보안 과제( ), 일반 과제(O) / 공개(O), 비공개( )발간등록번호(11-B551201-000132-01)

철도기술연구사업 최종보고서

18RTRP-B065581-06

R&D / 18RTRP-B065581-06

고속철도 자갈궤도구간 유지보수 저감을 위한 궤도개량 기술개발 최종보고서

2020. 02.

주관연구기관 / 한국철도기술연구원
협동연구기관 / 삼표레일웨이(주)
협동연구기관 / 한국철도기술연구원
공동연구기관 / 한국철도기술연구원
공동연구기관 / (주)천경기업
공동연구기관 / (주)청강크린텍
공동연구기관 / (주)선구엔지니어링
위탁연구기관 / 한국철도공사
위탁연구기관 / (주)아이디엠이엔씨
위탁연구기관 / 충남대학교 산학협력단

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

고속철도 자갈궤도구간 유지보수 저감을 위한 궤도개량 기술개발 최종보고서

2020

국토교통부 국토과학기술진흥원

제 출 문

국토교통부장관(국토교통과학기술진흥원장) 귀하

'고속철도 자갈궤도구간 유지보수 저감을 위한 궤도개량 기술개발' (연구개발 기간 : 2013.06. 28. ~ 2019.12.27.) 과제의 최종보고서를 제출합니다.

2020. 02. .



주관연구기관명 :	한국철도기술연구원	(대표자) 나 희 승	(인)
협동연구기관명 :	삼표레일웨이(주)	(대표자) 정 인 철	(인)
	한국철도기술연구원	(대표자) 나 희 승	(인)
공동연구기관명 :	한국철도기술연구원	(대표자) 나 희 승	
	㈜천경기업	(대표자) 이 순 구	
	㈜청강크린텍	(대표자) 임 종 일	
	㈜선구엔지니어링	(대표자) 정 한 중	
위탁연구기관명 :	한국철도공사	(대표자) 손 병 두	
	㈜아이디엠이엔씨	(대표자) 김 용 한	
	충남대학교 산학협력단	(대표자) 이 영 석	

주관연구기관책임자:	한국철도기술연구원	최영태
협동연구기관책임자:	삼표레일웨이(주)	황광하
	한국철도기술연구원	이일화
공동연구기관책임자:	한국철도기술연구원	황성호
	㈜천경기업	이순구
	㈜청강크린텍	임종일
	㈜선구엔지니어링	김성호
위탁연구기관책임자:	한국철도공사	박성백
	㈜아이디엠이엔씨	주영돈
	충남대학교	임남형

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제37조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	18RTRP-B065581-06	해당 단계 연구 기간	2018.02.28. - 2019.12.27.	단계구분	6 / 6
연구사업명	중사업명	철도기술연구사업			
	세부사업명				
연구과제명	대과제명	고속철도 자갈궤도구간 유지보수 저감을 위한 궤도개량 기술개발			
	세부과제명				
연구책임자	최영태	해당단계 참여연구원 수	총: 108명 내부: 76명 외부: 32명	해당단계 연구비	정부:3,350,000천원 민간: 783,667천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계: 4,133,667천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 534명 내부: 366명 외부: 168명	총 연구비	정부:18,472,000천원 민간: 3,559,734천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계: 22,031,734천원
연구기관명 및 소속 부서명	한국철도기술연구원 첨단궤도토목본부			참여기업명	
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위탁연구	연구기관명: 한국철도공사 ㈜아이디엠이엔씨 충남대학교			연구책임자: 박성백 주영돈 임남형	

※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 갈음

연구개발성과의 보안등급 및 사유	

9대 성과 등록·기탁번호

구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설·장비	기술요약 정보	소프트웨어	화합물	생명자원		신품종	
								생명 정보	생물 자원	정보	실물
등록·기탁 번호											

국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황

구입기관	연구시설·장비명	규격 (모델명)	수량	구입연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	NTIS 등록번호

보고서 면수 196

요약문

연구의 목적 및 내용	● 연구목표 고속철도 자갈궤도구간 유지보수 저감을 위한 궤도개량 기술 개발 - 고속철도(350km/h급) 또는 고속화 노선(300km/h 미만)에서 운행선의 교통지연을 최소화하면서 차단 시간내에 자갈궤도를 효과적으로 보강할 수 있는 자갈궤도 궤도구조 개량 공법 및 자갈궤도 급속경화공법 개발(궤도구조, 공정, 시공장비 등 포함) - 최소 100m/일의 시공속도 확보를 목표로 함. ● 연구개발 내용 - 성능목표 설정 및 설계/성능요구조건, IF 기술요건 정립 - 성능검증 방안 제시 - 테스트-베드 구축 및 성능 검증 - 시공성 및 경제성 평가 - 연구성과 홍보를 위한 E-catalog 개발 - 시스템 및 구성요소 설계 - 공정 및 시공장비 상세설계, 제작 발주 - 구성요소 및 시스템 단위 성능평가 및 검증/보완 - 시공성 및 경제성 평가 - 테스트-베드 시험시공 및 성능검증 - 자갈궤도 급속경화기술 시스템설계 및 성능평가 - 자갈궤도 급속경화 충전재 개발 - 자갈궤도 급속경화기술 공정 최적화 - 자갈도상 건식세척장비 개발 - 충전재료 주입장비 개발 - 테스트-베드 시험시공을 통한 성능검증
연구개발성과	● 성능목표 설정 및 설계/성능요구조건 인터페이스 기술요건 정립 ● 궤도구조 개량기술 및 급속경화기술의 성능검증을 위한 테스트-베드 구축 ● 성능검증방안 제시 및 성능검증 결과 확인, KR 성능 검증 ● 3차원 시공 시뮬레이션 모델을 활용한 시공성의 검증 및 보완 ● 궤도틀림 진전 예측 모델에 기초한 경제성 평가(LCC 분석) ● 연구성과 홍보를 통한 대외 공감대 형성 ● 침목교환장비 ● 개량형 침목 ● 테스트-베드 ● 요구조건 및 검증결과

	● 자갈궤도 시스템 해석모델 ● 자갈궤도 급속경화 충전재 개발 ● 자갈궤도 급속경화 기술 공정 최적화 ● 자갈도상 건식 세척장비 개발 ● 충전재료 주입장비 개발
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	● 경부고속철도 자갈궤도, 일반철도 자갈궤도 개량사업에 활용함으로써 상용화 달성 ● 유지보수비 절감을 통한 수명주기 비용 절감(10% 이상) ● 고속철도 및 일반철도 속도 향상 ● 일반철도에서 성능확인 후 고속구간 상용화 추진 ● 경부고속철도 및 일반철도 고속화 구간 자갈궤도 개량사업에 활용함으로써 상용화 달성 ● 기존선 노후터널구간 등 유지보수 취약구간에 우선적용 함으로써 유지보수비의 절감 가능 ● 개량이 시급한 기존 간선철도 구간의 자갈궤도 개량사업에 적용함으로써 지속적으로 투입되는 자갈 개량비의 절감 가능 ● 차단시간(작업시간 2시간)내에 자갈궤도를 효과적으로 개량할 수 있는 자갈궤도 급속경화공법을 통해 기존 운행선의 교통지연의 최소화 가능

국문핵심어 (5개 이내)	고속철도	자갈궤도	개량	속도향상	급속경화
영문핵심어 (5개 이내)	High-speed railway	Ballasted track	Renovation	Speed-up	Rapid hardening

※ 국문으로 작성(영문 핵심어 제외)

〈 목 차 〉

1. 연구개발과제의 개요 및 성과 ····· 8

가. 연구 개발 목적 ····· 8

나. 연구 개발의 필요성 ····· 9

다. 연구 개발 범위 및 성과 달성도 ····· 13

라. 주요성과 ····· 18

마. 연구 개발 추진 체계 ····· 22

2. 연구수행내용 및 성과 ····· 26

(1세부)

가. 시스템 성능 검증 및 테스트 베드 구축 ····· 26

나. 3차원 모델을 이용한 개량기술 시공성 검증 기술 개발 ····· 33

다. 궤도리프팅차량과 탬핑유닛 개발 ····· 40

라. 자갈궤도 상태평가 가이드라인 개발 ····· 46

마. 개량기술 경제성 평가와 실용화 전략 ····· 76

바. 실용화를 위한 연구성과 홍보 ····· 89

(2세부)

가. 자갈궤도 궤도구조 개선 방안 ·····91

나. 자갈궤도 갱환장비 개발 ·····104

다. 시험부설 및 현장 성능평가 ·····118

(3세부)

가. 토공 및 터널구간 급속경화궤도 시스템 설계 ·····140

나. 교량구간 급속경화궤도 시스템 설계 ·····145

다. 고속선 급속경화궤도용 충전재료 개발 및 성능 평가 ·····148

라. 충전 모르터와 도상골재의 계면 부착특성에 따른 강도 평가 ·····155

마. 급속경화궤도용 침목 설계 및 성능 시험 ·····159

바. 건식자갈세척장비 개발 ·····164

사. 대용량 주입장비 개발 ·····171

아. 궤광리프팅장비 개발 ·····174

자. 급속경화궤도 취약구간 보강방안 ·····178

차. 급속경화궤도 시공공정 개발 ·····181

카. 급속경화궤도 성능검증 ·····184

타. 급속경화궤도 설계 및 해외시장진출을 위한 전략수립 ·····189

3. 관련 분야 기여도 및 활용 계획 ·····192

(1세부)

가. 관련 분야 기여도 ·····192

나. 활용 계획 ·····192

(2세부)

가. 연구개발성과의 활용방안 ·····194

나. 기대효과 ·····194

(3세부)

가. 활용 계획 ·····195

1. 연구개발과제의 개요 및 성과

가. 연구 개발 목적

(1) 최종 목표

○ 고속철도(350km/h급) 또는 고속화 노선(300km/h 미만)에서 운행선의 교통 지연을 최소화하면서 차단 시간내에 자갈궤도를 효과적으로 보강할 수 있는 자갈궤도 궤도구조 개량 공법 및 자갈궤도 급속경화공법을 개발(궤도구조, 공정, 시공장비 등 포함)을 연구단 연구개발 목표로 함

○ 본 연구(1세부)에서는 **개량기술, 시공공정, 시공장비**의 **성능평가**와 이를 위한 **인터페이스 조정**과 **테스트-베드 구축 총괄**을 목표로 함

(2) 최종 목표의 성격 및 설정근거

○ 본 연구의 최종목표는 시작품 개발, 공정 개발, 시공장비 개발 등을 포함

○ 기존 기술 대비 차별화를 위해 고속철도의 요구조건을 만족하면서 차단시간 이내에 궤도구조의 개량이 가능한 기술의 개발을 목표로 설정

○ 개량의 수준에 따라 궤도구조의 성능과 유지보수 수준이 달라지며, 개량공사 비용도 현저히 달라지므로 해당 선구의 특성에 따라 선택적으로 적용할 수 있도록 두 가지 종류의 개량공법 개발 추진

(3) 연구개발과제의 설명

○ 최근 고속철도 자갈궤도구간에서 나타나고 있는 빈번한 궤도틀림과 이에 따른 승차감 저하, 안전 위협, 유지보수 증가 등의 문제에 대응하기 위하여 운행선 상에서 빠른 시간내에 궤도구조를 개량할 수 있는 기술을 개발하기 위한 연구

○ 본 연구를 통해 자갈궤도 구간의 고질적인 유지보수 요인을 효과적으로 개선함으로써 승객들의 승차감을 향상시키고, 열차의 주행안전을 확보함과 동시에 유지보수를 효과적으로 저감할 수 있으며 또한 향후 속도 향상에 대비하여 보다 안정적인 궤도구조로 개량할 수 있는 기술을 확보할 수 있음

(4) 연구단 최종목표 및 세부 목표

○ 자갈궤도 개량기술, 시공공정, 시공장비 개발을 목표로 함

○ 최종 목표 달성을 위한 세부목료 수립

- 기존 인력시공으로는 효율적인 개량이 곤란함으로 기계화, 장비화를 통한 야간 차단 시간내 효과적인 시공 수립을 위해 세부 목표를 수립
- 효율적인 연구 개발을 위하여 세부목표에 적합한 연구단 구성
- 각 세부별 세부 목표와 연구내용은 다음 절 참조

구분	내용
최종 목표	고속철도 자갈궤도구간 유지보수 저감을 위한 궤도개량 기술 개발 - 고속철도(350km/h급) 또는 고속화 노선(300km/h 미만)에서 운행선의 교통 지연을 최소화하면서 차단 시간(작업시간 2시간) 내에 자갈궤도를 효과적으로 보강할 수 있는 자갈궤도 궤도구조 개량 공법 및 자갈궤도 급속경화공법을 개발하며(궤도구조, 공정, 시공장비 등 포함), 최소 100m/일의 시공속도 확보를 목표로 함.
세부 목표	- 테스트-베드 시험시공 총괄/조정 - 궤도 리프팅 차량(TLV) 제작 - 궤도틀림 70% 저감형 궤도구조 개발 - 개량형 궤도구조를 효율적으로 부설할 수 있는 시공장비 및 공법 개발 - 운행선 시험부설을 통한 성능검증 - 급속경화궤도 성능목표 설정 및 설계/성능요구조건, 인터페이스 기술요건 정립 - 급속경화궤도용 시공공정 및 전용장비 개발 - 급속경화궤도 구성품 개발 - 시험부설을 통한 성능검증 및 실용화

나. 연구 개발의 필요성

(1) 연구개발의 필요성

○ 경부고속철도 1단계 구간(광명~대구)과 기존선 구간은 자갈궤도로 부설되어 고속으로 운행하는 열차에 의한 자갈입자의 이동, 재배열, 마모, 노반 관입 등 자갈 도상의 열화에 의해 궤도틀림이 지속적으로 증가하는 취약성을 가짐

- 뜬침목(unsupported sleeper) 또는 궤도틀림 증가에 따른 충격 발생으로 궤도틀림이 더욱 빠른 속도로 증가하는 악순환이 발생
- 승차감(ride comfort) 저하, 탈선 위험 증가와 궤도 수명의 감소로 이어질 수 있음

○ 궤도 선형을 양호한 상태로 유지하기 위해 궤도 유지보수 작업과 비용이 크게 증가하고 빈번한 유지보수 작업으로 열차 운행 지연과 이로 인한 사회적 손실이 발생

○ “제2차 국가철도망 구축계획 2011-2020(2011.4)”에서 전국 주요 거점을 1시간 30분대로 연결한다는 구상을 발표

- 이러한 정책 목표의 달성을 위해서 철도 교통망의 핵심축인 경부고속철도축의 속도 향상이 필수적
- 향후 경부고속철도의 운영속도를 350km/h까지 증속이 필요하며, 아울러 전국 주요 간선철도에서도 증속이 요구되고 있으나, 기존 철도 대부분은 자갈궤도로 부설되어 속도 향상에 따른 유지보수비의 급증이 우려됨

○ 따라서 자갈궤도의 문제점을 효과적으로 개선하고, 향후 속도 향상에 대응하여 승차감

및 주행 안전 향상을 도모함과 동시에, 유지보수를 현저히 줄일 수 있도록 운행선 상에서 빠른 시간 내에 궤도 구조를 개량할 수 있는 기술의 개발이 요구됨.

- 궤도구조를 개량하는 공사는 짧은 차단시간(장비이동시간을 제외한 실제 작업 가능시간은 2시간 10분에서 3시간 30분)내에 공사를 완료해야 하고 공사 전후에 고도의 안전 확보가 필요하므로 이러한 엄격한 제한조건을 극복하기 위한 체계적인 연구개발이 필요

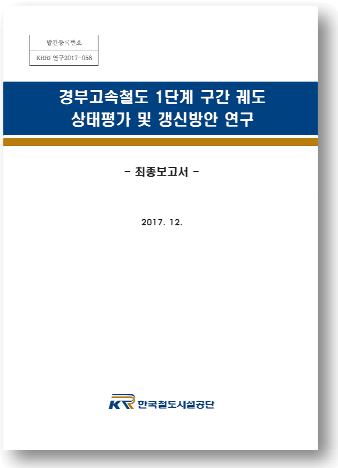
○ 짧은 차단시간내에 신속한 개량을 위해서 개량기술, **시공장비** 및 재료, 시공법 및 공정 개발이 필요하며, 개발된 기술과 공정간의 **상호 인터페이스**와 **성능에 대한 체계적인 검증**이 필요함

○ 고속선 자갈궤도의 상태에 기반한 유지관리 효율화 및 개량기술 선정을 위한 의사결정을 위한 기초자료 제공이 필요

(2) 국내외 현황 및 연구동향

○ 경부고속철도 1단계구간의 대개량시기(2027~)가 도래함에 따라 유지보수를 저감할 수 있는 개량기술 수요 증가

○ 3차 국가철도망구축계획의 일환으로 주요 간선철도에 간선형 전기동차(EMU-250) 도입 예정으로 주요간선 철도 속도향상에 따른 유지보수 비용 증가 예상





○ 국내에서의 기존자갈궤도의 개량사업은 각 운영기관에서 추진되고 있음. (궤도구조개량사업의 주요 운영처와 대상구간은 아래표 참조)

- 주로 서울교통공사를 중심으로 궤도개량사업이 추진되었으나, 향후 철도공사 및 부산교통공사 등 타 운영기관에서도 본격적인 궤도개량공사를 추진할 계획
- 철도공사 일부구간(경부선 등)의 터널구간에 개량사업이 적용 되고 있음
- 서울메트로의 궤도개량 실적을 보면 현재까지 5년간 660억원(33km)의 예산이 소요되었으며, 향후 년간 약 200억원 규모의 공사계획을 가지고 있으며 총 4,000억원(194km) 규모의 궤도개량 시장 확보

<국내 궤도개량사업 추진 현황>

운영처	대상선로	궤도연장(km)	진 행 현 황
서울메트로	1-4호선 자갈도상궤도 개량공사	복선궤도 연장226.7km	지하구간 B2S궤도(24km) 및 현장타설 콘크리트궤도 (9km) 시공완료
	분기기 개량공사	전체	시행중
부산교통공사	1호선 자갈도상궤도개량공사	복선궤도 연장72km	기본설계 완료
철도공사	과천선을 비롯한 국철구간	200km	기본설계 완료
	기존 철도구간 중 궤도 구조개량이 요구되는 구간(터널, 급곡선, 역구내 구간 등)	500km	-

<궤도개량공사의 향후 시장전망(도시광역철도)>

구 분	2013년	2014년	2015년	2016년	2017년	비 고
궤도개량 연장	10km	15km	20km	30km	30km	2017년 이후 년간 30km이상의 시장 형성
궤도개량 건설비	200억원	300억원	400억원	600억원	600억원	

○ 일본 및 유럽에서는 노후 선로가 많기때문에 선로 유지보수비용 절감을 위해 자갈궤도 개량사업을 계획하고 있음. 일본, 영국을 비롯하여 홍콩, 싱가폴, 프랑스 등으로 점차 확대될 것으로 예상됨

○ 오스트리아 등 유럽국가에서는 다양한 형태의 침목과 USP(Under Sleeper Pad) 등이 개발되어 시험적용되고 있으며, 유지보수가 현저히 감소되고 있음이 보고됨

- 가장 활발한 궤도개량사업을 추진하고 있는 일본의 경우에는 최근 신간선의 보수생력화와 내진성능향상을 목적으로 포장궤도공법의 적용을 적극 검토 중
- JR 동일본에서는 열차의 승차감 향상과 궤도 보수 작업을 경감시킬 목적으로 개발된 TC형 생력화 궤도(포장궤도)를 열차 수송 밀도가 높은 수도권을 중심으로 부설, 현재까지 256km의 선로를 포장궤도로 개량하였음
- JR동일본은 제외한 JR서일본, JR중앙, JR홋카이도 등에서도 별도의 선로개량작업을 진행 중에 있기 때문에 년간 약 40km(km당 25억원 수준)의 선로구조개량 시장이 확보되어 있으며, 향후에는 점진적으로 증가할 것으로 예상
- 향후 국외 시장 진출을 위해 시공속도 및 시공성 등의 측면에서 국외 기술과 차별화된 기술 개발 필요

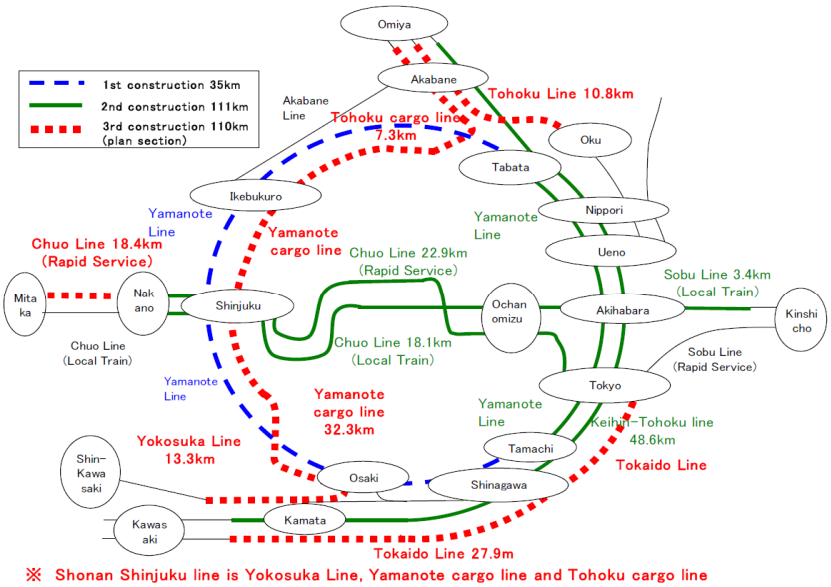
○ BIM (Building Information Modeling) 기법을 이용한 시공공정 간섭 평가, 시공효율화, 안전확보에 대한 연구가 활발히 진행되고 있음

- 야간 작업시 사전에 간섭, 시공효율 등을 평가하여 효율 및 안전확보 필요

○ 유지관리를 위해 구조물 등의 상태에 기반한 유지보수인 Condition-Based-Maintenance

(CBM)로 패러다임 전환중

- 다양한 비파괴탐사기법을 활용한 자갈궤도 상태평가기술 연구가 필요



<궤도구조개량 현황 및 계획(JR동일본)>

(3) 연구개발 단계

○ 자갈궤도 개량기술의 경우 일반철도 구간에서 적용성이 입증된 기술이자만 이를 고속철도 운행선에 적용하기 위해 본 연구과제에서는 실험실 수준의 성능평가(TRL3/TRL4)와 실제 환경에서의 시제품 성능평가(TRL7/TRL8)를 거쳐 현장적용 단계 및 사업화 단계(TRL9)

- 개발된 시작품(시공장비): TRL 7/8로 실제환경에 설치 및 적용을 통한 성능시험 완료
- 개량기술(개량침목) : TRL 9으로 실제 현장적용으로 사업화단계

구분		표기	단계별 설명
기초연구 단계	TRL 1	☐	TRL 1 이론적 연구단계
	TRL 2	☐	TRL 2 기술적 개념정립 단계
실험 단계	TRL 3	☐	TRL 3 실험적 증명 단계
	TRL 4	☐	TRL 4 실험실 성능평가 단계
시작품 단계	TRL 5	☐	TRL 5 유사환경 시험 단계
	TRL 6	☐	TRL 6 유사환경 기술시범 단계
실용화 단계	TRL 7	☐	TRL 7 실제환경 시작품 데모 단계
	TRL 8	☑	TRL 8 시제품 설치 및 성능시험 단계
사업화 단계	TRL 9	☑	TRL 9 현장적용/사업화 단계

다. 연구 개발 범위 및 성과 달성도

(1) 연구 개발 범위

○ 해당선로의 상태에 따라서 궤도구조 개량기술(2세부)과 급속경화궤도구조 기술(3세부)로 이원화하여 연구개발 진행

○ 1세부에서는 개량기술의 목표인 차단시간동안 100m 시공과 유지보수 목표성능을 확보하기 위한 **개량기술간의 인터페이스조정**과 **테스트-베드구축을 통한 성능 검증**을 연구 범위로 설정함

○ 2세부에서는 고속철도 또는 고속화노선 자갈궤도 구간에서의 궤도틀림 진전속도를 약 70% 저감할 수 있는 새로운 형태의 PC침목을 포함한 **자갈궤도 보강 구조 개발**과 **야간 차단시간 내 100m 궤도갱환시공이 가능한 장비와 시공공정 개발**을 연구 범위로 설정함

○ 3세부에서는 고속철도(350km/h급) 또는 고속화 노선(300km/h 미만)에서 운행선의 교통지연을 최소화하면서 차단시간 이내에 자갈궤도를 효과적으로 보강할 수 있는 **자갈궤도 궤도구조개량공법 개발** 및 **자갈궤도 급속경화공법 개발**(궤도구조, 공정, 시공장비 등 포함) 연구 범위로 설정함

<1세부>

최종 성과목표	연구개발 내용
시스템 성능검증 및 테스트베드 구축	· 시스템 성능검증 방안 제시 및 검증 · 시스템 성능검증 및 테스트베드 시험시공 총괄/조정 및 구축 · 테스트베드 구간 궤도 상태평가 및 모니터링
3차원 모델을 이용한 개량기술 시공성 검증	· 3차원 시공 시뮬레이션 개발 · 시뮬레이션 모델을 이용한 시공성 분석 및 보완, 작업 안전도 분석 · 급속경화궤도 BIM 모델 개발 · 테스트베드 시험시공결과를 고려하여 시공 시뮬레이션 모델 보완
궤도리프팅차량과 탬핑유닛 개발	· 궤도리프팅차량과 탬핑유닛 개발 · 시운전 및 테스트베드 시공을 통한 성능검증
자갈궤도 상태평가 가이드라인 개발	· 고속선 및 테스트베드 후보지 궤도상태평가(LWD, GPR, DCP, FWI 등) · 상태평가 가이드라인 제시
개량기술 경제성 평가와 실용화 전략 수립	· 궤도틀림 진전 예측기법의 타당성 분석 · 경제성분석과 시장조사를 통한 실용화 및 사업화 전략 수립
연구성과 홍보	· 세미나 및 전시회 참여를 통한 기술성과 홍보 · 3차원 시뮬레이션 기반 연구성과 전자 홍보자료 작성

<2세부>

최종 성과목표	연구개발 내용
궤도틀림 저감형 궤도 구조 개발	· 궤도틀림 진전속도 70% 이상 저감 가능한 침목시스템 개발 · 궤도틀림 저감형 침목 구조설계 및 최적화 (곡속선용) · 궤도틀림 저감형 침목 성능검증 · 개량형 침목 접속부 설계 방안 도출
정시 내 효과적 궤도구조 개량 공법 기술 개발	· 궤도갱환 공정 설계 · 시공장비(자갈궤도 침목교환 장비) 보완설계 · 개량형 침목 부설관련 장비 및 공정에 대한 시공성 검증 · 시공장비 성능확보 (100m/일 시공)
운행선 시험부설을 통한 성능검증	· 경부선(일반선) 서대구역 예정지 시험부설 완료 · 경부고속선 대전~영동 하선 시험부설 완료
형식승인 및 제작자승인	· 60kg, 60E1용 PSC 침목 형식승인 및 제작자승인

<3세부>

최종 성과목표	연구개발 내용
성능목표 설정 및 설계/성능요구조건, 인터페이스 기술요건 정립	· 토공노반구간에서 급속경화궤도 적용성 평가를 위하여 설계조건(KRS 2012하중 적용, 설계속도 350km/h)을 선정하고 고속철도 차량을 대상으로 하중조합 선정하여 성능 검증 · 노반조건(토공, 교량)의 영향을 검토하기 위하여 각 조건별 이론적 실험적 연구를 수행하여 최종 노반조건 결정 · 교량상 급속경화궤도의 설계최적화를 위해 온도응력, 휨응력, 균열에 대한 이론적 검토 수행 · 교량상 급속경화궤도의 핵심인 앵커부에 대한 성능을 해석적, 실험적으로 규명 · 고속선용 급속경화궤도 표준단면 제시(단면폭, 두께, 구조, 시공연장 등) · 급속경화궤도의 가장 취약한 시공이음매부, 접속부, 연약지반구간 등에서 성능확보를 위하여 이론적 검토를 바탕으로 모형, 실물시험을 수행하여 최종 보강안 제시
고속선용 시공공정 개발	· 시공공정을 복합공정, 단일공정 및 차단조건(단선/복선 사용)별로 구분하여 공정별 소요시간 및 인력투입을 산출하고 기계화 시공장비의 투입순서 선정 · 교량의 특수조건을 감안한 교량용 급속경화궤도 공정 개발 · 현장 시험부설을 통한 공정 검증
주입장비 개발	· 설계요구조건을 분석하여 시공속도를 만족하는 모듈파트를 구성해 설계에 반영하였으며, 그 결과를 이용하여 핵심모듈 시제품(교반기, 싸이로탱크, 물탱크)을 제작해 현장에서 성능 검증 · 주입공정에서의 오차를 줄이기 위해 각 재료의 계량방법을 개선하였으며, 각 공정을 통합콘트롤러로 자동화 제어 · 현장 시험부설을 통한 성능 검증 및 개선
자갈세척장비 개발	· 5차년도 설계 및 제작 결과를 바탕으로 세척모듈(드럼, 구동부, 분사노즐, 투사재 공급장치)의 성능 개선 · 현장 시험부설을 통한 성능 검증 및 개선
급속경화궤도 시방서 및 유지관리지침 작성	· 국내 궤도개량기술을 기반으로 궤도공사 시방서 및 유지관리지침서 마련

(2) 성과지표 및 달성도

(가) 1세부

○ 6차년도 달성도

질적성과목표					
성과목표	성과지표	검증방법	가중치(%)	목표치	달성치
테스트베드 구축	테스트베드 구축 건수	보고서	20	2건	2건
	테스트베드 구간 현장조사 건수	보고서	10	4건	25건
상태평가 가이드라인 개발	자갈궤도 상태평가 가이드라인 최종 제시	보고서	15	1건	1건
TLV, 탬핑유닛 제작 및 성능검증	TLV, 탬핑유닛 제작 및 성능검증 완료	보고서	15	2건	2건
3차원 시뮬레이션 고도화	시험시공결과를 고려한 시공시뮬레이션 보완건수	결과물	10	1건	1건
경제성 분석, 실용화 및 사업화 전략 수립	경제성 분석, 실용화 및 사업화 전략 수립 결과	보고서	20	1건	1건
대외 공감대 확대를 위한 연구성과 홍보	연구성과 홍보건수 (세미나, 전시회 등)	증빙자료	10	2건	5건

양적성과목표				
구분	증빙	가중치(%)	목표(건)	달성(건)
논문 발표	논문	30	3	9
논문 게재	논문	30	2	4
S/W	S/W 등록증	40	3	5
특허출원	특허출원증		-	-
특허등록	특허등록증		-	1

○ 1~5차년도 달성도

질적성과목표					
성과목표	성과지표	검증방법	가중치(%)	목표치	달성치
테스트베드 구축	설계 결과 검토 회의 건수	보고서	-	4건	4건
	테스트-베드 구간 현장조사 건수	보고서		12건	25회
	테스트-베드 구축 건수	보고서	-	2건	2건
	자갈궤도 상태평가 가이드라인 초안 제시	보고서		1건	1건
시공성 검증	공정별 위험도 분석건수	보고서	-	2건	2건
	작업 안전 확보를 위한 교육매뉴얼 작성건수	결과물		1건	1건
3차원 시뮬레이션 기반 연구성과 전자 홍보자료 작성	3차원 시뮬레이션 기반 연구성과 전자 홍보자료 개발건수	결과물	-	1건	1건
급속경화궤도 BIM모델 개발	급속경화궤도 BIM모델 개발건수	결과물	-	1건	1건
경제성 분석, 실용화 및 사업화 전략 수립	경제성 분석, 실용화 및 사업화 전략 수립 결과	보고서	-	2건	2건
대외 공감대 확대를 위한 연구성과 홍보	연구성과 홍보건수(세미나, 기술전시회 등)	증빙자료	-	4건	7건

양적성과목표				
구분	증빙	가중치(%)	목표(건)	달성(건)
논문 발표	논문	30	11	21
논문 게재	논문	30	8	10
S/W	S/W 등록증	40	5	5
특허출원	특허출원증		-	-
특허등록	특허등록증		-	1

(나) 2세부

○ 6차년도 달성도

질적성과목표					
성과목표	성과지표	검증방법	가중치(%)	목표치	달성치
자갈궤도 개량용 침목 개발	고속선 (고속화노선용) 침목설계	보고서	10	3종	3종
	시제품 제작	보고서	10	3종	3종
	성능시험	보고서	15	시험완료	시험완료
	형식승인	보고서	10	1건	1건
자갈궤도 갱환장비 개발	장비개량	보고서	10	개량완료	개량완료
	성능확보도	보고서	15	86sec/1ea	86sec/1ea
자갈궤도 궤도구조 개량 시스템 개발	궤도틀림 진전속도 저감	보고서	10	70% 이상	45%
	자갈궤도 개량시스템 현장 부설	현장방문	10	500정 이상	441정
	개량침목의 VCRM 성능 확보도	보고서	10	만족	만족

양적성과목표				
구분	증빙	가중치(%)	목표(건)	달성(건)
논문	논문	30	1	1
시제품 제작	시제품	70	3	3
특허출원	특허출원증		0	0
특허등록	특허등록증		0	0

○ 1~5차년도 달성도

질적성과목표					
성과목표	성과지표	검증방법	가중치(%)	목표치	달성치
자갈궤도 개량용 침목 개발	침목설계	보고서	-	3건	3건
	시제품 제작	보고서	-	6조	11조
	성능시험	보고서	-	시험완료	시험완료
	침목설계 표준화	보고서	-	1건	1건
	형식승인 인증	보고서	-	1건	- (6차년도 이월)
자갈궤도 갱환장비 개발	궤도갱환 장비 제작 관련 회의	보고서	-	3회	3회
	장비제작	보고서	-	제작완료	제작완료
	장비개량	보고서	-	개량완료	개량완료
	성능확보도	보고서	-	106sec/1ea	계획대비 70%
자갈궤도 궤도구조 개량 시스템 개발	궤도틀림 현장측정	보고서	-	2개소	2개소
	궤도틀림 진전속도 저감	보고서	-	70% 이상	65.2%
	자갈궤도 개량시스템 현장부설	현장방문	-	침목 500정 이상	460정
	개량침목의 VCRM 성능 확보도	보고서	-	만족	만족

양적성과목표				
구분	증빙	가중치(%)	목표(건)	달성(건)
논문	논문	20	25	33
시제품 제작	시제품	40	6	11
특허출원	특허출원증	20	8	8
특허등록	특허등록증	20	4	7

(다) 3세부

○ 6차년도 달성도

질적성과목표					
성과목표	성과지표	검증방법	가중치(%)	목표치	달성치
급속경화궤도 설계기술	궤도구조 적합성	보고서	20		
인터페이스 기술요건 정립	취약구간 보강 방안	보고서	20		
시험부설 및 성능평가	현장적용성 확보	보고서	20		
주입장비 성능 개선	주입시스템의 성능 수준	보고서	15		
세척장비 성능 개선	세척시스템의 성능 수준	보고서	15		
시방서 및 유지관리지침 작성	작성자료의 타당성	보고서	15		

양적성과목표				
구분	증빙	가중치(%)	목표(건)	달성(건)
논문 발표	논문	20	2	10
논문 게재	논문	20	2	4
시제품	보고서	25	1	1
특허출원	특허출원증	35	1	3
특허등록	특허등록증			

○ 1~5차년도 달성도

질적성과목표					
성과목표	성과지표	검증방법	가중치(%)	목표치	달성치
교량용 급속경화궤도 시스템 설계 및 검증	교량용 궤도구조의 적합성	보고서			
인터페이스 기술요건 정립	취약구간 설계	보고서			
급속경화 충전재 현장적용성 확보	충전재료 강도 및 내구성지수 확보	보고서			
시험부설 및 성능평가	현장적용성 확보	보고서			
설계지침서 작성	작성자료의 타당성	보고서			

양적성과목표				
구분	증빙	가중치(%)	목표(건)	달성(건)
논문 발표	논문		12	34
논문 게재	논문		11	15
시제품	보고서		7	12
특허출원	특허출원증		10	14
특허등록	특허등록증			6
인력양성	보고서			2
녹색기술인증	녹색기술인증서			1

라. 주요성과

(1) 1세부

ㅇ시스템 성능검증 및 테스트베드 구축

- 세부과제별 시스템 요구조건 분석 및 성능검증방안 제시
- Verification-Cross Reference Matrix(VCRM) 기반 성능검증 실시
- 궤도구조 개량기술(2세부) 테스트베드 구축을 통한 성능검증 실시(일반선, 고속선)
- 급속경화궤도(3세부) 테스트베드 구축을 통한 성능검증 실시(고속선, 시험선)

ㅇ3차원 모델을 이용한 개량기술 시공성 검증

- 3차원 시공 시뮬레이션 개발
- 시뮬레이션 모델을 이용한 시공성 분석 및 보완, 작업 안전도 분석
- 급속경화궤도 BIM 모델 개발
- 테스트베드 시험시공결과를 고려하여 시공 시뮬레이션 모델 보완

ㅇ궤도리프팅차량과 탬핑유닛 개발

- 궤도리프팅차량 개념 설계 및 필요 사양 정립
- 탬핑유닛 개념 설계 및 필요 사양 정립
- 필요 사양 및 작업성능 확보를 위한 상세설계 및 검증
- 공정회의, 자문회의를 통해 설계 검증후 최종 도면 승인
- 궤도리프팅차량과 탬핑유닛 제작 감독
- 시운전을 통한 성능검증 및 개선사항 도출
- 테스트베드 시공을 통한 성능검증 및 개선사항 도출

ㅇ자갈궤도 상태평가 가이드라인 개발

- 자갈궤도 침하모델 개발
- 실대형실험 및 일반선 검측데이터를 통한 검증 실시
- DEM에 의한 자갈도상 거동 검토
- LWD를 이용한 궤도상태평가 기법 개발
- LSP에 의한 동적강성 평가
- FWI에 의한 강성 평가
- 침목영향배제를 위한 GPR 탐사장비 및 해석기법 개발
- 이미지프로세싱을 이용한 자갈 마모도 평가기법 개발
- 하부노반 탐사기법의 적용성 평가(DCP, 지반내시경, 도상샘플러 등)
- LWD 실험 결과를 바탕으로 상태평가 가이드라인 제시

ㅇ개량기술 경제성 평가와 실용화 전략 수립

- 개량기술별 LCC 분석

- 개량기술별 편익 분석
- 경제성분석을 통한 적정 개량기술 선정
- 국내 실용화 및 사업화 방안 제안
- 해외진출 방안 제안
- 북한 철도 현황 및 개량공법 적용 방안 제시

(2) 2세부

○ 자갈궤도 개량형 침목 개발

- 제작도면 작성
- 구조계산서 작성
- 최적화 검토
- 일반선 및 고속선용 침목 시제품 제작
- 성능시험 (공인성능시험 실시)
- 침목설계 표준화 (한국철도표준규격 고시 KRS-TR-0008)
- 철도안전법 (형식승인, 제작자승인) 인증

○ 자갈궤도 갱환장비 개발

- 시공장비 상세설계 및 제작
- 시운전을 통한 성능검증 및 개선사항 도출
- 테스트베드 시공을 통한 성능검증 및 개선사항 도출
- 성능확보도 (100m/1일 시공)

○ 자갈궤도 궤도구조 개량시스템 개발

- 궤도틀림 진전속도 저감
- 자갈궤도 개량시스템 현장 부설
- 궤도틀림 현장 측정
- 개량 침목의 VCRM 성능 확보도

(3) 3세부

○ 토공 및 터널구간 급속경화궤도 시스템 설계

- 고속선 적용을 위한 설계조건
- 급속경화궤도 구조설계
- 차량 주행안정성 및 궤도안정성 검토
- 노반 상부층의 밀도변화에 의한 궤도특성 검토

○ 교량구간 급속경화궤도 시스템 설계

- 교량구간 급속경화궤도의 특징

- 교량용 급속경화궤도 앵커 구조 설계 및 시공
- 교량상 급속경화궤도 표면 마찰 거동

○ 고속선 급속경화궤도용 충전재료 개발 및 성능 평가
- 충전재료 목표 품질성능
- 충전재료 설계 검토
- 충전재료 내구성 평가

○ 충전 모르터와 도상골재의 계면 부착특성에 따른 강도 평가
- 골재 세척도의 영향 검토
- 골재 세척도와 골재 수분포화도의 영향 검토
- 모래 입경크기 및 혼합비율의 영향 검토
- 폴리머 및 혼화재 첨가의 영향 검토

○ 급속경화궤도용 침목 설계 및 성능 시험
- 장침목(CK-600) 설계 및 제작
- 슬림형 침목(MF-140) 설계 및 제작
- 급속경화궤도용 침목 성능 시험 및 시험부설

○ 건식자갈세척장비 개발
- 건식자갈세척장비의 구성 및 개선
- 녹색기술 인증
- 세척골재 품질관리기준

○ 대용량 주입장비 개발
- 대용량 주입장비 설계 목표
- 대용량 주입장비 용량 검토
- 대용량 주입장비 구성 및 개선

○ 궤광리프팅장비 개발
- 궤광리프팅장비 설계 기준
- 궤광리프팅장비 구조해석 및 주행안정성 평가

○ 급속경화궤도 취약구간 보강방안
- 급속경화궤도 시공시 예상 취약구간 검토
- 고속선 적용에 따른 시공이음매부, 궤도 접속부, 연약지반구간, 하부자갈층 두께 변화 구간에 대한 보강방안

○ 급속경화궤도 시공공정 개발

- 기계화 시공공정 설계
- 교량구간 시험부설
- 철도종합시험선로 시험부설

○ 급속경화궤도 성능검증
- 교량구간 급속경화궤도 현장 계측 및 시험
- 철도종합시험선로 급속경화궤도 현장 계측 및 시험

○ 급속경화궤도 설계 및 해외시장진출을 위한 전략수립
- 급속경화궤도 해외시장진출을 위한 전략수립
- 급속경화궤도 설계기준(안) 작성

마. 연구 개발 추진 체계

○ 연구단

연구개발과제	
과제명	고속철도 자갈궤도구간 유지보수 저감을 위한 궤도개량 기술 개발

총 참 여 연 구 원
주관연구책임자 (최영태)외 96명

기 관 별 참 여 현 황			
구 분	기관수	인원수	총인원 수
산 업 계	10	72	106
대 학	1	5	
국공립(연)			
출 연 (연)	3	29	
기 타			

주 관 연 구 기 관	협동(공동) 연 구 기 관	협 동 연 구 기 관
한국철도기술연구원	삼표레일웨이(주)	한국철도기술연구원
참 여 연 구 원	**참 여 연 구 원**	**참 여 연 구 원**
주관연구책임자 (최영태)외 50명	협동연구책임자 (황광하)외 27명	협동연구책임자 (이일화)외 26명
수석급 12명 / 책임급 10명 선임금 14명 / 주임급 2명 원 급 3명	수석급 6명 / 책임급 4명 선임금 13명 / 주임급 5명	수석급 2명 / 책임급 7명 선임금 10명 / 주임급 6명 원 급 1명

담당연구개발내용					
과제명	고속철도 자갈궤도 개량기술 시스템 인터페이스 조정 및 테스트-베드 구축	과제명	고속철도 자갈궤도 궤도구조 개량기술 개발	과제명	고속철도 자갈궤도 급속경화기술 시스템 설계 및 성능평가
• 성능목표 정립(설계속도, 궤도틀림저감성능, 경제성, 시공성, 유지관리성 등) • 인터페이스 기술요건 분석 및 총괄/조정 • 시스템 성능검증방안 제시 및 테스트-베드 구축 • 시스템 성능검증 총괄 • 작업 위험도 분석 및 위험회피 전략 수립 • 경제성 평가 • 자갈궤도 개량사업 추진계획 수립		• 국내외 자갈궤도 개량공법 기술조사 및 성능분석 • 설계/성능기술요건 정립 • 인터페이스 요구사항 제시 • 시스템 개념설계 • 시스템 상세 기술 검토 • 공정 설계, 시공장비(자갈궤도 자동갱환장비) 개념/기본설계, 제작 발주 • 침목 시작품 제작 • 시작품 제작 및 실내 가속열화실험 • 시공장비 상세설계 및 제작 • 현장 시험시공 및 성능평가		• 설계/성능기술요건 (구조, 재료,장비,공정)정립 • 시스템 개념 설계 • 시스템상세 기술검토 • 궤도표준도 작성 • 개발장비 및 재료의 신뢰성평가 • 자동화장비를 이용한 시공공정 제시 • 충전재료 설계 및 내구성능 향상 • 실물가속열화실험(실내시험 2회) • 현장 시험시공 및 성능평가 각 2회 • 상세공정설계 및 최적화 • 일체형 자동화 충전재 주입장비 개발 • 건식작살세척장비 개발 • 급속경화궤도 설계기준 및 시방서작성	

○ 1세부

1 세부과제	
과제명	고속철도 자갈궤도 개량기술 시스템 인터페이스 조정 및 테스트- 베드 구축

총 참 여 연 구 원
주관연구책임자 (최영태) 외 50명

기 관 별 참 여 현 황			
구 분	기관수	인원수	총인원 수
산 업 계	2	37	51
대 학			
국공립(연)			
출 연 (연)	1	14	
기 타			

주 관 연 구 기 관	위 탁 연 구 기 관	위 탁 연 구 기 관
한국철도기술연구원	한국철도공사	(주)아이디엠이엔씨
참 여 연 구 원	**참 여 연 구 원**	**참 여 연 구 원**
주관연구책임자(최영태) 외 13명 수석급 1명 책임급 1명 선임금 8명 주임급 2명 원 급 2명	위탁연구책임자(박성백)외 33명 수석급 11명 책임급 8명 선임급 4명 원 급 1명	위탁연구책임자(주영돈) 외 2명 책임급 1명 선임급 2명
담당연구개발내용	**담당연구개발내용**	**담당연구개발내용**
과제명: 고속철도 자갈궤도 개량기술 시스템 인터페이스 조정 및 테스트-베드 구축	과제명: 자갈궤도 개량기술 테스트-베드 구축 계획 수립 및 적합성 평가	과제명: 자갈궤도 궤도구조 개량 기술 시공성 분석을 위한 3D 시뮬레이션 모델 개발
• 성능목표 정립(설계속도, 궤도틀림저감성능, 경제성, 시공성, 유지관리성 등) • 인터페이스 기술요건 분석 및 총괄/조정 • 시스템 성능검증방안 제시 및 테스트-베드 구축 • 시스템 성능검증 총괄 • 작업 위험도 분석 및 위험회피 전략 수립 • 경제성 평가 • 자갈궤도 개량사업 추진계획 수립	• 테스트-베드 구축 기본계획 수립 • 테스트-베드 후보지 적합성 평가 • 테스트-베드 구축 관련 관계기관 협의 및 의견 수렴 • 적합성 검토 결과 및 관계기관 협의 결과에 따른 테스트-베드 구축 최종계획 확정	• 시공성 분석을 위한 3D 시뮬레이션 모델 구축 • 급속경화궤도 BIM model 개발 • 3D 시뮬레이션을 이용한 시공성 분석 및 공정 보완 • 작업 위험도 분석

○ 2세부

2 세부과제	
과제명	고속철도 자갈궤도 궤도구조 개량기술 개발

총 참 여 연 구 원
주관연구책임자 (황광하) 외 27명

기 관 별 참 여 현 황			
구 분	기관수	인원수	총인원 수
산 업 계	5	19	28
대 학	1	5	
국공립(연)			
출 연 (연)	1	4	
기 타			

주 관 연 구 기 관	협동(공동) 연 구 기 관	위 탁 연 구 기 관
삼표레일웨이(주)	한국철도기술연구원	충남대학교 산학협력단
참 여 연 구 원	**참 여 연 구 원**	**참 여 연 구 원**
주관연구책임자 (황광하)외 14명	협동(공동)연구책임자 (황성호)외 7명	위탁연구책임자 (임남형)외 4명
수석급 3명 책임급 3명 선임금 6명 원 급 3명	수석급 2명 책임급 1명 선임급 5명	수석급 1명 주임급 2명 원급 2명

담당연구개발내용		
과제명	고속철도 자갈궤도 궤도구조 개량기술 개발	
• 공정 설계, 시공장비(자갈궤도 자동갱환장비) 개념/기본설계, 제작 발주 • 침목 시작품 제작 • 시공장비 상세설계 및 제작 • 장비 및 공정에 대한 시공성 검증 시험 및 보완 • 시공장비 신뢰성 시험 • 현장 시험 시공 • 시공장비 운용 및 유지보수 매뉴얼 작성, 작업자 운용 교육		

담당연구개발내용	
과제명	자갈궤도 궤도구조 개량기술 시스템 설계 및 성능평가
• 국내외 자갈궤도 개량공법 기술조사 및 성능분석 • 설계/성능기술요건 정립 • 인터페이스 요구사항 제시 • 시스템 개념설계 • 시스템 상세 기술 검토 • 시작품 제작 및 실내 가속열화실험 • 현장 시험시공 및 성능평가	

담당연구개발내용	
과제명	자갈궤도 개량용 침목의 구조해석 및 실험
• 국내·외 침목설계기준 분석 • 침목 상세해석 • 침목 실내실험 및 현장 실험 지원 • 개발 침목의 성능평가 지원(실내·외 실험)	

○ 3세부

3 세부과제		총 참 여 연 구 원
과제명	고속철도 자갈궤도 급속경화기술개발	주관연구책임자 (이일화) 외 26명

기 관 별 참 여 현 황			
구 분	기관수	인원수	총인원 수
산 업 계	3	16	27
대 학			
국공립(연)			
출 연 (연)	1	11	
기 타			

