

# GPR에 의한 지반 구조물 탐사

김학수<sup>1)</sup>, 임해룡<sup>2)</sup>, 배성호<sup>1)</sup>

1) 바투엔지니어링(주), 2) (주)쓰리텍

## Investigations of Underground Structures by Ground Penetrating Radar

Kim, Haksoo<sup>1)</sup>, Lim, Haeryong<sup>2)</sup> & Bae, Seongho<sup>1)</sup>

1) Batu Engineering Co. Ltd., 2) Three TECH Co. Ltd.

**요약** : GPR이 국내에 소개된지 6년 이상이 지났으며 그 동안 GPR이 가지는 다양한 적용 분야 및 그 방법의 편의성과 경제성에 의해 많은 건설현장에서 수 많은 이용 사례들이 축적되었다. 따라서 본 논문에서는 이들 실제 사례들을 중심으로 GPR이 가지는 특성 및 제한을 살펴보고자 하였다.

**주요어** : GPR, 지하매설물 탐사, 비파괴 안전진단, 정밀 지반조사

**Abstract** : More than 6 years passed until GPR was introduced to our country. GPR method is now widely used in construction site because of its various applicability, convenient handling and low cost. We discussed the characteristics and limits of GPR method with various case study.

**Keywords** : Ground Penetrating Radar, Underground Buried Object Survey, Non-Destructive Safety Diagnosis, Precise Geotechnical Investigation.

### 1. 서론

GPR(Ground Penetrating Radar) 탐사법은 고주파 대역(수십-수천 MHz)의 전자파(electromagnetic wave)를 지표에서 송신 안테나를 통해 지하로 방사시킨 후 지표 하부의 지층 경계, 파쇄대(fracture zone), 공동(cavity), 매설관(buried pipe)등과 같은 지하의 불균질층으로부터 반사된 반사파를 수신 안테나를 통해 기록하고 기록된 수신 파형을 처리 분석하여 지하 하부의 상태에 대한 정보를 얻는 물리탐사 기법중의 하나이다.

GPR기술은 초기에는 북유럽과 캐나다를 중심으로 깊은 심도의 지질조사나 광업분야에서 부분적으로 사용되었지만 최근에는 전자공학, 안테나 설계기술 그리고 컴퓨터분야의 급속한 발전으로 인해 적용 및 응용범위가 지반공학과 환경 오염문제를 다루는 고해상도 천부 지반 조사를 비롯하여 지하철, 대형교량등 각종 주요 구조물의 안전진단을 위한 비파괴 검사(NDT: Non-Destructive Test) 분야에까지 광범위하게 확대되고 있다.

GPR 탐사는 탐사 설계(survey design), 현장 탐사작업(field operation), 현장에서 얻은 자료에 대한 처리(data processing) 및 해석(interpretation)의 4단계로 나뉘어진다. 탐사결과는 주로 유전상수(dielectric constant), 전기전도도(electrical conductivity)와 같은 지반의 물리적 성질, 안테나의 중심 주파수(center frequency), 안테나 간격(antenna separation), 측정 간격(spacing), 신호의 기록범위(time window), 샘플링 간격(sampling interval) 등으로 구성

되는 탐사 설계변수의 영향을 받게 된다.

국내에 GPR 기술이 도입된지도 6년 이상이 지났으며 여러 분야에 이용되고 있다. 따라서 본 논문에서는 여러 사례를 중심으로 이 방법이 가지는 특성과 한계 등을 규명해 보고자 한다.

## 2. GPR의 기본원리

전자파를 이용하는 레이더(Radar; Radio Detecting Ranging)는 원래 1940년대 이후 미국에서 적의 비행기나 군함 등의 탐지를 위해 군사 분야에서 처음 사용되기 시작하여 현재는 군사용뿐만 아니라 항공 분야를 비롯해 여러 상업적 용도로 광범위하게 사용되고 있다. 이러한 레이더를 지상이 아닌 지하에 적용시켜 지하의 대상물을 탐지하는 것을 GPR 탐사법이라고 한다. 일반적으로 알고있는 지상레이더의 원리는 송신안테나에서 파가 방사된 후 공기중의 반사체에 반사되어 수신안테나를 통해 기록되는 수신파의 시간간격으로부터 반사체의 거리, 방향과 같은 정보를 파악하게 된다. GPR의 기본원리는 지상레이더와 같지만 차이점은 지상레이더의 경우 파의 전달 매질이 균질한 공기이고 탐지 목적이 단순히 탐지대상의 공간상의 위치파악에 있지만 GPR에서는 지반의 구성이 아주 불균질한 매질이기 때문에 매우 정밀한 자료처리 및 해석기법이 필요하고 탐사목적도 단순히 대상물의 위치를 파악하는 것 뿐 아니라 연속적인 탐사를 통해 연속적인 지하단면의 영상(reflection image) 및 관련 정보를 획득하는데 있다

GPR은 크게 정밀 지반조사분야, 구조물의 비파괴검사 및 지하 매설물 탐사분야에 적용되고 있으며 그림 1은 이들 적용 분야에 따른 탐사 원리를 도식적으로 나타낸 것이다. 그림에서 화살표로 나타낸 직선은 전자파의 반사 경로(ray path)를 개념적으로 나타내는데 터널 안전진단의 경우 송신 안테나(Tx)에서 방사된 전자파가 2차 라이닝과 슛크리트의 경계면(방수포나 부직포), 슛크리트와 암반의 경계 및 록볼트(rock bolt)나 강지보(steel rib)와 같은 지보재(supporting material)의 선단에서 반사되어 수신안테나(Rx)를 통해 기록되고 이 기록된 자료를 분석하여 해석을 하게 된다.

탐사자료의 처리 및 해석에 영향을 미치는 전자파의 전달 속도는 유전상수의 영향을 받으며 파의 감쇠(attenuation)는 주로 전기전도도에 영향을 받는다. 파의 전달 속도는 유전상수의 제곱근에 반비례하며 감쇠는 전기전도도에 비례하고 유전상수에 반비례하는 특성을 가진다. 일반적으로 전기전도도는 매질내 수분함량과 전도성 물질의 함량에 영향을 받으며 유전상수는 매질이 균질한 경우 수분함량과 공극율에 영향을 받게 된다. 표 1은 콘크리트, 물 등을 포함한 지반을 구성하는 대표적인 물질들의 전기적 특성과 전자파 전파 속도의 범위를 나타내고 있다.

그림 2는 이론적으로 구한 공기와 접한 매질에서 유전상수의 상대적 크기에 따른 안테나로부터 방사 에너지의 변화 형태(antenna pattern)를 도식적으로 나타낸 것이다. 보통 전기적 성질이 서로 다른 두 매질의 경계부에 안테나가 위치할 경우 에너지의 많은 부분이 상대적으로 유전상수가 큰 매질로 방사된다. 유전상수는 그 매질이 전기를 함유할 수 있는 축전기의 용량과 같은 의미로 이해할 수 있다. 조건이 양호한 지반에서 공기와 지반의 경계면에서 방사가 일어날 때 약 90%정도의 에너지는 지반 즉 땅속으로 전파된다. 식(1)-(6)은 GPR 탐사에서 파의 전달속도, 반사면 심도 등의 값을 구하는데 사용되는 기본적인 식들을 나타낸 것이다.

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}} \quad (1)$$

$$d = \frac{vt}{2} \quad (2)$$

$$A = 1635 \frac{\sigma}{\sqrt{\epsilon}} \quad (3)$$

$$\lambda = \frac{1000c}{f\sqrt{\epsilon}} \quad (4)$$

$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}} \quad (5)$$

$$T = 1 - R \quad (6)$$

- $d$  : 반사체와의거리( $m$ )  
 $v$  : 전자파의전달속도( $m/ns$ )  
 $A$  : 파의감쇠( $dB$ )  
 $\lambda$  : 파장( $m$ )  
 $t$  : 왕복주시( $ns$ )  
 $R$  : 반사계수  
 $T$  : 투과계수  
 $\epsilon$  : 유전상수  
 $\sigma$  : 전기전도도( $mS/m$ )  
 $f$  : 주파수  
 $c$  : 공기중에서의 전자파속도( $0.3m/ns$ )

식에서 보는 바와 같이 전자파의 전달 속도는 매질의 유전 상수에 의해 결정되며 매질이 균질한 경우 유전상수는 매질의 수분함량과 비례 관계를 가진다. 반사 계수(reflection coefficient)는 전체 방사 에너지에 대한 반사 에너지의 비를 나타내는 것으로 반사파 강도(진폭)에 영향을 준다. 인접한 두 매질에서 유전상수의 차와 반사 계수는 비례 관계를 가지는데 주 매질과 반사체와의 유전상수 차가 클수록 반사체로부터 반사 신호의 강도는 증가하게 된다. 투과 계수(transmission coefficient)는 안테나에서 반사되는 전체 에너지 중 반사되지 않고 투과되는 에너지의 비를 나타낸다. 특정 경계면에서의 반사 에너지가 큰 경우 그 하부로의 투과 에너지는 작아지기 때문에 이러한 조건에서는 강한 반사면 하부에서 오는 반사파의 강도는 작아지므로 강한 반사면 하부의 정보 획득은 어려워지게 된다. 표 2는 대표적 매질 경계에서의 반사 계수를 나타내고 있다.

