

궤도노반의 상태 및 품질평가에 관한 연구

Evaluation on the condition and quality of railway track substructure

김대상¹⁾ Dae-Sang Kim, 박태순²⁾ Tae-Soon Park

¹⁾ 한국철도기술연구원 선임연구원, Senior Researcher, Korea Railroad Research Institute

²⁾ 서울산업대학교 교수, Professor, Seoul National University of Technology

개요(SYNOPSIS): Track substructure(ballast, subgrade) should have sufficient strength and adequate stiffness to fully support track superstructure(rail, fastener, sleeper). Vertical support stiffness of track comes from the sufficient thickness, adequate strength and stiffness of material of substructure layers. Since the vertical support stiffness of track substructure is closely related with the track geometry, the evaluation of the stiffness is very important to understand the track states. This paper introduces the system, which are composed of Ground Penetrating Radar(GPR), Portable Ballast Sampler(PBS), and Light Falling Weight Deflectometer(LFWD), to evaluate substructure condition and summarizes the field test results performed with the reliable system.

주요어(Key words): Vertical support stiffness, Ground Penetrating Radar(GPR), Portable Ballast Sampler(PBS), Light Falling Weight Deflectometer(LFWD)

1. 서 론

철도에서 궤도는 크게 상부구조와 하부구조로 나눌 수 있다(그림 1). 상부구조는 레일, 체결구, 침목으로 구성된 부분을, 하부구조는 도상 및 노반으로 구성된 부분으로 정의된다. 고속철도의 도입과 함께 강화노반 개념이 궤도하부구조에 도입됨으로서 도상 및 노반의 2층으로 구성되어 있었던 궤도하부구조는 다층구조로 바뀌게 되었다. 다층화 되고 있는 궤도하부구조와 함께 궤도를 지지하는 궤도하부에 많은 문제들이 발생되고 있으나, 아쉽게도 이에 대한 조사 방법이나 대처 방안은 확립되어 있지 않다.

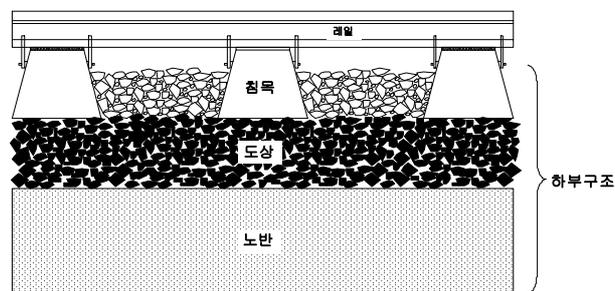


그림 1. 궤도 구조

입도 조정된 자갈(도상)과 노반으로 시공된 궤도를 유도상궤도(Ballast Track)라고 하는 데, 이는 궤도의 수직 침하 발생 시에 발생된 수직침하량을 보수하는 것을 전제로 건설된다. 유도상 궤도를 구성하는 주요부인 도상의 경우 선로의 등급에 따라 도상 두께가 250mm~300mm 이상으로 설계 할 것을 규

정하고 있으나, 도상의 강성 및 강도를 결정하기 위한 다짐이나 침하에 대한 기준은 정해져 있지 않다. 노반의 경우도 1층 구조인 일반 철도에서의 강성 기준은 평판재하시험으로부터 구한 지반반력계수로 규정하고 있으나 침하에 대한 기준은 정해져 있지 않다. 강화노반이 도입된 고속철도는 다층구조로 각 층의 두께는 다층 탄성이론에 기초하여 노반표면의 탄성 최대 처짐량이 일정치(2.5mm)이하가 되도록 층 두께를 결정하고 있다. 그리고 각 층에 대한 강성 및 강도에 대한 품질 기준은 평판재하시험을 2회 실시하여 구한 변형률계수(Strain Modulus)로 관리하고 있다.

