

제 3장 현장조사 및 시험 개요

3.1 현장조사 개요

3.2 내구성 시험 및 측정 개요

3.3 G.P.R 탐사 개요

제 3장 현장조사 및 시험 개요

3.1 현장조사 개요

본 시설물에 대한 외관조사는 대상터널의 물리적, 기능적 결함을 발견하고 구조적 손상유무를 판단하기 위해 부재 전체에 대하여 가능한 근접 육안조사를 실시함을 원칙으로 하였다. 따라서, 사전 현장답사를 통해 주변 여건을 파악하여 현장 접근에 필요한 접근방법 및 장비 동원과 그에 따른 일정계획을 수립하고, 기초자료의 수집 및 분석을 통한 주요 손상을 파악하는 등의 사전검토를 통하여 주요 손상을 파악한 후 『안전점검 및 정밀안전진단 세부지침-터널편(2010.12, 국토교통부/한국시설안전공단)』의 실시요령에 따라 시설물에 내재되어 있는 위험요인이나 시설물의 기능 및 성능 저하, 상태 등을 신속·정확하게 검사·평가하는 데 주안점을 두고 외관조사 방향을 결정하였다.

본 터널의 외관조사시에는 고소작업차를 이용하여 어깨부 및 천단부를 조사하고 그 외 공동구 및 포장부는 도보를 이용하여 구조물에 최대한 근접한 상태에서 조사를 실시하였다.

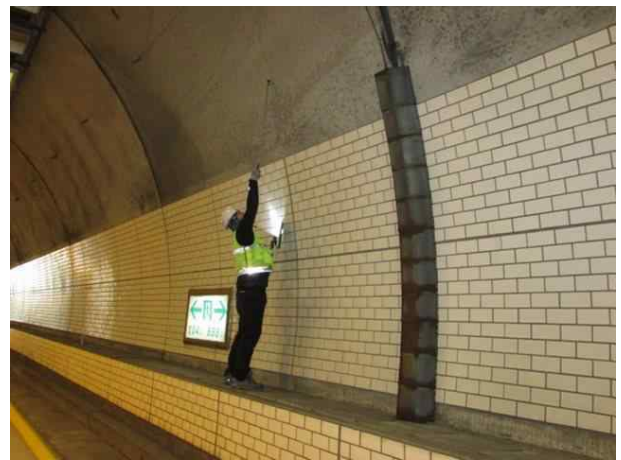
본 장에서는 외관조사 결과 확인된 결함과 손상 상태에 대하여 구성 부재별로 사진을 첨부하여 설명하고 발생 원인을 분석하여 보수·보강 및 유지관리 방안을 마련하는 데 참고할 수 있도록 하였으며, 전체 부재에 대한 외관조사망도를 작성하여 향후 터널의 점검 및 유지관리 시 효율적으로 활용할 수 있도록 하였다.

3.1.1 현장조사 수행 현황

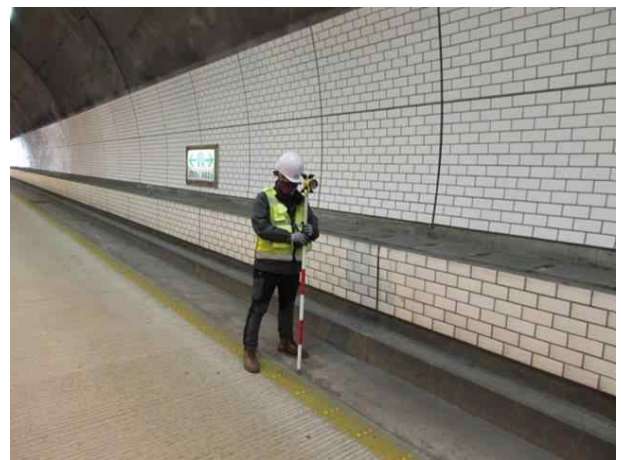
터널 외관조사는 조명시설, 점검차량, 스마트 균열경, 카메라 등의 접근장비를 이용하여 최대한 터널 라이닝에 근접한 후 육안조사를 실시하였으며, 조사결과는 지보패턴, 주변구조물의 상태, 주변 지형상태 등을 고려하여 분석하였다.



고소작업차를 활용한 라이닝 근접조사



도보조사



현황측량



배수시설(집수구) 조사 전경

【사진 3.1.1】외관조사 전경

3.1.2 부재별 주요조사 항목

금번 정밀안전진단시 현장답사, 기존자료 등을 토대로 외관조사 방법을 결정하였으며, 부위별 점검항목별로 외관조사를 실시하였다.

【표 3.1.1】 부재별 주요조사 항목

구분		조사항목	비고
현장답사		•현장접근에 필요한 고소차 등의 접근방법, 일정계획을 수립 •예비조사를 통해 터널에 발생된 주요 결함을 형태별로 분류 •결함 및 손상의 발생 원인을 추정하고 조사방향 결정 •현장조사 안전조치 사항	
기존자료 검토		•천단부 종방향 균열 발생 유무 확인 •신축이음부 반원형 균열 발생 및 박락 유무 확인 •신축이음부 누수 및 배수시설 확인 •개착구간 철근노출 및 피복부족 구간 확인	
입·출구부	갱문	•벽체 균열 및 누수상태조사 •콘크리트 박리, 박락 상태조사 •기타 콘크리트 열화상태 조사	
	사면	•수목, 식생 상태조사 •사면 낙석 유무 조사 •지하수 유출 •배수로 및 우수로 상태조사	
본선타널	측벽부 천단부	•균열, 단차, 누수상태 •시공이음부 누수 및 손상상태 •박리, 박락 및 변형조사	
	배수시설	•배수상태 •배수구 덮개 파손 및 망실	

3.2 내구성 시험 및 측정 개요

3.2.1 콘크리트 내구성 조사

콘크리트 내구성조사는 구조물에 열화손상이 이미 현저하게 진행되었을 경우 열화의 정도 및 그 원인 관계를 조사하고 보수·보강 여부를 판정하며, 아직 열화손상이 없거나 경미한 구조물은 내구성조사에 의해서 향후 열화 경향을 예측하고 예방보전을 검토하기 위한 자료를 수집하는 것을 목적으로 한다.

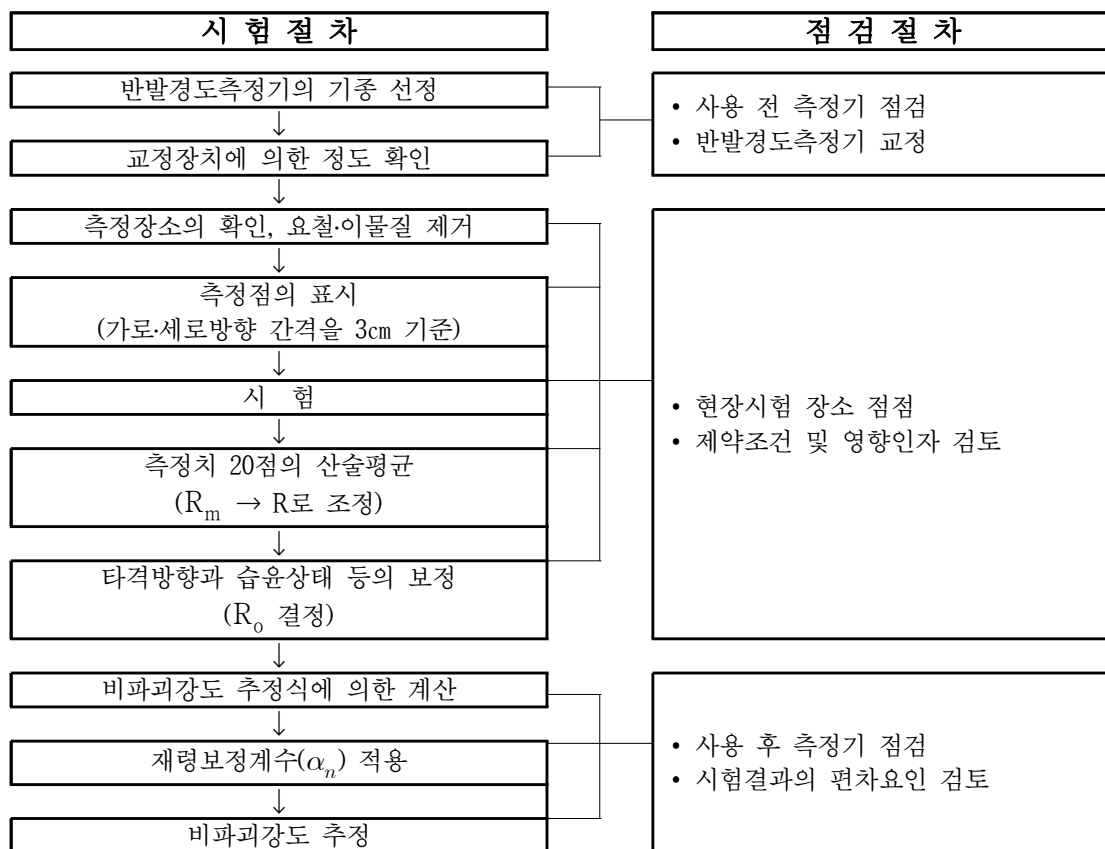
3.2.2 시험내용 및 평가기준

가. 콘크리트 강도시험

1) 반발경도시험

콘크리트의 표면 경도를 측정하여, 이 측정치로부터 콘크리트의 압축강도를 비파괴로 추정하는 검사방법이다. 반발경도를 구하는 방법으로는 슈미트 해머(Schmidt Hammer)법이 가장 널리 사용된다. 슈미트 해머로 경화된 콘크리트 표면을 타격시, 반발경도(R)와 콘크리트의 압축강도(F_c)와의 사이에 특정 상관관계가 있다는 실험적 경험을 기초로 한다.

① 반발경도시험 및 측정기 점검 등의 절차



【그림 3.2.1】 반발경도시험 및 측정기 점검 등의 절차

외관조사 결과에 의해 결정된 측정개소에 대해서 타격점 상호간의 간격은 3cm를 표준으로 종으로 5열, 횡으로 4열의 선을 그어 직교되는 20점을 타격하여 반발경도 값의 산술평균값(R_m)을 구한다. 산술평균값(R_m)에 대해서는 릴렘(RILEM) 규정에 따라 각 반발경도의 값이 $R_m \pm 20\%$ 의 범위를 벗어나는 값들은 제외시키고 나머지 값들을 다시 산술평균하여 반발경도 R 을 결정한다.

