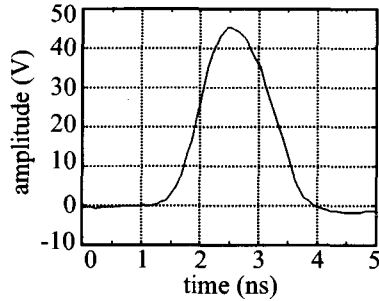


그림 3. UWB GPR용으로 사용된 임펄스.

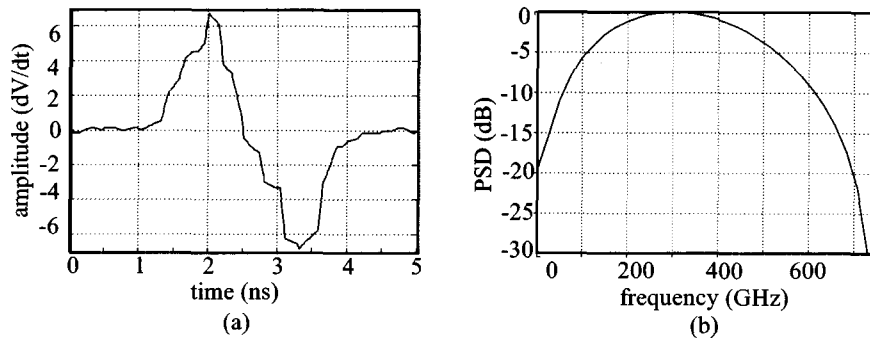


그림 4. (a) 초광대역 안테나를 통과한 임펄스 모양 (그림 3의 임펄스를 시간에 대해 미분한 그림).  
(b) (a)에 있는 임펄스의 전력밀도 함수.

많이 포함되어 있는 경우는 중심 주파수를 수백 MHz로 낮추어야 충분한 탐지 깊이가 얻어지고, 고해상도가 얻어진다. 여기서 사용된 펄스 폭 3ns 임펄스는 수분 때문에 손실이 많은 실제 국내 토양을 고려하여 지중 3미터까지 탐사가 가능하고 사용 주파수를 100MHz에서부터 400MHz까지 사용하기 위해 설계된 것이다.

그림 3에 보여진 것은 임펄스 발생기에 의해 생성된 것이지만, 실제 초광대역 안테나를 통과하면 그림 4(a)와 같은 모양을 갖게 된다. 그림 4(a)는 그림 3에 있는 임펄스의 시간에 대한 미분값이다. 이것은 식 (2-1)부터 (2-3)에 보여진 것 처럼 간단히 증명될 수 있다. 우선 전장의 세기( E)는 vector potential A에 비례한다.

$$E \propto \frac{\partial A}{\partial t} \quad (2-1)$$

여기서 vector A는 전류밀도( J)에 비례하고, 전류밀도는 인가한 소스의 전류( i)에 비례한다. 즉,

$$A \propto J \propto i \quad (2-2)$$

따라서 식 (2-1)과 (2-2)로부터

$$E \propto \frac{\partial i}{\partial t} \quad (2-3)$$

즉, 안테나를 통해서 방사(radiation)되는 전장의 세기는 인가한 전원의 미분치에 비례하기 때

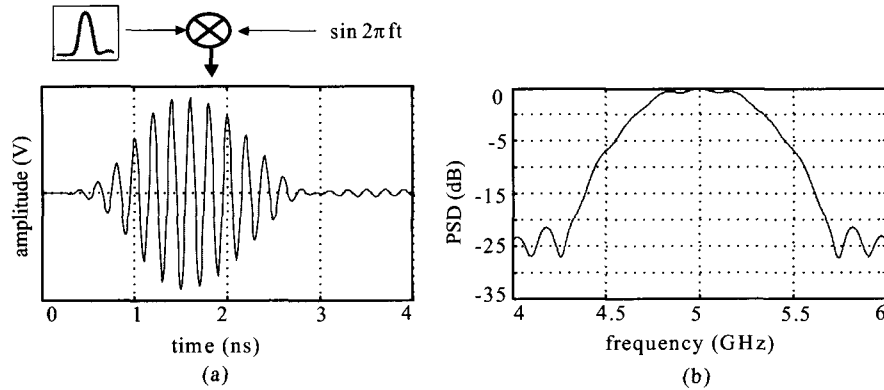


그림 5. (a) 그림 3에 있는 임펄스를 중심 주파수 5GHz를 갖는 정현파와 곱하여 얻은 결과.

