

## 실내모형토조 가력시험을 이용한 아스팔트 노반궤도의 거동분석

### Behavior Analysis of Asphalt Roadbed using the Prismoidal Chamber Loading Test

이성혁\*, 조호진\*\*†, 송근우\*\*, 박재범\*\*, 임유진\*\*

Seong Hyeok Lee\*, Hojin Cho\*\*†, Geunwoo Song\*\*, Jaebeom Park\*\*, Yujin Lim\*\*

**Abstract** In order to provide stability and vibration reduction onto track structure, asphalt trackbed foundation is introduced. In this study, dynamic and repetitive static load tests in a prismoidal chamber are performed by construction of asphalt trackbed foundation including rail, pad, sleeper and subgrade soil in the chamber to investigate differences of activated vertical pressure on the surface of the subgrade and of permanent deformation on the top of the sleeper between ballastless asphalt track and ballast track. In addition, bending strains and moments generated in the concrete sleepers of the two different track structures are investigated during dynamic loadings by attaching strain gages on the sleeper surface. It is found that installation of the asphalt trackbed is very useful in order to reduce bending stiffness in the concrete sleeper.

**Keywords** : Asphalt trackbed, Prismoidal chamber, Repetitive loading test, Bending deflection

**초 록** 진동저감과 궤도내구성 및 주행안정성을 개선 시키기 위하여 아스팔트 강화노반의 도입이 고려되고 있다. 본 연구에서는 기존 자갈도상궤도와 아스팔트 궤도의 흙노반상면에 발생하는 수직 토압의 크기 및 소성침하 발생의 차이를 파악하기 위하여 실내모형토조(W=0.6m, H=0.6m, L=1.1m)를 이용한 가력시험을 실시하였다. 아스팔트 노반의 유무 및 강화노반의 두께 차이에 따른 모형궤도의 거동차이를 분석하였다. 또한 반복재하시 아스팔트 노반의 유무에 따라 침묵에 미치는 휨변형의 영향을 평가하였다. 시험결과 아스팔트 노반 설치시 침하를 방지하고 흙노반 상면 토압을 저감시킬 수 있는 것을 확인할 수 있었으며 공용에 따른 침묵의 휨변형 손상을 줄일 수 있는 것을 확인하였다.

**주요어** : 아스팔트 노반, 실내모형토조, 반복가력시험, 휨변형

## 1. 서 론

현재 철도는 육상교통수단 중 국가경제활동의 이동과 접근을 제공하는 매우 중요한 사회간접 자본시설이다. 특히, 철도노반을 포함한 궤도구조는 빈번하게 운행되는 중량의 철도차량을 안전하게 지지하고 열차의 통과하중을 하부지반으로 분산, 전달하는 역할을 담당하며 궤도의 파손, 틀림 등 궤도의 안정성에 직접적인 영향을 주게 되어 열차의 주행안정성에 직결되는 매우 중요한 부분이다. 또한 일반적인 유도상 궤도의 경우, 누적통과톤수의 증가와 증속추세에 따라 잦은 유지보수를 필요로 한다.

† 교신저자: 배재대학교 공과대학 건설환경철도공학과(hojin@pcu.ac.kr)

\* 한국철도기술연구원

\*\* 배재대학교 건설환경철도공학과

이러한 문제점을 보완하기 위해 독일 등 철도선진 국에서는 궤도하부에 적합한 아스팔트 노반을 개발하여 적용하고 있으며, 최근 국내에서는 궤도의 지지력과 주행안정성을 개선하기 위한 목적으로 아스팔트 노반 기술개발중에 있다. 본 논문에서는 실내모형토조를 이용한 가력시험으로 유도상궤도와 유도상 아스팔트궤도의 흙노반 상면에서 발생하는 수직토압의 크기 및 침목상면에서 측정된 소성침하 발생 차이 및 침목의 휨변형 특성 차이를 비교, 분석하였다.