궤도하부의 각 층의 두께와 층을 구성하는 재료의 강성 및 강도는 궤도의 수직지지강성을 확보하는데 있어서 중요한 요소들이다. 궤도의 수직지지강성이 중요한 이유는 수직지지강성이 변화하면 궤도틀림이 발생하고 이를 유지보수 하는데 많은 비용이 소요되기 때문이다.

따라서 본 연구에서는 우선적으로 궤도하부를 구성하는 층들의 두께와 상태 및 강성을 평가할 수 있는 신뢰할 수 있는 방법을 구축하여 실내실험 및 현장시험을 통하여 그 적용성을 확인하고자 한다. 상태평가법으로 고려된 방법은 비파괴검사법인 Ground Penetrating Radar(GPR)과 Light Falling Weight Deflectometer (LFWD) 및 파괴탐사법인 Portable Ballast Sampler(PBS)이다. 각 검사법의 사용 목적은 표 1과 같다.

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

2. 궤도하부 층 두께와 상태 평가 및 강성 평가 방법

궤도의 수직지지강성이 불균일하면 궤도에 국부적인 궤도틀림이 발생하고 이는 승차감을 저하시키며 탈선의 원인이 된다. 궤도틀림은 궤도검측차를 이용하여 측정할 수 있으나 이는 틀림 발생 후 문제 개소를 확인하는 작업이다. 따라서 궤도틀림의 근본 원인인 궤도 하부의 상태를 평가하여 문제가 발생하는 개소의 범위 및 두께를 정량적으로 파악하고 이 결과를 활용한다면 궤도 유지보수 작업을 효율적으로 수용할 수 있을 것이다. 상태평가 및 강성평가를 위하여 고려되고 있는 방법을 간단하게 정리하면 아래와 같다.

2.1 GPR(Ground Penetrating Radar)과 PBS(Portable Ballast Sampler)

2.1.1 GPR 탐사원리

그림 2와 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.

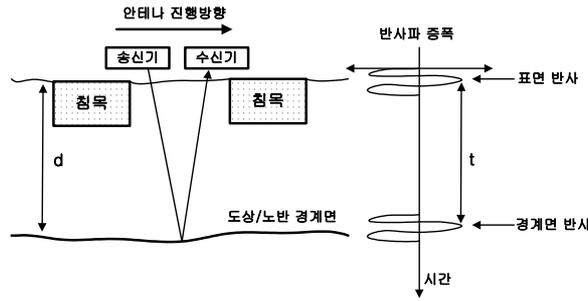


그림 2. GPR 실험 모식도

층 두께를 결정하기 위해서는 대상 매질의 유전상수(dielectric constant)를 이용하여 수직축인 시간 축을 거리로 환산하면 된다.

2.1.2 GPR의 철도에의 적용 목적과 문제점

궤도하부의 상태평가에 GPR을 적용하는 목적은 다음과 같다.

- 1) 층 두께 변화개소 파악 - 층 두께의 변화는 궤도의 수직지지강성을 변화시키고 궤도틀림 발생을 증가시키므로 층 두께 변화 구간을 파악한다.
- 2) 배수 불량 개소 파악 - 배수불량으로 발생하는 도상·노반 경계의 물웅덩이는 노반분니와 노반 파괴의 주요 원인이 되므로 그 위치를 파악한다.
- 3) 도상 세립분 함량 파악을 통한 오염도 파악 - 도상에 세립분 함량이 증가하면 도상의 탄성 및 배수능력을 저하시키므로 이를 파악한다.

궤도하부의 상태평가에 GPR 탐사법을 적용 시 문제점은 다음과 같다.

- 1) 일반 도로나 터널에서의 GPR탐사에서는 안테나를 측정하고자 하는 표면에 밀착시킨 채로 측정이 가능하나 궤도하부의 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 반사되어오는 전자파에 어떠한 영향을 미치는지를 평가해야 한다. 즉 조사를 위해서는 안테나를 어떤 방향과 높이에 배치할 때 도상·노반의 경계면으로부터의 신호가 가장 선명하게 나타나는지를 파악해야 한다.

