

## 지하레이더탐사기(GPR)를 이용한 콘크리트 구조물의 안전 진단 사례

- Structural Condition Assessment of Reinforced  
Concrete Structures Using GPR -



김영익\*

### 1. 머리말

시설물의 안전 진단시 콘크리트 구조물의 건전도 상태를 조사하기 위한 방법으로 최근 다양한 비파괴 검사법이 활용되고 있다. 주요 부재의 배근 상태 조사와 해안 지역 염해가 우려되는 구조물의 경우에 있어 피복 두께 조사 등을 위한 비파괴 검사법으로 지하레이더 탐사법이 많이 활용되고 있으며, 이 방법은 특히 터널 라이닝 콘크리트의 두께, 보강재 설치 상태 및 위치뿐만 아니라 배면 공동 상태 조사 등을 위해 매우 활발하게 활용되고 있다.

교량이나 터널 진단의 경우 교통 통제 등의 이유로 탐사 시간이 제한되어 있어 신속한 탐사가 가능한 비파괴 검사법이 요구되고 있어 사전 준비가 간단하고, 안테나의 접합 상태에 큰 영향을 받지 않으며, 연속 탐사가 가능하여 탐사 속도가 빠른 레이더 탐사법의 적용이 더욱 확대되고 있다.

\* 정회원, 시설안전기술공단 기술개발지원실장

본고에서는 지하레이더탐사법의 원리와 활용 현황을 소개하고 시설물의 안전 진단에 활용한 사례를 기술하였다.

### 2. GPR 탐사법의 원리와 현황

지하레이더탐사법(GPR)은 매질 내부의 구조를 밝히기 위하여 개발된 전자기파 반사법(Electromagnetic Sounding) 기술로서 당초 빙하 지대의 얼음층 두께 조사를 목적으로 개발되었으나, 현재는 급속한 전자 기술의 발달에 힘입어 응용 범위가 구조물 비파괴 조사에까지 확대되고 있다.

#### 2.1 원리

GPR 탐사법은 지상에서 전자기파를 매질 속으로 전파시켜 반사를 일으키는 반사체까지의 심도를 밝히고, 반사파의 모양이나 산란 등을 분석하여 전파 매질의 특징이나 구조를 밝히는 것이다.

주파수 MHz ~ GHz 대역의 전자파를 임의의 매질

속으로 방사시키면, 주매질(host material)과 다른 전자기적 성질을 가진 물체(반사체)의 표면에서 전자파가 반사되어 되돌아오게 된다. 이러한 반사파를 수신하여 반사 에너지의 크기와 반사파의 전파 시간을 기록하면, 반사가 발생한 곳의 위치 및 심도 등 매질 내부의 정보를 얻을 수 있다. 이것이 가장 기초적인 GPR 탐사의 원리이다.

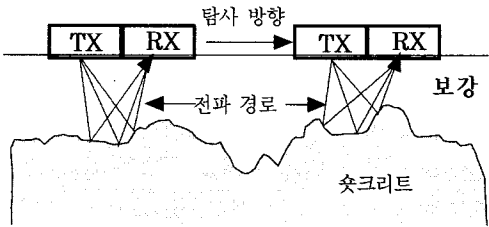


그림 1. 터널라이닝 탐사 모식도

### 2.1.1 반사체의 심도

반사체의 심도는 전자파가 매질 내를 전파하는 속도를 이용하여 계산해낸다.

전자파를 반사시키는 반사체는 매질 속에 존재하는 전자기적 이상체(지중 매설관, 콘크리트 속에 시공되어 있는 철근, 지층의 경계면 등)이며, 이상체의 표면에서 반사하는 전자파가 수신 안테나로 도달하는 시간(t)과 매질 내의 전파 속도(V)를 이용하면 이상체까지의 위치(심도)를 알 수 있다.

$$d(\text{depth}) = \frac{t}{2} \times V$$

### 2.1.2 전파 속도

전파 속도는 매질의 전자기적인 특성인, 상대 유전율과 상대 투자율에 따라 달라진다. 강자성체를 제외한 일반적인 매질의 상대 투자율은 거의 1에 가깝지만, 상대 유전율( $\epsilon_r$ )은 1~80까지 매우 다양하기 때문에 매질의 유전율이 속도에 가장 큰 영향을 끼친다 (<<표 1>> 참조). 따라서 전파 속도 V는 최종적으로 다음과 같이 쓸 수 있다(Lytle & Lager, 1976).

$$V \approx \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

c : 0.3 m/ns(빛의 속도)

이 중 속도에 절대적 변수인 상대 유전율은 매질의 함유량과 공극률에 따라 달라지며, 동시에 사용되는 주파수에 따라서도 달라지게 된다.

