



## 지하레이더(GPR) 탐사법

송 창 섭

(충북대학교 농과대학 전임강사)

### 1. 개 요

지하레이더(GPR, ground penetrating radar) 탐사법이란 고주파 대역의 전자파(electromagnetic wave)를 지표에서 펄스형태로 송신안테나를 통해 지하로 전파시킨 후, 지표하부의 지층경계, 파쇄대, 공동(cavity), 매설관(buried pipe) 등과 같이 전파경로중 물리적 성질이 다른 매질의 경계에서 반사된 파를 수신안테나로 수신·기록하고, 수신된 파형을 적절한 기법으로 처리·분석하여 지하상태에 대한 정보를 얻는 물리탐사 기법중의 하나로, 1980년대 이후에야 상업적 이용이 가능해진 최신 기술이다.

지하레이더 기술은 초기 응용단계에서는 지질조사나 광업분에서 부분적으로 사용되었지만 최근에는 전자공학, 안테나 설계기술, 컴퓨터 분야의 급속한 발전으로 적용범위가 지반공학과 환경오염 문제를 다루는 지반조사뿐만 아니라, 지하철, 교량 등 각종 구조물의 안전진단을 위한 비파괴 검사(NDT, non-destructive test)분야까지 광범위하게 확대되고 있다. 특히, 최근 건설공사가 대형화되고, 90년대에 들어서 대형 토목·건축 구조물의 안전사고가 빈번하게 발생함에 따라 시공중인 구조물뿐만 아니라 사용중인 터널, 교량 등과 같은 대형 시설물의 안전여부가 큰 사회적 문제로 대두하고 있으며, 시공과정에서 장애요인으로 작

용하는 지하 매설물의 심도, 위치, 진행방향에 대한 정보의 파악이 매우 중요시되고 있다.

이와같이 지하상태에 대한 정보를 획득하고 시공과정이나 시공 후 발생할 수 있는 여러 문제점들을 효과적으로 해결하기 위해 다양한 장비들과 기법들이 사용되고 있으나, 그 중에서 물리탐사(geophysical prospecting)기술을 응용한 지하레이더 탐사법이 다양한 적용범위, 결과의 정확성 및 경제성으로 인해 가장 각광을 받고 있다.

여기에서는 지하레이더 탐사의 기본원리와 탐사를 구성하는 기본요소, 지하레이더 탐사법의 활용성·유용성·한계에 대하여 소개하고자 한다.

### 2. 지하레이더 탐사법

#### 가. 지하레이더 탐사법의 원리

지하레이더 탐사법의 기본원리는 레이더 기술과 같으나, 지상레이더의 경우 파의 전달매질이 균질한 공기이고 목적이 탐지대상의 공간상 위치파악에 있지만, 지하레이더에서는 매질이 불균질하기 때문에 잡음이 많이 포함되므로 적절한 처리기법이 필요하고 탐지목적도 대상물의 위치를 파악뿐만 아니라 연속적인 탐사를 통해 지하단면의 영상을 획득하는데 있다. 그림. 1은 지하레이더 탐사원리를 도식적으로 나타낸 것이다.

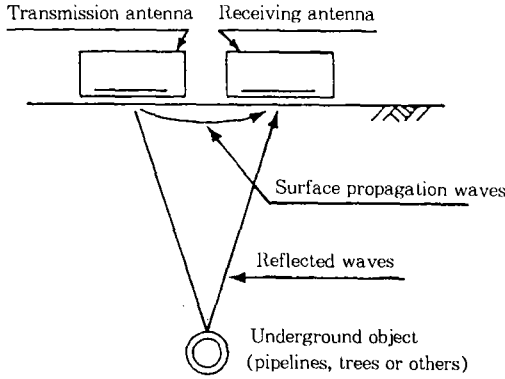


그림. 1. 지하레이더의 탐사원리

탐사결과는 전기전도도(electrical conductivity), 유전율(dielectrical constnt)과 같은 지반구성물질의 전기적 특성에 크게 영향을 받는다. 전기전도도는 전류를 전도시킬 수 있는 능력으로서 저항의 역수로 나타내며, 함수비와 점토 또는 전도성 물질의 함유량에 따라 좌우된다. 유전율은 전하를 저장할 수 있는 물질의 능력을 말하는데, 매질의 함수비와 공극률에 따라 달라진다. 전기전도도나 유전율이 높은 경우에는 전자파의 전달을 어렵게 한다. 특히, 전기전도도가  $10^{-2}$ 보다 높은 경우에는 지하레이더 탐사가 어려우므로 탐사지역의 전기전도도나 유전율을 미리 예측하여 정확한 결과를 얻을 수 있도록 하여야 한다.

