

개발형 콘크리트 슬래브궤도의 성능평가

The Performance Evaluation of Newly Developed Concrete Slab Track

강윤석*
Kang, Yun-Suk

김은**
Kim, Eun

이일화***
Lee, Il-Hwa

양신추****
Yang, Sin-Chu

ABSTRACT

The purpose of this study is to establish the test procedure of concrete slab track and to estimate the performance of newly developed slab track.

The basic direction of conceptual design of KRRI Slab track was determined in the viewpoint of running safety, economic efficiency and maintenance costs. Based on the research results, a detailed conceptual design of KRRI slab track is suggested. For the systematic development of slab track, a comparative study is carried out, comparing merits and demerits of each slab type, and used in the design process of slab track.

Slab track tests were performed at lab and the slab track system was improved by the experiment result. Site Test also were performed in test slab track.

1. 서론

이 연구의 목적은 개발형 슬래브궤도(KRRI 슬래브궤도)의 실내시험 및 현장시험방법을 정립하고 슬래브궤도의 성능을 검증하는데 있다. 슬래브궤도 부설을 위해 먼저 슬래브 선행기술분석을 수행하여 열차주행 안전성, 경제성, 시공성, 유지관리성을 고려한 초기 개념설계를 하였다. 개념설계 후 구조 해석과 단면의 구조안전성 대비 경제성 분석을 하였으며 이를 기본설계에 반영하였다. 고속철도 슬래브궤도의 기술요건을 체계적으로 정립한 후 슬래브궤도 시스템 구조안전성 검토를 수행하였다. 그리고 궤도 구성품의 기술사양을 결정된 후 상세설계를 수행하였다. 개발형 슬래브궤도의 체결장치, 패드 및 슬래브 침목 및 부설공법은 모두 철도연구원에서 자체 개발하였으며 성능검증을 위하여 실내시험과 현장시험의 성능평가 방법을 정립하였다. 실내시험을 수행하기 위하여 시험체를 실물제작하고 실내시험 평가를 하였다. 그리고 이 시험결과를 피드백하여 각 구성품의 성능개선과 보완을 한 후 현장 시험선에 부설하여 실차 주행시험을 통하여 그 성능을 검증하였다.

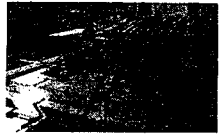



2. 실내시험평가

2.1 개요

슬래브궤도의 구조안전성을 평가하기 위해서 CEN기준, AREMA, SNCF기준과 독일 슬래브궤도 시험기준 등을 국외 슬래브궤도 시험방법을 조사 연구하여 시험평가기준을 정립하였다. 시험실에 부설

* 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원
** 한국철도기술연구원 주임연구원, 정회원
*** 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원
**** 한국철도기술연구원 책임연구원, 정회원

표 1. 슬래브케도 실내시험평가 항목

시험종목	시험방법	사용지그	하중 재하수	검토기준
		사용지그/센서		
수직 하중시험 (평판)		<ul style="list-style-type: none"> ○ 케도수직하중 재하용 ○ 하부 좌우밀림 방지용 ○ 다이얼게이지(케도좌우방향) ○ 변형울게이지 (레일옆면) 	250kN 300만회	<ul style="list-style-type: none"> • 케도 50cm당 - 순간탄성변위 - 영구소성변위 • 독일, 일본의 고속철도 슬래브케도 수직변위, 횡변위 준용
수직 하중시험 (경사판)		<ul style="list-style-type: none"> ○ 상부하중재하용 ○ 변위계 	250kN 300만회	<ul style="list-style-type: none"> • 케도 50cm당 - 순간탄성변위 - 영구소성변위 • 독일, 일본의 고속철도 슬래브케도 수직변위, 횡변위 준용
케간확대량 검사시험		<ul style="list-style-type: none"> ○ 케도상면 하중재하용 ○ 하부 좌우밀림 방지용 ○ 변위계 (레일두부밀림량측정) 	250kN 300만회	케간확대량 4mm 검증
체결구 인발시험/ 매립전 인발력 시험		<ul style="list-style-type: none"> ○ 케도 인발하중 재하용 지그 ○ 매립전 인발하중 ○ 정적하중 재하기 	정적 하중	인발력 5kN (약 0.51t(f))

하면서 슬래브케도의 시공방법을 검증하였으며 정립된 시험기준에 따라 구조 및 주행 안전성 등의 테스트를 수행하였다. 중요한 성능시험이라 판단되는 수직 하중시험, 경사판 하중시험, 케간 확대량 시험, 체결구 인발시험, 매립전 인발시험 등 5개 시험을 집중적으로 수행하였는데 실내시험 평가항목은 표 1과 같다.