표 1. 매질의 상대 유전율과 전파 속도

매 질	상대유전율 ( $\epsilon_r$ )	전파 속도 (V, m/ns)
공기	1	0.3
담수	81	0.033
염수	81	0.01
건조모래	3~5	0.15
습윤모래	20~30	0.06
석회	4~8	0.12
실트	5~15	0.09
점토	5~30	0.07
실트	5~40	0.06
화강암	4~6	0.13
알루미늄	5~6	0.13

### 2.1.3 탐사 설계

탐사를 수행하기 전에 GPR 탐사의 목적을 성공적으로 달성하기 위해 필요한 몇 가지 사항을 결정해야 하는 과정이다. 이 과정에서 결정할 사항들은 다음과 같다.

#### (1) 사용 주파수

GPR 탐사에 사용되는 주파수를 결정하는 것은 그리 간단한 문제가 아니다. 이는 주파수에 관련하여 투과 심도와 분해능이 서로 반비례 관계에 있기 때문이다. 저주파수일수록 투과 심도는 깊어지지만 분해능은 낮아진다.

#### (2) 탐사 지속 시간

탐사 지속 시간은 반사파가 기록되는 제한 시간이므로 탐사 대상 매질 내의 전파 속도와 관련하여 탐사 심도를 결정한다. 탐사 심도는 목적 심도의 30% 가량을 더해서 결정하는 것이 탐사에 소요되는 시간과 처리해야 할 획득 자료의 양을 감안할 때 적절하다고 할 수 있다.

#### (3) 샘플링 간격

원래의 아날로그 신호를 왜곡하지 않고 기록, 재생하기 위해서는 가장 큰 주파수의 1사이클당 적어도 2개 이상의 샘플을 취해야만 아날로그 신호를 정보의 유실 없이 기록, 재생할 수 있다. 샘플링 간격은 짧을수록 연속적인 아날로그 신호를 원래에 가깝게 재생할 수 있으나, 너무 짧은 샘플링 간격은 자료의 양을 증

가시킴으로 자료 획득과 처리에 소요되는 시간이 길어진다.

(4) 측정 간격

측점 간격을 결정하는 기준은 공간 나이퀴스트 샘플링 간격(Spatial Nyquist Sampling Interval)이다. 탐사 수행시 측정 간격이 공간 나이퀴스트 샘플링 간격보다 크면 획득된 자료는 기울어진 반사체나 임의의 회절 신호를 표현해 주지 못하게 되므로, 반드시 공간 나이퀴스트 샘플링 간격보다 작은 측정 간격을 선택해야 한다.

(5) 안테나 간격

탐사시 넓은 안테나 간격을 채택할수록 탐사 획득 자료의 수직 분해능은 낮아지게 된다. 적절한 안테나 간격을 채택하면 안테나의 전자파 방사 특성에 따라 전자파 에너지를 반사체에 집중시킬 수 있어 탐지 가능성이 더 높아지는 데 있다. 적절한 안테나 간격은 다음 식에 의해 결정할 수 있다.

$$\text{안테나 간격} = \frac{2 \times \text{목적심도}}{\sqrt{\epsilon_r - 1}}$$

만약 주매질의 상대 유전율을 알지 못할 때에는 목적 심도의 20%를 안테나 간격으로 결정할 수 있다.

(6) 탐사 축선

GPR 탐사는 축선 하부 수직 단면에 대한 정보를 제공하므로 탐사 목적물의 방향, 경사, 크기 등에 대한 정보를 몇 개의 축선만으로 알 수 없다. 그러므로 탐사를 수행하기 위한 탐사 축선의 방향과 위치는 탐사 목적에 따라 적절히 설정해 주어야 한다.

2.1.4 GPR 탐사의 한계

GPR 탐사법은 현존하는 물리 탐사법 중 가장 높은 분해능을 가지고 있지만, 몇몇 한계점도 가지고 있다. 이 한계점들은 주로 매질 특성에 따른 전자파의 투과 심도와 잡음 요인들에 의한 분해능의 저하에 관계되는 것으로, 이를 열거하면 다음과 같다.