식 (1)~(4)는 지하레이더 탐사법에서 전파의 전달속도, 반사면의 심도 등의 값을 구하는 데 사용되는 기본식을 나타내고 있으며, 표-1은 지반을 구성하는 대표적인 물질들의 유전율과 전파속도를 나타낸 것이다.

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}} \text{ (m/ns)} \dots\dots\dots (1)$$

$$d = \frac{v \cdot t}{2} \text{ (m)} \dots\dots\dots (2)$$

$$A = \frac{1635 \cdot \sigma}{\sqrt{\epsilon}} \text{ (dB)} \dots\dots\dots (3)$$

표-1. 주요 지반구성물질의 전기적 특성값 및 전자파의 속도

물 질 명	유 전 율	전파속도(m/ns)
공기	1	0.3
맑은물	81	0.033
화강암(건조)	5	0.1
화강암(습윤)	7	0.11
현무암(건조)	8	0.1
현무암(습윤)	12	0.087
점토	5~40	0.047~0.13
실트	5~30	0.054~0.13
모래(건조)	30	0.054
모래(습윤)	4~6	0.12
사질성 흙(건조)	2.5	0.18
사질성 흙(습윤)	25	0.06
점토질 흙(건조)	2.4	0.18
점토질 흙(습윤)	15	0.075

$$\lambda = \frac{1000 \cdot c}{f \cdot \sqrt{\epsilon}} \text{ (m)} \dots\dots\dots (4)$$

여기서,  $v$ 는 전자파의 매질내 전달속도,  $d$ 는 반사면과의 거리,  $A$ 는 파의 감쇠,  $\lambda$ 는 파장,  $c$ 는 공기중에서의 전자파 전달속도(0.3m/ns),  $\sigma$ 는 전기전도도,  $f$ 는 안테나의 중심주파수(MHz),  $\epsilon$ 는 유전율을 의미한다.

나. 탐사구성요소

지하레이더 탐사과정은 탐사준비(설계)단계, 현장 탐사작업(field operation), 자료의 처리(dataprocessing) 및 해석(interpretation)과정의 4단계로 나눌 수 있다.

1) 탐사설계(survey design)

현장에서 탐사를 실시하기 전 단계로 탐사 목적과 현장의 지질 및 환경조건, 전기적 특성, 탐사심도 등을 고려하여 최적의 자료를 얻기 위해 안테나의 주파수, 송·수신 안테나의 간격, 장비의 이동간격 등 탐사에 영향을 미치는 세부요인들을 결정하는 과정을 탐사설계라고 한다.

① 안테나의 주파수(antenna frequency) : 중심주파수는 탐사의 목적과 심도 등을 고려하여 결정한다. 주파수가 증가할수록 해상도는 증가하지만 탐사심도가 얕아지기 때문에 신중하게 선택해야 한다. 일반적으로 기반암이나 파쇄대의 분포상태나 지질학적 구조를 파악하기 위해서는 25~100MHz, 심도 2m내외에 매설된 상·하수도, 가스관 등의 지하매설물 탐지에는 200~500MHz, 터널의 2차 슬래브 내부의 철근탐지와 비파괴 안전진단분야에는 500~1,000MHz 또는 1,000MHz이상의 주파수를 사용한다.

② 탐사심도 : 심도는 적용되는 전자파의 중심주파수에 따라 달라진다. 그러나, 매질의 전기전도도, 함수비, 점도함유율이 많거나 전자파의 산란이 많으면 낮아지므로 안테나의 선택에 주의하여야 한다. 표-2는 주파수에 따른 대략적인 조사심도를 나타낸다.

표-2. 중심주파수에 따른 탐사심도

중심주파수 (MHz)	심도(m)	적 용 분 야
80	5~30	지질학 분야
100~120	4~25	지질, 환경 분야
300~500	0.5~9	토목, 환경 분야
900	0~1	고고학 분야
1000~2500	0~0.5	콘크리트, 도로, 지반 분야

③ 송·수신 안테나 간격(antenna separation) : 송신 및 수신안테나의 간격을 말하는 것으로, 매설물이나 안전진단에서는 10~50cm, 깊은 심도의 탐사에서는 최소한 1m이상으로 하는데, 안테나의 간격이 넓어질수록 수평반사층에 대한 탐지범위가 증가하게 된다.