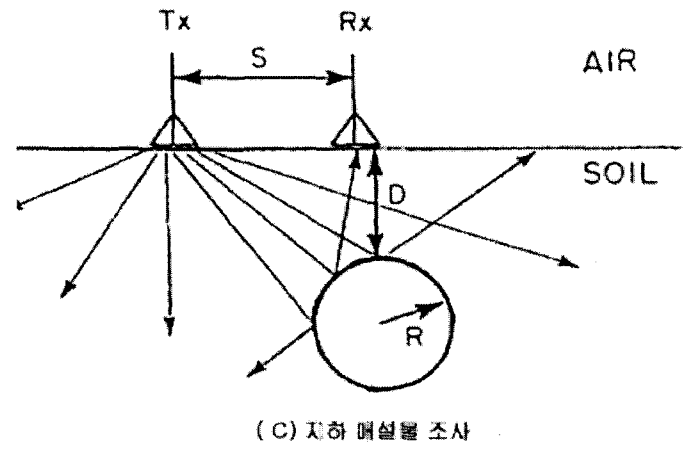
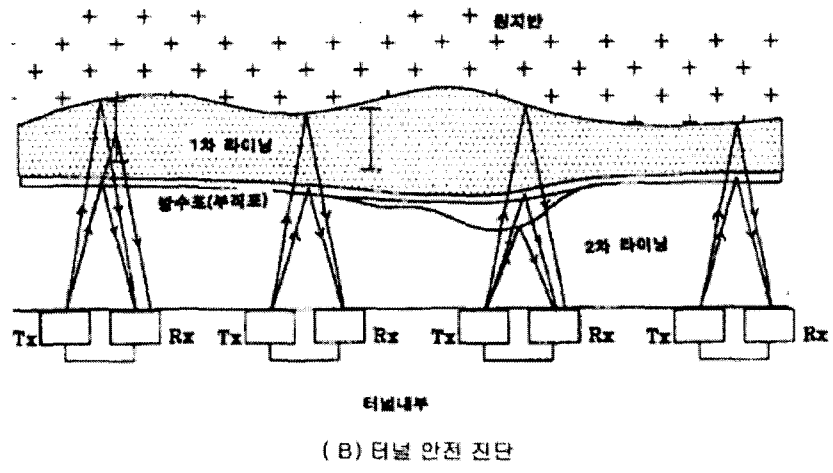
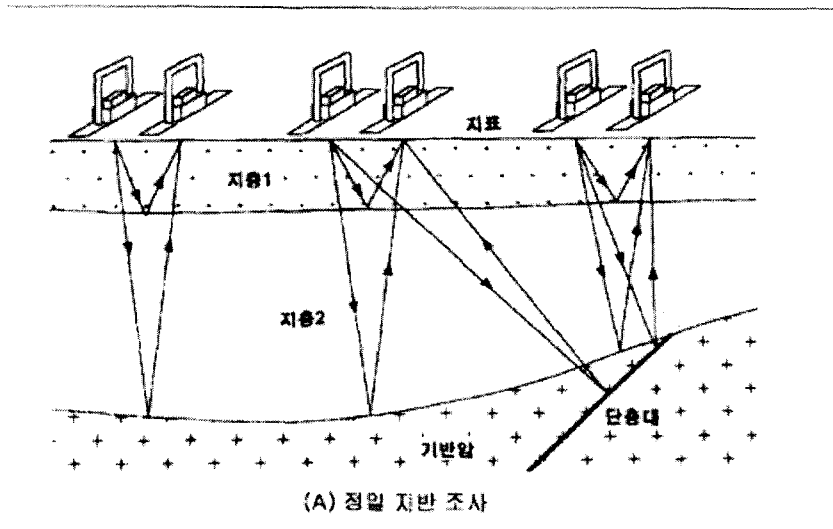


Fig. 1. Principle of GPR in various applications.

Table 1. Electrical properties and electromagnetic wave velocities of various material

매질명	유전상수	전기비저항( $\Omega m$ )	전파속도(m/ns)
공기	1	$\infty$	0.3
맑은물	81	100	0.033
바닷물	81	0.00033	0.033
얼음	3-4	100	0.15-0.17
화강암(건조)	5	$10^8$	0.13
화강암(습윤)	7	1000	0.11
현무암(건조)	8	$10^6$	0.1
현무암(습윤)	12	10000	0.087
점토	5-40	1-10	0.047-0.13
실트	5-30	0.01-1	0.054-0.13
모래(포화)	30	0.1-1	0.054
모래(건조)	4-6	100	0.12
세일	5-15	10-1000	0.075-0.13
석회암	4-8	$50-10^7$	0.11-0.17
사암	6	$1-10^8$	0.12
흙(사질, 건조)	2.5	7000	0.18
흙(사질, 습윤)	25	100	0.06
흙(점토질, 건조)	2.4	3000	0.18
흙(점토질, 습윤)	15	20	0.075
흙(톰)	2.5-19	50-10000	0.07-0.18
흙(동결)	3-6	100-10000	0.12-0.17
콘크리트	4-10		0.09-0.12

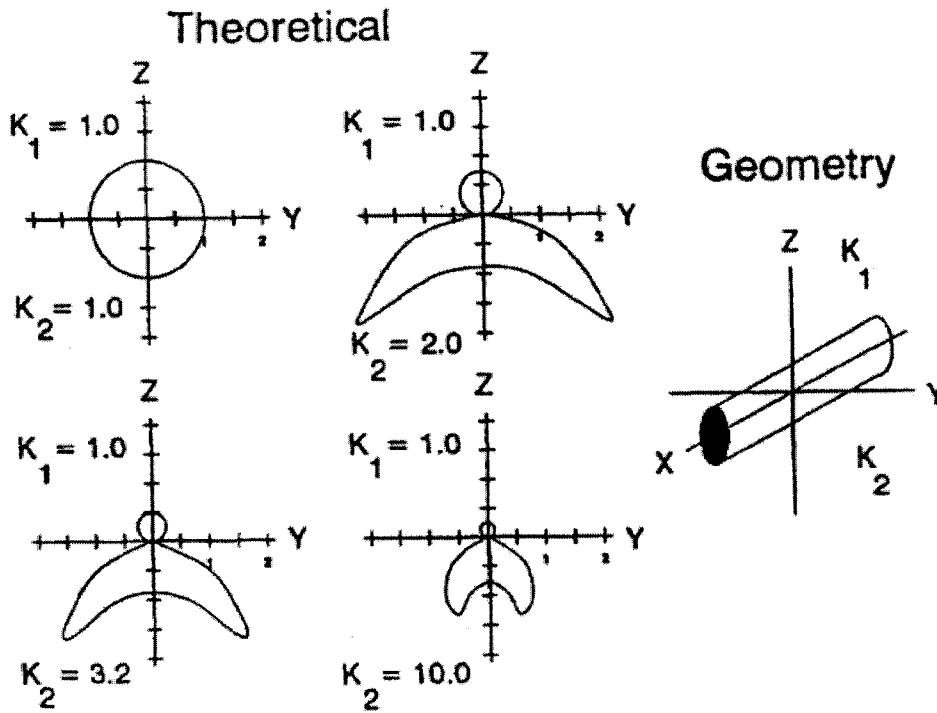


Fig. 2. Energy radiation pattern for dielectric constants of the earth materials(from GPR Workshop Notes).

Table 2. Reflection coefficient for various media boundaries.

매질 1	유전상수	매질 2	유전상수	반사계수
공기	1	흙(건조)	5	-0.38
흙(건조)	5	흙(습윤)	25	-0.38
흙(건조)	5	암반	8	-0.12
흙(습윤)	25	암반	8	-0.28
물	81	암반	8	0.52
얼음	3.2	물	81	0.67
흙(동결)	6	흙(습윤)	25	0.34
흙	3-50	금속	$\infty$	-1

그림 3과 4는 Davis, Annan(1992)에 의해 수행된 시험결과의 일부로 매질의 전기적 특성 즉 유전상수와 전기전도도가 파의 전파 속도 및 감쇠에 미치는 영향을 잘 나타내고 있다. 일반적으로 전자파는 매질내에서 전파의 형태로 진행(wave propagation)되지만 매질의 전기적 환경이 변하는 조건에서는 전자파는 전파가 아닌 분산(diffusion)된 형태로 진행된다. 유도 분극(dielectric polarization)에 의해 발생하는 변위 전류(displacement current)가 전자의 이동에 의해 형성되는 전도 전류(conduction current)를 초과할 때의 주파수를 전이 주파수(transition frequency)라고 하는데 이 주파수 이하에서 전자파는 분산의 형태를 가진다.

그림 3, 4에 따르면 이러한 분산현상은 106-108 Hz범위에서 발생되며 이러한 현상을 최소화시키기 위해서 탐사 설계시 전이 주파수 이상의 주파수를 갖는 안테나가 선택되어야만 한다. 그림 5는 여러 실험자료로부터 구한 흙의 함수비와 유전상수 및 전자파 전달속도와의 관계를 나타낸다.(Topp et al, 1980)

### 3. GPR 시스템의 구성

GPR 시스템은 현재 여러 시스템이 상용화되어 사용중인데 제작회사에 따라 장비의 형태 및 사양이 다르지만 기본적인 구성은 모두 유사하다. GPR 시스템은 크게 송신부, 수신부 송 수신부를 제어하는 제어부 그리고 자료의 기록, 처리를 담당하는 컴퓨터부로 나눌 수 있다. 제어부(control console)에서는 전원을 조절하며 디지털 프로세싱과 송수신부에 전원 공급. 타임 시퀀싱(time sequencing) 및 컴퓨터와의 통신을 조절하는 기능을 담당한다. 송신부는 송신기(transmitter)와 안테나로 구성되며 제어부에서 송신신호와 전원 공급을 받아 펄스(pulse)형태의 전자파를 발생시켜 지반으로 방사시키는 기능을 가진다. 수신부는 수신기(receiver)와 안테나로 이루어지며 제어부에서 전원 공급과 수신시간의 제어를 통해 지하의 반사체에서 반사된 신호를 수신 받아 디지털 형태로 변환시킨 후 제어부로 전송하는 역할을 담당한다.

그림 6은 GPR 시스템의 한 예로 pulseEKKO 1000A의 시스템 구성을 나타내는데 이 시스템에서는 225,450, 900, 1200 MHz의 중심 주파수(center frequency)를 갖는 안테나가 있어 탐사 목적에 따라 선택적으로 사용된다.

### 4. 탐사 설계

현장에서 탐사를 실시하기 전 단계로 탐사의 목적과 대상 지역의 지질 및 환경조건을 고려하여 최적의 자료를 얻기 위해 안테나의 주파수, 송수신 안테나의 간격, 측정점의 간격 등과 같은 탐사에 구체적으로 영향을 미치는 세부 요인들을 결정하는 과정을 탐사 설계라고 하는데 일반적으로 다음과 같이 나눌 수 있다. 표 3은 사용 주파수에 따른 주요 변수들의 범위를 나타낸다.

#### 1) 탐사 형태(survey type)

GPR탐사는 탐사의 주목적 및 두 안테나의 배열 형태에 따라 다음의 3가지 형태로 구분된다. 그림 7은 각각의 방법들을 도식적으로 나타내고 있다.

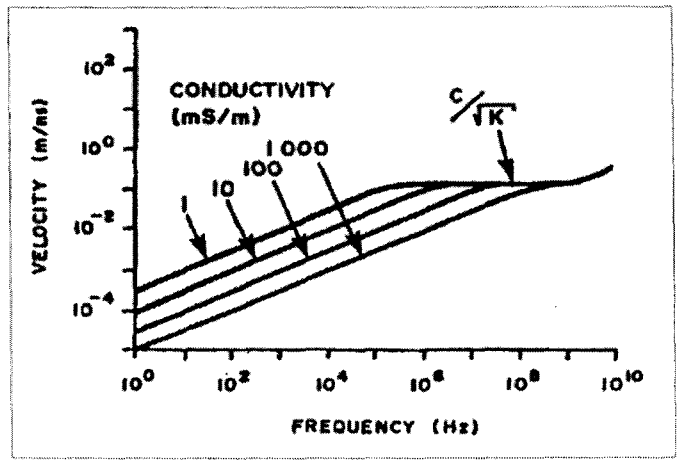


Fig. 3. Velocity variations for frequencies and electrical conductivity(Davis & Annan, 1992).