## 2. 실내모형토조를 이용한 가력시험

### 2.1 시험방법

본 연구에서는 기존 자갈도상궤도와 아스팔트 궤도의 흙노반 상면에 발생하는 수직 토압의 크기 및 소성침하 발생 차이를 파악하기 위하여 Fig 1과 같은 실내모형토조(W=0.6m, H=0.6m, L=1.1m)를 이용한 가력시험을 실시하였다. 궤도구조(자갈도상궤도, 아스팔트 노반궤도)에 따른 강화노반, 아스팔트 노반, 흙노반, 침목 및 레일을 Fig 2와 같이 재현하였다. 아스팔트 노반의 유무 및 강화노반의 두께차이에 따른 모형궤도의 거동차이를 분석하기 위하여 흙노반 상면 하중재하 직하부에 1개의 토압계를 설치하였고 침목상면에 레일을 중심으로 좌·우에 각각 2개씩 총 4개의 선형변위계(LVDT)를 설치한 후 정적하중 및 동적반복하중을 가하였다.



Fig 1 Repetitive load test with prismatic chamber

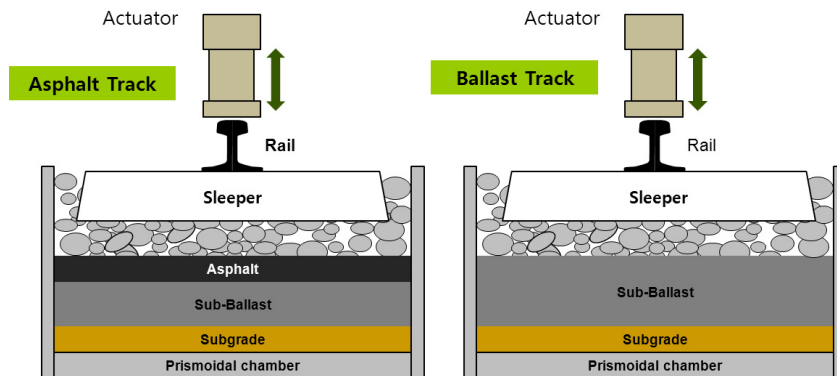


Fig 2 Schematics of two different test track sections

## 2.2 실내모형토조를 이용한 가력시험

### 2.2.1 궤도하부지반 조성

실내모형토조를 이용한 가력시험에 앞서 노반 및 쇄석강화노반재료에 대한 체가름 시험 및 다짐시험을 실시하여 Table 1과 같이 최적함수비(OMC) 및 최대건조밀도( $\gamma_{d-max}$ )를 확인하였다.

Table 1 Compaction test results

	Sub-Ballast	Roadbed
Optimum moisture content (%)	6.5	5.5
Maximum dry unit density ( $t/m^3$ )	2.273	2.247

모형토조 내에 노반 및 쇄석강화노반 재료를 이용하여 최적함수비(OMC)조건에서 최대건조밀도( $\gamma_{d-max}$ )를 기준으로 95%이상의 다짐도로 궤도하부지반을 조성하였다. 하부지반(노반, 쇄석강화노반)의 1층당 다짐 두께는 5cm로 조성하였으며, 노반의 총 두께는 5cm로 1층 다짐을 실시하였다. 쇄석강화노반은 Table 2와 같이 시험 CASE에 따라 총 두께 15~25cm로 층다짐을 실시하여 조성하였다.

아스팔트 노반의 유무에 따른 흙노반 상면에서의 토압 분포 및 침목 상단에서의 소성변위를 파악하기 위하여 아스팔트 노반이 없는 경우에는 쇄석강화노반의 두께를 25cm로 시험을 실시하였으며, 아스팔트 노반을 적용한 시험의 경우 아스팔트 노반의 두께(t)는 5cm로 고정하고 강화노반 두께(t)를 15cm 및 20cm로 시험을 실시하였다. 자갈도상의 두께는 10cm로 고정하여 시험을 실시하였다.

