

GPR/PBS/LFWD를 이용한 궤도하부 상태평가

Evaluation on the Condition of Track Substructure Using GPR/PBS/LFWD

김 대 상¹ Kim, Dae-Sang

황 선 근² Hwang, Seon-Keun

신 민 호³ Shin, Min-Ho

박 태 순⁴ Park, Tae-Soon

Abstract

Track substructure (ballast, subgrade) should have sufficient strength and uniform stiffness to fully support track superstructure (rail, fastener, sleeper). Vertical support stiffness of track is strongly influenced by the condition of ballast and subgrade layers. Therefore, the evaluation of the condition of track substructure is very important to evaluate the vertical support stiffness of track. This paper proposes the trackbed evaluation system, which is composed of Ground Penetrating Radar (GPR), Portable Ballast Sampler (PBS), and Light Falling Weight Deflectometer (LFWD), to diagnose track substructure. The laboratory and field tests are performed to evaluate the applicability of the proposed trackbed evaluation system.

요 지

궤도상부(레일, 체결구, 침목)를 완전하게 잘 지지하기 위해서는 궤도하부(도상, 노반)가 충분한 강도를 가지고 균질한 강성을 가져야 한다. 궤도의 수직지지강성은 궤도하부의 상태(세립분 함량, 함수비)에 크게 영향을 받는다. 따라서 궤도의 수직지지강성을 평가하기 위하여 궤도하부의 상태를 평가하는 것은 매우 중요하다. 본 논문에서는 궤도하부의 상태를 진단할 수 있는 GPR/PBS/LFWD로 구성된 궤도기초상태평가법을 제안하였다. 제안된 궤도기초 상태평가법의 적용성을 평가하기 위하여 실내 실험 및 현장시험을 수행하였다.

Keywords : Ground penetrating radar (GPR), Light falling weight deflectometer (LFWD), Portable ballast sampler (PBS), Trackbed evaluation system, Vertical support stiffness

1. 서 론

고속철도의 도입과 함께 국내 궤도의 하부구조는 점차 다양화 되어 가고 있다. 고속철도의 새로운 궤도하부구조로 적용된 있는 강화노반은 이와 같은 궤도하부구조 다양화의 한 예이다. 강화노반의 도입으로 궤도하부구조는 도상과 노반의 2층구조(그림 1)에서 3층이상의 구조로 바뀌게 되었다. 궤도하부가 다층화 됨에 따

라 궤도하부와 관련된 많은 문제들이 발생되고 있으나, 아쉽게도 이에 대한 조사 방법이나 대처 방안은 현재까지 체계적으로 확립되지 않고 있는 실정이다.

입도 조정된 자갈도상과 노반으로 시공된 궤도를 자갈도상궤도(Ballast Track)라 하는 데, 이는 궤도에 발생된 수직침하를 보수하는 것을 전제로 건설된다. 자갈도상궤도를 구성하는 주요부인 도상의 경우 선로의 등급에 따라 도상 두께를 250mm~300mm 이상으로

1 정희원, 한국철도기술연구원 궤도토목연구본부 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Dept. Track. Civil. KRRI)

2 정희원, 한국철도기술연구원 궤도토목연구본부 책임연구원 (Member, Chief Researcher, Dept. Track. Civil. KRRI)

3 정희원, 한국철도기술연구원 궤도토목연구본부 수석연구원 (Member, Principal Researcher, Dept. Track. Civil. KRRI)

4 정희원, 서울산업대학교 교수 (Member, Prof., Seoul National Univ. of Technology)

설계하도록 규정하고 있으나, 도상의 다짐 기준은 결정되어 있지 않다.

또한 궤도하부의 상태는 신선한 초기의 시공 상태로 부터 열차통과 튄수의 누적과 함께 변화한다. 변화의 정도는 도상에 포함된 세립분 함량의 정도, 도상자갈의 파쇄정도, 도상자갈의 노반으로의 관입에 따른 도상층 두께변화, 도상 및 노반의 배수상태로 나타난다. 이와 같은 궤도하부의 상태 변화는 궤도의 지지강성을 변화시켜 최종적으로는 궤도틀림을 발생시킨다(그림 2). 따라서 궤도의 유지보수 비용 절감을 위해서는 도상 및 노반 상태의 변화정도를 평가하는 것이 우선적으로 수행되어야 한다.