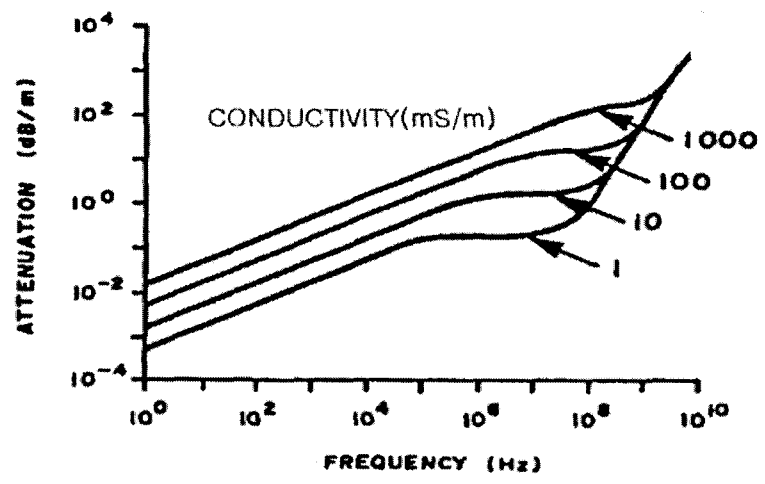


Fig. 4. Attenuation patterns for frequencies and electrical conductivity(Davis & Annan, 1992).

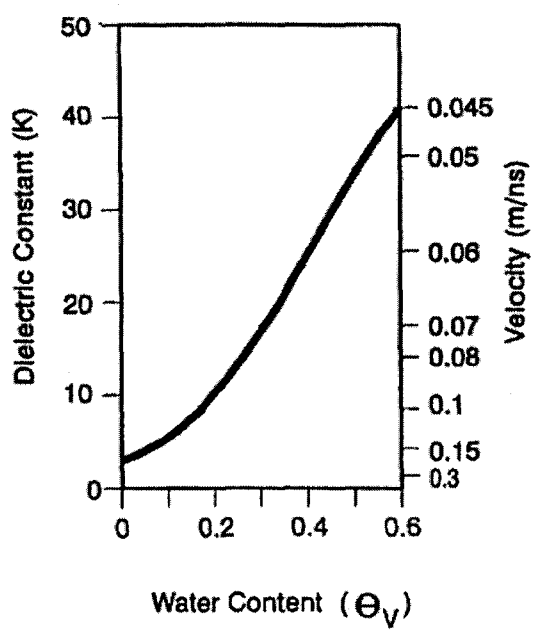


Fig. 5. Relation of water contents, dielectric constants, and velocity (Topp et. al., 1990).



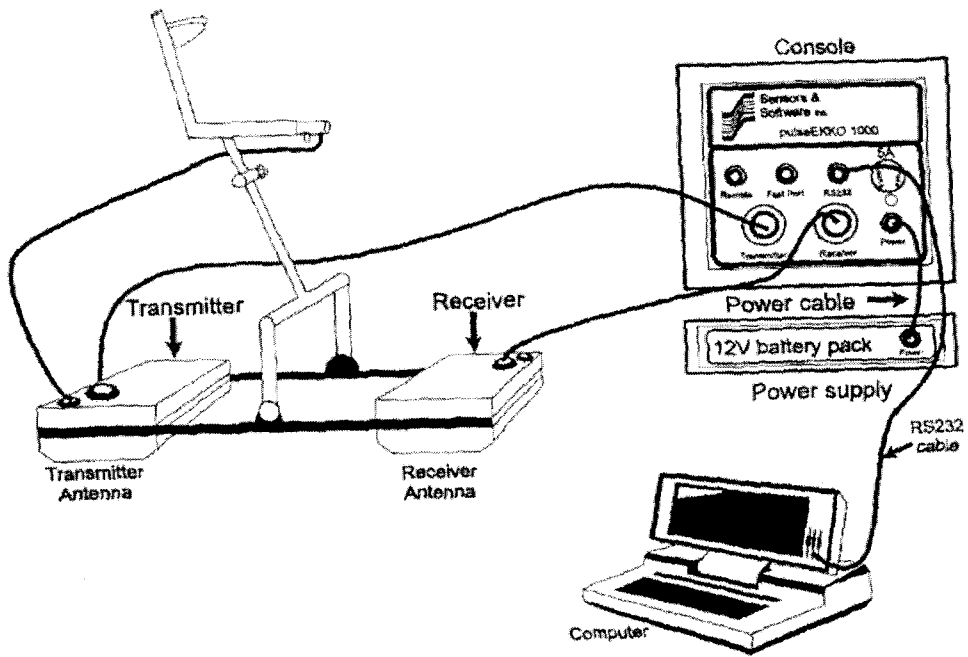


Fig. 6. Configuration of pulseEKKO 1000A system (from pulseEKKO User's Guide).

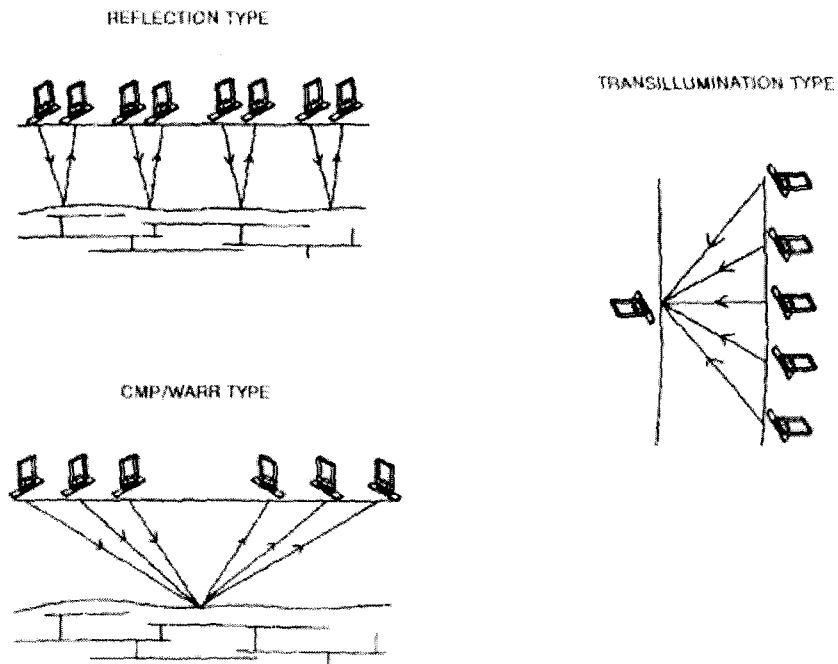


Fig. 7. GPR survey types (from GPR Workshop Notes).

반사법 (reflection type)

CMP/WARR법 (Common Mid Point/Wide Angle Reflection & Refraction)

투과법 (transillumination type)

반사법은 땅속 반사면에 대한 정보를 얻기 위해 실시되며 기준점을 기준으로 송수신 안테나가 동시에 이동하게 되는데 대부분의 탐사에서 적용되는 방법이다. CMP법은 기준점을 중심으로 송수신 안테나를 각각 반대방향으로 일정하게 이동시켜 탐사를 수행하는 방법으로 지층에서의 전자파의 속도 추정에 사용된다. 투과법은 주로 분리된 구조물을 대상으로 대상체에서 파의 투과 특성을 연구하는 분야에서 부분적으로 적용되는 방법이다.

Table 3. Principal survey design parameters for various antenna frequencies

안테나 주파수(MHz)	최대 측정 간격(m)	최소 안테나 간격(m)	샘플링 간격(ps)
12.5	2.0	8.0	6400
25	1.0	4.0	3200
50	0.5	2.0	1600
100	0.25	1.0	800
200	0.1	0.5	400
225	0.1	0.5	400
450	0.05	0.25	200
900	0.025	0.17	100
1200	0.020	0.075	100

## 2) 안테나 주파수(antenna frequency)

일반적으로 안테나에서 방사되는 신호의 스펙트럼은 중심 주파수와 주파수 대역에 의해 특징지어진다. 그림 8은 현재 상업적으로 사용되는 시스템의 안테나에서 방사되는 신호의 스펙트럼 형태를 나타낸다.

사용 안테나의 중심 주파수의 선택은 탐사 설계 중에서 가장 중요한 항목으로 탐사의 결과에 결정적인 영향을 미친다. 안테나 주파수의 선택에 영향을 미치는 요인들은 매우 다양하며 원론적으로는 다음의 항목들을 포함해야 되지만 실제 이러한 요인들을 모두 고려하기는 어렵다.

지반 매질의 전기적 특성(electrical properties of the host material)

공간 해상도(spatial resolution)

불연속면(체-얇은 층리, 균열, 절리등)의 크기(clutter dimension)

탐사 심도 및 대상체(물)의 크기(depth of exploration & target size)

장비의 접근 가능성(site access)

외부 간섭(external interference)

따라서 일반적인 탐사 시에는 탐사 목적, 탐사 심도 및 대상체의 크기가 우선적으로 고려된다. 사용 안테나의 주파수가 증가할수록 자료의 해상도는 증가하지만 탐사가 가능 심도가 감소하게 되는데 보통 대상체의 크기보다는 탐사심도가 우선적으로 고려된다.

보편적으로 기반암이나 파쇄대의 분포상태 등 지질학적 층서구조를 파악하기 위해서는 25-100 MHz 범위의 안테나가 사용되며 심도 2m 내외에 매설된 상하수도, 가스관 등 매설물 탐지에는 200-500 MHz, 터널의 2차 라이닝의 두께나 배면의 공동 및 콘크리트 슬래브 내부의 철근 탐지와 같은 비파괴 안전진단분야에는 500-1000 MHz(혹은 1000 MHz 이상)의 안테나가 선택적으로 혹은 병행되어 사용된다.

### 3) 송수신 안테나 간격(antenna separation)

송신안테나와 수신안테나의 간격을 말하는 것으로 동일한 탐사에서는 이 간격이 일정하게 고정되며 매설물이나 안전진단을 위한 탐사에서는 10- 50 cm사이의 값을 사용하고 깊은 심도의 탐사에서는 최소한 1m 이상의 값을 사용하는데 허용 범위 내에서 안테나의 간격이 넓어질수록 수평 반사층에 대한 탐지범위가 증가하게 된다.

