

지하레이이다(GPR)를 이용한 터널 라이닝 비파괴시험에 관한 연구

김영근¹⁾ · 이용호²⁾ · 정한중³⁾ · 신상범⁴⁾ · 조철현⁵⁾

Non-Destructive Test for Tunnel Lining Using Ground Penetrating Radar

Y. G. KIM, Y. H. LEE, H. J. JEONG, S. B. SIN and C. H. CHO

ABSTRACT It is necessary to estimate the soundness of tunnel using non-destructive tests(NDT) for effective repairs and maintenances. But, the state of tunnel lining could not be investigated using previous non-destructive techniques, due to the various types of support and accessibility only from one side in tunnel lining. Recently, the various non-destructive techniques such as ground penetrating radar (GPR) have been researched and developed for inspection of tunnel lining. In this study, the usefulness and applicability of GPR test in tunnel lining inspection has been investigated through model tests and tunnel site application. This paper described the tunnel lining inspection for lining thickness, cavity and support using GPR test. From the results of tests, we have concluded that GPR test are very useful and effective techniques to look into the interior of lining and measure the lining thickness.

1. 서 론

구조물이 점점 노후화됨에 따라 구조물에 대한 효과적인 조사·진단이 매우 중요하며, 이때 구조물에 손상을 주지 않는 비파괴 조사기술이 요구되고 있다. 특히 노후화된 터널의 효율적인 유지·보수를 위해서는 비파괴시험을 이용한 터널 라이닝의 전전도를 평가하는 것이 필수적이라 할 수 있다. 그러나 터널과 같은 지하 구조물에서 터널 내부에 대한 조사 및 평가는 어려워, 전전도 및 내구성 평가는 외관조사에 의한 경험에 의존하고 있어 아직까지 체계적인 조사·진단기법이 확립되어 있지 못한 실정이다.

또한 터널 현장시험시 한쪽면에서만 접근할 수 있고, 조명과 환기 설비 등으로 인해 비파괴기술이 매우 제한적으로 사용되어 왔다. 또한 터널라이닝은 롤볼트, 속크리트, 와이어 매쉬, 강재지보 그리고 콘크리트 등과 같은 여러 종류의 지보재가 복잡하게 설치되므로 이의 정확한 조사는 매우 어려운 실정이다. 그리고 터널 라이닝 내부에 존재하는 공동과 지반과 라이닝사이 배면 공동의 존재는 터널 안정성에 심각한 영향을 미치므로 이에 대한 조사는 매우 중요한 비파괴 조사항목이 되고 있다.

최근 다양한 비파괴 조사법 중 전자파레이이다를 이용

한 지하레이이다(Ground Penetrating Radar, GPR)기법이 터널 라이닝 배면공동조사 등에 적용되고 있으며 이에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다.

본 연구에서는 터널에서의 보다 효율적인 비파괴 조사·진단기법을 구축하기 위하여 전자파 레이다법인 GPR을 터널 라이닝 비파괴 조사에 적용하고자 하였다. 이를 위해서 다양한 비파괴 모델시험체를 제작하여, GPR 모델시험을 실시하고 측정자료를 분석하므로서 GPR 시험의 정밀도 및 정확도를 검증하고자 하였다. 또한 실제 터널현장에서 라이닝에 대한 GPR 시험을 수행하여 본 기법의 터널에서의 적용성을 평가하고자 하였다.

2. 터널 비파괴 조사

터널의 변형(deformation)은 노후화된 콘크리트 라이닝의 열화 뿐만 아니라 지압, 누수 등과 같은 구조적 요소에 의해서 발생한다. 터널 라이닝의 변형상태는 Fig. 1에서 보는 바와 같다(Asakura *et al.*, 1991).

- 1) (주)대우건설기술연구소, 선임연구원
- 2) (주)대우건설기술연구소, 주임연구원
- 3) (주)대우건설기술연구소, 토목연구실장
- 4) (주)아주지오엔지니어링, 조사진단부
- 5) 지하기술정보, 대표(공학박사)

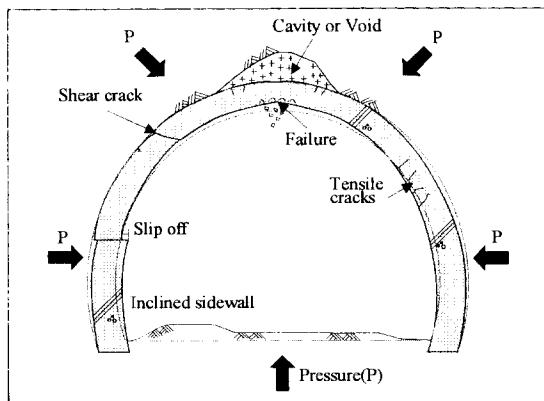


Fig. 1. Deformation of tunnel lining

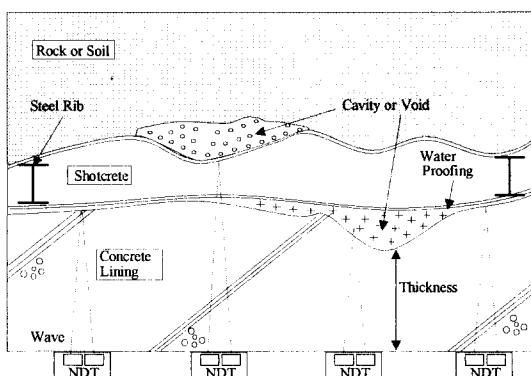


Fig. 2. Principle of NDT in tunnel lining

터널 라이닝에 대한 비파괴 조사에서는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 라이닝의 두께, 라이닝 내부 및 배면에 존재하는 공동의 크기 및 깊이 그리고 롱볼트, 강지보재와 같은 터널 지보재의 존재를 조사·탐지할 수 있어야 한다.