2.2 수직하중 시험

수직하중시험은 열차하중(250kN) 재하시 케도의 순간 수직 탄성변위와 누적 케도틀림량인 수직소성 변위를 측정하는 것이 목적이다. 열차의 수직변위가 너무 크면 주행안전성 및 승차감 저하, 케도 구조 안전성 저하를 초래하고 너무 작으면 열차하중이 케도에 집중되어 마모를 촉진하고 2000Hz이상의 고주파 진동에도 불리한 것으로 알려져 있다. 이는 슬래브 하부의 패드의 강성과 밀접한 관련이 있다.

열차의 반복 하중의 영구 수직변위는 열차 운행후 통과톤수 누적에 따른 케도틀림과 연관이 있는데 슬래브 케도의 유지관리, 차량 주행 안정성 및 승차감에 영향을 미치게 된다. 실내시험을 위하여 케광을 조립한 후에 3810mm×4700mm 크기로 HGT층과 BTS층을 현장타설하여 시험체를 제작하였다. 하중가력을 위해 철도연구원의 케도·노반시험기를 사용하였으며 UIC 71에서 제시한 250 kN의 하중을 5Hz로 3백만번 재하하였다. 케도 두부면 중앙점에 하중을 재하하였고 대칭 거동을 확인하기 위하여 동적변위측정기를 대칭으로 설치하고 노반과 케도상부면의 상대변위를 알기위한 센서를 설치하였다.

플레이트 패드의 강성 변화에 따른 거동 변화를 알기 위하여 고강성 HDPE 패드와 저강성 폴리우레탄 계열의 패드를 설치하여 각 거동의 차이를 비교 분석하였다. 일본 신간선 슬래브케도의 레일상 하변위량은 3mm이며, 독일 고속철도에서는 1.5mm를 제시하고 있는데 독일고속철도의 값을 준용하였다. 실험결과 각각의 통과톤수 누적시험을 통해 HDPE 패드와 폴리우레탄 계열의 패드 모두 케도 수직탄성처짐량은 약 1.5 mm이하를 나타내었다. 누적 케도틀림량을 나타내는 수직소성변위 역시 성능 기준을 만족하였다.

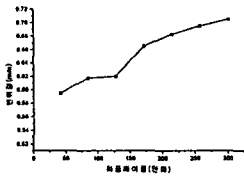


그림 3. 수직하중시험 (HDPE)

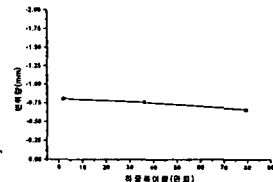


그림 4. 수직하중시험 (폴리우레탄)

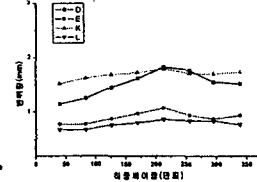


그림 5. 경사판 하중시험 (수직방향변위)

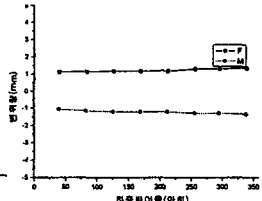


그림 6. 경사판하중시험 (두부횡변위량)

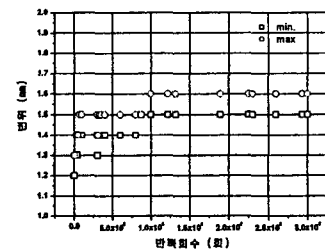
기존의 제시된 기준과의 비교를 위해 궤도와 슬래브간의 상대 변위량을 나타낸 결과 HDPE 패드(그림 3)와 폴리우레탄 계열의 패드(그림 4)의 경우 각각 0.705mm, 0.810mm로 저항성의 베이스 플레이트패드의 실험결과가 8% 더 크게 나타났지만 기준치 1.5mm 보다 훨씬 적은 값을 보였다.

지반침하 소성변형량은 0.35mm정도였으며 슬래브 노반 다짐상태가 좋지 않은 경우에는 침하량이 크게 발생하므로 강화노반시공이 중요하다는 것을 알 수 있었다. 하중 재하후 육안 검사를 실시한 결과, 각 궤도 구성품의 구조적인 균열은 전혀 없었으며 체결클립 역시 체결력을 그대로 유지하였다.