첫째, 탐사 심도를 증대시키기 위해 저주파수의 안테나를 사용하면 분해능이 감소한다.

둘째, 감쇠 현상에 따른 투과 심도의 저하이다.

셋째, 탐사 매질의 불균질에 따른 잡음 성분이다.

2.2 국내·외 현황

최초의 GPR 탐사 개념은 1937년 Melton이 제안하였고, 다시 1953년 Donaldson에 의해 제안되었지만 이론적 제안을 뒷받침할 만한 장비가 동시에 개발되지 못하였기 때문에 실제로 GPR 시스템이 처음 사용된 것은 1974년 Lerner가 지하의 터널을 탐지할 때였으며, 이 시스템의 명칭은 'Geodar System'이다. 1976년 Young과 Caldecott는 지중 매설 파이프 탐지를 위하여 상기의 시스템을 발전, 개선시킨 시스템을 개발하였으며, 그 이후에 OYO(일본), GSSI(미국) 등 몇몇 기업에서 상용 시스템을 개발, 판매하였다. 이들 시스템의 가장 중요한 발전은 Geodar System에서는 하나의 안테나가 펄스(pulse)의 송·수신을 담당하던 것을 교차 쌍극자 안테나(crossed-dipole antenna)로 만들고, 펄스의 송·수신 안테나를 분리한 것이다. 이에 따라 지중에서 발생되는 회절 신호들을 더욱 잘 수신할 수 있게 되었다. 그 이후에 GPR 탐사의 적용성 연구가 많은 사람들에게 의해 이루어졌으며, 보고된 주요한 사례는 다음과 같다.

- 얼음층(바다 얼음, 호수 얼음)의 두께 조사 및 호수 바닥 심도 조사(Sisky, 1981)
- 동결도 내 얼음층 조사(Annan, 1976)
- 석탄층 두께 조사(Houck, 1985)
- 단층 조사, 지하 공동 조사(Cook, 1982)
- 두께 및 구조 탐사(Ulriksen, 1980)
- 도로포장층 하부의 공동 탐사(Austin, 1983)
- 지중 매설물(금속, 비금속) 탐사 등

국내의 경우 1990년대 이후 GPR 탐사가 사용되기 시작하였고, 주로 시설물의 안전 진단 분야에서 터널 라이닝(두께, 지보재 위치 및 라이닝 배면 공동) 조사, 콘크리트 구조물 내의 철근 탐사, 지중 매설물 탐사 등에 사용되고 있다.

상용화되어 있는 장비들 중 현재 국내에서 많이 도입되어 사용되고 있는 대표적인 종합 시스템은 펄스 EKKO 시스템(캐나다, Sensors & Software社), SIR 시스템(미국, Geophysical Survey System社) 및 RAMAC 시스템(스웨덴, Mala社)이다. 이들 각 시스템은 다소간의 특징 차이가 있으나, 앞 절에서 언급한 바와 같이 기본적인 구성 및 기능은 다르지 않다.

또한 종합 시스템은 수십 MHz ~ 수 GHz 대역의

안테나를 제어하므로 전체 부피가 크고 중량이 무거워 현장에서 장비 운용에 불리한 점이 많기 때문에, 철근이나 매설물 등을 탐사 대상으로 송신 주파수가 고정되어 있고, 비교적 작고 가벼워 1인에 의해 현장 운용이 가능한 GPR 장비로 상용화되어 있으며, 현재 국내에서도 많이 사용되고 있다.

① RC-Radar

콘크리트 구조물 내의 철근 탐지를 주목적으로 설계, 제작된 RC-Radar는 주로 구조물 속의 철근을 탐지하기 위해 중심 주파수 1 GHz 이상의 안테나를 채택하고 있다. 따라서 탐사 가능 심도는 일반 콘크리트 매질에서 약 25 cm 내외이다.

② IRON-SEEKER(일본, KOMATSU社)

RC-Radar와 마찬가지로 철근을 탐사 대상으로 설계, 제작되었다. 그러나, RC-Radar가 한 종류의 안테나를 제공하는 것과는 달리 측정 가능 심도가 다른 2개 안테나를 제공하여 최대 75 cm의 탐사 심도를 확보하고 있다. 따라서 철근 조사 이외의 목적으로도 사용이 가능하므로 콘크리트 구조물의 비파괴 조사용으로 사용될 수 있다.