협동연구기관	공동연구기관	공동연구기관	공동연구기관
철도기술연구원	(주)천경기업	(주)청강크린텍	㈜선구엔지니어링
참여연구원	**참여연구원**	**참여연구원**	**참여연구원**
(세부)주관연구책임자 (이일화) 외 10명	공동연구책임자 (이순구) 외 7명	공동연구책임자 (임종일) 외 3명	공동연구책임자 (김성호) 외 3명
수석급 1명 책임급 1명 선임급 5명 주임급 2명 원 급 1명	수석급 1명 책임급 2명 선임급 3명 주임급 2명 원 급 0명	수석급 0명 책임급 2명 선임급 1명 주임급 1명 원 급 0명	수석급 0명 책임급 2명 선임급 1명 주임급 1명 원 급 0명
담당연구개발내용	**담당연구개발내용**	**담당연구개발내용**	**담당연구개발내용**
과제명: 고속철도 자갈궤도 급속경화기술 시스템 설계 및 성능평가	과제명: 고속선 급속경화궤도 공정 최적화 및 충전재 주입장비 개발	과제명: 고속선 급속경화궤도용 건식 자갈세척장비 개발	과제명: 급속경화궤도 설계 및 해외시장 진출을 위한 전략수립
• 설계/성능기술요건 (구조, 재료,장비,공정)정립 • 시스템 개념 설계 • 시스템상세 기술검토 • 궤도표준도 작성 • 개발장비 및 재료의 신뢰성평가 • 자동화장비를 이용한 시공공정제시 • 실물가속열화실험(실내시험 2회) • 현장 시험시공 및 성능평가 각 2회 • 급속경화궤도 설계기준 및 시방서작성	• 급속경화궤도 성능검증을 위한 시험부설 • 급속경화궤도 모르터 주입장비 성능평가 및 시공성 검증 • 급속경화궤도 모르터 주입장비 운용 및 유지보수 매뉴얼 작성	• 세척장비의 생산성능평가 및 시공 편의성 개선 • 자갈세척장비의 기술인증을 통한 친환경 기술력 확보 • 자갈과 모르타르 간 부착강도 향상을 위한 세척효율 평가 • 자갈세척장비 운용 및 유지보수 매뉴얼 작성	• 국외 궤도개량시장/환경분석을 통한 전략수립 • 급속경화궤도 설계지침(안) 작성 및 영문화

2. 연구수행내용 및 성과

(1세부)

가. 시스템 성능 검증 및 테스트 베드 구축

(1) 세부과제별 시스템 요구조건 분석 및 성능검증방안 제시

(가) 시스템 성능목표 설정

○ 본 과업의 성능목표인 설계속도와 시공성 목표를 시스템 성능목표로 설정
- 설계속도 : **350km/h급 고속철도**
- 시 공 성 : 시공속도 **100m/일**, 열차 일일 **차단시간내** 작업

○ 궤도구조 개량기술(2세부)
- 궤도틀림 진전속도 저감 목표 : 현재 수준의 **30% 이하(70% 저감)**
- 운영조건 : 열차운영속도 300km/h, 연간누적통과톤수 3,000만톤
- 설계속도 350km/h에 대해 구조적 안전성, 승차감 및 주행 안전을 확보할 것
- 시공속도 목표: 100m/일 (일일 차단시간 내 작업)

○ 급속경화궤도(3세부)
- 설계속도 350km/h에 대해 충분한 지지력, 승차감 및 주행 안전을 확보할 것
- 시공속도 목표 : 100m/일 (일일 차단시간 내 작업) 또는
  충전재 주입속도 50m^3 /일 이상 (100m/일)

(나) 인터페이스 요구조건 분석 및 조정

○ 설정한 성능목표에 따라 각 시스템별 시스템 수준의 요구조건 설정

○ 인터페이스 조정을 위한 공정회의 및 세부과제 책임자 협의

○ VCRM (Verification-Cross Reference Matrix) 개발: 단계적 성능검증 및 점검

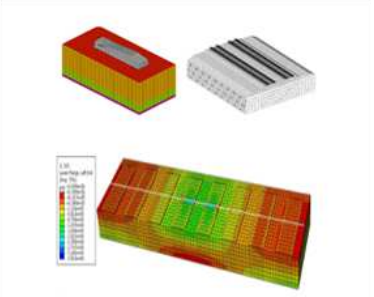
(다) 단계별 시스템 성능검증 절차

○ 개발 기술의 체계적이고 객관적인 성능검증을 위해 한국철도시설공단 “철도시설 성능증지침”에 규정된 단계적 성능검증 절차에 따라 추진

(a) 1단계**(기술 적합성 검토 단계)** : 설계 결과의 검증
- 설계보고서, 구조계산결과, 시공절차 및 구성요소 요구조건(시방서), 유지보수개념 등에 대해 전반적인 기술적 검토

(b) 2단계**(실내성능시험)** : 실모형 가속열화실험을 통한 성능 검증
- 설계에서와 동일한 성능을 확보하는가를 확인(정적 및 동적 거동)
- 실제 현장보다 가혹한 하중조건 하에서 성능을 검증(가속열화실험)

(c) 3단계**(현장설치시험)** : 실제 현장에 설치하여 성능 검증
- 1차: 야드 시험시공을 통해 시공성 검증
- 2차: 현장설치시험을 위한 테스트 베드 구축을 통한 최종 검증

1단계	2단계	3단계
수치해석을 통한 성능 검증	실내 실험을 통한 성능 검증	현장 시험을 통한 성능 검증
		
・궤도틀림 진전율 예측, 구조 안전성 평가 ・주행안정성 평가(안전 및 승차감) 등	・구성요소 성능 평가 ・궤도틀림 진전율 및 구조안전성 평가 ・수치해석 모델 검증	・시공성 검증(1차) ・궤도틀림 진전율 및 구조적 안전성, 내구성 평가(2차)

(라) 시스템 요구조건 및 검증방안 수립

<2세부 궤도개량기술>

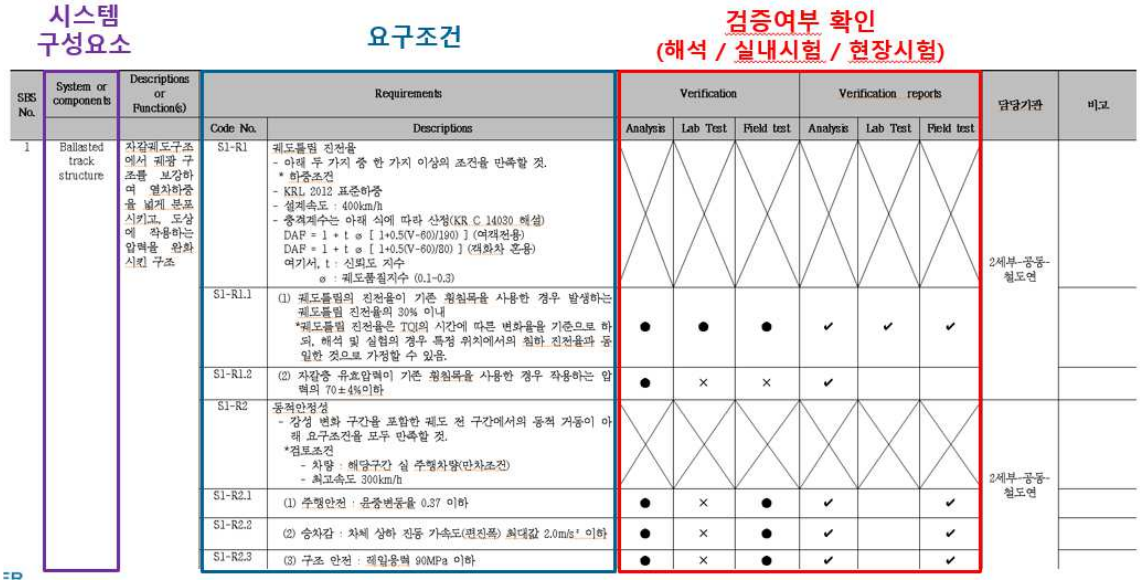
검토항목	요구조건	검증방안		
		1단계	2단계	3단계
궤도틀림 진전속도	궤도틀림 진전속도 30% 수준	구조해석, 궤도틀림 진전모델	가속열화 실험	현장설치시험 (궤도틀림, 유지보수 확인)
구조안전	자갈궤도의 모든 구성요소가 구조적으로 안전할 것 ·설계하중 : 220kN(KRL2012) + 충격 ·열차속도 : 350km/h	구조해석	가속열화 실험	현장설치시험 (부재응력 및 파손여부 확인)
동적 안정성	열차-궤도 상호작용 해석 결과가 아래 조건을 만족(KTX, KTX-산천열차 적용) ·주행안전 : 윤중변동율 37% 이하 ·승차감 : 차체 수직가속도 2.0m/s² 이하 ·구조 안정성 : 레일휨응력 90MPa 이하	구조해석	-	현장설치시험 (가속도, 윤중, 레일휨응력 등 확인)
시공성	공정 계획에 따라 시공속도 목표 달성을 위한 각 공정별 요구 작업속도를 만족할 것	3D 시뮬레이션	야드 시험시공	현장설치시험

<3세부 급속경화기술>

검토항목	요구조건	검증방안		
		1단계	2단계	3단계
구조안전	자갈궤도의 모든 구성요소가 구조적으로 안전 ·설계하중 : 220kN(KRL2012) + 충격 ·열차속도 : 350km/h (충전 직후 90km/h)	구조해석	가속열화 실험	현장설치시험 (부재응력 및 파손여부 확인
동적 안정성	열차-궤도 상호작용 해석 결과가 아래 조건을 만족(KTX, KTX-산천열차 적용) ·주행안전 : 윤중변동율 37% 이하 ·승차감 : 차체 수직가속도 2.0m/s² 이하 ·구조 안정성 : 레일휨응력 90MPa 이하	구조해석	-	현장설치시험 (차체가속도, 윤중/레일휨응력 등 확인)
시공성	공정 계획에 따라 시공속도 목표 달성을 위한 각 공정별 요구 작업속도를 만족할 것 콘크리트궤도와 동등한 시공/유지보수기준을 만족할 것	3D 시뮬레이션	야드 시험시공	현장설치시험

(2) Verification-Cross Reference Matrix (VCRM)

- 요구조건과 검증여부를 확인할 수 있는 방법으로 아래와 같은 요소를 포함하고 있음



SBS No.	System or components	Descriptions or Function(s)	Requirements		Verification			Verification reports			담당기관	비고
			Code No.	Descriptions	Analysis	Lab Test	Field test	Analysis	Lab Test	Field test		
1	Ballasted track structure	자갈궤도구조에서 궤광 구조를 보강하여 열차하중을 넓게 분포시키고, 도상에 작용하는 압력을 완화시킨 구조	S1-R1	궤도틀림 진전율 - 아래 두 가지 중 한 가지 이상의 조건을 만족할 것. * 하중조건 - KRL 2012 표준하중 - 설계속도 : 400km/h - 충격계수는 아래 식에 따라 산정(KR C 14030 해설) DAF = 1 + t ø [1+0.5(V-60)/190)] (여객전용) DAF = 1 + t ø [1+0.5(V-60)/80)] (객화차 혼용) 여기서, t : 신뢰도 지수 ø : 궤도틀질지수 (0.1~0.3)							2세부-공동-철도연	
			S1-R1.1	(1) 궤도틀림의 진전율이 기존 철침목을 사용한 경우 발생하는 궤도틀림 진전율의 30% 이내 *궤도틀림 진전율은 TQI의 시간에 따른 변화율을 기준으로 하되, 해석 및 실험의 경우 특정 위치에서의 철하 진전율과 동일한 것으로 가정할 수 있음.	●	●	●	✔	✔	✔		
			S1-R1.2	(2) 자갈층 유효압력이 기존 철침목을 사용한 경우 작용하는 압력의 70±4%이하	●	×	×	✔				
			S1-R2	동적안정성 - 장성 변화 구간을 포함한 궤도 전 구간에서의 동적 거동이 아래 요구조건을 모두 만족할 것. *검토조건 - 차량 : 해당구간 실 주행차량(만차조건) - 최고속도 300km/h							2세부-공동-철도연	
			S1-R2.1	(1) 주행안전 : 윤중변동율 0.37 이하	●	×	●	✔		✔		
			S1-R2.2	(2) 승차감 : 차체 상하 진동 가속도(편진폭) 최대값 2.0m/s² 이하	●	×	●	✔		✔		
			S1-R2.3	(3) 구조 안전 : 재일응력 90MPa 이하	●	×	●	✔		✔		

(3) 테스트 베드 구축을 통한 성능검증



(가) 궤도구도 개량 기술 (2세부) 테스트-베드 구축

① 야드 시험 시공

㉮ 영동기지내 개발 개량침목 시험시공: 광폭침목, Half-Frame 침목, I/B 침목

○ 개발침목 교환공정 및 작업 효율성 확인

- 1, 2, 3차 침목교환을 통한 시공공정 및 침목교환장비 개선사항 도출

㉯ 침목교환장비 성능 검증 (침목교환장비 성능 개선 후)

○ 성능 목표: 1일 100m 시공속도(2편성 기준, 작업시간 2시간) 확보

○ 1차 시공성 테스트(19.05)

- 결과: 1일 76m 시공속도 예상(2편성 기준, 작업시간 2시간)

○ 2차 시공성 테스트(19.07)

- 결과: 1일 110m 시공속도 예상(2편성 기준, 작업시간 2시간)

② 개량침목 테스트 베드(2세부): 일반철도(경부선)

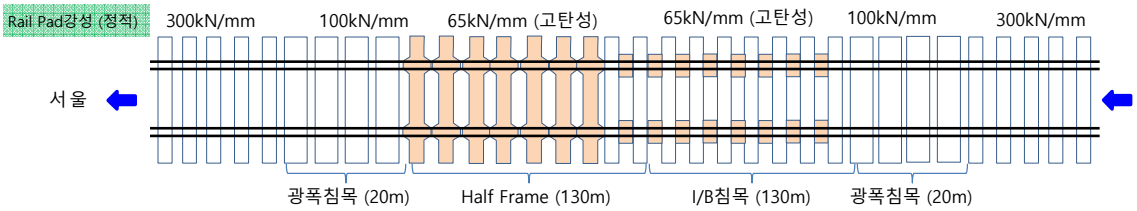
○ 기간: 2017.05.

○ 위치: 경부선 지천-대구간 상선 318k690~990 (300m)

○ 선정사유

- 선로에 장비 진입이 용이하고 자재 적치가 편리하며, 성능검증을 위한 모니터링과 유지보수시 접근이 쉬운 구간임
- 경부선 하행선으로 충분한 **통과톤수(14.8MGT/년)**와 **130km/h**의 통과속도로 개량침목 성능검증에 최적의 장소임
- 시공중 이상 발생시 부본선으로 열차우회 가능

○ 테스트 베드 구성: 광폭침목 20m, HFS 130m, I/B침목 130m, 광폭침목 20m





○ 개량침목 시공성 평가

- 야간작업의 안전성을 위한 철도공사의 요구로 기존 침목교환장비를 이용하여 시험시공 진행. 충분한 시공속도 확보
- 6일동안 300m 시험부설 완공

○ 현장모니터링을 통한 개량침목 성능검증

- 하선 대비 상선의 궤도틀림 표준편차 진전 속도 저감을 보면, 전체적으로는 45% 정도의 저감 효과가 있으며, 특히 HFS 구간에서 52%의 궤도틀림 저감효과를 보여 큰 효과가 있음을 알 수 있음. 하지만 IB의 경우 20% 정도의 궤도틀림 진전 저감효과가 나타남. 이는 IB 설치시 하부 자갈의 이완영역이 커져 설계 및 해석에서 검토한 것과 같이 열차하중을 충분히 분산시키지 못하기 때문인 것으로 사료됨
- 하선의 궤도틀림 진전율을 기준으로 저감효과 분석. 해당 구간은 신규부설이후 안정된 구간으로 상·하선 모두 유지보수가 적용되지 않는 양호한 구간임
- 따라서 양호한 구간임을 고려하면 **45%의 궤도틀림 저감**은 개량침목의 성능을 충분히 나타냈다고 할 수 있음

<일반선 시험부설구간 상하선 궤도틀림 표준편차 변화율>

구분	하선		상선			
	측정시기	수직방향	측정시기	수직방향(전체)	수직방향(HFS)	수직방향(IB)
1차측량	17/04/20	1.71905	17/05/22	1.12397	0.78735	0.93419
⋮						
8차측량	19/02/14	2.54950	19/02/14	1.55624	1.19729	1.49323
기울기	-	0.03504	-	0.01938	0.01686	0.02801
저감효과	**-**	**-**	**-**	**44.7%**	**51.9%**	**20.1%**

③ 개량침목 테스트 베드(2세부): 고속철도(경부선)

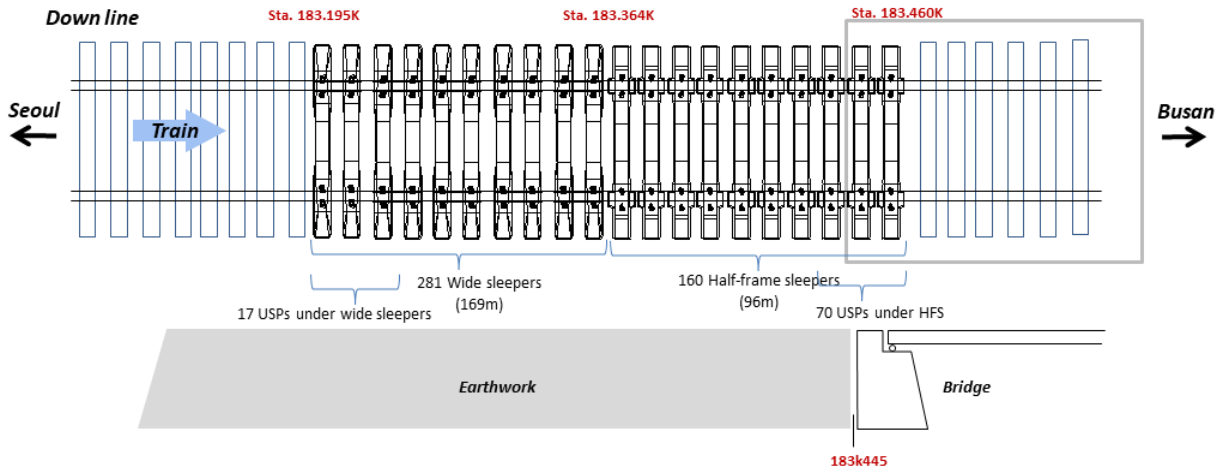
○ 기간: 2018.11월

○ 위치: 경부고속선 대전-영동간 하선 183k195~460 (265m)

○ 테스트 베드 구성: HFS 96m, 광폭침목 169m

○ 개량침목 시공성 평가 (백호우 2대 투입)

- 광폭침목 1정 교체시간 35초, 2시간 작업시 205정 교체가능(123m)
- HFS 1정 교체시간 45초, 2시간 작업시 160정 교체가능(96m)
- HFS의 경우 2시간 100m에 약간 못미치지만 작업자 숙련도가 높아지면 교체시간 단축 가능할 것으로 예상. 또한 차단시간 2시간은 보수적인 시간으로 2시간 이상 확보될 경우 100m이상의 시공은 무난할 것으로 판단됨



<고속선 시험부설구간 궤도틀림 표준편차 변화율>

구분	측정시기	토공부 reference	개량 공사 전구간	광폭침목 - 전체	광폭침목 - good	HFS	교량부 reference
1차측량	18/11/12	0.77527	2.06261	1.24847	0.86676	2.96518	3.36251
⋮							
7차측량	19/09/25	1.10202	2.14785	1.75193	1.09618	2.59357	3.97779
기울기		0.03358	0.01585	0.05508	0.01738	-0.02912	0.03835
저감효과			**52.8%**	**-64.0%**	**48.2%**	**186.7%**	**-14.2%**

○ 고속선 개량침목 성능평가

- 개량 구간 전체에 대해서 궤도틀림 진전율을 평가해보면 0.0158로 **약 52.8%의 진전율**

개량효과가 있음. 즉, 궤도틀림 진전율이 절반 이상 개선됨

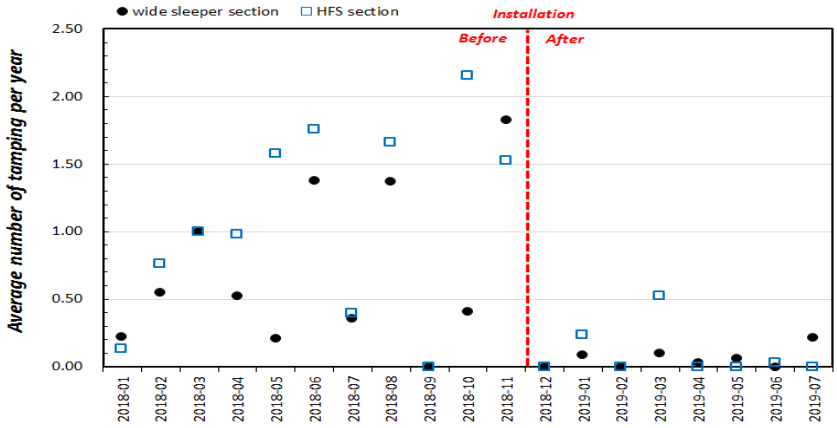
- 광폭침목구간과 HFS구간의 궤도틀림 진전율 개선이 다소 다르게 나타나나 이는 침목 자체의 성능이라기 보다는 용접부에서의 충격하중, 시공시 과다 양로 등에 의한 요인이 더 크게 작용한 것으로 분석됨

○ 고속선 개량침목 테스트 베드 구간의 유지보수 작업현황 분석

- 개량침목으로 교환 전·후의 누적탬핑연장(유지보수량)을 비교하면 약 95% 정도의 감소효과가 있는 것으로 나타남

○ 개량침목을 적용함으로써 궤도틀림 진전율은 52.8% 개선되었으며, **유지보수는 95% 정도 개선**되는 효과가 나타남

- 따라서 개량침목을 적용함으로써 궤도틀림진전율 70% 이상 저감은 충분히 달성되었다고 할 수 있음



<고속선 시험부설구간 개량 작업 전후 궤도 유지보수 작업량 비교>

(나) 급속경화궤도

① 야드 시험시공

㉮ 주입장비

○ 1차 시공성 테스트(17.05)

- 결과: 1일 76m 시공속도 예상(2편성 기준, 작업시간 2시간)

○ 2차 시공성 테스트(19.08)

- 결과: 1일 100m 시공속도 예상(2편성 기준, 작업시간 2시간)

㉯ 건식세척장비

○ 시공성 테스트(19.04)

- 결과: 1일 100m 시공속도 예상(2편성 기준, 작업시간 8시간)

② 급속경화궤도 테스트 베드(3세부): 경부고속선 대전남연결선

○ 기간: 2017.03. ~ 07.

○ 위치: 경부고속철도 대전 남연결선 교량 구간

○ 연장: 곡선부(R=600) 외측 75m (25m경간 x 3경간)

○ 급속경화궤도 시공성 평가: 핵심장비인 주입장비의 성능평가 및 개선사항 도출

- Silo tank의 적재용량이 최소 28ton이어야 하는데 25ton 이상일 경우 재료 자중에 의한 다짐 등의 문제로 인해 원활한 시공 곤란
  → 수평스크류 컨베이어와 유압 개폐시스템을 보완하여 시공성 확보
- 팔각믹서의 경우 품질은 만족하나 연속성이 불안함
  → 원형믹서로 교체한후 연속성 확보





③ 급속경화궤도 테스트 베드(3세부): 오송시험선

○ 기간: 2019.08.~09.

○ 위치: 한국철도기술연구원 오송시험선내 제4터널 종점부~토공구간 (165m)

○ 선정사유:

- 일반선(운행속도 150km/h)에 기존 급속경화궤도(인력기반 시공) 시공 및 성능검증 완료
- 속도 200km/h 이상이 가능한 오송시험선 구간 선정. 고속대역 성능검증 수행
- 개발장비(시작품) 시공공정 및 시공성 검증이므로 예기치 못한 상황 대처 및 안전사고 방지를 위하여 오송시험선 선정



✓ 작업 공정 분리로 인한 공정별 간섭 최소화 및 파트별 작업 가능

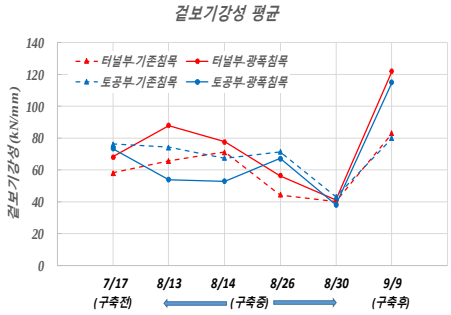
○ 테스트 베드 구간 상태평가 및 상세설계 기본 자료 제공

- DCP, LWD, GPR: 테스트 베드 구축전 지반지지력, 도상강성, 상태 평가
- 토공구간중 성토구간 침하예상으로 시험시공연장 조정

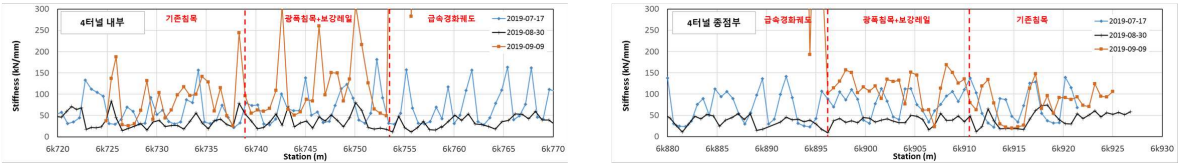
○ 시멘트 몰탈 주입전 자갈궤도 상태평가 수행

- LWD: 테스트베드 구축전후 자갈궤도 강성지수 변화 확인

구축 전후 비교시 궤도강성이 동등하거나 증가. 자갈궤도 안정성 확인 후 주입



<평균 궤도 겉보기강성 변화>



<급속경화궤도 구축 전후 궤도 겉보기강성 변화>

○ 시공성 검증

- 개발장비(TLV, 시멘트몰탈 현장 혼합 및 주입장비, 건식세척장비) 성능검증
- 1일 55m 이상 시공속도 확보 (1편성 기준, 작업시간 2시간)





나. 3차원 모델을 이용한 개량기술 시공성 검증 기술 개발

(1) 3차원 BIM 개요

(가) BIM 개요

① BIM(Building Informtion Model) 모델이란?

○ 다차원 공간과 설계 정보를 기반으로 계획단계에서부터 설계, 시공, 유지관리 단계 등 전 생애 주기 동안 다양한 분야에서 적용되는 모든 정보를 생산하고 관리하는 기술

② 건설분야의 BIM

○ 건설분야에서 BIM은 기획 단계부터 설계, 설계평가, 입찰 및 계약, 시공, 유지관리 및 해체에 이르는 전 단계에 적용

○모든 정보를 단계별로 모든 참여자가 공유 → 커뮤니케이션이 활성화로 문제점 조기에 파악 및 대처 가능

(나) 고속철도 자갈궤도 개량기술의 BIM 적용

① BIM검토의 필요성

○신규 개발장비의 적용과 그에 따른 장비 조합에 따른 시공성 검토, 한정된 공간(운영노선) 내에서 수행되는 작업으로 면밀한 검토, 기존의 2차원 기반의 검증뿐만 아니라 다차원 BIM을 이용한 장비 및 공법의 검증이 필요

○개발장비 및 적용장비를 BIM 모델로 구현하고 시뮬레이션을 통해 시공 전에 시공성(시공효율성, 간섭 등) 및 안전성 검증 수행 필요

② BIM기술 적용

㉮ 개발장비 시뮬레이션

○개발장비 : **침목교환장비(2세부), TLV(Track Lifting Vehicle)(3세부)**

○시뮬레이션 결과 : 개발 장비 운영에 따른 위험성 평가, 작업안전 매뉴얼 제시, 장비 운영 시 위험저감 대책 제시

㉯ 공법에 따른 장비 조합 시뮬레이션

○2세부의 침목교환공정, 3세부 급속경화궤도 시공공정에 대한 시뮬레이션 프로그램 작성

○장비조합에 따른 3차원 시뮬레이션 구현과 이를 통한 시공성 및 안전성 사전 검토

○차단 시간 내 공정완료를 위한 목표성능 도출

㉰ 급속경화궤도 BIM모델 및 활용도구 개발

○급속경화궤도에 대한 BIM모델과 BIM모델을 활용한 해석모델 변환 프로그램 개발

○급속경화궤도 BIM모델의 제작, 활용(도면추출, 수량산출) 가이드 제시

㉱ BIM모델을 이용한 홍보자료

○작성된 BIM모델과 시뮬레이션 프로그램을 이용한 E-catalog 및 홍보동영상을 제작

○E-catalog 및 홍보동영상을 통한 연구성과 홍보

(2) 3차원 시뮬레이션 프로그램 개발

(가) 개요

○멀티 플랫폼 및 통합 개발 환경 제공과 같은 장점을 가진 Unity 3D 기반으로 개발

○시공 시뮬레이션 프로그램은 침목, 공법, 장비 등을 BIM 기반으로 3차원 모델로 구축

○가상현장에 실제와 같은 공정을 구현하여 시공 전에 시공성 및 안전성 검토를 수행

○자갈궤도 궤도구조 개량공법 및 급속경화공법을 구성하는 장비의 작업능력 및 재원에 따른 시간 산정

○운행선의 영향을 최소화, 차단시간(작업시간 2~3시간)내 작업의 가능유무에 대한 검토를 사전에 수행

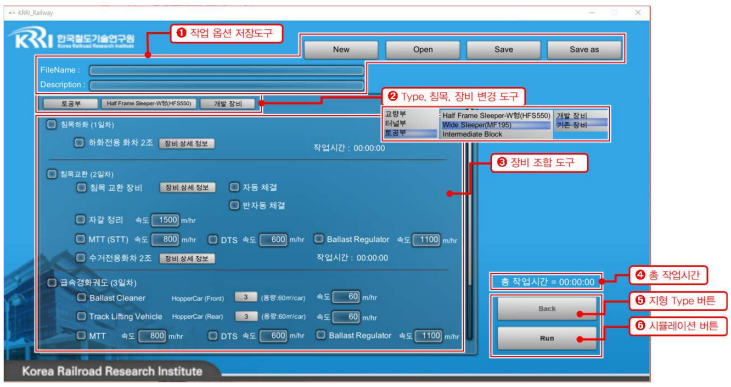
(나) 프로그램 구성

① 초기화면 : 작업환경(토공부, 터널부, 교량부) 선택



<프로그램 초기 화면>

② 장비조합 옵션



<장비조합 옵션 화면>

○ Type, 침목, 장비 변경 도구 : 구조물(지형) Type, 침목(광폭침목&HFS, IB)에 따른 체결 방식, 사용장비별 조합 도구

○ 장비 조합 도구

- 사전작업과 후속작업을 분리하여 일자별로 시뮬레이션을 할 수 있도록 구성
- 궤도구조(침목) 개량기술: 1일차 침목하화, 2일차 **<u>침목교환 및 안정화</u>**
- 급속경화궤도 개량기술: 1일차 침목하화, 2일차 침목교환 및 안정화, 3일차 **<u>자갈교환 및 부직포·거푸집 설치</u>**, 4일차 충전재 주입으로 분할

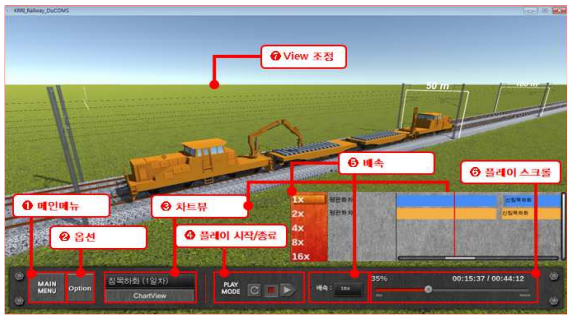
③ 시뮬레이션 확인

○ 장비조합 완료 후 시뮬레이션을 실행

- 궤도개량 공정 시뮬레이션 및 동영상 형태의 확인 가능

○ 시결과 확인의 편의를 위하여 간트차트 동시에 확인 가능

○ 시뮬레이션 속도 조절 등의 기능으로 시공공정 전반에 대한 신속한 확인 가능



<시뮬레이션 결과 확인>

(3) 개발 장비 모델을 통한 시공성 및 안정성 향상

○ BIM은 2차원으로 설계된 장비 및 시설을 3차원 상에 구현 DMU(Digital Mock-up)을 구성
- 실제 운영 및 시공 전 가상의 공간에서 시뮬레이션을 수행하여 설계 및 시공공정, 안전성 등을 검증, 보완

○ 개발 장비 및 개발공정을 3차원으로 구현하고 시뮬레이션할 수 있는 도구를 개발

○ 개발된 시뮬레이션 프로그램은 계획된 공정을 사전 구현, 검토
- 시험시공을 위한 사전계획 검토에 활용

(가) BIM 개발 장비모델을 통한 설계 및 안전성 검토

① 개발 장비 설계검토

○ 시뮬레이션 프로그램 제작에 앞서 개발 장비의 3차원 구현과 제원에 따른 개별장비 구현으로 장비 설계를 검토
- 3차원구현에 따른 다양한 시점에서의 장비 검토로 설계제안요소 도출 및 제안
- 침목 갱환 장비(Sleeper Changer) 설계검토



<설계 검토>

② BIM모델을 통한 작업 위험도 분석을 통한 안전성 확보

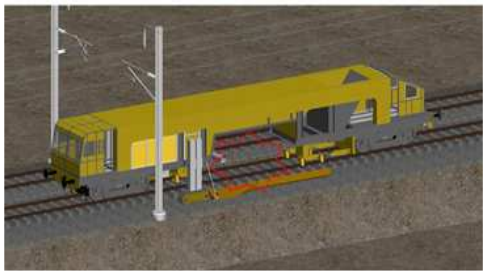
○ 개발 장비 시공성 및 작업 위험도 Check List
- 궤도 개량 장비의 시공성과 작업 위험도를 분석하기 위해 3차원으로 구축된 신규 개발 장비(침목 갱환장비, 궤광리프팅장비(TLV))의 시뮬레이션 수행
- 장비 시공성 및 작업 위험도 Check List를 작성

<장비 시공성 및 작업 위험도 Check List>

작업명	위험도 항목
침목갱환	① 침목 Clamp 작업 시 굴삭기 운전자의 시야확보
	② 전차선 Post구간에서의 새 침목 갱환시 장비와 Post의 간섭
	③ 침목 갱환 작업 시 전차선과 장비 Boom의 간섭
	④ 자갈 굴착을 위한 Blade의 깊이 산정
궤광 리프팅	① 궤광리프팅 장비 내부에 작업자의 위험 방지



<침목교환장비>



<TLV(Track Lifting Vehicle)>

○ 작업별 위험 요인별 저감대책 수립

- 장비 / 작업 Sequence별 사전 시뮬레이션 결과로부터 잠재적 위험요소을 시각적으로 도출하고 그에 대한 저감 대책 수립
- 해당내용은 향후 활용을 위한 자갈궤도 유지보수 작업안전 매뉴얼 제시



<자갈궤도 유지보수 작업안전 매뉴얼>

(나) 시뮬레이션 프로그램을 통한 시공성 검증 활용

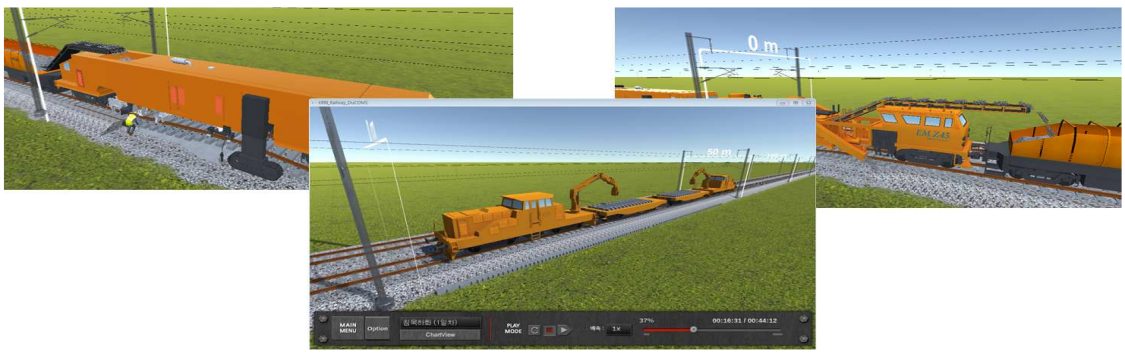
① 시뮬레이션프로그램 장비조합

○ 공정별 시공 시뮬레이션

- 침목교환, 급속경화궤도 등 연구개발 장비 이용한 시공 시 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 계획된 장비의 조합 및 속도를 적용하여 대상 구간시공을 사전 시뮬레이션 수행
- 시뮬레이션은 조작을 통해 다양한 시점에서 시공공정을 확인하고 예상되는 문제점을 사전에 점검

○ 소요시간 산정

- 시뮬레이션 프로그램은 입력된 장비조합, 제원 값, 장비 상세정보를 통해 조합된 장비로 예상되는 작업 소요시간을 산출
- 산출된 시간은 해당 작업 차단시간과 비교하여 작업 가능여부를 판단
- 장비성능값 조정을 통해 목표시간내 작업조합을 선정하고 주요관리 공정 사전 준비



<다양한 시점의 시뮬레이션 확인>

(4) 급속경화 BIM 모델 개발과 적용

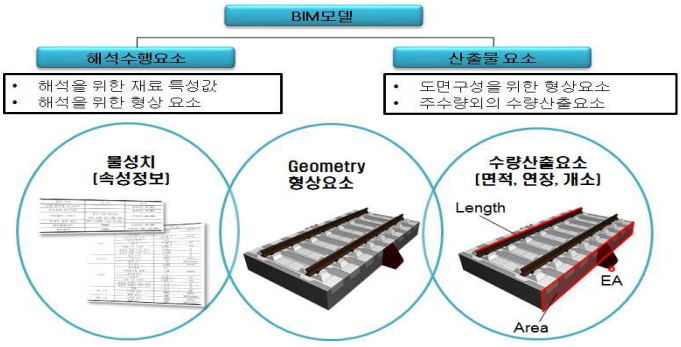
(가) 서론

○ 급속경화궤도는 다른 토목 구조물에 비하여 간단한 형태의 구조물이나 궤도 설계시 반복 적용되는 항목으로 정확한 형상구현, 수량산출, 해석을 필요

(나) 급속경화궤도의 BIM모델

○ 급속경화궤도 BIM모델은 모델을 통한 도면추출, 수량산출, 형상 및 속정정보의 변환을 통한 해석모델로 전환

○ BIM모델작성이 구현에 부합되는 형상객체와 속성정보를 가져야 하며, 해당 기능구현을 위한 최적화된 방법 적용



<BIM모델의 활용에 따른 모델 구성요소>

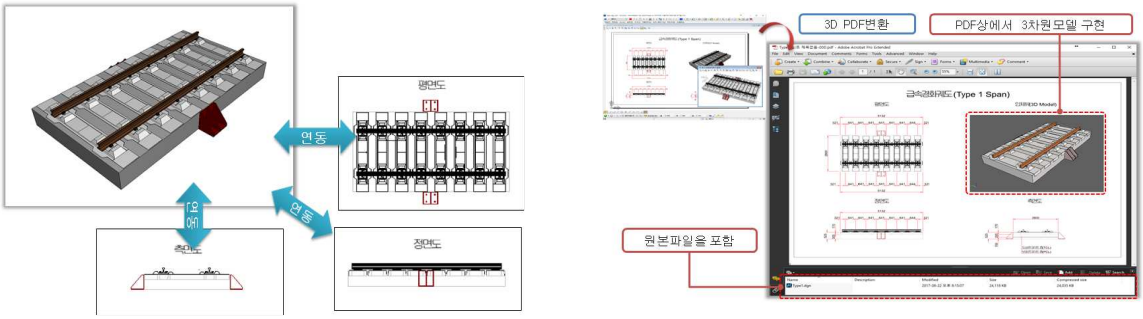
(다) BIM모델의 활용

① 도면 추출

○ 3차원 BIM모델과 연동된 2D도면을 추출하고 기존의 도면과 동일한 정보를 구현하여 성능의 저하없이 3차원 도면모델 탐색 기능까지 포함한 active 도면 제시

② 수량 산출

○ 모델에 적용되는 Dataset은 3차원객체의 속성정보에 해당하며, 미리 설정된 수량산출요소의 지정을 통해 설정된 객체에서 사용자가 원하는 수량만을 일괄 산출 가능



<3차원 모델과 연동 된 2d도면 추출 및 전자도면 활용 >

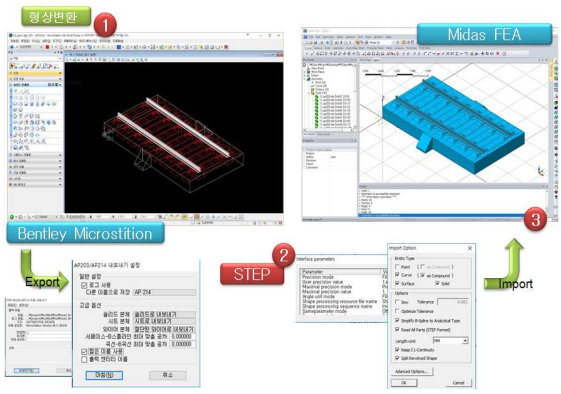
③ BIM 기반 자동 구조해석

○ 기본 구조해석

- 급속경화궤도 설계를 위한 기본 구조 검토를 자동 프로그램 개발
- 해석결과와 메시지를 도출하고, 구조 계산서 자동 작성

○ **BIM을활용한 3D 자동화 구조해석**

- BIM모델을 해석프로그램에 적용할 수 있도록 3차원 모델 변환 프로그램 개발
- BIM 속성정보 자동 변환으로 재료별 물성치 자동입력 → MIDAT FEA Solver 해석



<BIM모델이 해석모델 적용>

(5) 테스트-베드 시험시공을 통한 연구개발성과 검증 및 고도화

(가) 서론

○ 시험 시공 후 실제 시공 데이터를 시뮬레이션의 장비 상세 설정(공정 시간)에 반영

○ 현장 여건 및 시험 시공을 통한 현실성 있는 시뮬레이션 구성 변경

(나) 시공 시뮬레이션 변경 사항

구분	대상모델	현장 의견 및 시험시공에 따른 변경사항	비고
1	침목 교환 장비 운영 계획	• 침목교환 장비 투입방법 변경 - 기존 : 0m, 25m 투입, 교환 작업 수행(0~50m) - 변경 : 0m, 50m 투입, 교환작업수행(0~100m)	
2	초기 측방향 침목 제거	• 최초 측방향 제거 침목갯수변경 - 기존 : 초기 3개소 침목 측방향 제거, 4번째 침목부터 일반 교환공정 수행 - 변경 : 초기 4개소 침목 측방향 제거, 5번째 침목부터 일반 교환공정 수행	
3	자갈정리 장비	• 자갈정리 장비 크기 및 위치 변경 - 기존 : 10규격 백호, 레일 사이 장비 이동 - 변경 : 02규격 백호, 레일 위 장비 이동	
4	I/B 시공 변경 및 보완	• I/B 침목 하화 - 궤도 측방향 공간 부족으로 인하여 개별 하화로 공정 수정 • I/B 블록 설치 - 궤도 측방향 공간 부족으로 인하여 궤도내 작업 수정	
6	세부공정 모델	• 시뮬레이션 제원값 변경 - MTT, DTS, RE 기본값 변경 - 광폭침목 및 IB침목 하화 시간 적용 - 침목 시공 단위시공 시간 적용	

(다) 시공 시뮬레이션을 통한 시공성 검증

○ 테스트 베드 구축을 통해 검증된 장비 운영시간을 적용하여 개량기술별 시공성 재검증

① 침목교환 공정

○ 시뮬레이션 프로그램 산정시간 (**소요시간 1:48:23**)

② 금속경화궤도 공정

○ 시뮬레이션 프로그램 산정시간 (**소요시간 1:50:00**)



<테스트베드구축 결과를 활용한 시공시간 재검증>

(라) 소결

○ 시험시공으로 실제 장비의 시공 시간을 시뮬레이션에 적용 및 검증

○ 사전에 시공 전 사용되는 장비 조합에 맞춰 시뮬레이션을 활용한다면, 시공 전 장비 운영 협의 및 전문가의 판단에 의해 차단시간에 맞춰 시공 목표를 달성

(6) 연구개발성과물 활용방안

○ 본 연구의 성과물인 3차원 시공 시뮬레이션 프로그램은 다양한 현장 여건과 장비 조합에 따른 시공속도를 사전에 시뮬레이션함으로써 정해진 공기에 필요한 일별 작업량 및 기간별로 투입되어야하는 장비 리스트를 미리 예측해볼 수 있는 중요한 프로그램임

○ 따라서 향후 개량침목과 급속경화궤도의 사업화가 진행될 경우, 사업화를 진행하는 업체에 개량침목과 급속경화궤도 개발기술 이전과 함께 시뮬레이션 프로그램을 같이 제공하여 개발기술의 사업화에 도움이 될 수 있도록 적극적으로 협력할 계획임

다. 궤도리프팅차량과 탬핑유닛 개발

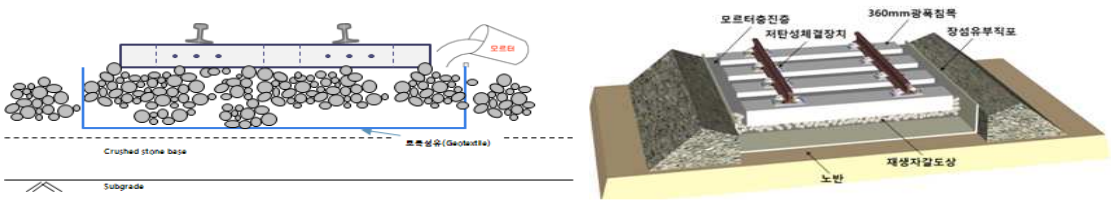
(1) 장비제작의 필요성

(가) 궤도리프팅 차량 (TLV, Track Lifting Vehicle)

① 개요 및 필요성

○ TLV는 개량기술의 일환인 급속경화궤도의 효율적인 시공을 위한 개량장비

○ 운행선의 교통지연을 최소화하면서 차단시간 내에 자갈궤도를 효과적으로 보강할 수 있는 급속경화궤도 시공을 위해 필요한 장비임



<급속경화궤도>

② 개념 설계

○ 한정된 열차 차단시간 내에 빠르게 시공을 완료하기 위해 작업시간을 단축하여 연구개발 목표인 차단시간이내 100m 이상 시공효율을 확보하여야 함

○ 이를 위해 **급속경화궤도 시공공정**에서 **부직포와 거푸집 설치**를 위해서 궤광을 들어올리고, **자갈을 살포하는 작업**을 수행할 수 있는 시공장비가 필요함

○ 따라서 궤도리프팅차량(Track lifting vehicle)을 개발하여 적용함으로써 작업시간을 획기적으로 단축하여 시공성과 경제성을 확보해야 함

(나) 타이탬핑 유닛 (Tie Tamping Unit)

○ 탈/부착형 타이 탬핑 유닛을 자갈궤도 다짐장비로 해외에서 사용하고 있으나 국내에는 전무한 상황

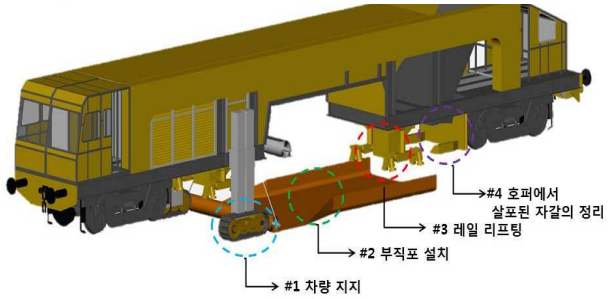
○ TLV 장비에 부착한다면 급속경화궤도시공법의 적용 시에 궤도시공 안전성 확보 가능

○ 일반궤도의 유지보수뿐만 아니라 침목간격 및 침목형태가 다른 궤도구간에서도 자갈다짐이 가능하여 장비의 활용도를 높일 수 있음

○ 궤도구조 개량기술로 개발한 Intermedia Block이나 Half frame sleeper는 일반침목과 형상이 달라 기존 장비로의 다짐 효율이 떨어지는 경우가 발생

- 탬핑타인 간격이 조절가능하며, 탬핑유닛 전체의 회전이 가능한 8 head 타이 탬핑 유닛 개발 필요

○ 장비 국산화로로 향후 유지보수시스템 변경에 능동적으로 대처할 수 있음



<궤도 리프팅 차량 개념도>



<타이탬핑유닛(예)>

(2) 개발 사양 정립

(가) 궤도리프팅 차량 (TLV, Track Lifting Vehicle)

○ 급속경화궤도 시공공정, 장비 전문가, 유지보수관계자들의 의견조회로 필요 사양 정립

○ 주요 성능 조건

1) 최고 주행속도는 70km/h 이상

2) 최고 주행속도 주행 시 주행안정성을 확보함. 작업시 정속주행이 가능할 것

3) 0.4m/L 의 기울기를 갖는 상태로 작업이 가능할 것(L은 차량대차중심간간격(m))

4) 자차운행가능 및 300ton의 중량을 견인가능

5) 토목섬유(부직포) 설치 후, 자갈포설 가능

6) 비상시 탈선복구장비

<TLV 기본사양 정립>

구 분	설계기준	구 분	설계기준	
차량한계	차량 총 길이-21.0m 이하 (연결기 제외)	최소 주행 곡선반경	300m	
	폭 : 3.0m 이하	최대 주행 구배	35‰ 이상	
	높이 : 레일면에서 4.1m 이하	최대 주행 속도	70km/h 이상	
고정축거	2.5m이하	감속도 조건 70km/h→정지	상용	3.5km/h/s
			비상	4.5km/h/s
대차형식	2-axle bogie 타입	작업소음	운전실 내 73dB 이하 차량 외부 75dB 이하	
대차구조	반경 120m이하 곡선 통과 가능	연료탱크	1000 리터 이상	
축중하중	정차중 차량 최대 15ton 이하	운전장치	전 후진 운전장치	
견인능력	300ton 이상	자체외형	자갈포설형	
작업속도	100m/h 이상	확장성	레일연마기 등 장착가능	
호퍼용량	5.5m3	최대작업구배	35‰ 이상	
레일리프팅	더블캐치(전,후 2세트)			

(나) 타이탬핑 유닛 (Tie Tamping Unit)

○ 8두와 16두 타이탬핑유닛 제작

- 16두 타이탬핑유닛은 8두 유닛 2개를 연결하여 제작. 8두 탬핑유닛과 같은 사양임

<타이 탬핑 유닛 사양기준 >

항 목	16두 규격	8두 규격
전장×폭×높이	1120×1978×1556	1140×865×1275
본체중량(kg)	1600	950
시공방법	침목 1개(양측레일)씩	한쪽 레일 측면에 침목1개씩
최대시공깊이(mm)	침목 하면보다 300	침목 하면보다 깊이 250
진동력(N)	30000 × 2	34000
진동주파수(HZ)	35	30~35
진폭(mm)	3.0	3.0
최저 필요 유량(L/min)	50+60	35+50
최고사용압력 (kgf/㎠)	210	210
탬핑타인 간격조절기능	ⓐ 565~700mm 조절가능 ⓑ 252~550mm 조절가능	ⓐ 565~700mm 조절가능 ⓑ 240~320mm 조절가능
회전기능	-	±90° (180°) 회전가능

(3) 설계 및 제작

(가) 상세설계 및 검증

○ 필요 사양 및 작업성능 확보를 위한 설계 수행

○ 공정회의, 자문회의를 통한 설계보완 및 검증 후 최종 도면 승인

(나) 제작 감독

○ TLV 제작

- 전문 제작감독업체인 '(사)한국철도차량엔지니어링'에서 설계 및 제작 감독 수행
- (1) 기본설계 검토, (2) 부품검사(21개 항목), (3) 공정검사, (4) 완성차 검사
- 제작 감독 수행후, **공인 '검사용역 증명서' 발행**
- 주기적인 공정회의로 공정 확인
- 월 1회 이상의 공정회의 및 **매주 공정보고 실시**

○ 탬핑유닛

- 승인된 설계에 따라 제작 및 공정확인



사단법인 한국철도차량엔지니어링
KOREA ROLLING STOCK TECHNICAL CORPORATION

검 사 용 역 증 명 서
(CERTIFICATE OF INSPECTION SERVICE)

발행번호 : RTC - 18 - 044 발행일자 : 2018. 8. 24.