최근 국제터널협회(ITA)를 중심으로 터널의 효율적인 유지·보수를 위하여 터널라이닝 비파괴 조사기술이 연구되어 왔다. Table 1은 터널라이닝 조사를 위한 다양한 비파괴 조사기술의 장단점이 정리되어 있다(Haack *et al*, 1995).

3. 지하레이이다(GPR)

3.1 측정원리

GPR 시험은 송신안테나로부터 방출된 전자기파의 전자기적 물성이 다른 물체를 만나 반사되어 돌아오는 신호를 수신 안테나에서 탐지하고, 이를 처리하여 해석

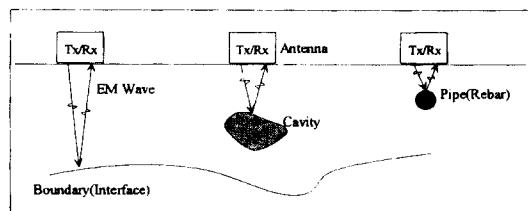


Fig. 3. Principle of GPR test

Table 1. NDT technique for tunnel inspection

비파괴 조사기법	적용성	문제점	이 점
起振機 Mechanical Oscillation	공진법	Very low	벽면 ¶凸 , 불균질암반, 수위변동
	진동반사법	Low	속도, 정도
	미진동 및 AE 해석법	Very low	재현성, 정도
	초음파	Very low	지질조사 병용, 불균질성
放射線 Radiation	γ선 후방산란법	Very low	측정속도, 측정심도
	중성자 후방산란법	Low	측정속도, 측정심도
電氣 및 電子 Electric & Electronic	渦動전류법	Low	측정속도, 측정심도, 비전도체
	레이이다법	High	평가방법, 금속피복 반사
	전위법	Low	측정속도, 측정심도
光學 Optical	Infrared thermography	Very high	터널환경, 막장의 열방사 공동, 누수, 균열, 빠른 속도
	Multispectral Analysis	High	속도, 진동, 강력 광원필요, 측정심도, 평가방법

하고 단면도로 작성하는 과정이라 할 수 있다(Fig. 3). 전자기파는 송신안테나로부터 송출되어 전자기적 물성 차이를 갖는 물체를 만날 때까지 진행한다. GPR 시험에서 고려되는 주된 전자기적 물성은 유전율(dielectric permittivity)과 전기전도도(electrical conductivity)이다.

전자기파의 전파는 각각의 주파수에 대해서 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P(\omega) = e^{-\alpha(\omega)x - i\beta(\omega)x} \quad (1)$$

또한, 속도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$v = \frac{\alpha}{\beta} \approx \frac{c}{\sqrt{\epsilon}} \quad (2)$$

여기서 c 는 진공에서 전자파속도(빛의 속도)이다. 식 (2)으로부터 전기전도도와 주파수가 높을수록 전자파 신호는 지수함수적으로 감소함을 알 수 있다. 즉 주파수가 높을수록 감소가 심하여 투과심도-조사가능 심도가 낮아진다. 한편 파동의 속도와 파장 및 주파수의 관계는 다음과 같다.

$$v = f \cdot \lambda \quad (3)$$

따라서 주파수가 높을수록 파장이 짧아 작은 규모의 이상체를 탐지해 낼 수 있는 분해능이 높아진다. 파장이 짧아지면 미세한 매질특성의 변화나 이상체를 설명하게 식별할 수 있는 반면에 투과깊이는 감소한다. 반대로 파장이 길어지면 탐사깊이는 증가하나 설명도가 떨어진다. 이로부터 조사 심도와 조사 분해능은 서로 상반의 관계에 있음을 알 수 있다.

강자성체가 아닌 일반 매질에서 전자기파 진행속도는 주로 매질의 유전율에 의존하며, 반사파의 진폭 역시 이 웃하는 두 매질의 유전율의 상대적 차이에 따라 달라진다. 반사파의 진폭은 반사계수 R 에 의해 영향을 받으며

$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}} \quad (4)$$

$$T = 1 - R \quad (5)$$

의 관계에 있다. 여기서 T 는 투과계수이며, ϵ_j 는 j 매질의 유전율을 진공에서 유전율로 정규화한 유전상수이다. 식(4)의 반사계수는 원래 총 에너지에 대한 반사 전자기파 에너지 강도의 비율을 의미하고, 식(5)의 투과

계수는 표면으로 되돌아 오지 않고 매질 내부로 전달·확산되어 소산되어 버리는 파에너지의 크기를 나타내는 척도가 된다.

위의 식으로부터 유전상수의 대비가 큰 물질은 매우 잘 탐지될 수 있음을 알 수 있다. 즉 구조물 내부의 공동이 존재하여 있을 경우 주변 물질과 공기의 유전율 차이가 크므로 뚜렷한 반사신호를 얻을 수 있다. 그러나 이러한 반사체의 배면에 있는 또 다른 이상체는 식 (5)에 보이듯이, 이미 앞서의 반사에너지가 크므로 투과 에너지가 작고 따라서 반사될 에너지가 미약하기 때문에 탐지가 곤란하다.