(b) 그림 5(a)의 임펄스의 전력밀도함수

문에 그림 4(a)의 결과가 얻어진다. 이런 이유로 안테나를 단순히 미분기라고도 한다.

이처럼 원하는 주파수 대역폭을 갖는 임펄스를 만드는 것은 UWB 레이더에 있어서 아주 중요한 기술이다. 본 논문에서는 GPR용 임펄스에 대한 것만 언급하였으나 비파괴 검사와 같이 더 높은 해상도가 요구될 때에는 주파수 대역폭이 GHz 대역까지 높아져야한다. 이를 위해서는 그림 5에 있는 방법처럼 원래의 임펄스에 정현파를 곱하여 원하는 주파수 대역으로 이동시킬 수도 있다. 그림 5(b)에 중심 주파수를 옮긴 모양이 나와 있다. 이 그림에서는 그림 3의 임펄스를 중심주파수 5GHz를 갖는 정현파 신호와 곱한 것으로, 진폭변조된 모양의 파형처럼 보인다. 그러나 주파수 영역에서는 중심 주파수가 5GHz로 옮겨졌음을 확인할 수 있다. 이러한 임펄스 모양은 차량용 레이더용 (사용 주파수 대역:22GHz~29GHz)으로 사용될 수 있다.

## 2.2. 초광대역 안테나

UWB 통신 및 레이더 기술을 개발하기 위하여 임펄스 신호를 송수신하기 위한 초광대역 안테나의 개발은 필수적이다. UWB 레이더용 안테

나로는 TEM 혼, 광대역 다이폴 안테나, Bow-tie 안테나 등이 흔히 사용된다. 개발된 UWB GPR에서는 그림 6에 있는 것과 같은 변형된 다이폴 안테나를 송수신용 안테나로 사용하였다. 다이폴 안테나는 안테나의 이득이 TEM 혼 안테나 보다는 낮지만, 작고 선형적인 물체에 효과적이다 [9][11][12].

그림에 보여진 것처럼 안테나는 패치 형태의 평면구조로 되어 있다. 안테나 재료는 에폭시  $\epsilon_r \approx 4.5$ 를 사용하였다. 안테나의 공진에 의해 발생하는 안테나 종단에서의 떨림(ringing)을 방지하기 위해 접지와 종단에  $100\Omega$  저항을 연결하였다. 또한 안테나의 이득을 증폭시키고 back scattering 영향을 차단하기 위해 안테나를 포물선 모양의 반사체(parabolic reflector)를 씌웠다 (그림 8 참고).

UWB GPR용 안테나를 설계하기 위해서는, 사용된 임펄스의 주파수 대역을 알아야한다. 본 논문에서 사용된 임펄스의 주파수 대역은 100MHz부터 600MHz이고, 사용하려는 주파수 대역은 100MHz부터 400MHz이다. 이상적인 경우는 이 주파수 대역에서 안테나는 일정한 이득을 갖고 동일한 방사 패턴을 가져야한다.

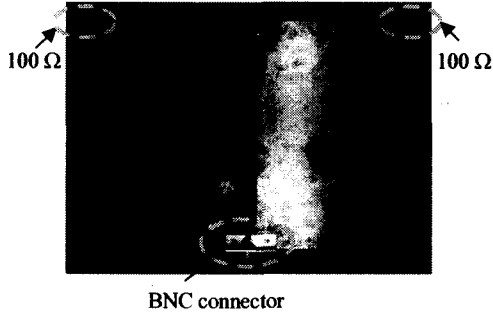


그림 6. 제작된 광대역 다이폴 안테나. 양쪽 안테나 종단에는 안테나에 의한 링링(ringing) 현상을 방지하기 위해 100Ω 저항을 연결.