발 주 자	:	한국철도기술연구원
사 용 자	:	한국철도기술연구원
공 급 자	:	주식회사 KCWI
제 작 자	:	주식회사 KCWI / 대동이엔티
계약번호	:	2917310-3000
조립및검사장소	:	주식회사 KCWI
검 사 기 간	:	2018. 4. 25 - 2018. 8. 24.

품명 및 규격	레도리드링 차량(TLV) / 발주자 승인 사양서
수 량	1량
비 고	제품 NO. : TLV-01

(4) 시운전 성능 검증

(가) TLV 성능검증

○ 완성차 검사 완료후, 시운전을 통한 성능검증 수행

- 과업지시서에서 제시한 사양을 기준으로 성능검증 수행

○ **1차 TLV 성능검증** (오송차량기지내)

- 검사보고서: 사양서 제시 기준 만족(기지내 제한속도 등의 제약으로 주행관련 시험 미미)

○ **2차 TLV 성능검증** (영동차량기지 및 인입선)

- 공정하고 합리적인 성능평가를 위해서 전문업체인 '(사)한국철도차량엔지니어링' 입회하에 시운전 성능검증 수행
- (1) 시운전 검사기준서 검토 및 승인, (2) 시운전 성능검증 수행, (3) 증명서 발급
- 자차 주행 및 제동시험, 작업주행시험

○ 자갈호퍼카와의 협동작업을 통한 시운전 성능검증

- 자갈호퍼카를 이용한 자갈포설 검증. 스크레이퍼, 컨베이어벨트 등 작업성능검증
- 개선사항: 자갈호퍼카 거치대 설치 필요



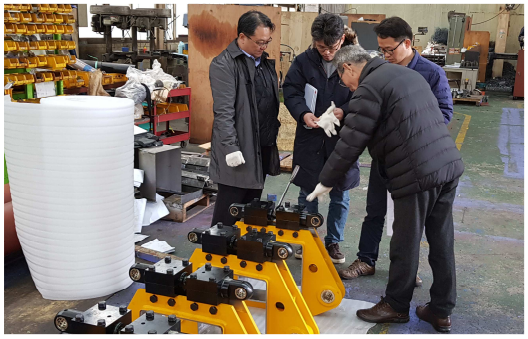


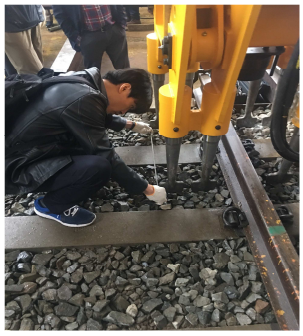
<TLV와 호퍼카 조합 시운전 성능>

(나) 탬핑유닛 성능검증

○ **제작 공장내 시운전 성능검증**

- 사양서 기준 적합성 검사 → 사양서에 제시된 기준 통과

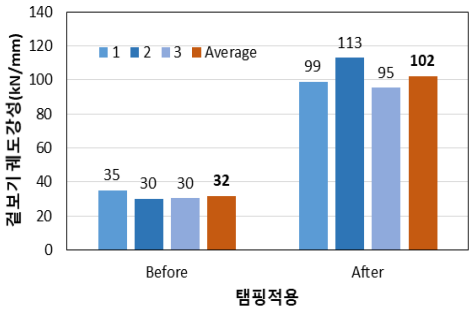




<공장내 시운전 성능 검사>

○ **1차 성능검증**: 자갈궤도 다짐 및 성능평가 (영동기지 내)

- 8두 탬핑유닛을 부착하여 자갈도상을 다질 수 있도록 침목교환장비를 개조
- 기본 작동시험: 진동(35Hz), 스퀴징 및 탬핑유닛 회전, 침목교환장비와의 호환성 검증
- 다짐도 약 3.2배(320%) 향상
- 개선사항: 유압모터 누유, by-pass 필요, 방진고무 개선 필요



○ **2차 성능검증**: 개선된 탬핑유닛 자갈궤도 다짐 및 성능평가 (영주역내 시공현장)

- 1차성능 검증시 도출된 개선사항 확인 및 추가 성능검증 수행
- 진동성능향상 및 유압모터 등의 누유 없음 확인
- 영주역 궤도 신설 작업자 의견: 시공현장에 간편한 다짐장비 필요
  - ‣ 내구성 및 작업 편의성 향상으로 상용화 가능

(5) 테스트-베드 시험시공을 통한 성능검증

○ 철도기술연구원 오송종합시험선로 급속경화궤도 테스트-베드 시험시공

○ 시험시공을 통한 시공속도 검증: 100m/day

-시공공정별 개별 검증 수행

○ TLV 시공속도 확인

- 자갈살포 주행 : **80m/h**
- 야간차단시간 2시간 작업시 **160m 작업가능**
- 거푸집과 부직포 설치 동시작업시에도 100m/day 가능




<시험시공을 통한 TLV 시공성 확인>

(6) 테스트베드 시험시공을 통한 개선(안)

번호	항 목	원 인	조치 및 향후 개선방안
1	타이탬핑유니트8두	펌프 및 방진고무 불량	-유압회로 변경, 방지우레탄교체
2	쇄정장치(안전장치)	누유등으로 주행중 구성품 낙하 가능	-기계적 고정장치 추가 설치
3	감속기 기어 마모	기어 작동속도가 느림	-기어 작동변 보완
4	급속 배기변 설치	피견인 시 제동 및 해방이 느리게 작동	-급속 배기변 설치
5	레일캐치 유압실린더	유압 실린더 누유	-유압 실린더 교체 및 누유부분 조임 필요
6	하구배 주행 성능 보완	하구배 주행 시 엔진브레이크 현상	-제동과 유압 배기변 추가 설치 및 시운전을 통한 보정
7	레일캐치 실린더 변위 조작	작업주행 능률 부족	-유량조절밸브 조정으로 미세조정가능하도록 보완
8	작업주행 원격 리모콘 추가 비치	조작 및 관리 부주의로 파손	-운행선상 작업시 파손을 대비한 추가 리모콘 필요
9	작업시 유압구성품별 작동불능 복구방안	유압장치가 선로와 저촉된 후 작동 불가	-추가 소형 유압펌프 배치 -유압장비 구동부에 유압주입구 설치

(7) 오송시험선 추가 시운전을 통한 개선사항 검증

○ 오송종합시험선로에서 TLV 추가 시험 주행으로 미세 튜닝 수행

○ 개선 사항

(i) 내리막 주행시 안전향상을 위한 개선

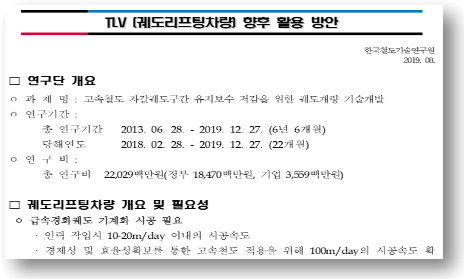
(ii) 주행조이스틱 및 계기판 개선

(iii) 누유 방지, 유압장치 낙하방지용 쇄정장치, 급속배기변 등




(8) 궤도리프팅차량(TLV) 향후 활용 방안

○ 철도기술연구원 오송종합시험선로에서 차량입환, 선로순회, 전차선 점검 등의 유지보수 차량으로 활용 예정 (철도연내 협의 완료)
○ 오송 시험선내 주박 (정거장 TS02)


TLV (궤도리프팅차량) 향후 활용 방안

한국철도기술연구원
2019. 08.

□ 연구단 개요
○ 과 제 명 : 고속철도 자갈궤도구간 유지보수 저감을 위한 궤도개량 기술개발
○ 연구기간 :
총 연구기간 2013. 06. 28. - 2019. 12. 27. (6년 6개월)
당해연도 2018. 02. 28. - 2019. 12. 27. (22개월)
○ 연 구 비 :
총 연구비 22,029백만원(정부 18,470백만원, 기업 3,559백만원)

□ 궤도리프팅차량 개요 및 필요성
○ 급속정회궤도 기계화 시공 필요
· 인력 작업시 10-20m/day 이내의 시공속도
· 경제성 및 효율성확보를 통한 고속철도 적용을 위해 100m/day의 시공속도 확

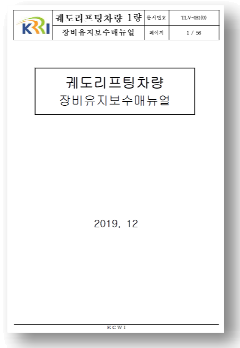
(9) 궤도리프팅차량 장비조작설명서 및 유지보수매뉴얼 작성

(가) 궤도리트팅차량 운전 및 작업취급 설명서

○ 운전취급설명서
○ 작업주행장치 Control 설명서
○ 레일리프팅장치 Control 설명서

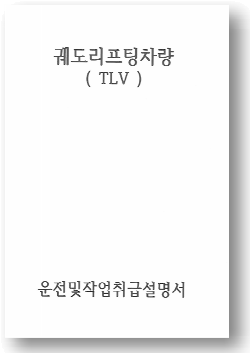
(나) 궤도리트팅차량 장비유지보수매뉴얼

○ 주요제원
○ 차체와 언더프레임
○ 대차(BOGIE)
○ 주요작업 장치
○ 보수점검정비
○ 급유
○ 동력전달장치)
○ 공기제동장치
○ 전기장치


궤도리프팅차량 1량
장비유지보수매뉴얼

궤도리프팅차량
장비유지보수매뉴얼

2019. 12


궤도리프팅차량
(TLV)

운전및작업취급설명서

라. 자갈궤도 상태평가 가이드라인 개발

(1) 자갈궤도 상태평가

(가) 개요

○ 궤도의 현상태에 따라서 본 연구단에서 개발하고 있는 침목구조 개량기술이나 급속경화기술을 이용한 개량이 합리적일 수 있음
○ 또한, 궤도 개량의 효과를 높이고 개량 후의 개량 효과를 정확히 평가하기 위해서는 테스트-베드 시험시공을 실시하기에 앞서 궤도 및 하부 노반의 상태(건전도)를 정확히 파악하는 것이 중요
○ 자갈궤도 유지관리지표로 사용되는 TQI(Track Quality Index)는 200m 구간에서 산정된 궤도틀림의 표준편차로 자갈궤도 상태를 평가
○ 궤도틀림은 복잡한 현상과 다양한 원인의 최종 결과로서 **원인 평가**를 통한 자갈궤도 유지관리 및 개량이 필요

○ 따라서 본 연구에서는 자갈궤도 거동에 가장 큰 **영향을 미치**는 **궤도강성**, **층두께와 파울링정도**, **자갈의 마모도** 3가지 요소를 정량적으로 평가하여 궤도의 상태를 나타내는 지표를 제안

○ 나아가서 상태평가를 위한 방법을 개발하여 **"자갈궤도 상태평가 가이드라인(안)"**을 제시하고자 함

(나) 궤도틀림 영향인자

① 궤도틀림 메카니즘

○ 자갈궤도는 변형을 허용하는 구조로 궤도틀림이 불가피. 궤도 틀림은 자갈도상과 하부노반의 침하가 주요한 원인으로 알려짐

○ 침하(궤도틀림)을 일으키는 하중과 이에 저항하는 요인으로 나눌 수 있으며, 본 연구에서는 자갈도상의 상태평가를 위해서 침하에 저항하는 요인들에 초점을 둠

○ **하중**: 열차 정하중, 동적 충격하중(←레일손상, 궤도강성차, 레일용접부, 분기기 등)

○ **저항**: 자갈도상의 강성, 자갈마모도, 분니(파울링정도), 노반상태(지지력, 침하가능성) 등



<자갈궤도 궤도틀림 요인 및 분니에 의한 mud pumping>

② 궤도강성(Ballast Track Stiffness)

○ 각 구성품의 강성으로부터 궤도강성을 계산하여 궤도강성이 균질하게 되도록 설계

○ 현재 우리나라에서는 시공중이나 운영중에 궤도의 강성을 측정할 수 있는 장비가 없고 이에 대한 연구가 사실상 진행되지 않고 있음

○ 현재 유지관리방법은 뜬침목봉을 이용하여 수작업으로 확인하는 방법으로 뜬침목을 찾기는 하지만 정량적인 강성을 평가할 수는 없음

○ 본 연구에서는 소형동평판재하시험기를 이용하여 자갈궤도의 겉보기 강성을 정량적으로 평가하고자 연구를 진행하였음

③ 도상층두께와 파울링층의 두께(또는 파울링정도)

○ 자갈도상층의 두께는 하부노반의 상태를 간접적으로 나타내는 지표이며, 동시에 자갈궤도의 강성과 관계

○ 하부노반이 연약한 경우, 지속적인 침하가 발생하여 침하된 만큼 자갈을 보충하기 때문에 도상의 두께가 두꺼워지기 때문에 상대적으로 두꺼운 자갈층은 자갈궤도의 상태가 양호하지 못함을 의미함

○반복 열차하중과 장비・인력 다짐에 의한 자갈입자의 파쇄・파모에 의해 발생한 세립분이 도상하부에 쌓이는 파울링도 자갈도상 열화의 큰 원인으로 지적됨
○본 연구에서는 GPR(Ground Penetration Radar)를 이용하여 자갈궤도 도상층두계와 파울링층의 두께를 측정하는 연구를 진행하였음

④ 자갈 마모도

○자갈의 마모는 마찰각을 작게하여 억물림효과를 저하시켜 결과적으로 열차하중에 대한 저항력이 적어져 침하가 크게 발생하게 됨
○철도공사 유지관리 담당자의 경험에 의하면 유지보수주기가 짧은 개소의 자갈은 마모가 심각한 것으로 나타났음
○이미지분석 기법의 발달로 현장 자갈에 대한 이미지분석을 통해 자갈입자의 마모도를 정량적으로 평가할 수 있을 것으로 기대됨

(다) 경부고속철도 자갈궤도구간의 유지관리 특성기반 상태평가기준지표 산정

① 건설 기준

○경부고속철도 자갈궤도구간(1단계)는 하부노반, 상부노반(3.0m), 강화노반(40cm, 입도조정쇄석층) 위에 자갈도상이 건설됨
- 교량: 콘크리트 상판위에 고무매트를 설치하고 자갈도상 부설
- 터널: 콘크리트슬라브 위에 가잘도상 부설 (터널구간은 대부분 암반임)

○자갈도상 하부 지지층이 견고하게 건설되었으며, 토공구간은 건설 및 개통(2004년) 이후 15년이상 경과하여 안정화되었다고 판단할 수 있음

② 유지관리 특성분석 및 상태평가 지표개발의 한계

○자갈궤도 선로유지관리 기본 개념
- 궤도틀림(또는 TQI)이 보수한계치에 도달하면 유지보수 시행
- 점진적인 궤도틀림 발생시 궤도틀림을 예측해서 예방적인 유지보수 가능

○경부고속철도 자갈궤도 유지관리 현황
- 양호구간: 통과톤수 증가에 따라 점진적으로 TQI 증가
- 불량구간: TQI를 일정한 수준으로 유지하기 위해 잦은 유지보수, 필요시 2종작업
- **궤도상태지표**: 일반적으로 궤도틀림이나 TQI를 궤도상태지표로 널리 활용하나 경부고속선 자갈궤도구간은 유지보수로 궤도틀림 개선

→ 궤도상태평가 기준 지표로서 **궤도틀림(TQI)**과 **유지보수지표**를 동시에 참고

(2) 자갈궤도 침하모델 개발

(가) 개요 및 침하모델의 필요성

① 필요성

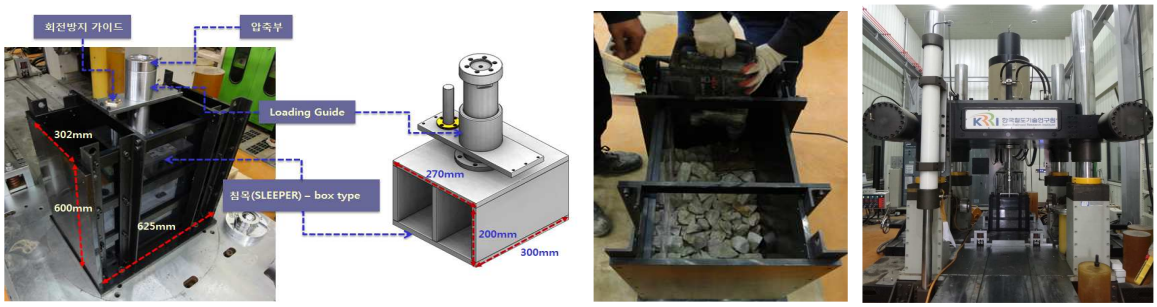
○궤도틀림: 현방식으로 측정되는 궤도(레일)의 부등침하량으로 정의
○궤도틀림 원인규명과 메카니즘을 이해하고, 이를 바탕으로 유지관리에 적용하기 위해서 침하모델 개발 필요

(나) 침하모델 개발

① 실험체 구성 (실내 자갈박스 시험)

○ 고속선에서 사용되는 자갈을 3층 다짐하여 반복재하시험 수행

○ 하중, 입도분포, 분니(파울링) 및 함수비 조건에서 실험을 수행하여 재하횟수에 따른 침하량을 측정



<실내자갈박스 및 대형압축시험기>

<반복재하 재료 및 실험 조건>

실험유형	하중 (kN)	실험조건 (하중재하)	자갈재료 조건	비고
소형자갈박스	20, 40, 60	스틸박스	새자갈	
대형자갈박스	60	일반침목, 광폭침목		
	20	I/B 침목		
	20	세립분 30%	분니조건	
	20	세립분 30% +함수비 15%		
대형삼축 압축시험 (직경 30cm)	축차응력: 330kPa 구속압: 60kPa	마모도에 따른 침하거동 다짐도(16kN/m^3)	자갈마모 (LA 0, 500, 1000, 1500, 2000회 마모)	

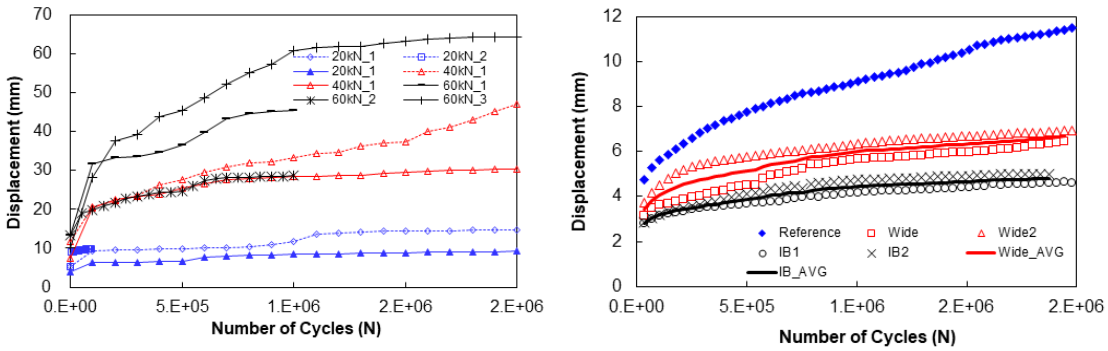
② 실험결과 및 분석으로 기본침하모델 제시

○ 하중에 따라 침하량 증가, 침목형식(도상압력)에 따라서도 침하량 다소 변동

○ 분니와 함수비에 따른 실험에서는 뚜렷한 경향이 나타나지 않음(실내실험의 한계)

○ 기본침하모델 제시

- 초기에는 빠르게 증가하다가 수렴하는 양상 → 초기=log 함수, 중장기=선형함수
- 기본모델: $\epsilon_p = \epsilon_1(N + \alpha \log(N))$
- 모델파라미터인 ϵ_1, α를 영향인자의 함수로 표현



<영구변형(침하량) vs. 재하횟수(N): (a)소형자갈박스, (b)대형자갈박스>

③ 영향인자를 고려한 침하모델 개발

㉮ 하중영향

○ **탄성변형량**: 각각의 실험에서 반복재하횟수에 관계없이 일정한 값으로 나타남

- 탄성변형량: 한주기의 최고와 최저하중사이의 변형량으로 정의됨
- $\epsilon_1 = fn(\delta_e)$ (δ_e=탄성변형량, elastic deformation of ballast)
- 자갈박스실험으로 영향깊이(L) 산정이 곤란하여 변형률 대신 탄성변형량을 그대로 적용

㉯ 자갈마모도 영향

○ 대형삼축압축시험 결과, 마모도가 증가할수록 침하량 증가

○ 자갈박스실험: 마모되지 않은 자갈로 실험하여 침하모델 개발

○ 도상자갈이 마모됨에 따라 아래와 같이 기하급수적으로 침하발생 증가

- 새자갈 침하량기준으로 정규화하여 이를 침하모델의 **보정함수**로 적용

㉰ 침하모델 제시

○ 최종 침하모델은 아래와 같은 형태로 제시될 수 있음

$$\epsilon_p = \left(\gamma_1 m_r^{\gamma_2}\right)\left(\beta_1 \delta_e^{\beta_2}\right)(N+\alpha\log(N))$$
$$= \left(\gamma_1 m_r^{\gamma_2}\right)\left(\beta_1 (\frac{P}{k_b})^{\beta_2}\right)(N+\alpha\log(N))$$

여기서, $\alpha = constant$ $(1{,}000{,}000)$, $\beta_1 = 1.525 \times 10^{-8}$, $\beta_2 = 1.819$, $\gamma_1 = 1.0101$, $\gamma_2 = 0.074$,

m_r = abrasion loss(마모도), P= ballast pressure, k_b = ballast stiffness, N=통과톤수

○ 해외 자갈궤도 침하모델에서도 알 수 있듯이, 다양한 요인에 의해서 자갈궤도의 침하가 발생함. 따라서 정확한 침하예측은 현재로서는 어려움이 있음

○ 잦은 유지보수로 말미암아 침하모델의 현장검증이 현실적으로 어려움

○ 자갈도상의 침하 영향인자

- 도상압력(하중), 자갈도상의 **강성**, **통과톤수**, **자갈마모도,** 자갈도상의 두께

○ 아래의 영향인자로서 자갈궤도 침하예측 가능. 이로부터 자갈궤도의 침하 예측

- 침하량 = 영구변형률 × 도상층 두께
- **도상강성**, 통과톤수, **자갈마모도**, **도상층의 두께**, 열차하중(도상압력)

→ 주요 영향인자에 대한 상태평가 기법 개발에 초점

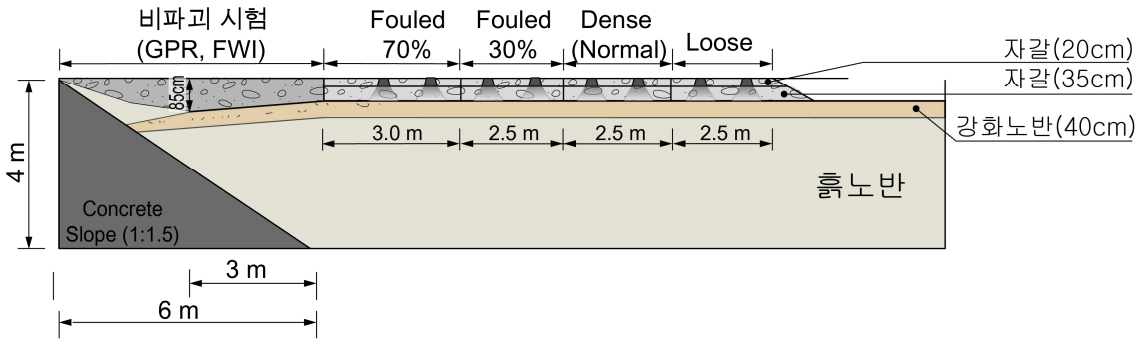
(다) 실대형 실험을 통한 침하모델 검증

① 실험체 조성 및 실험 조건

○ 운영중인 고속선의 자갈궤도와 유사한 자갈층 조성후 반복하중에 따른 침하량 측정

○ 4가지 다른 조건으로 실험체를 조성하여 반복재하시험 수행

○ 정적하중과 동적반복하중실험을 실시. 반복하중의 주파수는 5Hz, 100만회 이상 실시



<실내형 실험체 조성 단면>

② 실험결과

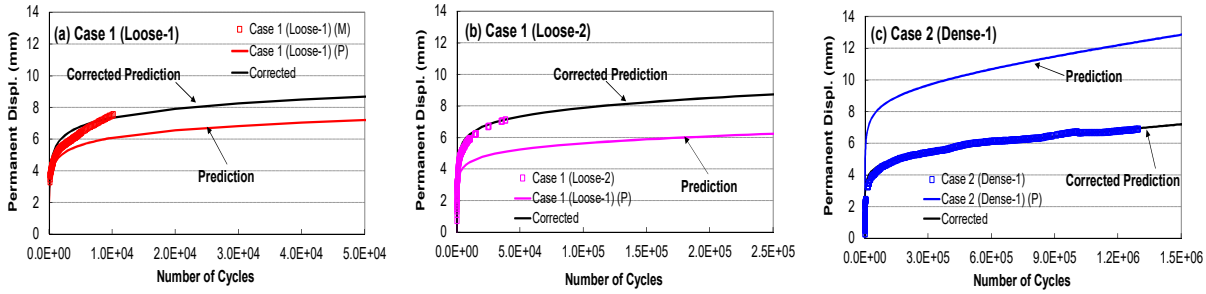
○ 다짐정도에 따라 침하량 차이 발생

○ 침하량의 대부분은 초기에 주로 발생하고 이후 침하 증가량은 일정

③ 침하모델의 검증

○ 실대형 실험결과를 침하모델로 유사하게 예측할 수 있음. 일부 경우에 대해서는 오차가 발생. 이는 실험 초기 조건(다짐도 등)이나 예비 정재하 실험 등의 영향으로 사료됨

○ 수정계수를 곱하여 침하량을 수정한 결과, 초기침하량 뿐만 아니라 장기거동 또한 정확하게 예측. 수정계수를 다짐도의 함수 등으로 나타내는 작업 필요



<실대형실험 침하예측 결과>

(라) 경부선(일반선) 계측을 통한 침하모델 검증

○ 실내 박스테스트로부터 제안한 모델을 현장 계측 침하량과 비교하여 검증하고 보다 정확한 침하량 예측을 위한 개선안 제시

○ 운영중인 호남선, 경부선, 충북선을 대상으로 계측. 개통후 충분한 시간이 지났으므로 하부지반의 침하는 없는 것으로 가정

① 현장 계측

○ 2종작업(자갈치환) 직후부터 침하(침목 수직 변위) 계측을 실시

○ 측정위치 : 경부선(부강역, 내판역), 충북선(오근장역 부근), 호남선(정읍역 부근)

○ 측정방법 : 주기적인 레벨측량으로 침하량 산정

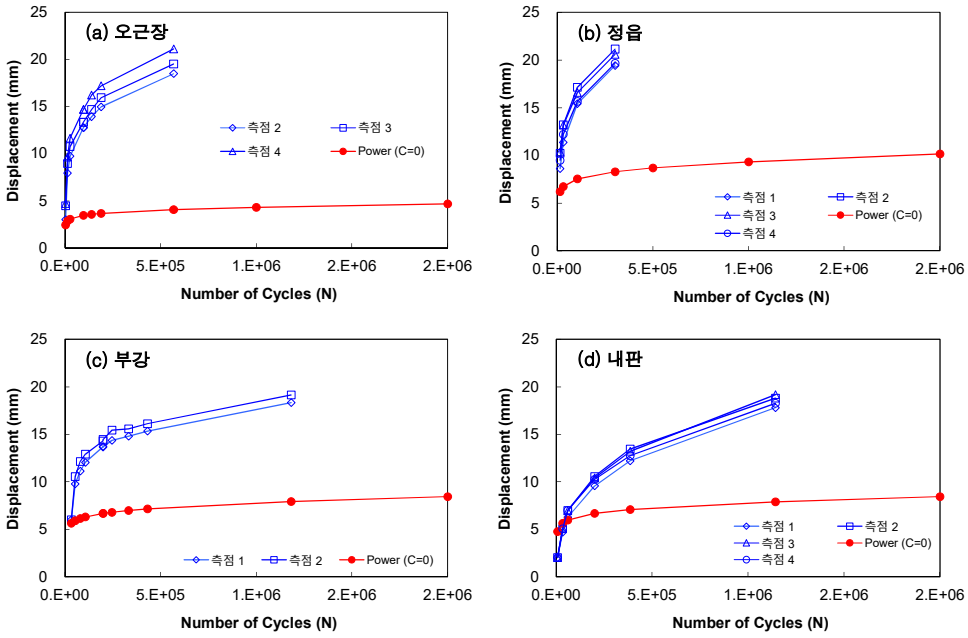
② 침하량 예측

○ 실내시험으로 제시한 침하모델로 예측한 침하량이 측정치보다 작게 평가됨

○ 이는 실내시험의 경계조건, 즉 실내시험에서 구속압이 현장보다 커 이로인한 영향으로

예측치가 작은 것으로 사료됨

○ 또한, 초기 다짐도 또한 중요한 영향인자라고 사료됨. 실내실험의 경우, 다짐기를 이용하여 층별로 다짐을 수행한 반면, 운영중인 선로는 선로다짐장비(MTT, DTS 등)에 의하여 다져짐. 따라서 현장의 초기 다짐도는 실내시험보다 느슨할 것으로 추정됨



<침하량 예측값과 현장 측정값의 비교>

③ 보정기법 제안

○ 실내실험과 현장조건의 차이를 보정(전달함수)하여 침하량 예측의 정확도를 향상하고자 함

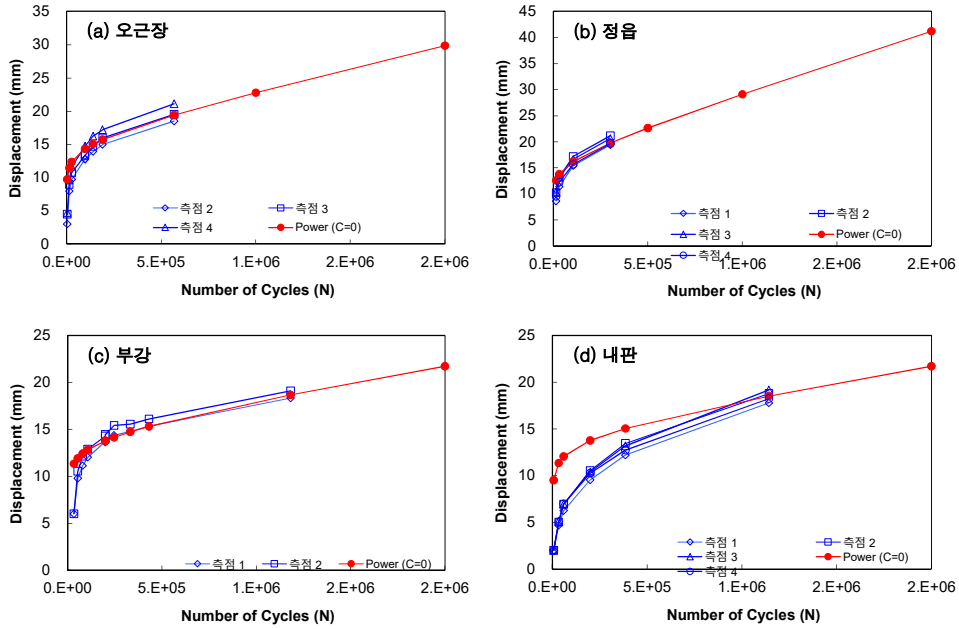
○ 적용된 침하모델 : 강성측정, 마모도의 측정이 곤란하여 초기 침하모델을 적용

$$\epsilon_p = a\log(N) + bN \quad \text{(수정로그모델)}$$

○ 각각의 모델계수(*a*, *b*)에 대하여 보정을 실시

- 비교적 정확하게 침하량을 예측
- *a*는 초기거동, *b*는 장기거동에 관여하기 때문에 초기와 장기 거동을 평가가능
- 오근장역의 초기다짐상태가 다른 역보다 불량하다고 할 수 있음. 정읍역, 부강역, 내판역의 경우는 비슷한 정도의 초기다짐을 수행했다고도 할 수 있음. 부강역과 내판역은 약 5km정도 이격되어있으므로 이러한 가설을 뒷받침함
- 장기침하(모델계수 b)에 대한 보정에 있어서도 오근장역부근의 자갈궤도는 장기침하에도 취약할 것으로 사료됨. 장기거동 보정계수가 상당히 크게 나타남. 이는 앞에서 언급한 것과 같이 실내실험의 경계조건, 구속압 등의 차이에 따른 것으로 사료됨

○ 대형 박스테스트결과와를 활용하여 보정(전달함수) 제안



<각 모델계수에 각기 다른 보정계수 적용>

<소형 및 대형 박스테스트 결과를 활용한 현장 침하량 예측을 위한 보정계수>

계측지점	소형박스테스트 결과 활용		중형 박스테스트 결과 활용	
	a에 적용 (초기침하 보정)	b에 적용 (장기침하 보정)	a에 적용 (초기침하 보정)	b에 적용 (장기침하 보정)
오근장	4	40	4	25
정읍	2	30	2	8
부강	2	10	2	2
내판	2	10	1.4	6

(마) DEM에 의한 자갈도상 거동 검토

① Discrete Element Method(DEM) 개요

○ DEM이란 다수의 작은 입자들의 운동 및 상호영향을 계산하여 시스템의 거동을 해석하는 수치해석법

○ 자갈도상의 자갈입자는 개별적으로 거동하기 때문에 FEM 해석으로 거동을 평가하기보다는 DEM으로 자갈입자를 개별적으로 모사하여 반복적으로 작용하는 열차하중에 따른 자갈도상의 거동을 평가하는 것이 적절하다고 할 수 있음

② 현장 자갈궤도 침하 거동 평가를 위한 최적 모델링

○ 자갈궤도 DEM 모델링 기초연구를 통해 자갈 물성치와 입도분포, 형상 등을 결정

○ 반복하중 재하시 강성이 수렴하는 것을 확인

○ 가진주파수가 10Hz와 20Hz인 경우 큰 차이가 없기 때문에 해석시간 단축을 위해 20Hz로 결정. 30Hz이상인 경우 실제 열차하중과 다른 조건이라 고려하지 않음

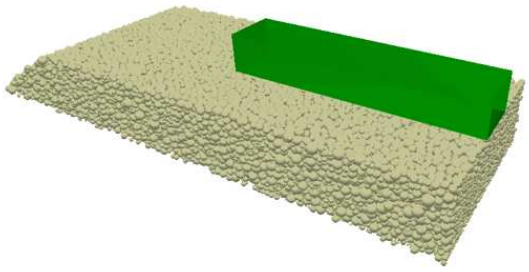
○ Sampling time은 시뮬레이션 결과 최소 0.05초로 산출

구분	물성치	값	출처
고체요소	Poisson’s Ratio	0.4	가정
	Solids Density	2661 kg/m3	실내시험
	Shear Modulus	3.9 GPa	문헌
Interaction	Bulk density	17 KN/m3	실내시험
	Restitution	0.4	Calibration
	Static Friction	0.6	Calibration
	Rolling Friction	0.2	Calibration

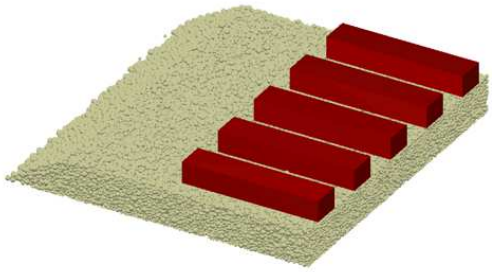
<자갈 물성치>

입자크기 (mm)	비율
50	20.0%
40	32.5%
31.5	27.5%
22.4	17.5%
10	2.5%

<자갈 입도분포>



<단일침목>



<5개 침목>

<DEM 해석에 사용된 침목 개수>

③ 침목지지상태에 따른 자갈 침하거동 평가

○ 단일침목인 경우와 5개 침목이 놓여있는 경우로 구분해서 열차에 의한 반복하중이 작용할 때 자갈도상의 침하거동 평가

- 가진하중의 크기에 비례하여 침하량 증가
- 가진하중의 크기에 비례하여 침목 직하부 공극률 변화량 증가
- 가진하중이 클수록 강성도 증가하지만, 반복 싸이클이 커질수록 가진하중 크기에 상관없이 특정값으로 수렴하는 경향

○ 5개 침목의 경우, 가운데 침목을 뜬 침목으로 모델링

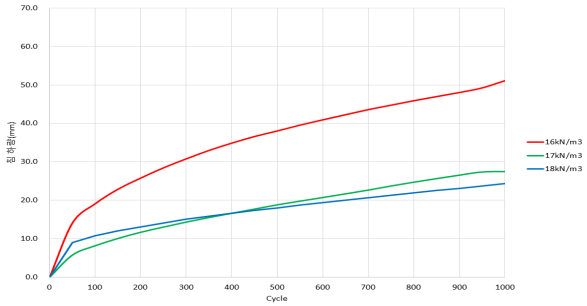
④ 자갈도상 상태변화에 따른 장기 침하거동 분석

○ 자갈 마모도에 따른 거동을 분석하기 위해 5개 침목 중 가운데 침목 하단에 위치한 자갈 입자의 회전마찰계수를 기존의 0.2에서 0.15, 0.1로 변화시키며 해석

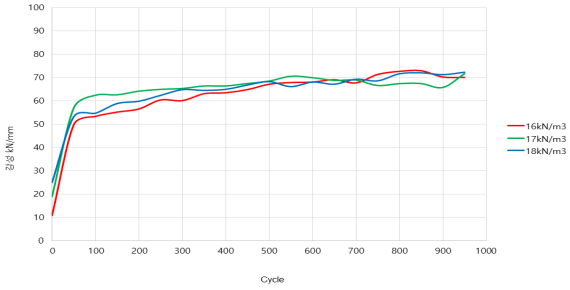
- 해석결과 마모에 의해 침하량이 더 진전되는 것으로 나타남

○ 자갈치환에 의한 변화하는 물성치를 모사하기 위하여 자갈입자 다짐하중의 크기를 16, 17, 18 kN/m^{3}으로 변화시키며 해석

- 자갈 다짐하중 크기와 침하량은 반비례하는 경향
- 강성의 경우, 다짐하중 크기와 상관없이 특정값으로 수렴하는데 가진하중 크기와 연관된 것으로 나타남



<다짐하중 크기에 따른 침하량>



<다짐하중 크기에 따른 강성>

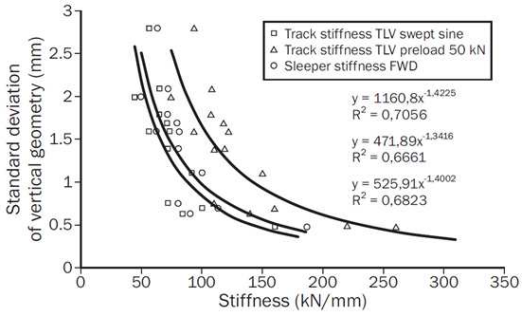
(3) 궤도강성을 이용한 자갈궤도 상태평가

(가) 궤도강성의 중요성

○ 궤도 강성은 궤도설계와 거동에 있어 중요한 인자로, 궤도강성을 일정하게 유지하도록 설계시 궤도 구성품의 강성을 설정(KR C-14030). 측정장비가 없어 활용되지 못함

○ Hunt(2000)는 자갈궤도강성과 유지관리지표인 궤도틀림 표준편차(TQI)와의 상관관계를 제시. 궤도강성이 클수록 궤도틀림은 지수함수적으로 감소함

○ 국내에서는 김대상 등(2008)의 연구 외에는 궤도강성에 대한 연구 없음



<Relationship between track irregularity and track stiffness (Hunt 2000)>

(나) 소형 동평판재하시험기 (Light Weight Deflectometer, LWD)

○ LWD(Light Weight Deflectormeter)는 지반의 강성을 측정할 수 있는 장비로써 비파괴 실험 장비로 도로의 강성과 지층구조를 확인하기 위하여 사용되는 FWD(Falling Weight Deflectometer)의 휴대용 장비

○ 일정 무게의 추를 정해진 높이에서 떨어드려 지반, 자갈, 침목 등의 대상체에 충격하중을 가하고, 이 때 발생하는 변위를 측정하는 장비



(a) LWD 장비 개요도



(b) 현장실험

(다) 겉보기강성의 정의

○ LWD로 측정된 하중과 변위의 최대값의 비를 겉보기강성(Apparent Stiffness)으로 정의

$$k = P_{max}/\delta_{max}$$

여기에서 P_{max} = LWD의 최대하중(kN)

δ_{max} = 측정된 최대변위(mm)

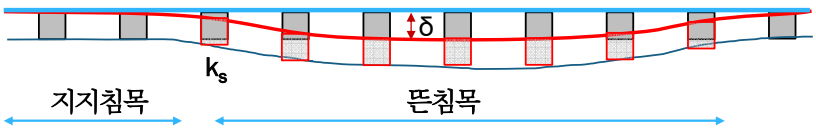
k = 강성 (kN/mm).