안테나 사이의 간격이 너무 좁은 경우 저주파 성분이 이 신호에 혼재되어 발생(wowing 혹은 system saturation)하고 신호의 절단 현상(electronic clipping artifact)에 의해 신호의 왜곡이 발생하게 되기 때문에 간격은 최소 값 이상으로 유지되어야 한다. 식 (7)은 최적 안테나 간격(s)을 구하는 식을 나타낸다.

$$S = \frac{2 \times \text{depth}}{\sqrt{(\epsilon - 1)}} \quad (7)$$

### 4) 측정 간격(station spacing)

안테나와 송수신기를 포함한 송수신부의 이동간격을 말하며 동일한 탐사에서는 일정하게 유지된다. 지반이나 지질탐사에는 탐사성격에 따라 20- 100 cm의 값이 사용되며 매설물 탐사에서는 5- 10 cm, 안전진단 조사에서는 5 cm 이하의 값이 사용된다.

최소 이동 간격은 표 2에 나타나 있는데 이동간격이 기준 이상으로 긴 경우 공간 알리아싱(spatial aliasing) 현상을 발생시키고 너무 짧은 경우 탐사 자료의 양이 증가하기 때문에 탐사 목적과 기타 탐사 환경을 고려하여 적절한 값을 적용해야 한다.

일반적으로 이동간격은 식 (8)로 표시되는 나이퀴스트 샘플링 간격( $n_x$ )보다 낮은 값을 취해야 하는데 이 보다 큰 값이 적용되는 경우 급경사층이나 회절점으로부터의 반사 신호를 구현하는데 어려움이 따른다.

$$n_x = \frac{c}{4\sqrt{\epsilon}} = \frac{75}{\sqrt{\epsilon}} \quad (8)$$

### 5) 신호 샘플링 간격(signal sampling interval)

지하의 반사면에서 반사되어 수신되는 신호들은 수신부에서 연속적으로 기록되는 것이 아니라 일정한 시간 간격으로 단락적으로 기록되는데 이 때 신호가 기록되는 시간 간격을 샘플링 간격이라 한다. 신호 샘플링 간격이 너무 짧은 경우에는 기록되는 자료의 양이 방대해지고 너무 긴 경우에는 일정 수준 이상의 고주파 성분이 저주파 성분으로 변환되어 나타나는 알리아싱(temporal aliasing)현상이 발생하여 신호의 왜곡을 가져오기 때문에 적당한 범위의 값을 선택해야 한다. 샘플링 주파수가 나이퀴스트(nyquist) 주파수의 2배 이상일 때 왜곡되지 않은 원래 파형의 재생이 가능하다. 최대 샘플링 간격은 다음 식 (9)에 의해 구할 수 있다.

$$\text{Max. sampling time} = \frac{6F}{1000} \quad (9)$$

#### 6) 신호기록 범위(time window)

수신되는 반사파 신호가 기록되는 총 시간을 의미하며 탐사 대상물에 대한 정확한 정보를 함유한 신호가 기록될 수 있도록 정해져야 한다. 탐사 지역의 지질조건이 불확실할 경우 일반적인 범위보다 30%정도 증가시킨다. 식 (10)에 의해 개략적으로 산정할 수 있다.

$$\text{Time Window} = 1.3 \times \frac{(2 \times \text{depth})}{v} \quad (10)$$

#### 7) 탐사 축선의 위치 및 방향(survey line location)

탐사의 진행방향을 말하며 지하의 구조 및 성질에 대한 정보를 얻기 위한 탐사에서는 일반적인 물리탐사법과 같이 주향(strike)에 수직하게 방향을 설정한다. 지하의 매설물 탐사와 같이 매설물의 위치, 심도, 진행방향 등에 대한 정보를 총체적으로 얻기 위해서는 매설물의 예상 진행방향에 대해 횡방향과 종방향으로 격자형의 탐사선을 설정하는 것이 유리하다. 도면상의 탐사선 위치와 실제 현장에서의 탐사선 위치가 일치하지 않는 경우 탐사결과 자체가 무의미해지기 때문에 정확한 탐사선의 위치를 정하는 작업은 간단하면서도 매우 중요한 탐사 설계 변수로 볼 수 있다.

#### 8) 송수신 안테나의 배열 방향(antenna orientation)

일반적으로 GPR 탐사에 사용되는 안테나는 쌍극성(dipolar)을 가지며 극성을 가지고 방사되는 성질을 가진다. 안테나는 반사체의 장축이나 주향에 평행한 전기장(electric field)이 형성되도록 배열되는 것이 바람직하다. 그림 9는 다양한 송수신 안테나의 배열 방법들을 나타낸다. 대부분의 GPR 탐사에서는 PR-ED배열법이 사용되지만 다른 배열법들도 부분적으로 사용된다.

#### 9) 중합 수(number of stacks)

측정자료에서 기록되는 한 지점에서의 트레이스(trace)는 안테나로부터 한번의 에너지 방사에 의한 반사신호들이 기록되는 것이 아니라 수-수백 번의 에너지 방사에 의해 수신되는 기록들이 중합된 후 잡음들이 많이 감소된 대표적 신호로 구성된다. 중합 수는 수가 증가할 수록 신호 대 잡음비(S/N비)는 증가하나 소모되는 에너지와 시간도 함께 증가하기 때문에 탐사 목적에 따라 적정 범위의 값이 사용된다.

안전진단 분야에서는 탐사 심도도 얇고 매질이 비교적 균질하기 때문에 잡음이 수신될 가능성이 적으며 중합 수의 증가에 따라 자료의 상태가 큰 변화를 나타내지 않는다. 따라서 2-8 범위의 값을 적용해도 적절한 상태의 자료 획득이 가능하다. 매질조사에서는 보통 32-64 정도의 값이 적용되며 상대적으로 대상심도가 깊고 불균질한 매질을 대상으로 하는 지반조사분야에서는 잡음이 수신될 가능성이 크기 때문에 128이상의 값이 보편적으로 선택된다.

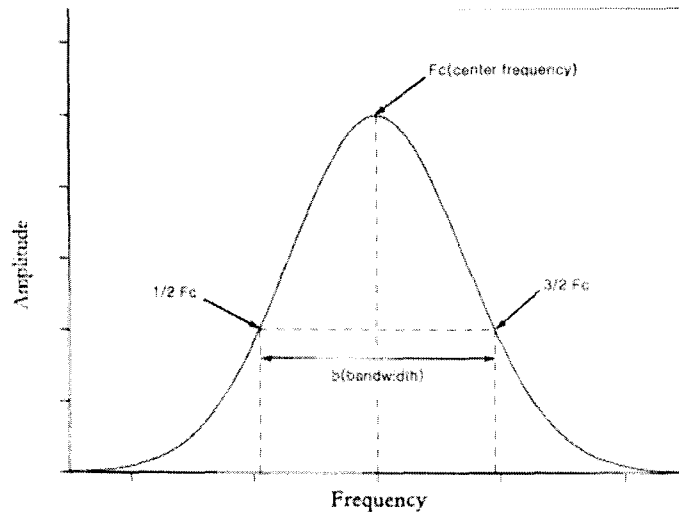


Fig. 8. Frequency spectrum of GPR waves.

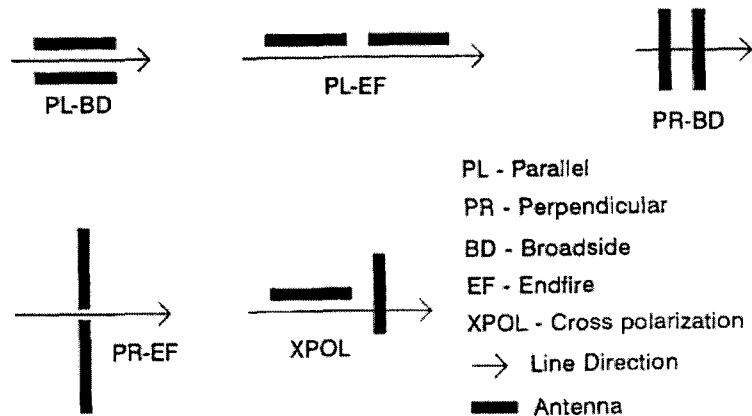


Fig. 9. GPR antenna orientations(from GPR Workshop Notes).

## 5. GPR 탐사법의 특성

GPR 탐사법은 다음과 같은 특성으로 인해 다양한 분야에서 적용이 가능하다.

### 1) 비파괴적인 조사법

안테나를 포함한 장비의 이동만으로 작업이 수행되기 때문에 비파괴적인 방법으로 주변 환경에 피해를 주지 않고 조사가 가능하다.

### 2) 광범위한 적용 범위

일반적인 탐사, 계측 및 조사 장비들이 제한된 범위에서만 적용이 가능한데 비해 GPR은 폭넓은 대역(수십 MHz- 수 GHz)의 안테나를 조사 목적에 따라 선택적으로 혹은 병행하여 사용이 가능하다. 적용 및 응용가능 분야를 다시 한 번 정리하면 다음과 같다.

지하 매설물조사 분야 : 각종 공공 시설물 및 구조물의 위치 파악

비파괴 안전진단 분야 : 터널 라이닝-배면, 포장도로, 활주로 및 각종 콘크리트 구조물의 진단

정밀 지반조사 분야 : 천부 지질 구조, 불연속면의 분포, 하상(호수) 조사 및 교각 주변 세굴 여부 등

기타분야 : 오염지역 분포파악, 고고학 유적조사, 극지방의 얼음층 두께 파악 등

### 3) 고해상도의 연속된 결과 제공

진폭이 매우 짧은 고주파 대역의 전자파를 송신원으로 사용하기 때문에 지반 조건이 양호한 경우 높은 해상도(분해능)의 지반 정보 획득이 가능하고 연속적인 지하 반사 단면 자료를 제공하며 또한 탐사의 목적에 따라 다양한 형태의 컬러 이미지의 제공이 가능하다.

### 4) 작업의 편이성

탐사에 별도의 시추공이 필요없고 송신부와 수신부를 포함한 일체의 탐사장비가 인력이나 이동장비에 의해 연속적으로 동시에 이동하면서 자료를 얻기 때문에 탄성파, 전기비저항 탐사 등 일반적인 물리 탐사법에 비해 작업이 신속하게 진행되며 도로의 경우 부분적인 교통 통제만으로 소기의 목적을 달성할 수 있다.