Table 2 Cases of prismatic chamber test

Track Type	Asphalt W or W/O	Asphalt thickness (cm)	Sub-Ballast Thickness (cm)	Roadbed Thickness (cm)	Ballast Thickness (cm)	CASE No.
Ballast Track	W	5	15	5	10	1
		5	20			2
	W/O	-	25			3

본 시험의 아스팔트 노반은 AP-5 등급의 스트레이트 아스팔트 바인더를 사용하여 골재 최대입경은 19mm이며, 공극률이 3%인 밀입도 아스팔트 혼합물로 제작하였다.

아스팔트 노반 및 쇄석강화노반, 흙노반의 다짐은 소형 컴팩터를 이용하였으며, 각 재료의 최대건조밀도( $\gamma_{d-max}$ )로부터 층당 부피(V)를 고려, 해당 무게만큼의 재료를 다져서 다짐도를 확보하였다.

### 2.2.2 계측기 설치

실내모형토조를 이용한 정적하중 및 반복하중의 가력시험시 토압의 변화를 측정하기 위하여

노반 상면에 Fig 3과 같이 용량 500kPa의 토압계를 설치하였다. 또한 하중재하시 발생하는 수직변위를 측정하기 위하여 침목상면에 Fig 4와 같이 레일을 중심으로 좌·우에 각각 2개씩 총 4개의 선형변위계(LVDT)를 설치하였다.

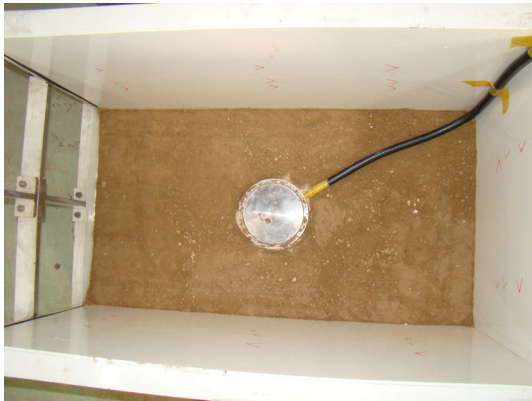


Fig 3 Installation of earth pressure gauge



Fig 4 Installation of LVDTs

하중의 반복재하시 아스팔트 노반의 유무에 따른 침목의 손상도를 분석하기 위하여 Fig. 5와 같이 침목 상·하면에 strain gage를 부착한 후 반복재하에 따른 침목의 휨변형 및 휨모멘트 발생특성을 측정하였다.