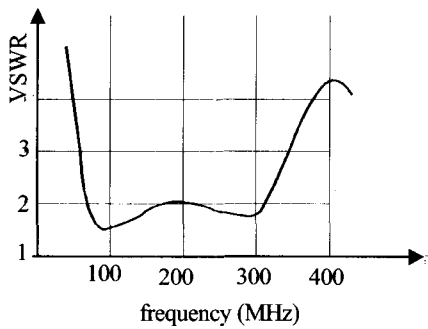


그림 7. 제작된 광대역 다이폴 안테나의 전압 정재비측정 결과.

그림 7에는 제작된 안테나의 전압 정재비 (VSWR)가 있다. 그림에서 보여지는 것처럼 주파수 대역이 80MHz~320MHz 범위의 넓은 대역에서는 정재비가 낮음을 알 수가 있다. 이외의 주파수 대역에서는 입력 신호의 반사량이 높다.

### III. UWB GPR 시험 및 측정 결과

#### 3.1 실험 장치 구성 및 시험장 구성

앞장에서 설계하여 제작된 장비들을 실제 환경에서 구현하여 실험이 이루어졌다. 전체 시스템은 송수신 안테나가 분리된 Bistatic 형태이고 측정방식은 송수신 안테나의 간격을 일정하게 유지해 가며 측정하는 common offset survey mode가 사용되었다. 전체 실험 장치 구성은 송수신 안테나와 이 안테나를 고정시키고 이동시키기 위한 구조물, Sampling 속도 5GS/s를 갖는 디지털 오실로스코프 및 임펄스 발생기로 구성되어 있다. 또한 안테나 면을 거친 지면으로부터 보호하기 위해 PVC판이 사용되었다. 그림에서 보여지는

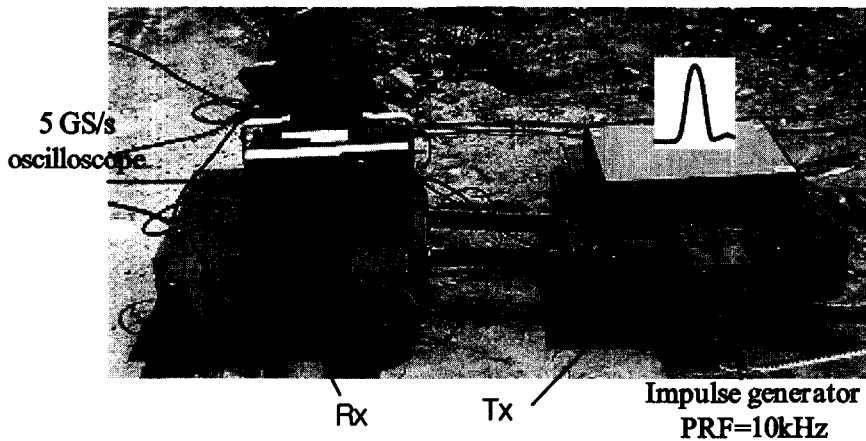


그림 8. 실험장치 구성. 송수신 안테나와 안테나를 고정시키고 이동시키기위한 주변장치, 디지털 오실로스코프 및 임펄스 발생기로 구성.

것 처럼 안테나와 지표면 사이는 수센티미터 정도의 간격이 있다.

그림 9에는 실제 시험장의 구성도를 보인다. 전체 시험장의 길이는 10미터, 폭은 3미터이다. 시험장속에는 가로 1.2미터, 세로 0.4미터인 금속 판을 지면으로부터 깊이 1미터되는 곳에 묻었다. 다음으로는 지름이 40센티미터, 길이가 1미터인 금속 파이프를 3미터 간격을 두고 묻었다. 물체의 크기 구분을 시험하기 위해 다음으로 지름이 5센티미터이고 길이가 3미터인 금속 파이프를 묻었다. 마지막으로 금속 매설물과의 차이를 확인하고자 금속이 아닌 PVC 관을 매설하였다.