2.1.3 안테나 높이 및 방향 결정

최적의 안테나 방향과 높이를 구하기 위하여 실내 실험을 수행하였다. 그림 3은 실내 실험 전경으로 도상 표면에서 노반 상면까지의 총 도상두께가 50cm인 실험용 공시체를 조성하여 실험을 수행하였다. 실험에 사용되는 안테나의 주파수에 따라 해상도 및 탐사 가능심도는 바뀌나, 본 연구에 사용된 안테나는 750MHz 공중안테나 시스템 한 종류였다.



그림 3. GPR 실내시험장면

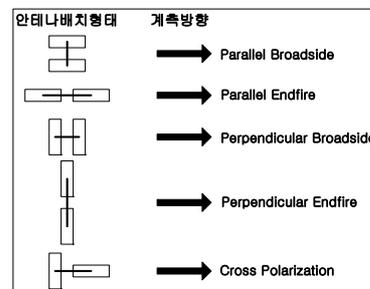


그림 4. 안테나 방향 및 배치형태

레일의 방향에 대한 안테나의 방향에 따라 그림 4와 같이 5가지 종류의 실험을 실시하고 안테나 높이

변화에 대한 실험을 수행하였다. 실험 결과 안테나의 방향이 레일의 종방향에 평행하고, 안테나가 서로 마주보며 평행하게 배치된 경우(Parallel Broadside, PaBr)와 도상 상면으로 부터의 높이가 15~25cm에서 최적의 반사와 신호를 확인할 수 있었다. 그림 5와 그림 6은 안테나의 높이를 변화하여 측정된 GPR 단면도를 보여준다. 그림의 X축은 측정 거리를, Y축은 신선한 자갈의 유전상수 3.3으로 계산된 깊이이다. 침목과 50cm 깊이의 도상·노반경계면이 잘 나타나고 있다.

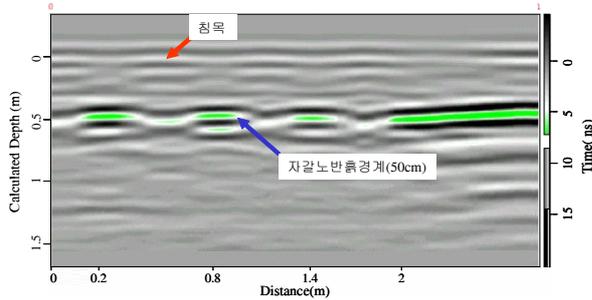


그림 5. GPR 측정 단면도(PaBr, 안테나 높이, h=15cm)

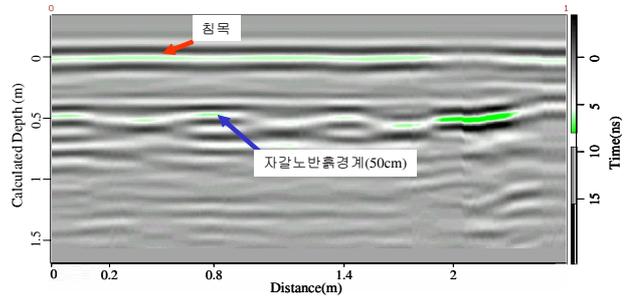


그림 6. GPR 측정 단면도(PaBr, 안테나 높이, h=25cm)

2.1.4 PBS(Portable Ballast Sampler)

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

- 1) 철도의 특성상 궤도는 안전을 최우선으로 하기 때문에 궤도에 교란을 주는 작업에 대한 보수적인 견해가 있었다.
- 2) 도상자갈 및 노반흙의 동시 샘플링이 쉽지 않았다. - 도상자갈은 입도가 크고 노반 흙은 상대적으로 입도가 작아서 동시에 샘플링하기에는 입경 범위가 너무 넓어서 샘플링이 쉽지 않았다.
- 3) 철도의 특성 상 작업 시간 확보가 어렵고 대형 시추 장비를 설치할 만한 공간을 확보하기가 어렵다.