### 5) 작업의 경제성

다른 탐사법에 비해 처리작업이 비교적 수월하고 주변 환경이나 지형의 제약을 적게 받으며 자동차와 같은 이동장치에 설치할 경우 연속적인 탐사가 가능하므로 단시간에 넓은 지역의 탐사가 가능하다. 또한 2-3인의 적은 인원에 의해 운영 관리 및 자료처리(해석)가 가능하므로 다수의 인원이 동원되는 기타 탐사법에 비해 경제적인 면이나 시간적인 측면에서 많은 절감효과를 가져온다.

그러나 GPR은 다음과 같은 여러 특성에 따라 그 적용시에 제한을 가지게 된다.

### 1) 매질 특성에 의한 영향

GPR 탐사에서는 송신원으로 전자파를 사용하기 때문에 수신 신호의 상태 및 탐사 결과는 탐사지역을 구성하는 지반 매질의 전기 전도도나 유전상수와 같은 전기적 특성과 안테나가 접하는 지표의 상태에 의해 복합적인 영향을 받는다. 전기 전도도는 파의 감쇠에 유전상수는 전자파의 속도와 파의 감쇠 및 파장의 크기에 영향을 미친다. 유전상수와 전기전도도는 매질내 수분의 함량에 가장 큰 영향을 받기 때문에 탐사의 결과도 매질내 수분 함량에 결정적으로 좌우된다. 그밖에 안테나와 접하는 표면의 상태(균질성, 강도 등)는 직접 표면파(direct ground wave)의 강도 및 형태에 영향을 미친다. 따라서 이러한 매질의 특성이 탐사에 불리한 조건에서는 양질의 자료 획득이 매우 어렵다.

#### - 매설물 조사분야

탐사 대상 지반은 투로 도로하부로 일반적인 안테나와 접하는 상부매질은 아스팔트, 콘크리트 및 토양 등으로 구성될 수 있고 225, 450, 900 MHz 안테나가 적용될 수 있다. 이들 안테나들중 상대적으로 저주파를 사용하는 225 MHz 안테나의 경우 다른 안테나에 비해 안테나와 접하는 매질의 종류에 따른 특성을 나타낸다. 일반 토양에서는 일정 수준 이상의 탐사가 가능하나 콘크리트나 아스팔트 매질 조건에서는 매질의 상태에 따라 직접 표면파(direct groundwave)가 다중 반사파의 형태로 나타나 자료의 상태를 저하시키는 현상이 나타나는데 이는 매질의 상태와 안테나 특성간의 coupling 작용에 의해 발생하는 현상으로 판단된다.

#### - 비파괴 안전진단분야

콘크리트 구조물을 대상으로 하는 안전진단의 경우 타설 시기나 계절적 온도 요인이 탐사의 결과에 영향을 미친다. 콘크리트의 경우 타설 후 시간이 경과함에 따라 매질 공극 내부의 수분이 시멘트 입자와 결합하여 고결화되는 수화(hydration)과정이 진행된다. 이러한 수화과정은 매질 내부의 공극율과 수분 함량을 감소시켜 결과적으로 매질의 전기 전도도와 유전상수에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 수화과정은 보통 1년 이상 혹은 그 이상의 장시간에 걸쳐 진행되는 것으로 알려져 있는데 이러한 사실로 부터 타설 후 어느 정도 기간이 지난 콘크리트 매질에서 경과 시간이 상대적으로 짧은 매질에 비해 양호한 결과가 얻지는 것을 설명할 수 있다.

#### - 정밀 지반 조사분야

정밀 지반조사의 탐사 대상 매질은 탐사 목적에 따라 자연 상태의 지반, 물, 얼음 등 매우 다양하다. 지층 및 기반암 조사시 대상은 토양과 암반 등이 매우 불규칙한 상태로 이루어진 매질이다. 일반적으로 입자가 거친 석영질 모래와 사질토에서는 전기 전도도가 매우 낮지만 미세한 점토성분을 함유한 흙은 10 mS/m 이상의 값을 나타낸다. 우리나라의 경우 흙으로 구성된 상부 표층은 알지만 파의 감쇠에 직접적인 영향을 미치는 전기전도도가 높은 경우가 많기 때문에 파의 투과 심도가 이상적인 지반에 비해 얇게 나타나는 경향을 보인다. 100 MHz 안테나를 사용할 때 외국의 사례에서는 30 m 내외까지 투과 심도를 보이지만 국내의 경우 최대 15-16m 정도로 나타났다. 50 MHz 안테나를 사용할 때에는 외국의 경우 최대 50m까지 투과된 것으로 보고되고 있으나 우리나라의 경우 20 m 내외로 나타난다.

강이나 호수의 물을 대상으로 하는 하상 구조 및 교각 주변 세굴조사에서는 탐사 자료의 상태나 투과 심도는 물의 오염도 즉 물속에 함유된 전해 물질(TDS, Total Dissolved

Solids)의 정도에 영향을 받는다.

## 2) 전자파의 속도값 산정이 결과에 미치는 영향

탄성과 탐사의 경우 탐사 결과로부터 대상 매질의 P, S파 속도와 같은 고유 물성에 대한 정보를 얻을 수 있으나 GPR 탐사에서는 송신원으로 사용하는 전자파가 매질의 유전율에 따라 전파 속도가 변화하기 때문에 탐사 자료에서 매질의 속도에 대한 정보는 얻을 수가 없다. 이러한 속도값은 탐사 결과중 대상물의 반사 형태 및 심도에 영향을 미치기 때문에 속도 추정 방법 등을 이용하여 오차 범위가 적은 신뢰성 있는 값을 선정하여 적용하여야만 한다.

## 3) 외부 반사파의 영향

차폐된 안테나를 사용하는 경우에는 외부 반사파의 영향을 최소화 할 수 있으나 정밀지반조사에 주로 적용되는 차폐되지 않은 안테나는 상대적으로 저주파 대역의 전자파를 사용하기 때문에 파의 차폐가 어려우며, 차폐를 할 경우 안테나의 크기와 무게가 크게 증가되는 어려움이 있으므로 대부분 차폐되지 않은 안테나를 이용한다. 송신 안테나에서 일부 공중으로 방사된 에너지는 주변의 다양한 반사체로부터 반사되어 수신되는데 이러한 외부 반사체에는 주변 건물, 대형 전신주, 송신탑, 숲 등 다양한 대상이 포함된다. 외부 반사파는 반사체에 따라 저주파 성분에서 고주파 성분까지 다양한 주파수를 가진다. 신호와 혼재되어 나타나는 외부 반사파는 실제 지반에서 반사된 파와 유사한 형태를 가지는 경우가 많다. 따라서 공중 반사파의 가능성이 있는 지역에서는 탐사 수행시 외부 반사파를 발생시킬 가능성이 있는 반사체의 존재 및 위치에 대한 기록과 함께 해석시 이러한 외부 반사파의 영향이 반드시 고려되어야 한다. 이런 외부 반사체에 의한 영향 외에 복잡한 도심지에서 차폐된 안테나를 사용하여 탐사할 경우에도 외부로부터 특정 FM주파수 대역의 신호들이 강하게 수신되기도 한다.

# 6. 건설 현장 적용 사례

GPR의 건설현장에서의 적용분야는 크게 지하의 주요 공공 시설물을 대상으로 한 매설물 조사, 콘크리트 구조물의 비파괴 안전진단, 정밀 지반조사의 3가지로 분류 할 수 있다.

## 6.1 지하 매설물 조사 적용 사례

### 사례 1)

탐사 목적 : 설계된 고가도로의 교각 및 교대와 기존의 지하 시설물과의 간섭 여부 파악

탐사 장비 : pulseEKKO 1000

탐사 방법 및 사용 안테나 : 스텝 모드(step mode), 450 MHz

탐사 내용 및 결과

그림 10은 S시 B고가도로 건설 공사 현장에서 교각과 교대가 시공될 도로 하부에 묻혀있는 매설물을 탐지할 목적으로 실시한 탐사 결과중의 하나와 결과의 모식도를 나타낸 것이다. 도로와 보도의 하부에 화살표/검은 점으로 표시된 것과 같이 많이 많은 관들이 매설되어 있는 것을 알 수 있고 12-20 m 지점의 심도0.8-1.2 m에 나타나는 4개의 관들은 상수관



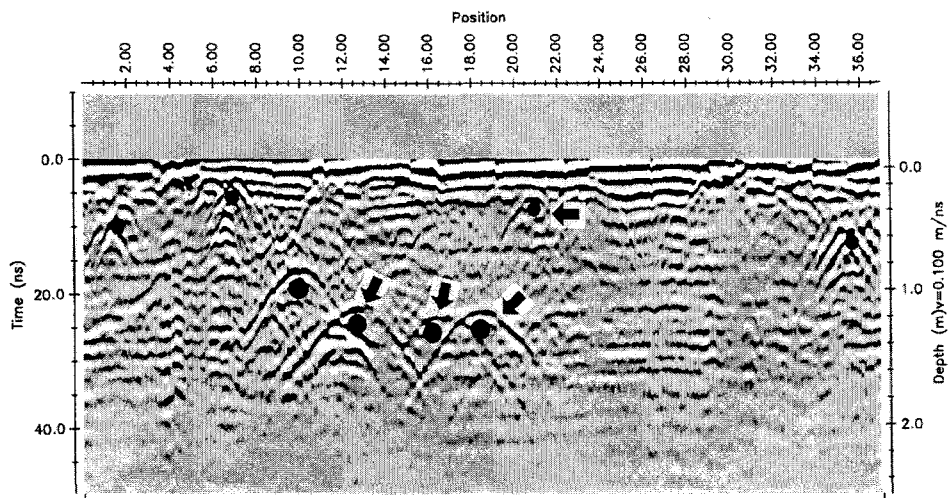


Fig. 10a. GPR survey results for underground pipes(Case 1).

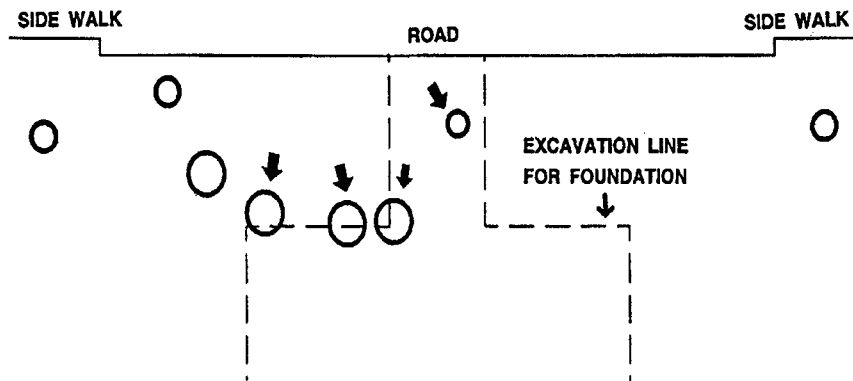


Fig. 10b. Interpretation results of GPR section in Fig. 10a.