② 보정반발경도(R_o)

【표 3.2.1】 보정반발경도(R_o)

◇ 보정반발경도 : $R_o = R + \Delta R_1 + \Delta R_2$ 여기서, R : 반발경도 ΔR_1 : 타격방향에 따른 보정값 ΔR_2 : 콘크리트의 습윤상태에 따른 보정값					
㉠ 타격방향에 따른 보정값(ΔR_1) - 수평방향의 타격에 의한 측정치가 안정된 값을 나타내지만 타격방향이 다른 경우에는 반발치를 보정해 주어야 함 ⇒ 하향 타격(-90°)의 경우 : (+)값으로 보정 상향 타격($+90^\circ$)의 경우 : (-)값으로 보정	α	보 정 값			
	R	$+90^\circ$	$+45^\circ$	-45°	-90°
	10	-	-	+2.4	+3.2
	20	-5.4	-3.5	+2.5	+3.4
	30	-4.7	-3.1	+2.3	+3.1
	40	-3.9	-2.6	+2.0	+2.7
	50	-3.1	-2.1	+1.5	+2.2
	60	-2.2	-1.6	+1.3	+1.7
㉡ 콘크리트의 습윤상태에 따른 보정값(ΔR_2) - 콘크리트는 함수율이 증가함에 따라 반발경도가 저하됨 ⇒ 측정위치가 습하고 타격의 흔적이 보이는 경우 : $\Delta R_2 = +3$으로 보정 측정위치가 완전히 젖어 있는 경우 : $\Delta R_2 = +5$로 보정					

③ 압축강도의 추정

보정반발경도(R_o)로부터 압축강도(F_c)의 상관관계를 도출한 제안식들은 다음과 같다.

【표 3.2.2】 기존의 비파괴강도 추정 제안식(반발경도시험)

구 분	추 정 식(MPa)	비 고
일본재료학회	$F_c = -18.0 + 1.27R_o$	금회 적용(식①)
일본건축학회	$F_c = (7.3R_o + 100) \times 0.098$	금회 적용(식②)
※ 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침(2010. 12, 국토교통부/한국시설안전공단)		

④ 28일 강도의 추정

시일이 경과할수록 콘크리트 구조물은 표면경도가 높아지므로 아래 식과 같이 재령 28일 강도(F_{28}')로 환산하여 압축강도를 추정한다. 콘크리트의 재령에 따른 압축강도 보정계수 α 는 아래 【표 3.2.3】와 같으며, 3,000일 이상의 재령에 대해서는 0.63을 적용한다.

$$F_{28}' = \alpha \cdot F_c$$

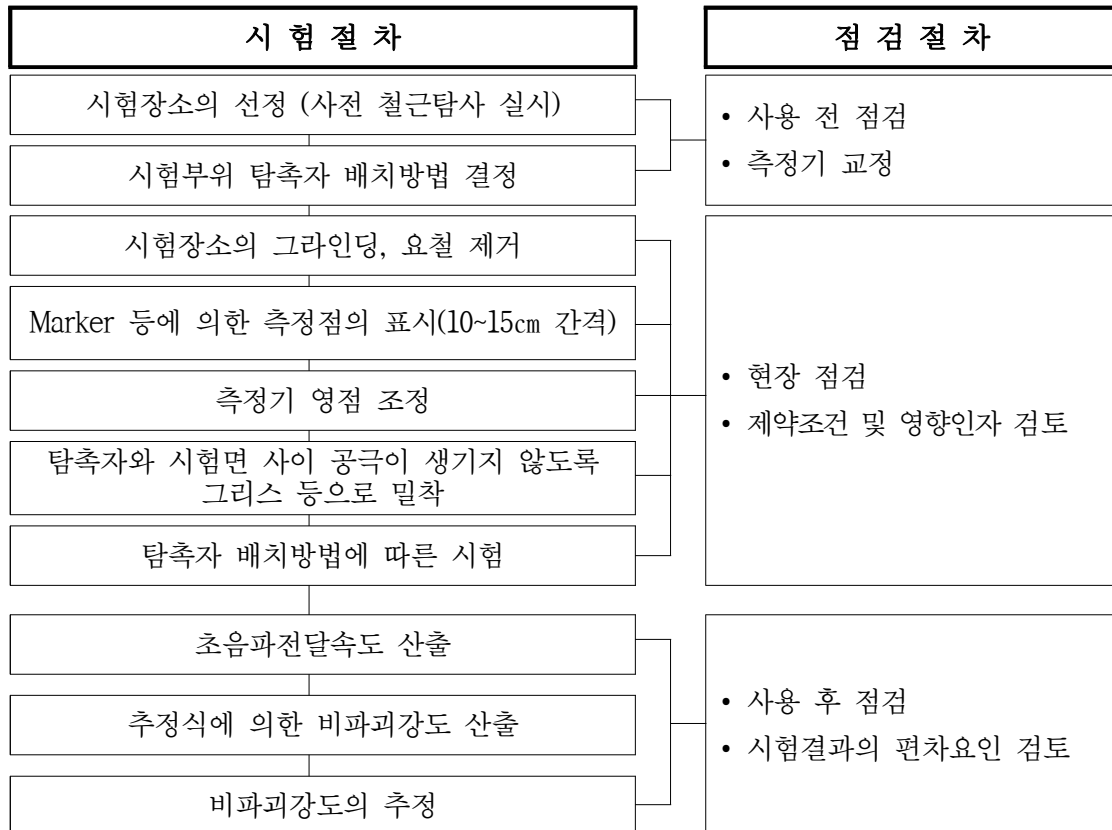
【표 3.2.3】재령계수 α 값

재령(일)	10	20	28	50	100	150	200	300	500	1000	3000
α	1.55	1.12	1.00	0.87	0.78	0.74	0.72	0.70	0.67	0.65	0.63

2) 초음파전달속도시험

초음파의 투과속도가 콘크리트의 밀도 및 탄성계수에 따라서 변화하는 것을 이용하며, 이 투과속도로부터 콘크리트의 동적 특성, 강도, 균열상태 등을 추정하는 방법이다. 그러나, 강도 추정의 정확도는 높지 않으며, 일반적으로 콘크리트의 강도 및 품질 비교 또는 균열깊이를 판정하는 수단으로서 이 방법을 사용하고 있다.

① 초음파전달속도시험 및 측정기 점검 등의 절차



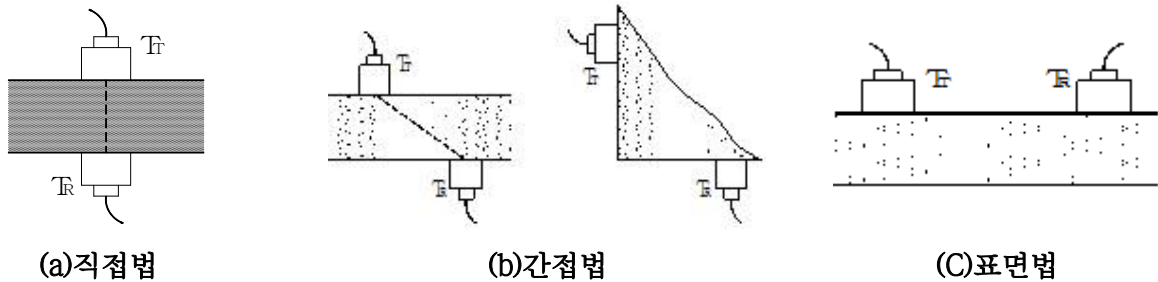
【그림 3.2.2】초음파전달속도시험 및 측정기 점검 등의 절차

② 초음파전달속도시험에 의한 전달속도 분석

초음파전달속도를 결정하기 위해서는 재료에서 초음파가 전달되는 거리를 미리 측정하고 장비상에 나타난 초음파 전달시간을 측정한 후 아래 식에 의해서 구한다.

$$\text{전달속도(Velocity)} = \frac{\text{전달길이(Path Length)}}{\text{전달시간(Transit Time)}}$$

초음파전달속도시험을 위한 탐촉자의 배치방법으로는 직접법, 간접법 및 표면법이 있다.



【그림 3.2.3】 초음파전달속도시험을 위한 탐촉자 배치방법

표면법과 직접법에서 구한 초음파전달속도는 근사적으로 아래 식과 같은 관계가 있다.

$$V_d \approx 1.05 V_i$$

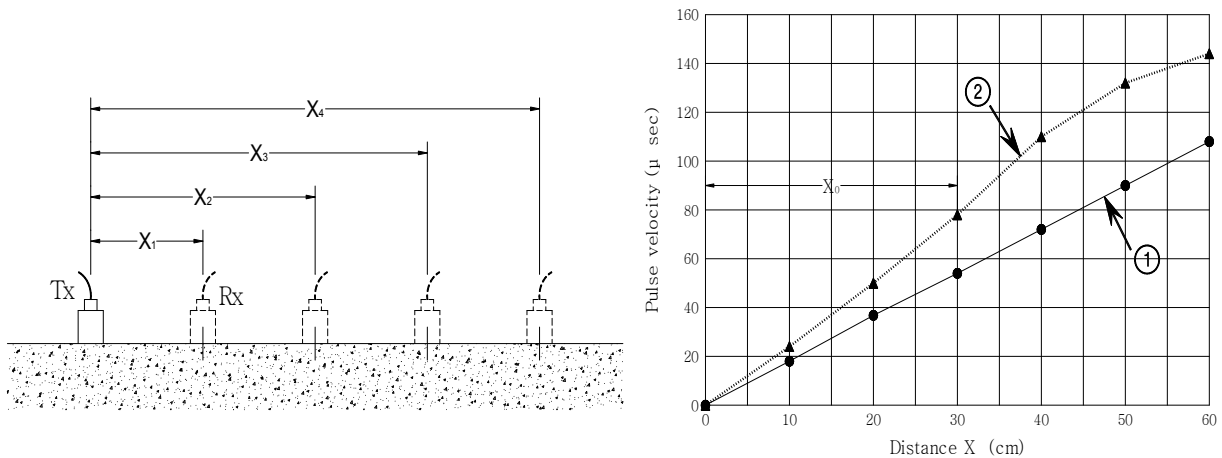
여기서, V_d : 직접법에 의한 초음파 속도

V_i : 표면법에 의한 초음파 속도

직접법과 표면법의 초음파전달속도는 재료의 종류, 배합, 함수율 등 여러 가지 원인으로 변동을 나타내고 있으며, 보편적으로 현장 콘크리트의 초음파전달속도 관계는 $V_d \approx 1.05 \sim 1.15 V_i$ 의 사이에 있다고 경험적으로 보고되고 있다.

