

# 궤도하부구조의 상태 평가를 위한 연구

## Research for Assessing Railway Trackbed Condition

김대상\* 이수형\*\* 강승구\*\*\* 손강희\*\*\*\*  
Kim, Dae-Sang Lee, Su-Hyung Kang, Seung-Goo Son, Kang-Hee

### ABSTRACT

So far systematic and reliable methods for the investigation of track substructure (ballast and subgrade) are not developed yet. This study presents the applicability of GPR (Ground Penetrating Radar) and PBS (Portable Ballast Sampler) to the evaluation of railway trackbed conditions. Including FWD (Falling Weight Deflectometer) often used to evaluate the subsurface conditions of pavement, the standard system for assessing trackbed conditions will be developed in the future.

### 1. 서론

최근의 여러 연구결과에 의하면 자갈갱환이 반드시 자갈도상의 품질을 향상시키지는 않는다는 것을 알 수 있다. 이는 자갈 갱환이 도상부 상태와 배수상태를 적절히 고려하지 않고 수행되었기 때문에 발생한 문제라고 볼 수 있다.

도상 부분에 관련한 많은 문제들은 도상의 상태를 평가할 수 있는 신뢰할 만한 체계가 구축되어 있지 않기 때문에 발생하여 왔다. 도상의 유지보수를 위한 처리공법은 단순히 엔지니어의 직감으로 결정되곤 하였다. 기껏해야 시험굴을 파는 것이 도상 상태를 조사하기 위한 유일한 방법이었다. 그러나 이 방법은 문제가 발생할 여지가 있는 지역을 전체적으로 파악할 수 없는 단점이 있다.

궤도유지관리와 갱환을 효과적으로 수행하기 위하여 도상상태에 대하여 전체적이고 체계적인 수준의 데이터가 요구된다. 이것은 현재 도상에 문제가 있는 곳에 대한 구체적인 조사로부터 가능하다.

많은 연구결과로부터 궤도의 품질은 궤도를 구성하는 전체구성품의 강성에 의해 결정된다고 알려져 있다. 궤도의 품질은 도상상태와 노반의 강성변화에 밀접하게 연관된다. 그리고 이 관계로부터 실질적으로 어떻게 다양한 보선방법을 평가하고 궤도품질을 지속적으로 유지할 수 있는 지에 대하여 연구해야 할 필요성이 있을 것이다.

본 연구에서 적용하고자 하는 기술들은 값싸게 많은 양의 데이터를 수집할 수 있으며, 이를 이

\* 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원

\*\* 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원

\*\*\* 한국철도기술연구원 연구원, 비회원

\*\*\*\* 한국철도기술연구원 연구원, 비회원

용하여 5년 혹은 10년 주기의 자잘갱환과 유지보수 계획을 최적화시킬 수 있는 충분한 정보를 제공하고 “선로상태평가”의 기초가 될 것으로 기대한다.

## 2. GPR(Ground Penetrating Radar) 탐사

레이다 기술을 지상이 아닌 지하에 적용하여 매설물탐사 및 터널 라이닝 두께 확인 등에 응용한 것을 GPR 탐사법이라고 한다.

### 2.1 GPR 원리

송신안테나(Transmitter)로부터 수 MHz-GHz 범위의 전자기파를 지표면이나 구조물의 노출면에서 내부로 방사시킨 후, 전자기적 물성이 다른 매질을 만나 반사되어 돌아온 신호를 수신안테나(Receiver)에서 받고 이를 시간 축에 기록한다. 이러한 과정을 미리 설계된 탐사 축선을 따라 안테나를 수평으로 이동시키면서 계속하여 시간을 표시하는 수직축과 수평거리를 나타내는 수평축에 반사강도를 표시하는 2차원 단면도를 얻는다. 그림 1은 GPR 탐사의 기본원리를 보여 준다. 매질 내에서의 전자기파의 속도를 알면 단면도에 나타난 수신파의 시간, 거리 간격으로부터 반사체의 거리, 방향과 같은 정보를 얻게 된다. 레이더파의 전자특성은 매질 2개의 물리적 성질 즉, 유전상수와 전기전도도의 영향을 받는다. 표 1은 지반을 구성하는 대표적인 물질들의 전자기적 특성들이다.