따라서 본 연구에서는 도상자갈과 노반흙을 동시에 샘플링 할 수 있으면서 궤도상에서 2~3인에 의하여 이동이 가능한 회전·타격식 샘플러인 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. 그림 7은 샘플링을 실시하고 있는 장면이고, 그림 8은 채취한 시료이다.



그림 7. 샘플링 작업



그림 8. 채취한 시료

PBS는 현재 기준선과 고속선에서 도상 및 상부노반의 일부를 샘플링 할 수 있도록 내경 68mm, 샘플링 깊이 115cm까지 안정적으로 굴착할 수 있도록 제작하였다. 시추 속도는 장비 이동을 포함하여 1공당 30분 이내이다.

2.2 LFWD(Light Falling Weight Deflectometer)

궤도의 수직지지강성은 궤도강성(Track stiffness, k), 궤도기초계수(Track foundation modulus, u) 및 동적 침목지지강성으로 평가될 수 있다. 각각에 대한 정의는 아래와 같다.

1) 궤도 강성(Track stiffness, k) : 집중하중(P) 와 레일 수직 처짐(δ)의 비로 윤중 하에서의 최대 처짐 δ_m 을 이용하여 정의하며, 전 궤도 시스템(레일, 레일패드, 체결구, 침목, 도상, 노반)의 수직 강성을 측정하는데 이용된다.

$$k = \frac{P}{\delta_m} \quad (1)$$

2) 궤도기초계수(Track foundation modulus, u) : 궤도계수(Track modulus)라고도 하며, 이는 레일의 단위 길이당 단위 처짐에 대한 지지력으로 정의된다.

$$u = -\frac{q}{\delta(x)} \quad (2)$$

여기서, q 는 단위 길이 당 수직 지지력이다.

궤도 강성(k)과 궤도계수(u)는 탄성힘이론을 이용하면 식 3과 같이 연관 시킬 수 있다.

$$u = \frac{(k)^{\frac{4}{3}}}{(64EI)^{\frac{1}{3}}} \quad (3)$$

여기서, E : 레일의 탄성계수, I : 레일의 단면 2차모멘트이다.

따라서, 궤도계수는 레일의 강성 기여를 포함하지 않는 특징이 있다. 상기 식의 각 변수에 대한 정의는 그림 9에 설명되어 있다.

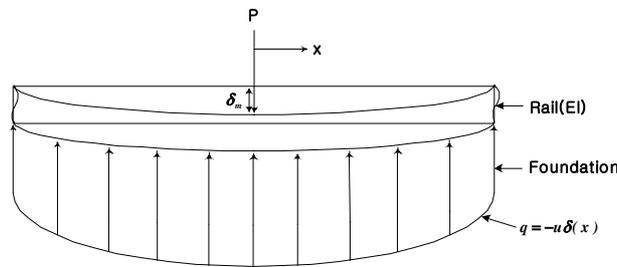


그림 9. 탄성 기초 상의 원클러 빔

3) 동적 침목지지강성 : 사인 펄스하중 작용시에 체결구가 체결된 상태의 침목에 작용하는 최대하중을 최대 침하로 나눈 값으로 중추낙하시험을 통하여 구한다.

본 연구에서는 궤도의 수직지지 강성을 평가하기 위하여 LFWD(Light Falling Weight Deflectometer)를 이용하였다. LFWD는 자유낙하 시킨 추로 인해 발생하는 충격 하중에 의한 처짐을 측정하며, 최대 처짐과 최대하중 관계에서 동탄성계수를 측정하는 시험장비이다. 소형으로 1~2인으로 이동이 가능하며 측정시간이 짧은 장점이 있다. 그림 10은 LFWD의 개략도로서, 낙하추, 고무완충기, 로드셀, 변위계와 재하판 및 데이터 출력장비로 구성되어 있다. 재하판 직경과 무게는 열차 하중을 고려하여 변화 시킬 수 있다.