2.3 경사판 하중 시험

경사판 하중시험은 최대캐트가 180mm의 슬래브궤도에 열차가 주행시 나타날 수 있는 최악의 상황을 시뮬레이션하여 순간 궤도 수평탄성변위와 누적궤도 틀림량인 영구 수평변위를 측정하는 것이 목적이다. 시험체에 250kN의 수직하중이 재하시키면 횡방향 30kN의 횡력이 발생한다. 시험을 위해 3810mm×2760mm 크기의 바닥판을 최대캐트 180mm로 제작하여 5Hz, 3백만 하중사이클의 하중시험을 수행하였다. 대칭되지 않는 구조물의 특성을 고려하여 동적변위측정기(LVDT)를 구조체에 각각 분산 배치하고 궤도의 직각방향으로 내·외측의 플렌지 및 두부에 동적변위계를 설치하였다. 동일 기준에 의하면 레일 두부의 상하변위는 3mm이내이다. 시험결과 순간 횡방향 변위(그림 6)는 1.125mm였으며 300만번 하중재하 이후에도 1.35mm를 넘지 않는 것으로 나타났다.

2.4 궤간확대시험



궤간확대시험은 좌우레일두부의 궤간확대량을 측정하는 시험으로 원심하중 등에 의한 좌우레일두부에 수평하중을 내측에서 재하하여 안전성을 검증하는 시험이다. 시험체에 좌우레일두부에 수평방향 변위계를 설치하고, 하중재하별로 레일변위를 측정하여 허용기준치 만족여부를 확인하였다. 5kN~150kN의 하중을 4Hz 주기로 3백만회 재하한 후 순간 궤간 확대량과 궤간 영구확대량을 측정하였다. 이 실험에서 HDPE 베이스플레이트 패드와 폴리우레탄 계열 패드시험을 수행하였는데 폴리우레탄 계열의 패드를 사용시 베이스플레이트 전단 변형이 한계치를 초과했다. 향후 나사스파이크 부분의 횡압을 분산해서 받을 수 있도록 침목의 험프(hump)부분과 체결시스템 개선의 추가연구가 필요할 것으로 생각된다. 반면 HDPE 베이스플레이트 패드를 사용한 실험(그림 7)에서는 궤간확대량이 3mm를 넘지 않아 허용 기준치를 만족하였다.

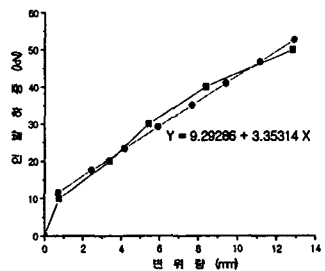


그림 8. 인발하중 시험결과

2.5 인발력 측정시험

인발력 측정시험은 부방향 윤증재하로 인한 체결장치의 구조적 안전성을 검증하는 시험이다. 운영슬래브 궤도에서 차량통행시 최대 인

발하중은 계산상 지점당 5kN 정도이고 독일슬래브레도의 연구 에서도 체결장치의 인발력이 최소한 5kN이 될 경우에는 침목들림 현상을 방지할 수 있는 것으로 보고있다. 열차운행시 궤도에 생기는 부압력은 최소 5~7kN이며 안전율을 1.5까지 고려한다면 7.5~10.5kN 에 대해서 검토가 필요하며 매립 전의 테스트는 50kN까지 검토하는 것이 일반적이다. 시험결과(그림 8)는 50kN 재하까지 안전하였다.

3. 현장시험평가

3.1 측정개요

개발형 슬래브레도의 실내성능평가를 통해 성능이 검증된 후 안전성향상과 시공방법개선을 위한 설계와 제작보완을 하였다. 개발슬래브레도의 현장성능검증을 위하여 OO구역내 축선 50m 구간에 현장부설을 한 후 성능검증을 수행하였다. 부설하면서 콘크리트 슬래브레도 각 구성품의 개별 공정 단계점검, 궤도구성품의 조립을 통한 시스템의 인터페이스 점검, 각각의 부설공법의 검증도 하였다. 성능검증을 위해 4200호대 기관차와 화차 5량을 시속 45km/h까지 증속하면서 실차주행시험을 수행하였다. 현장시험 평가항목을 나타낸 것이 표 2이고 시험선 구간의 시험계측망은 그림 9,10과 같다.