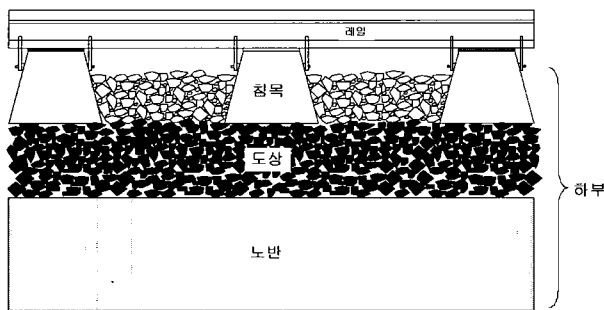


그림 1. 자갈도상궤도 구조

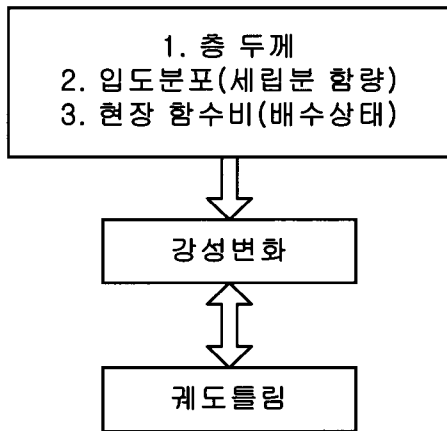


그림 2. 궤도하부 상태 평가 시 중요 고려 항목

따라서 본 연구에서는 궤도하부를 구성하는 층들의 두께와 상태 및 강성을 평가할 수 있는 신뢰할 수 있는 방법을 구축하고자 GPR/PBS/LFWD로 구성된 궤도기초 상태평가법을 제안하고 실내실험 및 현장시험을 통하여 그 적용성을 확인하였다. 상태평가법으로 제안된 Ground Penetrating Radar(GPR)과 Light Falling Weight Deflectometer(LFWD) 및 Portable Ballast Sampler(PBS)의 사용목적은 표 1과 같다.

2. 궤도하부 상태평가

도상 및 노반과 관련하여 많은 공학적인 문제들이 발생하고 있으나 궤도하부의 상태를 평가할 수 있는 신뢰할 만한 장비와 체계가 구축되어 있지 않기 때문에 문제 발생 시 문제 발생 구간에 대한 대처 방안은 극히 제한적이다. 현재까지 궤도하부의 상태를 조사하기 위한 유일한 방법은 시험굴(Test Pit)을 인력(사진 1)으로 파는 것이 유일한 방법이다. 이 방법의 경우 많은 시간과 노력이 필요하며 문제가 발생한 지역을 전체적으로 파악할 수 없는 단점이 있다. 또한 현재 수행하고 있는 궤도틀림 측정은 궤도하부 상태가 나빠진 결과를 확인하는

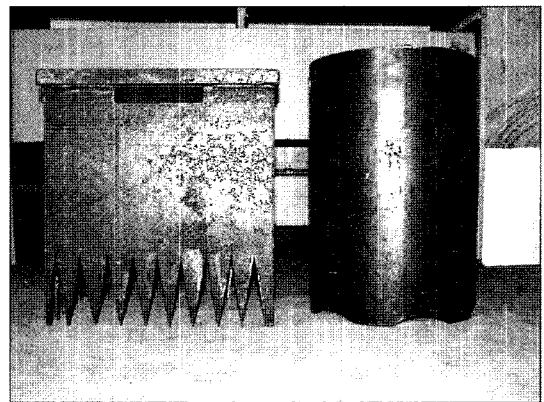


사진 1. 도상자갈 샘플러

표 1. 궤도하부구조 상태 평가법 및 사용목적

검사법 종류	검사 방법	목적
비파괴검사법	Ground Penetrating Radar(GPR)	1. 층 두께 2. 함수비 3. 세립분 함량
	Light Falling Weight Deflectometer(LFWD)	1. 강성 평가 2. 처짐량 평가
파괴검사법	Portable Ballast Sampler(PBS)	1. 층 두께 2. 함수비 3. 세립분 함량

의미를 가지므로 서서히 열화 혹은 파괴 되어가는 궤도 하부의 상태를 진단하는 데는 한계가 있다.

따라서 궤도하부의 상태 변화를 확인할 수 있는 층 두께, 세립분 함량, 배수상태를 파악하기 위하여 비파괴 검사법인 GPR 및 LFWD와 파괴검사법이지만 궤도에 대한 교란을 최소화 할 수 있는 시추조사 방법인 PBS를 이용하여 궤도하부의 상태를 평가하였다.