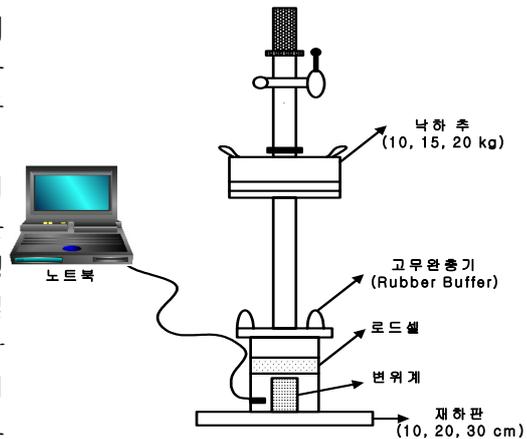


그림 10. LFWD의 개략도

3. 현장 시험결과 및 분석

3.1 GPR과 PBS

경부선 하행 1선 37k600~38k100m구간에서 현장시험을 실시하였다. 동 구간에서 GPR 왕복 1회,

PBS 5개소, LFWD 11개소에 대한 시험을 실시하였다. 그림 11은 시험구간 및 시험지점을 보여준다.

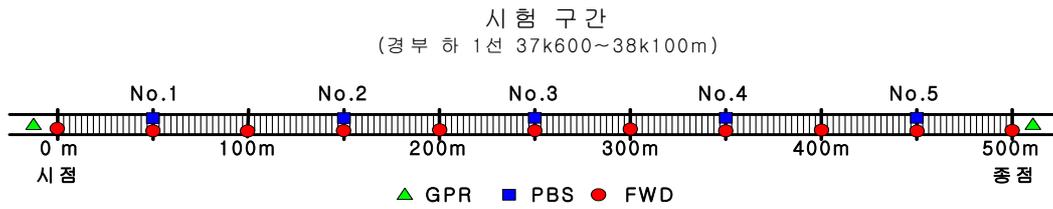


그림 11. 시험구간 및 시험지점(경부 하1선)

현장 상태에 대한 육안 조사 결과 47m에서 90m 구간에서 2~3m 간격으로 노반 분리가 발생한 것을 확인할 수 있었다. 그림 12는 0~100m구간에 대하여 층 두께를 파악한 GPR 단면도와 PBS 시추결과이다. 그림에서 위쪽 붉은선은 도상과 관입층의 경계를, 아래쪽 붉은선은 관입층과 노반층의 경계를 나타낸다. 노반분리가 많이 발생한 구간에서 도상층의 노반으로의 관입이 많이 진행된 것을 확인할 수 있다. 그림 13은 5개의 시추공에 대하여 각 층의 두께를 직접 확인한 결과로, 각 층의 두께를 비교한 결과 분기 다발 지역인 No.1(50m)의 경우, 도상층의 두께가 얇고, 관입층이 두텁게 발달하고 있는 것을 확인할 수 있다.