표 2. 슬래브레도 현장시험평가 항목

구분	평가항목	실험기준치	필요한 실험장비
슬래브구간	윤중	윤중 ≤ 25.5tf(일본기준)	윤중측정 게이지
	횡압	횡압 ≤ 20.0tf(일본기준)	횡압측정 게이지
	레일 수직변위	레일수직변위 ≤ 1.5mm	5mm 변위계
	레일 두부수평저짐	레일두부변위 ≤ 3.0mm	5mm 변위계
	레일 저부용력	레일용력 ≤ 70N/mm ²	용력측정게이지
	침목의 저면변위	측정값 ≤ 0.3mm	5mm 변위계
	노반토압	토노반 토압 이하	2kgf/cm ² 매립형토압계
	노반속도	노반변위 2mm해당속도값 이하	4.5Hz Geophone
	슬래브 균열조사	0.1mm	외관조사
슬래브 강도조사	설계기준강도 400	반발경도법(쉬미트 해머)	

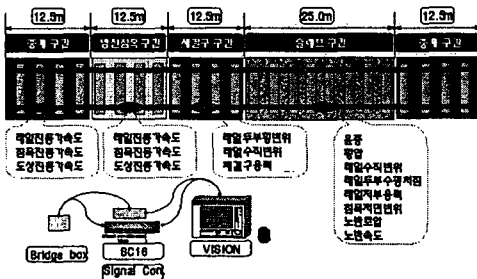


그림 9. 현장시험 진동계측망

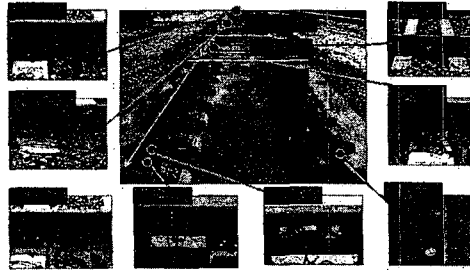


그림 10. 현장시험 센서설치

표 3. 주요 계측장비 사양

장비명	모델명	제조회사	주요 사양
Data Acquisition System	Vision	Nicolet Tech	<ul style="list-style-type: none"> • Sampling rate: 100s/sec ~100ks/sec • 16-bit A/D Converting • Hard copy output • Direct-to-disk acquisition • 16-Channel
Dynamic Strain Amplifier	SC16	NCode	<ul style="list-style-type: none"> • 16 Channels • Sensitivity : ±2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500mV, 1, 2, 5 & 10V • Excitation : 0-10VDC • Auto zero : bridge balance • Filter: 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500Hz, 1, 2, 5, 10, & 20 kHz • Output : ± 10 V (Peak to Peak) single ended
Signal Conditioning System		PCB	<ul style="list-style-type: none"> • 16 Channels • ICP Type accelerometer 지원
Accelerometer		센서	<ul style="list-style-type: none"> • ICP type sensor • Full range: 100g, 50g, 2g • K-beam type sensor(2g)

3.2 윤중 및 횡압발생

슬래브 궤도구간에서 발생한 윤중의 측정 예는 그림 11과 같다. 동력차에서 11.035tf의 최대윤중이 측정되었고 횡압은 최고 1.0tf정도 발생하였다. 일본 신간선 주행판정기준의 20tf와 횡압최대치 4.0tf이하의 값을 보였다. 슬래브 궤도구간에서 발생한 윤력은 그림 12와 같다. 레일저면에서는 최대 474.48kg/cm²의 윤력이 발생하였는데 이는 독일 고속철도 레일윤력 기준치 70N/mm²(714.2kg/cm²)의 66%수준으로 안전 측에 속한다.

변위측정은 슬래브궤도 레일두부의 수직 및 수평변위와 침목저면 즉 HGT층 상부에서의 탄성변위량을 계측하였다. 변위계는 기준말뚝에 고정되어 있으며 오차를 방지하기 위하여 각 계측시마다 Baseline Collection을 실시하였다. 레일두부에서의 수직변위량은 속도에 따른 큰 차이는 없으며, 속도에 따라 약 0.5-0.65mm의 변위량을 나타내며, 기준인 1.5mm를 만족하는 것으로 나타났다. 현재 고속철도용 토노반궤도에서 레일의 수직변위는 약 0.3~0.6mm 범위이고 터널구간에서는 약 0.4mm이다. 레일두부에 발생하는 두부 횡변위량의 범위는 0.216~0.608mm로서 열차속도에 따른 변동량은 크지만, 기준치인 3mm를 충분히 확보하였다. HGT층 상부면에 발생하는 수직변위량의 범위는 0.118~0.124mm로서 기준치인 0.3mm를 충분히 확보하였다. 그림에서 피크치는 윤중의 대표값으로서 레일의 수직변위와는 다른 형태를 보이고 있다. 그림 15의 BTS층의 수직변위결과에서는 상부구조의 고주파성분이 레일패드 및 체결구 패드에 의하여 저감되는 것을 확인할 수 있었다.