○ 운영중인 자갈궤도에는 그림과 같이 지지침목과 뜬침목이 존재함

○ 지지침목: 자갈도상과 침목이 잘 접촉되어 도상의 지지를 충분히 받는 침목으로 LWD로 강성을 측정할 경우 하부지반 강성, 자갈도상 강성, 레일의 휨강성이 모두 측정됨

○ 뜬침목: 자갈도상과 침목사이에 빈공간이 존재하는 침목으로 지지침목에 비해 변형이 크게 발생함. LWD로 강성을 측정할 경우 하부지반과 자갈도상의 강성이 정확하게 측정되지 않기 때문에 지지침목에 비해 강성이 작게 계산됨

○ 따라서 뜬침목에서 측정된 강성은 궤도강성과는 다른 의미이기 때문에 LWD로 측정된 강성을 **겉보기강성**으로 정의하였음



<운영중인 자갈궤도에서 침목과 자갈도상 상태>

(마) 현장실험을 통한 궤도강성 평가

① 현장실험 현황

○ 고속선

연차	횟수	계측일자	구 간 명	구조물 구분	위치
4차년도	4	17.03.07~17.04.07	산동3교	교량-토공	T1 092k050-092k340
			용와터널~산동1교	터널-토공-교량	T2 089k200-089k580
			설계교	교량-토공	T1 195k240-195k510 T2 195k240-195k530
5차년도	13	17.06.23~17.12.27	팔곡고가-반월터널	교량-토공-터널	T1 035k850-036k415
			평택고가	교량-토공	T1 075k050-075k272
			배방교	교량	T1 097k000-097k800
			팽성2고가-운용1고가	토공-교량	T1 077k740-078k530
			갈항고가-금오터널	교량-토공-터널	T2 241k200-241k600
			대전남연결선	곡선부	T2 151k000-152k000
			신정교-운주터널	교량-토공-터널	T1 111k750-112k050
			서봉제2터널	터널	T1 053k250-054k350
6차년도	15	18.04.13~19.04.28	신휴고가	교량	T2 085k400-085k640
			고등터널	토공-터널	T1 107k300-107k600
			갈항고가-금오터널	터널	T2 241k200-241k600
			풍세교시점	토공	T2 099k600-099k635
			용와터널	터널-토공	T1 089k200-089k350
			팽성1고가	토공-교량	T2 075k490-076k690
			원동교-금강교	토공-교량	T1 183k120-183k509
			풍세교종점	교량-토공	T1 107k032-108k479
			대전북연결선	교량	T1 153k950-154k265

○ 일반선

연차	횟수	계측일자	구 간 명	구조물 구분	비고
4차년도	1	16.11.01	백원역	토공	
5차년도	6	17.04.20~18.02.07	지천역	토공	2세부 개량침목
6차년도	2	18.07.02~18.11.13	(서대구역 예정지)		테스트베드 구간

○ 시험선

연차	횟수	계측일자	구 간 명	구조물 구분	비고
6차년도	6	19.07.17~19.09.09	오송시험선 (시험4터널 종점부)	터널-토공	3세부 급속경화궤도 테스트베드 구간

② 현장실험 결과 분석

○ 총 13,191개의 침목에 대해서 LWD 시험을 수행후 분석

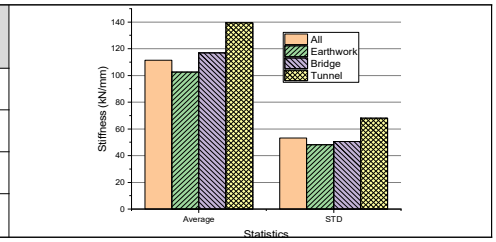
○ 하부구조에 따른 겉보기강성 분포 특성

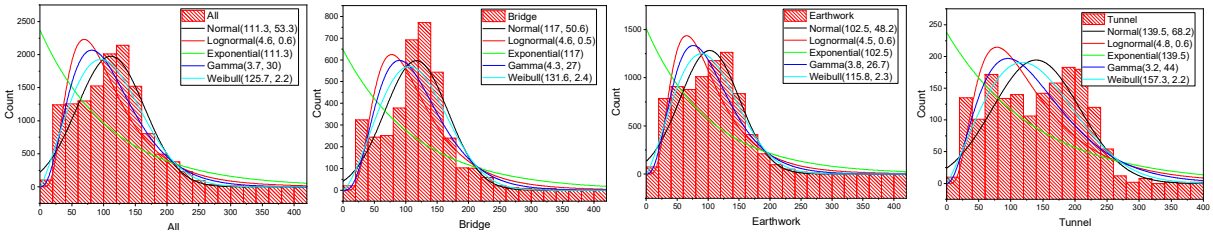
- 평균 겉보기 궤도강성 : **터널 > 교량 > 토공**
- 하부구조물의 강성에 따라서 평균 겉보기 궤도강성이 분포

→ 하부구조물까지 LWD 영향범위에 포함됨

○ 전반적으로 정규분포를 나타내나, 뜬침목으로 분류될 수 있는 50 kN/mm 정도의 겉보기 강성 영역에서 다소 침목수 증가

Structures	Stiffness (kN/mm)		침목 갯수
	Average	STD	
All (HSR only)	111.34	53.28	13,191
Bridge	116.97	50.64	3,785
Tunnel	139.50	68.14	1,661
Earthwork	102.55	48.19	7,745



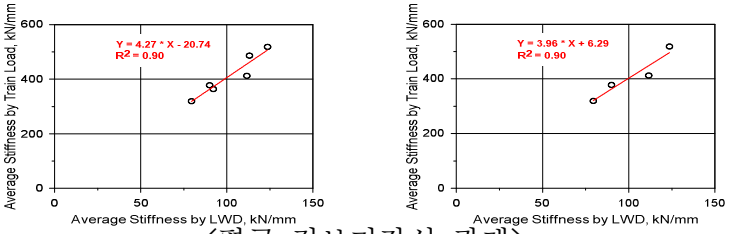


<겉보기 궤도강성 분포>

③ 하중크기에 따른 겉보기 궤도강성

○ 하중크기가 겉보기강성에 미치는 영향

- LWD하중(10kN)과 열차하중(윤중, 80kN)에서의 겉보기 궤도강성 사이의 상관관계
- **열차하중수준**에서의 **궤도강성**과 LWD로 측정한 **겉보기 궤도강성**은 하부구조, 계측지점에 따라 다소 차이가 있지만 **일정한 상관관계가 있음**



<평균 겉보기강성 관계>

(바) 자갈궤도 상태와 겉보기 궤도강성

① 겉보기 궤도강성과 궤도틀림과의 관계

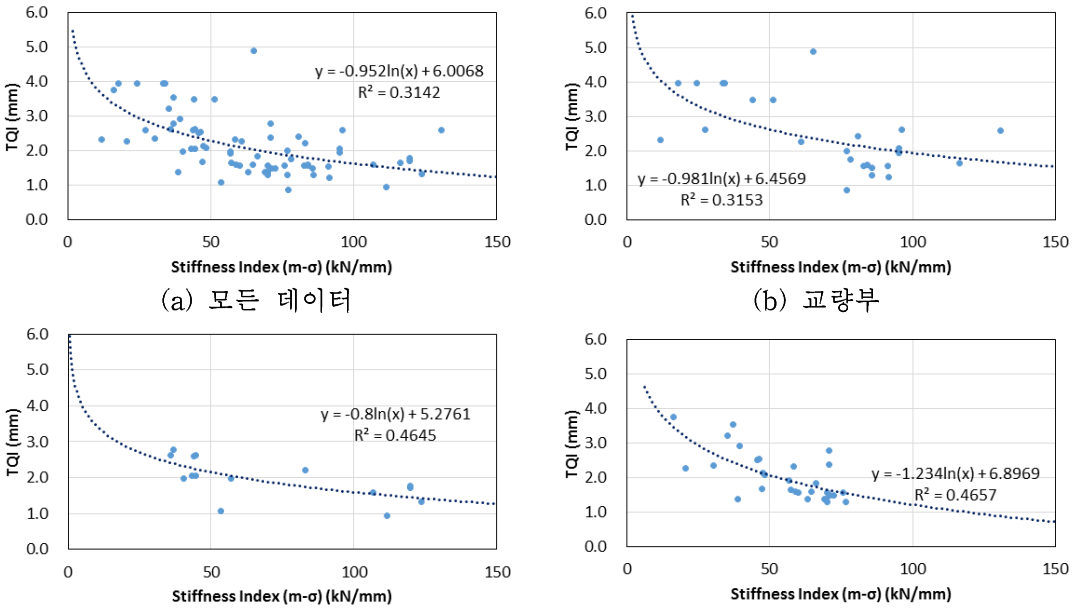
○ 궤도틀림(TQI) vs 겉보기 궤도강성

- **궤도강성지수**: 궤도 상태는 겉보기 궤도강성 평균이 작고, 표준편차가 클수록 불량하다고 판단할 수 있음. 따라서 평균과 표준편차의 영향을 모두 고려하여 궤도 상태를 표현하기 위해 ***궤도강성의 평균과 표준편차의 차($m-\sigma$)***로 정의된 궤도강성지수 제안

<궤도틀림과 궤도강성지수의 관계>

구분	겉보기 궤도강성		Stiffness Index
	평균, m (↑)	표준편차, σ (↓)	
궤도틀림	감소(↓)	감소(↓)	$m+(-\sigma)$

- 하부구조별로 구분하여 상관관계를 파악하는 것이 보다더 합리적인 것으로 나타났음
- 궤도강성 평균보다 궤도강성지수와의 상관성이 더 큰 것으로 나타났음



(a) 모든 데이터 (b) 교량부

(c) 터널부 (d) 토공부

<TQI와 겉보기 궤도강성지수와의 관계>

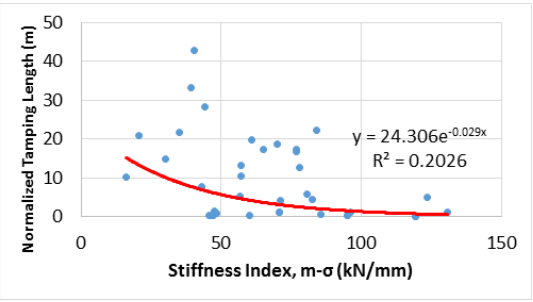
② 겉보기 궤도강성과 유지보수이력과의 관계

○ 유지보수이력 분석

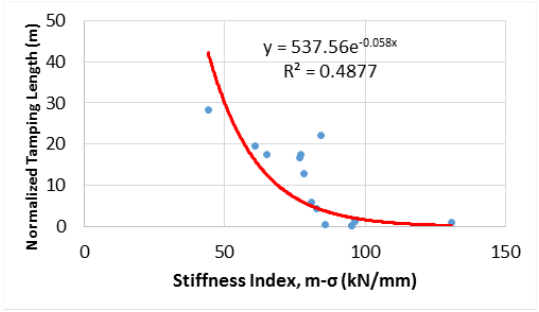
- 유지보수이력인 누적탬핑연장(2011-2018)과 겉보기 궤도강성 사이의 상관관계 분석
- LWD 측정구간 길이와 유지보수이력 기간이 구간별로 상이하기 때문에 누적탬핑연장을 측정구간 길이와 기간으로 나눠서 정규화한 후 분석

○ TQI 분석과 마찬가지로 궤도강성지수와의 상관성이 더 큰 것으로 나타났음

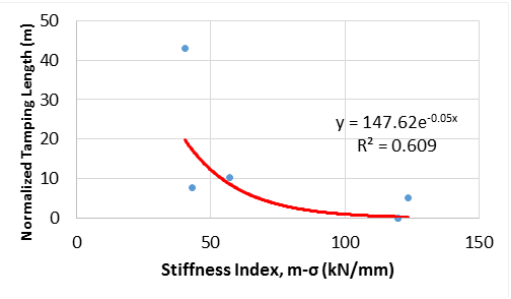
○ 궤도강성지수와 유지보수이력과도 상관성이 비교적 높게 나타남 → 지표로 활용 가능



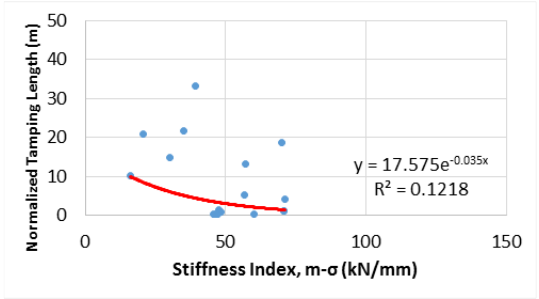
(a) 모든 데이터



(b) 교량부



(c) 터널부



(d) 토공부

<누적탬핑연장과 겉보기 궤도강성과의 관계>

(사) 겉보기 궤도강성 기반 자갈궤도 상태평가 가이드라인

○ 궤도강성지수를 기반으로 자갈궤도 상태평가 가이드라인 제안

○ 선로유지관리지침의 TQI 기준을 근거로 궤도 상태를 5단계로 구분하고 각 단계별 궤도강성지수를 아래와 같이 제안

- 매우 좋음: 준공기준에 해당하는 단계로 부설당시의 상태를 계속 유지하고 있다는 것은 궤도 상태가 매우 좋다는 것을 의미
- 좋음: 목표기준에 해당하는 단계로 유지보수작업 후 요구되는 기준이기 때문에 궤도 상태가 좋음을 의미
- 보통: 중간단계의 궤도 상태
- 불량: 주의기준에 근접한 상태로 지속적인 상태파악이 필요한 단계
- 매우 불량: 주의기준에 해당하는 단계로 궤도상태가 매우 불량하여 즉시 특별한 조치가 필요한 상태
- 장점: 정량적인 지표를 이용하여 궤도 상태를 객관적으로 나타낼 수 있음
- 단점: 평균과 표준편차를 동시에 고려한 지표이기 때문에 현장에서 바로 적용하기에는 어려움이 존재

<궤도강성지수에 따른 궤도상태 구분>

선로유지관리지침 관리단계	TQI	궤도강성지수(kN/mm)			궤도상태
		교량	터널	토공	
준공기준	1.3	184	137	90	매우 좋음
목표기준	1.7	128	87	67	좋음
(목표+주의)/2	2.2	81	50	47	보통
-	2.6	51	28	33	불량
주의기준	2.6 이상	51이하	28이하	33이하	매우 불량

○ TQI와의 상관성은 궤도강성지수가 더 크지만, 궤도강성지수는 평균과 표준편차를 동시에 고려한 지표이기 때문에 실제 현장에서 바로 적용하기에는 어려움이 존재. 따라서 현장적용성을 고려한 대안으로 궤도 상태별 평균 겉보기강성도 아래와 같이 제시하여 보조적인 기준으로 사용할 수 있음

<평균 겉보기강성에 따른 궤도상태 구분>

선로유지관리지침 관리단계	TQI	평균 겉보기강성(kN/mm)			궤도상태
		교량	터널	토공	
준공기준	1.3	181	200	90	매우 좋음
목표기준	1.7	153	151	67	좋음
(목표+주의)/2	2.2	124	107	47	보통
-	2.6	100	75	33	불량
주의기준	2.6 이상	100이하	75이하	33이하	매우 불량

○ 추가 현장 실험을 통해 제안된 **상태평가 가이드라인 검증**

- 해당구간 TQI는 2018년 6월 검측데이터를 기반으로 계산
- 토공부의 경우 검증실험을 실시한 두 군데 모두 궤도강성지수에 기반한 궤도상태와 TQI에 기반한 궤도상태가 일치
- 교량부의 경우 궤도강성지수에 기반한 궤도상태평가가 TQI에 기반한 궤도상태평가에 비해 과소평가하는 것으로 나타났는데 궤도상태가 상대적으로 안좋은 교량접속부가 포함되어 나타난 현상으로 추정됨

<상태평가 가이드라인 검증>

계측일	위치	구조물	겉보기강성(kN/mm)		궤도강성지수 (kN/mm)	TQI	궤도상태	
			평균	표준편차			궤도강성지수	TQI
2019/12/02	081k580~729	토공	93	56	37	2.4	불량	불량
2019/12/04	086k440~731	토공	100	39	60	2.2	보통	보통
2019/12/12	100k240~389	교량	114	53	60	1.7	불량	좋음

(아) Loose Sleeper Profiler(LSP)에 의한 동적강성 평가

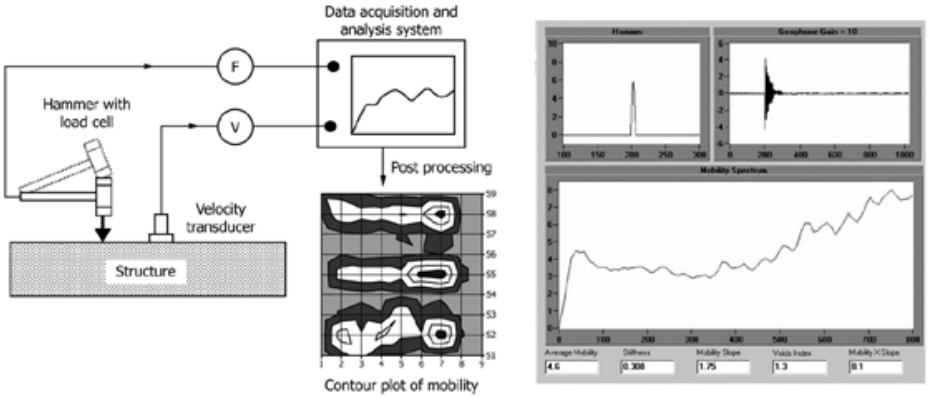
① LSP 기법 개요

○ 대상 구조물에 충격을 가하고 이에 대한 동적응답을 측정하여 콘크리트 침목의 동적강성을 측정하기 위하여 개발된 기법

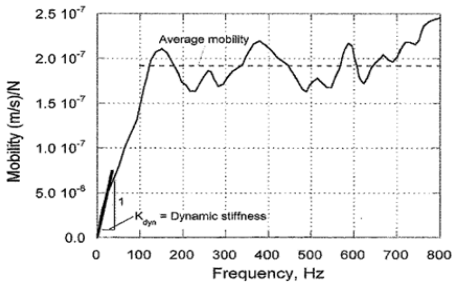
○ 모빌리티 함수(Mobility Function, H(f)): 지오폰 센서를 통해 측정된 응답속도함수(V(t))와 해머의 충격으로부터 구한 하중함수(F(t))를 함께 FFT(Fast Fourier Transform)하여 계산

$$H(f) = \frac{V(f)}{F(f)} = \frac{V(f)}{m\,A(f)}$$

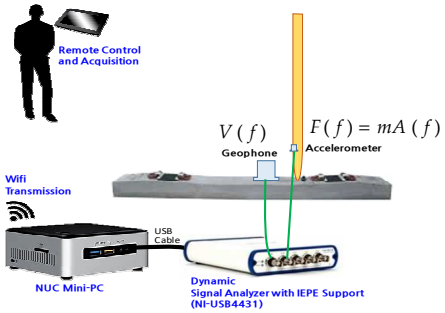
○ 동적강성은 콘크리트 슬래브, 벽에 대해 콘크리트 품질, 부재의 상대적 두께, 지지상태를 나타내는 지표로 0~40Hz 사이 모빌리티 함수의 초기 기울기 값의 역수



<충격응답기법 개략도와 일반적인 응답스펙트럼>



<일반적인 모빌리티 함수와 동적강성>

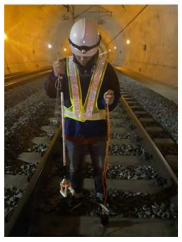


<LSP 하드웨어 시스템 개념도>

② 침목의 밀착상태 정량화 평가를 위한 LSP 시험

○ LSP 시험의 신뢰성 확인을 위해 SASW 시험 결과와 비교 분석

○ 경부고속선 자갈궤도 구간 7차례 현장시험 수행





○ LSP 시험 결과

하부구조	LSP 결과 특징
토공부	• 침목의 동적강성 범위는 0~5 kN/mm • 침목 동적강성의 일반적인 측정치는 2~3 kN/mm 이하. • 양호한 구간에서는 일정 침목마다 갑자기 증가된 동적강성이 반복적으로 측정됨
터널부	• 침목의 동적강성 범위는 0~10 kN/mm • 침목 동적강성의 일반적인 측정치는 2~3 kN/mm 이상. • 양호한 침목구간이라 하더라도 토공부에서와 같이 일정 침목마다 갑자기 증가된 동적강성이 반복적으로 측정이 되는 경향은 없음.
교량부	• 침목의 동적강성 범위는 0~6 kN/mm • 침목 동적강성의 일반적인 측정치는 2~3 kN/mm 이하. • 양호한 구간에서는 일정 침목마다 갑자기 증가된 동적강성이 반복적으로 측정됨

○ SASW 시험 결과

하부구조	SASW 결과 특징
토공부	• 자갈도상 대표전단파속도 범위는 150~250 m/sec • 자갈도상 대표전단파속도의 일반적인 측정치는 약 200 m/sec • LSP 동적강성 분포와 자갈도상 대표전단파속도의 변화가 유사하게 나타나며 양호한 상관관계에 있음
터널부	• 자갈도상 대표전단파속도 범위는 50~150 m/sec • 자갈도상 대표전단파속도의 일반적인 측정치는 약 100 m/sec • LSP 동적강성 분포와 자갈도상 대표전단파속도의 변화 사이에 일부 유사한 경향이 있지만 전체적으로 명확하게 상관성이 있다고 말하기에 부적절함

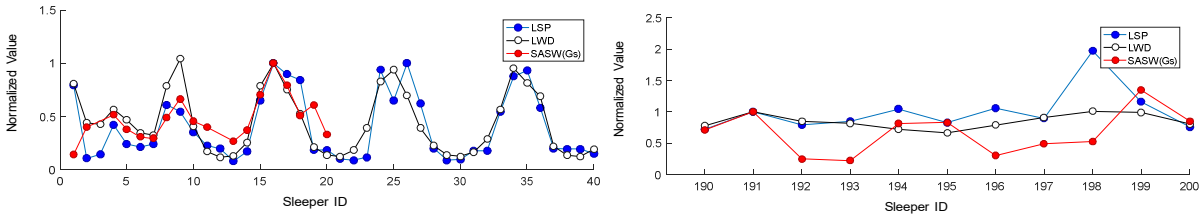
③ LSP, LWD, SASW 시험 결과 비교

㉮ 토공부에서의 결과 비교

○ LSP와 LWD의 강성의 크기는 다르지만 유사한 경향.

○ LSP와 SASW 시험 결과도 대체적인 증감의 차이는 유사

○ 그러나 지반조건이 불량한 경우 차이가 나타남



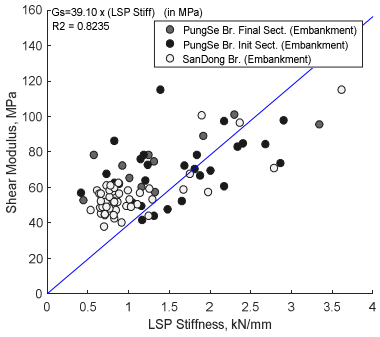
<현장시험결과 비교>

④ LSP, LWD, SASW 강성의 관계식

㉮ 침목 동적강성(LSP) vs 자갈도상 전단강성(SASW)

○ 풍세교 시점, 종점, 산동교 구간 101개 침목 데이터 사용

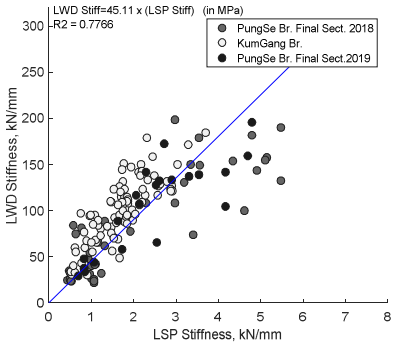
$$G_s = 39.10\,k_{LSP}$$



㉯ 침목 동적강성(LSP) vs 궤도 겉보기강성(LWD)

○ 상호 유사성을 명확하게 보여주는 풍세교 종점, 영동 금강교 156개 침목 데이터 사용

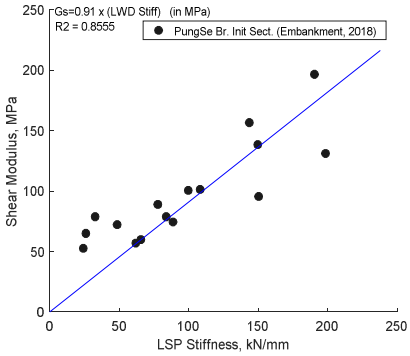
$$k_{LWD} = 45.11\,k_{LSP}$$



㉰ 궤도 겉보기강성(LWD) vs 자갈도상 전단강성(SASW)

○ LWD 고장으로 측정이 일시적으로 불가능하여 풍세교 종점 16개 침목 데이터만 사용

$$G_S = 0.91\,k_{LWD}$$



⑤ 결론

○ LSP 기법으로 구한 침목 동적강성은 토공부는 0~5 kN/mm, 터널부 0~10 kN/mm, 교량부 0~6 kN/mm 인 것으로 나타났음

○ 토공부와 교량부의 경우 일정 침목마다 갑자기 동적강성이 증가하는 경향이 있으나 터널부의 경우 명확한 경향이 없음

○ LSP, LWD, SASW 강성을 비교한 결과, 토공부에서는 뚜렷한 상관관계가 있는 것으로 나타났지만 교량부와 터널부의 경우 큰 차이가 있는 것으로 나타났음

(자) Full Waveform Inversion(FWI)에 의한 강성 평가기법

① FWI 기법 개요

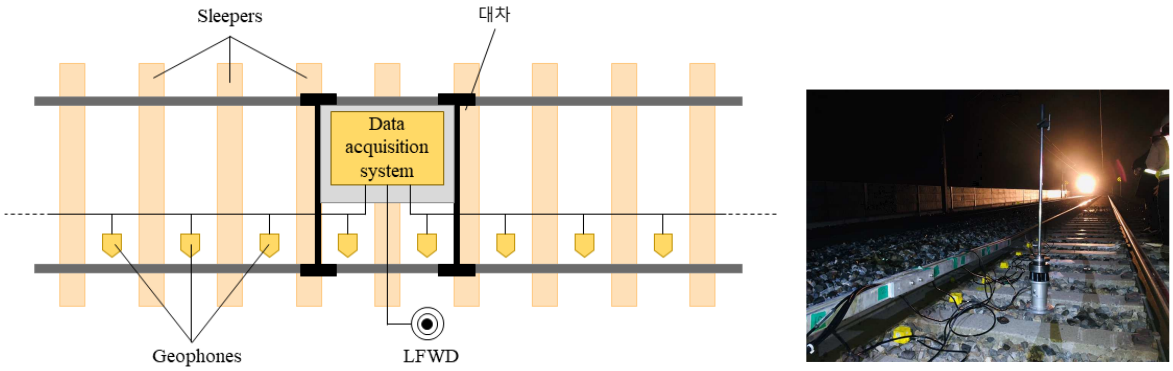
○ 표면에서 탄성파를 발생시켜 자갈도상, 강화노반과 하부노반을 매질로 이동 및 반사하는 탄성파를 측정. 이를 이용해 지층을 구분하고 각 층의 탄성계수를 측정하는 방법

○ 하부구조를 물성이 불균질한 2차원 반무한 탄성영역으로 가정하고 표면에서 측정된 속도의 응답파형을 역해석하여 자갈 도상 및 강화노반 Lame 상수의 공간적 분포 도출

② FWI 실험

○ 설험장비는 이동 대차, 지오폰, 탄성파 발생 장비(LFWD), 데이터 수집장치로 구성

○ 지오폰을 정해진 위치에 매설한 후, 침목과 침목 사이에서 LFWD를 이용하여 총 72번의 충격하중을 가하여 매설된 지오폰을 이용해 3축 방향 속도 응답 측정



<FWI 실험 개념도 및 현장시험>

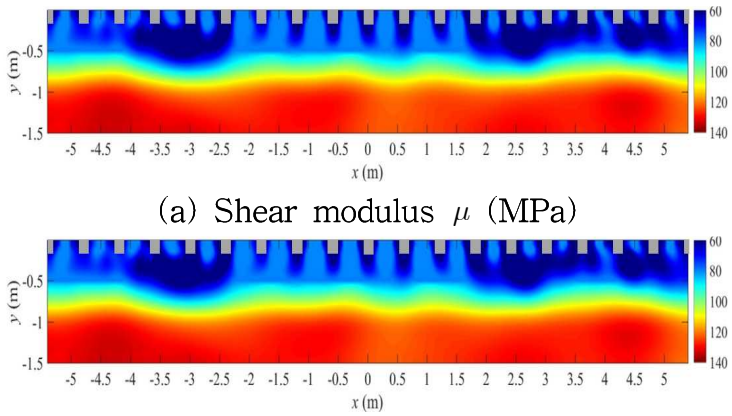
③ FWI 실험결과

○ 팽성 1고가, 옥천 금강교 시점, 아산 용와터널의 토공부에 대해 탄성파 측정 실험과 FWI 해석을 수행한 결과, 전단탄성계수가 자갈도상 층에서 약 60 ~ 80 MPa, 강화노반층에서 약 120 ~ 140 MPa로 추정됨. 이는 자갈도상과 강화노반의 일반적인 기계적 물성치와 유사함

○ 팽성 1고가 토공부와 옥천 금강교 시점 토공부의 결과 자갈도상 층과 강화노반의 경계면의 변화가 뚜렷하게 보였고, 아산 용와터널 토공부의 결과 다른 실험장소에 비해 경계면의 변화가 크지 않음

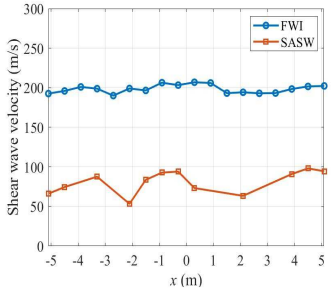
○ FWI를 이용하여 산정한 자갈도상 층의 전단파속도가 약 190~210 m/s로 실제와 유사하게 도출할 수 있었음

○ 다른 재구성 방법인 SASW와 도출한 자갈도상 층의 전단파속도를 비교한 결과, 두 방법을 이용해 구한 자갈도상 층의 전단파속도 값에 차이가 있지만 위치별 변화의 경향은 유사함을 알 수 있음



(a) Shear modulus μ (MPa)

(b) Modulus λ (MPa)



<FWI와 SASW 결과비교>

<FWI 기법을 이용한 탄성계수 분포 재구성 결과: 팽성 1고가 토공부>

④ 결론

○ FWI를 이용하여 자갈도상과 강화노반의 전단탄성계수를 추정할 수 있음

○ 실험시 많은 시간이 소요된다는 단점이 있음

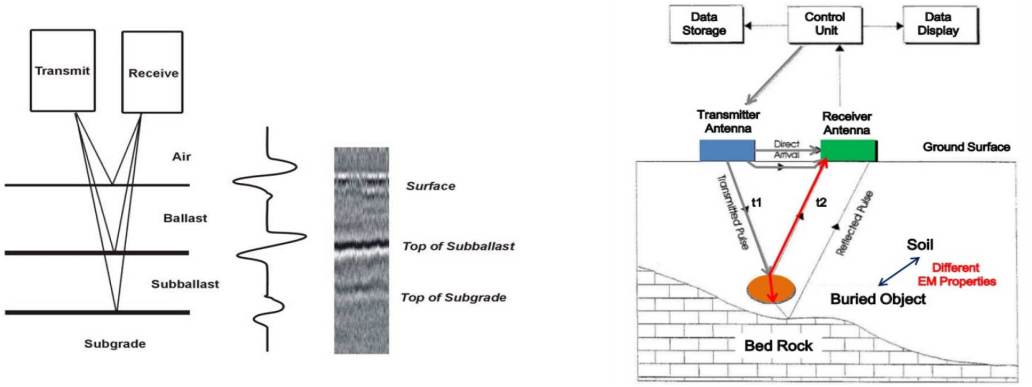
○ 불량구간에 대해서 정밀조사 시험기법으로 적용

(4) 침목영향배제를 위한 GPR 탐사 장비 및 기법 개발

(가) GPR (Ground Penetrating Radar) 개요

① GPR 탐사원리

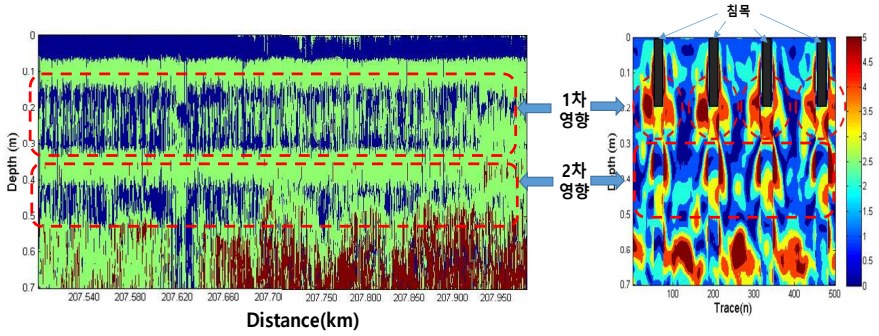
○ GPR은 아래 그림과 같이 전자기파(Electromagnetic Wave)를 지면으로 송출시켜 매질을 통해 투과된 신호의 반사파를 측정하여 지반내부에 존재하는 특정 사물이나 공극, 매질이 변하는 지층 등을 탐사해 낼 수 있는 장비



<GPR 탐사 모식도>

② 기존 탐사장비의 한계

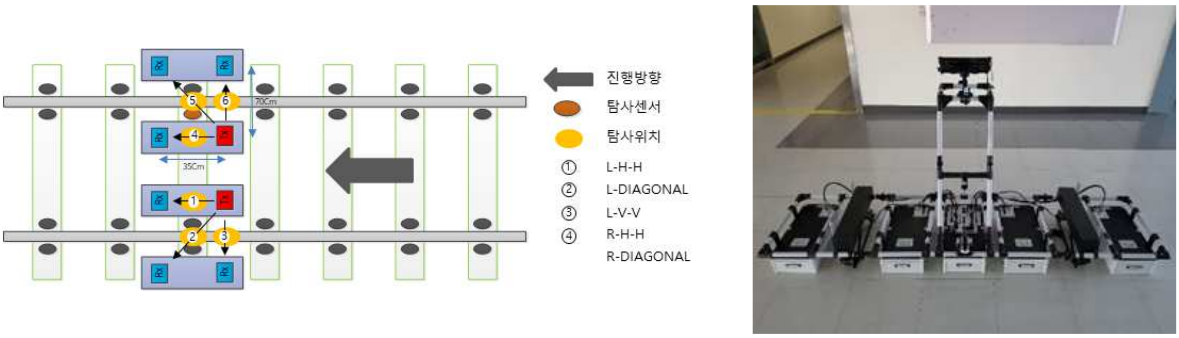
- ○ 콘크리트 침목(침목 자체와 침목내부 강성)의 영향으로 심각한 노이즈 발생
- ○ 콘크리트침목에서 GRP 신호(전자기파)가 반사되어 하부 도상과 노반으로 투과되지 않아 도상의 상태 평가 불가능
- ○ 침목에 근접한 경우 콘크리트침목과 침목 안의 강선 영향으로 신호 왜곡 현상 발생
- ○ 발생원인: 이러한 침목의 영향은 송수신기 일체형 안테나를 사용하여 연속적으로 철도 노선을 따라 탐사하는 방법에 기인한 것으로 분석



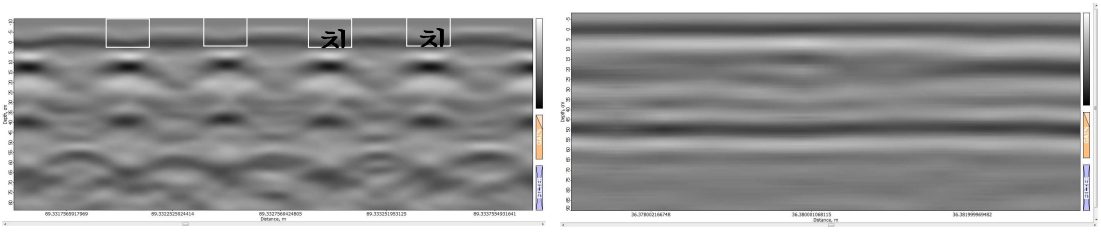
<콘크리트침목의 영향으로 인한 GPR 신호 왜곡>

(나) 침목영향배제를 위한 GPR 장비제작

- ○ 송수신기 일체형 안테나를 사용한 기존 탐사장비의 한계를 극복하고자 송신기와 수신기가 분리된 형태의 GPR 장비 개발
- ○ 멀티채널 GPR: 좌우 3채널씩 총 6채널의 GPR 장비 개발
- ○ 침목감지센서 장착: 근접 마그네틱 센서를 활용하여 체결구를 감지하여 이 위치를 침목 위치로 간주하여 데이터 취득
- ○ 이동식, 접이식 카트: 탐사시에는 철로를 따라 주행 가능한 형태이며 비탐사시에는 부피를 최소화할 수 있도록 접이식 구조 적용
- ○ GPS와 영상 카메라 장착: 탐사지역에 대한 정확한 위치정보 획득 및 탐사시 특이사항(체결구 이상유무, 침목 이상유무 및 균열 등) 확인 등을 위해 GPS와 카메라 장착
- ○ 구동프로그램을 이용하여 야간작업시 원활한 탐사를 위한 간단한 분석기능 제공



<철도 자갈도상 전용 GRP 장비 개념도 및 장비 사진>



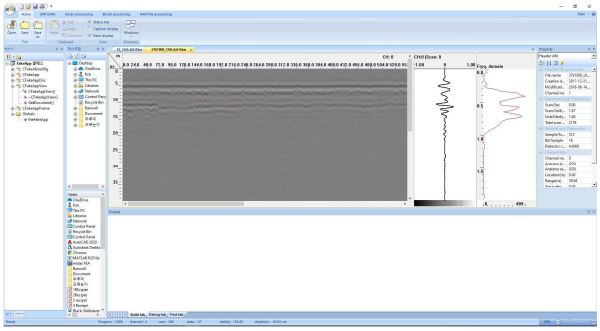
(a) 일반 GPR 장비 (b) 철도전용 GPR

<기존장비와 multi-channel GPR 신호 비교>

(다) GPR 분석 프로그램 개발

○ 상용프로그램과 마찬가지로 기본적인 GPR 데이터 분석 기능 제공

○ 분석프로그램을 개발함으로써 **자동화된 자갈층 두께 파악 기능**과 이를 이용한 **자갈도상 파울링 상태 파악**의 **효율성 향상**



<GPR 분석 프로그램>

(라) GPR을 이용한 자갈도상 분석기법 개발

① 자갈도상 깊이 계산을 위한 알고리즘

○ 기본가정: GPR 신호의 급격한 변화위치가 매질의 경계면

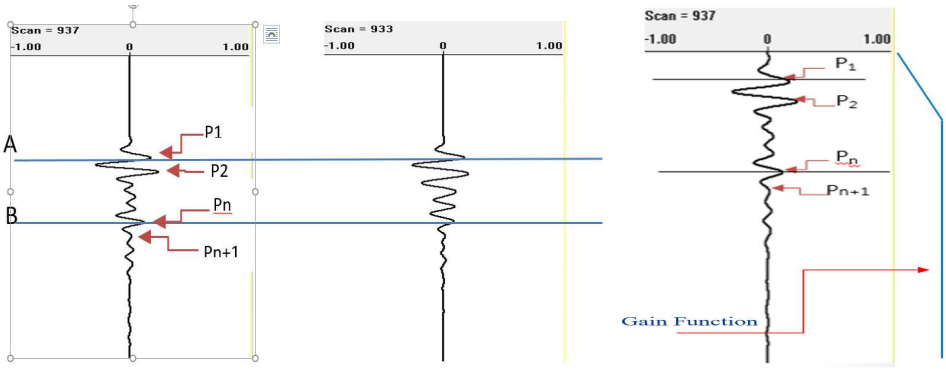
○ 아래 그림에서 데이터의 변화가 가장 크게 발생하는 A라인은 GPR 기기와 자갈도상 표면 사이의 경계면을 의미하고 두 번째로 변화가 큰 B라인은 자갈도상과 하부지반 사이의 경계면

○ 아래 세 가지 방법을 사용하여 적용한 결과, 세번째 방법 선정

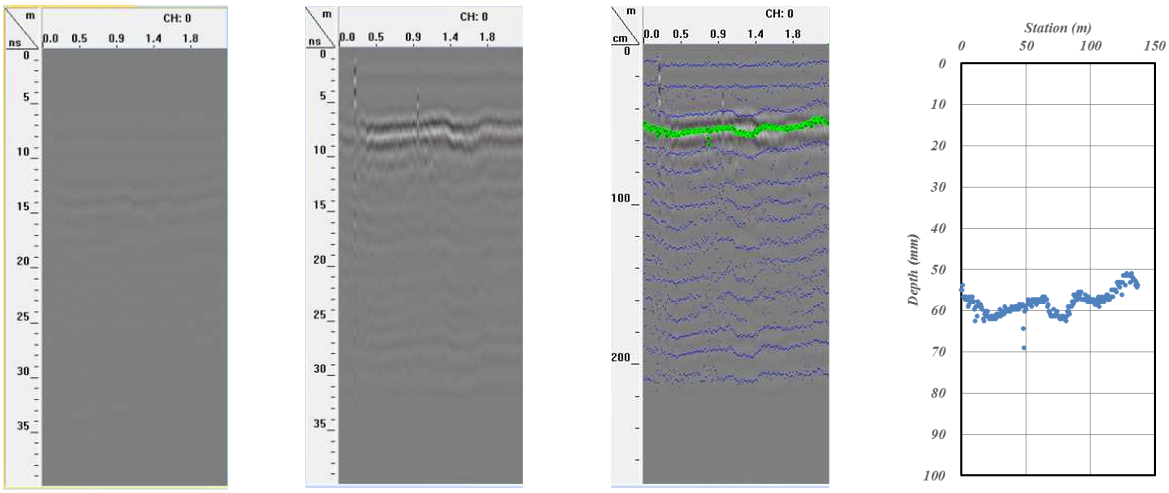
(1) 연속하는 피크치 사이의 비의 최대값($=P_n/P_{n+1}$)

(2) 연속하는 피크치 사이의 차를 합으로 나는 값의 최대값($=(P_n-P_{n+1})/(P_n+P_{n+1})$)

(3) GPR 신호의 최대값. 침목효과 상쇄를 위한 Custom gain function 적용



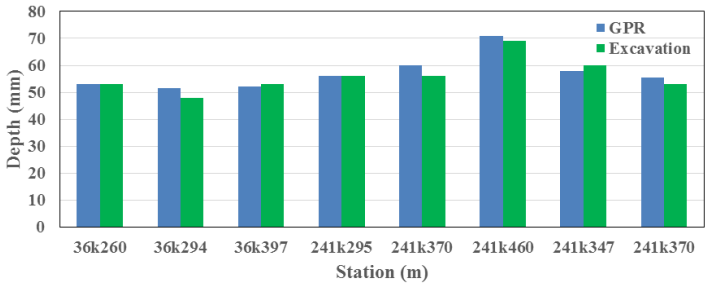
<GPR A-Scan 데이터와 Custom gain function>



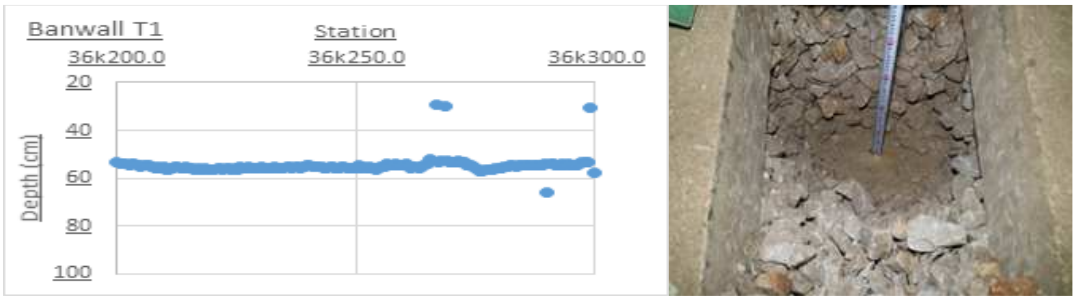
1. Raw data 2. Apply preprocessing 3. Peak detect 4. Final result

<자갈도상 깊이 계산 알고리즘 적용 과정>

○ 실제 굴착을 통해 자갈도상 깊이를 확인한 결과, 적용된 알고리즘이 비교적 정확한 결과를 보여주는 것으로 나타남: 평균 오차율 ±3.4%



<굴착을 통해 확인한 자갈도상 깊이와 GPR 분석을 이용한 자갈도상 깊이 비교>



<자갈층 깊이 계산 알고리즘 적용 결과와 굴착 결과>

② 자갈층 파울링 상태 파악을 위한 알고리즘

○ 자갈입자 사이의 세립분(파울링 재료)의 함량이 증가할수록 전자기파 신호의 분산도 증가

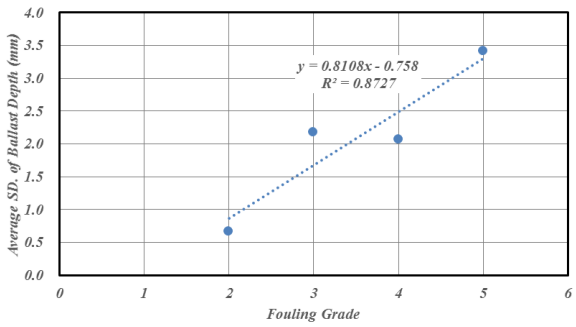
○ 위의 자갈층 두께 선정 평가 알고리즘에서 peak 값의 분산도가 파울링 정도와 연관

○ GPR 전자기파 분산도와 파울링정도 (fouling level) 상관도 분석

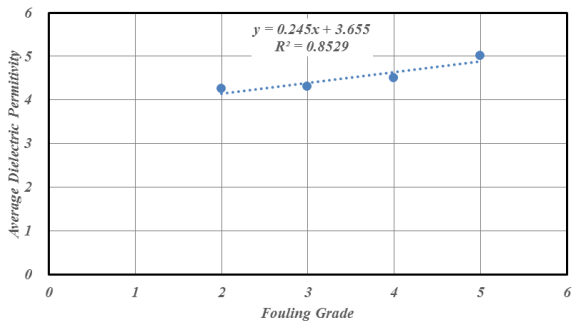
- 자갈도상을 굴착하여 육안 관찰을 통한 파울링 등급 구분: 5단계 구분
- (Grade 1) 파울링이 전혀 없는 깨끗한 자갈도상
  (Grade 5) 파울링이 심각하게 발생한 자갈도상
- 자갈층 깊이 계산 결과의 표준편차의 평균과 선형 관계

○ 파울링 등급과 자갈층 유전상수 사이에 높은 상관관계가 있음.

- 유전율: 굴착에 의한 실측한 도상층 두께와 GPR 신호의 상호비교로 유전율 계산
- 파울링정도가 증가할수록 유전율이 증가



<파울링 등급 vs 자갈층 깊이 표준편차>

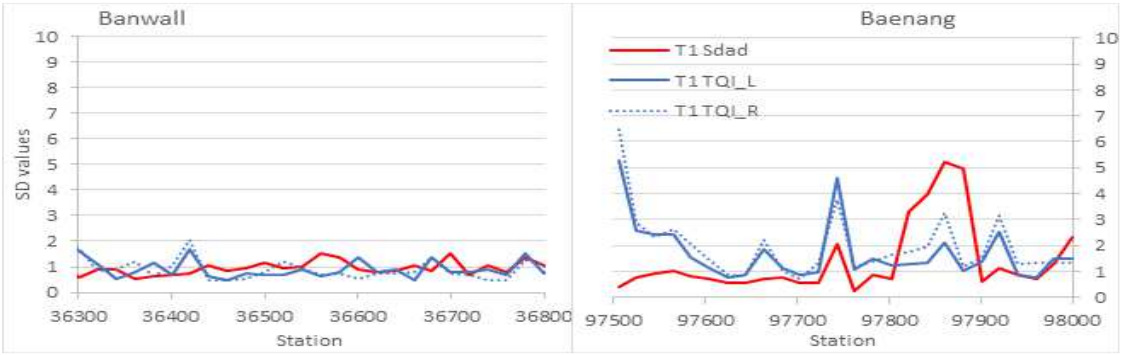


<파울링 등급 vs 자갈층 유전상수>

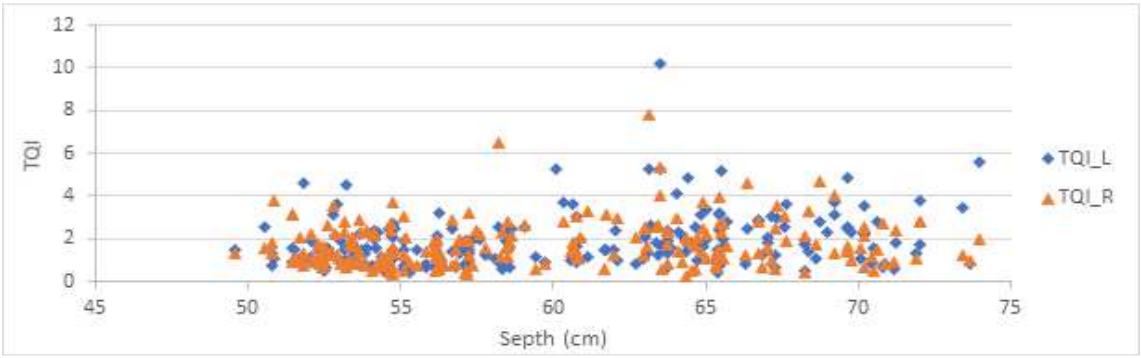
(마) 궤도틀림과 자갈층 두께과의 상관관계

○ TQI가 전체적으로 작은 반월터널의 경우 자갈층 깊이 분포의 표준편차가 작게 나온 반면에 TQI 변화가 큰 배방교의 경우 자갈층 기피 분포의 표준편차도 변화가 크게 나타났음

○ TQI와 자갈층 깊이 사이에는 명확한 상관성이 없는 것으로 나타났는데 이는 고속선의 경우 자갈층 아래에 존재하는 강화노반 때문으로 추정됨



<TQI와 자갈층 깊이 분포의 상관관계>



<TQI와 자갈층 깊이의 상관관계>

(바) GPR을 이용한 자갈궤도 상태평가 가이드라인

○ GPR 평가 정확도 향상을 위하여 굴착과 병행하여 자갈궤도 상태를 평가

1) 자갈궤도용 GPR 탐사장비를 이용하여 탐사 수행

2) 제시한 자갈도상 평가기법을 이용하여 자갈도상 두께 분석

- 일정 거리마다 굴착으로 측정한 도상층 두께를 활용하여 도상층 두께 보정
- 도상층 두께는 2종작업, 개량작업, 도상층두께 분포파악 등을 위한 기초자료로 활용

3) GPR 신호 분산도 평가 → 파울링 정도(분니정도) 정성적 평가

- 앞에서 제시한 관계를 바탕으로 파울링 정도를 제시
- 정량적인 지표가 아닌 정성적 (상대비교) 평가

(5) 자갈 마모도 평가기법 개발

(가) 배경

① 경부고속철도용 자갈의 특성

○ 고속철도용 자갈은 세척자갈을 사용하도록 규정하여, 세척시설을 갖춘 경북 김천시 소재의 업체 1곳(석산포함)에서 생산

○ 같은 자갈을 사용함으로 경부고속철도 자갈궤도 자갈의 마모특성이 동일하다고 가정

② 파울링(Fouling, 분니)과 유지보수

○ 세립분이 증가하는 현상: 자갈의 마모(도상분니), 하부노반 세립분의 상승(노반분니)

○ 고속철도의 경우 강화노반으로 노반분니 현상 미미

○ 노반침하시 궤도 양로로 도상두께가 증가하며, 파울링이 증가하여도 자갈도상의 침하가 가속화되어 궤도틀림 진전속도 증가

○ 도상두께와 파울링정도 평가는 궤도틀림 예측과 유지보수에 있어 중요한 요소

○ 자갈이 마모되면 침하(궤도틀림) 저항성이 낮아져 궤도틀림이 가속화되어 자갈치환(2종 작업) 필요(선로유지관리지침(2018))

○ 유지보수와 개량(2종작업)은 경험에 의존하여 수행. 과학적인 유지보수 및 개량을 위하여 정량적인 마모도평가기법이 필요하며, 이를 바탕으로 유지보수나 개량 계획 수립

③ 이미지분석(Image Analysis)과 형상지수(Shape Index)

○ 디지털 촬영한 이미지 영상을 컴퓨터 소프트웨어를 이용하여 분석하여 기존 체분석의 한계를 극복하고 골재의 형상과 관련된 다양한 정보를 획득하여 정량적으로 평가할 수 있는 진보된 기법

○ 이미지분석을 통해 획득한 골재의 형상 정보를 정량적인 형상지수로 나타낼 수 있음

(나) 마모도와 파울링

① 파울링 상태평가지표: 자갈도상의 파울링 상태를 정량적으로 평가하는 방법

파울링 상태평가 지표	정의	장점	단점
Fouling index (FI)	4번체와 200번체 통과중량백분율의 합	**간편하여 가장 널리 사용되는 지표**	비중이 서로 다른 경우를 고려할 수 없음

② LA 마모시험

○ 장기간에 걸쳐 발생하는 현장 자갈의 마모를 실내에서 단기간에 모사하기 위한 시험

○ 굵은 골재를 쇠구슬과 함께 로스앤젤레스(LA) 마모시험기에 넣어서 원하는 횟수만큼 돌린 후, 마모시험 전후의 무게로부터 마모율을 측정하는 시험으로 본 연구에서는 200, 300, 500, 1000, 2000회 회전에 따른 마모정도를 비교

$$R = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100$$

m1 = 시험 전의 시료 무게(g)

m2 = 시험 후 1.7mm 이상 골재 무게(g)



<LA 마모시험기>

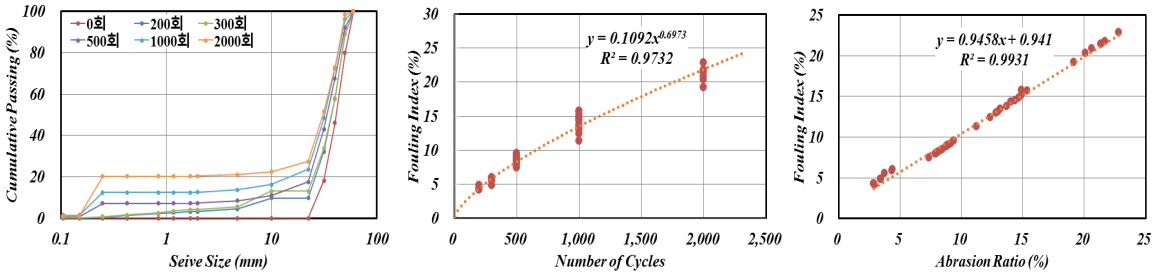
③ 실험결과

○ 마모율 vs Fouling Index (FI)

- 마모율과 FI 모두 자갈이 마모시험에 의해 마모된 정도를 나타내는 지수이기 때문에 수치상으로는 다소 차이가 있지만 전체적인 경향은 거의 일치
- 고속철도의 경우 노반분니가 거의 발생하지 않고 대부분이 도상분니가 발생되는 것으로 알려져 본 실험에서와 유사한 결과가 발생할 것으로 예측 **(고속철도 적용가능)**

○ 회전수 vs Fouling index (FI)

- 회전수가 높아질수록 기울기가 점점 작아지는 형태
- 운영선의 자갈은 초기에 마모가 상대적으로 크게 발생하고, 지속적인 반복하중에 의해서 마모가 진행되나 그 속도는 점차 감소할 것으로 추정



(다) 이미지분석 소프트웨어 및 포토박스 개발

○ 배경과 자갈입자 이미지 분리 기법 개발

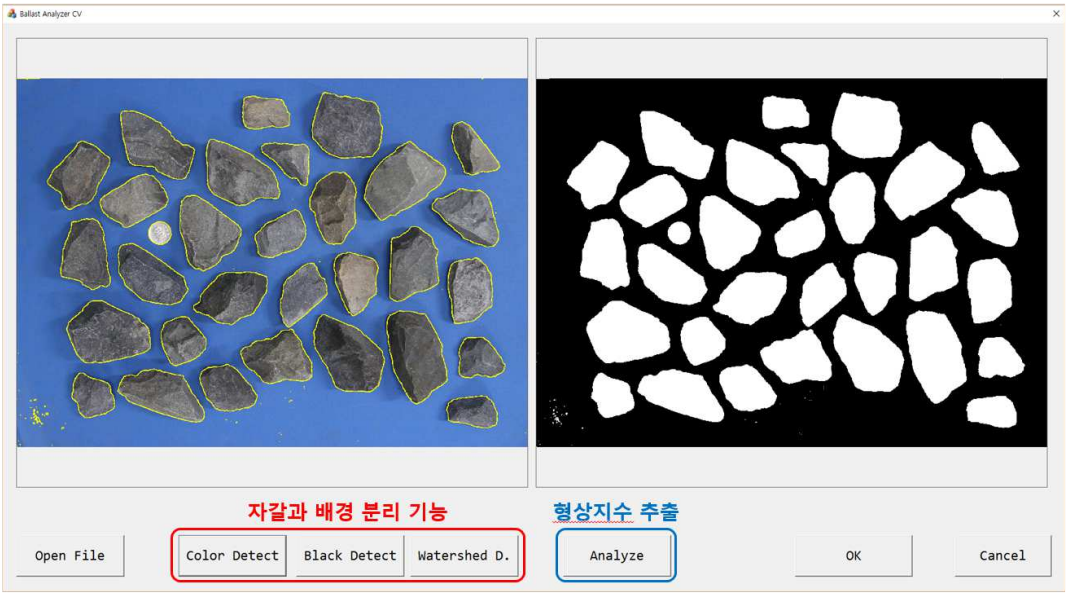
- 배경색 선정: 청색 또는 적색 배경인 경우 상대적으로 배경과 자갈의 분리가 수월함
- 포토박스 제작: 골재 이미지분석을 원활하게 진행할 수 있도록 배경색이 균일하고 조명을 충분히 확보할 수 있도록 포토박스 제작