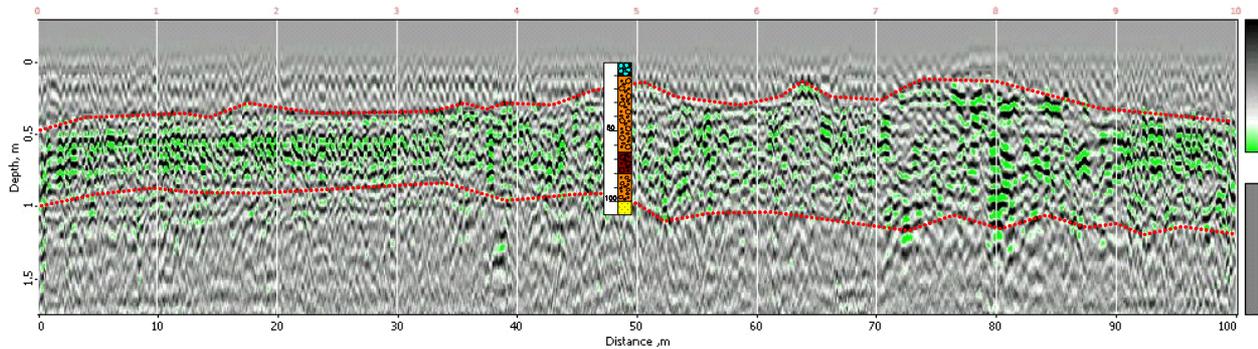


그림 12. 0 ~ 100m 구간의 GPR 단면도

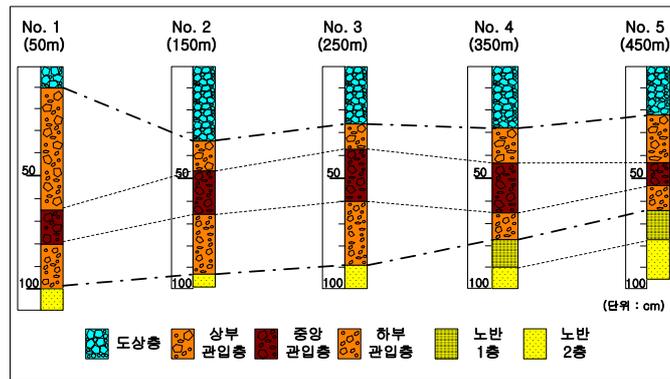
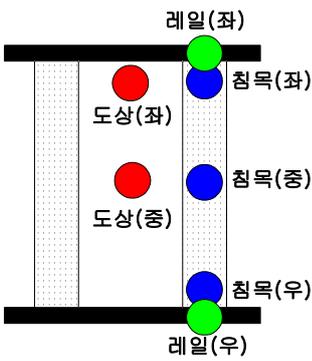


그림 13. 시추공별 층 두께 비교

3.2 LFWD

50m 간격으로 11개 지점에 대하여 LFWD 시험을 실시하였다. 그림 14와 같이 각 지점별로 총 7개소(침목 3개소, 레일 2개소, 도상 2개소)에 대하여 시험을 실시하였다. 레일에 대한 시험은 레일(좌·우)에서, 침목 상면에 대한 시험은 침목(중앙)과 침목(좌·우)에서, 도상에 대한 시험은 도상(중앙)과 도상(좌측)에서 시험을 실시하였다.

레일 상면에서의 시험은 재하판의 접촉 면적에 문제가 있으나, 레일의 처짐 정도를 지점별로 상대적



으로 평가하기 위하여 시험을 실시하였다. 침목의 경우 침목과 도상 자갈과의 접촉 상태에 따른 지지강성과 처짐의 변화를 평가할 수 있을 것으로 판단하여 시험을 실시하였다. 침목에 대한 처짐 결과로부터 뜬침목 발생 및 발생 가능성 여부에 대한 평가를 수행할 수 있을 것으로 판단된다. 도상층의 경우, 도상 다짐도에 따른 도상의 강성을 평가하기 위하여 시험을 실시하였다. 시험을 수행하기에 앞서 축중 20tonf의 열차주행 시에 궤도구성품에 발생하는 응력과 LFWD시험 수행 시 발생하는 응력을 비교하여 재하판의 무게와 직경을 변화시켜야 하나, 본 시험은 초기 단계의 시험이고 열차 운행 차단의 시간적인 제약으로부터 재하판의 직경을 10cm, 하중을 15kg으로 고정하고 실험을 실시하였다.