본 연구에 사용된 GPR 시스템은 Zond 12c(Radar System Inc.)로 공중안테나를 사용하고 있으며 라트비아에서 제작되었다. 본 시스템의 경우 안테나는 750MHz를 사용하고, 1 nsec rise time과 70 nsec decay time을 가진 short pulse를 입력파로 사용한다. 수신안테나에서는 Ricker's wavelet을 수신한다. 가탐심도는 약 1.5m이다.

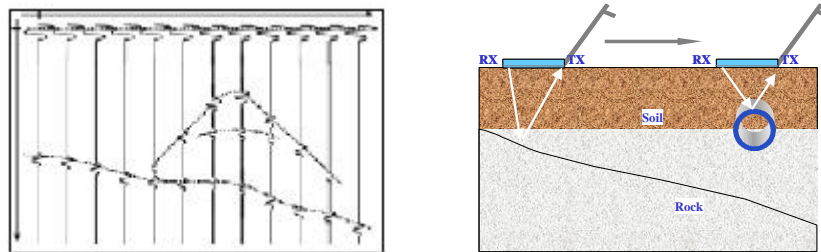


그림 1. GPR 탐사 모식도

표 1. 일반적인 물질의 전자기적 성질

물질	유전상수	속도(cm/nsec)	감쇠율(dB/m)
공기	1	30	0
물(담수)	81	3.3	0.1
모래	4	15	0.01
점토	9-25	10-6	1-300
콘크리트	6-12	12-8	(1-100)
화강암	4-5	13	0.01-1
현무암	8-12	10-9	
철근	200-	-2	300-

## 2.2 궤도도상조사에 연관된 물리적 변수

매질 속을 통과하는 전자파의 속도는 매질의 유전상수에 의해 결정되며 식 1로 표시된다.

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

식에서  $v$  : 속도,  $c$  : 광속,  $\epsilon$  : 매질의 유전상수

송신안테나에서 펄스 형태로 방출된 전자파는 방사상으로 하부로 진행하거나, 서로 다른 두 매질의 경계면에서 에너지의 일부는 반사되고 나머지는 투과하여 하부로 전파한다. 수신안테나에서는 반사파를 수신하게 되는데, 반사파의 강도는 반사계수에 비례하며, 반사계수는 두 매질의 유전상수의 제곱근의 차이에 비례한다. 식 2는 두 매질의 유전상수로부터 반사계수를 계산하는 식이다.

$$R = (\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}) / (\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2})$$

(2)

식에서  $R$ : 반사계수,  $\epsilon_1, \epsilon_2$  : 두 매질의 유전상수

전기전도도는 전자장 내에 놓인 물질 내 자유전자의 흐름을 표시하는 상수로 전자파의 감쇠율을 결정한다.

## 2.3 GPR 실내실험-1

### 2.3.1 실험의 구성

GPR에 의한 궤도하부구조 조사는 여타의 일반적 GPR 탐사에 비해 여러 가지 특수한 조건을 갖는다. 궤도상에는 레일과 침목이 일정한 간격으로 시공되어 있기 때문에 레일과 침목이 지하로부터 반사되어오는 전자파에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 고찰이 이루어져야 한다. 또한 철도는 도상 표면이 평탄하지 않기 때문에 안테나를 지면이 아니라 공중에 위치시켜야 하는데 이때 가장 선명한 신호를 획득하기 위한 높이를 결정해야 한다. 본 연구에서는 안테나의 방향에 대한 배치형태를 4가지로 변화시켜 실험하였으며 안테나의 높이는 15cm에서 50cm까지 변화시켜 실험하였다.