〈포토박스 프레임〉

○ 이미지분석 소프트웨어 개발

- 디지털 카메라로 촬영한 골재 이미지를 손쉽게 분석하기 위하여 소프트웨어 개발
- 주요기능 : 1. 청색 또는 적색 배경하에서 자갈과 배경 구분
  2. 자갈 입자별 형상지수 추출
  3. 형상지수를 추출한 표본집단에 대한 통계분석



<이미지분석 소프트웨어 실행 화면>

(라) 자갈입자 마모도 평가 모델 개발

① 이미지분석

○ 기존 체분석의 한계: 골재의 크기와 중량에 대한 정보만을 획득, 골재의 크기도 정사각형의 체를 통과하는 입자로서 긴 골재는 크기가 왜곡

○ 이미지분석의 장점: 골재의 형상과 장축, 단축에 대한 정보 획득 가능, 나아가서 모난정도(형상) 등을 정량적으로 평가할 수 있는 진보된 기법

○ LA마모시험에 사용된 자갈을 이용하여 마모도와 형상지수 간의 상관관계 규명

② 골재 형상지수 (Shape Index)

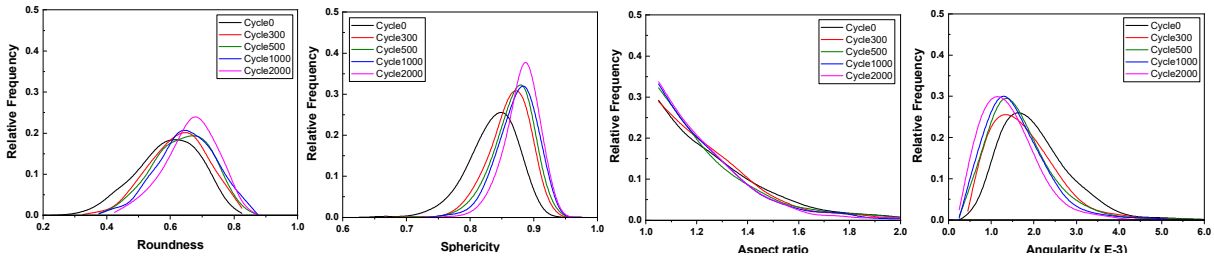
○ 2차원 골재 이미지를 이용하여 형상을 정량적으로 평가하는 방법

형상지수	정의	수식
Roundness	입자에 접하는 장축을 반지름으로 하는 원의 단면적과 입자의 단면적의 비	$4A/\pi L_{Major}^2$
Sphericity	자갈입자와 같은 면적의 원의 원주와 자갈입자 둘레의 비	L_e/L_a
Aspect ratio	자갈입자의 장축과 단축의 비	-
Angularity	입자의 형상을 푸리에 시리즈로 표현하였을 때 고주파 영역의 계수	$\sum_{j=5}^{25}\left[(a_n)^2+(b_n)^2+(c_n)^2+(d_n)^2 \right]$

③ 골재 이미지분석 결과

○ Aspect ratio를 제외하고 정규분포형태로 나타남

○ Roundness와 Sphericity는 마모가 진행될수록 증가하고 Aspect ratio와 Angularity는 감소하는 형태로 나타남



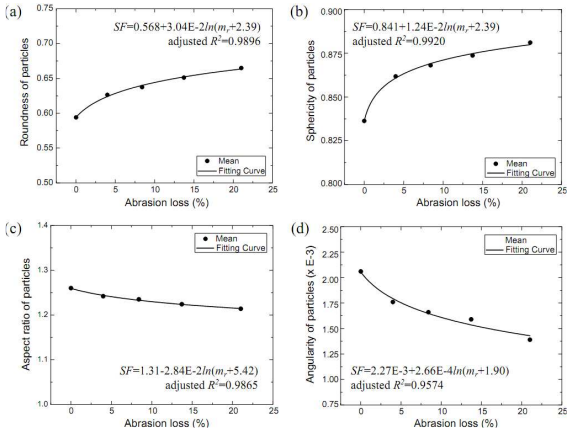
<골재 이미지 분석 결과>

④ 형상지수와 자갈 마모도의 상관관계

○ 회귀분석을 통해 각각의 형상지수와 평균값과 자갈 마모도 사이의 관계식 추정

○ R^2가 0.95 이상으로 매우 높은 상관관계가 있음을 확인

○ 이미지분석을 통해 현장에서 채취한 자갈 시료의 형상지수를 계산한 후, 이 관계식을 이용하여 해당 현장 자갈의 마모도를 추정 가능



<자갈 형상지수와 자갈 마모의 상관관계>

(라) 이미지분석 기법의 현장적용

① 현장적용 현황

○ 아래표와 같이 다양한 고속선 현장에서 자갈을 채취해 이미지분석 실시

○ 이미지분석을 통해 계산한 형상지수로부터 마모도 추정

○ 각각의 추정 마모도와 현장의 탬핑장비 작업횟수와의 상관관계 규명

날짜	지명	위치		위치(깊이)
2017-07-11	금오터널	T2	241k295	-
2017-09-01	운용고가	T2	78k465	-
2017-09-15	운주터널	T1	112k000	-
2017-12-26	서봉터널	T1	53k562	-
2018-04-12	신휴고가	T2	85k400	표면
2018-05-02	풍세교종점	T2	107k270	표면/중간/아래
		T2	107k440	표면
2018-06-07	풍세교시점	T1	99k700	표면
		T2	99k700	표면/중간
		T2	100k300	표면/중간
		T2	100k500	표면
2018-07-05	용와터널	T2	89k110	표면
		T2	89k310	표면/중간
2018-10-10	팽성1고가	T2	75k570	30cm
		T2	75k670	표면/30cm
2018-10-11	금강교	T1	183k220	28cm
		T1	183k430	표면/21cm

② 이미지분석 기법 적용결과 분석

○ 표면에서 채취한 데이터만 사용한 경우

- 네 개의 형상지수와 장비작업횟수와의 상관관계는 파악하기 힘듦

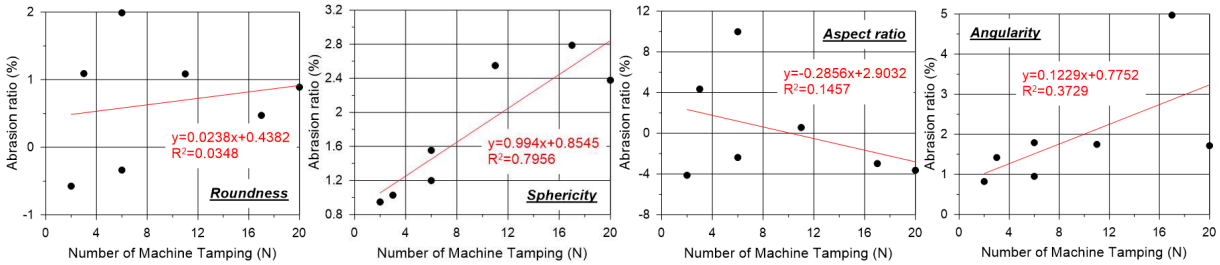
○ 중간층에서 채취한 데이터만 사용한 경우

- 표면 데이터만 사용한 경우와 마찬가지로 특별한 상관관계는 파악하기 힘듦

○ 깊이별로 채취한 데이터를 모두 사용한 경우

- Roundness와 Aspect ratio로부터 추정한 마모도와 장비작업횟수 사이의 상관관계는 거의 없는 것으로 나타났음
- Roundness와 Aspect ratio의 경우 변동계수(=표준편차/평균x100)가 14~23%로 매우 높

은 편이기 때문에 자갈 갯수에 따라 추정 마모도의 편차가 매우 클 것으로 판단됨
- Sphericity로부터 추정한 마모도와 장비작업횟수 사이의 상관관계 높음
- Sphericity의 경우 변동계수가 3~4%로 작은편이기 때문에 자갈 개수가 적어도 추정 마모도의 편차가 크지 않을 것으로 판단되고 이로 인해 장비작업횟수와의 상관관계가 뚜렷하게 나타난 것으로 판단됨



③ 결론

○ 마모도 평가시 사용하는 시료는 현장의 표면뿐만 아니라 중간층에서 채취한 시료를 모두 사용해야 현장의 마모도를 정확하게 평가할 수 있을 것으로 판단됨

○ 현재 채취한 자갈 개수 수준에서는 Sphericity로부터 추정한 마모도와 장비작업횟수 간의 상관관계만 추정 가능

○ 다른 형상지수의 경우 편차가 크기 때문에 뚜렷한 상관관계가 나타나지 않는 것으로 보임. 자갈 개수가 많아지면 다른 형상지수와 장비작업횟수 간의 상관관계도 추정할 수 있을 것으로 판단됨

(마) 자갈 마모도 평가 기법을 이용한 상태평가 가이드라인

○ 자갈 마모도 평가 기법을 이용해 자갈궤도 상태평가를 하기 위해 필요한 사항
- 이미지 품질: 이미지 품질이 균일하며 조명이 충분한 확보되어야 함
- 배경색은 청색 또는 적색인 경우 배경분리가 가장 원활하게 이루어짐
- 자갈시료 개수가 충분히 확보되어야 함

○ Sphericity와 장비작업횟수와의 상관관계 가장 높음

(1) 현장에서 도상 표면, 20cm-30cm(중간), 50-55cm(바닥)에서 자갈입자를 충분히(최소 30개 이상, 50개이상 권장) 채취하여 포토박스에 넣고 촬영

(2) 마모도 분석 프로그램으로 각 자갈입자의 형상 분석 및 통계 처리

(3) 해당 지점에서의 마모도 평가
- 마모도 제시
- 향후 데이터 추가 획득으로 궤도틀림 진전율, 2종작업 기준과의 연계 필요

(6) 하부노반 탐사기법 적용성 평가

(가) 동적콘관입시험(Dynamic Cone Penetrating, DCP)과 지반내시경

○ 동적콘관입시험: 망치로 콘을 타격하여 관입시키는 동시에 타격하중과 관입량을 측정하여, 일정 관입에너지에 대한 관입량의 비(콘관입저항)을 깊이에 따라 측정

○ 동적콘관입시험 실험으로 생긴 구멍으로 내시경 카메라를 넣어 자갈층과 (강화)노반의

상태 확인

○ 콘관입으로 생긴 구멍을 이용하여 지반내시경으로 지반상태 유관 확인으로 정확도 향상

○ 특정 위치에서 수행되기때문에 연속적인 비파괴검사인 GPR 등과 보완하면 자갈궤도의 상태를 효율적으로 평가 가능





<동적콘관입시험 장비와 지반내시경 장비>

(나) 도상샘플러에 의한 자갈도상 시료채취

○ 철재관안에 플라스틱 튜브가 있어 채취한 시료를 안전하게 보관 가능

○ 단단한 자갈도상에 철제튜브를 관입하기 위하여 엔진의 타격력을 이용

○ 고속철도구간: 자갈도상 다짐도가 일반선보다 높고, 자갈도상 하부에 강화노반이 설치되어있음. 강화노반은 도상 자갈의 노반침투를 원천적으로 막도록 설계되어, 샘플러로 관입이 사실상 불가능. 고속선에서 자갈도상의 관입도 매우 어려웠지만, 강화노반의 관입이 불가하여 자갈시료의 회수율 또한 매우 낮음

○ 샘플러를 적용하기 위해서는 해외에서처럼 별도의 장비를 구축해야할 것으로 판단됨. 자갈층과 강화노반을 충분한 굴착할 수 있는 힘을 가진 항타기나 rotator를 적용해야하며, 이를 지지할 수 있는 트롤리지그 등도 함께 구축해야함. 더불어 자갈입자의 최대크기가 60cm임을 감안하여 대표성을 높이기 위하여 샘플러 튜브의 크기도 150~200 mm가 되어야할 것으로 판단됨



<고속선 강화노반 샘플채취 (운용1고가 부근)>

(다) 인력에 의한 자갈도상 굴착

○ 문제점: 상부의 자갈이 계속해서 무너지고 안식각 정도의 기울기를 유지하면서 자갈시료를 채취하게 되어 동일한 면적에 대한 깊이별 시료채취 어려움. 또한 인력에 의존하기 때문에 시간이 많이 소요됨

마. 개량기술 경제성 평가와 실용화 전략

(1) 개요

○자갈궤도 개량기술을 적용을 위하여 경제성의 확보 가능성 검토
○향후 자갈궤도 개량사업 추진 시 사업화 전략 수립을 위한 기초자료로 활용
○경제성 평가를 위해서 비용과 편익을 분석
○비용은 초기 투자비용뿐 아니라 유지보수비를 포함한 운영비용, 구성요소의 교체 비용 등을 포함한 **총 수명주기비용(Life cycle cost, LCC)**으로 평가
○편익은 한계 편익으로 궤도구조의 보강을 통해 추가로 발생하는 편익에 한정
- 유지보수 절감에 따른 기회비용 편익
- 유지보수 절감에 따른 서행감소로 통행시간 저감 편익
- 급속경화궤도 적용시 운영속도 향상(320km/h) 편익
○경제성 평가를 위한 비용 및 편익 분석을 위해서 아래 4가지 시나리오를 설정

시나리오	내용	비고
1 (S1)	현재 자갈궤도를 그대로 유지	Control
2 (S2)	급속경화궤도 시공	자갈궤도 개량
3 (S3)	기존 침목 사이에 중간블록(I/B)을 설치	
4 (S4)	하프프레임침목 또는 광폭침목으로 교환	

(2) 개량기술별 LCC 분석

(가) 기본가정

○LCC 계산 기간 : 개량 완료 후 40년 (자갈궤도 수명 60년 가정)
○할인율(depreciation rate) : 4.5% (교통시설투자평가 철도기준)
○선로 연장 : 1 km (단위연장 기준)
○연간 통과톤수 : 30MGT (초기 개통시 25MGT → SRT 개통이후 30MGT)
○LCC 비용 산정

LCC = 초기 건설비(initial construction cost, IC)
+ 교체 비용(renewal cost, RN)
+ 운영 비용(operational cost, OP)

- 초기 건설비: 건설에 필요한 모든 비용
- 교체 비용: 궤도의 총 수명 중 발생하는 구성품의 교체 비용. 수명이 경과한 후 해체, 재시공 비용은 고려하지 않음
- 운영 비용: 유지보수비(maintenance cost, MT)와 리스크 비용(risk cost, RK) 나눔
  ・유지보수비: 일상적인 선로 유지보수 비용
  ・리스크 비용: 일상적이지 않으나 발생가능한 유지보수 비용
- 생애동안 발생하는 비용을 현재가치로 환산하여 적용

(나) 초기건설비

○ 2018년도 가격기준 적용

<단위길이당(1km) 초기공사비>

항 목	초기 공사	개량 기술 (백만원)		
	자갈 궤도	급속경화궤도	I/B 개량	광폭/HF 개량
직접비	511.3	1,592.5	624.5	569.0
간접비 및 부대비	187.2	531.4	238.1	223.9
합 계	698.6	2,123.9	862.6	792.9

(다) 교체비용

○ 선로유지관리지침에 따라 궤도구성품별 교체주기를 산정

○ 교환주기에 따른 교체비용은 아래 식으로 산정

$$RN = \sum_{j=1}^{n}\sum_{i=1}^{m}\frac{C_{rn,i}L_{rn,ij}}{(1+d)^{t_{(rn,ij)}}}$$

여기에서, $C_{rn,i}$ = i 구성요소의 단위 거리당 교체 비용,

$L_{rn,ij}$ = i 구성요소의 $t_{rn,ij}$에서의 교체 거리,

n, m, d = 각각 교체 횟수와 교체할 구성요소의 수 및 실질할인율,

$t_{rn,ij}$ = 교체 시기, $j\times$[i항목의 교체 주기(누적통과 톤수)]/연간통과톤수(T_a)

(라) 유지보수비용

○ 궤도구조개량기술 및 급속경화궤도의 유지보수 항목을 선로유지관리지침(2015)에 근거하여 설정

○ 일상적인 유지보수: 검측차를 이용한 궤도검측(m1), 선로 순회점검과 경미한 보수작업(m2), 레일 연마(m3), 궤도틀림 정정 및 다짐(m4) 등을 포함

○ 궤도구성품 교체: 각 구성요소의 교체주기는 누적통과톤수(tonnage)로 정의

(마) 리스크 비용

○ 불규칙적으로 발생하는 궤도의 손상을 복구하는 비용

- 시공하자에 의한 손상, 사고 또는 천재지변에 의한 손상, 누적 피로에 의한 손상 등

○ 급속경화궤도의 경우 콘크리트궤도와 동일한 손상모드를 가정(Jang, 2014)

- 노반 침하나 체결구 파손 외에 슬래브, 침목의 손상에 대한 보수 포함

○ 자갈궤도의 경우는 체결구 손상, 침하에 의한 궤도틀림 보정으로 체결장치의 교체나 조정 외에는 대부분 자갈의 보충을 통해 보정함을 가정

<리스크 확률, 보수 시간 및 보수 연장의 가정>

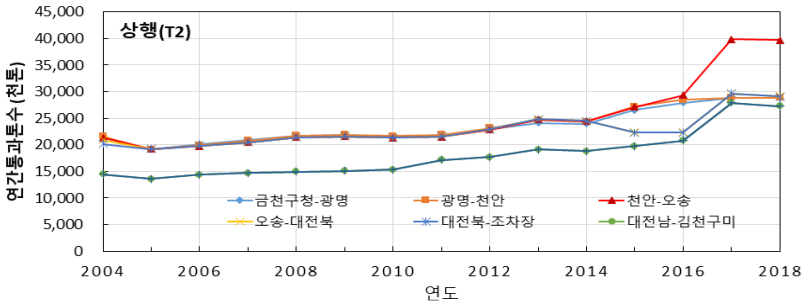
Code: Description	수량	주기 (year)	Probabilities	
			자갈궤도	급속경화
I. Risks by initial defects (초기결함)				

R1: 작은 침하(트랙 형상 수정)	10.0%	2.0, 10.0	100.0%	100.0%
R2: 슬래브 및 / 또는 침목 균열	0.5%	5.0	-	100.0%
R3: 침목 아래 틈	2.0%	5.0	-	100.0%
R4: 자갈 보충	10.0%	5.0, 17.0, 29.0, 41.0, 53.0	100.0%	-
II. Risks by accidents (자연재해, 사고 등으로 인한 결함)				
R5: 슬래브 부분의 손상	0.1%	10.0, 40.0	100.0%	100.0%
R6: 레일 고정 손상	0.2%	10.0, 40.0	100.0%	100.0%
R7: 소규모 침하	10.0%	5.0	50.0%	50.0%
R8: 대규모 침하	1.0%	10.0	25.0%	25.0%
R9: 침목 피해	0.1%	10.0, 40.0	30.0%	30.0%
R10: 슬래브의 손상(부분 수리)	0.1%	10.0, 40.0	30.0%	30.0%
III. Risks by degradation or fatigue (열화로 인한 결함)				
R11: 피로에 인한 슬래브 및 침목 손상	0.06% ~8.0%	손상정도에 따라 다른 주기 적용	-	100.0%

(바) LCC 분석을 위한 통과톤수, 유지보수, 궤도품질지수 분석

○ SR 개통(2016. 12.)후 경부1단계 자갈궤도 구간 통과톤수 증가

- 23.608MGT (2015년) → 30.270MGT (2017년), 년평균 통과톤수는 약 28% 증가
- SR 개통이후에 개량기술이 적용이 가능하기 때문에 LCC 및 경제성 분석을 위해서 **30MGT**를 적용 (개량기술이전 25MGT → 개량기술 적용 이후 30MGT)



<경부고속철도 구간별 통과톤수 (2004-2018)>

○ 연평균 유지보수(탬핑횟수) 분석

- 유지보수이력 데이터(2011~2018)로부터 단위궤도연장(1km)에 대한 누적탬핑연장 산정
- 1km 궤도연장에 대해서 평균 1.23-1.27km 탬핑
- MTT 기준 1회(1일, 야간차단작업시간) 약 600-800m 탬핑수행가능

→ **연간 평균 탬핑 횟수=단위궤도연장당 누적탬핑횟수/1회 탬핑가능거리**

→ 단위궤도연장에 대해서 평균 1.5~2.1회 탬핑 수행

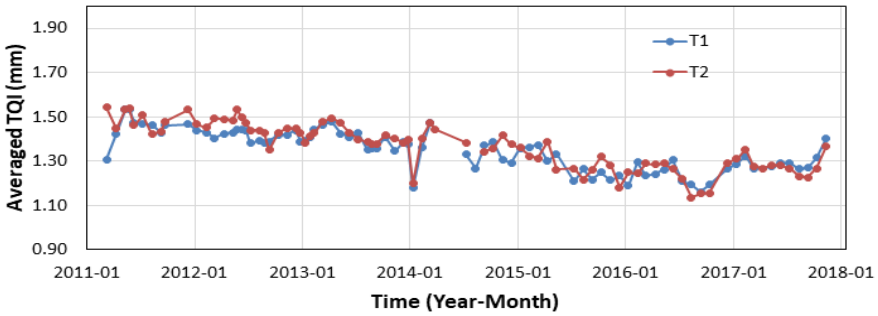
- 따라서 고속선 자갈궤도구간에 대해서 **2.0회/년의 탬핑횟수**를 적용

<단위 궤도연장(1km)에 대한 연간 누적 탬핑 연장>[단위: km]

연도	2011	2012	2013	2014	2015	2016	평균
상행(T2)	1.31	1.34	1.31	1.34	1.16	1.24	1.23
하행(T1)	1.41	1.71	1.27	1.19	1.02	1.16	1.27

○ 경부고속철도구간 궤도품질지수(TQI, Track Quality Index) 분석

- 자갈궤도 전구간에서 2011년~2017년까지의 평균 TQI 계산하여 전반적인 궤도품질을 분석하였음
- 유지보수 및 자갈궤도 안정화로 전반적으로 궤도품질이 향상되는 것으로 나타나나, 2016년 12월 SR 개통이후 통과톤수 증가로 유지보수에도 불구하고 TQI 증가 양상

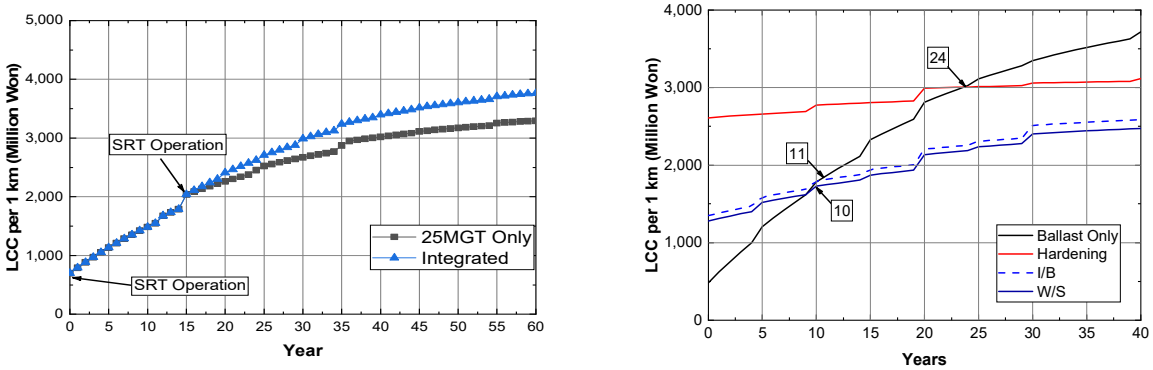


<경부고속철도 자갈궤도구간의 평균 TQI 변화 (2011년-2017년)>

(사) LCC 분석결과

○ 개량기술 적용후 40년간 LCC 비교를 통한 경제성 검토

- 경부고속선 자갈궤도구간이 15년 경과된 후에 개량기술 적용을 가정함



<기존자갈궤도 통과톤수 증가와 개량기술 적용시 LCC 변화 (1km 기준)>

○ I/B 침목이나 광폭침목(HF침목)으로 개량시 **11년**, **10년** 경과후, 급속경화궤도는 **24년**이 경과된 후에 기존 자갈궤도보다 경제성을 확보

- 개량기술 적용시 발생할 수 있는 편익을 반영하지 않았을 경우임

<개량기술별 40년후 소요비용 및 절감액 비교>

비용구분 (백만원)	자갈궤도	급속경화궤도	I/B 침목개량	광폭침목개량
소요비용 (40년간, 1km당)	3,716	3,114	2,584	2,473
절감액 (비율)	-	602 (16.2%)	1,132 (30.5%)	1,243 (33.5%)

(3) 개량기술별 편익 분석

(가) 개요

○ 개량시의 열차운행속도 향상 편익 분석하기 위하여 열차 주행성능 시뮬레이션(Train Performance Simulation, TPS) 수행

○ 고속철도 자갈궤도 개량기술의 편익

- 보수구간 서행으로 인한 운영 지연의 감소로 인한 편익 (급속경화궤도)
- 유지보수비 절감 편익
- 운영속도 향상에 따른 편익 (급속경화궤도)

(나) TPS 분석 기본 조건

○ 열차 주행성능 시뮬레이션을 위한 차량 : KTX 산천 단편성 (만차 기준)

○ 구간 : 경부고속철도 광명~오송~천안아산~대전~김천구미~동대구 구간

○ 운행패턴 : 각 역 정차, 정차 시간 2분

○ TPS 소프트웨어 및 차량 모델 입력 파라미터

- 소프트웨어: OpenTrack
- 차량 모델: KTX 산천

○ 유지보수로 인한 서행 편익(부편익) 분석

- 상하선별로 1개소 이내의 유지관리작업만 허용함. 각 구간에서의 서행 TPS 분석
- 유지보수에 따른 속도제한이 열차간 시격 거리(약 9 km)에 걸쳐 90 → 170 → 230 km/h로 단계별 적용

○ 전구간 320km/h 증속에 따른 편익

- 급속경화궤도 설계속도인 350km/h로 운행하기 위해서 전차선 개량, 제어 및 신호시스템 등도 함께 개량이 필요. 부대시설과 설비의 추가 개량없이 가능한 최고 속도인 320km/h에 대해서 TPS 분석 수행

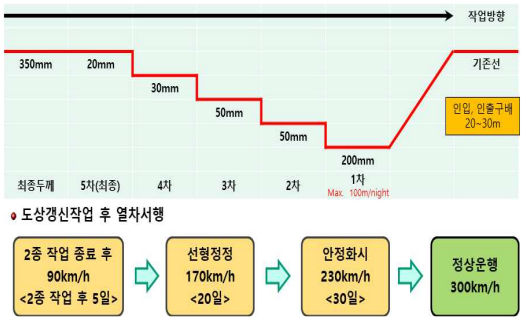
○ 열차주행성능 시뮬레이션을 이용한 통행시간과 에너지소모량 분석

(다) 서행 감소로 인한 편익 분석

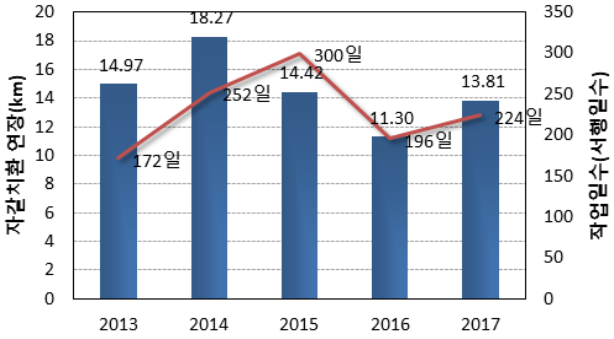
○ 경부고속철도 2종작업(자갈치환작업)으로 인한 단계적 서행과 서행일수는 아래와 같음

○ 급속경화궤도로 전구간을 개량시 자갈궤도와 같은 유지보수작업이 불필요함

○ 따라서 개량기술 적용시 유지보수작업에 의한 서행 감소로 발생하는 이용자들의 통행시간 절감편익과 가감속에 따른 전력소모량 변화와 이에 따른 동력비 절감편익 산정



<자갈궤도 갱환 작업과 단계적 서행>



<경부고속선 2종작업(자갈치환) 현황>

○ TPS 결과에 유지보수작업에 따른 서행운전 70일의 일평균 운행시간 차이를 정리하면 구간별로 **약 67초**에서 **119초** 가량 되는 것으로 나타남

○ 개량기술 적용시, **서행감소에 따른 편익**은 **년간 58-62억원** 정도로 추정됨

<유지보수 서행운전 통행지연>

구 분		지연시간	1일 평균
구간별 단축시간(초)	광명-평택	7,565	108.1
	평택-천안아산	4,670	66.7
	천안아산-오송	4,460	63.7
	오송-대전	5,325	76.1
	대전-김천구미	8,315	118.8
	김천구미-동대구	7,870	112.4

<유지보수작업 해소에 따른 절감편익>

연도	통행시간 절감편익	동력비 절감편익	유지보수작업 해소 편익
2021년	6,053	69	**6,122**
2025년	6,113	70	**6,183**
2030년	6,055	69	**6,124**
2035년	5,940	69	**6,009**
2040년	5,795	67	**5,862**

(라) 320 km/h 증속에 의한 편익 분석

○ 급속경화궤도로 전구간을 개량시 고속철도 운영속도를 320 km/h로 증속할 수 있으며, 이에 따른 편익을 산정

○ TPS 분설결과, 300 km/h에서 320 km/h로 증속시 구간별 단축시분은 아래 표와 같음

구 간	300 km/h 운행 운전시분(초)	320 km/h 증속 운전시분(초)	단축시분 (초)
광명-평택	844	815	29
평택-천안아산	321	316	5
천안아산-오송	630	630	0
오송-대전	830	830	0
대전-김천구미	1,276	1,248	28
김천구미-동대구	1,172	1,161	11
계	5,073	5,000	73

○ 제시된 단축시간에 해당구간 재차인원과 시간가치를 곱하여 통행시간 절감편익 산정

- 연간 편익은 일 평균 편익에 연 365일 중 주중(월-목) 209일, 주말 156일로 가정

○ 320 km/h 증속에 따른 통행시간 절감편익은 **연간 약 110~117억원**로 추정됨

- 320 km/h 증속은 급속경화궤도에서 가능하므로 유지보수저감에 따른 서행감소, 증속에 따른 운행시간단축에 의한 통행시간 절감편익과 동력비 편익의 합으로 산정

연도	통행시간 절감편익 (백만원/년)			연간 동력비 절감편익	편익 합계 (백만원/년)
	서행감소	320km/h 증속	합계		
2021년	6,053	8,090	14,143	-2,596	11,616
2025년	6,113	8,170	14,283	-2,632	11,721
2030년	6,053	8,094	14,149	-2,622	11,596
2035년	5,940	7,944	13,884	-2,602	11,351
2040년	5,795	7,749	13,544	-2,569	11,042

(마) 유지보수 절감 편익 분석

○ 자갈궤도 연간 보수비용은 1km 당 **0.95~1.38억원**. IB 또는 Hafe Frame 침목(HFS)로 개량할 경우는 **약 0.55억원**, 급속경화궤도로 개량할 경우는 **약 0.25억원**으로 감소

○ 경부고속선 자갈궤도구간(궤도연장 436.7 km)의 연간 유지보수비 절감편익

- 개량침목기술(IB 또는 WS) : 약 265~273억원
- 급속경화궤도 : 402억원

<자갈궤도 개량에 따른 보수비용 및 총유지보수 절감편익>

구분		자갈궤도 유지		자갈궤도 개량 (백만원)		
		25MGT	30MGT	IB	WS	급속경화
유지보수 (1km 기준)	Renewal	25.52	30.81	30.97	29.04	14.43
	Operational	69.87	106.99	25.04	25.02	10.15
	합계	95.39	137.8	56.01	54.06	24.58
총 유지보수비 절감편익 (전연장)		-		**26,460**	**27,311**	**40,183**

(마) 개량기술 적용으로 인한 편익

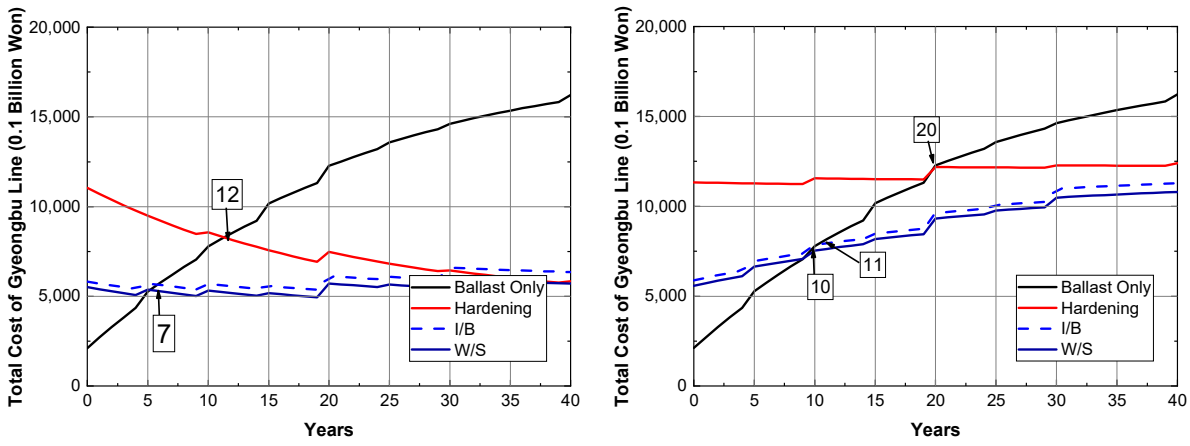
○ 경부고속철도 자갈궤도 구간에 개량기술을 적용시 편익을 고려한 총 유지보수 비용분석

- 유지보수편익과 320km/h 증속을 고려할 경우 급속경화궤도는 10년, 침목개량기술은 8년 경과후 기존 자갈궤도를 유지보다 경제적인 것으로 분석됨

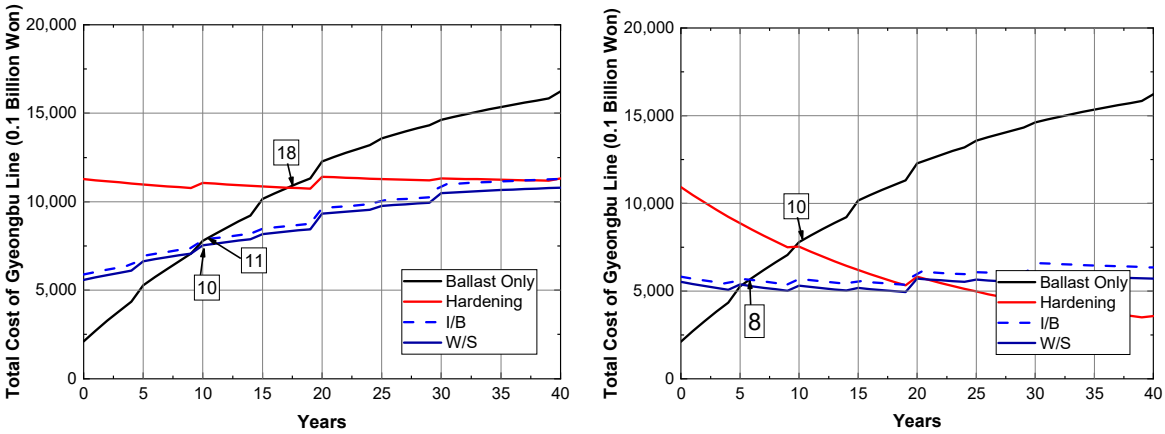
○ 유지보수 편익을 고려하지 않고 서행감소나 증속에 의한 편익만을 고려할 경우, 급속경화궤도는 18-20년, 개량침목기술은 10-11년 경과후 경제성 확보

<개량기술 적용으로 인한 편익을 고려한 총소요비용 손익분기>

편익	급속경화궤도	I/B	W/S (or HF)
유지보수편익	12년	7년	7년
서행감소 편익	20년	11년	10년
320km/h 증속운행	18년	11년	10년
유지보수+320km/h 증속	10년	8년	8년



<개량기술 적용 편익: (a)유지보수절감 편익, (b)서행감소에 따른 통행시간 절감편익>



<개량기술 적용 편익: (a) 320km/h 증속 편익, (b) 320km/h 증속과 유지보수 절감편익>

(4) 경제성분석을 통한 적정 개량기술 선정

(가) 개요

○ 침목개량기술(2세부)과 급속경화궤도(3세부) 개량기술 선정을 위한 경제성 분석

○ 급속경화궤도는 초기개량비용이 크나 유지보수비용이 침목개량기술에 비하여 낮음

○ 자갈궤도 상태가 매우 불량한 구간, 즉 궤도틀림이 빈번하게 발생하여 유지보수가 잦은 구간은 급속경화궤도가, 보통-불량 수준의 구간은 침목개량기술이, 양호구간은 기존 자갈궤도 존치가 경제적임

○ 따라서 경제성(LCC)분석을 통한 공법선정 방안 제시 필요

○ 자갈궤도 유지보수 비용은 유지보수횟수(탬핑횟수)에 의해 결정됨으로 탬핑회수를 기준으로 LCC 분석을 수행함

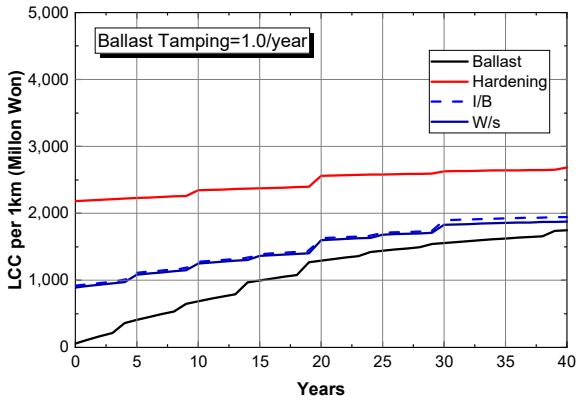
(나) 경제성 검토 기본 가정

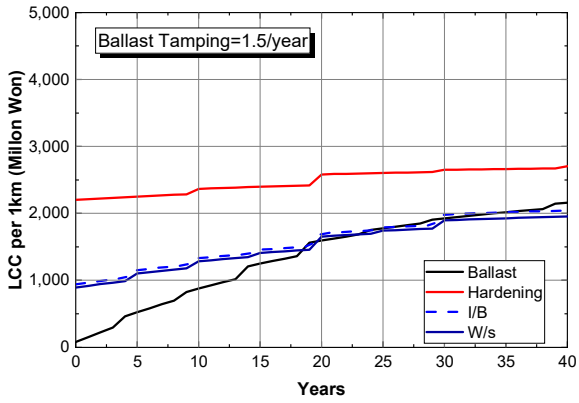
○ ‘개량기술별 LCC 분석’에 적용했던 조건을 동일하게 적용

○ 편익은 고려하지 않음
○ 침목개량기술 적용시, 기존 자갈궤도 탬핑횟수의 30% 적용 (연구목표 적용)
○ 공법선정기준: 기존 자갈궤도 존치시보다 총소요비용이 10~15년을 기점으로 개량기술의 경제성 확보에 초점

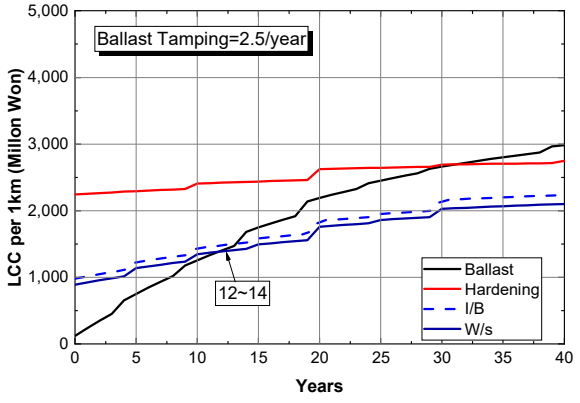
(다) 유지보수(탬핑횟수)에 따른 LCC 분석결과

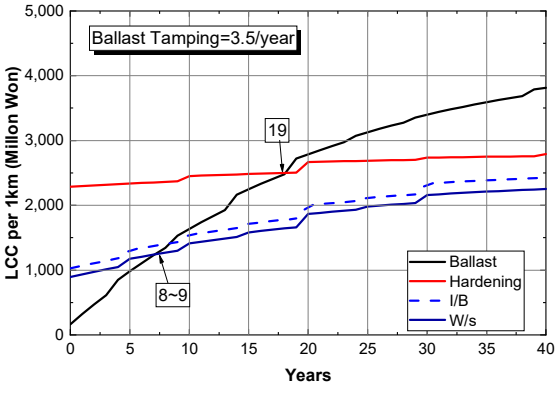
○ 기존 자갈궤도의 **연간 탬핑횟수가 1.5회 이하**일 경우에는 개량공법 적용이 경제성을 확보하기 어려운 것으로 나타남
○ 기존자갈궤도 연간 탬핑횟수 1.7-2.0회일 경우 약 20년 이후 개량침목기술이 경제적인 것으로 분석되나, 40년후 총 245백만원~546백만원, 즉 연간 평균 6.1백만원~13.7백만원의 경제성 확보로 개량효과 미미



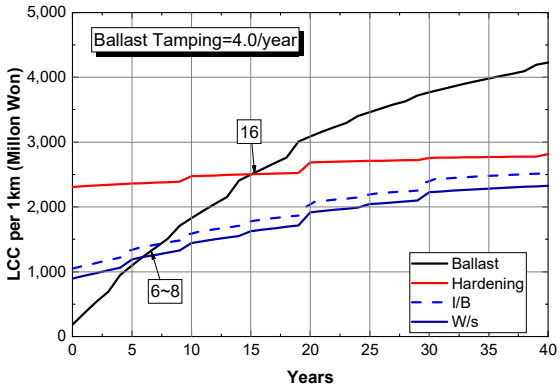


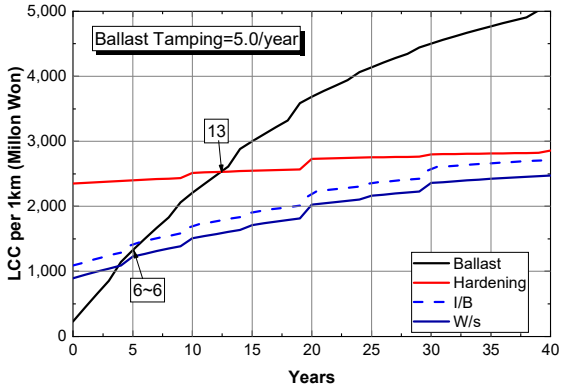
○ 침목개량기술 적용
- 연간탬핑횟수가 2.5회~3.5회 일 경우, 8년~14년 후에 경제성이 확보되는 것으로 분석
- 3.5회 이상의 탬핑회수에서는 궤도상태가 매우 불량할 것으로 판단되며, 급속경화궤도 개량시 약 18-19년의 시간경과후 경제성이 확보됨





○ 급속경화궤도 개량
- 연간 탬핑횟수가 4.0회 이상의 궤도는 매우 불량하다고 판단되며, 15~16년후 경제성 확보가 가능함으로 급속경화궤도 적용이 합리적일 것으로 판단됨





(라) LCC 분석 기반 개량공법 선정방안

○ 개량공법 선정시 LCC뿐만이 아니라 자갈도상의 상태, 유지보수관리자의 판단, 예산 등 다양한 요인에 기반하여 최종 선정을 해야 함

○ 경제성에 기반할 경우 아래표와 같이 제안할 수 있음

- 아래 표는 개량공법 선정을 위한 제안일뿐 다양한 여건을 고려하여 선정해야 함

연간 탬핑횟수 (회)	개량방안	비고
$0.0 \leq N_T < 1.5$	기존 자갈궤도 유지	최종 공법선정은 다양한 조건(도상상태, 유지보수정도, 통과톤수 등)을 고려하여 최종 결정 필요
$1.5 \leq N_T < 2.5$	기존 자갈궤도 유지 또는 침목개량기술	
$2.5 \leq N_T < 3.5$	침목개량기술	
$3.5 \leq N_T < 4.0$	침목개량기술 또는 급속경화기술	
$4.0 \leq N_T$	급속경화기술	

○ 자갈도상 상태를 평가하여 유지보수 및 TQI 이력을 종합하여 최종 개량기법 선정 필요

(5) 실용화 및 사업화 전략

(가) 국내 실용화 방안

① 국내 정책 및 시장 동향

○ 국내 전체 철도연장은 2017년 1월 기준으로 총 4,650km로 고속철도 596.3km, 일반철도 3,379.6km, 도시철도 674.2km 운영 중이며, 궤도시설은 궤도가 9,364.1km, 침목이 1,565만개, 분기기가 11,478틀 설치

○ “중장기 노후 철도시설 개량투자계획 수립 연구”(국토교통부. 2017) 에 따르면 일반철도 시설물의 30년 이상 경과된 비중은 38.6%이며, 선로선형 개량사업 및 레일 장대화, 중량화 개량 사업 추진 중

○ 도시철도는 전 노선(674.2km)중 30년 이상 경과된 노선은 서울시 1~4호선(119.9km), 부산시 1호선(16.2km)등 전 노선의 20.1%(136.1km)임. 서울교통공사에서는 궤도시설의 노후화로 유지관리비용이 과다하게 소요되는 자갈도상을 콘크리트 도상으로 교체하는 사

업을 추진

○ 제3차 철도시설 개량투자계획(2018년~2022년)에 따르면 궤도시설에 대한 개량계획을 국가철도와 도시철도로 구분하여 계획. 국가철도 개량에서는 노후궤도시설, 선로선형개량, 레일 장대화 및 중량화로 총 5,283억원을 집행 계획이며, 향후 15,697억원을 추가 예정

<국가철도 개량투자계획 총괄표> (단위:억원)

구 분		총 소요	기투자	개량투자계획 (2018~2022년)						장래
				계	'18	'19	'20	'21	'22	
궤도 시설 개량 항목	노후궤도시설개량	824	-	543	-	80	117	150	196	281
	선로선형개량	1,950	57	1,188	288	150	200	250	300	705
	레일장대화	20,866	2,603	3,552	540	600	792	800	820	14,711
	소 계	23,640	2,660	5,283	828	830	1,109	1,200	1,316	15,697

○ **경부고속철도 1단계 대개량 계획** : 2024년부터 단계적으로 개량시기가 도래함에 따라서 갱환계획 수립 (경부고속철도 1단계구간 궤도 상태평가 및 갱신방안 연구용역, 한국철도시설공단 2017)

- 개량침목 및 급속경화궤도 개량 공법 대안으로 제시

○ **경부고속철도 1단계 복복선화, 400km/h 증속, 콘크리트궤도 등에 검토**

- 평택-오송 2복선화 건설사업 타당성조사 및 기본 계획(건설교통부, 2019.08)
- 경부고속철도 평택~오송간 콘크리트궤도 시공방안 검토용역 (한국철도시설공단, 2019.09)
- 400km/h급 고속철도 상용노선 건설을 위한 기술검토 용역 (한국철도시설공단, 2019.07)

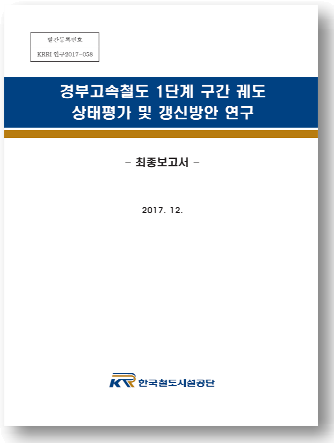
○ 경부고속 철도 1단계 자갈궤도구간 개량 방안 검토

→ 기존 자갈궤도 콘크리트 궤도화 (3세부 개량기술)

→ 광폭침목 기술 (2세부 개량기술)







② 국내 적용성 평가

○ 제3차 철도시설 개량투자계획(2018년~2022년)의 국내 기존선 개량계획에 자갈궤도 개량기술 적용가능성 분석

- 경부선, 경북선, 호남선 232.2km구간은 광폭침목 자갈궤도 보강기술이 경제적이라 판단됨

- 일산선의 경우 지하철 3호선과 연계되는 노선으로 유지보수가 많을 것으로 판단 급속경화 궤도기술을 제시
- 구조적 일체화로 소음, 진동 등 부가적 편익이 예상됨으로 일반철도 개량구간 중 터널 및 교량구간은 급속경화 궤도기술을 적용
- 서울교통공사 궤도개량 구간의 239.8km중 자갈궤도 구간은 급속경화 궤도기술을 적용하여 콘크리트 궤도화로 유지보수비의 절감 예상

<국내 기존선 개량공법 예상연장 및 예상개량 비용>

항 목		궤도연장 (km)	개량공법 예상연장(km)		예상개량 비용 (억원)		
			급속경화	침목개량	급속경화	침목개량	계
고속철도	경부고속철도	150	111.0	39.0	2,357.5	309.2	2,666.7
일반철도	경부선(세마-성환)	212.8	-	212.8	-	1,835.6	1,835.6
	경북선(점촌-개포)	13.0	-	13.0	-	112.1	112.1
	호남선(세마-성환)	6.4	-	6.4	-	55.2	55.2
	일산선(지축-대화)	76.4	76.4	-	1,622.6	-	1,622.6
도시철도	서울도시철도공사	239.8	239.8	-	5,093.1	-	5,093.1
계		698.4	365.2	333.2	9,073.2	‘2,312.1	11,385.3

○ 천안정차장 부근 궤도틀림 저감 및 횡저항력 확보를 위한 **개량침목 적용**
- 폭염시 방향틀림 발생구간에 횡저항력 확보 및 궤도틀림 저감을 위한 광폭침목 적용 예정

(나) 해외진출 방안

○ 세계 각지에서 영업 중인 고속선의 총 연장은 2010년 2월말 시점에서 1만 3,020km
- 일본 신간선 연장은 2,176km
- 중국은 4,322km 연장의 고속철도 노선을 개통 운영하고 있으며, 2020년까지 1만 6,000km 이상의 고속선 건설 예정
- 서유럽과 동아시아가 중심이며, 서유럽은 유럽연합(EU)내의 교통 네트워크 강화를 위해서, 인구가 조밀한 동아시아는 대도시 간을 고속열차로 연결, 운송구조를 개선하는 것으로 한층 더 경제발전을 하기 위해 고속철도 건설 계획중
- 미국도 11개 노선 13,700km의 고속철도를 건설 계획 중
- 브라질, 아르헨티나, 남아프리카, 폴란드 등의 국가에서 고속철도 건설계획 수립

○ 일본은 현재까지 256km의 선로를 TC형 포장궤도로 개량하였음
- JR 서일본, JR 중앙, JR 홋카이도 등에서도 별도의 선로개량작업을 진행 중이며, 점진적으로 증가할 예상

○ 영국의 경우, 100년이상 경과한 선로들이 많기 때문에 대부분의 구간이 개량이 요구되며, 1차적으로 Tube line 4개소 71km구간을 개량계획

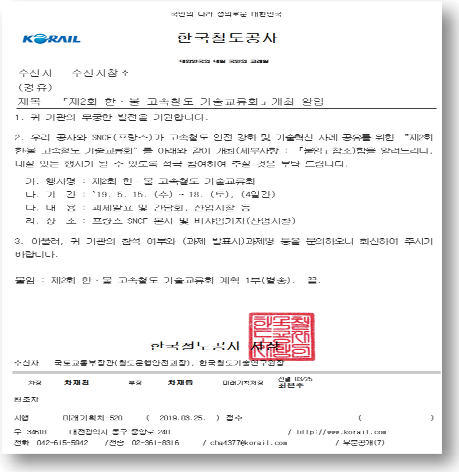
○ 향후 유럽을 중심으로 궤도구조개량은 폭발적으로 증가할 것으로 예상

○ 유럽 국가에서도 기존선의 속도 향상과 유지보수 저감을 위한 중요한 정책 및 기술개

발 목표로 하고 있음

○ **고속선 개량기술관련 프랑스 SNCF 공동연구 제안**

- 제2차 한불기술교류회 참석 및 고속선 개량기술(개량침목, 급속경화궤도) 발표
- 고속선 자갈궤도 개량기술관련 공동연구 제안. Working group 참여
- 해외 협동 연구 등을 통한 고속선 자갈궤도 개량기술 실용화 가능



한국철도공사

수신자 수신자참조
(경유)
제목 「제2회 한·불 고속철도 기술교류회」 개최 알림

1. 귀 기관의 무궁한 발전을 기원합니다.