실제 시험장에서는 사진으로부터 알수 있듯이 지중에는 여러가지 클러터 (clutter)들-돌멩이, 풀뿌리 등등-이 있음을 확인할 수가 있다. 이어지는 측정결과에서도 이러한 클러터들의 영향이 관

### 3.2 측정 방법 및 결과

측정은 네개의 물체를 땅속에 묻고, 그림 8에 있는 장비들을 사용하여 수행하였다. 수신된 신호는 오실로스코프에 저장되고, 이 데이터는 Delphi로 프로그램하여 영상처리를 하였다. 측정은 매 10센티미터마다 이루어 졌다. 따라서 전체 길이가 10미터이므로 전체 샘플링 값은 100개이다. 임펄스 발생기의 10kHz PRF는 해상도와 데이터를 처리하는 오실로스코프의 성능을 고려하여 결정된 것이다.

그림 10에 Delphi로 프로그램하여 얻어진 두개의 영상이 있다. 그림 10(b)는 문턱치(threshold) 값을 낮추어서 얻은 영상이다. 우선 두 그림으로부터 세개의 금속 물체가 탐지됨을 알 수가 있

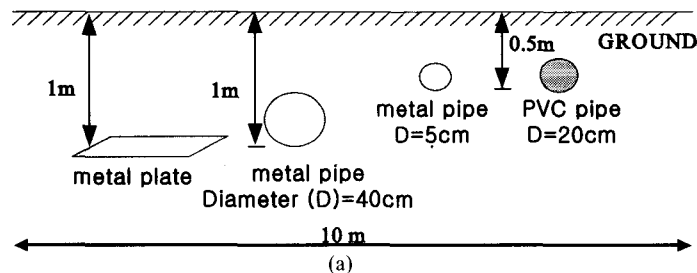


그림 9. (a) 시험장 구성. 세개의 금속 물체와 한 개의 PVC 파이프가 깊이를 달리해서 묻혀 있음. (b) 실제 시험장의 사진. 지중에는 흙 이외에도 클러터-작은 돌멩이, 풀뿌리-가 존재.

다. 각각 금속의 높이가 달리 나타남을 알 수가 있다. 가장 아래에 있는 금속판, 그리고 지름 40 센티미터 금속 파이프는 파이프의 윗 둥근 부분이 탐지되므로 금속판보다 높은 위치에서 탐지가 되었다. 또한 5센티미터 금속 파이프도 큰 금속 파이프보다 위에 놓여 있음을 확인할 수 있다. 그러나 수평 해상도에 있어서는 각 물체간의 구분은 가능하나 실제 간격과 비교한다면 어느 정도의 차이가 있다. 또한 비금속인 PVC 파이프는 영상으로 나타나지 않는다. 이는 주변의 클러터들에 의해 산란되는 신호의 영향 때문에 탐지가 되지 않는 것으로 생각된다. 대개의 시간영역 수신 레이더는 1밀리볼트 (mV) 정도까지도 탐지가 가능하다는 점을 고려하면 더욱 그 원인이 클러터에 있음을 알 수 있을 것이다.

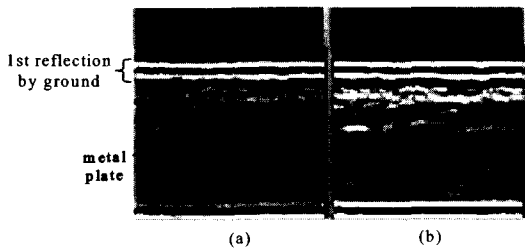


그림 10. (a) Delphi로 프로그램하여 얻어진 최초의 영상.  
(b) 문턱치 값을 변화시켰을 때의 영상.

그림 10 속에는 세계의 금속 물체이외에도 지면에 의한 강력한 반사, 그리고 작은 돌멩이, 풀뿌리와 같은 클러터들의 영향이 관측된다.

그림 11은 물체를 땅에 묻기 전에 아무런 물체가 없을 때 땅속에 대한 값들을 제외한 네개 물체들만에 의한 영상을 보인 것이다. 이 그림에 또한 뚜렷하게 세계의 금속 물체가 보인다.