2.1 GPR 탐사원리 및 철도 적용 시 문제점

그림 3과 같이 송신안테나로부터 수백MHz~수GHz 범위의 전자기파를 대상 매질을 향하여 입사시킨 후, 전자기적 물성이 다른 매질을 만나 반사되어 돌아온 반사 신호를 수신안테나에서 수신하여 이를 시간에 대하여 기록한다. 이러한 과정을 미리 계획된 탐사 축선을 따라 안테나를 이동시키면서 계속하면 시간을 표시하는 수직축과 수평거리를 나타내는 수평축에 반사강도를 표시하는 2차원 단면도를 얻을 수 있다. 반사파 도달시간과 구성 재료의 유전상수를 이용하여 층 두께를 결정할 수 있다.

궤도하부의 상태평가에 GPR 적용 시 문제점은 다음과 같다.

- 1) 일반 도로나 터널에서의 GPR탐사에서는 안테나를 측정하고자 하는 표면에 밀착시킨 채로 측정이 가능하나 궤도하부 조사의 경우 도상 표면이 평탄하지 않기 때문에 안테나를 표면이 아니라 공중에 위치시켜야 한다.
- 2) 궤도상에는 레일과 침목이 일정한 간격으로 존재하므로, 궤도하부상태를 평가하기 위해서는 레일과 침목이 도상하부 경계면으로부터 반사되어 오는 전자파에 어떠한 영향을 미치는지를 평가해야 한다. 즉 조사를 위해서는 안테나를 어떤 방향과 높이에 배치

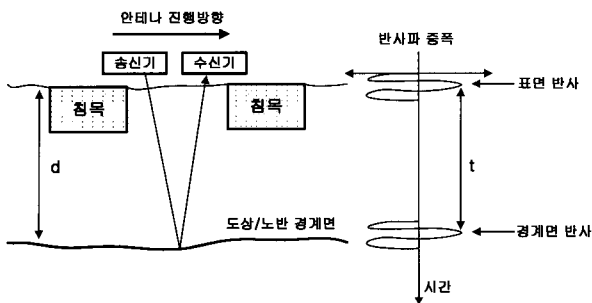


그림 3. GPR 탐사원리

할 때 도상·노반의 경계면으로부터의 신호가 가장 선명하게 나타나는지를 파악해야한다.

- 3) 궤도하부의 상태변화(세립분함량, 함수비변화)에 따라 궤도하부를 구성하는 재료의 유전상수가 달라진다.

상기의 문제점을 해결하기 위하여 GPR 적용 시 안테나의 높이와 방향 결정을 위한 실험과 세립분 함량 및 함수비 변화에 따른 궤도 구성 재료의 유전상수 변화를 파악하기 위한 실내 박스실험을 실시하였다.

2.2 GPR 적용 시 안테나 높이와 방향 결정

주파수가 750MHz인 안테나 사용시 최적 안테나 방향과 높이를 구하기 위한 실험을 수행하였다. 사진 2는 시험 전경으로 도상 표면에서 노반 상면까지의 도상두께가 50cm인 실험용 시뮬레이션 공시체를 조성하여 시험을 수행하였다.

레일의 방향에 대한 안테나의 방향에 따라 그림 4와 같이 5가지 종류의 실험을 실시하고, 안테나 높이에 대한 시험을 수행하였다. 안테나의 방향이 레일 종방향에 평행하고, 안테나를 서로 마주보며 평행하게 배치한 경우(Parallel Broadside, PaBr), 도상 상면으로부터의 높이가 15~25cm에서 최적의 반사파 신호를 확인할 수 있었다. 그림 5와 그림 6은 안테나의 높이를 변화하여 측정된 GPR 단면도를 보여준다. 그림의 X축은 측정 거

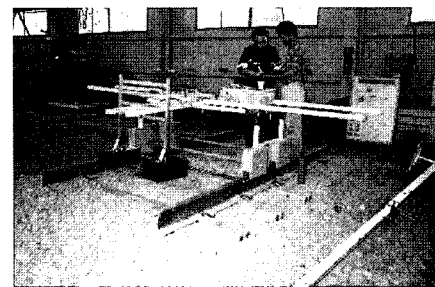


사진 2. GPR 실험시현

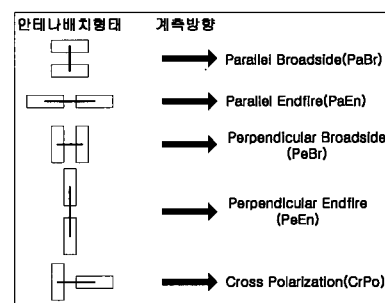


그림 4. 안테나 방향 및 배치형태

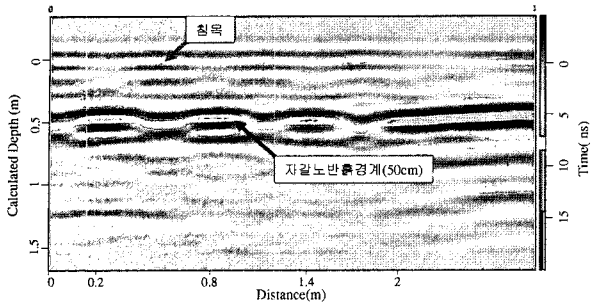


그림 5. GPR 측정 단면도(PaBr, 안테나 높이, h=15cm)