3.2 자료 분석방법

3.2.1 속도 결정

GPR 시험에서 측정되는 자료는 시간기록이다. 그러나 해석결과로서 알고자 하는 것은 구조물 내부의 공간적인 물성변화이므로, 자료의 분석은 깊이를 기준으로 수행된다. 따라서 GPR 자료의 분석은 우선 전파속도의 결정에서 시작된다. 속도의 결정방법에는 직접 비교법, 회절점 근사법, CMP(common mid-point)법, 표면 전파법, 기존 자료 이용법 등이 있다.

현장측정 방법이 용이치 못할 경우, 여러 물질의 물성이 정리된 문헌으로부터 유전상수를 선택하여 속도를 추정할 수 있다. GPR 시험에서 흔히 접하게되는 물질의 유전상수를 Table 2에 정리하였다.

3.2.2 자료 제시

GPR 자료는 지표면이나 구조물의 내부에서 반사된 신호의 조합이다. 반사신호는 구조물 내부의 물질간의 전자기적 물성차이에 대한 정보를 지니고 있는 신호의 크기와 이러한 신호가 발생한 위치정보를 지니고 있는 반사 시간으로 구성되어 있다. 이러한 자료를 해석하기 위한 제시법은 크게 색상단면 제시법과 위글트레이스(wiggle trace) 제시법이 있다.

Table 2. Dielectric constant of material

재료	유전상수	재료	유전상수
공기	1	암석/암반	4~10
물	80~81	도로포장체	5~10
해수	81	접성토	4~16
금속	1~2	사질토	4~25
얼음	3~4	실트	9~23
동결토	3~6	빙적토(Till)	9~25
콘크리트	4~10	유기토(Peat)	50~78

3.2.3 신호 처리

자료의 처리 과정은 이득 조절(gain control), 필터링(filtering), 디콘(deconvolution), 뮤팅(muting) 및 헤더 수정(header editing), 구조보정(migration), 심도변환(depth conversion), 칼라 테이블 및 트랜스폼(color table & transform), 고도 보정(top surface normalization), 수평 내삽(horizontal scaling) 등이 있다.

4. 비파괴 모델시험

4.1 모델 시험체 제작

모델시험체는 터널 라이닝을 나타내기 위해 콘크리트로 만들어진 4개의 모델로 구성되어 있다. 전체 모델시험 부지의 크기는 $1200 \times 1500 \text{ cm}$ (길이×너비)이고, 각각의 모델 크기는 $1200 \times 300 \text{ cm}$ 이다.

Model I은 터널 라이닝 두께를 조사하기 위한 것으로 평면도 및 단면도가 Fig. 4(a)에 나타나 있다. 라이닝 두께는 20 cm에서 100 cm까지 변화하고 오른쪽은 경사져 있다.

Model II는 터널 라이닝 내부 및 배면에 있는 공동을 조사하기 위한 것으로 평면도 및 단면도가 Fig. 4(b)에 나타나 있다. 공동은 두께 20 cm의 $10 \times 10 \text{ cm}$ (가로×세로), $20 \times 20 \text{ cm}$ 그리고 $30 \times 30 \text{ cm}$ 의 직육면체로 라이닝 두께는 30 cm이다. 중앙의 경우 공동은 $10 \times 10 \times 20 \text{ cm}$, $20 \times 20 \times 20 \text{ cm}$, $30 \times 20 \times 20 \text{ cm}$ 의 직육면체로 라이닝 두께는 60 cm이다. 그리고 오른쪽의 경우 공동은 중앙의 경우와 마찬가지이며, 라이닝 두께는 90 cm이다. 공동은 아크릴 판으로 제작되었다.

Model III는 터널 지보재와 공동을 조사하기 위한 것으로 평면도와 단면도는 Fig. 4(c)에서 보는 바와 같다. 이 모델은 실제 터널 공사에서의 같은 지보재를 사용하여 속크리트 타설, 와이어 매쉬 록볼트 그리고 콘크리트 라이닝 시공의 순서에 따라 제작되었다. 왼쪽의 경우는 콘크리트 타설불량에 의한 라이닝 단면부족을 모델링 한 것으로 공동의 두께는 0 cm에서 20 cm까지 변하도록 되어 있다. 라이닝 밑에는 1차 및 2차 속크리트, 그 사이에 와이어 매쉬 그리고 록볼트가 1 m 간격으로 시공되어 있다. 오른쪽의 경우 발파에 의한 여굴을 모델링 한 것으로 라이닝 밑에는 1차 및 2차 속크리트,