으로 밝혀졌다. 이 중 3개의 상수관들과 22M 지점의 심도 0.3 m부근에서 나타나는 관은 교각과 교대가 설치될 지점을 통과하는 것으로 밝혀졌다. 이 지역은 주변 여건으로 인해 기존 설계에 대한 변경이 불가능하기 때문에 기존의 관들을 모두 다른 지역으로 이설한 후 굴착 공사가 이루어 졌다.

사례 2)

탐사 목적 : 설계된 지반 보강재와 기존 지하 시설물과의 간섭 여부 파악

탐사장비 : pulseEKKO 1000

탐사 방법 및 사용 안테나 : 스텝 모드, 450, 900 MHz

탐사 내용 및 결과

그림 11-(A)는 S시에 위치한 D건축현장 부지와 인접한 보도 하부에 매설된 관들의 위치를 파악하여 굴착작업 과정에서 인접 보도 하부의 보강을 위해 설계된 soil nailing의 시공시 기존 공공 시설물의 침해 및 파손 가능성 여부를 사전에 파악하고자 실시한 탐사 결과를 나타낸 것이다. 자료 분석결과 보도의 하부에는 6종류의 매설물들이 매설된 것으로 추정되었으며 총 3단으로 설계된 soil nailing중 심도 1m에 시공되는 1단은 기존의 시설물들을 손상시킬 것으로 판단되었으며 2m심도에 시공되는 2단도 기존의 시설물을 손상시킬 가능성이 큰 것으로 판단되었다. 그림 11-(B)는 탐사결과로부터 추정된 지하 시설물의 위치와 기존 설계도에 나타난 Soil Nailing의 예상 위치를 도식적으로 표시한 그림이다.

사례 3)

탐사 목적 : 기존 대형 상수관의 위치 확인 및 잘못된 도면 수정

탐사 장비 : pulseEKKO 1000

탐사 방법 및 사용 안테나 : 스텝 모드, 450, 225 MHz

탐사내용 및 결과

그림 12는 S시 T지역에서 실시한 탐사 결과이다. 탐사 축선은 기존의 매설물 도면을 바탕으로 대형 상수관의 진행 방향과 직각으로 설정하였다. 그림의 세 탐사자료에서 기준 출발점은 동일하며 탐사선간의 간격은 50m이다. 탐사결과 좌측에 심도 약1.8-2.0 m에 나타나는 A, B 대형 상수관은 기존의 도면과 같이 진행하는 것으로 파악되었으나 우측의 C, D상수관은 도면상에는 일직선으로 진행되는 것으로 표시되었으나 실제 일직선으로 진행하다 우측으로 방향이 전환되는 것으로 밝혀졌다. 탐사에서 얻어진 결과는 차후 구조물 설계 및 안전 시공의 자료로 활용되었다.

## 6.2 비파괴 안전진단 적용 사례

사례 1)

탐사 현장 : S시 O도로 터널

탐사 장비 : pulseEKKO 1000

탐사 방법 및 사용 안테나 : 스텝 모드, 450, 900 MHz

탐사 내용 및 결과

그림 13은 현재 사용중인 S시 O도로터널의 일부 구간에서 강지보재의 누락여부 및 시공

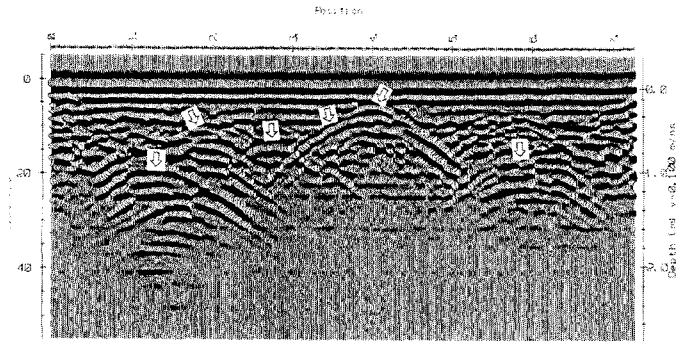


Fig. 11a. GPR survey results from buried pipelines(Case 2).

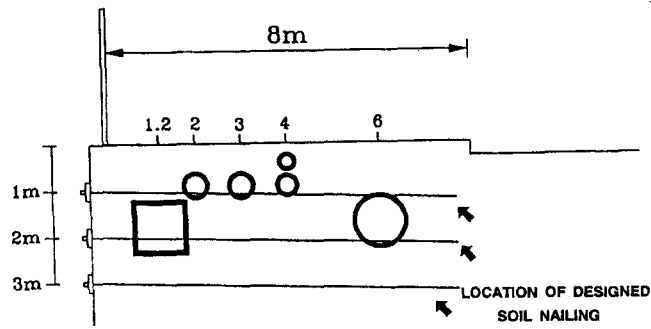


Fig. 11b. Interpretation results of GPR section in Fig. 11a

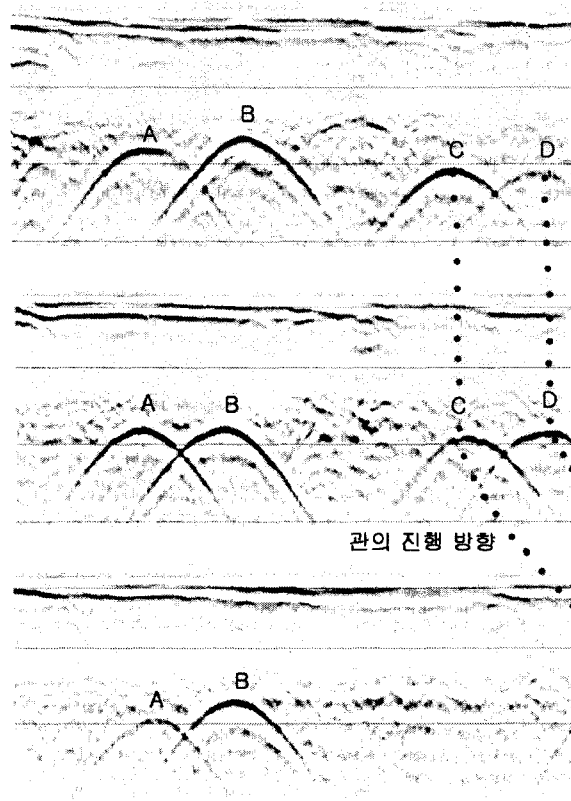


Fig. 12. GPR survey results(Case 3).

성 확인을 위해 실시한 탐사 결과의 하나로 조사구간은 ASTM공법으로 시공한 구간과 개착식 공법으로 시공한 구간이 연결되는 지점이다. 조사 결과 강지보체는 심도 약40 cm, 시공 간격은 약 1.2 m로 설계대로 잘 시공되었음을 확인할 수 있었다. 심도 약 20 cm에 나타나는 신호들은 2차 라이닝의 시공과정에서 내측과 외측 라이닝의 분리 시공 과정 중 접촉부에 삽입된 와이어 메쉬(wire mesh)에서 반사된 것으로 보이며 우측에 표시된 신호들은 개착구간에서 라이닝 내부에 설치된 철근 신호이다. 5.8 m지점의 직선으로 나타낸 부분은 ASTM공법구간과 개착식 공법 구간의 경계부로 판단된다.

사례 2)

탐사 현장 : S시, D시 2개 지역

탐사 장비 : pulseEKKO 1000

탐사 방법 및 사용 안테나 : 스텝 모드, 450, 900 MHz

탐사 내용 및 결과

GPR을 이용해서 콘크리트 내부에 시공된 철근의 배근 간격, 피복 두께(변화) 및 누락에 대한 정보 획득이 가능하다. 그림 14는 콘크리트 구조물을 대상으로 실시한 탐사 결과의 일부이다. (A)는 S시의 C현장 자료로 철근의 피복두께는 약15 cm, 배근간격은 약 60 cm로 설계대로 시공되었음을 알 수 있다. (B)는 D시의 D지역에서 얻어진 자료로 철근의 누락은 없으나 피복 두께가 매우 불규칙하게 시공되었음을 알 수 있다.

사례 3)

탐사 현장: S시 N터널

탐사 장비 : pulseEKKO 1000

탐사 방법 및 사용 안테나 : 연속 모드, 450 MHz, 900 MHz

탐사 내용 및 결과

조사 터널은 일반적인 터널과는 달리 라이닝 배면에 철판이 방수재로 삽입된 구조로 시공되었기 때문에 철판 배면에 대한 조사는 불가능하였다. 그림 15-(A)는 터널 상부에 시공된 duct부에서 실시한 천단부 라이닝에 대한 횡방향 탐사 자료를 나타낸다. 그림에서 흰 화살표로 표시한 부분이 콘크리트 라이닝과 철판사이에 존재하는 공동을 나타내는데 콘크리트와 공기층의 전자파 속도차가 크기 때문에 철판에서 반사된 신호가 왜곡되고 공동의 선단에서 발생된 회절파가 나타남을 알 수 있다. 그림 15-(B)는 아치부에서 얻어진 탐사 결과로 방수재로 시공된 철판의 결함부에 대한 정보를 제공한다. 그림에서 좌측에 표시된 두 부분은 철판의 연결이 끊어진 단락부로 추정되며 우측의 표시부는 반사 신호의 진폭(강도)과 연속성이 주변부에 비해 떨어지는 현상이 나타나는 것으로 판단할 때 철판의 상태가 양호하키 못한 즉 누수에 의한 부식의 가능성이 큰 구간으로 추정된다

### 6.3 정밀 지반조사 적용 사례

사례 1)

탐사현장 : K시 K플랜트현장

탐사목적 : 부지 하부의 광미사층 분포 파악

탐사장비 : pulseEKKO 100

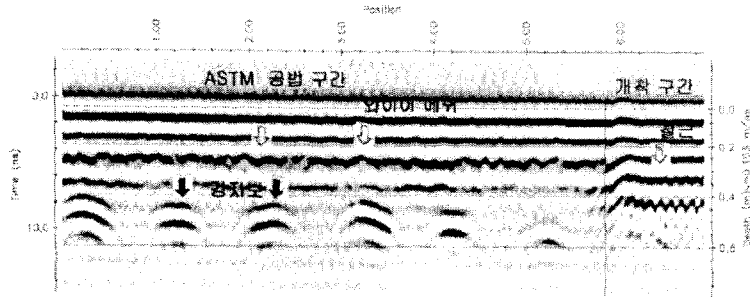


Fig. 13. GPR survey result(NDT Case 1).