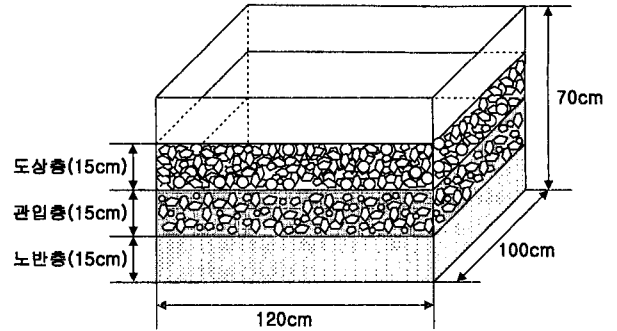


그림 7. 박스 실험체

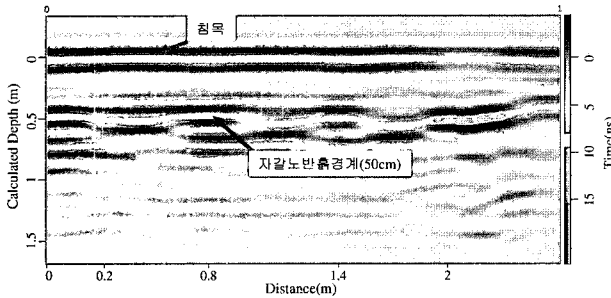


그림 6. GPR 측정 단면도(PaBr, 안테나 높이, h=25cm)

리를, Y축은 신선한 자갈의 유전상수 3.3으로 가정하여 계산된 깊이를 나타낸다. 그림으로부터 침묵과 50cm 깊이의 도상·노반경계면을 확인할 수 있다.

2.3 유전상수 결정 실험

궤도하부의 상태 변화가 GPR의 반사 신호에 미치는 영향을 평가하기 위하여 세립분 함량 및 함수비 변화에 따른 반사 신호의 변화를 파악하고 유전상수를 결정하기 위하여 실내 박스실험을 실시하였다(그림 7). 박스 실험체는 도상층, 관입층(도상과 노반의 혼합층) 및 노반층의 3층으로 구성하고 표 2와 같이 세립분 함량 및 함수비가 다른 9가지 경우에 대하여 실험

을 실시하였다.

도상층은 일반철도에서 사용하고 있는 자갈을 사용하여 실험체의 단위중량이 1.6tonf/m^3 이 되도록 충분히 다짐 작업을 수행하였다. 노반 흙 재료는 통일 분류법상 SP 계열인 모래질 흙을 사용하였으며, 상대다짐도가 90%가 되도록 다짐작업을 수행하였다. 도상층과 노반층이 혼합된 관입층은 노반흙이 도상의 간극에 골고루 채워지도록 자갈과 노반 흙을 혼합시키고 충분한 다짐을 하여 실험체를 조성하였다.

실험 1~3에서는 관입층의 자갈중량에 대한 세립분 중량이 0%, 실험 4~6에서는 세립분 중량이 15%, 실험 7~9에서는 세립분 중량이 30%로 실험체를 조성하였다. 함수비 조건은 표면적에 따라 살수량을 변화(0, 20, 80mm)시켜서 실험을 수행하였다. 20mm 살수의 경우 살수한 물이 도상과 노반 경계면으로 충분히 이동한 후에 실험을 실시하기 위하여 살수 한 후 1일 경과한 시점에 실험을 실시하였다. 80mm 살수의 경우는 20mm 살수에 추가로 60mm를 살수한 후 2일 경과한 시점에 실험을 실시하였다.

그림 8과 그림 9는 함수비 변화에 따른 반사 파형의 변화를 시간역과 거리역으로 나타낸 것이다. 함수비 증

표 2. 박스 실험 조건

실험명	박스 번호	박스 재료 구성	함수비 조건
실험 1	1	도상층 : 15cm 자갈	살수 0mm
실험 2		관입층 : 15cm (자갈+세립분 중량 0%)	살수 20mm
실험 3		노반층 : 15cm 다짐토(노반흙)	살수 80mm
실험 4	2	도상층 : 15cm 자갈	살수 0mm
실험 5		관입층 : 15cm (자갈+세립분 중량 15%)	살수 20mm
실험 6		노반층 : 15cm 다짐토(노반흙)	살수 80mm
실험 7	3	도상층 : 15cm 자갈	살수 0mm
실험 8		관입층 : 15cm (자갈+세립분 중량 30%)	살수 20mm
실험 9		노반층 : 15cm 다짐토(노반흙)	살수 80mm

가에 따라 반사파의 강도는 증가하나 반사파의 지연은 거의 발생하지 않음을 확인할 수 있다.