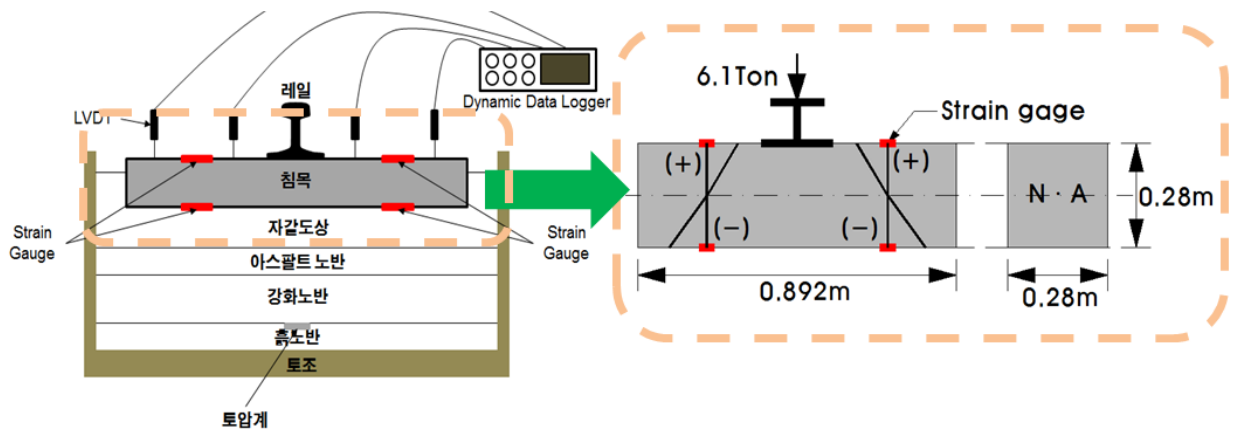


Fig 5 Attached strain gages on sleeper to measure bending strains

### 2.2.3 재하하중 및 반복재하횟수

본 시험에서 적용한 재하하중의 크기는 실제 KTX열차의 속도(300km/h)와 충격계수(i)를 고려하였으며, 재하점 직하의 침목압력은 윤중의 40%라는 연구결과[1]에 따라 정재하시험과 동재하시험의 재하하중을 결정하였다. 또한 아스팔트 노반계도상에서의 차량 설계속도(V)를 고려하여 하중주파수(load frequency) 변화를 최대 5Hz까지 가하여 시험을 실시하였다.

정재하시험은 KTX 차륜하중인 85kN의 40%인 35kN을 기준으로 0kN부터 5kN씩 단계별로

재하하여 레도 구조 및 노반의 거동(침하, 토압)을 측정하였다.

동재하시험은 식(1)로부터 정적차륜하중이 34kN 일 때 동적차륜하중을 61kN으로 결정하였으며, 반복재하횟수는 하중주파수 5Hz에서 30만회까지 시험을 실시하였다.

$$P_d = P_s(1+i) \quad (1)$$

여기서,  $P_d$  : 동적하중(KN),  $P_s$  : 정적하중(KN),  $i$  : 속도충격계수 ( $i=0.153 \cdot V/100$ , 최대 0.8),  $V$ : 열차하중 (300km/h 적용)

### 3. 실내모형토조시험 결과 분석

#### 3.1 정재하시험 결과

Fig 6은 정재하시험의 단계별 하중재하에 따른 토압 및 변위 발생크기를 나타낸 것이다. 시험 결과 아스팔트 노반이 없는 유도상자갈레도에 재하 하중에 따른 토압 및 변위가 가장 크게 발생하였다. 또한 하중 제거 후 소성변형량은 유도상 아스팔트레도가 유도상자갈레도에 비하여 최대 40%정도 감소하는 것으로 나타났다. 이는 아스팔트 노반이 쇄석강화노반보다 하중 분산 능력이 뛰어난 것으로 판단되어 소성변형 저감에 효과적인 것으로 사료된다.

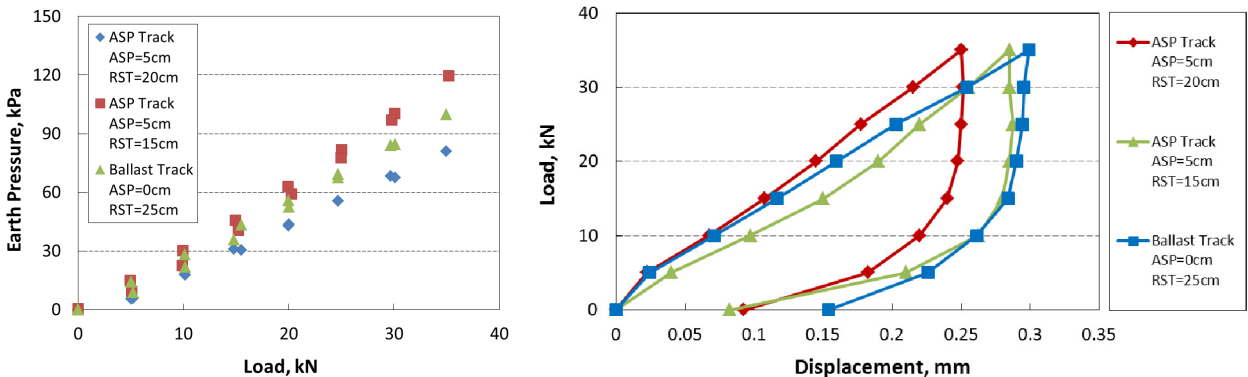


Fig 6 Comparison of load test data between asphalt track and ballast track sections

#### 3.2 동재하시험 결과

Fig 7은 동재하시험의 반복재하횟수에 따른 흙노반 상면에서의 토압과 침목상면에서의 누적 침하량을 나타낸 것이다. 토압은 유도상레도의 경우 최대 153kPa 정도 발생했으며, 유도상 아스팔트레도의 경우 136kPa이 발생하여 아스팔트 노반의 적용으로 12%의 토압이 저감된 것을 확인하였다. 또한 고속철도의 자갈도상층 설계깊이는 35cm이기 때문에 실제 토압은 상당히 작게 발생할 것으로 판단된다.

