

GPR/PBS/FWD를 이용한 도상/노반 상태평가 기술 개발

Development of ballast/subgrade investigation technique using GPR/PBS/FWD

김대상* 박태순** 장승구*
Dae-Sang Kim Tae-Soon Park Seung-Goo Kang

ABSTRACT

Ballasted track is constructed in consideration of the maintenance. The application time and frequency of MTT(Multiple Tie Tamper) and BS(Ballast Cleaner) depend on track geometry measurements. This paper presents the application of Ground Penetrating Radar(GPR), Falling Weight Deflectometer(FWD), and Portable Ballast Sampler (PBS) to evaluate the effects of track geometry due to substructure deterioration and to build a reliable substructure evaluation system.

1. 서 론

유도상궤도는 유지보수를 전제로 하여 건설되며, MTT 및 자갈차기 작업의 적용 시점 및 주기는 순전히 궤도틀림에 대한 측정 결과에 의존하고 있다. 그러나 지금까지 궤도틀림의 발생 원인에 대한 연구 및 궤도틀림의 진행에 영향을 미칠 것으로 추측되는 궤도하부구조(도상·노반)의 상태를 평가하는 방법은 정립되어 있지 않았다. 따라서 본 연구에서는 비파괴검사법인 Ground Penetrating Radar(GPR), 강성평가법의 하나인 Falling Weight Deflectometer(FWD)와 파괴탐사법인 Portable Ballast Sampler(PBS)를 철도에 적용하여 신뢰할 만한 궤도하부구조 상태 평가의 체계를 구축하고 이에 대한 실 현장에서의 적용성을 확인하고자 한다.

2. 본 론

궤도하부구조의 상태를 평가하기 위하여 비파괴검사법인 GPR과 FWD 및 파괴탐사법인 PBS를 조합하였다. 본 상태평가법을 이용하여 신설선의 상태평가와 기존선에서의 특정 문제 개소에 대한 궤도 유지보수가 필요한가에 대한 답과 필요하다면 언제 어떤 우선 순위로 어떻게 유지보수를 하는 것이 가장 경제적이고 효과적인가에 대한 답을 얻고자 한다. 표 1에는 궤도하부구조 상태 평가법과 각 평가법의 목적을 정리하였다.

<표 1> 궤도하부구조 상태 평가 방법

평가법 종류	평가 방법	목적
비파괴검사법	Ground Penetrating Radar(GPR)	1. 도상두께 2. 함수비
	Falling Weight Deflectometer (FWD)	1. 강성 평가 2. 처짐량 평가
파괴검사법	Portable Ballast Sampler(PBS)	1. 도상두께 2. 세립분 함량 3. 함수비

2.1 GPR(Ground Penetrating Radar)

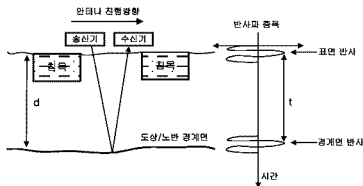
2.1.1 GPR 탐사 원리

<그림 1>과 같이 송신안테나(Transmitter)로부터 수 MHz-GHz 범위의 전자기파를 대상 매질을 향하여 입사시킨 후, 전자기적 물성이 다른 매질을 만나 반사되어 돌아온 신호를 수신안테나

*한국철도기술연구원

**서울산업대학교

(Receiver)에서 받고 이를 시간축(Time domain)에 기록한다. 이러한 과정을 미리 계획된 탐사 주선을 따라 안테나를 이동시키면서 계속하여 시간을 표시하는 수직축과 수평거리를 나타내는 수평축에 반사강도를 표시하는 2차원 단면도를 얻는다.



<그림 1> GPR 실험 모식도

시험을 통하여 도상 두께 d 를 결정하기 위해서는 매질의 유전상수(dielectric constant)와 전파 파가 매질을 통과한 시간을 알아야 한다. 이에 관한 수학적인 관계식은 <식 1>~<식 3>과 같다.

$$v = \frac{2d}{t} \quad \text{<식 1>}$$

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}} \quad \text{<식 2>}$$

<식 1>과 <식 2>로부터

$$d = \frac{ct}{2\sqrt{\epsilon}} \quad \text{<식 3>}$$

여기서, c 는 광속($3 \times 10^8 \text{m/sec}$), ϵ 은 유전상수이다.

2.1.2 GPR의 철도에서의 적용 목적과 문제점

철도분야에서 GPR을 사용하는 목적은 다음과 같다.