그림 10과 그림 11은 세립분 함량 변화에 따른 반사파형의 변화를 시간역과 거리역으로 나타낸 것이다. 세립분함량 증가에 따라 반사파의 강도는 감소하고 반사

파가 지연됨을 알 수 있다.

9가지 경우에 대하여 수행한 실험 결과 얻은 각 층의 유전상수 값은 표 3과 같다. 건조하고 신선한 도상자갈의 유전상수는 3.3이었고, 관입층의 유전상수는 함수비 및 세립분 함량에 따라 3.3~8.5 범위에 있었다. 노반층

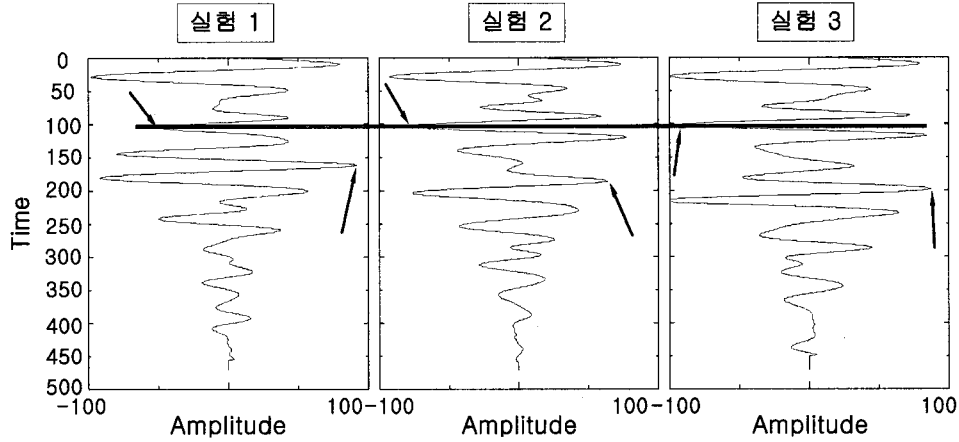


그림 8. 함수비 변화에 따른 GPR 반사파형(시간역)

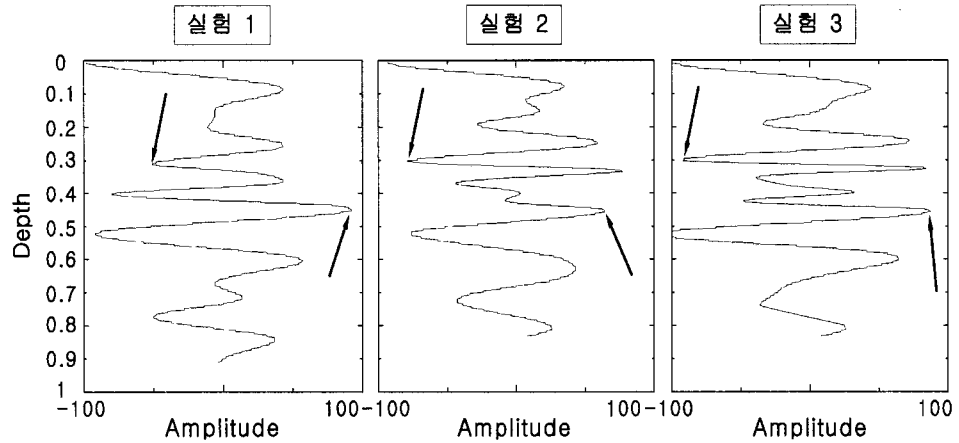


그림 9. 함수비 변화에 따른 GPR 반사파형(거리역)