보다 정확한 직접법과 표면법의 초음파전달속도의 관계를 파악하기 위해서는 표면법을 수행한 동일 조건의 구조물이나, 동일한 부위에서 채취한 코어의 종파(직접법) 속도를 측정하여 상관관계에 의해 환산하여 이용하는 방법이 바람직하다.

표면법은 등간격(100mm)으로 5점 이상의 측점을 정하고 초음파의 전달거리(X_i)에 따른 전달시간(T_i)을 측정하고, 최소자승법에 의해서 회귀직선식을 구하여 그 기울기를 전달속도(V_i)로 한다.



【그림 3.2.4】 표면법에 의한 초음파전달속도의 측정

회귀직선의 적정성 여부를 판단하기 위해서 회귀직선의 유의성(有意性)검정에 사용되는 결정계수(Coefficient of determination)를 다음 식에 의해서 계산한다.

$$r^2 = \frac{SSR}{SST} = \frac{(\sum (X_i - \bar{X})(T_i - \bar{T}))^2}{\sum (X_i - \bar{X})^2 \sum (T_i - \bar{T})^2}$$

여기서, $\bar{X}$, $\bar{T}$ 는 거리 및 전달시간의 평균값

③ 비파괴강도의 추정

본 과업에서는 r^2 값이 99% 이상이 되는 회귀직선식만을 사용하여 전달속도 V_i 를 계산하였다. 전달속도에 따른 콘크리트 압축강도의 추정을 위하여 초음파전달속도와 압축강도의 상관관계를 도출한 다음 식을 사용하였다.

【표 3.2.4】 기존의 비파괴강도 추정 제안식(초음파전달속도시험)

구 분	추 정 식(MPa)	비 고
일본건축학회	$F_c = (215 V_d - 620) \times 0.098$	금회 적용(식③)
한전기술연구원	$F_c = (339.1 V_d - 1107) \times 0.098$	금회 적용(식④)
※ V_d : 직접법에 의한 초음파전달속도(km/s) ※ 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침(2010. 12, 국토교통부/한국시설안전공단) 참조 ※ 콘크리트 및 강재 비파괴시험 매뉴얼(2006. 12, 한국시설안전기술공단) 참조		

나. 철근탐사시험

1) 개 요

본 시험은 전자파레이더를 이용한 철근탐사 시험기(RC Radar)를 활용하여 철근콘크리트 구조물에 배근된 철근간격, 콘크리트 피복을 측정하기 위해 실시한다.

철근콘크리트 구조물의 부재 내부에 배근되어 있는 철근의 피복두께가 지나치게 작은 경우에는 콘크리트의 탄산화 등에 따른 열화손상에 대한 저항성이 저하되어 내구성이 감소할 가능성이 있으며, 피복두께가 지나치게 큰 경우에는 강도감소 등을 수반할 우려가 있으므로 철근탐사는 설계 당시와 같이 콘크리트 내에 배근되어 있는 철근의 배근상태 및 피복두께를 파악하기 위하여 실시한다.

2) 측정원리

전자파레이더의 원리는 현재 널리 사용되고 있는 레이더와 동일하다. 즉, 콘크리트용 전자파레이더는 임펄스 상의 전자파를 송신안테나로부터 콘크리트 내로 방사하면 그 전자파가 콘크리트와 전기적 성질(비유전율, 도전율)이 다른 물체(철근, 매설관, 공동 등)와의 경계에서 반사한다. 이를 수신안테나로 수신하고, 그에 소요되는 왕복전파시간으로부터 반사물체까지의 거리를 계산하면 그 위치를 구할 수 있다. 원리를 아래 【그림 3.2.5】에 나타내었고, 콘크리트 중의 전자파 속도는 다음 식과 같다.

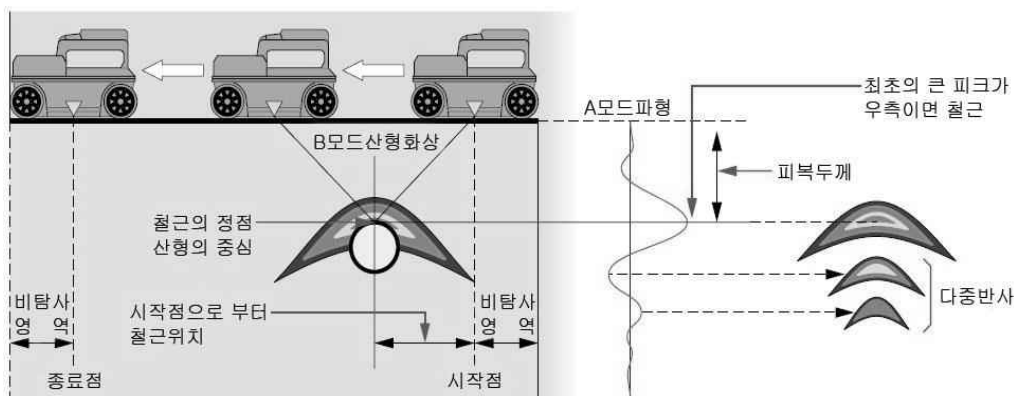
$$V = \frac{C}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (\text{m/sec})$$

여기서, C : 진공 중에서 전자파의 속도(3×10^8 m/sec)

ϵ_r : 콘크리트의 상대유전율(6~10)

또한, 반사물체까지의 거리(D)는 송신 시각으로부터 수신 시각까지의 시간차(T)의 측정치와 콘크리트 내부의 전파속도(V)로부터 구할 수 있다.

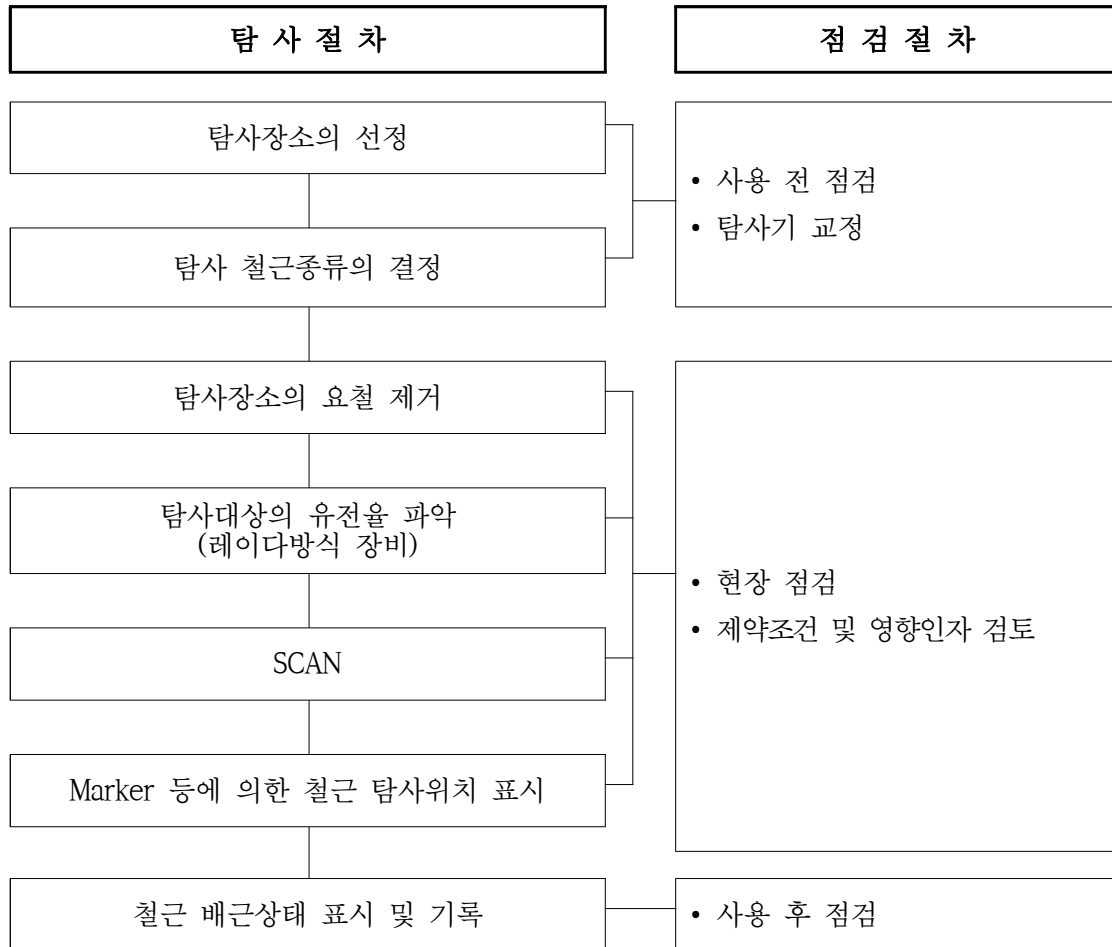
$$D = \frac{1}{2} V T \quad (\text{m})$$



【그림 3.2.5】 철근탐사 측정원리

3) 철근탐사시험 및 장비 점검 등의 절차

철근탐사시험 방법에 대한 절차는 KS F 2734 및 KS F 2735의 규정에 준한다.



【그림 3.2.6】 철근탐사시험 및 장비 점검 등의 절차

4) 탐사조건 및 적용한계(RC Radar의 경우)

① 탐사조건

- 적용 가능한 조건
 - 탐사심도 200mm이내
 - 탐사대상 철근지름이 $\phi 6\text{mm}$ 이상
 - 콘크리트의 질이 균일한 곳
 - 철근이 안테나 진행방향과 직교인 경우
- 적용 곤란한 조건
 - 표면에 금속 등 전파를 반사하는 것이 있고, 그 밑의 철근 등을 탐사하는 경우
 - 100mm이하의 피치로 배근되어 있는 경우
 - 철근이 안테나의 진행방향과 평행인 경우

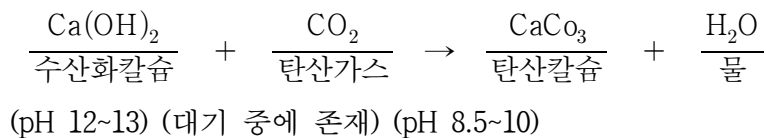
② 적용한계

- 탐사대상 물체의 표면에 금속 등 전파를 반사하는 것이 있고, 그 밑의 철근 등을 탐사하는 경우
- 철근이 안테나의 진행방향과 평행인 경우
- 비유전율에 따라 피복두께의 차이가 있으므로 탐사 대상물의 비유전율을 추정하기 어려움
- 철근직경과 복철근 및 경사철근의 판독 불가능
- 탐사대상 표면에 요철이 많은 장소는 탐사결과의 신뢰성 저하
- 안테나의 사용으로 좁고, 짧은 위치의 탐사 불편

다. 탄산화깊이 측정

1) 개 요

탄산화란 콘크리트의 탄산화(Carbonation) 과정에서 나타나는 현상으로 탄산화에 의해서 문제가 발생하는 것은 콘크리트 자체에서 생기는 것이 아니고, 콘크리트 중의 철근에 녹이 발생함으로써 문제를 일으키는 것이다.