### 2.3.2 실험결과

#### 2.3.2.1 안테나의 방향

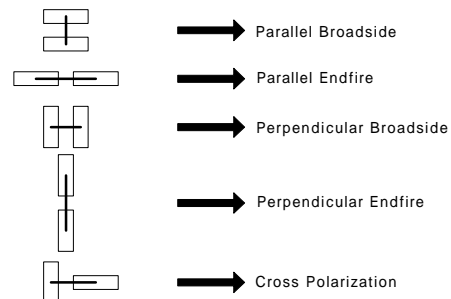


그림 2. 실내실험장면 및 안테나 배치형태

상기 5가지의 안테나 배치 방법 중에서 Parallel Broadside, Perpendicular Broadside, Perpendicular Endfire, Cross Polarization 4가지 방법에 대한 실내실험을 수행하였다. 4종류의 안테나 배치형태 모두 자갈·토양경계면을 선명히 보여 주었으나, Parallel Broadside가 현장작업이

용이하면서 가장 안정되고 선명한 자료를 보여줌을 알 수 있었다.

### 2.3.2.2 안테나 높이

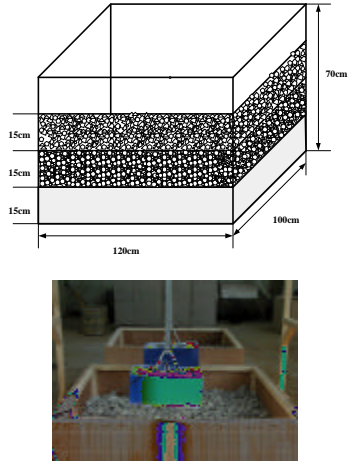
단면도상에서 침묵의 위치는 지표면을 표시하는 역할을 하므로, 실 측정에서는 침묵이 구분되며 도상·노반경계면이 선명한 높이에 안테나가 위치하는 것이 좋을 것이다. 본 실험에 사용된 GPR Zond 12c 와 750 MHz 공중안테나 시스템에서는 침묵 상면 15~25 cm 정도가 최적의 안테나 높이로 결정되었다.

## 2.4 GPR 실내실험-2

### 2.4.1 실험 조건

궤도노반이 지속적으로 하중을 받게 되면 도상자갈이 노반속으로 관입되거나 노반 분니 현상으로 노반의 흡이 도상자갈 속으로 침투하게 된다. 이때 자갈속의 공극은 공기 대신 흙이나 물로 채워지게 된다. 이에 본 연구에서는 도상자갈의 함수비와 세립분 함량 변화가 GPR 시험결과에 미치는 영향을 검토하기 위해 실내에서 3개의 박스를 제작하여 9가지 경우의 실내 GPR 실험을 실시하였다. 그리고 실험에 따른 도상과 노반의 유전상수를 산정하였다. 아래의 표 2는 9가지 실험의 형태를 나타내었다.

표 2. Box 모형의 실험 조건에 따른 분류

실험명	Box의 구성	강우조건	Box 모형의 규격
Test 1	15cm 자갈	강우 0mm	 <p>그림 3. 실내실험 사진</p>
Test 2	15cm 자갈	강우 20mm	
Test 3	15cm 다짐토	강우 60mm	
Test 4	15cm 자갈	강우 0mm	
Test 5	15cm 세립분 함량 15%	강우 20mm	
Test 6	15cm 다짐토	강우 60mm	
Test 7	15cm 자갈	강우 0mm	
Test 8	15cm 세립분 함량 30%	강우 20mm	
Test 9	15cm 다짐토	강우 60mm	

### 2.4.2 실험결과

도상의 두께가 30cm일 때 20mm 강우에 의해 도상·노반 경계면에 함유된 수분에 의한 반사파 강도의 증대는 GPR 단면도상에서 육안으로도 식별이 가능하였다. 강우는 빠른 시간 내에 도상·노반 경계면으로 침투되어 도상에 포함된 수분은 도상두께 산정에 큰 영향을 미치지 않는 결과를 얻었다.

도상 하부의 세립분 함유율이 증가할 경우 도상·노반 경계면에서의 반사파의 강도는 줄어들었다. 세립분 함유율 증가에 의해 도상·노반 경계면으로부터의 반사 신호는 지연되며, 이는 도상두께 산정에 영향을 미치는 결과를 얻었다.