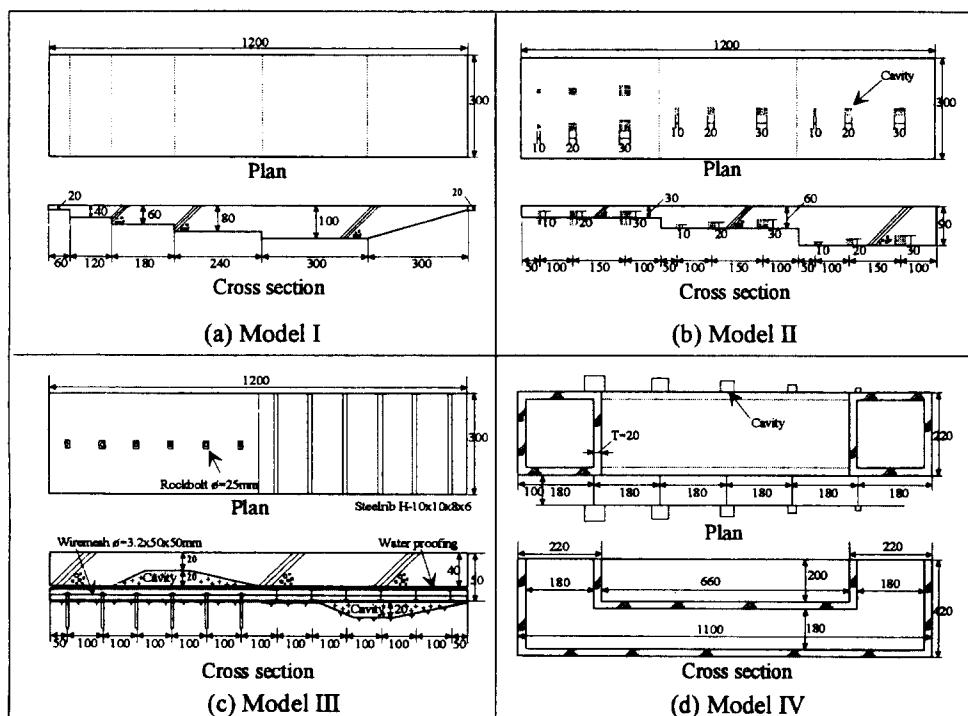


Fig. 4. Model for GPR test

Table 3. Non-destructive model test

모델명	시험 범위
Model I	• 배면과 밀착된 라이닝의 두께 변화
Model II	• 배면과 밀착된 라이닝의 두께 변화 • 라이닝 내부 공동 크기 변화에 따른 반응 • 배면 이상체 및 크기 변화에 따른 반응 • 지하수(물) 영향
Model III	• 라이닝내 공동 크기 변화에 따른 반응 • 지보재(Rockbolt 및 Steelrib) 반응 • 배면공동 크기변화에 따른 반응
Model IV	• 종합적인 실제 터널에서의 시험 (천단, 측벽) • 철근 콘크리트 영향 • 라이닝배면 밀착 및 떨어진 공동 반응 • 라이닝배면 공동의 크기변화 반응

그 사이에 와이어 매쉬 그리고 H-형 강지보재가 1 m 간격으로 시공되어 있다.

Model IV는 터널 라이닝 뒤의 배면공동을 조사하기 위한 것으로 실제터널과 같이 박스구조물이 지반중에 시공되어 있으며 평면도 및 단면도가 Fig. 4(d)에 나타나 있다. 라이닝 두께는 20 cm로 철근이 20 cm 간격으로 배근되어 있다. 터널주변에는 다양한 크기의 공동들이 라이닝 벽면에 밀착 또는 1 m 떨어져 매설되어 있다.

4개의 모델 모두 지반과 콘크리트 라이닝 사이에는 방수포가 시공되어 있으며, 타설된 콘크리트의 압축강도는 평균 210 kg/cm^2 이다.

각각의 비파괴 모델시험체의 시험목적은 Table 3에 정리되어 있다.

4.2 시험장비 및 시험방법

본 시험에 사용된 GPR 장비는 미국 GSSI사의 SIR (Subsurface Interfacing Radar) System 2로서 시스템의 구성도가 Fig. 5에 나타나 있다. 본 장비는 사용 목적으로 따라 적정한 주파수 특성을 나타내는 안테나를

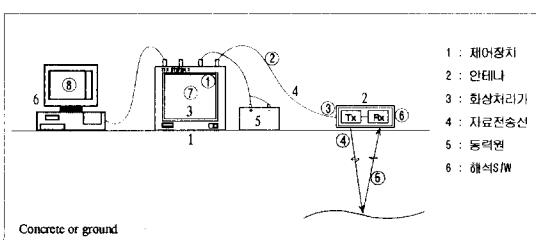


Fig. 5. Diagram of SIR-2 System

Table 4. Antenna used in model test

중심주파수 (MHz)	송수신기 배열 및 차폐 여부	사용 목적
900	• 송수신기 일체형 • 차폐	• 공동 탐지 • 2차 라이닝 두께 측정 • Rockbolt 및 Steelrib 및 Steelrib 탐지
500	• 송수신기 일체형	• 공동 탐지
400	• 차폐	• 1차 및 2차 라이닝 두께 측정 • Rockbolt 및 Steelrib 탐지 • 배면공동/이상체 탐지 • Bistatic 안테나 사용의 이점 확인



Fig. 6. View of GPR model test

사용하는 범용장비이다. 각 사용 목적에 따른 안테나 설정을 Table 4에 정리하였다. 본 시험에 사용된 안테나는 터널라이닝의 두께 범위인 30~100 cm를 탐지할 목적으로 선정되었다. Fig. 6에는 GPR 장비를 이용한 비파괴 모델시험장면이 나타나 있다.

4.3 GPR 시험결과

4.3.1 Model I

○ 안테나

중심주파수가 각각 900 MHz, 400 MHz인 Monostatic 안테나를 사용하였다.