탄산화가 일어나는 메카니즘을 보면 시멘트의 수화반응에서 생성되는 수산화칼슘(Ca(OH)_2)은 pH 12~13정도의 강알칼리성을 나타내지만 대기 중에 포함되어 있는 약산성의 탄산가스(약 0.03%)와 접촉하면 탄산칼슘과 물로 변화하고 탄산칼슘으로 변화한 부분의 pH가 8.5~10 정도로 낮아지게 된다. 따라서, 콘크리트의 탄산화는 일반환경 하에서도 확실하게 진행되기 때문에 매입된 철근의 부식에 따른 문제가 가장 기본적인 중요하다. 콘크리트 내부의 pH가 11이상에서 철근은 표면에 $1 \times 10^{-6} \text{mm}$ 두께의 수산화물($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) 부동태막을 형성하므로 산소 침입을 막아 철근의 부식을 방지하지만 탄산화에 의하여 pH가 11보다 낮아지면 부동태막이 파괴되면서 철근에 녹이 발생하게 된다. 이러한 녹은 원래 부피의 약 2.5배에서 최대 7배까지 팽창하고 녹의 팽창압력에 의해 콘크리트 내부에는 균열이 발생하게 되며 철근의 부착강도 저하, 피복 콘크리트의 탈락, 철근 단면적의 감소 등 구조물의 내구성 저하를 초래하게 된다. 이러한 원인으로 녹의 진행과 함께 콘크리트 구조물의 내구성면에서 탄산화를 파악하는 것이 중요하다.

	STEP 1 • 정상, 재료 및 강도상의 변화는 거의 없음 (약간의 건조수축에 의한 균열)
	STEP 2 • 녹의 발생에 의한 팽창압이 콘크리트 내부에 발생하여 미세한 균열이 발생
	STEP 3 • 철근의 윗면이 팽창함 • 균열이 표면까지 연장되어 공기와 수분의 침입이 격화되어 동해 등의 다른 열화도 유발시키며 녹물이 보임
	STEP 4 • 철근 윗면의 피복이 떨어지고, 철근의 노출이 시작됨 • 철근단면적이 감소함
	STEP 5 • 철근 윗면이 거의 없어지고 철근은 공기 중에 직접 노출됨 • 내구성능은 없음

【그림 3.2.7】 탄산화에 의한 콘크리트 성능저하

2) 탄산화 속도에 영향을 미치는 요인

탄산화 속도에 영향을 미치는 요인으로서는 환경조건(대기 중의 탄산가스 농도, 온도, 습도, 마감재 등)을 주원인으로 하는 외적요인 및 콘크리트 자체의 성능·품질(함수율, 강도, 시멘트의 종류, 배합조건, 시공조건 등)을 주원인으로 하는 내적요인에 의해 복합적인 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 대표적인 원인을 정리하면 다음과 같다.

【표 3.2.5】 탄산화 속도에 영향을 미치는 요인

구분	영향인자	탄산화 속도
내적 요인	시멘트의 종류	• 수화반응이 느릴수록 탄산화 속도가 빠름 • 조강 포틀랜드시멘트 < 보통 포틀랜드시멘트 < 중용열 포틀랜드시멘트
	골재의 종류	• 투기성이 큰 골재일수록 탄산화 속도가 빠름
	계면활성제 종류	• 동일 물-시멘트비, 동일 슬럼프라면 탄산화 속도와 무관함
	압축강도	• 압축강도가 낮을수록 탄산화 속도가 빠름
	물-시멘트비	• 물-시멘트비가 증가하면 탄산화 속도가 빠름

【표 3.2.5】탄산화 속도에 영향을 미치는 요인(계속)

구분	영향인자	탄산화 속도
내적 요인	시공 정밀도	• 다짐이 불충분할수록 탄산화 속도가 빠름
	콘크리트 결함부	• 균열부위, 이음부, 손상부위 등에서 탄산화 속도가 빠름
외적 요인	온도	• 온도 상승시 탄산화 속도가 빠름 • 20~50 °C 사이에서는 영향이 크지 않음
	이산화탄소 농도	• 농도가 클수록 탄산화 속도가 빠름 • 탄산가스 농도 3~10% 사이에서 상승비율이 큼
	습도	• 상대습도 50~70% 에서 탄산화 속도가 최대
	실내, 실외	• 실내의 탄산화 속도가 빠름

3) 탄산화깊이의 측정

본 과업에서는 일반적으로 현장에서 간편하게 이용되는 페놀프탈레인법(페놀프탈레인은 pH 지시약의 일종으로 1% 알칼리용액)을 이용하여 콘크리트의 탄산화 진행 정도를 측정한다.

콘크리트 파단면에 1% 페놀프탈레인 용액을 도포한 후 색의 변화를 관찰하는 방법으로 강알칼리성일수록 짙은 보라색을 띠며 pH 9이하에서는 무색을 나타낸다. 탄산화 진행 깊이의 측정은 콘크리트 표면에서 발색점까지의 깊이를 버니어캘리퍼스 등으로 측정한다.

4) 탄산화를 고려한 잔존수명 예측

탄산화 속도는 경과시간(t)의 평방근에 비례하여 진행한다고 하는 $\sqrt{t}$ 법으로 표현된다. 탄산화(C)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C = A \times \sqrt{t}$$

여기서, C : 탄산화깊이(mm)

A : 탄산화 속도계수(mm/ $\sqrt{\text{년}}$)

t : 재령(년)

여기서 구해진 탄산화 속도계수(A)를 실제 탄산화깊이와 경과년수를 이용하여 역추적으로 구한 후 탄산화가 철근에 도달하는 시간을 계산하면 콘크리트의 탄산화에 의한 잔존수명을 예측할 수 있다.

$$\text{수명예측(년)} = (\text{철근피복} / \text{탄산화 속도계수})^2$$

$$\text{잔존수명예측(년)} = \text{수명예측년수} - \text{경과년수}$$

5) 평가기준

탄산화 상태평가 기준은 다음과 같다.

【표 3.2.6】 탄산화 상태평가 기준

기 준	탄산화 잔여 깊이	철근부식의 가능성
a	• 30mm이상	• 탄산화에 의한 부식발생 우려 없음
b	• 10mm이상 ~ 30mm미만	• 향후 탄산화에 의한 부식발생 가능성 있음
c	• 0mm이상 ~ 10mm미만	• 탄산화에 의한 부식발생 가능성 높음
d	• 0mm미만	• 철근부식 발생
e	-	-

라. 염화물함유량시험

1) 콘크리트 속의 염분에 대한 일반적 사항

염화물의 콘크리트 침투를 구분해 보면 일반적으로 두가지로 크게 구분할 수 있다.

하나는 이미 건립된 구조물에 해풍, 해수 및 염화물을 함유한 외부 환경조건에 의해 염화물이 침투 축적되는 경우이고, 다른 하나는 방동대책으로서 염화칼슘(CaCl_2)과 염화나트륨(NaCl)의 살포에 의해 염화물이 침투하는 경우이다.

다음은 콘크리트 제조시에 배합재료로부터 직접 콘크리트에 침투하는 경우, 특히 아직 굳지 않은 프레스 상태일 때 혼입하는 경우인데 이의 예로서는 ① 깨끗이 세척하지 않은 바다 모래의 사용, ② 경화 촉진제로서 염화칼슘(CaCl_2)의 사용, ③ 염화칼슘(CaCl_2)을 주체로 한 조강형 AE제의 사용, ④ 혼화수로서 해수의 사용 등을 들 수 있다. 이 중 미세정 바다모래에 의한 염분(염화나트륨(NaCl))을 주로 함유한 것의 혼입에 의한 것이 염해 원인의 대부분을 차지하고 있다.

콘크리트 중에 함유하는 염화물은 ① 가용성 염화물(수용성 염화물), ② 전 염화물(산 용해성 염화물)의 2종류로 분류할 수 있다. ①의 가용성 염화물로는 콘크리트에서 물에 의해 유출되는 염화물이고, ②의 전 염화물은 콘크리트를 강한 산으로 용해함으로써 유출되는 염화물이다. 가용성 염화물의 측정은 콘크리트의 세공용액 속에 용해되어 있는 유리 염화물의 양을 구하는 경우로 측정할 수 있고 유출온도 등 시험방법의 자세한 내용은 제안되고 있는 각 방법에 따라 약간 차이가 있다. 일본 콘크리트공학협회(JCI)에서는 가용성 염화물을 「경화콘크리트 중에 함유된 50℃의 온수에 녹는 염화물」이라 정의하여 측정방법을 정하고 있다.

전 염화물량과 가용성 염화물량과의 차이는 시멘트 수화물에 고정되어 있는 염화물로서 판정되어진다.

강재 위치에 대한 염화물 이온의 강재 부식발생 한계농도는 콘크리트 단위용적당 양으로서 $0.3 \sim 1.2 \text{kg/m}^3$ 정도이고 이 값은 구조물의 설치 환경조건이나 강재부식 허용량 등의 조건에 따라서 다르다. 예를 들면, 미리 염화물을 혼입한 공시체에 의한 촉진시험 등에서는 $0.3 \sim 0.6 \text{kg/m}^3$ 정도이고 실제 환경의 노출실험에서는 $1.2 \sim 2.4 \text{kg/m}^3$ 정도로 되어 있다. 촉진시험과 실제 환경에서 얻어지는 한계농도의 차이는 시험 공시체와 실제 구조물의 덮개나 물-시멘트비의 차이 그리고 촉진시험 시에 설정되는 고온환경 등 온도의 영향이라고 생각된다.

