

# 포장궤도 구조결정을 위한 현장상태 조사

## The Investigation of the In-Situ state to Determine the paved Track Structure

이일화\*                  황선근\*\*                  박태순\*\*\*                  이보형\*\*\*\*                  고태송\*\*\*\*  
Lee, Il-Wha    Hwang, Seon-Keun    Park, Tae-Soon    Lee, Bo-Hyoung    Ko, Hak-Song

---

### ABSTRACT

Recently, the development of paved track is required as a Low-maintenance of conventional line. The most important factor of paved track is stability and applicability. In this method, the ballast is grouted with mortar so that the ballast can turn into a structure like slab. This method can be subdivided into the followings. One is the method with switching the ballast, and the other is without switching the ballast. The ordinary and actual states of the ballast and roadbed were investigated to evaluate the applicability of the paved track structure in this study, and various In-situ tests were applied. Non-destructive tests such as GPR, SASW, FWD were used, and bearing capacity of roadbed, depth of the ballast, and deterioration, penetration, and contamination of the ballast were focused. The result of this investigation was utilized in the selection of optimal paved track structure and data for preliminary design.

---

### 1. 서    론

현재 신선의 궤도구조는 콘크리트도상궤도를 채택하는 것이 세계적인 추세이다. 콘크리트도상궤도 채택의 가장 주된 이유는 유지보수의 절감이라 할 수 있다. 기존선에서도 유지보수절감을 목적으로 콘크리트도상화에 대한 연구가 진행중인데, 가장 중요한 것은 열차 운행에 지장(차단 또는 저속)을 주지 않으면서 시공이 가능한 공법이라야 한다. 이러한 궤도구조를 포장궤도라고 말하며, 일정 도상자갈층을 모르타그라우팅 주입 등의 방법으로 콘크리트 슬래브화(化)시키는 공법이라 할 수 있다. 다음 그림1은 본 연구를 통하여 결정된 포장궤도구조의 개념도이다. 포장궤도는 크게 도상자갈 교환시공법과 무교환시공법으로 구분할 수 있다. 자갈교환공법의 시공순서는 침목 및 체결구교체 - 도상굴삭 - 부직포타설 - 새도상채움 - MTT작업 - 모르타그라우트채움 순으로- 타설 1시간 후 정상운행을 목표로 하고 있다.

---

\* 한국철도기술연구원 궤도토목연구본부 선임연구원

\*\* 한국철도기술연구원 궤도토목연구본부 책임연구원

\*\*\* 서울산업대학교 토목공학과 교수

\*\*\*\* 한국철도기술연구원 궤도토목연구본부 연구원

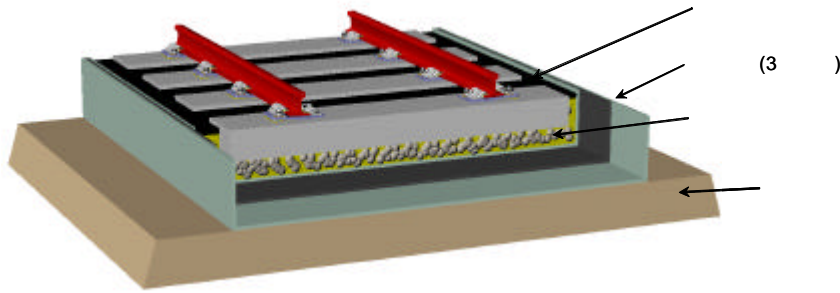


그림 1. 포장케도의 개념도

본 논문에서는 각 포장케도공법의 적용성을 평가하기 위하여 시험개소의 도상 및 노반에 대한 상태조사를 수행하였다. 이를 위하여 다양한 현장조사기법들이 적용되었다. 주요 시험목적은 기존 노반의 지지력, 도상의 두께, 그리고 도상의 파쇄, 관입 및 오염도 등에 대한 조사이다. 조사결과는 기존선 도상자갈케도에 적용할 최적포장케도 구조 결정 및 기본 설계 자료로 활용되었다.