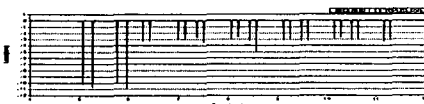


그림 11. 궤도 최대윤중

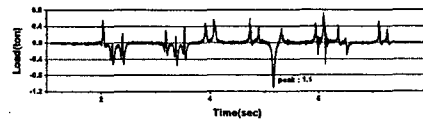


그림 12. 궤도 최대윤중

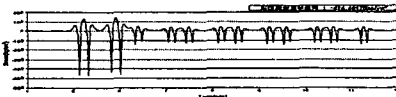


그림 13. 궤도 최대저부윤력

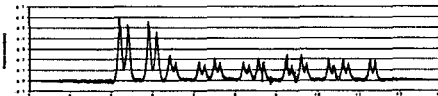


그림 14. 최대수직변위량

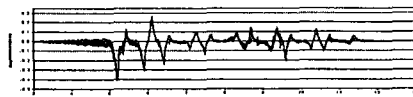


그림 15. 궤도 수평방향 변위

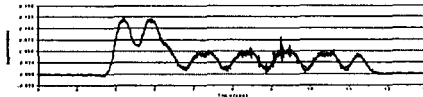


그림 16. 궤도 BTS층의 수직변위량

각 측정위치에서의 속도별 최대변위량은 분석한 결과 레일에서의 수직 및 수평변위량은 열차의 속도에 증가하지만 HGT면에서는 속도에 따른 영향은 거의 없다고 할 수 있다. 이는 열차에서 전달된 하중이 궤도 및 상부 슬래브층에서 대부분이 흡수되기 때문이다. 시속 38km/h 주행시 레일횡변위값이 과대하게 커지는 것은 속도영향이기 보다는 대차 및 바퀴의 불규칙한 형상이 원인으로 판단된다.

토압량의 크기는 기관차 통과시, 0.122~0.124kgf/cm²의 범위에 있는데 도상자갈궤도의 경우 자갈면 하부에 작용되는 토압은 약 0.2~0.8kgf/cm²의 범위에 있다. 토압측정 결과, 속도에 따른 토압의 변화가 거의 없는 것으로 나타났다. 시공된 강화노반은 현재 고속철도용 자갈도상궤도에서 적용되는 강화노반의 기준이 그대로 적용되었기 때문에 노반은 충분한 지지력을 확보한다고 할 수 있다.

4. 소결론

국내기술로 개발된 개발형 KRRI 슬래브 궤도의 성능을 분석하기 위하여 실내시험 및 현장시험을 수행하였다. 실내시험에서는 대표적인 5가지 시험을 수행하였고 현장시험에서는 10가지의 성능기준을 정립하여 측정을 수행하였다. 측정결과 실내시험에서는 평판과 경사판 슬래브궤도의 레일 수평, 수직 탄성 및 영구변형량은 모두 기준 이내에 들었다. 궤간 확대시험에서는 HDPE계열의 경우 수평변위를

만족하였고 저항성 패드는 구조시스템의 개선이 필요한 것으로 나타났다. 현장시험에서는 10가지 성능기준을 모두 만족하였다. 향후 시험결과를 피드백하여 설계 및 제작보완을 하여 슬래브궤도 시스템의 성능개선을 추진할 예정이다.

※ 이 과제는 “고속철도 선로구축물 시스템 기술개발과제”로 수행되었습니다. 참여기업으로 지원해주신 강원레일테크, 평화산업, 태명실업에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 한국철도기술연구원(2002), '선로구축물시스템 엔지니어링 기술개발 (2단계 3차년도 보고서)'.
2. American Railway Engineering Association (1996) "AREA Manual for Railway Engineering"
3. C. Esveld, "Moderr Railway Track", MRT-Production, 1989.
4. SNCF "Fastening system performance specification"
5. '레일체결장치류사양서(안) : 표준시공·보수요령(안)',平成4年9月, 일본철도총합기술연구소
6. '체결장치편람',昭和59年, 일본철도시설협회
7. 韓國高速鐵道建設公團 : 슬래브 軌度構造 設計報告書, 1994. 12.
8. 강기동, 콘크리트 軌度 슬래브의 構造 解析에 關한 研究, 1980.
9. Edgar Darr, Werner Fiebig, "Feste Fahrbahn", Tetzlaff Verlag
10. Dr-Ing. Dieter Hilliges und Walter Bittner "Feste Fahrbahn" Sonderdruck aus Edition ETR 1990.
11. Dr-Ing. Dieter Hilliges und Walter Bittner "Feste Fahrbahn" Sonderdruck aus Edition ETR 1990.
12. 이종득, 「철도공학」, 노해출판사, pp. 13~23, 1996