그림 14. 지점별 측정 개소

그림 15, 그림 16과 그림 17, 그림 18은 시험구간 전체에 대한 탄성계수와 처짐 측정결과이다. 표 2는 측정결과를 이용하여 구한 평균 탄성계수와 처짐값이다.

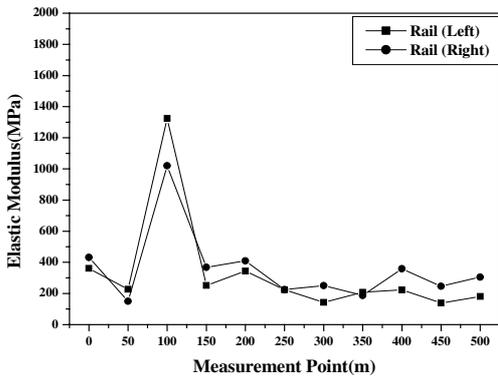


그림 15. 레일 상면 탄성계수

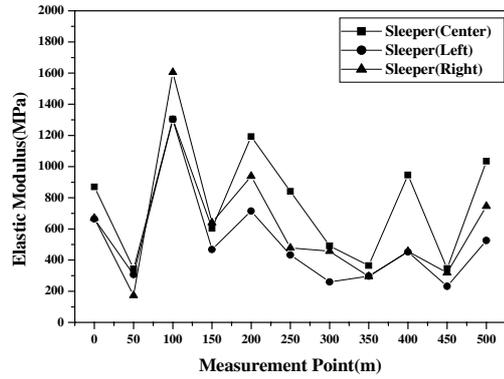


그림 16. 침목 상면 탄성계수

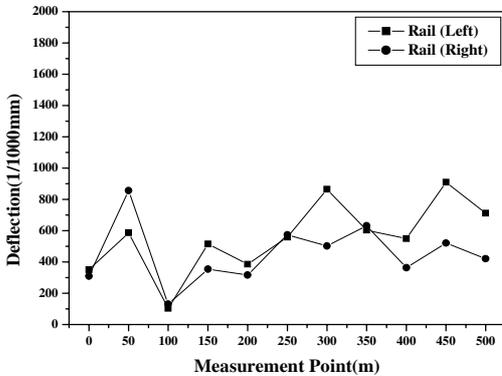


그림 17. 레일 상면 침하량

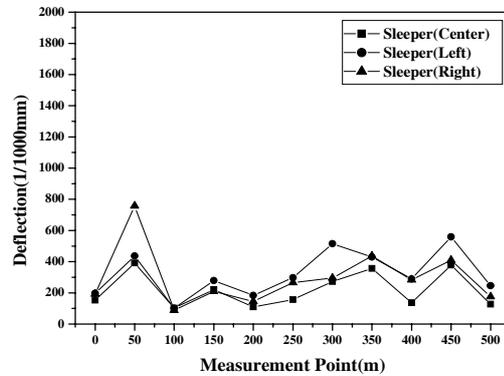


그림 18. 침목 상면 침하량

표 2. 평균 탄성계수와 처짐값

항목		탄성계수(MPa)	처짐(mm)
레일		261.5(100m지점 제외)	< 0.9
침목	좌측	514	< 0.8
	중앙	758	
	우측	616	
도상		97.6	< 1.9