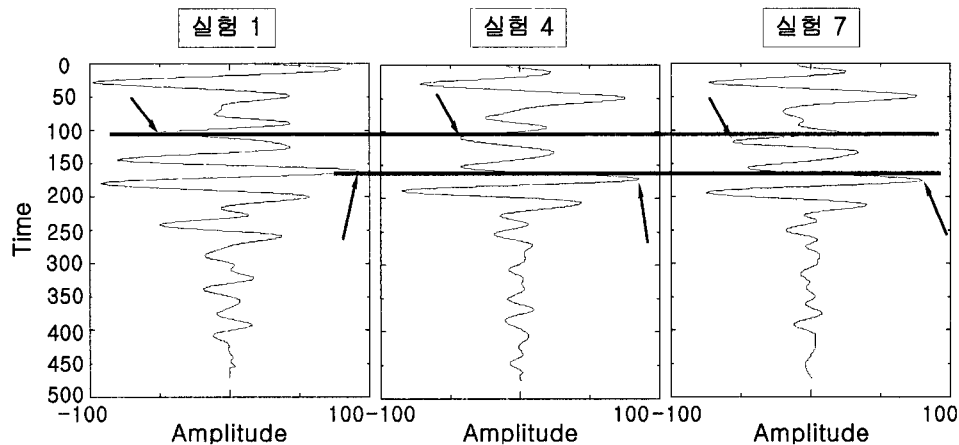


그림 10. 세립분함량 변화에 따른 GPR 반사파형(시간역)

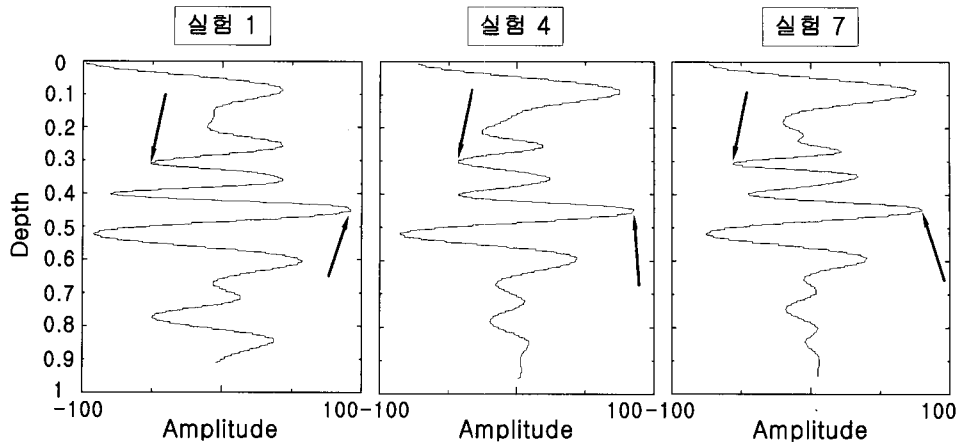


그림 11. 세립분함량 변화에 따른 GPR 반사파형(거리역)

표 3. 유전상수 값

구분	유전상수		
	도상층	관입층	노반층
실험 1	3.3	3.3	10
실험 2	3.3	3.3	17
실험 3	3.3	3.3	22
실험 4	3.3	6	10
실험 5	3.3	7	16
실험 6	3.3	7.5	22
실험 7	3.3	7	10
실험 8	3.3	8	18
실험 9	3.3	8.5	23

유전상수는 자연함수비 상태에서는 10이었으나, 함수비 증가에 따라 23까지 증가하였다.

2.4 상태평가 현장시험

현장시험은 경부선 하행 1선 00k000~00k500m구간에서 실시하였다. 동 구간에서 GPR 왕복 1회, PBS 5개소, LFWD 11개소에 대한 시험을 실시하였다. PBS는 철도에서 도상 및 상부노반의 일부를 샘플링 할 수 있도록 내경 68mm, 샘플링 깊이 115cm까지 굴착할 수 있는 장비로 궤도하부의 층 두께를 직접 확인할 수 있다. 그림 12는 시험 구간과 시험 지점을 보여준다. 시험구간은 노반분리가 자주 발생하는 구간과 선로 상태가 양호한 구간이 혼재하는 구간을 선택하였다. 현장 상태에 대한 육안 조사 결과 47m에서 90m 구간에서 2~3m 간격으로 노반분리가 발생한 것을 확인할 수 있었다.

시험 구간
(경부 하 1선 00k000~00k500m)

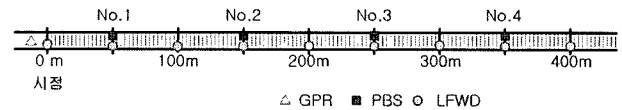


그림 12. 시험구간 및 지점

표 4. 시추공 1의 관입층 두께 및 유전상수 값

구분		No.1(50m)
경계면깊이 (m)	D ₁ (도상깊이)	10
	D ₂ (관입층깊이)	100
	ΔD(관입층 두께)	90
반사파 도달시간 (ns)	2T ₁ (도상/관입층 경계)	1.3
	2T ₂ (관입층/노반 경계)	18
	2ΔT(관입층)	16.7
전파속도 (m/s)	V ₁ (도상층)	15.38
	V ₂ (관입층)	10.78
유전상수	ε ₁ (도상층)	3.8
	ε ₂ (관입층)	7.7

표 4는 시추공 No.1(50m 지점)에 대한 층별 유전상수 값이며, 그림 13은 0~100m 구간의 궤도 중앙면에서의 GPR 단면도 및 시추주상도이다.