침목상단에 선형변위계(LVDT)를 설치하여 측정한 수직변위는 반복재하횟수 30만회에서 유도

상궤도의 경우 약 2.1mm, 유도상 아스팔트궤도의 경우 약 1.5mm 정도 발생하였으며, 아스팔트 노반의 적용으로 수직소성변위가 약 28% 정도 저감되었다.

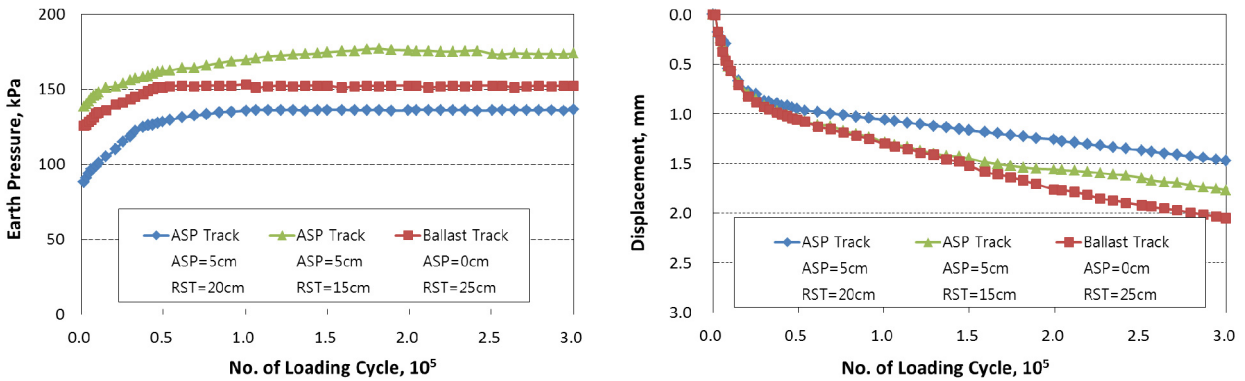


Fig 7 Comparison of repetitive load test data between asphalt track and ballast track sections

### 3.3 하중재하에 따른 침목의 휨변형 및 휨모멘트 발생 분석

침목의 상면과 하면에 strain gage를 부착하여 반복재하에 따른 침목의 휨변형 및 모멘트 발생을 분석하였다. 침목 상하면에서의 휨인장 및 휨압축 변형률을 측정된 결과 Fig 9와 같이 아스팔트가 없는 유도상궤도에서 가장 크게 나타났으며, 아스팔트 5cm, 강화노반 20cm일 경우 가장 작게 나타났다. 이는 아스팔트 노반의 설치가 침목의 휨변형 감소에 매우 효과적인 예방책이 된다는 것을 알 수 있다.

또한 측정된 휨변형률을 이용하여 침목의 휨모멘트를 산정한 결과, 휨변형률과 같이 아스팔트가 없는 유도상궤도의 침목에서 가장 큰 휨모멘트가 발생하였다. 본 시험결과 아스팔트 노반 설치시의 침목에서 발생하는 휨모멘트는 유도상궤도 침목에 비하여 약 28%정도 저감하는 것으로 나타났다. 따라서, 아스팔트 노반상 설치되는 콘크리트 침목은 오랜 기간 반복재하중에 노출될 경우에도 휨변형에 의한 피로가 유도상 궤도 침목에 비하여 크게 감소하여 내구성 확보측면에서 탁월할 것으로 판단된다.