안전점검 및 정밀안전진단 세부지침(2010.12) 및 콘크리트 표준시방서 내구성조서편에서는 경화콘크리트의 경우 전염화물 기준으로 실제 환경의 노출실험 결과 하한치인 1.2kg/m^3 을 강재 부식발생 한계농도로서 정하고 있다. 비록, 부식환경에 따른 전염화물량이 1.2kg/m^3 를 넘더라도 부식이 발생하지 않을 가능성이 있지만 잠재적으로 부식 가능성이 높을 것으로 평가되므로 부식방지를 위한 조치가 검토되어야 할 것이다.

2) 평가기준

① 국내 콘크리트 표준시방서 기준

굳지않은 콘크리트의 경우는 철근의 부식을 방지하기 위하여 0.3kg/m^3 이하로 규정하며, 책임기술자의 승인이 있는 경우 0.6kg/m^3 까지 허용

② 콘크리트 구조설계기준(2007년)

【표 3.2.7】 염화물 평가기준(콘크리트 구조설계기준(2007))

부재의 종류	최대 수용성 염소이온(Cl-), 시멘트의 중량에 대한 비(%)
프리스트레스트 콘크리트	0.06
염화물에 노출된 철근콘크리트	0.15
건조상태 또는 습기로부터 차단된 철근콘크리트	1.00
기타 철근콘크리트	0.30

③ 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침(2010. 12)

【표 3.2.8】 염화물 상태평가 기준(안전점검 및 정밀안전진단 세부지침(2010.12))

기 준	전염화물 이온량(kg/m^3)	철근부식의 가능성
a	• 염화물 $\leq 0.3 \text{kg/m}^3$	• 염화물에 의한 부식이 발생할 우려 없음
b	• $0.3 \text{kg/m}^3 < \text{염화물} \leq 1.2 \text{kg/m}^3$	• 염화물이 함유되어 있으나, 부식발생 가능성 낮음
c	• $1.2 \text{kg/m}^3 < \text{염화물} \leq 2.5 \text{kg/m}^3$	• 향후 염화물에 의한 부식발생 가능성 높음
d	• 염화물 $\geq 2.5 \text{kg/m}^3$	• 철근 부식발생
e	-	-

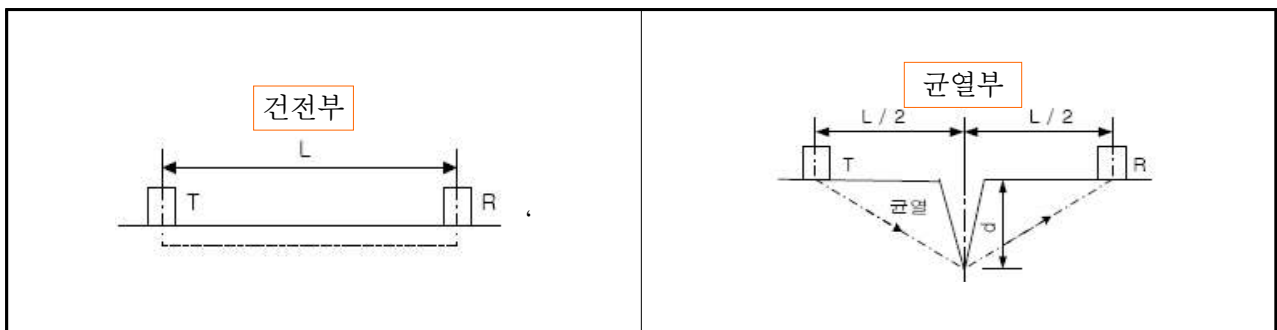
마. 균열깊이 조사

콘크리트 표면의 균열깊이는 일반적으로 T_c-T_0 법으로 구한다.

T_c-T_0 법은 콘크리트 부재의 균열부와 건전부에서 아래 【그림 3.2.8】와 같이 각각 측정하고, 양자의 데이터 비교에 의해 균열깊이를 산출하는 것이다. 본 방법에서는 균열부분을 중심으로 하여 송신탐측자와 수신탐측자를 등간격으로 배치한다. 송신탐측자(T)로부터 발신된 종파초음파가 그림 중의 점선과 같이 콘크리트 내를 전파하고 균열 선단부를 경유해서 수신탐측자(R)에 도달하기까지의 시간 T_c 를 구한다.

비교용으로서 같은 콘크리트 부재에서 균열이 없는 부분을 대상으로 송신탐측자와 수신탐측자의 거리 L 과 초음파가 전파하는 시간 T_0 를 구해 다음 식을 적용하여 균열깊이를 구한다. 본 과업에서는 $X=10\text{cm}$ 를 적용하였다.

$$d = \frac{L}{2} \sqrt{\frac{(T_c^2)}{(T_0^2)} - 1}$$



【그림 3.2.8】 T_c-T_0 법에 의한 탐측자 배치 및 균열깊이 측정방법

3.3 G.P.R 탐사 개요

3.3.1 개요

본 터널의 안전성에 영향을 미치는 콘크리트 라이닝의 두께, 콘크리트 라이닝 배면의 공동 유무와 위치, 강지보공 설치 현황 등을 조사하기 위하여 GPR 탐사를 실시하였다.

GPR 탐사의 주된 목적은 라이닝 배면에 공동이 존재할 경우, 이완토압, 잔류수압 및 기타 하중이 균등하게 작용하지 않으므로 장기적인 터널 안전성 확보를 위해서는 GPR 탐사 결과와 외관조사 결과를 종합적으로 분석하여 터널의 효율적인 유지관리에 필요한 보수·보강 대책을 수립하는데 있다. GPR 탐사 범위는 현장 답사 및 외관조사 결과를 토대로 측선위치를 선정하였고 조사결과는 외관조사, 시험 자료등과 비교·분석하였다.

3.3.2 탐사현황

가. 장비현황

본 탐사에 사용된 장비는 러시아 RADAR System. Inc의 Ground Penetrating Radar(GPR) 중 Zond-12e를 이용하여 측정하였으며 주요 제원은 【표 3.3.1】와 같다.

【표 3.3.1】 Zond-12e 제원

구 분	구 성 품	모델 및 규격	비 고
주장치 (Zond-12e)	Main Frame Body	Zond-12e	전원공급, 전자기파 송신 및 수신, 전자기파 상호 데이터 화상처리 및 표시, 이미지 조정, 데이터 filtering
	Control/Display Module	휴대용 노트북 PC	
측정 안테나 (전자기파 송수신기)	1.5GHz 2GHz	- -	조사 심도 및 분해기능에 따라 최 적 안테나 선정
실내 분석 장치	IBM 호환 퍼스널 컴퓨터	Pursonal Computer	데이터 전송 및 저장
	데이터 분석용 Software	Prism2.5	디지털 신호처리 기법을 응용한 다 각적인 데이터 분석 및 판독
출력 장치	컬러 프린터	Konica	컬러 출력
기타 부대 장치	배터리 케이블	DC12V,60AH 20m	직류 전원 공급

나. 탐사측선 선정 및 연장

대구방향 종측선은 천단부와 우측어깨부를 탐사하였고, 부산방향은 천단부와 좌측어깨부를 탐사를 실시하였다. 종방향 탐사는 천단부, 좌·우측 어깨부에서 실시하였고, 횡방향 탐사는 약 200m간격으로 7개소씩 탐사를 실시하여 신뢰도를 높였다.

【표 3.3.2】 탐사측선 현황

구 분		측 선	위 치(sta.)	Span	측정부재	탐사심도	비고
청도2터널 (대구)	종측선	L 1	68.820K ~ 70.373K	1~175	중앙천단부	1.0 M	
		L 2	68.820K ~ 70.373K	1~175	우측어깨부	1.0 M	
	횡측선	H 1	68.903K	11	좌측→우측	1.0 M	
		H 2	69.575K	86	좌측→우측	1.0 M	
		H 3	69.754K	106	좌측→우측	1.0 M	
		H 4	69.915K	124	좌측→우측	1.0 M	
		H 5	70.113K	146	좌측→우측	1.0 M	
		H 6	70.250K	161	좌측→우측	1.0 M	
		H 7	70.365K	174	좌측→우측	1.0 M	
청도2터널 (부산)	종측선	L 1	68.860K ~ 70.413K	1~175	좌측어깨부	1.0 M	
		L 2	68.860K ~ 70.413K	1~175	중앙천단부	1.0 M	
	횡측선	H 1	68.918K	8	좌측→우측	1.0 M	
		H 2	69.205K	40	좌측→우측	1.0 M	
		H 3	69.820K	75	좌측→우측	1.0 M	
		H 4	69.830K	110	좌측→우측	1.0 M	
		H 5	70.100K	140	좌측→우측	1.0 M	
		H 6	70.325K	165	좌측→우측	1.0 M	
		H 7	70.395K	173	좌측→우측	1.0 M	

다 GPR 탐사의 원리

1) 전자기파의 특성

GPR은 전자기파를 단속적으로 발생시키고 수신하는 측정 장비로서 그 측정한계는 전자기파의 측정한계를 따른다. 전자기파가 안테나에서 방출되면 파동의 회절특성 때문에 진행 방향에 대해서 일정한 각도로 퍼져나가게 된다. 또한 매질 내를 진행하면서 매질의 유전상수에 따라 그 진행속도와 매질에 대한 파의 에너지 흡수율에 차이가 발생된다.

유전상수는 진동수와 전도도에 비례하는 양으로, 전자기파의 매질 내 속도는

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

여기서, v : 전자기파의 매질 내 속도

c : 광속

ϵ_r : 유전상수

이 되고, 매질에 대한 파의 에너지 흡수율은 전도도에 비례한다.

매질 내 임의의 심도에서 파의 강도는

$$\text{여기서, } I = I_o e^{-\alpha x}$$

α : 흡수율

x : 심도

로 쓸 수 있다.

또한, 전자기파의 회절 때문에 심도가 깊어지면 분해능은 떨어지게 되는데 알려져 있는 분해능은 안테나에 수직방향으로 반파장이고, 수평 방향으로는

$$R_f = \sqrt{(\lambda r_o + 1/4x^2)}$$
이 되는데

여기서, λ : 파장

r_o : 측정 대상물의 심도

이다.