## 2. 현장시험 개요

현장시험은 도상굴착 및 노반면에 대한 표 1. 각 시험개소의 케도상태 및 특징

개소	구간	상태	비고
1. 98k 600	직선구간	보통	도상세립화
2. 98k 800	직선구간	불량	도상세립화
3. 94k 700	R400 곡선구간	매우불량	분니구간
4. 92k 650	R1200 곡선구간	보통	임시특수선

현장시험을 위하여 시험개소는 4개소를 선정하였다. 각 개소는 노반 및 케도의 상태가 각기 상이한 개소로서 각 개소별 특성을 비교, 검토하기 위하여 선정되었다. 표 1은 각 개소에 대한 케도상태 및 특징을 나타낸 표이며 표 2는 현장시험 항목과 내용을 나타낸 표이다.

표 2. 현장시험 항목 및 내용

분야 및 항목		시험목적	시험내용
굴착시험		도상 및 노반상태 확인	도상 및 노반의 오염도, 풍화도, 입도변화, 자갈관입, 재료의 종류 등
지지력평가	FWD	노반 지지력평가시험	하중/진동가속도를 이용하여 노반의 지지력을 비파괴적으로 조사
	SASW	노반 지지력평가시험	지반탄성파의 위상차를 이용하여 노반의 지지력을 비파괴적으로 조사
	PBT	노반 지지력평가시험	하중/변위관계를 이용하여 노반의 지지력을 직접적으로 조사
도상두께	GPR	도상/노반경계면 비파괴조사시험	전자기파와 지반의 유전율 등을 이용하여 매질의 특성을 2차원적으로 조사
	직접굴착	도상/노반경계면 육안조사	도상두께 확인

## 3. 직접굴착시험

시험선로는 사용공용년수가 거의 70년 정도된 선로로서 도상 및 노반의 상태를 정확히 파악하기 위해서는 직접굴착에 의한 조사가 필요하였다. 그래서 각 개소에 대하여 굴착조사를 시행하여 도상 및 노반의 오염도, 도상의 파쇄도, 풍화도, 입도변화, 자갈관입, 재료의 종류, 시공법의 추정

등을 파악하였다. 현장시험개소는 장기간 사용이 된 선로이고 폐선이 결정되면서 약 2년간 거의 유지보수를 수행하지 않았기 때문에 기존선의 상태 중 매우 취약한 개소라고 할 수 있다.

### 3.1 도상자갈의 마모 및 파쇄

현장시험개소에서 도상자갈은 열화가 상당히 많이 진행되어 자갈의 모난 부분이 대부분 마모되었다. 또한 외부에서 유입된 것으로 판단되는 토사와 파쇄된 석편/석분이 공극을 채우고 있었다. 4번개소에서도 파쇄가 상당히 진행되었는데, 사용년수가 2년 밖에 되지 않은 특수선 이라는 점을 고려할 때 파쇄의 주 원인을 통과하중보다 다른 요인에 의한 것이라 유추되었다.

### 3.2 도상의 관입

자갈도상은 자갈입자가 불규칙적인 배열이므로 하중에 대한 침하특성 또한 불규칙적이다. 즉 다른 조건들이 균일하다고 할지라도 여전히 자갈도상에서의 횡방향 및 종방향의 부등침하는 지속적으로 발생하게 된다. 이러한 영향은 자갈도상 및 노반의 불균일성, 철도하중의 반복적 재하, 기후변화 등에 의해 영향을 받는다. 일반적으로 노반 설계시, 노반에 작용하는 하중은 침목면적에 비례하여 등분포로 작용한다고 가정하지만, 실제 하중은 레일직하부에서 가장 크다. 그림 2는 전형적인 도상관입이 나타난 노반으로서 레일위치를 기준으로 “W”자 형태를 보이고 있다. 도상관입은 노반의 상태에 따라 편차가 크며 노반이 불량할 경우, 관입깊이가 30cm를 넘는 곳도 있는 반면, 노반상태가 양호한 개소에서는 도상관입이 전혀 없었다.