- 1) 도상두께 변화개소 파악 - 케도틀림 발생량이 크고 케도틀림 발생의 진전이 빠른 케도품질이 나쁜 개소는 도상자갈부가 얇거나 도상자갈부의 깊이가 변화하는 구간으로 이와 같은 구간을 파악할 수 있다. 또한 자갈치기 작업 결과의 좋고 나쁜 결과를 확인할 수 있다.
- 2) 배수 불량 개소 파악 - 도상·노반 경계에 존재하는 물웅덩이의 위치를 찾을 수 있는 능력 또한 GPR 이용의 중요한 목적 중의 하나이다.
- 3) 도상 세립분 함량 파악을 통한 오염도 파악 - 전차과는 깨끗한 도상자갈에서는 매질을 쉽게 통과할 수 있고 노반과의 경계에서 강한 반사 특성을 보이나 도상 내 세립분 함량이 많으면 경계면이 모호해지면서 반사파의 강도가 약해지게 된다. 그리고 매질의 변화로 인하여 전차과의 주행시간도 변화하게 되는 데 이와 같은 특징을 이용하여 도상 오염도를 파악한다.

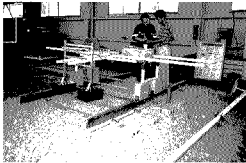
철도분야에 GPR 탐사법을 적용 시 문제점은 다음과 같다.

- 1) 일반 도로나 터널에서의 GPR 탐사에서는 안테나를 측정하고자 하는 표면에 밀착시켜서 측정하는데 이 때 사용하는 안테나를 Ground coupled 안테나라고 하며 지면에 밀착할 때 가장 선명한 신호를 나타내도록 제작되었다. 그러나 도상조사를 위해서는 도상 표면이 평탄하지 않기 때문에 안테나를 표면이 아니라 공중에 위치시켜야 하는데, 즉 표면에서 수십 cm 공중에 띄웠을 때 가장 선명한 신호를 보이도록 하는 안테나, 즉 Air coupled 안테나를 사용해야 한다.

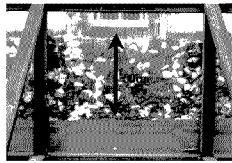
2) 케도상에는 레일과 침목이 일정간격으로 깔려있다. 도상 상태 평가를 위해서는 도상 상면에 위치한 레일과 침목이 도상하부 경계면으로부터 반사되어오는 전자파에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 고찰이 이루어져야 한다. 즉 도상조사를 위해서는 안테나를 어떤 방향과 높이로 배치할 때 도상·노반의 경계면으로부터의 신호가 가장 선명하게 나타나는지를 파악해야한다.

2.1.3 설대형 GPR시험 결과

GPR탐사법을 철도분야에 적용하기 위하여 설대형 시험을 통하여 안테나 방향과 높이를 구하기 위한 시험을 수행하였다. <사진 1>은 설대형 시험 전경을 <사진 2>는 시험체의 도상두께이다. 도상부 표면으로부터 노반 상면까지의 총 도상두께가 50cm인 설대형 시험용 공시체를 이용하여 시험을 실시하였다.



<사진 1> 설대형 시험 장면

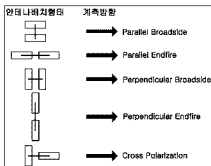


<사진 2> 도상두께(시험체 측면)

1. 안테나 방향

GPR탐사에서 사용할 수 있는 안테나 배치형태는 대략 5가지 종류가 있다.<그림 2>

- 1) Parallel Broadside(PaBr): 안테나의 편향(Polarization)이 진행방향에 평행하고, 송·수신 안테나가 서로 평행하게 배치된 경우
- 2) Parallel Endfire(PaEn): 안테나의 편향이 진행방향에 평행하고, 송·수신 안테나가 앞뒤로 나란히 배치된 경우
- 3) Perpendicular Broadside(PeBr): 안테나의 편향이 진행방향에 수직이고, 송·수신 안테나가 서로 평행하게 배치된 경우
- 4) Perpendicular Endfire(PeEn): 안테나의 편향이 진행방향에 수직이고, 송·수신 안테나가 옆으로 나란히 배치된 경우
- 5) Cross Polarization(CrPo): 안테나의 편향이 서로 수직인 경우



5가지 방법 중 PaBr, PeBr, PeEn, CrPo 4가지 방법에 대한 실내 실험을 수행하였다.