탄성계수의 경우, 분리가 발생하기 시작하는 지점인 50m지점에서 좌우레일의 평균 탄성계수값은 188.3MPa로 가장 작은 값으로, 가장 큰 평균 탄성계수 값을 보여주는 100m지점의 평균탄성계수 값인 1172.5MPa의 약 1/6수준이었다. 불과 50m 떨어진 두 지점의 탄성계수가 6배 변화하는 것을 알 수 있다. 100m 지점은 분리 발생이 끝나는 지점으로 강성이 다른 지점보다 크게 측정되었다. 100m 지점을 제외한 전 지점의 레일에서의 탄성계수의 평균값은 261.5MPa 이었다. 레일의 좌우에 따른 강성 변화는 크지 않았다. 침목상면에 대한 시험결과는 레일과 비슷하게 50m 지점에서 탄성계수가 가장 작았고, 100m 지점에서 가장 큰 탄성계수 측정값을 보였다. 평균적으로 보면 침목 중앙(758MPa)에서의 탄성계수가 침목 좌측(514MPa)이나 침목 우측(616MPa)에서 측정한 탄성계수 보다 큰 결과를 보였다. 그리고 침목에서 측정한 탄성계수가 레일에서 측정한 탄성계수보다 전체적으로 큰 탄성계수 값을 보였다. 도상상면에서는 레일이나 침목에서의 측정 결과보다 강성이 훨씬 작고 변화의 폭도 크지 않았다. 측정된 탄성계수의 전체 평균값은 97.6MPa이었다.

처짐의 경우, 레일과 침목에 대한 시험 결과를 보면, 분리가 발생한 지점인 50~100m 구간에서 처짐량의 변화가 크고, 레일보다는 침목에서의 시험결과가 분산이 작았다. 침하량은 최대 1mm를 초과하지 않았다. 도상 침하량은 일정한 경향을 찾기 힘들었고, 최대 2mm 정도의 처짐이 발생하여 레일이나 침목 보다 처짐이 크다는 것을 알 수 있었다. 도상의 강성을 평가할 수 있는 방법이 확립되어 있지 않은 현 단계로서는 동 탄성계수 시험결과와 정 탄성계수 시험결과를 정량적으로 비교하는 것은 성급하다고 판단된다. 현재로서는 측정 지점에 대한 상대적인 강성과 처짐량에 대한 경향을 파악하고 좀 더 많은 자료를 수집한 후에 정량적인 결과에 대하여 언급할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결론

경부선 하행 1선 37k600~38k100m구간에 대하여 선로상태 평가법으로 제안한 GPR, PBS 및 LFWD를 적용하여 궤도하부의 상태평가를 정량적으로 수행할 수 있는 신뢰할 수 있을 만한 체계를 구축하였다.

- 1) GPR 및 PBS를 이용하여 전 구간에 대한 도상 두께 정보 및 도상두께 변화개소에 대한 정보를 얻을 수 있었다. GPR의 적용성을 높이기 위해서는 다양한 안테나 주파수에 의한 시험과 측정 시험 속도를 향상시키는 시험에 대한 연구를 진행할 필요가 있을 것으로 판단된다.
- 2) PBS를 이용하여 도상자갈과 노반 흡을 동시에 성공적으로 샘플링 할 수 있었다. 샘플링한 시료에 대한 물성실험을 통하여 도상 상태에 대한 평가를 수행하였다. PBS로부터 도상층의 상태(세립분 함량과 현장함수비)에 대한 정보를 획득할 수 있었다. 개발된 PBS는 내경 68mm이며, 115cm 깊이까지 도상자갈과 노반흡을 동시에 시추할 수 있다.
- 3) LFWD를 이용하여 궤도의 수직지지계수를 평가하고자 하였다. 레일상면, 침목상면, 도상상면에 대한 현장시험으로부터 각 측정개소에서의 탄성계수 및 처짐량을 정량적으로 평가하였다. 아직 연구 초기 단계로 자료가 축적되면 개소별, 상태별로 정량적 강성 평가가 가능할 것으로 판단된다. 시험 구간에 대한 평균 탄성계수값은 레일(261.5MPa), 침목(629MPa), 도상(97.6MPa)이었고, 시험 시 발생한 최대 처짐량은 레일(0.9mm), 침목(0.8mm), 도상(1.9mm)으로 도상에서의 처짐이 가장 크게 발생하였다.

5. 참고문헌

1. Burrow M. Madelin M.(2004), "Track sub-base monitoring and performance", Railway Engineering 2004.
2. Sharpe P. "Trackbed Investigation", Scott Wilson Pavement Engineering Report.