그림 2. 전형적인 도상관입의 형상

### 3.3 MTT작업의 의한 도상의 파쇄

모든 시험개소에서 도상파쇄현상이 관찰되었다. 예전에는 도상자갈의 세립화는 반복열차하중에 의해 기여가 크다고 판단하였으나 최근 MTT(멀티타이템퍼)에 의한 케도보수가 정착되어, MTT작업에 의한 세립화가 지적되고 있다. 국내 연구결과에서도 도상열화의 가장 큰 원인이 MTT작업인 것으로 분석되었다. 그림 3은 2번 개소에서의 노반단면으로서 레일을 중심으로 양쪽침목하단에서 도상의 파쇄가 심한 것을 볼 수 있다. 즉, 파쇄위치가 MTT 다짐봉이 삽입되는 위치로서 도상자갈이 상부와 하부 모두 심각하게 파쇄가 진행된 것을 볼 수 있다.



그림 3. MTT작업에 의한 도상파쇄 형상

### 3.4 도상자갈층의 오염도

도상자갈층의 오염도에 대한 지표는 도상입자의 중량비로서 나타낸다. 영국철도(BR)의 경우

14mm보다 작은 입자를 오염물질로 구분하였으며, Selig는 입경이 9.5mm보다 작은 입자를 오염물이라고 구분하였다. BR의 기준을 적용할 경우, 14mm이하 입자가 전체중량대비 30%를 초과하면 완전오염으로 분류하였는데, 시험개소의 대부분이 완전오염으로 구분되었다. 오염의 주원인은 도상의 파쇄 및 마모, 하부노반토의 상승, 외부유기물의 유입 등으로 판단되며, 특히 침목직하부에서의 오염도가 높았다.

### 3.5 분니개소

개소 3의 경우는 노반분니가 심하게 발생한 지역으로 도상층은 심하게 오염이 되어 공극의 대부분이 석분과 흙으로 채워져 있다. 이런 상태에서는 강우시 도상 연약화에 의해 궤도지지기능이 극도로 저하된다. 오염의 주요 원인은 장기간에 걸친 외부 토사유입인 것으로 판단된다. 또한 측구에 배수상태가 불량하여 강우시 적절한 배수를 유도할 수 없는 상황이었으며, R400의 급곡선부 절토구간이다.

## 4. 도상두께평가지험

일반적으로 포장궤도적용시 충전두께는 최소 20cm가 확보되어야 한다. 측정을 위하여 비파괴적으로 연속시험이 가능한 GPR(Ground Penetration Radar)을 도입하였다. GPR에서는 대상노반의 유전율과 반사파의 정보를 이용하여 층간 구분이 가능하다. 도상두께의 결정은 도상과 노반의 경계층을 탐색하여 평가하였으며, 석분 및 토사가 많이 함유된 부분과 도상관입층은 제외하였다. 조사결과 도상층의 두께는 20~35cm범위 내에 있는 것으로 조사되었으며, 일부 노반상태가 불량한 구간에서는 도상두께의 변동폭이 컸다. 직접굴착 결과 평균적인 신뢰도는 높은 것으로 판단되나, 도상층에 토사와 석분함량이 많은 개소의 경우에는 경계면 구분이 어려워 분석결과의 신뢰도가 낮은 것으로 나타났다.