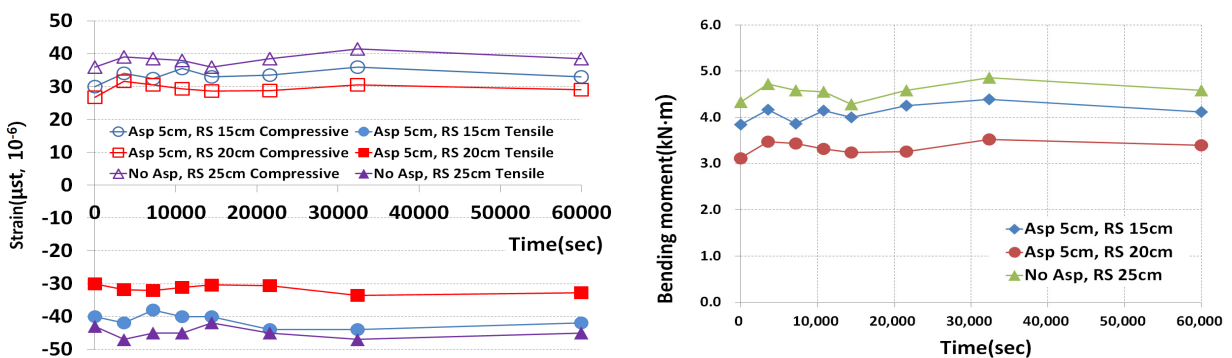


Fig 9 Bending strains measured at sleeper and calculated bending moment

## 4. 결 론

본 연구에서는 기존 자갈도상궤도와 아스팔트 궤도의 흙노반상면에 발생하는 수직 토압의 크기 및 소성침하 발생의 차이를 파악하기 위하여 실내모형토조(W=0.6m, H=0.6m, L=1.1m)를 이용한 가력시험을 실시하였으며 그 결과는 다음과 같다.

(1) 정재하시험의 단계별 하중제하 시험결과 아스팔트 노반이 쇄석강화노반에 비해 궤도하부에 전달되는 열차하중의 분산능력이 뛰어난 것을 확인하였으며, 정재하시험 완료 후 소성변형량은 유도상 아스팔트궤도가 유도상궤도에 비하여 최대 40%정도 감소하는 것으로 나타나 소성변형 저감에 효과적인 것으로 사료된다.

(2) 총 누적 재하횟수가 30만회인 동적반복재하시험 결과 아스팔트 노반의 적용으로 흙노반상단에서 측정된 토압이 유도상 궤도에 비하여 약 12% 정도 저감되었다. 이는 고속철도 자갈도상의 설계두께가 35cm이므로 시험결과에 비하여 실제 궤도하부에서 발생하는 토압은 상당히 작을 것으로 판단된다. 또한 침묵상단에 선형변위계(LVDT)를 설치하여 측정된 수직소성변위는 약 28% 정도 저감되었다.

(3) 아스팔트 노반 설치에 따른 침묵의 휨변형 및 휨모멘트의 발생 경향을 분석하기 위하여 침묵 상·하면에 strain gage를 부착하였다. 동적 반복재하시험결과 아스팔트 노반의 적용으로 휨변형 및 휨모멘트가 저감되는 것을 확인하였으며, 휨모멘트의 경우 최대 28%정도 저감되었다. 따라서 아스팔트 노반의 적용은 침묵의 내구성 증진에 효과적일 것으로 판단되었다.

## 후 기

이 논문은 한국철도기술연구원 “철도건설 및 운영비 절감을 위한 경제성 향상 기술개발” (고속화에 대응한 철도 아스팔트 노반 및 궤도구조 개발)과제의 지원을 받아 수행된 성과물로써 지원에 감사드립니다.

## 참고문헌

- [1] Railway Technical Research Institute (2007). Design standards for railway structures and commentary earth structures, Japan
- [2] Korea Railroad Research Institute (2011). Technical and Political Guide to Increase Competitiveness of Railway in Korea, Interim Research Report
- [3] Korea Railway Network Authority (2011). Specification of Rail design standard: roadbed, Korea Railway Network Authority.