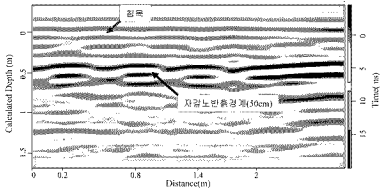
<그림 3>은 PaBr 안테나 배치에 의해 측정된 GPR 단면도를 보여준다. 그림의 X축은 측정 거리, Y축은 유전상수 3.3으로 계산된 깊이이다. 침목과 50cm 깊이에 도상·노반경계면이 잘 나타나고 있다. 4종류의 안테나 배치형태 모두 도상·노반 흙의 경계면을 선명히 보여주었으나, PaBr이 가장 안정되고 선명한 자료를 보여줄을 알 수 있다.

<그림 2> 안테나 방향 및 배치형태

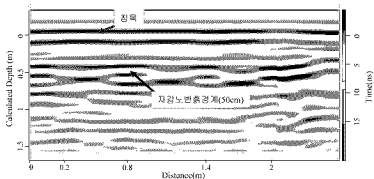
2. 안테나 높이

<그림 3>은 PaBr 안테나 배치형태로 15cm 높이에서 측정된 결과이고, <그림 4>는 PaBr 안테나 배치형태로 25cm 높이에서 측정된 자료이다. 두 단면은 비교해보면 도상·노반 흙의 경계면은 안테나 높이가 15cm인 <그림 3.4>에서 선명히 나타나지만, 침목에 의한 신호는 <그림 4>에서 좀 더 선명하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 단면도상에서 침목의 위치는 지표면을 표시하는 역할을

하므로, 실제 측정에서는 침묵면을 확인할 수 있으면서 도상·노반경계면이 잘 나타나는 높이로 안테나를 위치하는 것이 좋을 것이다. 따라서 본 실험에 사용된 750MHz 공중안테나 시스템에서는 약 15~25 cm 가 적절한 안테나 높이로 판단된다.



<그림 3> GPR 측정 단면도(PaBr, 안테나 높이, h=15cm)



<그림 4> GPR 측정 단면도(PaBr, 안테나 높이, h=25cm)

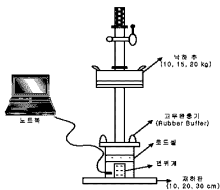
2.2 FWD(Falling Weight Deflectometer)

현재 도로 현장이나 철도 노반의 경우 평판재하시험을 통하여 지반반력계수를 결정한다. 신설선의 경우 도상의 강성은 도상노반의 경계에 토압계와 침하관을 설치함으로써 평가할 수 있다. 그러나 기존선의 경우 도상에 대한 강성평가 방법은 현재 까지 확립되어 있지 않다. 평판재하시험의 경우 측정 시간이 길어서 운행선의 도상에 대한 강성평가법으로서의 적용성에 문제가 있다.

본 연구에서 도상의 강성평가를 위하여 FWD의 일종인 소형 FWD인 LFWD(Light Falling Weight Deflectometer)를 이용하였다. LFWD는 자유낙하 시킨 추로 인해 발생하는 충격 하중에 의한 처짐을 측정하며, 최대 처짐과 최대하중 관계에서 동탄성계수를 측정하는 시험장비로 소형으로 1~2인력으로 이동이 가능하며 측정시간이 짧은 장점이 있다. 본 연구에서는 LFWD의 철도 도상 강성 평가에의 적용성을 검토하고 도상 상태에 따라 변화하는 강성의 정량적인 평가에 있다. <그림 5>는 LFWD의 개략도이다. LFWD는 덴마크의 Carl Bro사에서 개발한 경량 FWD로서, 변위계가 부착된 제하관, 하중 낙하 장비, 전자 침하 측정장치 및 데이터 출력장비로 구분할 수 있다. 변위계는 그림에서 보는 바와 같이 제하관 위에 내장되어 있으며 추가적으로 변위계를 설치하여 사용할 수 있다. LFWD 제하관은 직경의 크기가 10cm, 20cm, 30cm의 3가지가 있는데, 제하관의 선택은 열차 하중을 고려하여 결정하였다.