그림4.현장GPR시험 장치

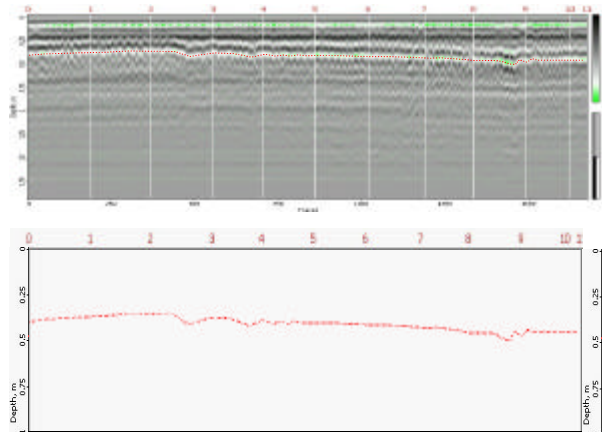


그림5.GPR결과분석

## 5. 지지력평가지험

지지력평가지험은 기존선의 노반지지력을 평가하기 위하여 수행하였다. 일본의 경우 포장궤도 적용의 최소 지지력 기준으로  $K_{30}$ 값이  $7 > \text{kgf/cm}^3$  을 적용하고 있다. 포장궤도는 포장층이 연속체로 시공이 되기 때문에 노반의 상태도 연속적으로 안정되어 있어야 한다. 국부적인 노반연약개소는 향후 포장궤도의 유지관리에 매우 큰 영향을 미치기 때문에 사전 평가에 의한 감지가 중요하다. 지지력평가지험에서는 SASW나 FWD와 같은 비파괴조사기법들을 도입하였는데, 이는 향후 기존선에 적용시 2차원의 연속적인 평가가 가능하고, 평판재하시험과 같이 도상을 제거하고 시험하는 불편을 없애기 위함이다.

### 5.1 SASW(Spectral Analysis of Surface-Waves)시험

SASW시험은 표면파(레일리파)의 위상차를 이용하여 노반의 지지력을 평가하는 시험이다. 충격 또는 진동에 의해 시작된 표면파의 측정은 발진원과 일직선 상에 위치한 지점에서 이루어지는데, 각 감지기에서 측정된 표면파의 속도차이를 측정하여 지반의 강성을 평가한다. 파 전파 속도의 결정은 FFT를 이용하여 400~800개의 주파수성분을 동시에 구한다. 최종적으로 지반의 강성은 현장측정 결과를 역산해석하여 구하게 된다.

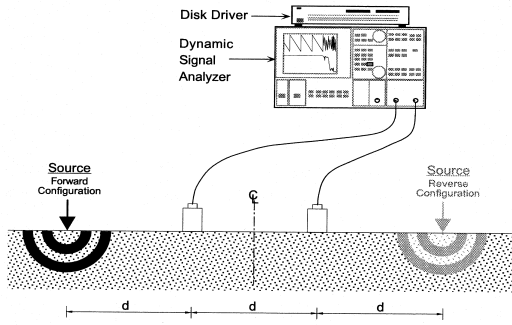


그림6. SASW실험개념도

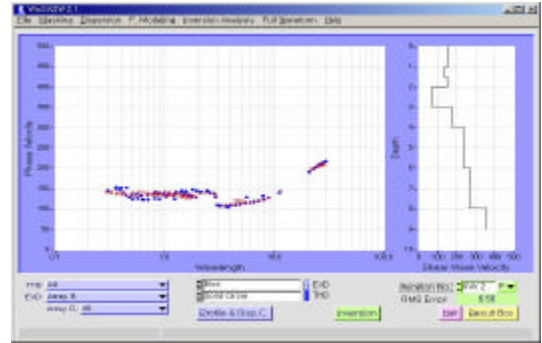


그림7. 분산곡선과 깊이별 전단파속도

### 5.2 FWD(Falling Weight Deflectometer)시험

FWD시험은 노반표면의 변위를 이용하여 강성을 평가하는 시험 방법이다. 충격재하 장치를 이용하여 측정하고자 하는 위치표면에 충격을 가하면 충구구조체에서는 충격이 발생하고 이때 발생된 처짐이 센서를 통하여 측정된다. 현재 FWD 측정방법은 ASTM D4694-87에 규정되어 있으며 시험과 관련된 규격으로 ASTM D4695-87에 규정되어 있다. 처짐 수진장치로는 속도계 또는 가속도계를 사용하며 포장의 최대 수직변형을 측정한다.



그림 8. FWD시험 장비

### 5.3 평판재하시험

평판재하시험은 하중과 변위량의 관계에서 지반의 강도 및 변형특성을 알기 위하여 실시하는 시험이다. 현재 국내 노반설계기준으로 적용되고 있는 방법으로서 기존 기준과 비교하기 위하여 비파괴시험기법과 병행하여 수행하였다. 신선건설시 적용되는 K<sub>30</sub>값은 11kgf/cm<sup>3</sup> 이상이 적용된다.