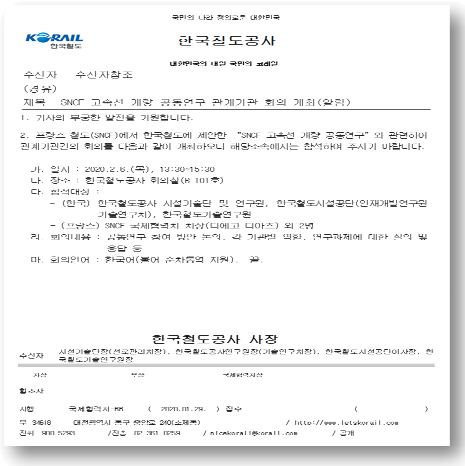
2. 우리 공사와 SNCF(프랑스)가 고속철도 안전 강화 및 기술혁신 사례 공유를 위한 「제2회 한불 고속철도 기술교류회」를 아래와 같이 개최(세부사항 : 「붙임」 참조)하게 되었으니, 내실 있는 행사가 될 수 있도록 적극 참여하여 주실 것을 부탁 드립니다.

가. 행사명 : 제2회 한·불 고속철도 기술교류회
나. 기 간 : '19. 5. 15. (수) ~ 18. (두), (4일간)
다. 내 용 : 세미나 및 산업시찰 등
라. 장 소 : 프랑스 SNCF 본사 및 비시인기지(산업시찰)

3. 아울러, 귀 기관의 참석 이부와 (과제 발표시)과제명 등을 문의하오니 회신하여 주시기 바랍니다.

붙임 : 제2회 한·불 고속철도 기술교류회 계획 1부(발송). 끝.

한국철도공사 사장



한국철도공사

수신자 수신자참조
(경유)
제목 SNCF 고속선 개량 공동연구 관계기관 회의 개최(알림)

1. 기사의 무궁한 발전을 기원합니다.

2. 프랑스 철도(SNCF)에서 한국철도에 제안한 "SNCF 고속선 개량 공동연구" 의 관련하여 관계기관간의 회의를 다음과 같이 개최하오니 해당부속에서는 참석하여 주시기 바랍니다.

가. 일시 : 2020.2.6.(목), 13:30~15:30
나. 장소 : 한국철도공사 회의실(8 101호)
다. 참석대상
- (한국) 한국철도공사 시설기술단 및 연구원, 한국철도시설공단(인재개발연구원 기술연구처), 한국철도기술연구원
- (프랑스) SNCF 국제협력처 차장(디에고 디아즈) 외 2명
라. 회의내용 : 신뢰구간 검어 방안 분석, 각 기관별 대응, 연구체제에 대한 의견 발표 등
마. 회의언어 : 한국어(불어 순차통역 지원). 끝

한국철도공사 사장

(다) 북한 철도 현황 및 개량공법 적용 방안

○ 북한의 육상수송망은 철도가 육상수송의 중심이고, 화물수송의 90%, 여객 수송의 62%를 분담

○ 북한의 철도정책은 전철화, 표준궤화, 중량화의 3대 정책을 축으로 추진

- 철도 중심의 수송체계는 1970년대 후반무렵 철도수송 능력 향상, 전철화, 철도신설이 이루어짐

○ 2016년 말 기준 북한의 철도 총연장은 5,226Km이며 이중에서 약 80%가 전철화

- 98%가 단선, 70% 이상이 일제시대에 건설되어 개보수 부진에 따른 시설 노후화 심각

<남북한 철도 총연장> (단위:km)

연도		2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
북한(총연장)		5,242	5,242	5,265	5,298	5,299	5,299	5,302	5,304	5,226
한국	총연장	3,381	3,378	3,557	3,559	3,572	3,588	3,590	3,874	3,918
	궤도연장	7,981	-	8,426	8,428	8,419	8,456	8,465	9,001	9,364

○ 철도노선 70%이상이 일제시대에 건설되어 궤도의 수명주기를 60년으로 가정 시 개보수 이상의 신설계획 또는 새로운 공법 적용이 필요함

○ 향후 남북한 교류확대를 통한 화물 및 여객 열차 이용량은 매년 급속도로 증가할 것이며, 이에 국내 철도 노선뿐 아니라, 북한철도 노선까지 자갈궤도 유지보수 비용이 이슈가 될 수 있음

○ 남북한 철도는 철저한 조사, 설계를 바탕으로 신설노선 및 개보수 구간에 저렴한 북한 노동력으로 자갈궤도 초기비용을 절감할 수 있으며, 향후 국내보다 더 큰 유지보수비용 절감을 기대할 수 있는 **자갈궤도 개량공법**을 적용 검토 필요

바. 실용화를 위한 연구성과 홍보

(1) 연구단 홍보물 제작 및 배포

(가) 연구단 홍보 동영상, 팜플렛 제작

(나) 연구단 홍보 e-catalog 웹게시: http://improveballast.com

(2) 학술대회 홍보부스 및 특별세션 개최를 통한 연구성과 홍보

순번	구분	일시	주제
1	한국철도학회 춘계학술대회	2014.05	궤도안전성 향상방안 및 탈선방호벽에 대한 기술토론회
2	한국철도학회 춘계학술대회	2015.05	자갈궤도 개량기술 개발(연구단) 연구 추진현황 및 향후 계획에 대한 전문가 의견 수렴
3	2016 CIVIL EXPO	2016.10	연구단 연구성과 홍보
4	콘크리트학회 춘계학술대회	2017.05	철도 궤도에 적용된 최신 콘크리트 기술
5	한국산학기술학회 추계학술대회	2017.12	4차 산업혁명 시대에 대비하는 철도 유지보수 합리화
6	한국철도학회 춘계학술대회	2018.05	자갈궤도 유지보수 현황과 저감을 위한 최신 개량기술 소개
7	한국철도학회 추계학술대회	2019.11	자갈궤도 유지보수 저감을 위한 개량기술 소개

(3) 전문가 초청 세미나 개최

순번	성명	소속	일시	주제
1	궤도기술위원회	한국철도학회	2016.04	급속경화궤도 설계 및 시공에 대한 전문가 의견 수렴
2	강태구	한국철도공사	2016.06	고속철도 자갈궤도 유지보수 기술 국제 세미나
	Fusayoshi Aoki	Railway Technical Research Institute		
	Klaus Riessberger	Graz Univ. of Technology		
	이일화	한국철도기술연구원		
3	Erol Tutumluer	UIUC	2017.09	Research on Railroad Track Substructure with Special Emphaiss on Ballast Behavior
4	Toshiharu KISHI	Tokyo Univ.	2018.11	Ballast Track Improvement to Reduce Maintenance and Enhance Operating Speed
	Osanai Makihro	Japan railway technology Ltd.		
	Yoshinori Matsuda	JR East		
	Gong Quanmei	Tongji Univ.		
	Michael Kim	FDOT		
5	안창열	한국철도공사	2019.05	철도시설물 유지관리, 상태평가, 보수보강 및 개량 기술에 대한 철도운영기관과의 간담회

(4) 기타

순번	구분	일시	주제
1	‘건설기술’ 신문 기사	2019.03.11	‘하루 100m 시공’ 고속철도 자갈궤도 급속경화공법 개발
2	철도기술연구원 블로그	2019.08.29	더 효율적이고 과학적인 철도궤도연구, 최영태 박사
3	제2차 한불교류회 발표	2019.05.17	한국-프랑스 철도관련 기술 교류/고속선 개량기술 소개 → 프랑스 SNCF 개량기술관련 공동연구 제안
4	궤도협의회 발표	2018.06.15 2019.06.21	자갈궤도 유지보수 저감기술 (소개와 적용방안) 자갈궤도 상태평가 기법

(2세부)

가. 자갈궤도 궤도구조 개선 방안

(1) 설계정립 및 요구조건

(가) 개선방안

○ 자갈궤도의 구조를 개선하는 방안은 크게 3가지로 볼 수 있음

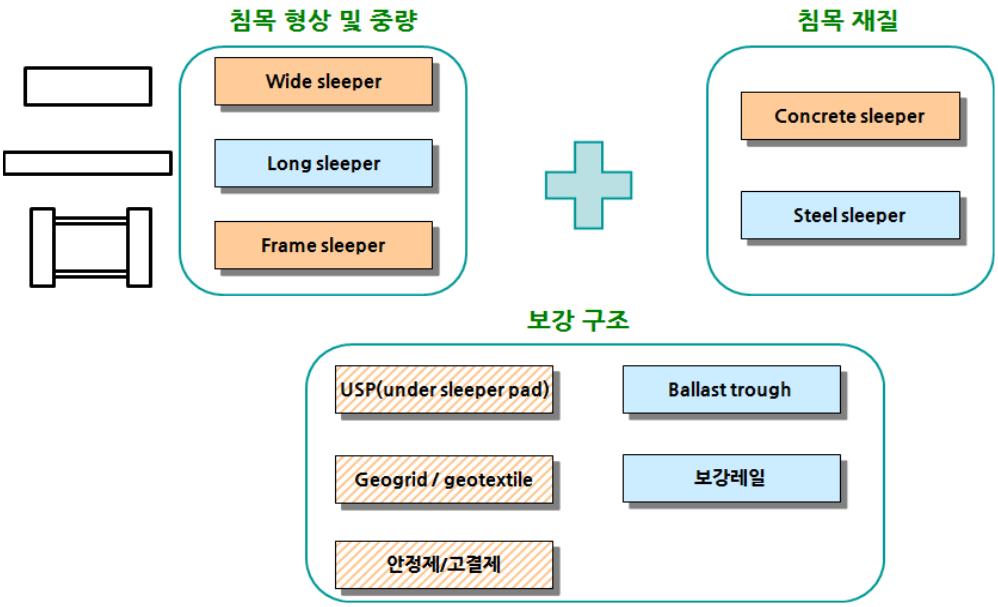


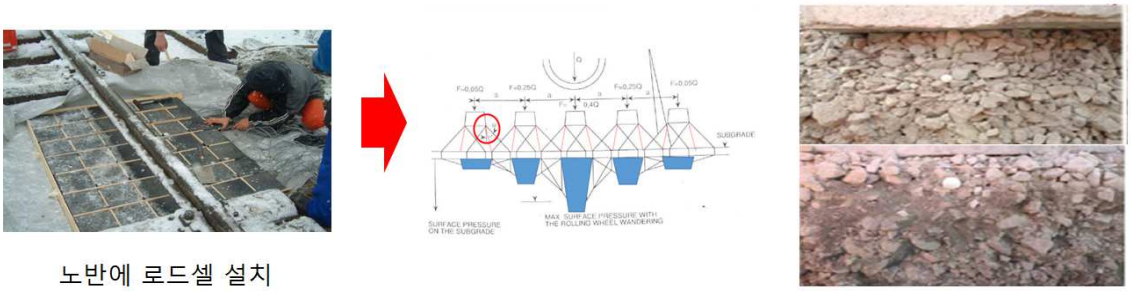
그림 168 궤도구조 개선방안에 대한 설계 정립 방안

(나) 침목 직하부 하중분포

○ 기존침목의 설계이론 실험적 검토 : 침목 직하부 하중 집중(**하중분산 각도** : 45° → 17°)

○ 침목저부와 도상자갈의 접촉면적 부족 ⇒ 자갈마모에 의한 분니현상 발생

○ 취약구간(교량, 터널, 분기기, 신축이음매 전후 및 급곡선부, 연약지반 등) 발생
⇒ 현재 취약구간에 대한 근본적인 해결 해소방안 부재



노반에 로드셀 설치
(하중 영향 확인 TU Graz)

침목 직하부 하중집중 확인 (17°)

접촉면적에 따른 자갈마모도 차이

그림 169 침목 직하부 하중 분포 계측

○ 독일철도 조사에 따르면 오탁(汚濁)된 도상은 약 30° 의 압력분산각도를 갖고 있음. 교체된 자갈도상에 설치된 밸러스트 매트의 눌린 자국을 조사한 결과에 따르면, 이들의 눌린 자국은 대략 20° 로 더 작은 압력분산각도를 가짐.

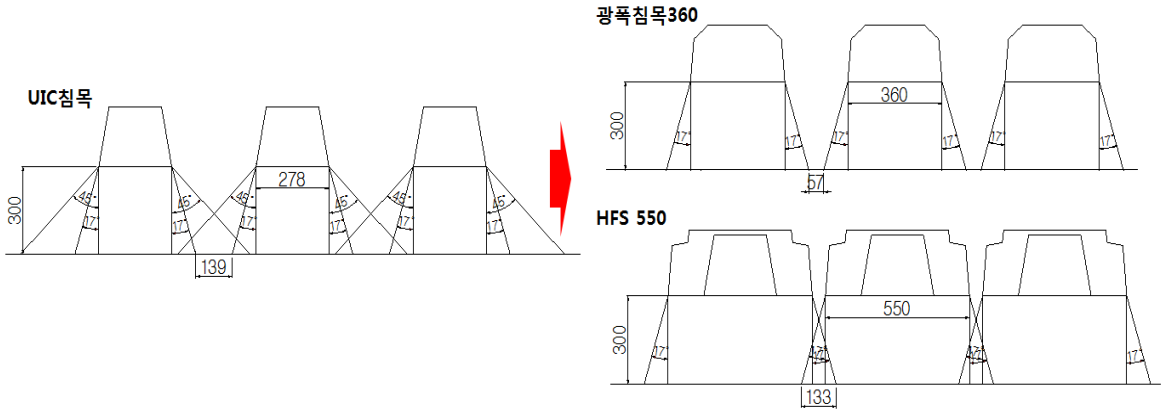


그림 170 침목에서 자갈층에 떨어지는 압력분산 각도

(다) 설계 요구조건 도출

① 궤도틀림 진전률 저감 목표치

○ 새롭게 개발된 궤도 개량 구조 시스템에서 발생되는 궤도틀림의 진전률은, 기존 횡침목을 사용한 경우 발생된 **궤도틀림 진전률의 30% 이내**를 목표로 함

○ 이를 달성하기 위해서 침목 하부에 발생되는 응력을 기존 대비 40±10% 수준으로 저감시키고, 도상에 발생되는 가속도를 기존 대비 80±10% 수준으로 낮추는 것을 목표로 함

○ 궤도틀림 진전률

- 아래 그림에서와 같이 궤도 부설 직후나 1, 2종 기계 작업 이후 초기 궤도 품질에서부터 열차하중 재하에 따라 궤도 품질이 악화되어 가는 추이를 나타내는 그래프에서, 시간에 따른 궤도품질(or 궤도틀림) 변화 기울기를 의미함

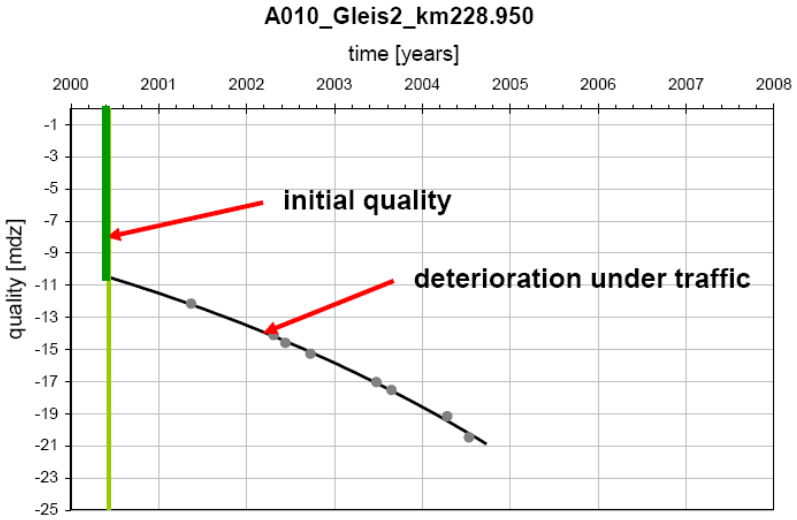


그림 171 오스트리아의 궤도품질 진전 추이(예)

② 동적 안전성

㉮ 평가기준

○주행안전 : 윤중 변동율(감소율) 0.37 이하

○승차감 : 차체 상하 진동가속도(편진폭)의 최대값 2.0m/s^2 이하

○구조안정성: 레일응력 : 90MPa 이하

표 1 EN 1990:2002에서 정한 승차감 확보를 위한 차체가속도 기준

차체가속도(m/s2)	승차감레벨
1.0	Very good
1.3	Good
2.0	Acceptable

㉯ 검토방법

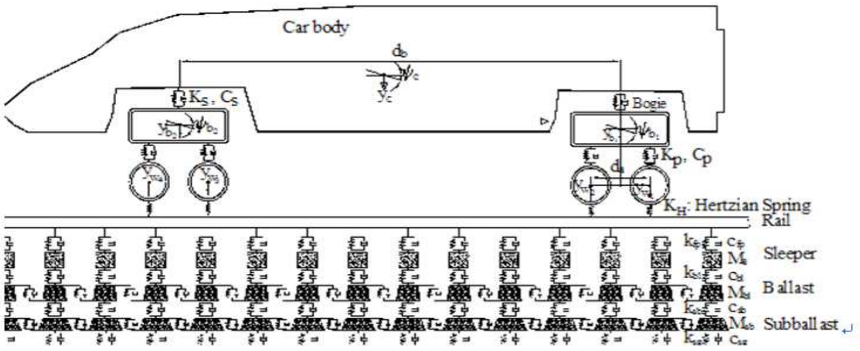


그림 172 해석모델(예)

○아래 조건과 동등 또는 이상으로 검증된 모델을 적용.

- 일반
  - 1-D vertical motion model
  - 시계열 해석 Time-series analysis
- 차량모델
  - 차륜-레일 상호작용 고려(moving mass, Hertzian nonlinear spring)
  - 1차체, 2대차 (rigid body) 이상 포함
  - 1, 2차 현가장치 (스프링-댐퍼 시스템) 포함
- 궤도모델
  - 레일, 침목, 도상(1층 or 필요시 다층)의 3중보 모델
  - 궤도틀림은 경부고속선에서 측정된 궤도틀림 데이터를 사용
- 하부구조
  - 일반 토노반, 교량구간(C형 매트 고려), 접속구간 포함

(2) 개념설계

(가) 광폭 침목 + USP

① 시스템 개요

- ○기존 횡침목의 형태를 유지하면서 도상 전달 압력을 최소화하기 위해, **침목의 폭을 넓혀 광폭침목의 형태**를 제안
- ○또한 기존 침목은 주로 콘크리트 침목으로써, 콘크리트 저면이 딱딱하기 때문에 자갈 도상과의 접촉면적이 작고 양 단부에 응력이 집중됨으로써 도상의 열화를 촉진시키고 있음. 따라서 콘크리트 침목과 도상의 직접적 접촉을 완화하고 접촉 면적을 넓힐 수 있는 USP (under sleeper pad)를 사용
- ○광폭침목에 의한 압력 저감, 그리고 USP에 의한 접촉 완화 효과를 동시에 보기 위해 광폭 침목과 USP를 함께 사용함

② 시스템 개념도

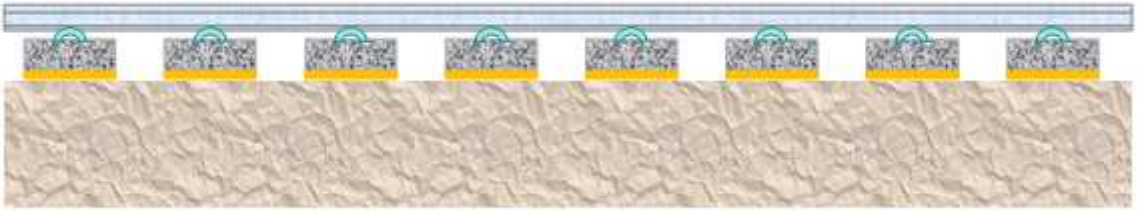


그림 173 [광폭 침목 + USP]의 시스템 개념도

③ 특징

- ○기존 횡침목의 개념을 그대로 유지하여 유지보수 작업자의 혼선을 최소화할 수 있음
- ○광폭침목의 폭을 40cm 이하로 유지할 경우 기존 MTT 장비 작업 그대로 수행 가능
- ○**도상 종저항력 및 횡저항력은 기존 횡침목에 비해 우수**
- ○기존 횡침목에 비해 중량이 증가하므로, 인력 침목 교체작업 난해
- ○광폭침목의 폭이 40cm 이상이 될 때 기존 MTT 장비의 blade 너비 조정 필요 또는 STT 이용 필요

(나) Intermediate block(I/B)

① 시스템 개요

- ○기존 횡침목을 그대로 사용하면서 침목과 침목사이에 I/B(intermediate block)을 삽입하여 오스트리아의 frame sleeper와 유사한 거동을 모사하는 보조 침목 구조
- ○I/B는 인접 침목과 전혀 연결되지 않고, 체결장치를 통해 레일과 연결되는 구조
- ○I/B를 통해 **축중의 길이방향 분산을 유도**하고, **침목과 도상이 접촉하는 유효면적을 극대화**하여 도상의 열화를 억제하는 방안
- ○기존침목에 USP가 적용되지 않은 경우 I/B도 USP를 적용하지 않고, 기존 침목을 회수하여 USP를 설치한 뒤 다시 부설하는 방식으로 할 경우 I/B도 USP를 적용

② 시스템 개념도

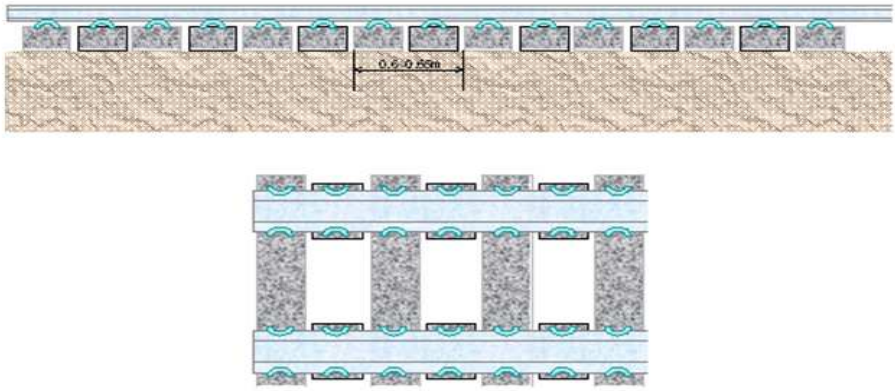


그림 174 I/B의 시스템 개념도

③ 특징

○ 기존 횡침목을 그대로 사용하여 **경제적 궤도 보강**이 가능

○ 레일 저부에 I/B가 위치하므로 MTT 장비작업에 방해를 받지 않으나, STT의 blade 방향 조정을 통해 레일 저면으로 자갈을 모아주는 작업 필요

○ I/B를 삽입하는 작업이 단순하여 단기간 장거리 작업을 할 수 있는 시공 효율성

○ 침목지지 간격이 기존의 1/2로 윤중 변동이 작아지나, 체결 장치 수 증가

○ **도상 횡저항력이 우수**하여 기존선 급곡선부의 장대화에도 활용 가능

(다) Under sleeper pad(USP)

○ 유럽 UIC의 USP 강성 분류와, USP 적용분야 제안에 따라 Medium stiff나 Stiff한 USP를 사용.

표 2 강성에 따른 USP 분류

USP 분류	강성
Stiff	$0.25N/mm^3 < C_{stat} \leq 0.35N/mm^3$
Medium stiff	$0.15N/mm^3 < C_{stat} \leq 0.25N/mm^3$
Soft	$0.10N/mm^3 < C_{stat} \leq 0.15N/mm^3$
Very soft	$C_{stat} \leq 0.10N/mm^3$

표 3 강성에 따른 USP 적용 분야

USP 적용분야	강성		
	Soft	Medium stiff	Stiff
궤도 품질 개선		○	○
접속부		○	○
도상 두께 부족 부분		○	○
장파장 corrugation 저감		○	○
ground-borne 진동 저감	○	△	

(라) 하중조건

○ 열차의 설계하중은 철도의 건설기준에 관한 규정(국토교통부고시 제2013- 236호)에 의거하여 **KRL2012 표준활하중(220kN)을 적용**하며 설계속도는 350km/h. 캔트부족량 및 동적충격계수는 철도설계편람(궤도편, 2010)을 참조. 설계편람에 따르면 궤도틀림 및 캔트부족 또는 캔트초과에 기인하는 윤하중을 고려한 유효하중은 아래식 1)을 이용하고 차륜/레일 간 요철, 레일절손 등에 기인하는 차량 탄성하 부분의 상하진동에 따른 예외적인 충격에 의한 동적하중은 식 2)를 이용.

$$Q_{eff} = Q \times 1.2 \quad \text{(식 1)}$$

$$Q_{dyn} = Q_{eff} \times DAF \quad \text{(식 2)}$$

$$DAF = 1 + t \cdot \Phi (1 + 0.5 \frac{V-60}{190}) \quad \text{(식 3)}$$

여기서 Q : 정적윤중

Q_{eff} : 유효윤중

Q_{dyn} : 동적윤중

DAF(Dynamic Amplitude Factor) : 동적할증계수

t : 확률의 신뢰구간에 좌우되는 표준편차의 가중치(3)

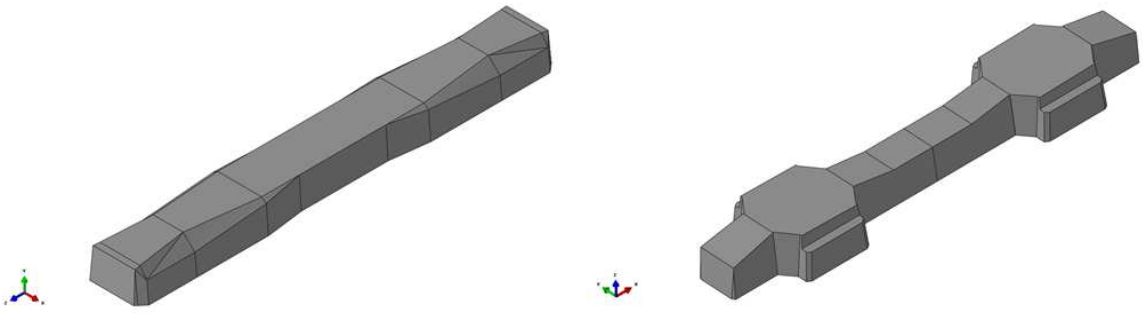
Φ : 궤도 품질에 좌우되는 계수(0.1)

(3) 개량형 침목 구조해석

(가) 구조해석 모델

① 기하학적 모델

○ 단면 변화에 따른 취약부(단면 변화가 급격하게 발생하는 부분)를 검토할 수 있도록 침목 형상을 그대로 모델링하였고, mesh size는 20mm인 사면체 요소로 적용하였음.



(a) 자갈궤도용 광폭침목(0.36m×2.6m)　　(b) 자갈궤도용 반격자침목(0.55m x 2.6m)

그림 175 개발 침목의 기하 모델링

② 적용 물성치

표 4 적용 물성치 (prEN 13230-6 참조)

Material Properties	Track Component	
	Sleeper(Solid Element)	Ballast(Spring Element)
Modulus of elasticity E(N/mm^2)	3.5×10^4	-
Modulus of platform E(N/mm^3)	-	0.1
Poisson's ratio(ν)	0.2	0.2

③ 하중 및 경계조건

○ 개량 침목에 재하하는 하중은 수정 침목 설계법에 의해 126.46kN의 설계하중(Design Rail Seat Load)을 적용하였음.

○ 도상 반력 분포는 UIC 713R에서 제시하고 있는 등분포(consolidated), 부분등분포(partially consolidated) 형태를 적용함.

○ 하중 재하 방법은 Design Rail Seat Load를 도상 반력으로 침목 하면에 재하(case-1)하거나, 도상을 스프링으로 고려하는 경우(case-2)는 레일 좌면부에 직접 하중을 재하함.

○ 도상을 스프링으로 고려하는 경우, 도상 지지력계수(0.1N/mm^3)에 mesh 면적(mm^2)을 고려하여 스프링 계수(N/mm)로 치환한 값을 적용함.

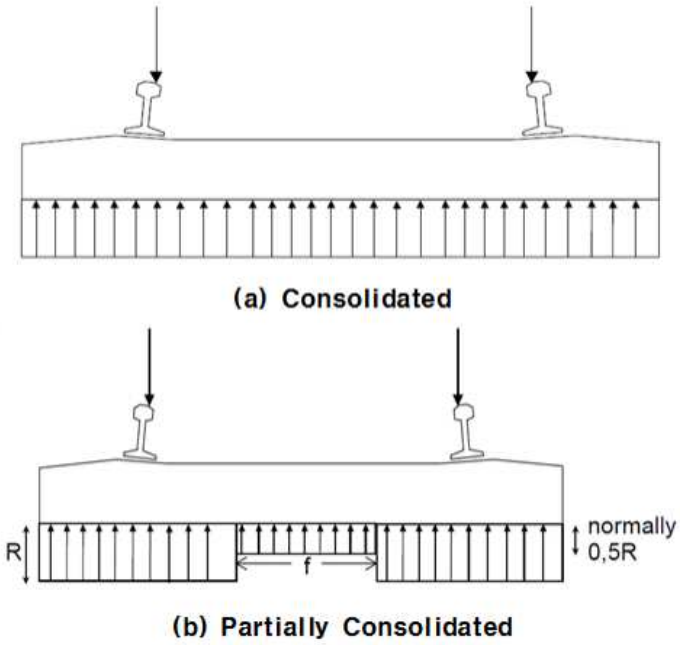
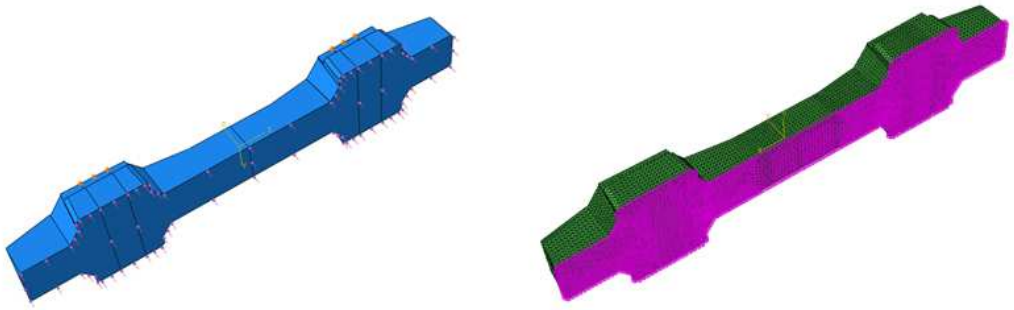


그림 176 도상 반력 분포



(a) Rail Seat Load를 도상반력 형태에 따라 하중으로 재하(case-1)

(b) 도상 지지력을 스프링 계수로 치환(case-2)

그림 177 도상 경계조건을 고려하기 위한 모델링 기법

(나) 구조해석 결과

○ 도상에 대한 경계조건은 그림 3과 같이 case-1, case-2로 분류하여 각각에 대해 **도상반력 등분포(consolidated) 및 부분등분포(partially consolidated)**일 때의 해석을 수행함.

③ 해석 결과 정리

○ 광폭침목 및 HFS에 대해 UIC 713R에서 제시된 2가지 도상반력 분포를 고려하여 구조해석을 수행하였으며, 그 결과를 다음 표 5에 정리하였음.

표 5 침목 구조해석 결과

Sleeper Types	Sleeper Reaction Cases	Analysis Methods	Rail Seat Section			Sleeper Center Section	
			Bending stress (MPa)	Bending moment [γi=1.6] (kN·m)	Bending stress [2-Dir.] (MPa)	Bending stress (MPa)	Bending moment [γi=1.6] (kN·m)
Wide Sleeper (B360)	Consolidated	case-1	5.11	16.88	0.63	4.04	10.75
		case-2	6.10	20.14	1.07	6.29	16.75
	Partially Consolidated	case-1	5.02	16.58	0.65	2.65	7.06
		case-2	6.55	21.63	1.07	3.04	8.10
Half Frame Sleeper	Consolidated	case-1	2.75	21.17	0.12	4.77	10.05
		case-2	2.76	21.25	0.18	7.82	16.48
	Partially Consolidated	case-1	2.30	17.71	0.12	3.15	6.64
		case-2	2.73	21.02	0.17	6.33	13.34

(4) 개량형 침목 시스템 해석

○ 궤도 시스템의 구조적 안정성을 검증하기 위하여 구조해석을 통한 레일의 처짐 및 응력, 궤도 각 구성요소에 대한 응력을 검토함.

○ 광폭침목, HFS(Half Frame Sleeper)의 해석결과와 기 수행한 기존침목과 I/B(Intermediate Block)의 해석결과를 비교·분석하여 개량용 침목의 정량적 효과를 검토함.

(가) 궤도 모델링

○ 유한요소 해석을 통한 구조검토를 위하여 3차원 수치해석 모델을 적용함. 해석 모델의 횡단면은 그림 11과 같으며, 해석 모델링의 전경은 그림 12와 같음.

○ 레일은 60E1으로 Beam element(B31)를 사용하였으며, 체결장치는 spring element와 동일한 기능을 갖는 connection element(6 DOF)를 사용하였음.

○ 침목은 Solid element(C3D4, C3D8)를 적용하였으며, 침목 간격은 0.6m로 함. 도상은 Solid element(C3D8)를 사용함.

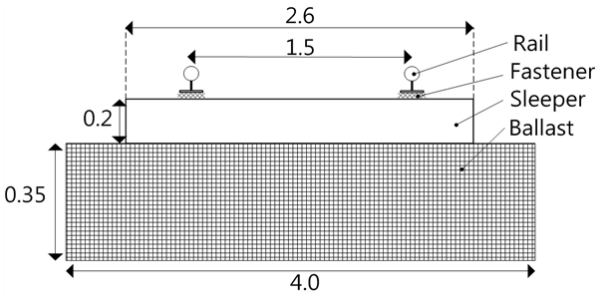


그림 178 구조 해석 모델 - 횡단면

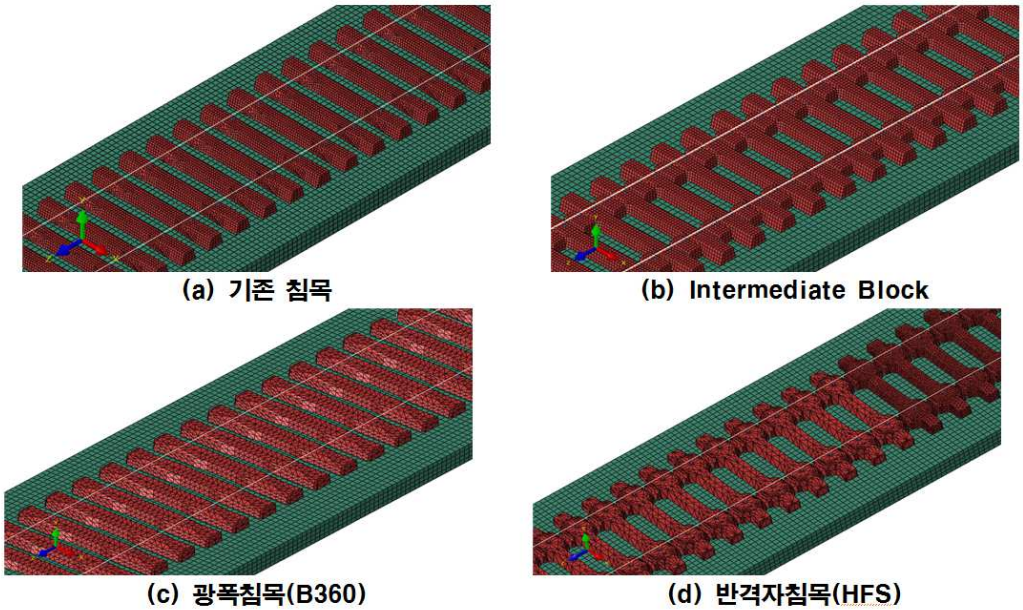


그림 179 해석 모델 전경

표 6 물성치

Track Components	Material Properties		
	Modulus of elasticity, E (N/m^2)	Poisson's ratio, ν	Unit weight, γ (kg/m^3)
Rail	2.1×10^{11}	0.3	7,830
Sleeper	3.5×10^{10}	0.22	2,600
Ballast	2.1×10^{8}	0.27	1,650
Fastener	X, Y, Z translation : 2.0E+05 N/mm		
	X, Y, Z rotation : 6.0E+07 N · mm/rad		

○ 노반의 경우 도상하면에 1절점의 spring 요소를 사용하였으며, 스프링의 강성은 요소 크기를 고려하여 표 7과 같이 노반상태가 양호한 경우를 가정하여 산정함.

표 7 노반탄성계수 및 지지력계수

노반상태	E_{v2}(N/mm^2)	K_{30}(N/mm^3)
양호	100	0.111

(나) 하중 및 경계조건

○ 하중의 위치는 고속여객열차 KTX를 기준으로 축간거리 3m를 고려하여 2개의 축중을 재하하였음. I/B에 대한 구조해석은 기존 침목에 하중을 재하하는 경우와 I/B 상에 하중을 재하하는 경우로 분류하여 수행하였으며, 하중재하 위치는 아래 그림과 같음.

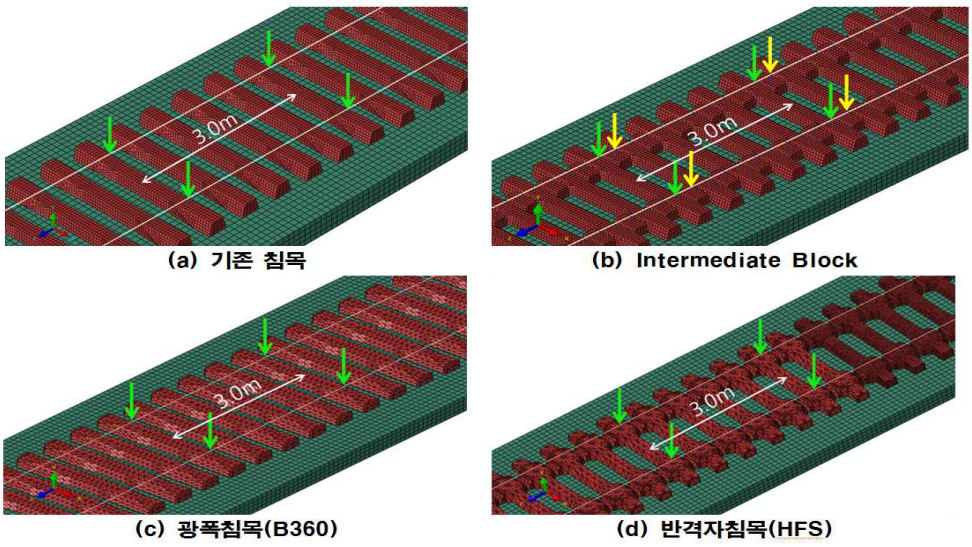


그림 180 하중 재하 위치

○ 경계조건은 레일의 양단을 6자유도에 대해 모두 구속하였으며, 도상 하면의 경계조건은 연직방향 스프링으로 연결하여 노반 지지력에 대한 영향을 고려하였음.

(다) 해석 결과

○ 궤도시스템의 구조적 안정성을 확인하기 위하여 궤도 각부의 허용값과 비교하였으며, 레일 처짐, 레일 휨응력, 침목 지압응력, 도상 압력, 노반 압력을 검토하였음. 검토 시 각 궤도 구성품은 다음과 같은 표준편차 가중치를 적용하였음.

- t = 1(확률 68.3%) : 접촉응력, 노반 구조계산에 적용
- t = 2(확률 95.4%) : 횡하중, 도상 구조계산에 적용
- t = 3(확률 99.7%) : 레일 응력, 체결장치, 침목 구조계산에 적용

○ 기존 침목, I/B, 광폭침목(B360), HFS에 대한 정적 구조해석 결과는 그림 14~20과 같으며, 레일 처짐, 레일 휨응력, 침목 지압응력, 도상 압력, 노반 압력은 **모두 허용치 내 거동**을 하는 것이 나타남.

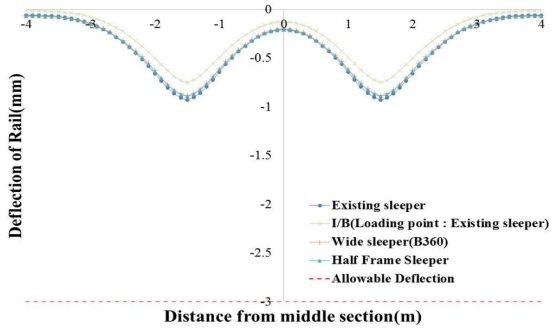


그림 181 레일 처짐 선도

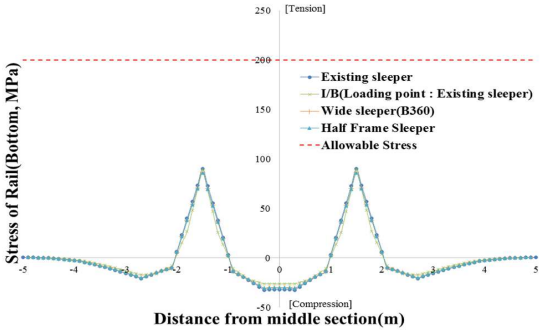


그림 182 레일 휨응력 선도

○ 기존 침목의 레일 처짐 대비, **I/B는 약 19%, 광폭침목은 약 5%, HFS은 약 4%의 처짐 감소**가 나타남.

○ **레일 휨응력**은 하중이 재하되는 지점에서 최대 인장응력이 발생하며, 기존 침목을 적용하는 경우와 비교하여 I/B의 경우, 하중 재하 지점의 인장응력은 감소효과가 거의 없지만 인근 지점에서 중앙부에 거쳐 타 개량용 침목에 비해 처짐 감소효과가 크며, **광폭침목은 약 3%, HFS은 약 5%의 감소**효과가 있음. 이에 반해 압축응력은 I/B인 경우 약 18%, 광폭침목은 4%, HFS은 약 5%의 감소효과가 있음.

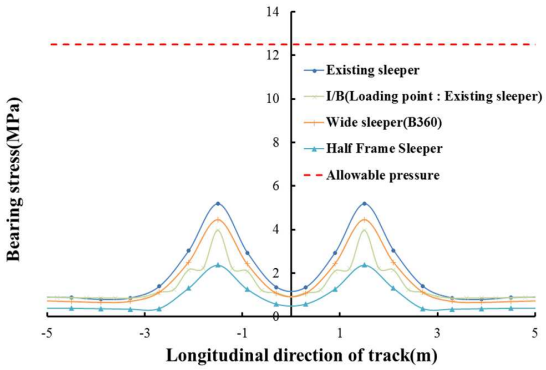


그림 183 침목 지압응력 선도

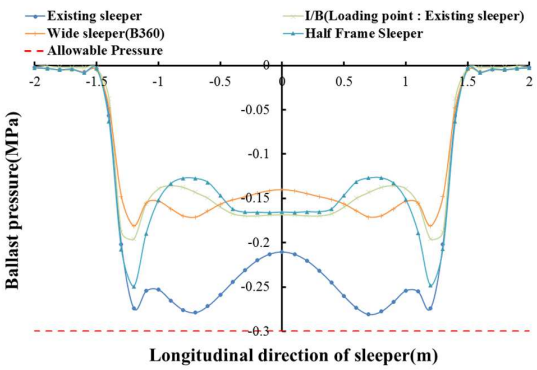


그림 184 도상 압력(침목길이방향)

○ **침목 지압응력**의 경우, 레일 저면과 접촉면적을 증가시킨 **HFS는 약 54%, 광폭침목은 약 14%의 감소**효과가 있으며, 침목 간격의 감소시킨 **I/B는 약 24%의 감소**효과가 있는 것으로 나타남.

○ 침목 길이 방향의 도상 압력 분포를 검토한 결과, 침목 단부는 기존 침목에 비해 광폭침목(약 36%), I/B(약 30%), HFS(약 11%) 순으로 저감효과가 큰 것으로 나타남. 레일 좌면부의 도상압력은 HFS(약 55%), I/B(약 50%), 광폭침목(약 40%)의 순으로 저감효과가 큼.

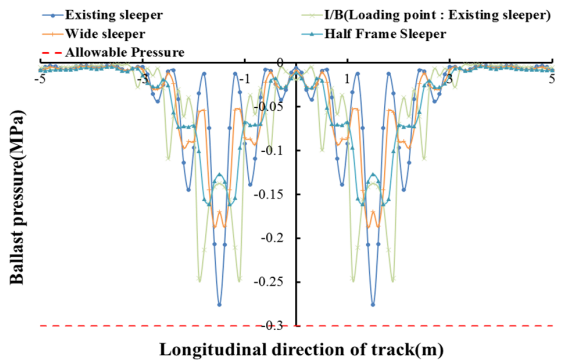


그림 185 도상 압력(레일길이방향)

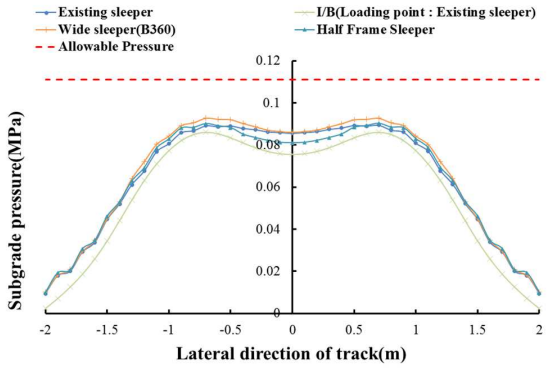


그림 186 노반 압력(침목길이방향)

○ 레일 길이방향(레일 좌면부 직하부)의 도상 압력 분포를 검토한 결과, I/B의 경우 기존 침목과의 틈에서 국부적으로 0.246 MPa의 큰 압력이 발생하지만 기존 침목(0.276 MPa)에 비해 약 11%의 도상압력이 감소함. **광폭침목과 HFS의 경우, 기존 침목에 비해 각각 약 32%, 41%의 도상압력 감소**효과가 있음.

○ 침목 길이방향으로 노반 압력 분포는 축중이 재하되는 지점에서 기존 침목과 광폭침목, HFS에서 최대 0.092 MPa으로 유사하게 나타나는데 반해 I/B의 경우, 0.086 MPa로 다소 감소함. 또한 I/B의 경우, 기존 침목에 비해 침목 중앙부에서 최대 12%의 노반 압력이 감소함.