그러므로 파장이 짧으면 전체적인 분해능은 커질 수 있으나, 전자기파의 투과깊이는 파장에 비례하므로 낮은 심도밖에 조사할 수 없는 단점이 있고, 깊은 심도의 물체를 확인함에 있어서 신호처리에 문제가 발생할 수 있다. 반대로 전자기파의 파장이 길면 투과깊이는 증가하나 정밀도가 떨어진다. 그러므로 측정에 있어서 적당한 안테나의 선택은 중요한 문제이다.

2) GPR에 사용되는 유전상수

전자기파가 하나의 매질에서 다른 매질로 진행할 때 매질경계면에서 다음의 현상이 일어난다. 전자기파의 일부는 입사각과 동일한 각도로 되돌아가고 나머지는 굴절하여 계속 다른 매질로 진행한다. 이때 반사되는 전자기파의 절대크기(반사도)를 측정하고 흡수도를 측정할 수 있으면 상대 굴절율을 계산할 수 있고 따라서 유전상수를 측정할 수 있다. 매질의 유전상수를 알고 있다면 매질 내 전자기파의 진행속도를 계산할 수 있고, 전자기파를 발신한 후 수신될 때까지 걸린 시간을 측정하면 대상물의 심도를 계산할 수 있다. 그러나 현실적으로 지반이 균일하지 않기 때문에 반사도와 매질 내 전자기파 에너지의 흡수도를 동시에 측정한다는 것은 불가능하므로 특정 목적물까지 전자기파가 도달하는 시간을 측정하여 역으로 유전상수를 계산한다. 다시 말하면 GPR 비파괴 검사법에서 사용하는 유전상수는 진동수에 관계없이 전자기파의 속도에만 의존하는 항으로 전환된 것이다. 물리학적으로 상대 유전율을 결정하는 방법은 캐패시터를 만들어 측정하는 방법이 있으나 이는 현장에서의 측정매질과 동일한 상태로 유지하기 어렵고, 지반인 경우 측정 당시 지하수위나 여러 조건으로 인하여(지반의 함수율 등) 실험실에서 측정한 데이터를 바로 적용시키기는 어렵다. 역으로 심도를 알고 있는 대상물에 대해서 유전상수를 구할 수 있으면 매질의 상태를 어느 정도 유추할 수 있다.

① 매질의 유전상수

토목, 건축과 관련된 주요 매질에 대한 상대 유전상수는 다음과 같다.

【표 3.3.3】 매질에 따른 유전상수

매 질	유 전 상 수	매 질	유 전 상 수
공기	1	얼 음	4
금속	1	만년설	1.5
물	81	아스팔트	5
마른콘크리트	5.5	젖은 콘크리트	12.5
마른모래	4	젖은모래	15
포화된모래	25	마른 Loamy/점토질토양	2.5
마른광물/젖은토양	6	유기체 토양	64
젖은 모래질 토양	23.5	결빙토양/영구동토	6
표석점토	11	토탄층	61.5
마른 점토	4	젖은 점토	27

【표 3.3.3】 매질에 따른 유전상수(계속)

매 질	유 전 상 수	매 질	유 전 상 수
마른 모래와 자갈	5.5	언 모래와 자갈	5
마른 화강암	5	젖은 화강암	6.5
화산재	13	젖은 현무암	8.5
알칼리 광석	5.5	마른 보크사이트	25
섬장암 반암	6	석탄	4.5
마른 석회석	5.5	젖은 석회석	8
젖은 사암	6	젖은 염	6

위에서 보면 매질의 함수율에 따라 유전상수에 큰 차이를 보여 습윤 상태의 매질이 건조한 매질보다 유전상수가 커짐을 알 수 있다. 또한 모래와 사암은 전체적인 구성 물질은 동일하나 밀도에서 차이가 있으므로 공극률에 따라서도 유전상수가 변화됨을 알 수 있다.

3) 안테나의 측정 한계

① 안테나의 주파수에 따른 측정 한계

지반이나 구조물을 탐사하는 경우 적당한 안테나의 선택은 중요한 문제이다. 일반적으로 저주파일수록 지반에 대한 투과율이 좋고 동일한 진동수의 파장이라면 안테나의 출력이 큰 편이 지반 침투율이 좋아진다. 안테나의 측정 한계는 각 회사마다 다르며 본사에서 보유하고 있는 Zond-12e 에서 제공하는 자료에 따르면 주파수별 안테나의 측정심도는 다음과 같다. 단, 이것은 실험데이터로 절대적인 것은 아니며 매질에 따라 차이가 있다.

【표 3.3.4】 주파수별 안테나 특성

구 분	안테나						
Parameter	2GHz	900MHz	500MHz	300MHz	150MHz	75MHz	38MHz
Resolution(m)	0.06~0.1	0.2	0.5	1.0	1.0	2.0	4.0
Blind Zone(m)	0.08	0.1~0.2	0.25~0.5	0.5~1.0	1.0	2.0	4.0
Depth(m)	1.5~2	3~5	7~10	10~15	7~10	10~15	15~30

② 대상물의 크기에 따른 측정 한계(분해능)

안테나의 파장에 따라 전자기파의 투과 깊이에 한계가 있기 때문에 진동수가 큰, 즉 파장이 짧은 안테나를 이용해서 깊은 심도의 대상물을 탐사하기는 어렵다. 그러므로 깊은 심도의 대상물을 탐사하기 위해서는 긴 파장의 안테나를 이용해야 하는데 파장에 따른 안테나의 분해능은 다음과 같다.

㉠ 수평방향 분해능

수평 방향의 분해능은 첫 번째 Fresnel Zone의 0% 이고, 이를 알기 위해서는 Relative Permittivity를 알고 있어야 한다.

㉡ 수직방향 분해능

수직방향의 분해능은 반 파장으로서 다음과 같이 계산할 수 있다. 먼저 진동수에 따른 전자기파의 1파장에 소요되는 시간은 진동수의 역수로서

$$\lambda_t = \frac{1}{f_c} \times 10^9 (ns/s) \quad (ns)$$

이고, 특정 매질에서의 1파장의 길이는

$$\lambda_t = \frac{\lambda_t \times c}{10^9 (ns/s) \times \sqrt{\xi_r}} \quad (cm)$$

여기서, λ_t : 전자기파의 1파장 (ns)

λ_l : 매질 내에서의 1파장 (cm)

f_c : 진동수 (Hz)

c : 광속 (3.0×10^{10} cm/s)

ξ_r : 유전상수(상대 유전율)

로 나타낼 수 있으며 분해능은 파장의 반이므로 쉽게 유추할 수 있다.

【표 3.3.5】 진동수별 파장

진동수		1파장(ns)	매질 내에서의 1파장(cm)		
			공기중 (유전상수 1)	마른 사질토 (유전상수 4)	콘크리트 (유전상수 6)
2500MHz		0.4	1	2	10
1000MHz		1	30	60	300
500MHz		2	15	30	150
100MHz		10	1.22	24.5	122.5
MLF	80MHz(120cm)	12.5	375	187.5	153.1
	40MHz(240cm)	25	750	375	306.2
	32MHz(360cm)	31.25	937.5	468.8	382.7
	20MHz(480cm)	50	1500	750	612.4
	16MHz(600cm)	62.5	1875	937.5	765.5

③ GPR탐사의 문제점

GPR 장비는 전자기파를 단속적으로 발신하고 수신하는 장비로서 측정시간은 나노초(ns) 즉 10^{-9} 초의 단위를 사용한다. 그리고 매질경계면에서 반사도는 두 매질간 굴절율차에 의존하게 된다. 파의 성질상 지향성 안테나라도 어느 정도 각을 이루고 파를 송수신하게 되고, 특정한 방향에 대한 파의 세기는 거리에 따라 제곱 항으로 줄어들게 된다. 또한 파가 매질에 흡수되어 계획된 대로 심도를 구하지 못할 가능성도 있다. 이러한 문제점으로 인하여 데이터의 오분석이 발생할 여지가 많고, 어느 정도 측정대상물에 대한 정보를 알지 못하면 전혀 분석을 할 수 없을 경우도 발생하며, 매질 경계면에 따라서는 분석할 만한 반사파가 탐지되지 않는 경우도 발생할 수 있다.

㉠ 파의 회절

Bistatic 안테나의 경우 임의성을 가지므로 전자기파가 전 방향에 대해서 동일한 세기로 송출되고, Monostatic 안테나인 경우 지향성을 가지므로 특정한 방향에 대한 세기가 다른 방향보다 강하게 송출된다. 파는 매질을 통과하면서 그 일부가 매질에 흡수되어 세기가 점차로 줄어들게 되고, 또한 회절과 송신각 때문에 세기는 줄어들게 된다.

그러므로 파를 수신할 때 파의 세기를 일정한 시간 비율로 증폭하여 수신하게 되는데(GSSI사 제품만 그러하고 Zond-12e 제품은 수신할 때 증폭을 하지 않고 데이터 처리 과정에서 증폭을 한다.) 이 증폭률은 기기의 성능에 따라 다르다. 지하매설물이나 지층경계면이 존재한다고 예상되는 구역에 대해서 증폭률을 강하게 주어야 한다. 그렇지 않으면 구별하기가 어렵고 좋은 데이터를 수신하였다 하더라도 놓치기 쉽다. 그런데 수신된 데이터를 증폭하는 과정에 있어서 동일한 시각에 발신 안테나에서 송신된 파가 경로차에 의해서 동일한 매질에 있는 단일 지하매설물이나 지층경계면이 2개 이상 존재하는 것으로 보여질 수 있고 또한 이러한 시간차 때문에 서로 간섭을 일으켜 지층 또는 지하매설물을 구별하기가 어려울 때도 있다. 이 현상은 피할 수 없는 것이며, 데이터를 분석할 때 사전정보가 없다면 심도를 변화시키거나 증폭률을 변화시킨 데이터가 최소한 2개 이상이 있어야 분석할 수 있을 것이다. 이때 2개 이상의 데이터에서 공통된 부분을 찾는다면 증폭에 대한 오분석을 줄일 수 있으나, 그래도 너무 작은 반사파는 식별하기 어렵다.

㉡ 매질의 불균일성

매질을 진행하던 전자기파가 다른 매질로 입사하면 반사파가 생기는데, 이때 두 매질간 굴절률 혹은 유전상수 차에 의해서 반사파의 강도가 결정된다. 그런데 매질의 유전상수를 보면 금속과 공기, 물을 제외하고는 토층이나 구조물을 형성하는 매질인 모래, 아스팔트, 콘크리트, 점토, 자갈, 암석 등 대부분이 4~8 사이의 상대 유전상수를 가지고 있고 또한 물이라는 변수에 따라서 유전상수가 변하므로 반사파의 강도가 극히 미약할 수 있다.