③ KSD-8(일본, KODEN社)

중심 주파수 300 MHz를 채택하여 지하 3 m까지를 주탐사 심도로 한다. 그러므로 지하 매설물을 주된 탐사 대상으로 설계, 제작되었다. 주된 장점은 다중 윈도우 기능이 있어 몇 개 축선 상의 획득 자료를 한 화면으로 만들어 매설관의 연속성을 찾기에 편리하도록 한 것이다. 단점으로는 바위가 달려있으므로 탐사 표면이 거친 곳에서는 운용이 곤란하다.

④ 그외 시스템

주로 교량 상판이나 도로포장층을 검사하기 위해 제작된 시스템들로서 ROAD RADAR(일본, Road Radar社), IRIS 시스템(미국, Pentradar社) 등이 있다. 이들의 주된 특징은 Horn 안테나를 사용하며, 차량에 부착하여 빠른 시간 내에 최대한 많은 탐사를 실시할 수 있도록 제작된 것이다.

3. 콘크리트 구조물 비파괴 검사 사례

3.1 교량 상판 저면 철근 배근 상태 검사

본 사례는 대구에 위치한 ○○고교 교 상판 하부에서 탐사한 GPR 탐사 자료로 철근의 배근 상태와 피복 두께를 조사하기 위하여 실시하였다. 대상 교량의 경우 콘크리트면에 거북등 모양의 균열이 다량 발생되어 있으며, 철근 탐사용 RC-Radar로 탐사하였으나 철근 피복 두께가 두꺼워 탐사 결과의 신뢰도가 낮아 탐사 변수 조정이 가능한 펄스 EKKO 장비를 사용하여 탐사하였다. 탐사 결과, 철근 간격은 20 cm이었으며, 철근 피복 두께는 13 cm인 것으로 조사되었다.

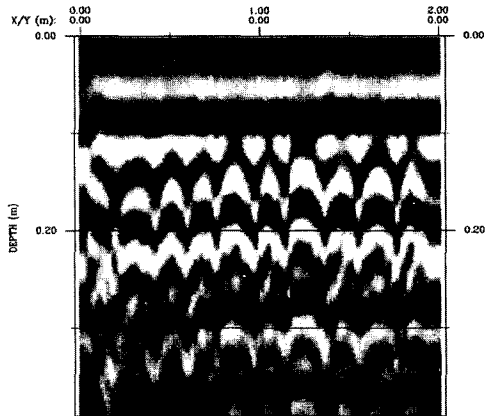


그림 2. 철근 배근 상태 및 피복 두께

3.2 교량 상판 조사

본 탐사의 대상 교량은 한강 상교량으로써 교량 상판의 아스팔트 두께, 아스팔트의 접합 상태, 슬래브 철근 배근 및 피복 두께 등을 조사하기 위하여 GPR 탐사를 실시하였다. 탐사 결과 아스팔트 포장층의 두께는 7 cm이며 탐사 축선 4~12 m에서는 7~10 cm인 것으로 조사되었다. 이는 축선 4~12 m 사이 하부 콘크리트의 두께가 최대 3 cm 얇다는 것을 의미한다. 콘크리트 내부에 시공되어 있는 철근의 피복 두께는 축선 0 m 지점에서는 14 cm였으며 축선 13 m 지점에서는 25 cm로 조사되어 철근의 시공 상태가 양호하지 못함을 알 수 있었다. 교량 상판의 전체적인 시공 상태를 조사하기 위해 축선 길이를 20 m로 설정하여 탐사한 자료이므로 본 탐사 자료에서는 철근의 배근 간격을 알기 곤란하므로 철근의 배근 간격을 조사하기 위해서는 축선 길이를 1~2 m 정도로 짧게 하여 조사해야 한다.

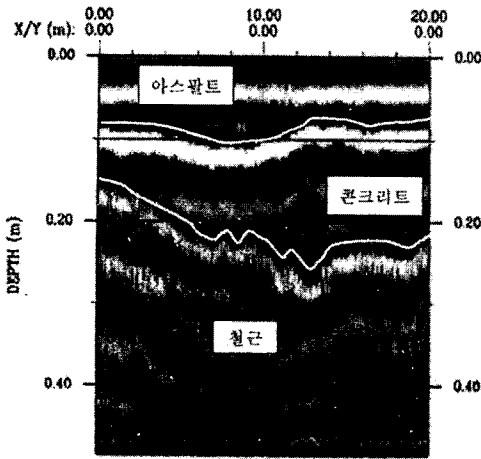


그림 3. 교량 상판 탐사

### 3.3 터널 라이닝 건전도 검사

콘크리트 라이닝은 일반적인 터널 시공에 가장 많이 이용되는 보강의 형태이며, 터널 라이닝 탐사시 일반적으로 적용되는 탐사 변수는 다음의 <표 2>와 같다. 그러나, 탐사 설계자가 탐사하고자 하는 대상체와 목적에 따라 적절히 선택하여야 한다.