그림 10 과 그림 11로부터 UWB 레이더는 넓은 주파수 대역을 가짐으로 작은 금속 물체도 충분히 탐지해 낼 수 있는 우수한 성능을 가짐을 알 수 있다. 그리고 깊이에 대한 해상도는 임펄

스를 사용했기 때문에 수십 센티미터 이하의 고 해상도를 가짐을 실험으로 증명해 보였다. 수평 해상도는 안테나 이득을 증폭시키거나 신호처리를 더욱 세분화하여 향상 시킬 수 있다.

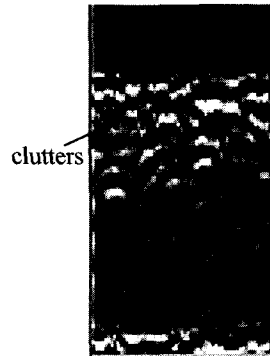


그림 11. 그림 10(b)로부터 네개의 물체가 없을 때의 값들을 제외했을 때의 영상.

#### IV. 결 론

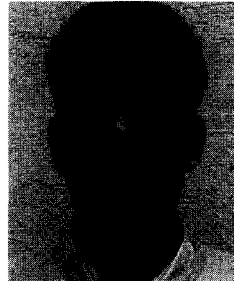
UWB 레이더의 핵심기술 및 기본적 원리를 개발된 UWB GPR을 이용하여 설명했다. 개발된 UWB GPR은 높은 해상도를 가지고 있음을 확인했다. 본 논문에서는 UWB 기술을 GPR에 응용시켰지만, 실제 UWB 기술은 다양하게 산업용, 의료용에 응용할 수 있다. UWB 기술의 장점을 활용하기 위해서는 논문에서 언급하였듯이 광대역 주파수 특성을 갖는 임펄스 열 발생기, 초광대역 안테나, 신호처리 기술등이 시급히 선행되어야한다.

#### 참고문헌

- [1] IEEE conference on UWB Systems and Tech., Baltimore, USA, May 2002.



- [2] UWB 국제기술 세미나, Seoul, Korea, Dec. 2002.
- [3] UWB 무선 기술 동향 특별호: 한국전자과학회지, Vol. 13, No. 7, June 2002.
- [4] J.D. Taylor (Ed.), Introduction to Ultra-Wideband Radar Systems. CRC Press: USA, 1995.
- [5] J.D. Taylor (Ed.), Ultra-Wideband Radar technology. CRC press: USA, 2001.
- [6] I. I. Immoreev and D. V. Fedotov, Ultra wideband radar systems: Advantages and disadvantages, IEEE conference on UWB Systems and Tech., Baltimore, USA, pp. 201-205, May 2002.
- [7] I. I. Immoreev and J. D. Taylor, Future of radars, IEEE conference on UWB Systems and Tech., Baltimore, USA, pp. 197-199, May 2002.
- [8] 김관호, UWB 레이더 기술동향, 한국전자과학회지, Vol. 13, No. 7, pp. 52-61, Feb. 2002.
- [9] D.J. Daniels, Surface Penetrating Radar. IEE: London, UK, 1996.
- [10] N. Ida, Microwave NDT. Kluwer Academic Publishers: London, UK, 1992.
- [11] A.G. Yarovoy, etc. The dielectric wedge antenna, IEEE Trans. on antennas and propagation, Vol. 50, No. 10, pp. 1460-1471, Oct. 2002.
- [12] H.L. Bertoni, etc. (Ed.), Ultra-wideband short-pulse Electro-magnetics. Plenum Press: New York, pp. 139-219, 1993.



**박영진**

2002. 11. ~ 현재, 한국전기연구원(KERI) 전기정보망기술연구그룹 소속



**김관호**

1978년 2월: 송전대학교 전자공학과 (공학사)  
 1980년 2월: 연세대학교 대학원 전자공학과(공학석사)  
 1980~83년: 한국전력공사  
 1983년~현재 : 한국전기연구원 (KERI) 책임연구원

[주 관심분야] 전파통신, 전력선통신, 무선에너지전송, UWB레이더 및 무선응용기기.



**윤동기**

현재 (주) 마이크로라인에 근무.