④ 송·수신장비의 이동간격(station spacing) : 송·수신부의 이동간격을 말하며, 지반이나 지질탐사에서는 20~100cm, 매설물 탐사에서는 5~10cm, 안전진단 조사에서는 5cm이하의 값이 사용된다.

⑤ 신호 샘플링 간격(signal sampling interval) : 반사되는 신호를 기록하는 시간간격을 샘플링간격이라고 하며, 간격이 너무 짧으면 기록되는 자료의 양이 방해해지고 너무 긴 경우에는 알리아싱(aliasing)현상으로 신호의 왜곡을 가져오기 때문에 적당한 범위의 값을 선택해야 한다.

그 밖에, 신호기록 범위(time window), 탐사선의 위치 및 방향(survey line location) 등을 설정하여야 한다.

2) 자료처리

전자파의 전달대상인 지반이 암석, 흙, 수분, 공극 등으로 아주 복잡하게 혼합된 불균질한 매질들로 구성되어 있어, 파동에너지의 대부분이 방사 후 지수함수적으로 감소한다. 또, 매질의 경계면에서 물리적 특성에 따라 반사, 회절 및 굴절현상을 일으키며, 지반자체에서 발생하는 저주파잡음성분이 수신신호에 혼합되어 나타난다. 특히, 탐사가 도심에서 이루어질 때는 지반자체에서 발생하는 잡음외에도 차량, 각종 철구조물, 통신케이블 등의 원인에 의해 발생되는 신호성분이 함께 기록되기 때문에 신호 대 잡음비(signal/noise ratio)가 매우 낮다. 따라서, 수신자료로부터 정확하고 유용한 지하정보를 얻기 위해서는 기하급수적으로 감소한 파를 적정수준까지 보정하고 불필요한 잡음성분을 제거 또는 감소시켜 신호 대 잡음비를 원하는 수준까지 향상시키고 왜곡된 부분을 바로 잡는 과정이 필요한데, 이 과정을 자료처리(data processing)과정이라 한다. 대부분의 지하레이더 시스템은 지금까지 석유 반사탄성과 탐사에서 이용되어 왔던 DSP(digital signal processing)기술을 거의 대부분 이용하고 있다.

① 데이터 보정 : 기록된 지하레이더 자료는 반사면의 전기적·탄성적 불연속성에 따라 간섭과 신호감쇠에 의존하게 되고, 전자파는 반사탄성과 신호와 비슷하게 형성되므로 상호

데이터처리법을 적용하여 보정한다. 데이터 보정에는 데이터 편집, 스택킹, 포화보정을 수행하게 된다.

② 필터링(filtering) : 탐사자료에 포함되어 있는 여러 종류의 잡음을 제거하고 원래의 반사신호를 강조하는 작업을 필터링이라 한다. 지하레이더 탐사에서 사용되는 필터는 상관필터와 대역필터를 주로 사용한다. 상관필터로는 반사면을 강조하고 잡음신호를 감소시키며 다중 반사파 등을 제거하여 시간도면에서 획득된 반사신호를 컨벌루션(convolution)시키는 자기상관 필터와 자료의 시간도면에서 획득된 반사신호를 디컨벌루션(deconvolution)시킨 후, 다중 반사파가 아닌 실제 반사면에서의 신호를 확인하고 신호 대 잡음비를 높이는 상호상관 필터가 있다.

또 탐사자료에 잡음이 많이 포함되어 있는 것으로 예상되는 주파수 대역을 제거함으로써 잡음을 제거하게 되는데, 종류는 대역통과 필터(band pass filter), 고주파통과 필터(high pass filter), 저주파통과 필터(low pass filter) 등이 있다. 특히, 대역통과 필터링은 저주파수, 진동(진폭)과 긴 측정시간에 의한 신호왜곡에 의하여 야기된 고주파수 잡음을 제거하는데 사용된다.