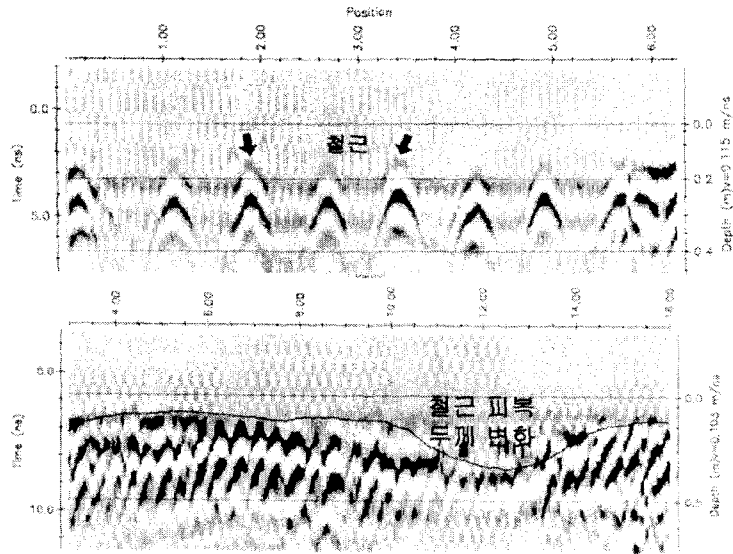


Fig. 14. GPR survey results(NDT Case 2, top-A & bottom-B).

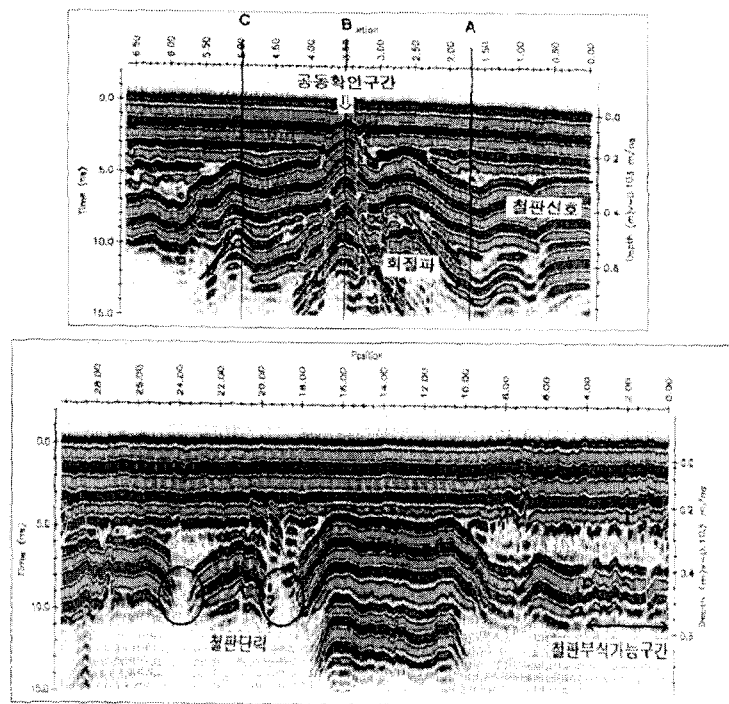


Fig. 15. GPR survey results(NDT Case 3, top-A & bottom-B).

탐사 방법 및 사용 안테나 : 단락 모드, 50 MHz

탐사 내용 및 결과

본 탐사 현장은 폐광된 금속 광산과 인접한 지역으로서 부지 하부에 다량의 광미사(mine tailing)가 분포하여 차후 공사의 진행에 문제점을 야기할 가능성을 내포하고 있었다. 이러한 광미사층의 분포에 대한 정보를 얻기 위해 50MHz 안테나를 사용하여 조사를 수행하였다. 부지 하부는 전반적으로 매립층, 광미사층, 원지반으로 구성되어 있으나 중간층인 광미사층의 경우 전기 전도도가 높은 다량의 중금속 입자를 함유하고 있기 때문에 매립층과 광미사층의 경계면에서 감쇠가 심하여 그 하부에 대한 반사 신호는 얻기 힘들었다. 그림 16-(A)는 탐사 결과 자료들 중의 하나로서 실선은 상부 매립층과 그 하부의 광미사층의 경계면으로 판단된다. 그림 16-(B)는 탐사 결과를 바탕으로 추정된 광미사층의 상부 면의 분포를 나타낸다.

사례 2)

탐사 현장: 강원도 H암반 사면

탐사 장비 : pulseEKKO 1000

탐사 목적 : 그라우팅재 과다 주입 원인 규명

탐사 방법 및 사용 안테나 : 단락 모드, 225 MHz

탐사 내용 및 결과

그림 17-(A)는 H 대절토 암반사면(rock slope)중 Soil Nailing공법으로 보강한 구간에서 실시한 탐사 결과이며 그림 17-(B)는 탐사에서 얻어진 결과를 도식적으로 나타낸 것이다. 탐사에는 차폐된 225 MHz안테나를 이용하였다. 탐사는 보강구간중 특정 3개 지점에서 다른 지점에 비해 그라우팅재의 주입량이 수십배로 과다 주입되는 현상이 발생하여 그 원인을 규명하기 위해 지표 지질조사와 병행하여 실시하였다. 탐사자료와 지표지질조사 자료의 분석 결과 그라우팅재의 과다주입이 발생한 지점의 직하부 2m부근에서 3개 절리군(joint sets)의 교차에 의해 암반내에 파쇄대(fracture zone)및 교차 틈새가 형성되었고 이 공간을 통해 그라우팅재가 사면 안쪽 방향으로 과다 주입된 것으로 판단되었다.

사례 3)

탐사현장 : 남한강 I교량 하부

탐사목적 : 강 하상구조 및 세굴 조사

탐사장비 : pulseEKKO IV

탐사방법 및 사용 안테나 : 연속모드, 100, 200 MHz

탐사 내용 및 결과

그림 18은 남한강을 가로지르는 영동고속도로상의 I교량하부에서 하상구조 파악 및 강물의 흐름에 따른 교각 주변 하부 토사의 세굴 여부를 알아보기 위해 실시한 탐사 결과이다. 그림 18-(A)는 강을 횡단하며 200 MHz안테나를 사용하여 탐사한 결과로 토사의 퇴적에 의해 형성된 강 하부의 지형구조를 잘 보여주고 있다. 유속이 가장 빠른 강 중심부의 심도가 가장 깊음을 알 수 있다. 그림 18-(B)는 유속이 빠른 강 중심부에 위치한 교각의 주변을 대상으로 탐사한 결과 자료로 교각 하부 토사의 세굴(scouring)현상을 잘 보여주고 있는데 화살표는 세굴에 의해 교각 하류 쪽에 쌓인 토사로 판단된다.

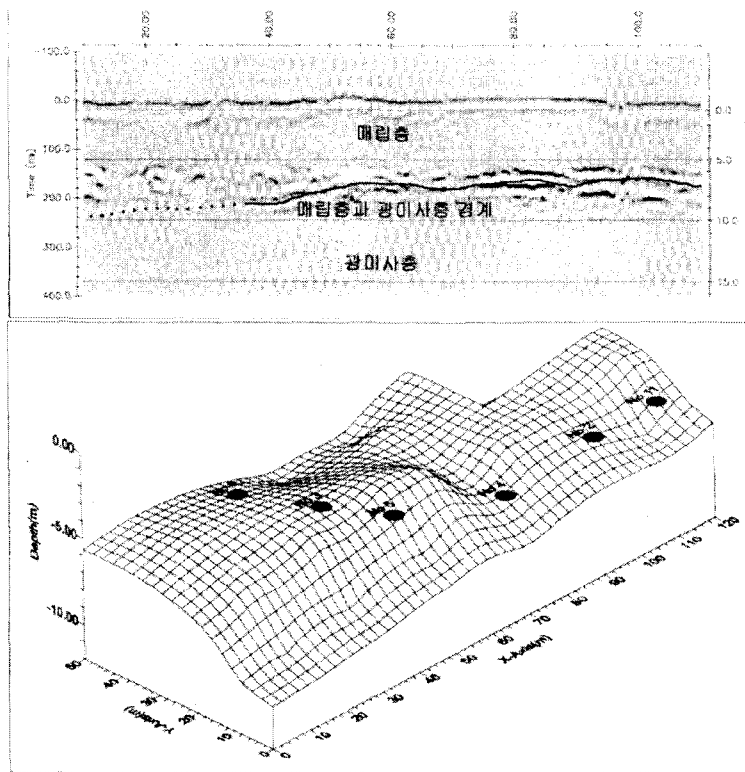


Fig. 16. GPR survey results(Geotechnical survey Case 1, top-A & bottom-B).

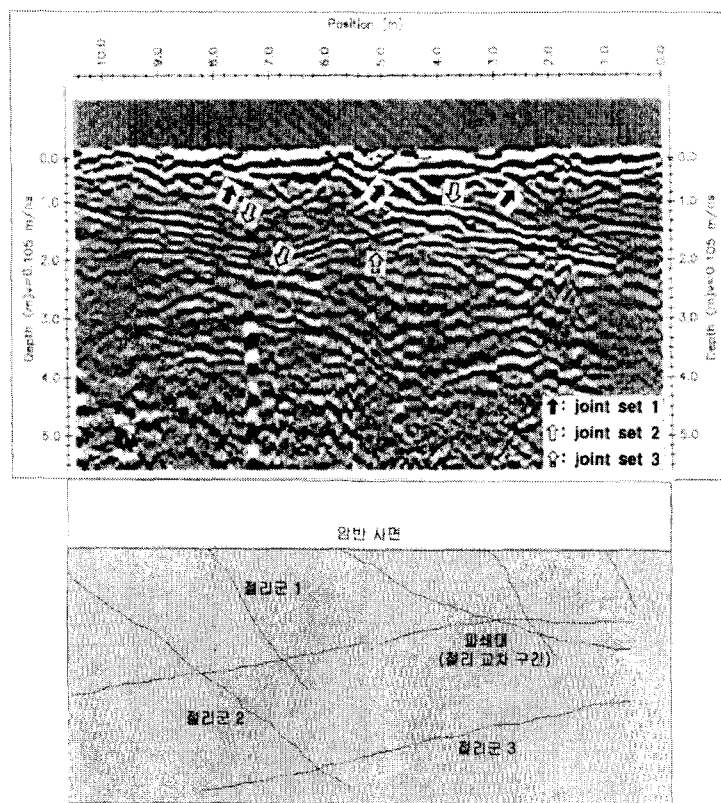


Fig. 17. GPR survey results(Geotechnical survey Case 2, top-A & bottom-B).