그림에서 위쪽 실선은 도상과 관입층의 경계를, 아래쪽 실선은 관입층과 노반층의 경계를 나타낸다. 노반분리가 많이 발생한 구간에서 도상층의 노반으로의 관입이 많이 진행된 것을 확인할 수 있다. 시추공 확인 결과 No.1(50m 지점)에서 도상층의 두께가 얇고, 관입층이 두텁게 발달하고 있는 것을 확인할 수 있었다.

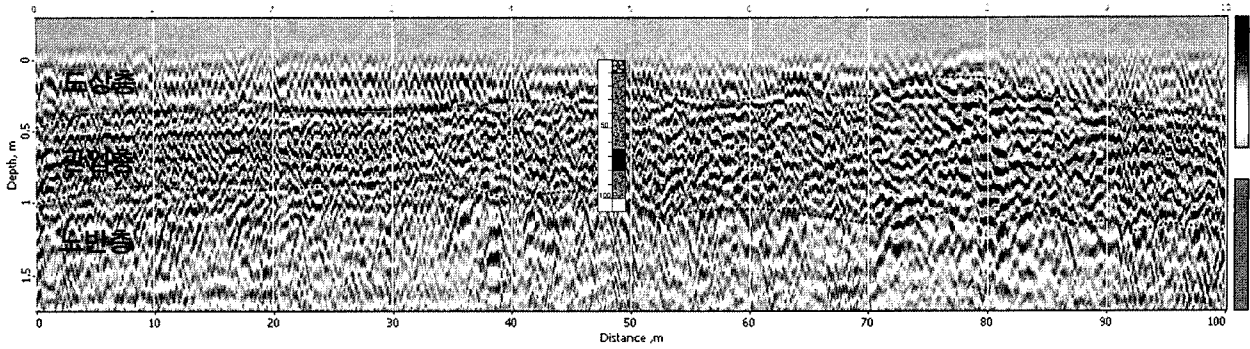


그림 13. GPR 단면도 및 시추주상도(0~100m 구간)

3. 궤도하부의 강성평가

열차통과톤수의 증가와 함께 지속적으로 증가하는 궤도틀림을 적절하게 평가하기 위해서는 레일의 수직 지지강성을 평가하는 것이 가장 중요하다. 그러나 레일의 수직지지강성을 평가하는 것은 현 단계로서는 쉽지 않다. 따라서 본 연구에서는 궤도를 지지하는 침목과 도상의 지지강성을 평가하기 위하여 LFWD를 활용하여 침목 및 도상의 수직침하량을 측정하였다. LFWD 시험은 50m 간격으로 총 11개소에 대하여 실시하였다(그림 12 참조). 그림 14는 지점별 측정개소를 보여준다.

열차 주행 시에 궤도구성품에 발생하는 응력과 LFWD 시험 수행 시 발생하는 응력을 비교하여 재하판의 무게와 직경을 변화시켜 시험을 실시해야 하나, 본 시험은 초기 단계의 시험이고 열차 운행 차단의 시간적인 제약 등의 이유로 재하판의 직경을 10cm, 재하 하중을 15kg으로 고정하고 시험을 실시하였다.

그림 15와 그림 16은 침목 및 도상침하량에 대한 시험 결과이다. 침목의 침하에 대한 시험 결과를 보면, 노반분리가 발생한 지점인 50~100m 구간에서 침하량의 변화가 크며, 지점별 침하량의 차이를 확인할 수 있었

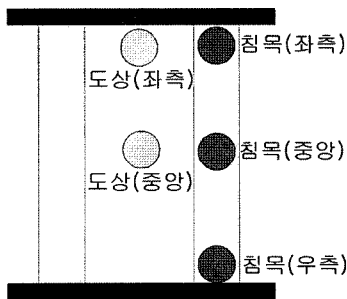


그림 14. 지점별 측정개소

다. 침하량은 최대 1mm를 초과하지 않았다(그림 15). 도상침하량은 일정한 경향을 찾기 힘들었고, 최대 2mm 정도의 침하가 발생하여 침목보다 침하가 크게 발생하였다(그림 16).