반사파의 강도가 감소하는 곳은 세립분 함량이 증가하는 곳이며 반사파 강도가 증대하는 곳은 수분이 증가하는 곳으로 볼 수 있었다. 그림 4는 표 2의 Test 7, Test 8, Test 9의 GPR 탐사결과

들이다. 보정전 깊이 Profile에서 신호의 지연을 확인 할 수 있다. 그림 5는 보정된 깊이를 보여주는 파형으로 그림 4의 흰색선에서의 파형을 나타낸다.

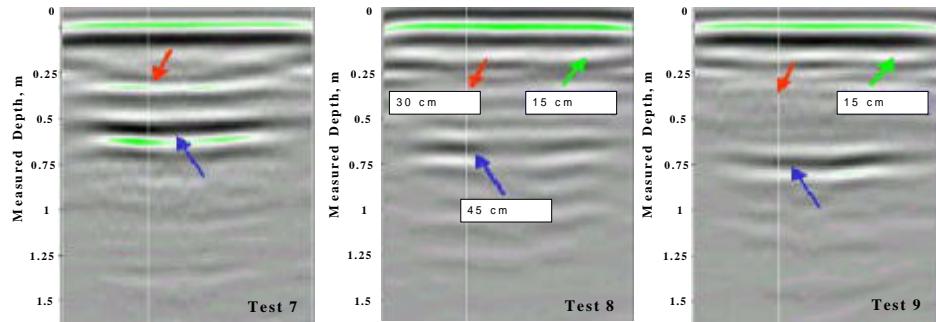


그림 4 함수비 및 세립분 함량에 따른 깊이 Profile(보정전)

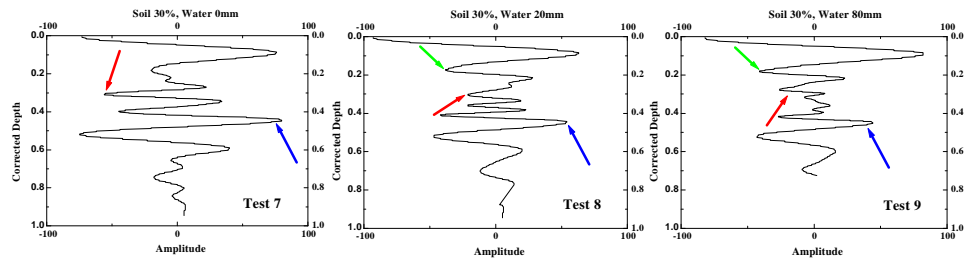


그림 5. 함수비 및 세립분 함량에 따른 깊이 Profile(보정후)

표 3. 깊이 Profile에서 유도된 유전상수

구분	유전상수		
	도상	중간층	노반
Test 7	3.3	7	10
Test 8	3.3	8	18
Test 9	3.3	8.5	23

실험결과를 토대로 역산으로 구한 도상자갈의 유전상수는 3.3 정도로 평가되었다. 세립분이 포함된 중간층의 경우 유전상수 값의 변화는 적었다. 노반의 경우 함수량에 따라 유전상수 값의 변화 폭이 크음을 알 수 있다. 이는 살수한 후 물이 노반면으로 빠르게 침투한 결과로 판단된다.