○ 측정 변수

• 기록 시간: 35 ns • 측정 방법: Encoder 측정 (Survey wheel)

○ 결과 해석

Fig. 7에는 GPR 측정단면이 나타나 있으며, 유전상 수는 7.5로 계산되었다. 두께 20 cm의 지점의 변화 상

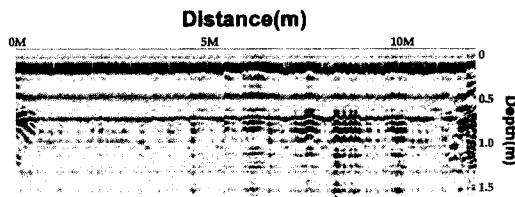


Fig. 7. Result of GPR test in Model I (400 MHz Antenna)

황과 라이닝 경사면의 끝부분에서는 경사의 반응이 나타나고 있지만 두께 40 cm 이상의 변화 상황은 나타나지 않았다.

4.3.2 Model II

○ 안테나

중심 주파수가 각각 900 MHz, 500 MHz, 400 MHz 인 안테나를 사용하였으며, 배면공동 및 내부공동이 있는 위치에서 추가적으로 각 안테나에 대한 반응을 관찰하였다.

○ 측정변수

• 기록 시간: 35 ns • 측정 방법: Encoder 측정 (Survey Wheel)

○ 결과 해석

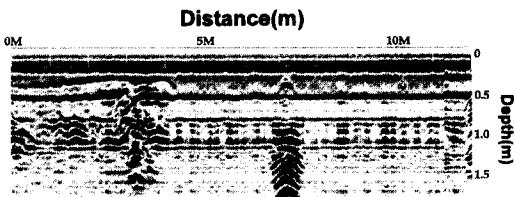


Fig. 8. Result of GPR test in Model II (400 MHz Antenna)

Fig. 8에는 Model II에서의 GPR 측정단면이 나타나 있다. 두께 30 cm의 지점의 라이닝 두께변화가 나타나고 있으며, 두께 60 cm 이하의 지반과 라이닝 경계면 반응은 나타나고 있지 않지만 물로 채워진 공동의 반응은 나타나고 있다. 특히 측정거리 7 m 지점의 반응은 매우 뚜렷이 나타났다. 측정거리 3 m 내외에서 보이는 반응은 측선에서 수평으로 떨어진 공동모형의 반응이다.

Fig. 9에는 배면이상체와 라이닝 공동에 물이 채워진 경우에 GPR 측정결과가 나타나 있다. 두 경우 모두 라이닝 두께반응은 나타나지 않았으며, 배면공동자료에서는 이상체반응이 3개 모두 나타났다. 또한 공동의 수평위치와 상대적인 심도는 파악 되었으나, 정확한 심도는 구분하기 어렵다. 이는 공동이 400 MHz 안테나의 전자기파 파장길이에 비해 너무 얕은 심도에 존재하기 때문인 것으로 추정된다.

4.3.3 Model III

○ 안테나

중심 주파수 각각 900 MHz, 500 MHz, 400 MHz 인 안테나를 사용하였으며, monostatic mode와 Bistatic mode를 사용하여 자료를 획득하였다.

○ 측정변수

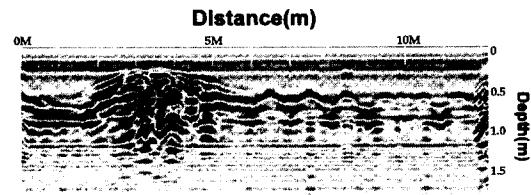
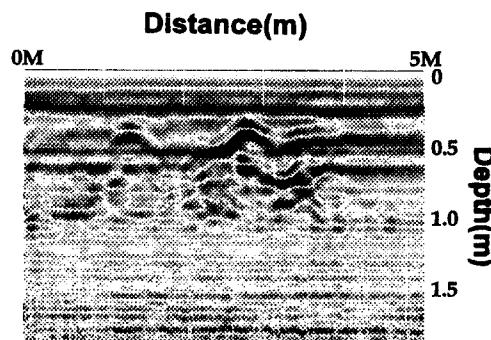
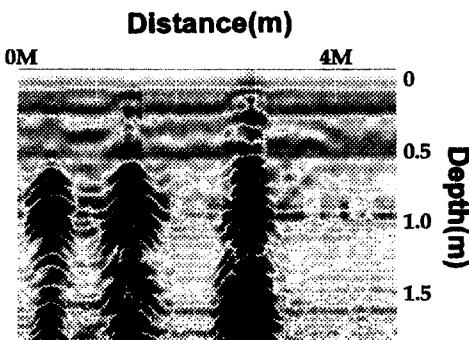


Fig. 10. Result of GPR test in Model III (400 MHz Antenna)



(a) 배면 이상체(스치로폼)의 반응



(b) 라이닝 공동에 물이 채워진 반응

Fig. 9. Result of GPR test for behind cavity(400 MHz Antenna)