표 2. 탐사 변수

탐사 변수	안테나 주파수	탐사 지속 시간	표본화 간격	중합	탐사 간격
결정값	450 MHz	40 ns	2 ps	2	3 cm

#### □ 사례 1 : 보강 라이닝(방수 시트) 시공 터널

본 사례는 강원도에 위치하고 있는 영동고속도로 상의 도로 터널로서 60 cm의 라이닝 시공 후 내구성을 증진시키기 위하여 방수지와 30 cm의 보강 라이닝을 추가로 시공하였다. 본 탐사의 목적은 터널 정밀 안전 진단을 위해 터널 라이닝의 상태를 평가하기 위하여 GPR 탐사를 실시하였다.

탐사 수행시 고주파 잡음 성분의 혼입과 전자파가 보강 라이닝 구간에서 심한 감쇠를 일으켜 원 라이닝 배면 상태는 확인이 어려웠으나, 원 라이닝의 두께와 보강 라이닝의 두께는 대부분의 구간에서 확인이 가능하였다.

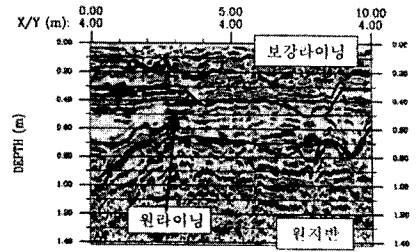


그림 4. 라이닝 두께 탐사

#### □ 사례 2 : 보강 라이닝(골합석) 시공 터널

다음 사례는 경상남도에 위치하고 있는 2차선 도로 터널로서 기존 라이닝을 보강하고 방수를 위해 골합석을 기존 라이닝과 보강 라이닝 사이에 설치한 후 보강 라이닝을 설치한 터널이다. 이 골합석은 금속 재료로 전자파의 반사 강도가 크고 전자파의 투과가 어렵기 때문에 보강 라이닝의 두께와 배면 공동의 조사는 가능하였으나 기존 라이닝의 두께와 강지보 위치 등의 조사는 곤란하였다. 사용한 탐사변수는 주파수 450 MHz, 탐사 지속 시간 40 ns, 표본화 간격 2 ps, 중합 2, 탐사 간격 3 cm를 사용하였으며, 탐사 결과는 <그림 5>에서 볼 수 있는 바와 같이 골합석에 의한 보강 라이닝 경계면이 확연히 조사되었다.

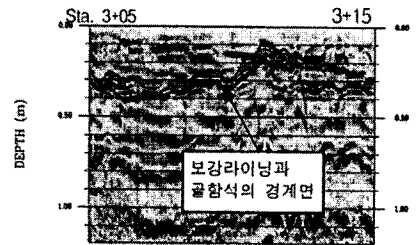


그림 5. 골합석 보강 라이닝 탐사

#### □ 사례 3 : 벽돌 라이닝 터널

본 사례는 경상남도에 위치하고 있는 적벽돌 라이닝 시공 철도 터널로서, 라이닝의 표면이 콘크리트 라이닝에 비하여 요철이 심해 획득된 자료의 상태가 불량한 편이다. 또한 벽돌을 몰탈을 이용하여 시공하였

어도 물성이 다른 연속면이기 때문에 적벽돌과 적벽돌 사이의 단락된 곳에서 포물선의 반사 신호가 발생하게 되고 이렇게 발생한 신호들이 주위에 기록된 다른 신호들에게 많은 영향을 주기 때문에 분석하기가 매우 어려웠다.

〈그림 7〉의 탐사 자료는 강원도 강릉시 평창군 위치하고 있는 도로 터널의 탐사 자료로 심도 70 cm 부근에 1~1.2m 간격으로 강지보재가 설치되어 있음을 확인하였다.