### 5.4 지지력시험결과의 비교

현장의 지지력시험측정 결과를 각 시험개소에서 노반의 강성을 탄성계수로 나타내면 그림 9와 같다. 실험 측정결과 1번, 2번개소는 같은 직선구간임에도 약간의 강성차를 나타내고, 3번개소의 경우는 분니 발생개소로서 다른 개소에 비하여 상대적으로 매우 연약한 것으로 나타났다. 시험결과는 Vesic의 방정식을 이용하여 E값으로 환산하여 비교하였다. 여기서 B는 재하판의 폭, μ는 포아슨비, k<sub>s</sub>는 지반반력계수이다.

$$E_s = k_s B (1 - \mu^2) \quad \text{식 1.}$$

각 개소별 시험결과를 비교해 보면 상관성이 높은 것으로 나타났지만, 1번개소와 4번개소는 변동폭이 큰 것으로 나타났다. 이는 각 시험시 위치가 정확히 일치하지 않았고 재하시험시 관입된 도상의 잔재 때문인 것으로 판단된다. 또한 결과분석시 시험별 응력구간의 영향범위가 고려되지 않았기 때문이다. 평판재하시험의 경우는 응력의 영향 범위가 크지만, FWD시험의 경우 가진하중

이 작기 때문에 약 1m정도의 지반특성만 반영되었고 SASW의 경우도 지표면에서 1m까지의 전단파속도를 Slowness를 이용하여 계산하였다.

## 6. 결 론

시험개소의 현장굴착조사 결과 도상은 상당히 심한 열화가 진행되어, 공극은 대부분은 토사와 석분 등으로 채워져 있어 도상상태가 불량하였다. 도상상태 불량개소에서는 노반불량현상도 같이 나타나, 반복적인 궤도변상의 주원인이 노반에 있는 것으로 조사되었다. 포장궤도 적용에 있어 전체적으로 시험개소의 노반상태는 최소기준을 만족하지만, 도상상태는 매우 취약하여 자갈무교환 방식을 적용하는 것은 불가능하다.

현장조사를 위하여 다양한 비파괴시험법들을 도입하였는데, 시험결과의 신뢰도가 비교적 높았으며, 향후 추가적인 시험 등을 통하여 기준이 정립된다면 굴착이 불가한 본선에서의 상태평가 등에 그 적용성이 높을 것으로 판단된다.

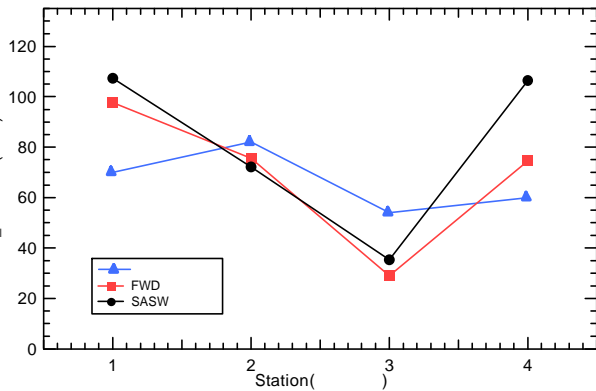


그림9.탄성계수에 의한개소별실험결과비교

## 후 기

본 연구는 철도청에서 시행한 철도기술연구개발사업중 “철도유지보수시스템 기술개발”과제의 일환으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. 박태순(1999), ‘FWD를 이용한 포장구조 평가 및 유지보수방법’, 한국도로포장공학회지, 제1권 2호, pp.27~33
2. 이일화, 조성호(2003), “Multi-channel SASW기법의 특성에 관한 수치해석 연구”, 대한토목학회 논문집, 제23권 제6C호 pp.407-415.
3. 이일화, 조성호(2004), “반무한체와 다층구조 지반에서 러브파와 레일레이파의 위상속도 분산특성“, 한국지반공학회 논문집 제20권, 1호, pp61-73.
4. 철도도상개량을 위한 기초연구(1999), 한국철도기술연구원