③ 스펙트럼 분석 : 신호 대 잡음비를 높이기 위해 자료의 주파수 성분을 분석하여 잡음 대역을 찾아내는 작업을 스펙트럼 분석이라 한다. 시간영역의 자료를 주파수 영역으로 변환하여 주파수 성분을 확인하는 이 작업은 푸리에 변환을 이용하여 처리할 수 있으며, 각 과정의 처리를 거칠 때마다 행하여 변화된 신호의 주파수 성분을 확인하는 것이 효과적이다.

④ 고도보정(static correction) : 송신부와 수신부, 샘플링 간격사이의 고도차, 저속도층의 풍화정도에 따른 전자파의 속도변화, 지층의 두께 등에 따라 발생하는 반사주시의 변화를 보정해주는 것이 고도보정(static correc-

tion)이라 하며, 표면지형의 영향이 있는 경우에 수행하게 된다.

⑤ 구조보정(migration) : 실공간 위치에 반사를 재배치하기 위한 것으로 2차원 영상처리 과정인 구조보정은 반사신호의 왜곡을 개선하여 실제의 반사면을 나타나게 하는 작업이다. 지하레이더 탐사시 전자파는 원통형의 지중 매질물, 일점 목표물, 경사층 등으로부터 회절되고, 회절된 전자파는 다른 대상체의 반사파로 오인되는 수가 있으므로, 이러한 현상을 보정하기 위해 회절곡선상의 적분, 유한차분법 이용, 파장의 위상이동, 주파수 영역보정을 통하여 실제의 위치를 나타낸다.

⑥ 이득보정(gain recovery) : 전자파 에너지는 매질내를 전파할 때, 매질의 전기전도도 등 전기적 요인뿐만 아니라 전자파의 구형발산 등으로 진폭의 감쇠가 일어나, 후기시간대의 신호는 전기시간대의 신호에 비해 미약하게 되므로, 탐사의 목적에 맞는 양질의 자료 획득을 위해 전시간대에 걸쳐 신호의 수준을 일정하게 해주는 작업이 필요하다. 이러한 작업을 이득보정이라고 하며, 상대적으로 약한 진폭을 회복하기 위하여 공간발산 또는 자동이득조절(AGC)로서 여러 가지 함수를 사용하여 조정한다. 이 경우, 데이터 수가 많으면 매끄러운 자료를 얻을 수 있는 반면, 외형진폭 레벨에 의한 반사의 분류가 불가능하므로 주의하여야 한다.

#### 다. 탐사 시스템의 구성

지하레이더 시스템의 구성은 그림. 2와 같이 송신부, 수신부, 송·수신부를 제어하는 제어부, 자료의 기록·처리를 담당하는 컴퓨터부로 구성된다.

제어부(control console)에서는 전원을 조절하며, 디지털 프로세싱과 송·수신부의 전원공급, 타임시퀀싱(time equencing) 및 컴퓨터와의 통신을 조절하는 기능을 담당한다. 송신부

는 송신기(transmitter)와 송신안테나로 구성되고, 제어부에서 송신신호와 전원공급을 받아 펄스형태의 전자파를 발생시켜 지반으로 방사시키는 기능을 가진다. 수신부는 수신기(receiver)와 수신안테나로 구성되며, 수신시간 제어를 받아 지하의 반사체에서 반사된 신호를 수신받아 디지털 형태로 변환시킨 후 제어부로 전송하는 역할을 담당한다.

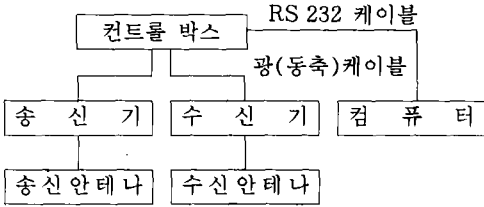


그림. 2. 지하레이더 시스템의 구성

### 3. 지하레이더를 이용한 탐사 활용 분야

최근 지하레이더를 이용한 탐사적용 분야가 급격하게 확산되고 있는데, 특히 건설분야의 지하레이더 탐사는 계획단계부터 설계·시공·유지보수·관리 측면까지 다양한 양상을 보인다. 이러한 지하레이더 탐사의 확대는 비파괴 탐사방법이며, 탐사결과에 대한 신뢰도가 높고, 방법이 간단하여 탐사속도가 빠르다는 특징뿐만 아니라 장비제작 기관 또는 장비활용 기업체에서 현장 적용성 향상을 위한 많은 모델시험 탐사로부터 운용기술, 재료상수 또는 현장여건에 따른 전자파의 반향 특성에 관한 기술의 축적에 기인한 것으로 판단된다.