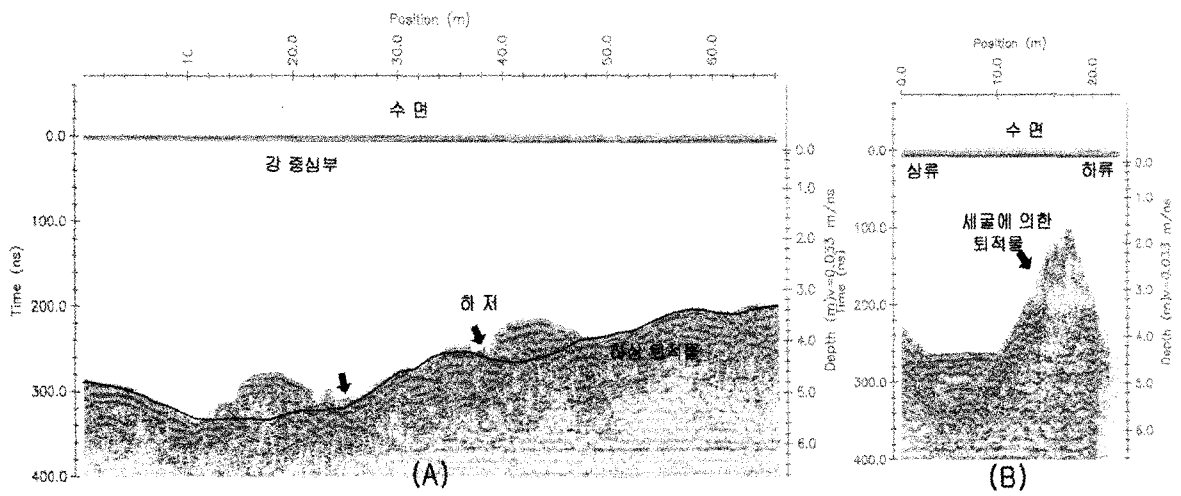


Fig. 18. GPR Survey Results (Geotechnical Survey Case 3)



## 7. 결론 및 토의

건설 관련 분야중 정보화 시공 및 안전 진단분야에서 다양한 현장 적용 사례의 분석을 통해 GPR 기술은 다양한 적용 범위와 고 해상도의 자료 제공 그리고 다른 탐사법에 비해 현장 작업의 편의성과 경제성의 제공에 의한 효과를 확인할 수 있었으며 여러 사례의 분석 결과와 GPR 기술의 전망을 요약하면 다음과 같다.

1) GPR의 적용 범위와 탐사 목적에 따라 서로 다른 주파수의 안테나가 선택적으로 혹은 병행되어 사용된다. 실제 안테나의 선택시 고려되는 요소들은 매우다양하지만 현실적으로 이 요소들을 모두 고려하기는 어렵기 때문에 일반적으로 기반암,파쇄대 분포, 층서 구조 및 가상 구조, 세굴 조사와 같은 천부 정밀 지반 조사분야에서는 25-200 MHz 범위의 안테나가 사용된다. 그리고 심도 2m내외의 반사체를 파악하는 매설물 조사분야에는 200-500 MHz의 안테나가, 터널 라이닝과 배면에 대한 비파괴 안전진단분야에서는 500-수천MHz 범위의 안테나가 적용된다.

2) GPR 탐사에서 송신원으로 사용되는 전자파는 물리적인 충격에 의해 발생하는 탄성과와는 달리 매질의 전기적 특성에 절대적인 영향을 받는다. 심한 전자파의 감쇠와 분산을 발생시키는 큰 함수비나 전기 전도도를 갖는 매질 조건과 도심과 같이 주변에 각종 전도성 물체가 많거나 전자파를 발생시키는 시설물이 존재하는 조건에서는 원하는 자료의 획득에 한계가 있다.

3) GPR의 여러 적용분야중 안전진단분야에서는 비교적 균질한 매질을 대상으로 하기 때문에 다양한 조건하에서 얻어진 자료에 대한 비교 분석을 통해 매질의 함수비나 균질성에 대한 상대적인 정성적 정보의 획득이 가능하다.

4) 송신 안테나에서 일부 공중으로 방사된 에너지는 주변의 다양한 반사체로부터 반사되어 수신되는데 이러한 외부 반사체에는 주변 건물, 대형 전신주, 송신탑, 숲 등 다양한 대상이 포함된다. 공중 반사파는 반사체에 따라 저주파 성분에서 고주파 성분까지 다양한 주파수를 가진다. 신호와 혼재되어 나타나는 외부 반사파는 실제 지반에서 반사된 파와 유사한 형태를 가지는 경우가 많다 따라서 차폐되지 않은 안테나를 사용하여 공중 반사파의 가능성이 있는 지역에서는 탐사 수행시 외부 반사파를 발생시킬 가능성이 있는 반사체의 존재 및 위치에 대한 기록과 함께 해석시 이러한 외부 반사파의 영향이 반드시 고려되어야 한다.

5) GPR 탐사에서는 송신원으로 사용하는 전자파가 매질의 유전상수에 따라 전파 속도가 변하기 때문에 탐사 자료에서 매질의 속도에 대한 정보는 얻을 수가 없다. 이러한 속도값은 탐사 결과중 대상물의 반사 형태와 심도에 영향을 미치기 때문에 신뢰성있는 결과를 얻기 위해서는 가능한 한 앞에서 언급한 CMP법, 회절 근사법 및 직접 조사법을 통해 얻어진 속도 값과 추정에 따른 오차 범위와 안전율이 함께 고려되는 것이 바람직하다.

6) GPR 탐사에서 얻어지는 결과들은 유전상수에 의한 속도와 반사체의 상부 형태에 따라 반사 패턴이 결정되기 때문에 반사면에 대한 정량적인 정보를 얻기가 매우 난해하다. 따라

서 지반조사분야에서는 반사면에 대한 규명과 확인을 위해 지질조사 및 시추자료가 활용되거나 기타 지반 탐사에서 얻어지는 자료와의 상호 검증 과정이 병행되어야 좀 더 정확하고 정량적인 정보의 획득이 가능하다. 매설물 조사나 안전진단에서는 반사 형태상 실제의 모양이 왜곡되어 나타나기 때문에 기존의 도면이나 설계 도면 등이 해석에 보조자료로 이용되어야 조사 결과의 신뢰성을 향상시킬 수 있다.

7) 국내에 GPR 기술이 소개된 이후 현재는 약 20여대 이상의 시스템이 도입되어 건설분야를 중심으로 적용되고 있다. 앞에서 언급한 여러 제한적인 요인에도 불구하고 GPR 기술은 다른 탐사법이나 검사법에 비해 많은 장점을 가지고 있고, 특히 비파괴 안전 진단분야에서의 적용성이 뛰어나기 때문에 앞으로 안전 진단분야를 중심으로 현장 적용 및 응용 범위가 꾸준히 증가할 것으로 판단된다.

8) GPR 탐사법은 비파괴적인 방법으로 탐사가 수행되기 때문에 탐사 결과에 대한 확인 과정이 불가능하며 매질의 조건에 따라 다양한 결과를 나타낸다. 따라서 기술의 적용성과 결과의 정확성 및 신뢰성을 높이기 위해서는 단순한 장비의 양적 증가보다는 정량적으로 결과를 얻을 수 있는 자료의 처리 해석 기법 개발, 기존의 현장 자료와 모델링에 의한 시뮬레이션 실험 결과와의 비교 검증 등 기술적 부문에 많은 연구와 투자가 필요하리라고 사료된다.

#### 참고 문헌

1. 설순지, 권형석, 서정희. (1996), 레이더 탐사의 지표에너지 방사 특성에 관한 연구, 한국자원공학회 제 66회 논문 발표집, pp.243-246.
2. 신성렬, 조철현.(199s), GPR에 의한 파이프형 매설물의 심도 및 직경 탐지연구, 한국자원공학회 추계 학술 발표
3. 민경덕, 서정희, 권병두. (1980), 응용지구 물리학, 우성문화사, pp.243- 287.
4. 변중무. (1993)1시추공 레이더 탐사자료의 자료처리에 관한 연구, 서울대학교 대학원 공학석사학위 논문, pp.7-51.
5. 배성호, 김학수, 윤운상, (1996),1지반공학과 구조물 진단분야에서의 GPR 기술 응용, 한국지반공학회지, 제12권 제 4호, pp.179-193.
6. 한국자원연구소, (1992), Radar 단층촬영법에 의한 석재 재질 평가 연구, PP 4-43.
7. A.P.Annan et al.,(1975), The Electromagnetic Response of a Low-Loss, 2-Layer, Dielectric Earth for Horizontal Electric Dipole Excitation, Geophysics, Vol. 40, No. 2, pp. 285-298.
8. A.P.Annan, S.W.Cosway, (1992), Ground Penetrating Radar Survey Design, Proceeding of the Symposium on the Application of Geophysicist to Engineering and Environmental Problems, pp.329-352.
9. A.P.Annan, SW.Cosway, (1994), GPR Frequency Selection, 4th International Conference on Ground Penetrating Rradar, pp.747-752.
10. Glen S Smith,(1984), Directive Properties of Antennas for Transmission into a Material Half-Space, IEEE Trans. Antennas Propagation. AP-32, pp.232-246.

11. I.J.Padaratz, M.S.A.Hardy & M.C.Forde,(1997), Coupling Effects of Radar Antenna on Concrete, Non-Destructive Testing in Civil Engineering, pp.237-243.
12. J.L.Davis,, A.P.Annan,(1989), Ground Penetrating Radar for High Resolution Mapping of Soil and Rock Stratigraphy, Geophysical Prospecting. pp.531-551.
13. P.Shaw. A.Xu, (1997), High Energy Radiography and Radar Application to Concrete Inspection, Non-Destructive Testing in Civil Engineering, pp.97-100.
14. Satoshi Maekawa, J.F.Thomas, (1994) Study of Cavity Estimation Behind Concrete Tunnel Lining Using GPR, 4th International Conference on Ground Penetrating Radar pp.895-905.
15. Seong-Ho Bae, Hak-Soo Kim, Woon-Sang, Yoon, Case Studies on The Application of Ground Penetrating Radar Technology in Detection of Underground Utilities and Structure Safety Diagnosis, 6th Int'l Conference on Ground Penetrating Radar, pp.467-472.
16. The Finnish Geotechnical Society,(1992), Ground Penetrating Radar. PP7-16.
17. Ground Penetrating Radar Workshop Notes
18. .pulseEKKO User' Guide ver.4.2