□ 사례 2 : 배근 위치 및 피복 두께 탐사

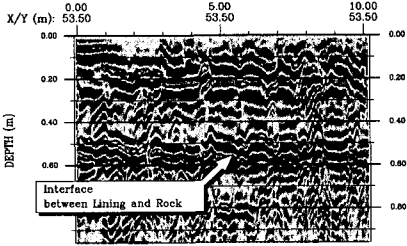


그림 6. 벽돌 라이닝 두께 탐사.

탐사의 신뢰도를 증대시키기 위해 핸드 드릴(φ 20 mm)을 이용하여 확인 천공을 실시한 결과 대부분 ± 5% 오차 범위 내로 수렴하여 벽돌 라이닝에서도 정확한 탐사가 가능함을 확인하였다.

3.4 터널 라이닝 보강재 탐사 사례

□ 사례 1 : 강지보(Steel-Rib) 탐사

강지보재(Steel-Rib)는 터널 복공의 구성물 중에서 가장 전기적 물성 차이가 큰 탐사 대상체로서, 끝단에서 회절 신호가 합쳐지면서 역삼각형 모양의 반사 신호를 강하게 보여 주고, 같은 모양의 다중 반사 신호를 1~2회 나타내므로 대부분 쉽게 탐지된다. 그러나 라이닝 표면으로부터 심도가 깊고 라이닝에서의 감쇠가 크면 탐지되지 않는 경우가 있다.

철근의 경우, 강지보재와 더불어 전기적 물성 차이가 라이닝에 비하여 상대적으로 크며 따라서 강한 반사 신호를 나타내게 된다. 〈그림 8〉은 고속철도 터널에서 획득한 탐사 자료로서 설계 기준에 의하면 단철근을 배근하도록 되어 있는 구간으로서 20 cm 부근에 철근으로부터 반사 신호가 명확하게 기록된 것을 알 수 있다.

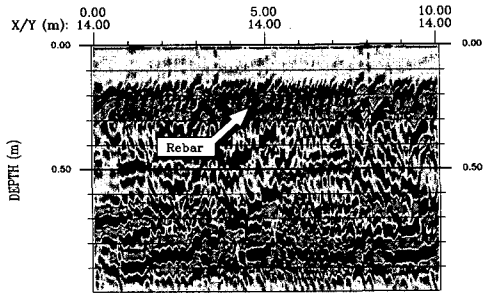


그림 8. 라이닝 철근 탐사

3.5 라이닝 배면 공동 탐사 사례

공동은 여러 가지 형태로 존재할 수 있고 라이닝 배면에 존재한다면 공동으로부터의 반사 신호는 다음과 같은 패턴을 보여 주게 되며 이와 같은 반사 신호가 기록된다면 공동으로 판단할 수 있다.

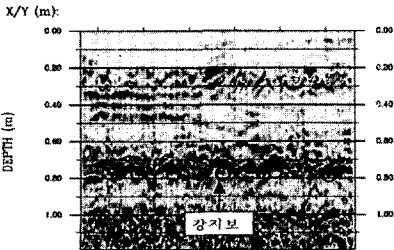


그림 7. 라이닝 강지보재 탐사

- (1) 공동의 상부 경계면에서 강한 반사 신호가 발생한다.
- (2) 공동 내부에서 속도가 콘크리트에서보다 3배 빠른 다중 반사 신호가 나타난다.
- (3) 공동의 양 끝단에서 회절 신호가 발생한다.
- (4) 불규칙한 공동 경계면에서 많은 산란 회절 신호가 발생한다.
- (5) 공동은 전자기적으로 매우 균질한 전파 매질이므로 공동 영역 하부에는 고주파수 잡음이 감소한다.

그러나, 이러한 조건을 만족하더라도 공동의 깊이와 크기를 추정한다는 것은 매우 어렵다. 공동의 깊이를 계산하기 위해서는 공동의 상부에서 반사되는 신호와 하부에서 반사되는 신호가 분리되어야 하는데, 이러한 조건을 만족하기 위해서는 공동의 깊이가 대규모이어야 하지만 일반적으로 라이닝 배면에 존재하는 공동은 대부분 소규모이므로 그 깊이를 판단해내기란 매우 어렵다.