또한 금속이라고 하더라도 표면에 피복이 되어 있거나 공기, 즉 공동이라고 하더라도 그 공동의 크기가 진동수와 비교하여 극히 작을 경우 반사파의 강도가 작게 된다. 또한 지층 경계면도 마찬가지로 구별하기 어려울 수 있다. 더욱이 지층 경계면은 단단한 암반인 경우를 제외하고는 경계면이 선으로 형성되는 것이 아니고 한 매질에서 다른 매질로 천천히 전이하고 유전상수도 매질경계면에서 천천히 변하므로 더욱 구별하기가 어렵다. 그러므로 이 경우 지하매질물이나 지층은 반사도 보다는 오히려 그 반사패턴으로 구별하는 것이 용이하다. 그러나 이는 사전에 어느 정도 조사된 자료가 있어야 효율적이다. 그리고 다분히 경험에 의할 수밖에 없다. 예를 하나 들면 지하에 매설되어 있는 콘크리트 관은 이 관에서 반사되는 반사강도보다 관내의 공간에 대한 반사 패턴으로 구별할 수 있다.

㉞ 수분

지하에 있는 매질 중 그 상대 유전상수차가 가장 큰 것은 물이다. 물이 지하나 지표에 있는 경우, 반사파의 강도가 상당히 크고 또한 큰 반사파는 안테나에서 다시 반사되어 연속 반사를 이룬다. 그러므로 물이 존재하는 경우, 이것이 지표에 있으면 물 하부에 대한 정보는 얻기 어렵다. 그러나 지하에 있는 경우에는 반사파의 강도가 크지 않으므로 물 하부에 대한 정보도 얻을 수 있다. 그러므로 지하에 지하수가 존재하는 경우는 탐사가 가능하다.

그리고 수분이 다량 함유되어 있거나 포화 상태인 매질 내에서의 지하매질물 탐사는 수면 반사 때문에, 그리고 염분이 함유된 물인 경우 파의 세기가 급격함으로써 측정이 어렵다. 그런데 지하수는 물이 단속적인 면을 이루고 있지 않고 주변 매질에 흡수되게 된다. 그러면 매질에 대한 유전상수가 매질의 유전상수에서 물의 유전상수로 선형적으로 변화하게 되고 이 경우 매질 경계면이 모호해져 탐사가 어려워진다.

콘크리트 구조물의 경우, 토층과 콘크리트가 오랜 기간 접촉되어 있어 콘크리트의 함수율이 높아지면 그 경계를 찾기가 어렵다. 이 경우 구조물의 경계면 보다는 구조물내의 철근 반사를 이용하여 구조물을 확인한다.

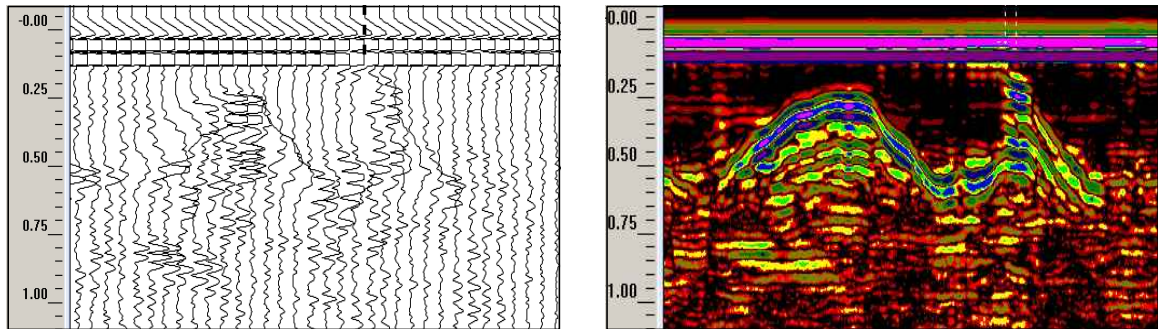
㉟ 표면반사

GPR 비파괴 시험법을 현장에서 적용하면 대부분의 표면 반사는 유전 상수가 크면 반사가 커지나 경우에 따라서 표면 반사가 매우 강한 경우가 있다. 이는 표면의 마감상태에 따라서 달라지는데 표면에 물이 있거나 유리, 대리석, 또는 이와 유사한 매질에 의해 표면이 매끈하게 처리된 표면의 반사는 매우 강하다.

표면 반사가 심한 경우 전자기파의 반사량이 투과량에 비해서 매우 크기 때문에 표면 하부의 상태가 전혀 측정이 불가능한 경우도 있고, 또한 표면 반사 강도가 크다는 것은 투과파의 파장이 작다는 것이므로 측정 심도가 더욱 작아질 수 있다. 이 경우 과도하게 신호를 증폭해야 하기 때문에 오분석의 소지가 많다.

3.3.3 자료 분석

GPR 자료에서 수평축은 안테나의 이동거리를 나타내고 수직축은 전자기파의 이동시간을 거리로 환산한 심도를 나타낸다. 나타난 색상은 전자기파가 매질경계면에서 반사된 반사강도를 나타내는 데 반사강도의 크기에 따라 색깔로서 나타내게 된다. 그런데 그 반사강도는 우리가 조절을 해줄 수 있는 양이므로 색상이 중요하다고 보다는 인접부분과의 색상차이, 즉 반사강도 차이가 중요하다.



【그림 3.3.1】 GPR 단면도 예 (좌 : 위글표시, 우 : 색상표시)

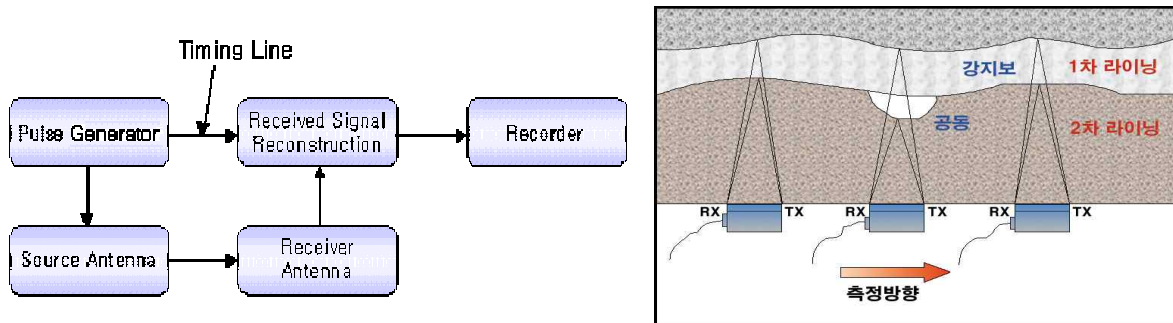
터널라이닝에 지보재나 공동이 존재한다면 이것은 포물선 형태로 나타나지만 지보재는 일정한 간격으로 설치하는 것이 보통이므로 일정한 간격을 유지하고 있는 것을 지보재로, 그 이외의 것과 축선방향으로 길이가 긴 것을 공동으로 분류할 수 있다. 이는 시공상황과 주변 상황을 고려하여 판단하여야 한다. 그러나, 라이닝에 철근이 배근되어 있다면 철근의 강한 반사 신호로 인하여 철근 배면의 작은 공동이나, 지보재등 배면의 많은 신호는 철근의 신호에 가려지게 된다. 한편 라이닝과 암반 경계면은 그 경계가 완전 밀착되었다면 두 매질의 유전상수 차이가 크지 않으므로 반사강도가 크게 측정되지 않는다. 그런데 밀착상태가 불량한 경우에는 이 경계가 명확해지는 경향이 있다.

가. 콘크리트 라이닝 두께

콘크리트 라이닝 내부의 경계면 즉, 라이닝과 스폿크리트의 경계면은 연속적인 반사면으로 작용하여 전자파를 반사시키므로 반사 신호의 왕복도달시간으로 라이닝의 두께를 알 수 있다. 그러나 기본적으로는 라이닝과 스폿크리트의 상대유전율이 4~8로 매우 비슷하기 때문에 각 경계면들이 잘 밀착되어 있고 함수율의 변화가 미미하다면 각 경계면에서의 반사강도가 크지 않아 그 경계면을 탐지하기가 매우 곤란하다. 그러나 경계면들 사이에 공동 또는 경계면의 들뜸현상 및 함수율의 급격한 변화 등 에너지를 많이 반사시켜주는 이상대(anomalous zone)가 존재하면 경계면은 쉽게 탐지될 수 있다. 대부분 터널의 탐사에서는 이러한 현상을

이용하여 콘크리트 라이닝의 경계면을 탐지하고 라이닝의 두께를 분석한다.

결론적으로 라이닝과 숏크리트의 경계면에서 전술한 이상대가 존재하면, 대부분 쉽게 탐지된다. 그러나 라이닝과 숏크리트는 에너지반사율에 가장 큰 영향을 미치는 상대유전율이 비슷하고 (암반:4~7, 콘크리트:6~8) 함수비의 변화가 거의 없고 투과하던 에너지의 대부분이 감쇠, 반사 및 회절현상으로 라이닝과 암반의 경계면에 도달하는 에너지가 미미하다면 탐지가 매우 곤란하다.