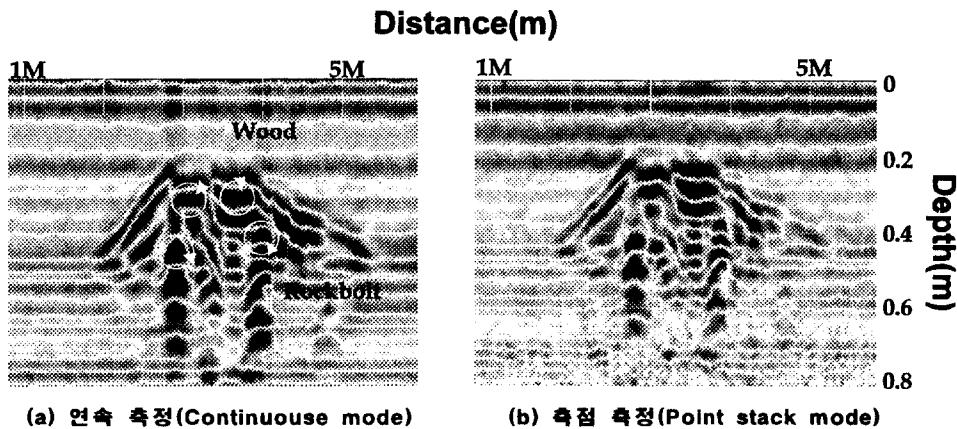


Fig. 11. Result of GPR test for cavity in lining (900 MHz Antenna)

- 기록 시간: 35 ns • 측정 방법: Encoder 측정
(Survey Wheel)

○ 결과 해석

Fig. 10에는 Model III에서의 GPR 측정단면이 나타나 있다. 라이닝 배면공동의 반응을 제외한 라이닝 내부 공동반응 및 강지보 반응이 모두 명확하게 나타났다.

Fig. 11에 라이닝 공동부에 대한 Model III에서의 GPR 측정단면이 나타나 있다. 라이닝 공동의 좌우경사를 포함한 형태 및 크기가 비교적 정확히 나타났으며, 바닥에 시공된 록볼트와 공동내에 설치된 나무에 대한 반응이 모두 명확하게 잘 나타났다.

4.3.4 Model IV

○ 안테나

중심 주파수 각각 900 MHz, 500 MHz, 400 MHz인

안테나를 사용하였다.

○ 측정번수

- 기록 시간: 20 ns • 측정 방법: 연속 측정
(Continuous Mode)

○ 결과 해석

Fig. 12에는 Model IV에서의 GPR 측정단면이 나타

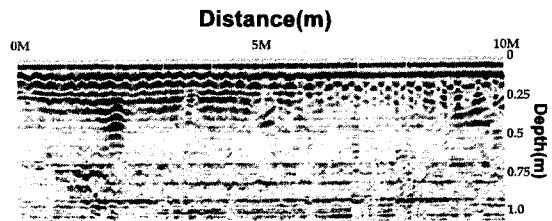


Fig. 12. Result of GPR test in Model IV(900 MHz Antenna)

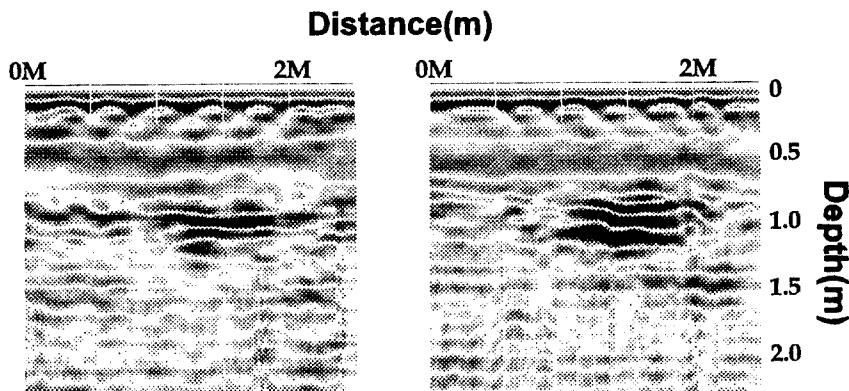


Fig. 13. Result of GPR test for cavity behind lining (900 MHz Antenna)

Table 5. Result of GPR model test

모델	시험 내용	GPR 시험 결과					
		20	40	60	80	100	경사
Model I	라이닝 두께(cm)						
	안테나(MHz)	900	×	×	×	×	×
Model II	내부/배면공동(cm)	20	20	20	10	20	30
	안테나(MHz)	900	○	○	○	×	×
Model III	라이닝 두께(cm)	30			60		90
	지보재/공동	20		20	30	10	20
Model IV	안테나(MHz)	900	○	○	○	×	×
	400/500	○	○	○	○	×	×
참조		40(숏크리트 두께 10 cm)					
		지 보 재		공 동			
		Rockbolt Steelrib		내부(20 cm)		배면(20 cm)	
		900	×	×	○	×	
		400/500	○	○	○	○	△
		20(철근콘크리트, 배근 간격 20 cm)					
		라이닝과 밀착		라이닝과 1 m 떨어짐			
		10	20	30	40	50	10
		900	×	×	△	○	×
		400/500	×	×	○	○	×
							○
		○측정 양호, △분석 가능, ×측정 불가					

나 있다. 철근이 반응이 뚜렷하게 나타났으며, 철근의 피복두께가 일정하지 않게 시공되었음을 알 수 있다. 또한 공동의 크기가 큰 순서로 3개 까지의 반응은 뚜렷이 나타났다. 네 번째 공동에 대한 반응은 위치상 공동의 반응으로 판단되지만 주변 철근의 반응과 명확히 구분되지는 않고 있다.