다음은 현재까지 활용되고 있는 지하레이더 탐사분야를 요약한 것이다.

- ① 고고학 분야 : 피라미드 탐사, 허드슨만의 유물탐사
- ② 터널분야 : 터널시공 지반탐사, 라이닝 두께, 배면의 공동 내부균열 탐사, 양수발전용 도수터널 탐사, 터널의 손상원인 조사, 터널의

지보재의 설치여부 및 간격 탐사, 파쇄대의 발달상황 조사, 그라우팅성과 검토를 위한 탐사, 지하매설물 탐사

③ 교량분야 : 교량상판의 역청포장 두께조사, 교량손상부위 탐사, 기초의 위치 및 손상조사

④ 도로 및 철도분야 : 해안도로 기초부의 해수흐름 조사, 도로탐사, 도로신설을 위한 지반조사 및 공동조사, 철도 개보수를 위한 지반탐사, 도로기초, 노반조사, 비행장 활주로 조사, 지중매설관로 탐사

⑤ 건축구조물 분야 : 바닥 슬라브 하부공동 조사, 건축부지 지반탐사, 철근콘크리트 구조물 내부결함·공동 및 철근배근 상태조사, 건축물 파일기초 탐사, 지하주차장 바닥 슬라브의 철근배근 상태조사

⑥ 댐 분야 : 댐의 기반암 탐사, 제방의 내부침식 위치 탐사

⑦ 공동분야 : 석회암 내의 공동탐사, 지반의 은닉공간조사

⑧ 지반탐사분야 : 지하수위 탐사, 하구퇴적상태 조사, 자갈층의 두께 조사, 오염지반탐사, 지반의 기반암 탐사, 가스 파이프라인의 조사

⑨ 지하철분야 : 콘크리트박스의 두께 및 철근배근 상태조사, 그라우팅 보강효과 검증을 위한 탐사, 기반암의 심도 및 형상파악을 위한 지질탐사, 안전시공을 위한 지하매설물 사전탐사

⑩ 자원개발분야 : 석재지질 평가를 위한 시추공 레이다 탐사, 지하공동개발 탐사 등

### 4. 결 언

국내에 도입 초기 단계에 있는 최신 비파괴 탐사법인 지하레이더 탐사의 기본적인 이론과 분석기법을 소개하였다. 그리고, 농공학 분야에서 지하레이더 탐사의 적극적인 활용과 이

에 대한 연구개발을 재촉하는 의미에서 국내·외 지하레이더 활용실태를 조사·정리하였다.

지하레이더 탐사법은 지질학, 토목공학, 건축공학, 지구물리학, 전자공학 등 여러 학문의 복합적인 작품이므로, 단순히 장비를 현장에 적용시킨다고 해서 원하는 결과를 바로 얻을 수 있는 장비가 아니고, 곳에 따라서는 많은 처리와 분석과정이 필요하고, 때에 따라서는 결과를 도출하지 못하는 경우도 있을 수 있으므로, 국내활용성 증진과 원활한 탐사수행, 신속하고 정확한 데이터처리 등을 위해서는 각 학문분야가 조화를 이루어 지하레이더 탐사방법뿐만 아니라, 국내 지반특성의 고려, 전자파 방사 특성의 개선, 장비의 전기적 특성 개선, 장비의 경량화, 동력원의 개선 등의 문제점을 해결하기 위한 연구개발·투자가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

1. L. Peter, Jr., M. Poirier & M. Barnes, General ground penetrating radar(GPR) concepts, International Conference on Ground Penetrating Radar, 1992.
2. 김선웅, 지하레이더를 이용한 지하매설물 조사 사례, 기술 365, 동부건설(주) 기술연구소, 1995.
3. 동부건설(주) 기술연구소, 지하레이더를 이용한 터널 라이닝 두께 조사 보고서, 1995.
4. 동부건설(주) 기술연구소, 지하레이더를 이용한 기반암 분포조사 보고서, 1995.
5. 배성호 외 2인, 지반공학과 집단분야에서의 지하레이더 기술응용, 한국지반공학회지, vol. 12 No. 4. pp. 179~ 193, 1996.
6. 정해상 외 5인, 토목공학에서의 지하레이더 활용성 연구(I), 건설기술연구연보, 한국건설기술연구원, 1996.