2.2.1 현장 시험

현재 운행중인 경부선 하행1선 37k600 - 38k100 구간(성균관대역~화서역 구간)에서 LFWD를 사용하여 역학적 평가를 실시하였다. 총 11개 지점에서 50m 간격으로 시험을 수행하였다 <그림 6>. 분기 발생 구간(50~100m)에서 탄성계수와 처짐의 변화가 컸다. <표 2>는 2지점에 대한 시험 결과이다.

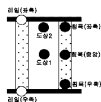


<그림 5> LFWD의 개략도

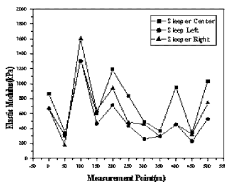
경부선(성균관대역 ~ 화서역 사이)



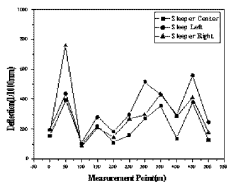
<그림 6> 경부선(성균관대역 ~ 화서역 사이) LFWD 시험 측정지점



<그림 7> 각 지점별 측정 요소



<그림 8> 레일 측정 결과(탄성계수)



<그림 8> 레일 측정 결과(치침)

<표 2> 2지점에 대한 LFWD 시험결과

시험대상	시험부분	Force (kN)	Press (kPa)	Deflection (1/1000mm)	E (MPa)
침목	중앙	11.5	1465.7	261.3	493.9
	좌측	10.4	1325.1	301.0	388.2
	우측	11.4	1454.3	225.0	568.7
레일	좌측	10.9	1384.8	581.3	209.1
	우측	10.4	1328.0	553.0	211.5
도상	1	9.7	1237.1	753.0	144.3

2.3 PBS(Portable Ballast Sampler)

기존선 및 신설선의 도상 및 노반의 오염경도와 상태를 평가할 수 있는 방법은 극히 제한적이었다. 기껏해야 도상의 일부에 대하여 시험관을 인력으로 파는 것이 전부였다. 이에 아래와 같은 이유가 있었다.

- 1) 철도의 특성상 궤도는 안전을 최우선으로 하기 때문에 교란을 주는 작업에 대한 보수적인 견해가 있었다.
- 2) 도상자갈의 샘플링에 대한 어려움 - 도상자갈은 입도가 크고 노반 높은 입도가 작아서 동시에 샘플링하기에는 입경 범위가 너무 넓어서 샘플링이 쉽지 않다는 인식이 있었다.
- 3) 철도의 특성 상 작업 시간 확보가 어렵고 대형 시추 장비를 설치할 만한 공간을 확보하기가 어렵다.

따라서 본 연구에서는 궤도에서 처음 시도되는 도상자갈과 노반층의 동시 샘플링을 위하여 궤도상에서 2~3인에 의하여 이동이 가능한 회전·타격식 PBS(Portable Ballast Sampler)를 개발하였다. 도상자갈의 경우 가급적 파쇄 되지 않도록 샘플링을 하는 것이 중요한 요소인데 PBS의 경우 회전·타격식 시추방법을 이용함으로써 이를 극복하였다. <사진 3>은 샘플링을 실시하고 있는 장면이고, <사진 4>는 채취한 시료이다.



<사진 3> 샘플링 작업

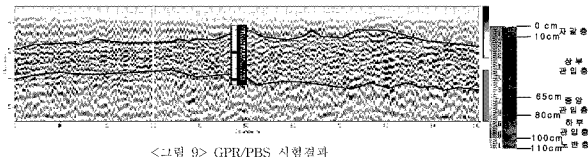


<사진 4> 채취한 시료

PBS는 현재 기존선과 고속선에서 사용되고 있는 도상자갈을 충분하게 샘플링이 가능하도록 내경 68mm, 1m 깊이까지 안정적으로 굴착할 수 있도록 제작하였다. 시추 속도는 장비 이동을 포함하여 1공당 20분 정도이다.

3. 결 론

GPR/FWD/PBS를 조합하여 궤도 하부를 종합적으로 평가할 수 있는 체계를 구축하고 있는 중이다. <그림 9>는 경부선 하행1선 37k600-38k100m 구간에서 수행한 GPR/PBS 시험결과로 도상층, 관입층, 노반층의 경계를 확인할 수 있다.



<그림 9> GPR/PBS 시험결과

현재 FWD에 대한 실험결과와 궤도투입 측정 결과를 분석 중에 있다. GPR시험은 현재 궤도 중심 축선에서만 수행하였으나, 향후 횡단면에도 실시하여 도상하부에 대한 전체 지도를 작성할 계획에 있다.