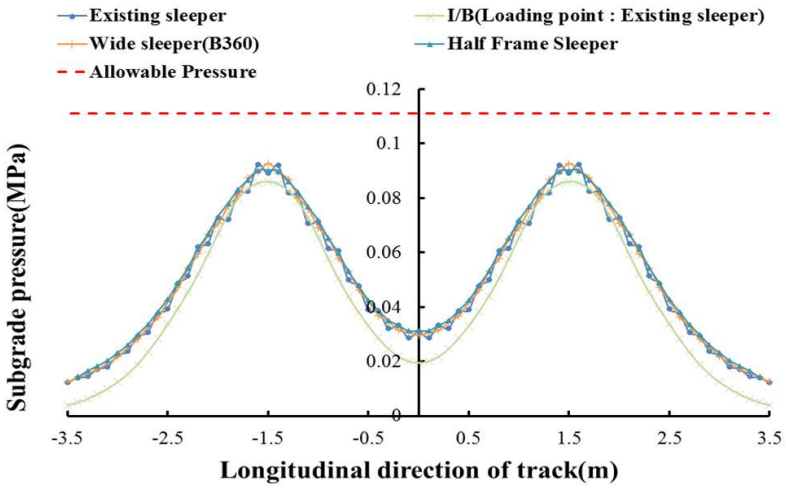


그림 187 노반 압력(침목길이방향)

○ 레일 길이방향으로 노반 압력 분포를 검토한 결과, 축중이 재하되는 지점에서 기존 침목과 광폭침목은 최대 0.092 MPa이며, 레일 길이방향으로 유사한 압력 분포가 나타남. I/B의 경우, 기존 침목에 비해 약 37%의 노반 압력 감소가 나타남. 그러나 HFS의 경우, 침목 중앙부에서 기존 침목에 비해 약 7%의 도상압력 증가가 나타나는데 이는 HFS 적용 시, 타 침목에 비해 중앙부에 하중(HFS의 자중)이 증가하기 때문임.

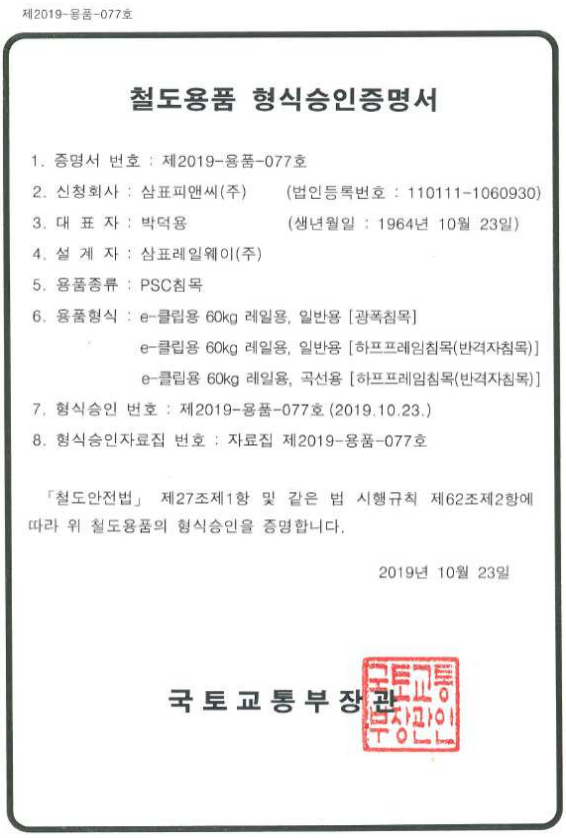
○ 정적 구조해석을 통해 개량용 침목에 대한 효과를 분석한 결과, 레일 처짐, 침목 지압응력, 도상 압력, 노반 압력은 기존 침목에 비해 개선 효과가 있는 것으로 나타남. 개량용 침목 적용 시, 국부적으로 도상 압력이 크게 증가하는 구간이 있으나 **기존 침목에 비해 개선 효과가 큰** 것을 확인할 수 있음.

(5) 철도용품 인증(형식승인, 제작자승인)

○ 철도안전법 시행(‘17.03)으로 철도용품 형식승인 지정대상 제품은 국토부 승인제도 운영
- 지정대상 용품 : 보통레일, 접착절연레일, PSC침목

○ 일반선 60kg e-클립용 (HFS, 광폭침목) 형식승인 및 제작자승인 완료(‘19.10.23.)

○ 고속선 60E1 e-클립용 (HFS, 광폭침목) 형식승인 및 제작자승인 진행 중(‘20.03월 내 완료)



제2019-용품-077호

철도용품 형식승인증명서

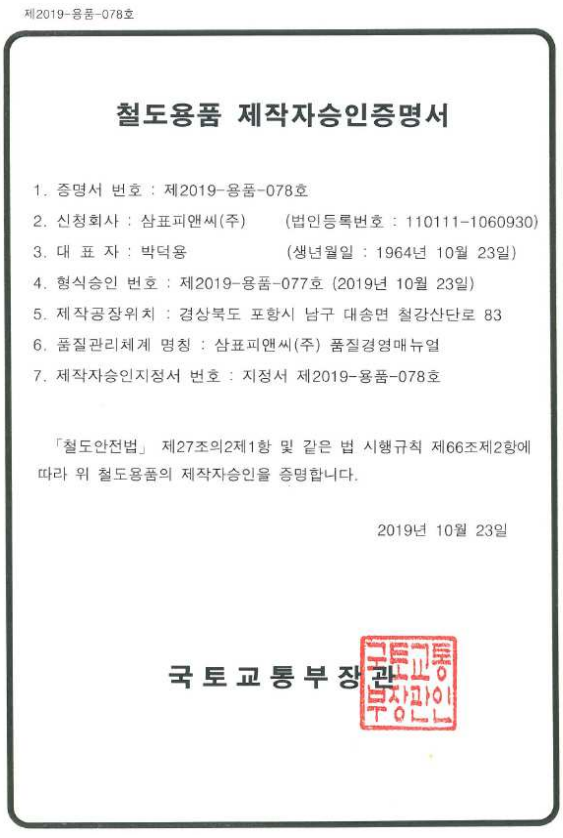
1. 증명서 번호 : 제2019-용품-077호
2. 신청회사 : 삼표피앤씨(주) (법인등록번호 : 110111-1060930)
3. 대 표 자 : 박덕용 (생년월일 : 1964년 10월 23일)
4. 설 계 자 : 삼표레일웨이(주)
5. 용품종류 : PSC침목
6. 용품형식 : e-클립용 60kg 레일용, 일반용 [광폭침목]
   e-클립용 60kg 레일용, 일반용 [하프프레임침목(반격자침목)]
   e-클립용 60kg 레일용, 곡선용 [하프프레임침목(반격자침목)]
7. 형식승인 번호 : 제2019-용품-077호 (2019.10.23.)
8. 형식승인자료집 번호 : 자료집 제2019-용품-077호

「철도안전법」 제27조제1항 및 같은 법 시행규칙 제62조제2항에 따라 위 철도용품의 형식승인을 증명합니다.

2019년 10월 23일

국토교통부장관

그림 188 철도용품 형식승인증명서
(제2019-용품-077호)



제2019-용품-078호

철도용품 제작자승인증명서

1. 증명서 번호 : 제2019-용품-078호
2. 신청회사 : 삼표피앤씨(주) (법인등록번호 : 110111-1060930)
3. 대 표 자 : 박덕용 (생년월일 : 1964년 10월 23일)
4. 형식승인 번호 : 제2019-용품-077호 (2019년 10월 23일)
5. 제작공장위치 : 경상북도 포항시 남구 대송면 철강산단로 83
6. 품질관리체계 명칭 : 삼표피앤씨(주) 품질경영매뉴얼
7. 제작자승인지정서 번호 : 지정서 제2019-용품-078호

「철도안전법」 제27조의2제1항 및 같은 법 시행규칙 제66조제2항에 따라 위 철도용품의 제작자승인을 증명합니다.

2019년 10월 23일

국토교통부장관

그림 189 철도용품 제작자승인증명서
(제2019-용품-078호)

나. 자갈궤도 교환장비 개발

(1) 자갈궤도 침목 교환장비 개발

(가) 개발 배경

○ 현재 개발하고 있는 궤도구조는 기존 궤도구조를 보완하는 시스템으로 자갈궤도의 궤도구조 개량이 용이하도록 고안하는 시공장비 개발이 필요한 실정이며, 기존침목 제거 및 신규침목 부설에 용이하도록 설계된 컴팩트한 침목교체 장비로 **고속선(운행선) 일일차단 시간을 이용한 100m/일의 궤도갱환 작업을 목표**로 하고 있음(**시공장비 2편성 구성 시행**).

○ 이에 본 과제에서는 궤도구조를 신속하고 용이하게 개량할 수 있는 장비를 개발함으로써 효율성을 높이고, 현장 시공성 테스트를 통해 초도품 장비의 시공성을 판단하고, 보완사항을 도출하여 개량 후 현장에 적용하고자 함.

(나) 침목 교환장비 개발 컨셉

① 주요 요구조건

○ 침목 교체 : 침목의 손상 없이 제거와 설치가 가능한 그립부

○ 체결구 체결 : 2Type 방식 적용 (Fast-Clip 자동체결, e-Clip 반자동 체결)

○ 자갈제거 : 자갈 제거를 통한 침목교환 방법

- 기존침목 → 광폭침목, 기존침목 → I/B침목 교체 시 일부 자갈 제거 필요

○ 장비형식 : 상부가 완전히 회전 가능한 백호(굴삭기) 타입

○ 이동수단 : 고무바퀴를 통해 도로 및 선로 진입, 레일 주행 시에는 가이드휠 및 고무바퀴 접지압을 통해 주행

○ 고도 및 회전제한 : 자갈제거 및 트로리 등을 견인하기 위해 백호(06)에 적용

- 전차선 높이, 지장물 문제로 고도 및 회전제한 장치 및 소프트웨어 적용



그림 190 침목 교환장비 개발컨셉

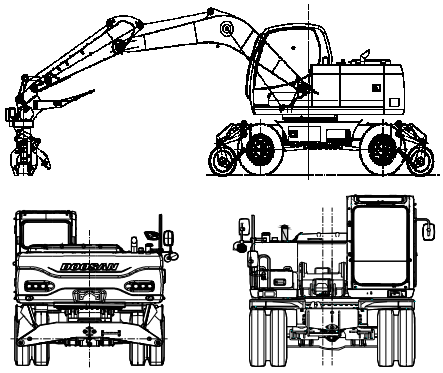


그림 191 교환장비 도면

② 궤도 인터페이스를 고려한 안전성 검토내역

○ 고도제한장치

- 높이 제한장치를 2단계로 설정하고, 최종으로 4.9m는 기계적 제한을 설정하여 전차선과의 간섭을 최소화함(경부고속선 5.08m, 경부선 지하부 4.75m, 지상부는 5.0m).



그림 192 붐 높이제한 확인



그림 193 붐 높이제한 표시 등

○ 회전 제한장치

- 복선선로 작업 시 차단작업으로 진행하나, 상황에 따라 반대편 선로로 검측차 등 운행 소지가 있어 회전제한 장치를 설치하여, 장비 안전성을 확보함.



그림 194 붐 스윙제한 장치

○ 가이드 휠 + 솔리드 타이어

- 레일 상 이동을 위해 상하 이동이 가능한 유압식 가이드휠을 적용하였고, 타이어는 솔리드 형식을 적용함으로써 안전성을 향상시킴.



그림 195 가이드휠 및 솔리드타이어

○ 전도방지 검토

- 침목교환장비는 레일 상 작업 시 레일방향 및 측방으로 작업이 필요. 이에 장비의 인양력을 검토하여 전도 방지를 위해 후단부에 웨이트(무게추)를 추가 설치하여 안전성을 높임.

(2) 어테치먼트(Attatchment) 개발

(가) 모노블럭 침목형 어테치먼트

○ 국내 자갈도상에 사용되는 대부분의 침목은 모노블럭 타입으로 **기존침목 및 광폭침목을 교체**하기 위해 제작됨.

○ 경부고속 1단계 구간은 체결장치가 다양하며, 비중은 e-cilp(37.8%), Fast-clip(51.7%), Vossloh-clip(10.5%)로 구성되어 있음.

- 모노블럭 침목형 어테치먼트에서는 비중이 가장 큰 Fast-clip 체결이 가능한 자동체결장치를 적용하였으며, 기타 체결시스템에 적용 시에는 이를 탈착하여 사용이 가능하도록 설계/제작함.

○ 3D 검토를 병행 진행하여 제작 시 간섭을 검토하였음.

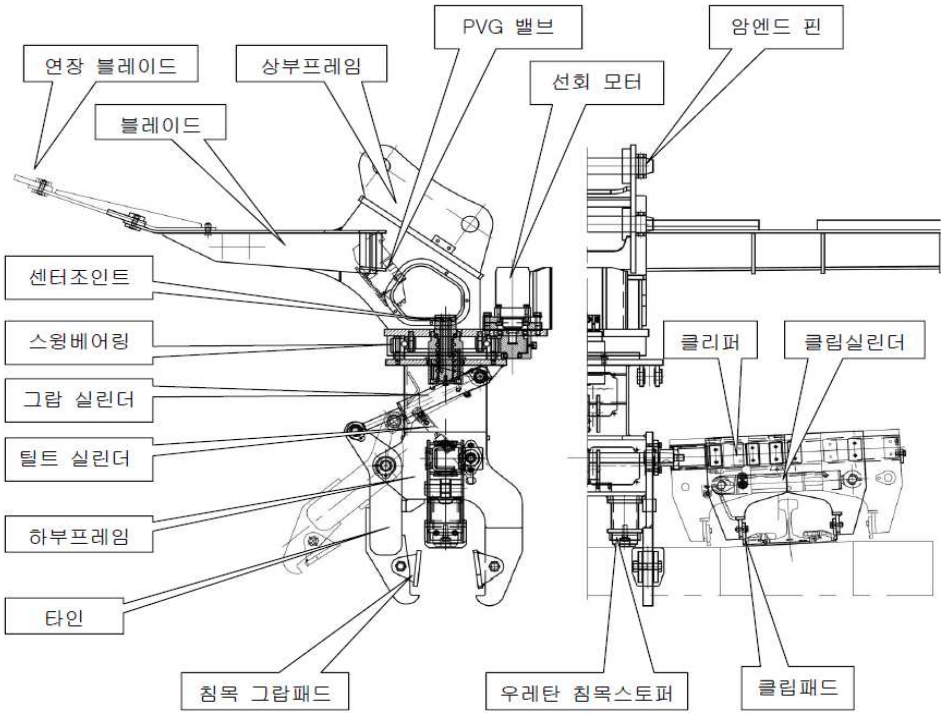


그림 196 모노블럭 침목형 어테치먼트 각 구성부의 명칭

① 자갈제거 블레이드 인터페이스 검토

㉮ 자갈제거 블레이드 인터페이스 (기본형)

○ 자갈제거 블레이드(삽날)의 경우 삽입깊이 조절이 가능하도록 하여 상황에 맞춰 대응이 가능하도록 하였으며, 일정한 깊이를 유지하기 위해 레일에 걸칠 수 있는 형상으로 제작 되었으며, 깊이는 100mm 간격으로 2단 조정이 가능하도록 설계/제작함.

㉯ 자갈제거 블레이드 인터페이스 (확장형)

○ 이 외에 포장궤도 시공처럼 자갈을 완전히 제거해야 하는 경우를 대비해 블레이드를 확장할 수 있도록 하였으며, 확장 시 2중 볼트결합을 통해서 탈/부착이 가능함.

㉰ 자갈제거 블레이드 볼트부 보호조치

○ 자갈제거 시 삽날에 설치된 볼트가 파손 될 경우, 유지보수에 어려움이 생길 수 있으므로 이를 최소화하기 위해 볼트부 보호가드로 파손을 최소화하였음.

표 8 자갈제거 블레이드 사진

구 분	형 상
자갈제거 블레이드 형상	
볼트 보호가드 및 추가연결용 삽날	

② 침목마운트 검토

㉮ 간격재

○ 침목의 높이차에 따른 집게와의 간섭을 고려하기 위해, 침목 마운트(간격조정)를 설치하였으며, 마운트를 통해 침목 파손 및 안전성을 높이고, 침목마운트 내에 간격재(심)을 넣는 방식으로 길이 조절이 가능하도록 설계/제작함.

○ 현장에서 볼트를 통해 심교체가 가능하도록 제작 되었으며, 내부심은 1mm단위로 조정이 가능하고 외측 간격재는 상황에 따라 조정범위를 확대 가능하도록 설계/제작함.

㉯ 자동체결장치 검토

○ 경부고속1단계 구간은 다양한 체결장치가 적용되었으며, 그중 Fast-clip가 가장 많은 비중을 차지하고 있으며, 본 장비에서는 이에 대응이 가능한 체결장치를 적용하였으며, e-clip체결장치에 해당하는 궤도구조 작업 시에는 해당 자동체결장치를 분리하여 작업이 가능하도록 설계/제작함.

○ 자동체결장치 해체를 위해서는 외부 볼트를 제거하면 해체가 가능하고, 회전을 방지하

기 위해 반달 회전방지 심을 삽입하여 제작하였음.

표 9 체결구 자동 체결장치 교체 방안

구 분	교체 순서도		
설 명	볼트 제거	회전방지 반달 심	연결부
사 진			

(나) I/B(Intermediate Block)형 어테치먼트

① I/B형 어테치먼트 기본 구성

○ I/B는 기존 침목을 그대로 활용하면서도 도상에 전달되는 압력을 줄일 수 있는 구조로, 개량 궤도구조의 적용에 대한 경제성 및 성능이 우수할 것으로 판단됨. 그러나 시공을 위해서는 기존침목 사이의 자갈을 제거하고 부설해야하는 어려움이 있으나 아래의 어테치먼트는 기존자갈을 제거하면서 I/B를 설치할 수 있도록 설계/제작함.

○ I/B(Intermediate Block)형 어테치먼트 제작과 관련하여 3D 검토를 병행 진행하여 제작시 간섭을 검토함.

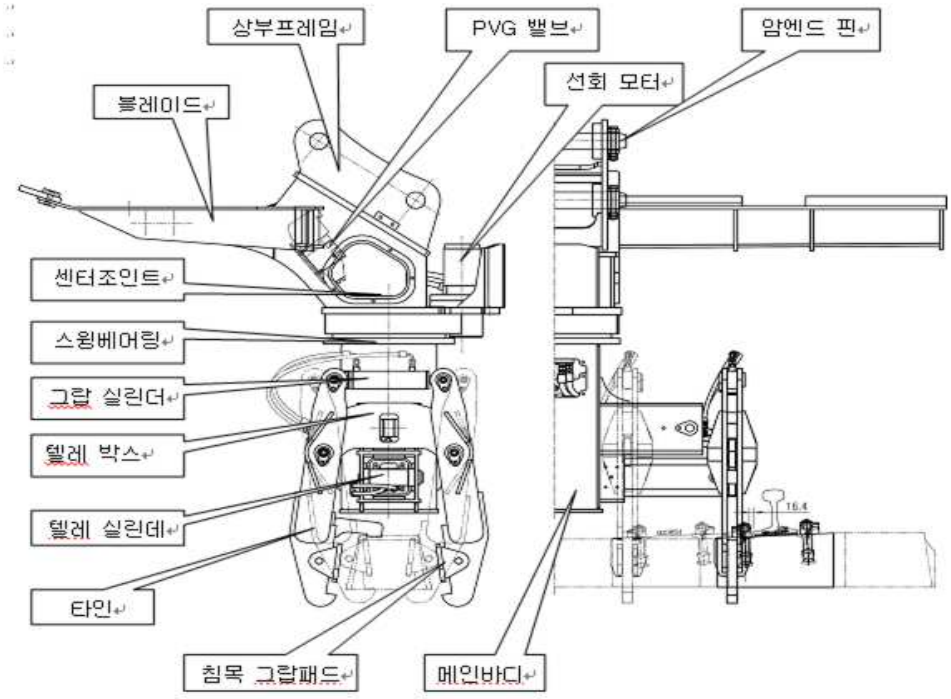


그림 197 I/B형 어테치먼트 각 구성부의 명칭

② I/B형 어테치먼트 구동형태

○ I/B를 부설하기 위해서는 기존침목사이 자갈제거 뿐 아니라 레일과의 간섭문제가 발생하므로, 이에 본 시공 장비는 자갈을 제거하고, I/B를 레일 저면에 유사하게 이동하여 인력작업을 최소화 시키는 장비임.

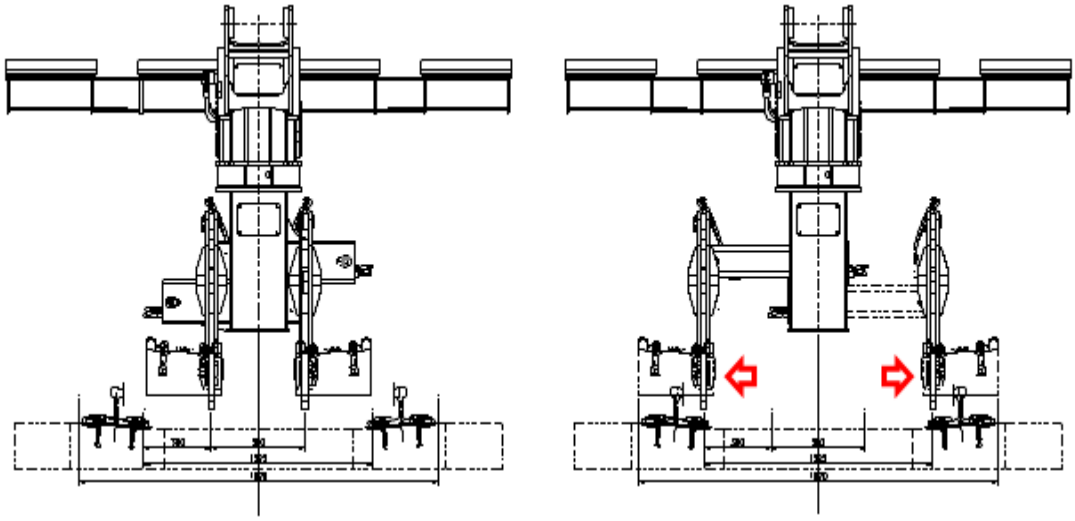


그림 198 I/B 설치를 위한 구동형태

③ I/B형 어테치먼트 간섭검토

○ I/B를 잡을 경우 측면 경사로인해 점이나 선접촉으로 파손우려가 발생할 수 있어, 이에 침목그립패드를 설치하고, 힌지 홀크기를 조절함으로 면접촉이 되도록 하여, 안정성을 높였음. 또한 I/B 확대 및 축소 시 텔레실린더와 텔레박스간 간섭을 검토한 결과 8mm의 이격 거리를 확보하였으며, 좌우 공용이 가능하도록 설계하여 유지보수성을 높임.

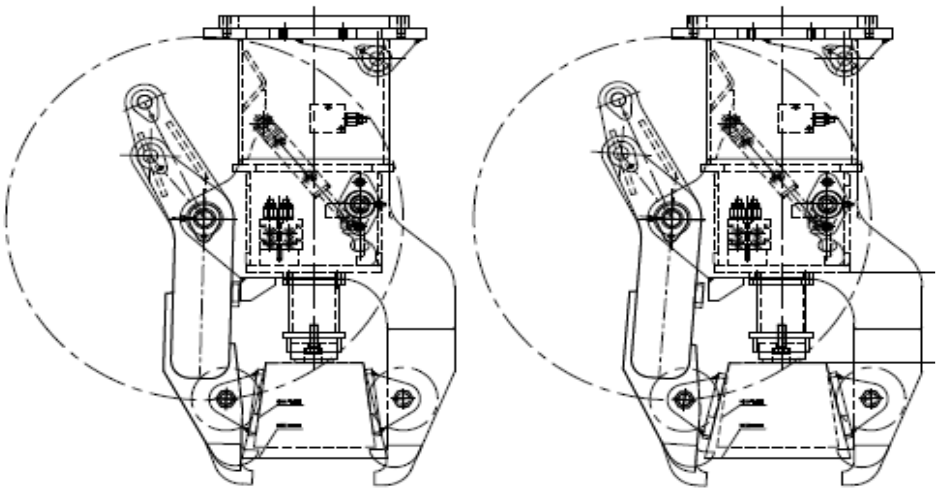


그림 199 I/B 어테치먼트 간섭 검토

(다) 침목 교환장비 검사

① 제품 검사

㉮ 1차 점검



그림 200 침목 교환장비 1차 점검사진 (‘16.04.28.)

㉰ 2차 점검


어테치먼트(모노블럭) 장착

추가 산날


어테치먼트 (I/B)


솔리드 타이어


스윙 제한장치


고도제한 검토(4.7m, 4.9m)


침목 마운트(간격조정) 교체 시연


퀵 커플러를 통한 어테치먼트 교체 시연


체결장치해체 시연


체결장치 연결봉 내 회전방지 키

그림 201 침목 교환장비 2차 점검사진 (‘16.05.11)

(3) 현장 시공성 검증

(가) 침목 교환작업 공정도

① 국내 자갈궤도 침목교환 공정

○ 궤도구조 유지보수 저감을 위해 국내외적으로 다양한 기술이 개발되어 왔으나, 운행선의 열차 운행에 지장을 초래하지 않는 것을 전제로 하는 기술은 매우 제한적임.

○ 또한 국내에서 시행되는 침목교체 공정은 인력위주의 공정으로 이루어지고 있음.

㉮ 침목 교환 공정

○ 작업시행 전일 : 침목을 현장에 배열 [모터카, 침목이송용 평판차, 백호]

○ 작업시행 당일

- 체결구 해체 (인력)
- 침목교환을 위한 레일 양로작업 (인력, 유압잭키)
- 침목교환 작업(기존침목 현장밖으로 배열, 백호)
- 체결구 체결작업 (인력)
- 장비작업 (Regulator, Multiple tie tamper, Dynamic Track Stabilizer)
- 전차선 조정작업 (고속선)

○ 작업시행 후일 : 현장내 배열된 침목 수거 [모터카, 침목이송용 평판차, 백호]

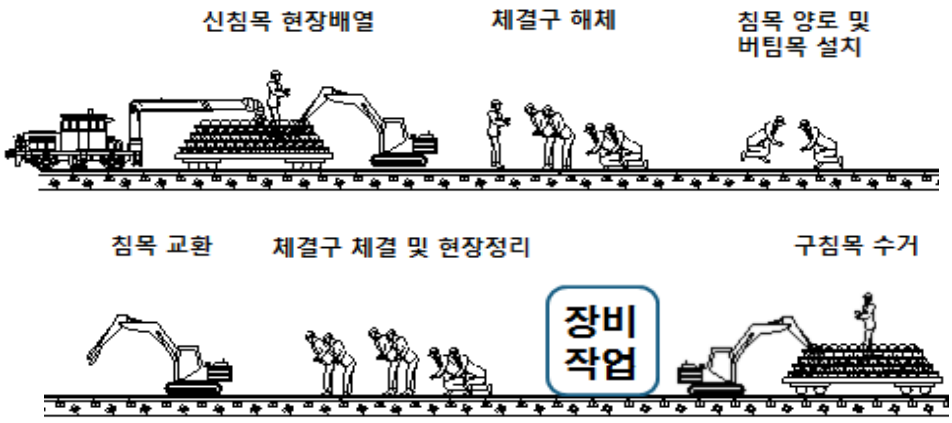


그림 202 침목교환공정

㉯ 국내 침목교환 현황

○ 국내에서는 대규모 자갈궤도 개량 공정이 이루어지지고 않고, 대부분 운행선의 일부개소의 목침목 → PC침목, PC침목 → PC침목 등의 일부개소만 개량하기 때문에 해외처럼 대규모 전용장비 시스템을 갖추지 않음.

○ 한국철도공사에서는 매년 지역본부 단위로 침목 교체공사를 발주하고 있음, 이에 2011년~2014년 동안 한국철도공사에서 발주한 침목갱환교환(개량)공사 현황을 보면 연평균 총 계약금액 57억, 33건의 공사가 이루어 졌으며, 대부분 2~3억(지급자재) 수준의 소형공사 임. 현재 규모가 크지 않지만, 점차 증가하는 추세를 보여주고 있음.

② 개발 장비를 이용한 침목교환 공정

본 연구에서는 개발된 장비를 적용하여 인력을 최소화 하였으며, 시공속도를 높여 1일 100m 시공이 가능하도록 하였으며, 기본 공정은 아래와 같음.

㉮ 개발 장비를 이용한 침목교환 공정

- ○ 현장 침목배열 : 모터카(크레인) + 평판차 + 침목 교환장비(지원)
- ○ 체결구 해체 : 인력
- ○ 침목교환 : 침목교환장비 (fast clip - 자동, e clip - 반자동)
- ○ 기존침목 수거 : 모터카 후진 (침목교환장비 선로이탈, 모터카 크레인을 통한 수거)
- ○ 장비작업 (Regulator, Multiple tie tamper, Dynamic Track Stabilizer)
- ○ 전차선 조정작업 (고속선)

㉯ 모노블럭 시공 공정

- ○ 단선 시공 시에는 아래와 같은 공정이 기본 공정으로 설정되며, 상황에 따라 전차선 조정 작업이 추가됨.

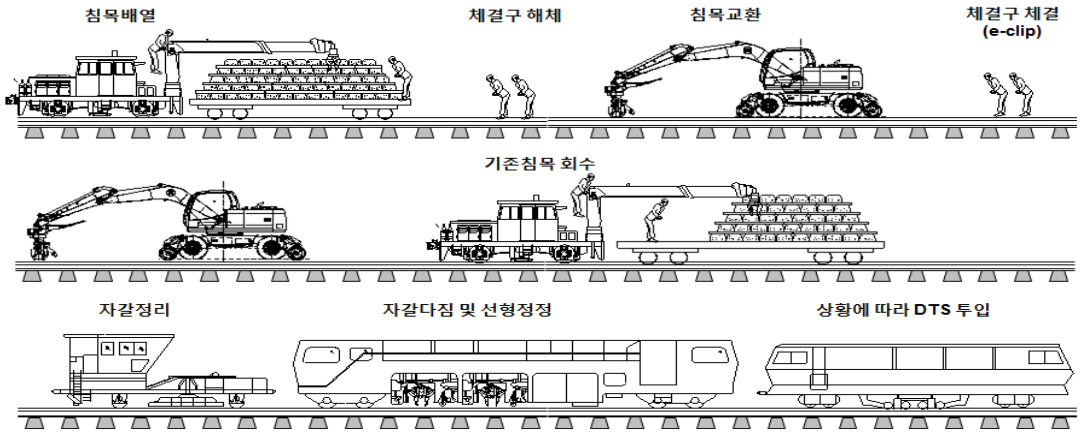


그림 203 모노블럭 침목교환 공정

- ○ 복선작업이 이루어지면 침목배열 및 수거를 반대선로에서 시행하면 되므로 효율성이 높아지게 되며, 아래는 복선에 대한 시공방안 개념을 설명함.

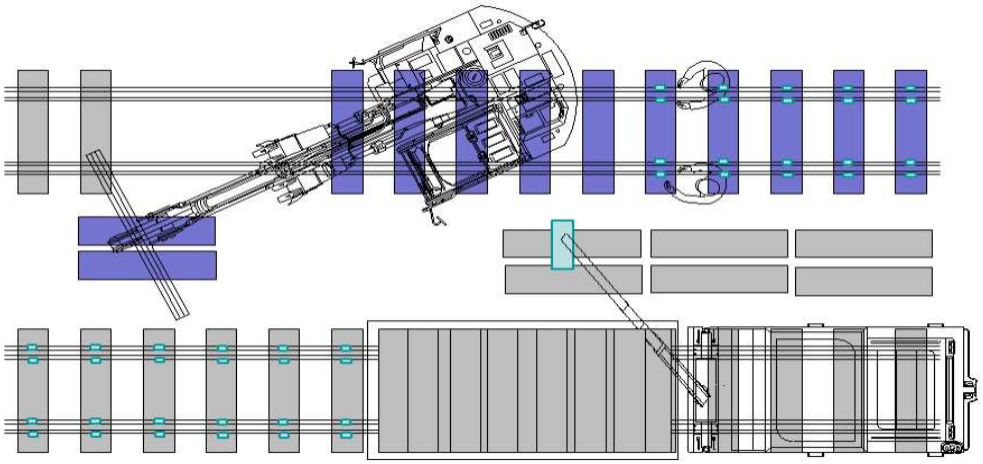


그림 204 모노블럭 침목교환 공정 (복선사용 시)

㉰ I/B 시공 공정

○ I/B시공은 기존선로에 I/B를 보강하는 방안으로 침목수거의 공정은 필요 없음. 아래 시공공정은 기존선로에 I/B를 배열 후에 침목부설 장비가 자갈을 제거하면서 I/B를 설치하는 개략적인 공정도임.

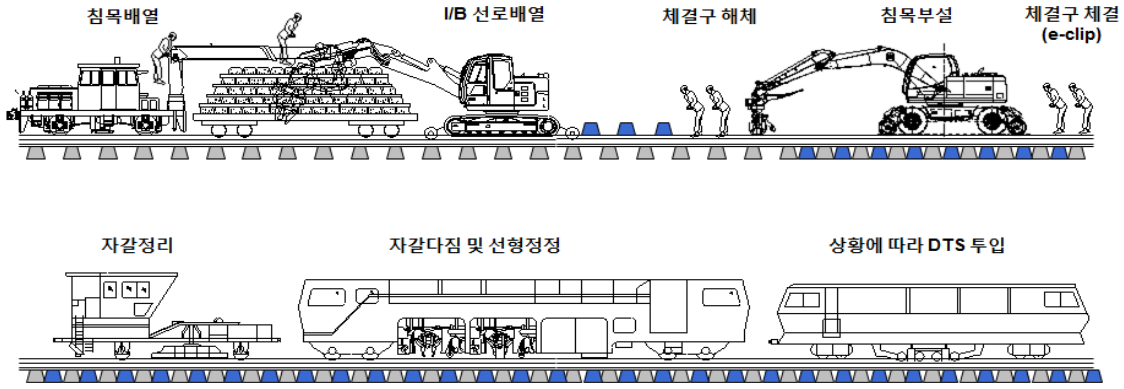


그림 205 I/B 침목교환공정

(나) 테스트베드 시험시공을 통한 성능검증

① 시험구간 선정

㉮ 개요

○ 목적 : 침목 교체작업에 대한 효율성 검증 및 궤도 인프라와 인터페이스 검토
- 침목교환장비 작업성, 공정별 소요시간, 광폭 및 I/B침목 다짐도 확인

○ 연장 : 50m (섹션구성 : 50m × 2회, 광폭 및 I/B침목)

○ 시험구간 요구조건 : 주간작업이 가능하고, 전차선이 없는 구간으로 선정함.

㉯ 시험구간 현황

구 분	Yard Test 구간 현황	비 고
장 소	충북 영동군 심천면 초강리 코레일 영동차량기지 구내선 (전차선 없는 구간)	
배선현황	 · 궤도현황 - 50k rail - 50k PC침목 - 비장대구간 (25m 이음매)	
	 이음매 구간 Yard Test 구간(50kg레일 PC침목)	

㉰ 60E1레일용 테스트 구간 설치

○ 테스트구간은 코레일 영동차량기지내로 현재 50kg 레일과 침목이 설치된 구간으로 개발된 침목(60E1)로 부설하기 위해서 사전에 50k레일을 60E1 레일로 교체하였음(50m구간).

○ 또한 다짐도 시험을 위해 STT장비 진입 시 안전성을 고려하여 이형 이음매판을 설치함.

② 3차 침목교체 시공성 테스트 : 장비 개량 확인 시공성 테스트 및 시연

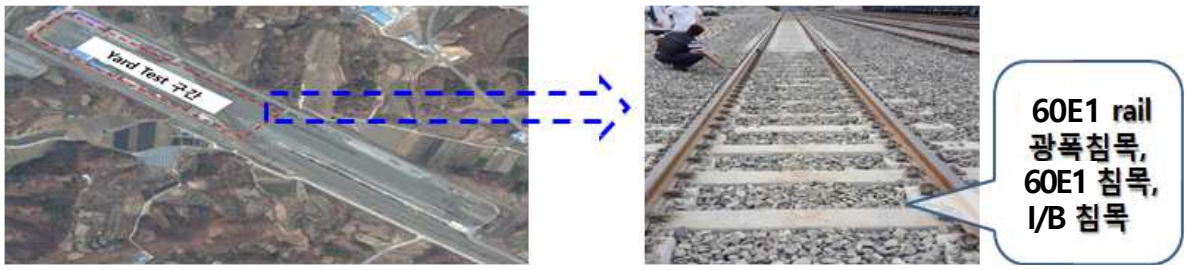
㉮ 개요

○ 목적 : 1, 2차 시공성 테스트 결과 후 장비 개량사항을 반영한 시공성 테스트 (침목교환장비 작업성, 장비 시연회)

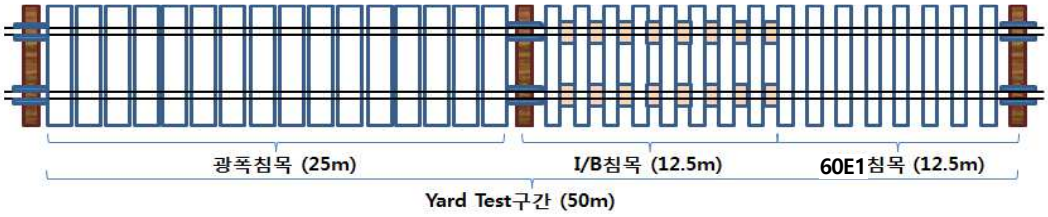
○ 일시 : 2017.03.29.~31.

○ 연장 : 50m (섹션구성 : 50m × 2회, 광폭 및 I/B침목)

○ 장소 : 선행 테스트 구간에서 동일 시공 조건으로 시행



○ 현장현황



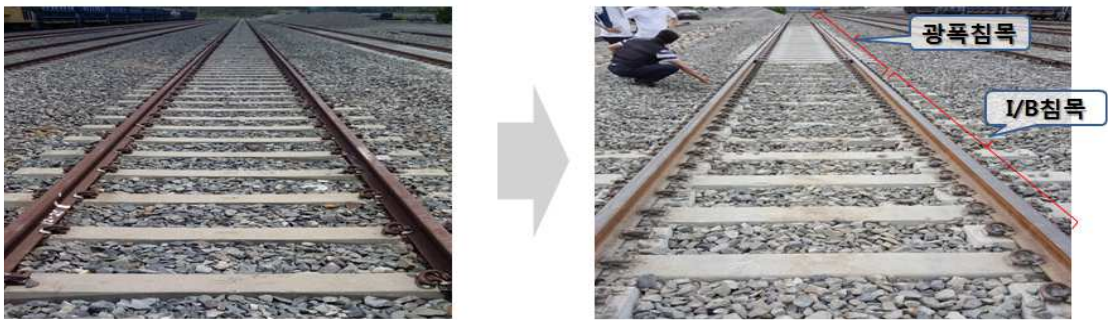


그림 206 3차 침목교체 시공성 테스트 구간 시험 설치

㉯ 현장 시공성 테스트

○ 주요 작업공정

- 침목교환 장비의 작업성은 장비원의 숙련도에 있음. 현재 개량된 장비로 시공성 테스트 시행 시, 숙련된 장비원의 부재로 신규 장비 운용자를 수배하여 운영하고 있어, 실질적인 장비 성능 파악이 어려움.
- 숙련되지 않은 장비원은 침목교환 작업 시, 1정 교체에 약 2분정도 소요됨. 이후 장비 취급의 숙련도가 높아지면 속도는 더욱 빨라질 것으로 판단됨.
- 시공성 테스트 전 장비 운용자에게 1일간의 장비 적응 기간을 부여하였고, 실질적 테스트에서 목표 시간을 이루었음.

④ 4차 침목교체 시공성 테스트 : 장비 시공성 확보

㉮ 개요

○ 목적 : 침목교환 공정도 확인 및 시공성 확인 시험

○ 일시 : 2019.05.07.(1차), 2019.07.18.(2차)

○ 장소 : 선행 테스트 구간에서 동일 시공 조건으로 시행

㉯ 침목 교환장비 시공성 테스트 결과

○ 1차 시공성 테스트 (’ 19.05.07 [영동기지], 침목교환 및 자갈다짐용 탬핑유닛 평가)

- 1편성으로 침목교체에 소요되는 작업시간은 총 19분이 소요되었고, 2시간 작업공정으로 환산 할 경우 약 38m 설치가 가능할 것으로 예상됨(2편성 시 76m).



그림 207 침목 교환장비 시공성 테스트 상세 공정 (1차)

○ **2차 시공성 테스트** (’ 19.07.18 [영동기지], 침목교환 장비 시공성 평가)

- 1편성으로 교체에 소요되는 시간은 총 31분이 소요되었고, 2시간 작업공정으로 환산 할 경우 약 55m 설치가 가능할 것으로 예상됨(**2편성 시 110m**).
- 1차 테스트에서는 장비 조작 미숙으로 목표치에 도달하지 못하였으나, 2차 테스트에서는 장비 조작자의 조작훈련과 공정에 대한 이해를 높여 개발 장비의 시공성을 확인함.

표 10 침목 교환장비 시공성 테스트 결과표

항 목		작업구분 (2편성/1장비)	기초작업 (체결구 해체, 레일양로 등)	초기침목 제거	반복공정 (기존침목 제거, 신규침목 설치)	마지막침목설치 (마무리작업포함)	총 시간 및 침목 수	비 고
목 표		소요시간, 분 (초)	10 (600)	10 (600)	85 (5,100)	15 (900)	120 (7,200)	
		교환침목, 정	-	5	74 (68초/1정)	5	84	
시공성 테스트 결과	1차 (‘19.05.07)	소요시간, 분 (초)	-	12 (720)	-	7 (420)	19 (1,140)	장비조작 미숙
		교환침목, 정	-	10	-	10	10	
	2차 (‘19.07.18)	**소요시간, 분 (초)**	-	**7.6 (457)**	**8.7 (520)**	**14.7 (880)**	**31 (1,857)**	장비조작 훈련 후 테스트 진행
		교환침목, 정	-	**6**	**8 (65초/1정)**	**6**	**20**	



그림 208 침목 교환장비 시공성 테스트 상세 공정 (2차)

㉰ 침목 교환장비 공정도

- 침목 교환장비의 시공성 테스트를 통해 시공성능과 침목교환 공정을 검증함.
- 침목교환은 크게 6공정으로 구분할 수 있으며, 주된 작업시간은 그림 42의 (c)에서 침목 교체에 대한 반복 작업의 숙련도에서 작업량이 결정됨.
- 해당 공정에 대해 테스트 진행 시 목표했던 **침목 1정 교체 시간은 68초에서 65초로 목표 달성 완료**, 작업이 숙련될 경우 시간을 더 단축시킬 수 있음.



(a) 초기침목 제거(6정) (b) 자갈제거 (c) 구침목 제거/신침목 설치(반복)

(d) 최후 침목 설치/체결 (e) 자갈채움/마무리 (f) 다짐(MTT)

그림 209 침목교환 공정도

다. 시험부설 및 현장 성능평가

(1) 일반선 시험부설

(가) 시험부설 대상지

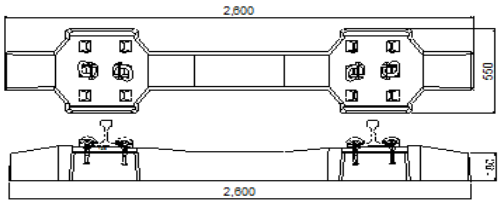
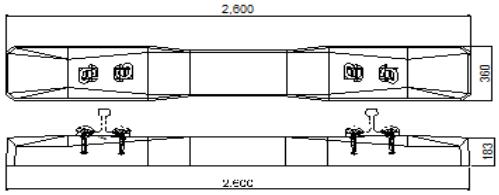
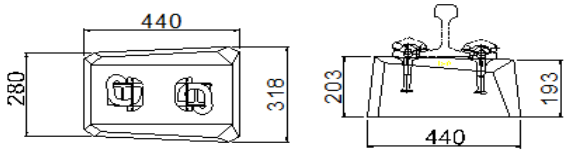
① 일반선 시험부설 현황

㉮ 시험부설 일시 : 2017년도 05월 02일 ~ 08일

㉯ 장소 및 부설 연장 : 경부선 지천~대구간 상선 318.690k ~ 218.990k (300m)

㉰ 부설 수량 : HFS 200정(130m), I/B 200정(130m), 광폭침목 60정(40m)

표 11 일반선 시험부설구간 적용 침목

구 분	형 상	주요치수	비고
HFS		길이 : 2,600mm 최대폭 : 550mm	
광폭 침목		길이 : 2,600mm 최대폭 : 360mm	
I/B		길이 : 440mm 최대폭 : 318mm	

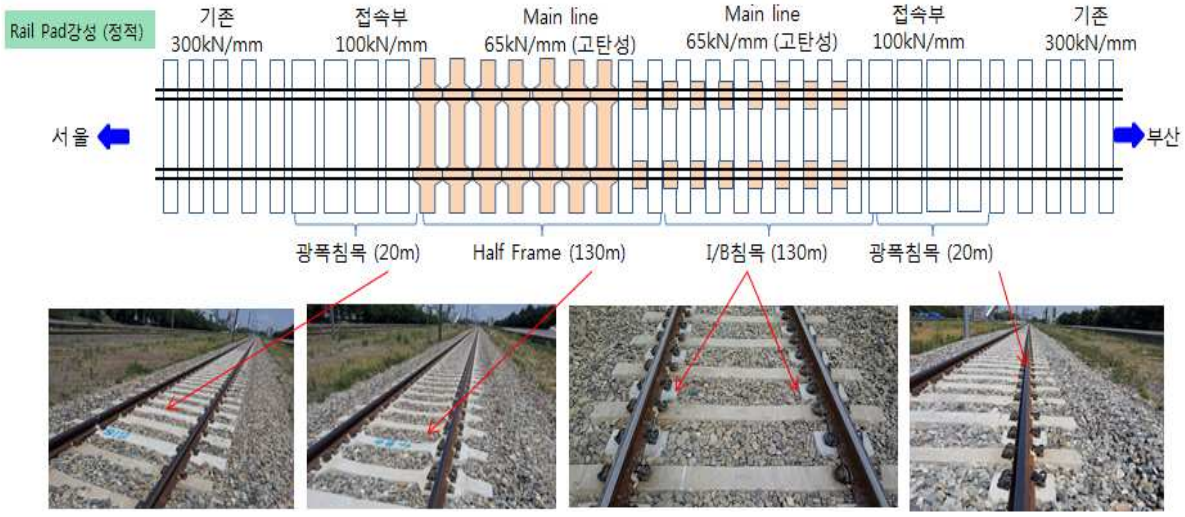


그림 210 일반선 시험부설 침목 설정

(나) 궤도강성 설정

① 궤도강성 계산

○ 현장시험부설 대상지 선정과 더불어 부설침목의 궤도강성을 설정하였음. 총연장은 약 300m수준으로 양 끝쪽에는 광폭침목으로 접속부를 설치하여 시행하였으며, 개량형 침목은 침목저면이 넓어지기 때문에 자갈도상 지지강성이 증가함에 따라 고탄성(Q클립)체결장치를 적용 65kN/mm~100kN/mm의 고탄성패드 적용하여 궤도강성을 조정하였음.

○ 또한 접속부 설치구간은 하프세컨드 구간을 고려할 때, 열차가 120km/h 속도로 주행 시 약 16.7m구간을 설정하여 진행함(120km × 0.5초 통과구간 = 16.7m).

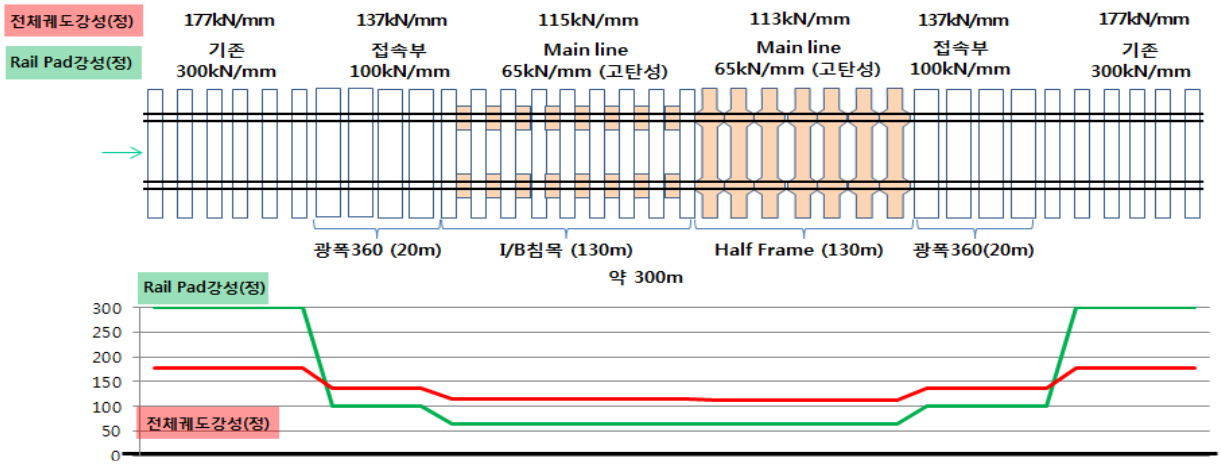


그림 211 일반선 궤도강성 설정

② 적용 침목별 시공공정

○ HFS 및 광폭침목 시공공정



		
체결구 해체	기존침목 제거	도상 자갈제거
		
개량형침목 설치	체결장치 체결	침목다짐(STT)

○ Intermediate Block(I/B) 시공공정



		
침목사이 자갈제거	침목사이면 정리	I/B 이동
		
I/B 양로	체결장치 체결	침목다짐(STT)

(2) 고속선 시험부설

(가) 시험부설 대상지

① 고속선 시험부설 현황

㉮ 시험부설 일시 : 2018년도 10월 26일 ~ 11월 06일

㉯ 장소 및 부설 연장 : 경부고속선 대전~영동 하선 183.195k ~ 183.460k (265m)

㉰ 부설 수량 : HFS 160정(96m), 광폭침목 281정(169m)

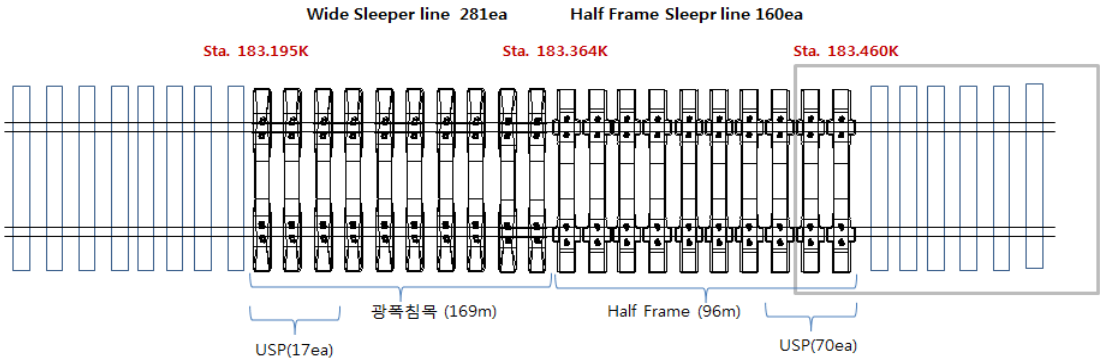
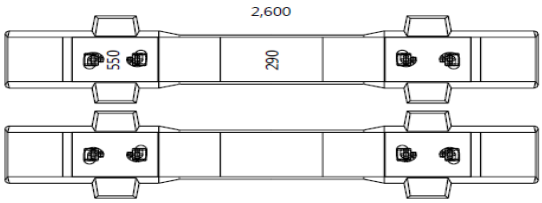
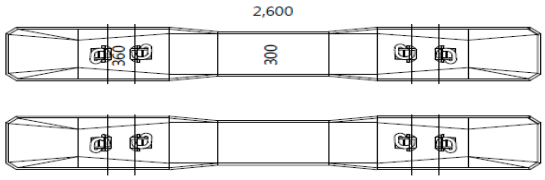
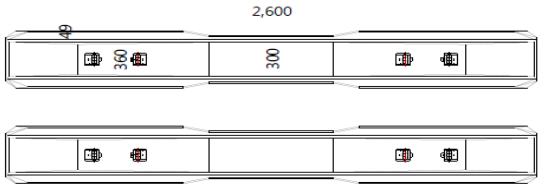


그림 212 고속선 시험부설 구간 침목 배치

표 12 고속선 시험부설 구간 시험부설 적용 침목

구 분	형상	주요치수	중량	비고
하프프레임 침목		길 이 : 2,600mm 최대폭 : 550mm	400kg	일반침목 대비 저부면적 1.5배 증가
광폭침목		길 이 : 2,600mm 최대폭 : 360mm	380kg	
광폭침목 프로텍터용		길 이 : 2,600mm 최대폭 : 360mm	370kg	횡단 신호케이블 보호용

(나) 부설공정

① 장비 배치 및 공정

○ 고속선 시험부설 시 국철(경부선) 시험부설과 다르게 작업일마다 Regulator작업 필요.