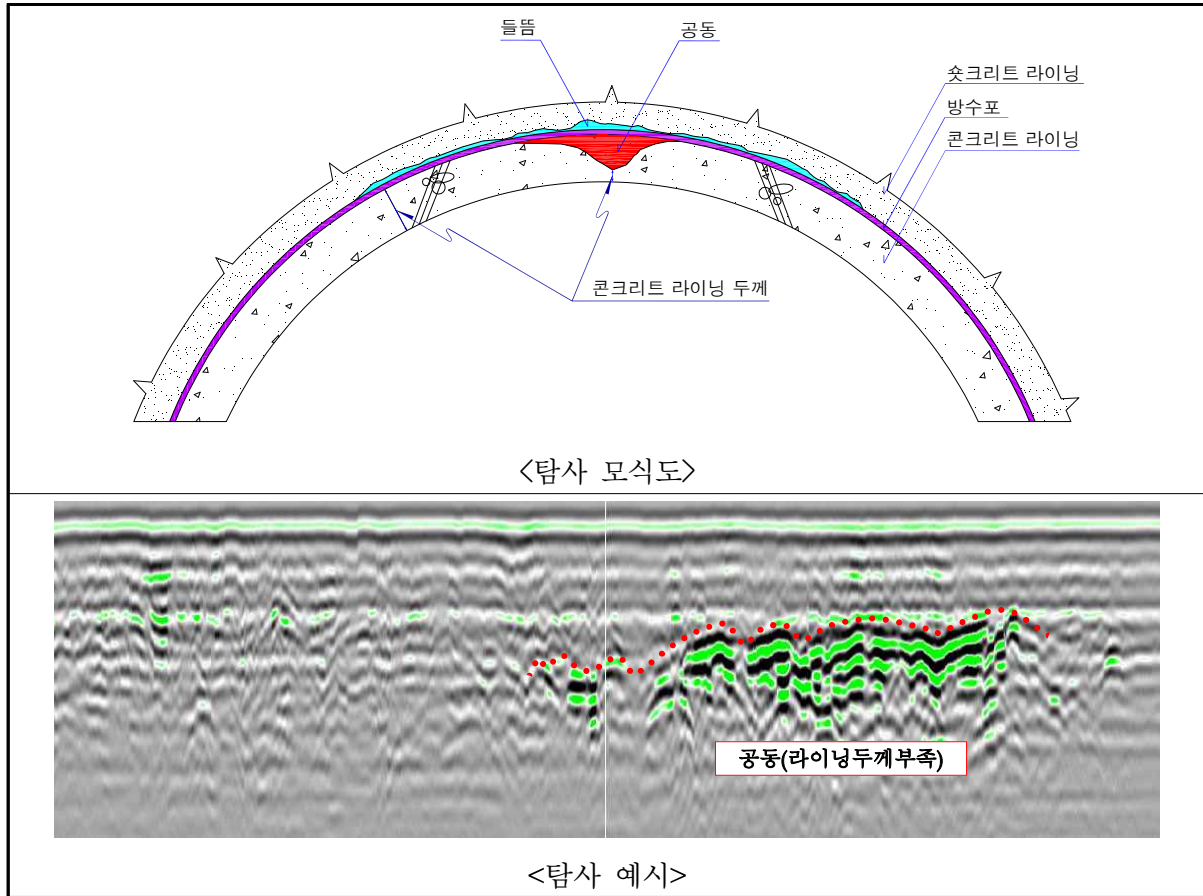


【그림 3.3.2】 GPR의 기본 신호처리 시스템 및 탐사 모식도

나. 공동(라이닝 두께부족)

GPR 단면도 상의 포물선형태 시그널은 지하매설물 및 터널 라이닝 배면의 공동파악 조사에 중요한 단서를 제공한다. 지반의 다짐상태나 지반 상부의 측정조건이 불량할 경우 반사파가 교란되어 피사체의 위치 및 규모, 상태 등을 정확히 판단하기에 어려움이 있을 수 있으며, 이 때는 기타 참고 자료등과 비교하여 위치를 유추해야 한다. 공동(라이닝 두께부족)이 콘크리트 라이닝 내에 존재한다면 공동(라이닝 두께부족)에서 반사되는 신호는 다음과 같은 양상을 나타내고 이와 같은 특징을 이용하여 손상구간을 탐지한다.

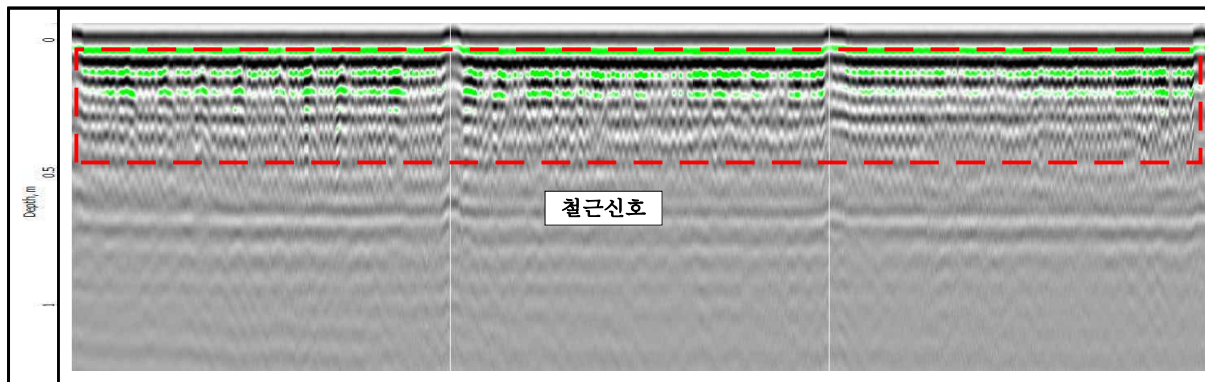
- 상부 경계면에서의 강한 반사 신호.
- 콘크리트보다 3배 빠른 다중 반사 신호.
- 공동양 끝단에서의 회절신호.
- 불규칙한 공동경계면에서 많은 산란 회절신호.
- 공동(라이닝 두께부족)은 전자기적으로 매우 균질한 전파매질이고 공동(라이닝 두께부족)에서 전자파의 속도가 빠르므로 공동자체의 깊이에 따라 약간의 차이는 있지만 반사파가 중첩되어 나타난다.



【그림 3.3.3】 라이닝 탐사 모식도 및 예시

다. 철근

철근은 콘크리트와 전기적 물성의 차이가 큰 탐사대상체로, 철근의 끝단에서 회절신호가 합쳐지면서 포물선 모양의 반사 신호가 매우 강하게 나타나며, 동일한 모양의 다중 반사 신호를 나타내므로 쉽게 탐지가 가능하다.

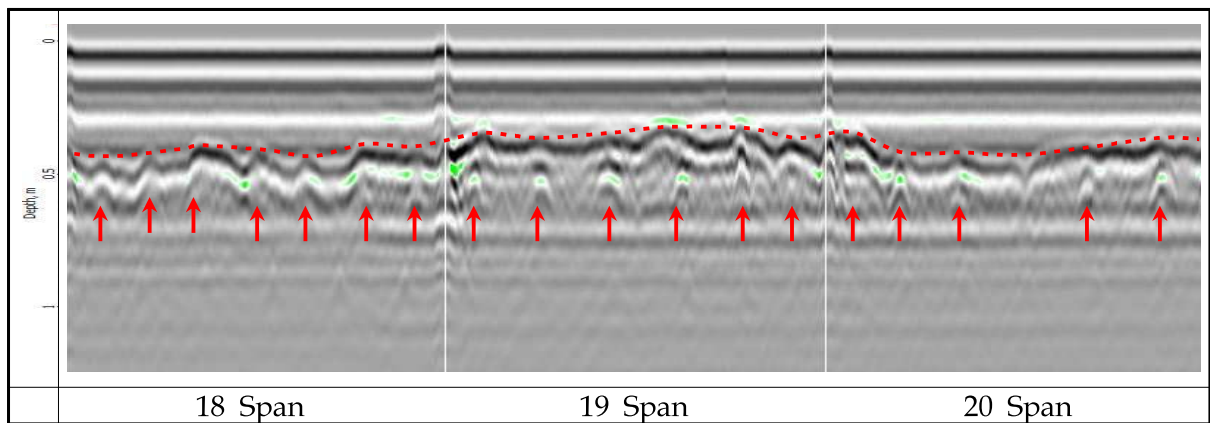


【그림 3.3.4】 철근신호 예시

다. 강지보공(Steel-Rib)

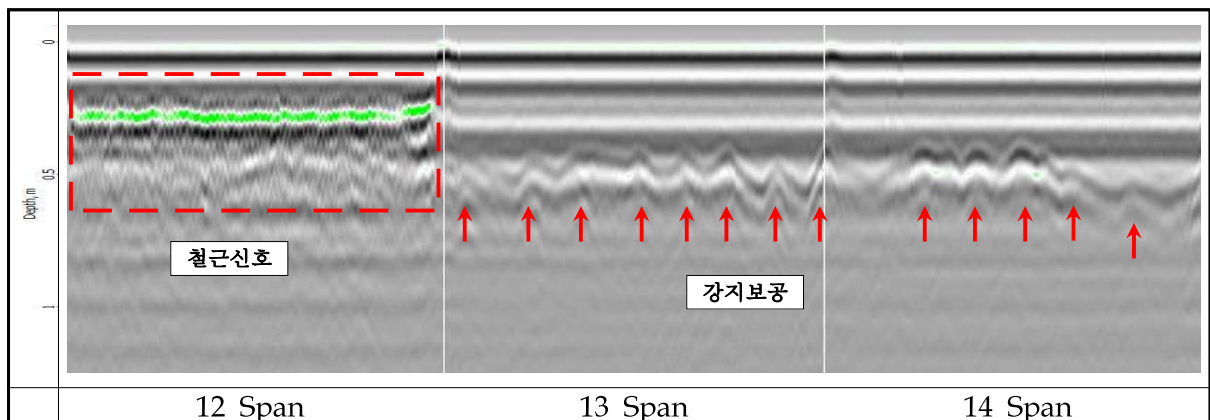
강지보공은 터널 라이닝의 재료들 중에서 철근과 함께 콘크리트와 전기적 물성의 차이가 가장 큰 탐사대상체이다. 강지보공의 끝단에서 회절신호가 합쳐지면서 포물선 모양의 반사 신호가 매우 강하게 나타나며 동일한 모양의 다중 반사 신호를 심도에 따라 1~2회 정도 나타내므로 쉽게 탐지가 가능하다. 그러나 표면으로부터 심도가 깊다든지 주변매질이 물로 포화되어 있으면 쉽게 탐지되지 않는 경우도 종종 있다.

다음은 강지보공의 탐사 예시로 포물선 형태의 강지보공 신호가 잘 나타나 있으며, 포물선 상단을 따라 라이닝 경계가 탐사되었다. 이와 같이 지보공의 신호가 잘 탐사되면, 그 신호를 따라 라이닝 경계면도 뚜렷하게 나타나게 탐지된다.



【그림 3.3.5】 강지보공 탐사 예시

아래그림은 터널의 라이닝을 탐사한 신호로써, 강지보공의 신호가 잘 나타나 있으나, 철근 신호가 탐지된 구간에서는 강지보공의 신호가 탐지되지 않았다. 이는 철근에서 대부분의 신호가 회절현상으로 반사되어 하부의 신호가 약해지기 때문에 철근보강구간에서는 라이닝 두께 및 배면의 상태를 확인하기 어렵다.



【그림 3.3.6】 철근 및 강지보공 탐사 예시