## 2.5 GPR 현장실험

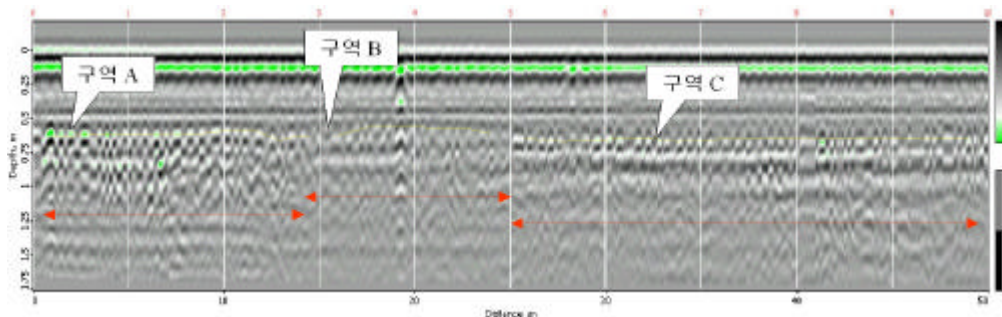


그림 6. 현장 GPR 단면도

현장실험은 고속철도 현장에서 연장 50m구간에 대하여 수행하였다. 50m 전 구간에 걸쳐 도상

은 약 50cm의 일정 두께로 이루어져 있다. 도상의 유전상수는 실내실험에 의해 3.3을 사용하였다. 도상하부는 대체적으로 서로 다른 반사패턴을 갖는 3개의 구역으로 이루어져 있었다. A 구역은 0~13m 구역으로 도상하부에 비교적 강한 반사파를 보여준다. B 구역은 13~25m 구역으로 도상하부에 비교적 약한 반사파를 보여준다. C 구역은 25~50m 구역으로 도상하부에 중간 강도의 반사파를 보여준다. 본 실험으로 도상의 두께를 파악할 수 있음을 확인할 수 있었다.

### 3. 도상자갈 및 노반 흙의 샘플링 방법

철도 분야에의 시추 및 샘플링은 도상자갈층과 노반흙의 성질이 매우 다른 이질층이라는 특수성으로 인해 현재까지 도상자갈과 노반 흙의 시추가 동시에 이루어지기 어려운 상황이었다. 본 연구에서는 도상층과 노반 상부를 동시에 시추할 수 있는 방법에 대한 연구를 수행하였다.

#### 3.1 PBS(Portable Ballast Sampler)

이 장비는 도상자갈을 샘플링 할 수 있도록 고안된 비트와 코어 튜브로 구성되어 있다. 회전 타격식으로 굴진 시에 작업의 전환이 가능하도록 제작되었다. 이 장비는 도상자갈의 샘플링이 가능하도록 68mm내경으로 제작하였으며 도상층과 노반을 1m 깊이까지 굴착할 수 있다. 본 시추장비를 이용하여 도상·노반층의 주상도를 작성함으로써 도상과 노반의 열화상태를 파악할 수 있다. 그림 7은 PBS 모습을, 그림 8은 시추기로 얻어진 샘플 사진, 그림 9는 시추 후 시추공 모습을 보여준다. 표 4는 PBS의 주요사양들을 나타내었다. 도상자갈 표면부는 구속압이 적어서 굴착 시에 약간의 다이러턴시 현상이 발생하나 샘플링에는 크게 문제가 되지 않을 것으로 판단되었다.



그림 7. PBS 시추 광경    그림 8. PBS로 시추한 샘플    그림 9. 시추 후 시추공 모습

표 4. PBS 주요 사양

품목	높이 (mm)	폭 (mm)	길이 (mm)	중량 (kg)	전원	소비 전력 (W)	회전 수 (rpm)	타격수 (bpm)	회전력 (N*m)	회전 방향	Stroke	슈내경 (mm)	슈외경 (mm)	Core Tube 외경 (mm)	Drill Rod 외경 (mm)
사양	1750	600	900	90	AC 100V	2830	26	최대 1890	최대 588	우	1150	68	89	86	40.5

#### 4. 결론

1. GPR(Ground Penetrating Radar) 탐사법의 철도의 적용성을 확인한 결과 도상층의 두께를 비파괴적으로 검사할 수 있는 방법이라는 것을 확인할 수 있었다.

2. 실험에 사용된 자갈의 경우 유전 상수는 대략 3.3 정도의 값을 가졌으며, 도상에 포함된 수분은 도상 두께에 크게 영향을 미치지 않았다. 세립분 함유율 증가에 따라 도상 노반 경계면에서의 반사신호는 지연되며, 이는 도상두께 산정에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다.

3. PBS(Portable Ballast Sampler)를 이용하여 도상자갈과 노반흙의 샘플링을 시도하였다. 도상 자갈 표면부는 구속압이 적어서 굴착시에 약간의 다이러턴시 현상이 발생하나 샘플링에는 크게 문제가 되지 않을 것으로 판단되었다.