Fig. 13에는 라이닝배면과 떨어진 공동에 대한 GPR 측정단면이 나타나 있다. 라이닝과 50 cm 떨어져 있음에도 정확히 이상체의 존재를 파악할 수 있었다. 공동의 두께와 깊이에 따라 정성적인 반응의 차이를 보이고 있다.

이상의 전자파 레이다법인 GPR을 이용한 비파괴모델 시험결과는 Table 5에 정리되어 있다.

5. 터널 현장적용

본 연구에서는 GPR 시험의 터널에서의 적용성을 확보하고 측정결과에 대한 유용성을 검증하기 위하여 실제 터널현장에서 라이닝에 대한 GPR 시험을 실시하였다. Fig. 14에는 터널 라이닝 천단부에서 GPR 시험을 실시하는 장면이다.

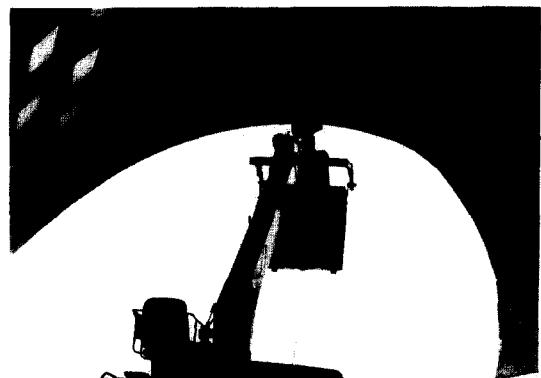


Fig. 14. View of GPR test in tunnel lining

5.1 지보재 및 라이닝 두께 반응

본 터널은 채래식 공법으로 시공된 것으로 강지보를 설치하고 콘크리트 라이닝을 1차, 2차에 나누어 타설하여 시공하였다. 조사된 측선은 터널 시공상 공동이 발생할 소지가 많은 천정부로 터널 길이 방향으로 전구간을 조사하였다.

- 사용 안테나: 400 MHz
- 기록 시간: 35 ns

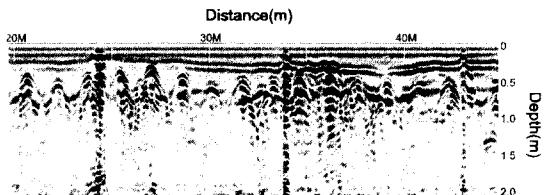


Fig. 15. Result of GPR test for support and lining thickness

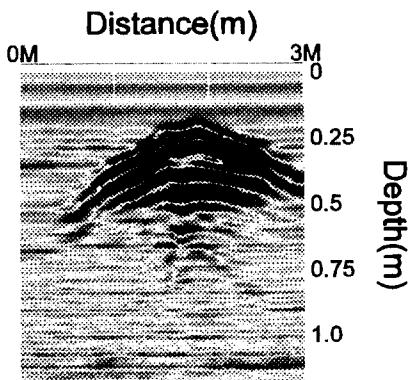
- 측정 방법: Encoder (Survey Wheel)

유전 상수는 지보재를 회절점으로 가정하여 회절점 분석법에 의하여 계산하였다. Fig. 15에는 지보재의 심도가 변화하는 구간의 자료를 제시하였다. 이 부근에서 계산된 유전상수는 6으로 비교적 작게 나타났다. 제시한 단면에서 1차 라이닝과 2차 라이닝의 경계가 전구간에서 나타나고 있으며 그 심도는 20~30 cm 범위이다. 이러한 경계가 뚜렷이 나타나는 것으로 보아 1차 라이닝과 2차 라이닝 사이의 틈이 많이 벌어져 있는 상태로 해석된다. 지보재의 반응도 약 1.4 m 간격으로 나타났다. 측정거리 34~36 m의 구간은 지보재의 심도로 보아 라이닝의 전체 두께가 다른 지점보다 얇은 것으로 판단된다.

5.2 배면공동 반응

본 터널은 NATM 공법으로 시공된 단선 터널 구간으로 2차 콘크리트 라이닝이 시공되어 있다. 조사는 터널 천정부에서 종방향과 횡방향을 나뉘어 수행되었으며, 횡방향 조사는 천정부 중심의 좌·우측으로 1.5 m씩 총 3 m 구간을 조사하였다.

- 사용 안테나: 900 MHz
- 기록 시간: 20 ns



(a) 배면공동 반응

- 측정 방법: 연속 측정(Continuous mode)

유전상수는 6으로 가정하여 심도변환을 수행하였다. Fig. 16(a)에는 터널 천정부 중심부로 갈수록 라이닝의 두께가 얕아지는 것으로 나타나고 있다. 이런 반응의 원인은 2차 라이닝 시공시 천단부에서 콘크리트가 덜 채워져 공동이 존재하기 때문으로 해석되었다. 이러한 구간은 터널의 안정성에 영향을 줄 수 있으므로 뒷채움 주입공법에 의해 총진하여야 한다. Fig. 16(b)에는 특이한 이상반응이 나타나지 않는다. 이는 1차 라이닝과 2차 라이닝이 비교적 밀착되어 있고 이들 사이에는 물성 차이가 거의 없으므로 반사층이 형성되어 있지 않기 때문으로 해석되었다. 즉 콘크리트 라이닝 타설이 양호하여 천단부 공동이 없는 구간이라 할 수 있다.