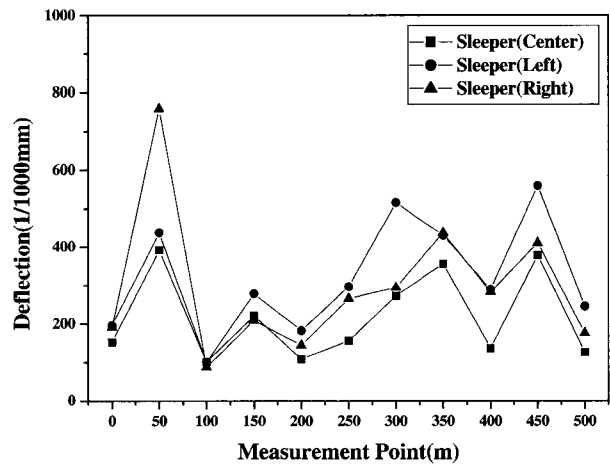


그림 15. 침목 침하량

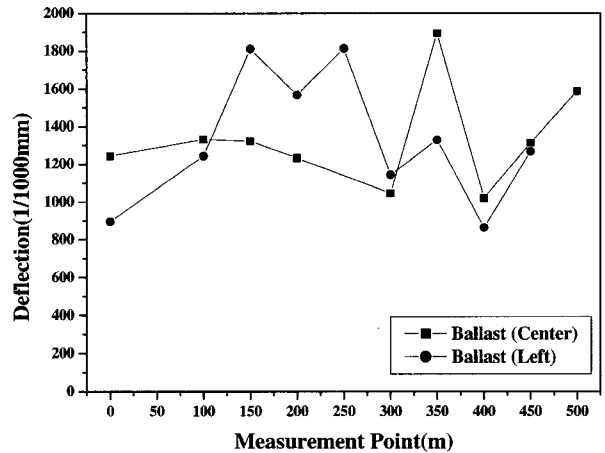


그림 16. 도상 침하량

4. 결론

궤도하부의 상태평가를 위하여 GPR/PBS/LFWD로 구성된 궤도기초 상태평가법을 제안하였다. 궤도기초 상태평가법의 적용성을 확인하고자 수행한 실내 실험과 현장시험의 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) GPR 실내 실험

1) 안테나 방향과 높이

레일 종 방향에 평행하고 안테나가 서로 평행하게 배치된 경우가 층 두께 파악에 있어서 가장 안정되고 선명한 결과를 보여주었다. 안테나 높이의 경우 사용 안테나의 주파수의 영향을 받을 것으로 판단되나, 본 실험에 사용된 750MHz 안테나 시스템에서는 15~25cm 정도가 적절한 안테나 높이로 판단되었다.

2) 함수비와 세립분 함량이 층 두께 판정에 미치는 영향

표 5. GPR 실내 시험으로 얻은 결과

항목	함수비 증가	세립분 함량 증가
경계면 반사파 강도	증가	감소
반사파 지연여부	약간 지연	지연
두께 판정에 미치는 영향	영향 적음	영향 큼

3) 유전상수

건조하고 신선한 도상 자갈의 유전상수는 3.3 정도였다. 관입층의 유전상수는 함수비 및 세립분 함량에 따라 3.3~8.5 범위의 값을 가졌다. 노반층 유전상수는 자연함수비 상태에서는 10이었으나, 함수비 증가에 따라 23까지 증가하였다.

(2) LFWD 현장 시험

LFWD를 이용하여 침목 및 도상에 대한 침하량을 정량적으로 평가할 수 있었다. 경부선 시험 구간에 대하여 실시한 LFWD 시험에서 발생 최대 침하량은 침목(0.8mm), 도상(1.9mm)으로 도상에서의 처짐이 크게 발생함을 확인할 수 있었다. 본 연구에서 수행한 예비 단계의 시험을 통하여 뜬침목에 대한 정량적인 평가가 가능할 것으로 판단되었다.

(3) GPR과 PBS 상태평가법으로 경부선 궤도하부의 층 두께를 파악할 수 있었으며, LFWD로 침목과 도상의 처짐량을 측정함으로써 궤도의 수직 지지강성을 평가할 수 있는 가능성을 확인하였다. 현재 연구의 초기 단계로 향후 자료가 축적되면 개소별, 상태별로 정량적 지지강성 평가가 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

현장시험 실시에 많은 도움을 주신 지오글로벌스(주)와 수원시설 관리사무소 직원 여러분에게 깊은 감사를 표합니다.

참고 문헌

- Burrow M. Madelin M. (2004), "Track sub-base monitoring and performance", *Railway Engineering 2004*.
- Sharpe P. "Trackbed Investigation", Scott Wilson Pavement Engineering Report.
- Sussmann, T.R., Selig, E.T., and Hyslip, J.P. (2003), "Railway track condition indicators from ground penetrating radar", *NDT & E international*, Vol.36, pp.157-167.

(접수일자 2005. 5. 31, 심사완료일 2005. 7. 5)