〈그림 9〉는 부산시 소재 ○○터널, 어깨부에 대한 탐사 결과이다. 본 터널은 NATM 터널로서 2차 라이닝 배면에 방수 시트가 시공되어 있다. 탐사 결과, 진폭이 매우 강한 다중 반사 신호를 발생시키는 이상대가 2개소에서 기록되었으며 이 이상 신호들은 상부면에서 발생한 반사 신호와 하부면에서 발생한 반사 신호가 중첩되어 기록되었고 상기에 언급한 공동으로부터 발생하는 여러 전형적인 신호 패턴을 보여주고 있어 공동으로 분석되었다. 축선 7.5m에서 탐지된 공동의 축선상 길이는 1.5m, 축선 14.5m에서 탐지된 공동의 길이는 0.7 내외인 것으로 분석되었다.

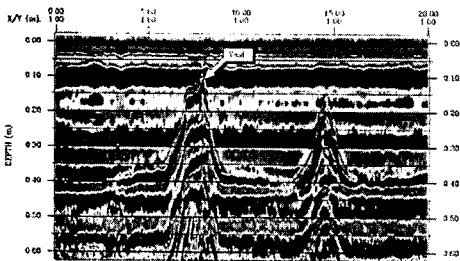


그림 9. 공동 탐사

최근 시설안전기술공단에서 공동의 규모 추정을 위한 연구를 실시하여 탐지가 가능한 공동 크기의 한계를 모형 실험 및 현장 적용 시험을 실시하여 규명한 사례가 있다. 연구 결과, 공동의 넓이를 확인하는 수평 분해능은 주파수와 무관하게 26.8cm 이상이면 가능하였고, 공동 상하부면을 확인할 수 있는 수직 분해능은 〈표 3〉과 같이 확인되었다.

표 3. 주파수별 수직 분해능

중심 주파수	펄스 폭	이론값	모형 실험
900MHz	1.1nsec	16.5 cm	30 cm 이상
450MHz	2.2nsec	33.0 cm	40 cm 이상

#### 4. 맺는말

GPR 탐사 기술은 현존하는 물리 탐사 기법 중에서 가장 분해능이 높고 현장 작업의 편리성으로 시설물 안전 진단 분야에 매우 다양하게 활용되고 있다. 콘크리트 구조물의 비파괴 검사로서 GPR 탐사는 탐사하고자 하는 대상체의 재질보다는 전기적인 특성, 즉 유전상수에 영향을 받으므로 유전율이 다른 물체를 만나면 전자파가 반사를 하므로 이상체의 존재 유무를 쉽게 확인할 수 있다.

GPR 탐사는 현재 터널 라이닝의 비파괴 검사용으로 가장 많이 활용되고 있으며, 특히 건축물이나 교량의 철근 배근 상태 및 피복 두께 조사용으로 탐사 변수를 특정한 장비인 IRON-SEEKER, RC-Radar 등이 많이 활용되고 있다. 적용 탐사 결과, 건축물이나 교량과 같은 구조물의 철근 배근이나 피복 두께 조사를 위해서는 특성화된 장비의 활용이 유용할 것이나, 피복 두께가 두꺼워 확인이 곤란하거나 콘크리트 상태등의 조건으로 특성화된 장비로 탐사가 곤란할 경우 펄스 EKKO 시스템과 같은 범용 장비를 사용할 필요가 있다. GPR 탐사는 당초 지반 조사용으로 개발되었다가 점차 콘크리트 구조물 비파괴 검사용으로 적용이 확대되었으며, 최근 하상 퇴적물 조사 및 교량 왜곡 조사용으로 적용 확대를 시도하고 있으며, 최근 들어 탐사 결과의 정확성 및 신뢰도 향상을 위한 시도와 더불어 이상체의 존재 유무 확인뿐만 아니라 이상체의 규모 확인을 위한 연구가 추진 중에 있다. □

#### 참고 문헌

1. 정해상 외, 터널 라이닝 배면의 공동 탐지를 위한 GPR탐사 연구, 인하대 석사학위 논문, 1996
2. 신주열 외, 시설물 안전진단 위한 GPR탐사 활용성 연구(Ⅱ), 시설안전기술공단, 1999
3. 터널 안전관리를 위한 정밀안전시스템 개발, 과학기술처, 1996
4. 지반조사연구, 삼성물산건설부문 기술연구소, 1996
5. 배성호 외, 지반공학과 구조물 진단분야에서의 GPR기술 응용, 한국지반공학회지, 제12권 제4호, 1996
6. Jeffrey J. Daniels, Fundamentals of Ground Penetrating Radar, 1990
7. A.P.Annan, Ground Penetrating Radar Workshop Note, 1992
8. Ulriksen, Application of Impulse radar to civil engineering, 1982