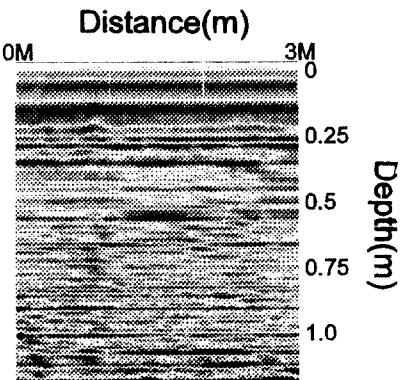
5.3 라이닝과 암반과의 경계반응 구간

본 터널은 NATM 공법으로 시공된 2차선 터널로 솟크리트와 2차 콘크리트 라이닝으로 시공되어 있다.

- 사용 안테나: 400 MHz
- 기록 시간: 35 ns
- 측정 방법: Encoder(Survey Wheel)

유전상수는 지보재를 회절점으로 가정하여 회절점 분석법에 의하여 계산하였다. 계산된 유전상수 값은 6으로 비교적 작게 나타났다.

Fig. 17에는 라이닝과 배면 암반과의 경계가 뚜렷한 구간의 GPR 측정결과가 나타나 있다. 전구간에서 라이닝과 배면암반과의 경계가 심도변화를 보이면서 잘 나타나고 있다. 이러한 반응들은 지보재의 심도 이후에서 나타나는 것으로 추정된다. 일부 구간에서는 배면이상 반응이 나타나고 있음을 알 수 있다.



(b) 라이닝 밀착반응

Fig. 16. Result of GPR test for cavity behind lining at crown

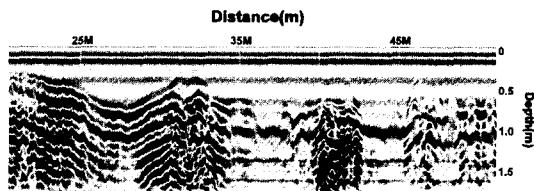


Fig. 17. Result of GPR test for boundary between lining and rock

6. 결 론

본 연구에서는 전자파레이디법인 GPR 시험의 터널에서의 적용성과 유용성을 평가하기 위하여 비파괴 모델시험과 터널현장 적용을 실시하였다. 이를 통해서 얻어진 결론은 다음과 같다.

1) 지보재 및 라이닝 두께변화 조사에는 주파수 400 MHz 안테나가, 천단부 공동조사에는 900 MHz 안테나가 유용하였다. 또한 측정거리에 따라 일정한 전자파를 발생시키는 encoder(survey wheel)의 사용이 권장된다.

2) 지보재 및 철근의 반응은 매우 뚜렷이 나타났으며, 그 간격 또한 정확히 파악할 수 있었다. 그러나 철근 콘크리트 라이닝의 경우 철근반응이 너무 강하여 배면에 존재하는 이상체에 대한 탐지력은 현저히 약화되었다.

3) 라이닝 배면공동의 존재도 효율적으로 조사할수 있었으며, 특히 물이 존재하는 공동은 공기로 채워진 공동보다 매우 강한 신호를 발생시키는 것으로 조사되었다.

4) 원지반과 밀착된 콘크리트 라이닝의 두께를 파악하는 데에는 매우 제한적으로 적용되어야 한다. 즉 원지반의 전자기적 물성이 콘크리트와 차이가 있어야 라

이닝 두께 파악이 가능할 것으로 판단된다.

5) GPR 시험은 비파괴기법의 일종으로 측정결과가 한계를 가질 수밖에 없음을 인식하고, 현장적용시 다른 비파괴 조사법 또는 코아링과 같은 직접법을 동시에 수행하는 것이 바람직하며, GPR 시험전 라이닝 콘크리트 상태(열화, 누수, 균열 등)와 주변지반상태(암종, 암질, 지하수 등)를 면밀히 확인한 후 조사에 임해야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. 김영근, 장정범, 정한중, 조철현, 1996, 터널라이닝 전 전도 평가를 위한 비파괴 조사법의 적용연구, 대한토목학회 학술발표회 논문집(II), pp.383-386.
2. 日本トンネル技術協会(JTA) 保守管理委員會, トンネルの新しい検査手法(1), トンネルと地下, Vol. 27, no. 8, pp.57-65, 1996.
3. 大島洋志, 吉岡修, コンクリート構造物への非破壊検査の適用例, コンクリート工學, Vol. 27, No. 3, pp. 89-92, 1989.
4. Asakura, T., Kojima, Y. and Onoda, S., 1991, Development of Reinforcement and Repair Methods for Railway Tunnel, QR of RTRI, Vol. 32, No. 3, pp.163-173.
5. Haack, A. J. Schreyer and Jackel G., 1995, State-of-the-art of Non-destructive Testing Methods for Determining the State of a Tunnel Lining, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 10, No. 4, pp. 413-431.
6. Maekawa, S. and Fenner, T. J., 1994, Study of Cavity Depth Estimation Behind Concrete Tunnel Lining Using GPR, Proc. of the 5th Int. Conf. GPR (GPR '94), Vol. 3, pp.895-905.
7. Peter, C. Ulriksen, F., 1982, Application of Impulse Radar to Civil Engineering, Lund University of Technology, Lund, Schweden.