- 열차 속도에 따른 자갈비산 문제로 침목상면에서 50mm 하부로 자갈을 채워야하는 관리규정이 존재하기 때문이며, 시공 공정은 양 선 차단이 가능한 경우에는 작업선로에서는 침목 교환 작업을 시행하고, 반대편 선로에서는 침목 하화와 침목 수거 작업을 시행하는 작업공정을 진행함.

○ 2종 작업 구간과 연계를 고려하여 장비 배치를 검토하였으며, 침목 교체 작업은 2종 작업 종료 후 단독으로 시행함.

○ 부설공정

신호해체 → 침목교환 → 1종 장비작업 → 편위점검 → 선형측량 → 신호 재설치

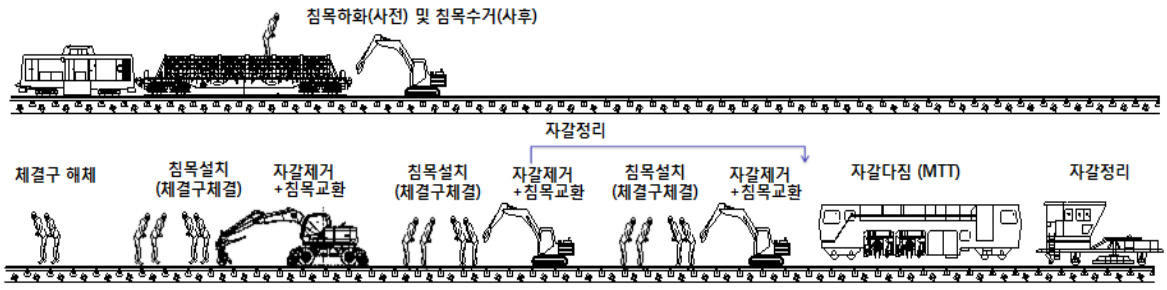


그림 213 고속선 시험부설 구간 하프프레임 침목 및 광폭침목 시공공정

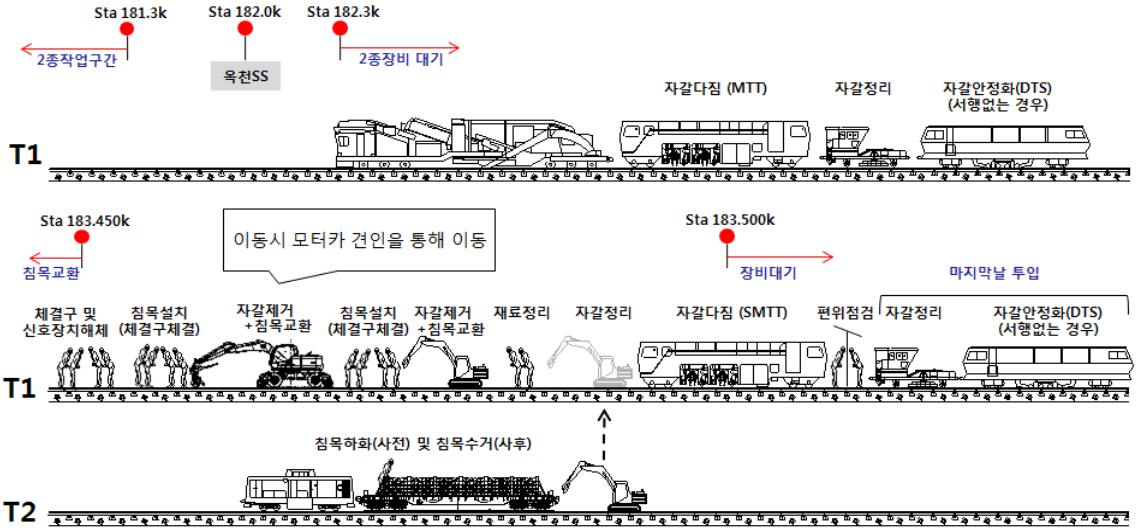


그림 214 고속선 시험부설 구간 침목교체 공정도 및 장비 배치도

② 신호설비 검토

○ 약 500m 내 신호설비 13개소, 부설구간 7개소로 절연구간과 콘덴서를 포함함.

○ 철도신호 전문 업체를 통하여 시공 시 조립과 해체를 시행함.

○ 신호설비가 간섭되는 구간은 광폭침목 설치 구간으로 광폭침목의 상부 형상을 개량하여 신호설비를 보호할 수 있도록 하였음.

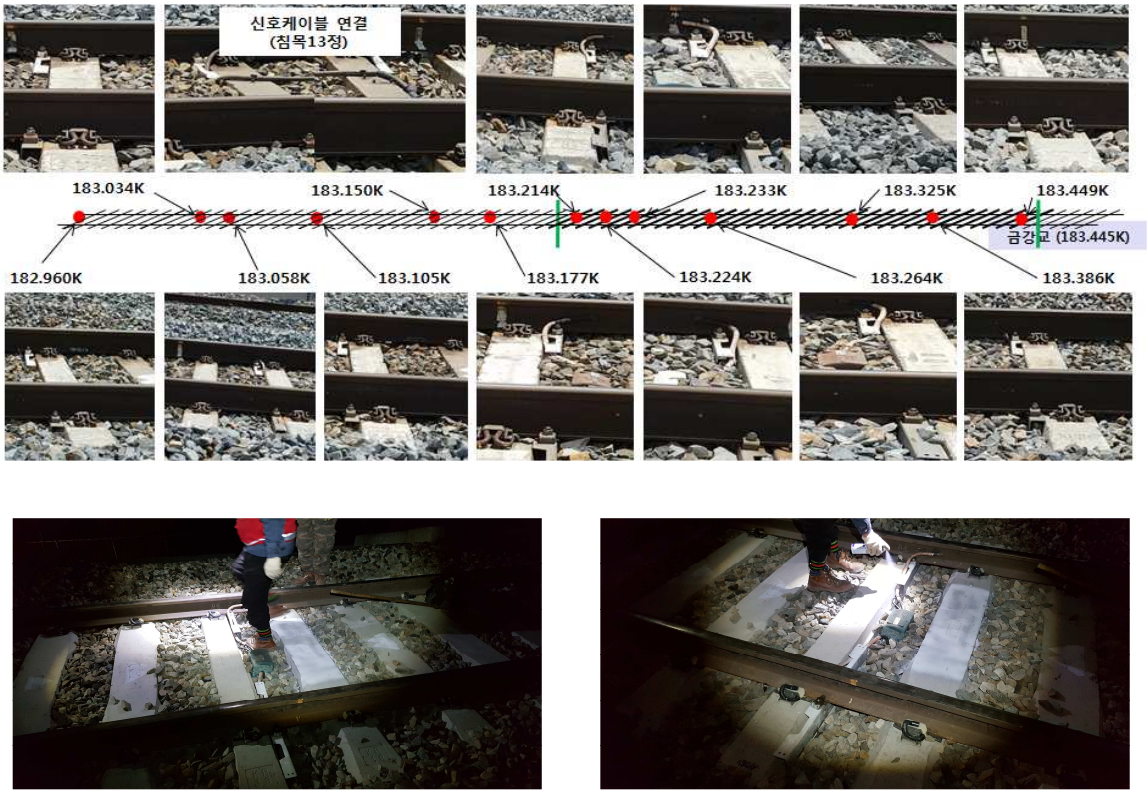


그림 215 신호설비 보호를 위한 광폭침목(프로텍터용) 설정

③ 일별 작업공정

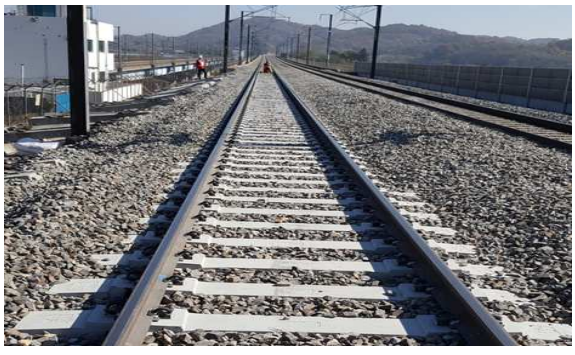
구 분		선행작업				1일차	2일차	3일차	4일차	5일차	6일차	후행작업
작업구분		2종병행	1종병행	1종병행		1종병행	1종병행	전차선 조정	전차선 조정	전차선 조정	단독	단독
Korail (새벽근무)	장비	●	●	●		●	●	●	●	●	●	●
	신호	●	●		●	●	●	●	●	●		●
교환 작업	STA					183.437K ~183.460K	183.412K ~183.437K	183.300K ~183.360K	183.235K ~183.300K	183.360K ~183.412K 183.221K ~183.235K	183.195K ~183.221K	
	작업량 (계획)	침목반입 (152ea)	침목반입 (228ea)		침목반입 (238ea)	교환22.8m (HFS 38ea)	교환24.6m (HFS 41ea)	교환60m (WIDE 100ea)	교환64.8m (WIDE 108ea)	교환66.6m (HFS 81ea, WIDE 30ea)	교환25.8m (Wide 43ea) (충다짐)	레일 재설정
장비	MTT										√	
	STT			√		√	√	√	√	√		
	SMTT											
	RE										√	
	CO			√		√	√	√	√	√		
	DTS										√	
	M/C								√	√	√	
	Trolley	2ea(10ton)	2ea(10ton)		2ea(10ton)			2ea(10ton)	2ea(10ton)	2ea(10ton)	2ea(10ton)	
	06											
	02	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	
신호 지장물	Protector					183.445K		183.386K	183.325K			
	DB									183.264K		
	BU									183.233K	183.214K	
	SVAC									183.224K		
	Cable											

④ 세부 작업공정

공 정	장 비	작업효율		0시						1시						2시						3시						4시						비 고
		1hr	100m	10	20	30	40	50	60	10	20	30	40	50	60	10	20	30	40	50	60	10	20	30	40	50	60	10	20	30	40	50	60	
작업협의/안전점검	작업책임자																																	
단전 및 차단협의	전기안전,운행안전																																	
2종장비 이동	CL,MTT,RE,DTS																																	
현장이동, 진입	MC, MTT, CO																																	
체결구 및 신호해체	인력(궤도,신호)																																	
현장이동, 자갈파기	굴삭기(02)																																	
침목교체	굴삭기(06, 02)	장비당 목표 42ea/hr																																1hr40min
침목수거	MC, 굴삭기(02)																																	
체결구 체결	인력																																	
침목다짐, 안정화	MTT, CO	500m/hr																																2회 다짐
측량	인력(광파기)																																	
편위점검	인력(편위자)																																	편위조정
자갈채움, 자갈정리	굴삭기(02)																																	
신호설치	신호공																																	
철수	MC외																																	
차량통과 확인	작업책임자																																	5시40분

⑤ 시공완료

○ 시공완료 후 개량형 침목이 부설된 현장사진은 아래와 같음



(a) HFS (Half Frame Sleeper)



(b) 광폭침목 (Wide Sleeper)

그림 216 시공완료 후 현장사진

(3) 일반선 시험부설 구간 현장계측 결과

(가) Testbed 현장 계측 개요

① 현장 계측을 통해 기존 침목 대비 개량 침목 구조 성능 확인

- ○ 3차원 정밀 측량 : 궤도틀림 진전률 산정
- ○ 궤도 응답 계측 : VCRM의 만족도 평가

② Testbed 현장 계측 종류

- ○ 3차원 정밀 측량 : 레일면 고저 면틀림, 레일 좌우 줄틀림, cant, 궤간 확인
- ○ 궤도 응답 계측 : 침목 변위, 윤중 및 레일 응력, 도상 저항력 등 계측

(나) 3차원 정밀 측량

① 측량 일정 (총 10회)

- ○ 17/04/20 : 상/하선 동시 측량
- ○ 17/05/01~07 : 상선 침목 교환 공사 수행
- ○ 17/05/22 : 상선 측량
  (하선은 4월 측정 일정과 인접하여 생략)
- ○ 17/06/27 : 상/하선 동시 측량
- ○ 17/08/21 : 상/하선 동시 측량
- ○ 17/11/13 : 상/하선 동시 측량
- ○ 18/02/06 : 상/하선 동시 측량
- ○ 18/07/03 : 상/하선 동시 측량
- ○ 18/11/14 : 상/하선 동시 측량
- ○ 19/02/14 : 상/하선 동시 측량

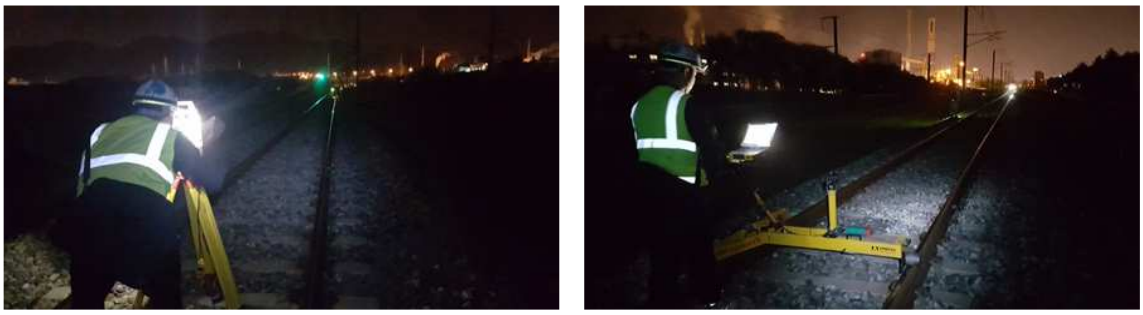
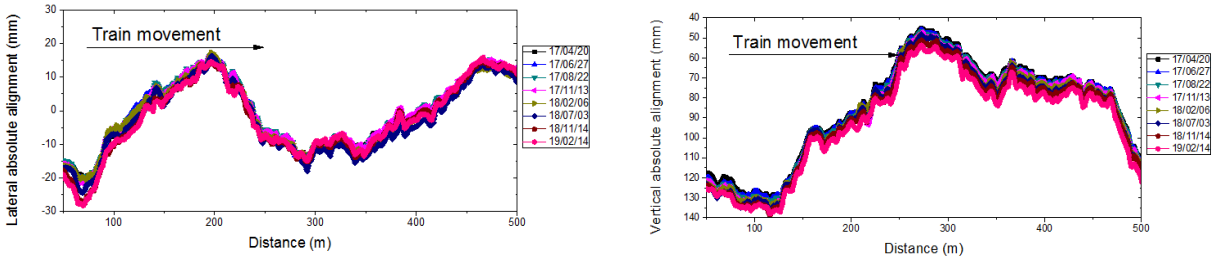


그림 217 네트워크(좌), 측량트롤리 측량(우)

② 측량 결과

㉮ 절대선형 : 하선

- ○ 하선은 수평/수직 방향 선형에 있어 약 2년간 큰 변화 없음



(a) 수평방향 절대선형 (b) 수직방향 절대선형

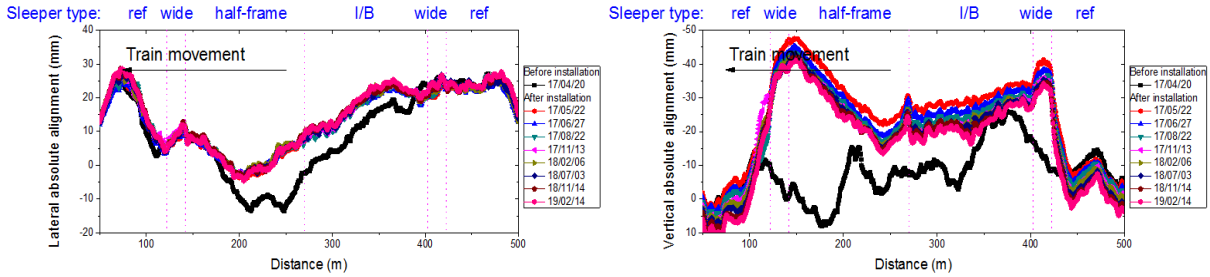
그림 218 일반선 하선의 절대선형 측량 결과, 수평(좌)/수직(우)

㉯ 절대선형 : 상선

○ 수평 선형의 변화는 거의 없으나, **수직 방향은 전구간에 걸쳐 침하가 발생**함

○ 단파장 궤도틀림은 하선에 비해 작은 것으로 판단됨. **장비 MTT 작업 시 일반침목처럼 향후 처짐 발생을 예상하여 작업자가 선로를 크게 올림**.

- 최대 40mm까지 궤도를 상승시켰으나, 신규 궤도가 기존 궤도만큼 처짐이 발생하지 않아 현재 접속부에서는 다소 큰 궤도틀림이 발생하고 있음
- 현재까지는 균등한 처짐이 발생하고 있지만, 40mm만큼은 처질 것으로 예상되지 않음. 단, 경계부에서 궤도틀림이 관리기준을 초과하지 않기에 **지속적 관리 필요**.



(a) 수평방향 절대선형 (b) 수직방향 절대선형

그림 219 일반선 상선의 절대선형 측량 결과, 수평(좌)/수직(우)

㉰ 10m 현 궤도틀림 : 하선

○ 절대선형 측량 결과는 현재 일반선을 관리하는 10m 현방식 궤도틀림으로 변환 가능

○ **하선은 수평/수직 방향 선형에 있어 2년간 큰 변화 없음**

○ 전 구간에 대한 궤도틀림 표준편차를 산정하였으며, 해당 결과를 제시함

㉱ 10m 현 궤도틀림 : 상선

○ **큰 변화 없음**

③ 3차원 정밀 측량 결과 분석

○ 궤도틀림 진전률 비교

- 상, 하선 전 기간에 걸친 궤도틀림 표준편차를 정리하면 아래 표와 같음.
- 하선 대비 상선(개량 침목)은 **45%정도의 저감 효과**를 보임,
- HFS 구간은 52%의 큰 저감효과를 보이고, I/B의 경우 20%의 저감효과를 보여 그 실효성은 크지 않은 것으로 판단됨
- 개량 침목 구간은 3종의 침목 배치로 접속부가 많아 테스트베드 여건상 불리함.
- 또한 I/B의 경우 그 하부가 적절하게 도상에 의해 지지될 때 성능을 발현하게 되는데, 아직 I/B 전용 다짐장비가 없기 때문에 그 효과가 낮은 것으로 판단됨.
- 당초 궤도틀림 진전률 개선 목표인 70%에 도달하지 못하였지만, **비교 대상이 상당히 안정적인 구간**이라는 점과 **신규 부설 후 안정화 단계**에 있다는 점 등을 감안하였을 때, 45%의 궤도틀림 진전률 저감 효과는 매우 우수한 결과임

표 13 일반선 시험부설구간 상하선 궤도틀림 표준편차 변화율

구분	하선		상선			
	측정시기	수직방향	측정시기	수직방향 - 전체	수직방향 - HFS	수직방향 - I/B
1차측량	17/04/20	1.71905	17/05/22	1.12397	0.78735	0.93419
2차측량	17/06/27	1.83133	17/06/27	1.22590	0.93544	0.98032
3차측량	17/08/21	1.99184	17/08/21	1.21578	0.89537	0.96910
4차측량	17/11/13	2.32147	17/11/13	1.24066	0.96885	1.11237
5차측량	18/02/06	2.21305	18/02/06	1.28908	1.04402	1.17570
6차측량	18/07/03	2.50783	18/07/03	1.41466	1.08358	1.34021
7차측량	18/11/14	2.37380	18/11/14	1.50350	1.14949	1.43230
8차측량	19/02/14	2.54950	19/02/14	1.55624	1.19729	1.49323
선형회귀 기울기	-	**0.03504**	-	**0.01938**	**0.01686**	**0.02801**
저감효과	-	-	-	**44.7%**	**51.9%**	**20.1%**

(다) 궤도 응답 측정

① 궤도 응답 측정 일정

○ 1차 측정 (부설 전 궤도 상태 측정) : 2017년 4월 19일 08~20시
○ 2차 측정 (부설 후 1차 궤도 측정) : 2017년 6월 27일 07~19시
○ 3차 측정 (부설 후 2차 궤도 측정) : 2017년 8월 23일 07~19시
○ 4차 측정 (부설 후 3차 궤도 측정) : 2017년 11월 14일 07~19시

② 궤도 응답 측정 방법

○ 테스트베드 구축 전 궤도 상태 점검을 위하여 1차 측정, 구축 직 후 총 3회 측정
○ 측정 센서는 아래 표와 같으며, 설치된 센서 설치 위치도를 첨부함.

표 14 일반선 테스트베드 구축 전, 후 궤도응답 센서 설치 현황

구 분		테스트베드 구축 전				테스트베드 구축 후					
		일반 1	일반 2	일반 3	계	일반	광폭	접속부	I/B	HFS	계
레일 및 침목 거동	레일 윤중 (Vertical Load)	1	1	1	3	1	1	-	1	1	10
	레일 응력(Stress)	1	1	1	3	1	1	-	1	1	10
	침목 수직변위 (직접법)	3	3	3	9	3	3	6	3	3	36
	침목 수직변위 (간접법)	1	1	1	3	1	1	-	1	-	7
도상 거동	도상저항력 (Ballast Resistance)					3	3	-	-	-	6
계		5	5	5	15	9	9	6	6	5	65

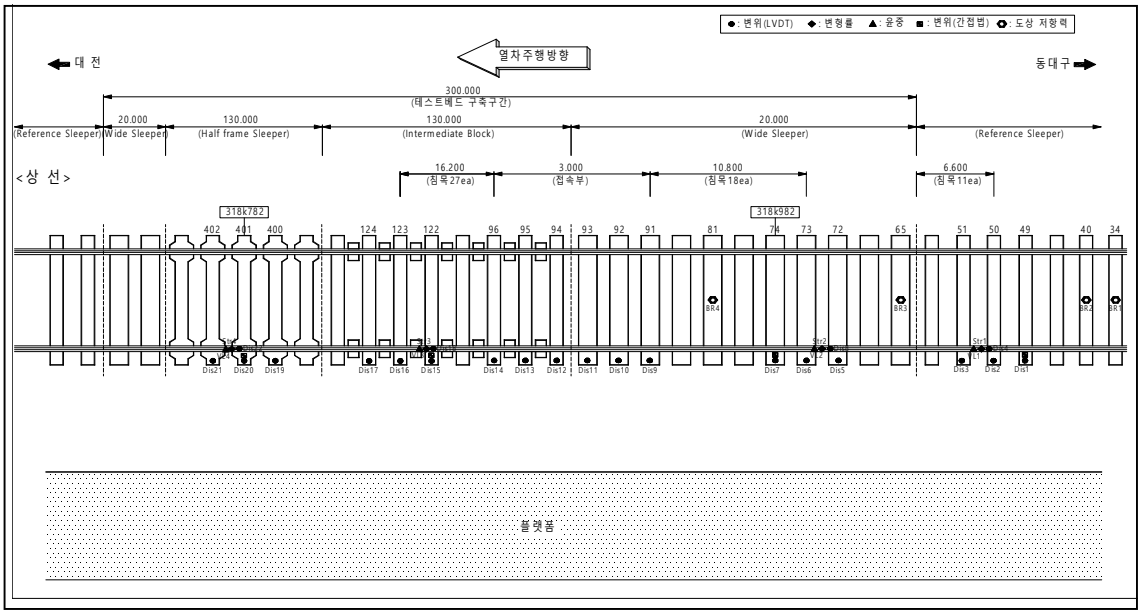


그림 220 일반선 시험부설 구간 센서 설치 위치도

③ 윤중 측정 결과 및 분석

○ 테스트베드 구축 이후 각 구간별 운행열차에 따른 차축별 레일 **윤중 결과를 최대 및 평균값**으로 나타내었으며 테스트베드 구축 전 1차 계측 결과는 구축 이후 계측 시에도 일반침목 구간의 계측을 수행하여 결과 분석 시 제외함

○ **윤중은 평균 40~60kN의 범위로 분포**하며, 침목 유형에 따른 윤중 변화는 크지 않음.

표 15 일반선 시험부설 구간 윤중 계측 결과

위 치	열차종류	윤중(kN)					
		2차		3차		4차	
		평균	최대	평균	최대	평균	최대
일반침목	ITX	57.41	93.58	56.12	91.18	60.08	95.53
	무궁화	61.12	142.14	61.70	183.27	60.91	130.95
	화물	59.79	160.91	52.34	121.80	51.67	119.48
광폭침목	ITX	44.82	58.97	59.61	117.58	50.92	124.52
	무궁화	54.44	130.41	62.57	197.63	58.00	139.91
	화물	57.47	116.71	66.34	150.05	50.66	114.65
I/B	ITX	46.21	83.08	49.36	80.04	47.44	69.93
	무궁화	47.48	110.78	52.30	133.78	51.34	114.42
	화물	53.75	106.64	50.22	140.29	48.07	114.02
HFS	ITX	40.80	66.78	46.57	91.40	46.27	93.07
	무궁화	53.61	119.20	52.55	154.92	54.73	130.10
	화물	58.36	111.38	49.02	116.99	49.26	111.63

○ VCRM에서 윤중 변동율 0.37 기준 만족 여부를 위해, 윤중 감소율을 산정함.

- 윤중 감소율을 측정하는 것은 차량에서 정해진 축에 센서를 부착하여 측정하는 것이

바람직하나, 궤도에서 측정을 할 경우 여러 열차의 다양한 정적 윤중의 축이 지나가는 것을 측정해야 하므로, 사실상 윤중 감소율을 산정할 수 없음

- 가장 일정할 것으로 예상되는 새마을호 첫 축에 대하여 모든 측정 결과의 윤중 값을 추출하여 윤중 감소율을 산정

○ 테스트베드 구축 전은 0.25 이하, 구축 직후 약간의 증가세를 보이다가 이후 모두 0.1 전후의 낮은 윤중 감소율을 보이며 윤중 변동이 크지 않음을 확인함.

○ **VCRM 기준에 따라 0.37 이하임을 확인함.**

표 16 일반선 시험부설 구간 윤중 변동률 결과

(a) 구축 전 1차 측정

구분	일반침목#1	일반침목#2	일반침목#3	비고
평균	46.222	54.192	54.715	
최소	34.705	47.773	45.759	
윤중 감소율 (1-최소/평균)	**0.249**	**0.118**	**0.164**	

(b) 구축 후 2차 측정

구분	일반침목	광폭침목	I/B	HFS
평균	55.326	45.228	42.766	38.535
최소	43.037	32.806	31.308	31.301
윤중 감소율 (1-최소/평균)	**0.222**	**0.275**	**0.268**	**0.188**

(c) 구축 후 3차 측정

구분	일반침목	광폭침목	I/B	HFS
평균	59.773	61.130	51.115	52.249
최소	52.838	49.715	47.323	45.093
윤중 감소율 (1-최소/평균)	**0.116**	**0.187**	**0.074**	**0.137**

(d) 구축 후 4차 측정

구분	일반침목	광폭침목	I/B	HFS
평균	59.293	49.630	47.298	50.510
최소	53.650	43.669	38.600	44.802
윤중감소율 (1-최소/평균)	**0.095**	**0.120**	**0.184**	**0.113**

○ 침목 유형간 평균 윤중의 변화를 볼 때, **기존 침목의 윤중이 가장 크게** 나타났으며, **I/B와 HFS에서 그 값이 작게 측정**되었음. 사실 윤중 자체는 하부 지지강성과는 무관한 값이라 할 수 있으며, 궤도의 상태, 즉 궤도틀림 상황 등에 영향을 받을 수 있음.

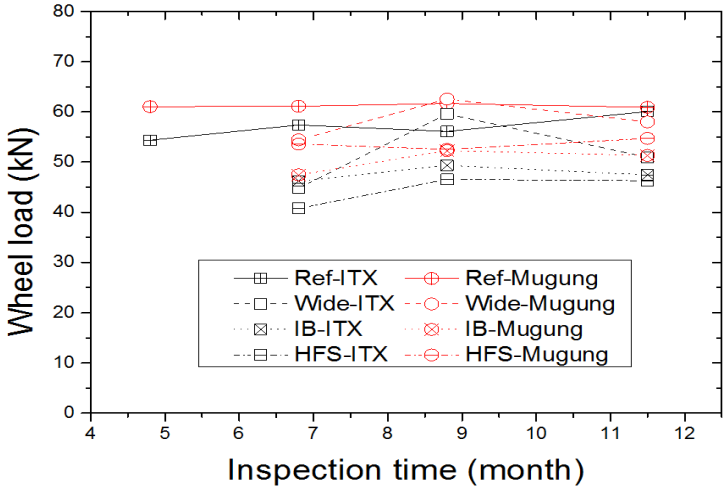


그림 221 일반선 시험부설 구간 침목 유형별 윤중 분포

④ 레일 응력 측정 결과 및 분석

○ 테스트베드 구축 이후 각 구간별 운행열차에 따른 차축별 레일 응력 결과를 최대 및 평균값으로 나타내었으며 테스트베드 구축 전 1차 계측 결과는 구축 이후 계측 시에도 일반침목 구간의 계측을 수행하여 결과 분석 시 제외함.

○ **레일 응력은 평균 13~25MPa의 범위로 분포**하며, 침목 유형에 따른 응력변화는 크지 않음.

○ **VCRM에 제시된 레일응력 기준 90MPa은 모든 침목에서 만족되고 있음.**

표 17 일반선 시험부설 구간 레일응력 계측 결과

위 치	열차종류	레일 응력(MPa)					
		2차		3차		4차	
		평균	최대	평균	최대	평균	최대
일반침목	ITX	18.68	34.13	19.32	38.42	17.63	33.43
	무궁화	19.54	41.15	20.43	59.02	18.72	54.11
	화물	17.43	44.33	16.46	37.49	13.79	34.43
광폭침목	ITX	19.13	30.19	21.53	36.85	23.50	51.45
	무궁화	22.28	52.35	24.94	59.69	25.04	57.97
	화물	19.75	43.39	19.91	44.26	18.82	43.54
I/B	ITX	15.82	23.27	17.47	39.93	17.85	30.92
	무궁화	16.23	41.79	18.87	58.76	18.30	43.07
	화물	14.93	32.09	14.72	55.89	13.61	33.32
HFS	ITX	17.32	25.66	17.58	35.85	18.24	37.19
	무궁화	21.16	48.44	21.96	62.59	21.87	57.65
	화물	18.93	37.15	16.58	39.75	15.63	35.61

○ 침목 유형간 평균 레일 응력 변화를 볼 때, 침목 면적이 넓어 하부지지 강성이 큰 **광폭**

침목(Wide)과 HFS에서 레일에 가해지는 응력이 다소 크게 나타나고 있으며, 일반 침목을 그대로 사용한 **Ref와 I/B에서는 응력 값이 작게 측정**되고 있음.

○ I/B도 저면적 기준으로 넓어져서 강성이 증가된 것은 사실이지만, 침목 간격이 좁아지는 효과 때문에 레일에 가해지는 응력은 낮아진 것으로 판단되며, **레일의 피로 측면에서 긍정적인 영향**을 미칠 수 있을 것으로 보임.

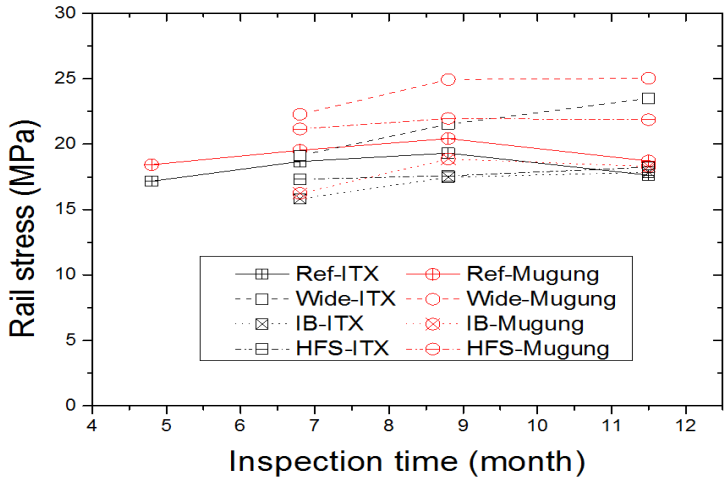
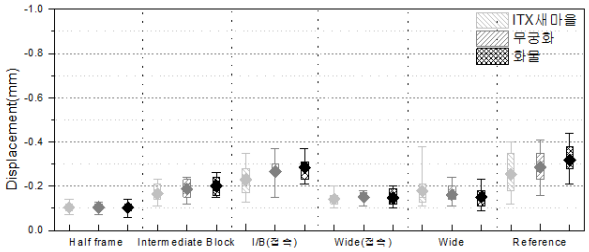


그림 222 일반선 시험부설 구간 침목 유형별 레일 응력 분포

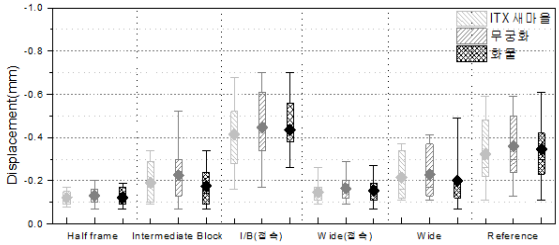
⑤ 침목 변위 측정 결과 및 분석

○ 침목 유형간 평균 침목 변위의 변화를 분석한 결과, **침목지지 면적이 넓어지면서, 궤도 강성이 증가**되고, 이는 **침목의 변위를 작게** 하는 결과로 이어짐.

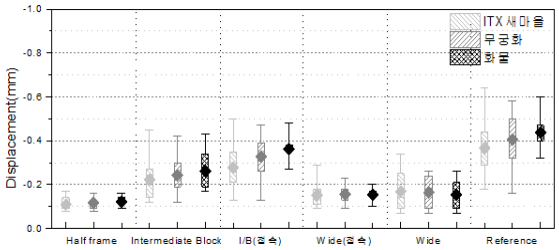
○ 침목의 지지면적에 따라 도상의 지지 강성과 하중 분배율이 달라지며, 침목 자체의 변위 감소로 도상의 가진 진폭을 줄임으로써 **궤도틀림 진전효과를 줄일 수 있음**.



(a) 구축 1개월 후



(b) 구축 3개월 후



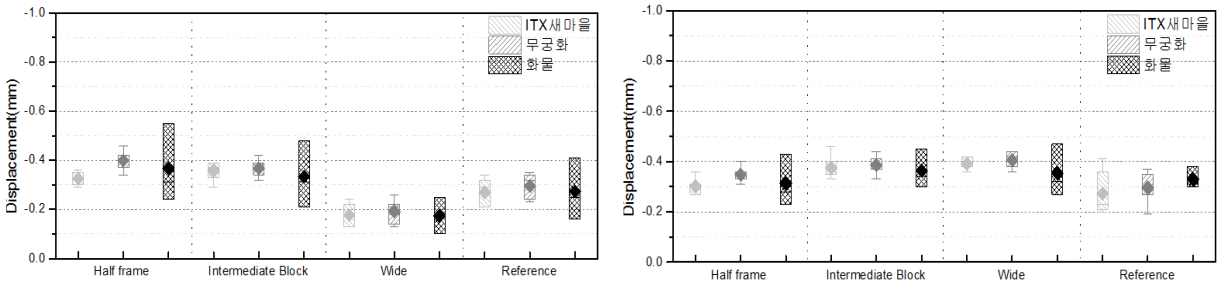
(c) 구축 6개월 후

그림 223 일반선 시험부설 구간 침목 변위 분포

⑥ 레일 변위 측정 결과 및 분석

○ 테스트베드 구축 후 구간별 운행열차에 따른 차축별 레일 변위 결과를 최대 및 평균값으로 나타내었으며, **레일 변위는 0.2~0.4mm의 범위 내에서 분포**하는 것으로 확인되었음.

○ 침목 변위의 경우 부설 후 초기에 침목간 변위 차이가 뚜렷한 반면, 4차 측정 시 레일 변위는 침목 유형별로 큰 차이가 보이지 않으며, 전체 궤도 강성 차원에서는 패드의 강성 조정 등으로 궤도 강성이 비슷하게 유지되고 있음.



(a) 구축 3개월 후 (b) 구축 6개월 후

그림 224 일반선 시험부설 구간 레일 변위 분포

⑦ 도상 저항력 측정 결과 및 분석

○ 테스트베드 부설 후 침목 횡변위 2mm일 때 횡하중을 측정하여 도상저항력을 측정함.

○ 도상저항력은 도상 교란 후 그 값이 감소하다가, 누적 통과통수 증가로 복원됨.

- 부설 후 1개월 내에 1차 측정하고, 5개월 후 재측정을 통한 안정화를 확인하고자 하였으나, 1개월 이후에 충분히 도상이 안정화 되어 **횡저항력이 VCRM 기준치인 500kgf/m(5kN/m) 기준을 충분히 상회하는 결과**를 보여주었고, 4차 측정에서 측정한 도상 저항력도 큰 변화 없이 유사한 값을 나타내고 있음

○ 일반침목 구간(11.60~14.95kN/m)에 비해 **광폭침목 구간(15.23~18.25kN/m)에서 도상저항력이 상대적으로 크게** 나타났으며, 침목 중량과 면적 증가로 나타난 현상으로 판단됨.

○ HFS의 경우 현재의 도상 저항력 측정 장치로는 측정이 불가하여 대상에서 제외하였으나 광폭침목과 동등 이상의 결과가 나올 것으로 예상됨.

○ I/B의 경우도 기존 침목에 추가 설치하는 것으로 기존침목 결과를 상회할 것으로 예측됨.

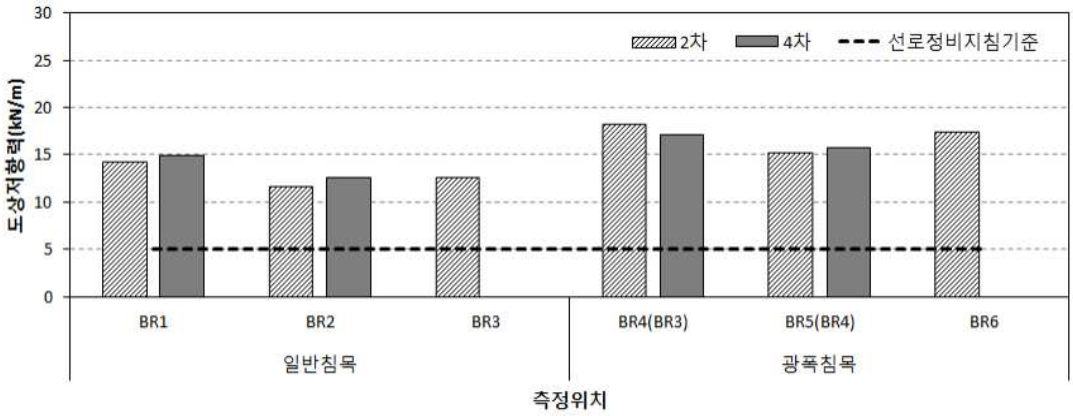


그림 225 일반선 시험부설 구간 도상저항력 평균값 분석결과

(4) 고속선 시험부설 구간 현장계측 결과

(가) Testbed 현장 계측 개요

① 현장 계측을 통한 기존 침목 대비 개량 침목 구조의 성능 확인

○ 3차원 정밀 측량 : 궤도틀림 진전률 산정

○ 궤도 응답 계측 : VCRM의 만족도 평가

② Testbed 현장 계측 종류

○ 3차원 정밀 측량 : 레일면 고저 면틀림, 레일 좌우 줄틀림, cant, 궤간 확인

○ 궤도 응답 계측 : 침목 변위, 윤중 및 레일 응력, 도상 저항력 등 계측

(나) 현장계측 항목의 목적

① 3차원 정밀 측량

○ 일정 주기로 절대 선형을 측정함으로써, 접속부의 **장기적인 궤도틀림 관측**이 가능

② 궤도 응답 계측

○ 궤도 응답을 계측함으로써, 신설선 개통 시 시운전 시험과 동일하게 VCRM에 지정한 궤도 응답이 일정 범위 이내를 **만족**하는지 확인하여 궤도의 안정성을 확인하고자 함

(다) 3차원 정밀 측량

① 측량 일정 (총 7회)

○ 18/10/26~11/9 : 고속선 테스트베드 구축

○ 18/11/12 : 1차 측정

○ 18/11/25 : 2차 측정

○ 19/12/18 : 3차 측정

○ 19/02/12 : 4차 측정

○ 19/03/30 : 5차 측정

○ 19/06/07 : 6차 측정

○ 19/09/25 : 7차 측정

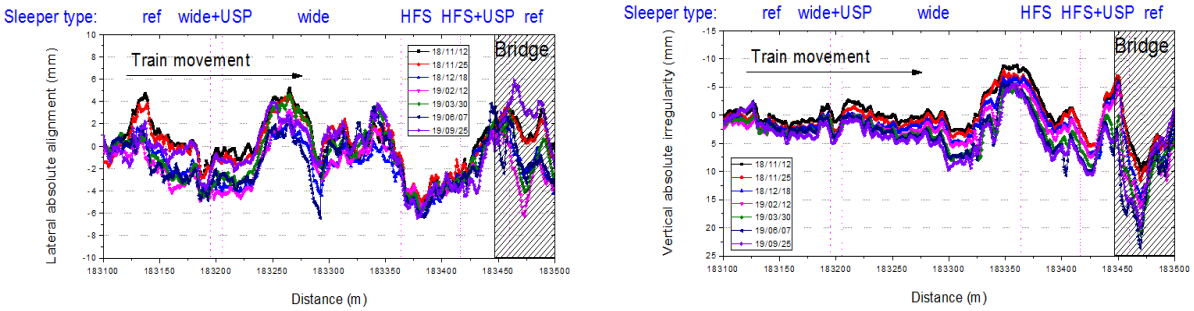
② 3차원 측량 결과

㉮ 절대선형

○ 약 10개월간의 모니터링 기간 중, 일반(reference)침목 부설 구간은 별도의 작업이 없었으므로 그 침하량이 작게 평가됨

○ 침목 개량 공사 시 도상의 교란으로 개량 구간 일부 침하 발생

○ 시험부설 시 인접한 교량부는 궤도 불량으로 인한 침하 진전이 크게 발생



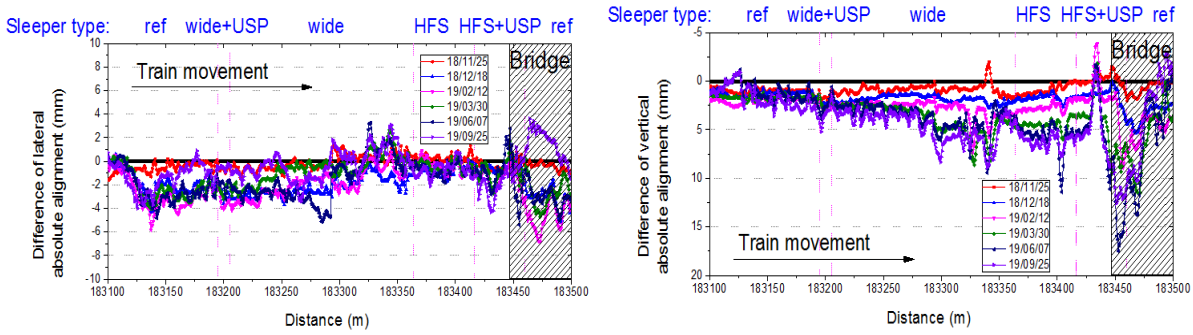
(a) 수평방향 절대선형 (b) 수직방향 절대선형

그림 226 고속선 시험부설 구간 절대선형 측량 결과

㉯ 절대선형 변화량

○ 수평방향 절대선형은 HFS 설치구간의 변화량이 가장 작음

○ 수직방향 침하 진전량은 점차 안정화 됨



(a) 수평방향 절대선형 변화량 (b) 수직방향 절대선형 변화량

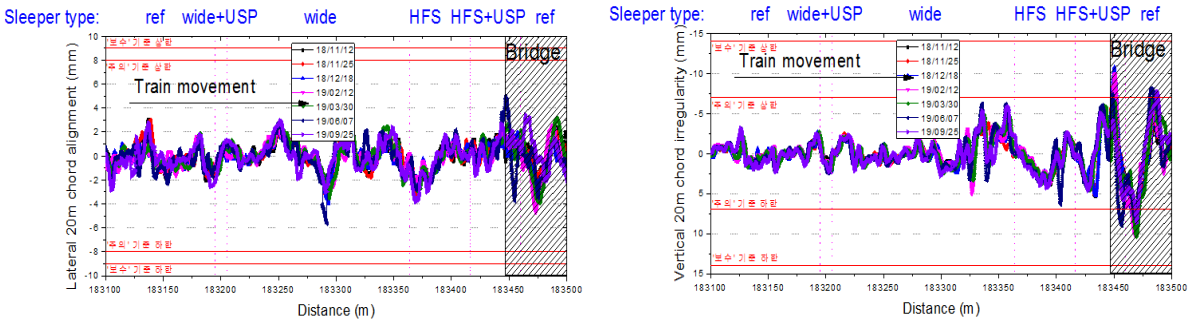
그림 227 고속선 시험부설 구간 절대선형 변화량

㉰ 20m 현 궤도틀림

○ 절대선형 측량 결과는 현재 고속선을 관리하는 20m 현방식 궤도틀림으로 변환 가능

○ 수평방향 궤도틀림은 10개월 기간에 걸쳐 커다란 변화가 나타나지 않음

○ 수직방향 궤도틀림은 변화가 크지 않으나, 초기 부설시 양로가 많이 되어 추가 작업을 한 구간과 용접 불량개소 인근에서 궤도틀림 변화가 나타나고 있음을 확인함.



(a) 수평방향 20m 현 궤도틀림 (b) 수직방향 20m 현 궤도틀림

그림 228 고속선 시험부설 구간 20m 현 궤도틀림 결과

③ 3차원 정밀 측량 결과 분석

○ 궤도틀림 진전률 비교

- 시험부설구간 궤도틀림 표준편차를 정리하면 아래 표와 같음.
- 인접 기존 침목 부설 구간은 상태가 매우 양호하여 궤도틀림 진전률이 0.0336이며,
- **개량 구간 전체의 궤도틀림 진전률은** 0.0158로 약 **52.8%의 진전률 개량효과** 확인.
- 인접 대조군이 매우 안정적인 구간임을 감안하면 **고속선에서 매우 우수한 궤도틀림 진전률 저감효과를 보인다**고 볼 수 있음.

표 18 고속선 시험부설 구간 궤도틀림 표준편차 변화율

구분	측정시기	토공부 일반	개량 공사 전구간	광폭침목 - 전체	광폭침목 - good	HFS	교량부 일반
1차측량	18/11/12	0.77527	2.06261	1.24847	0.86676	2.96518	3.36251
2차측량	18/11/25	0.75430	2.11885	1.29166	0.96342	3.05776	3.76648
3차측량	19/12/18	0.82043	2.14292	1.30900	0.90608	3.09018	4.31152
4차측량	19/02/12	0.82346	2.24016	1.55652	0.97148	3.07058	4.39855
5차측량	19/03/30	0.83621	2.06159	1.66703	0.97464	2.55118	4.52157
6차측량	19/06/07	1.04362	2.50941	1.80967	1.00590	3.27530	4.34196
7차측량	19/09/25	1.10202	2.14785	1.75193	1.09618	2.59357	3.97779
선형회귀 기울기		0.03358	0.01585	0.05508	0.01738	-0.02912	0.03835
저감효과			**52.8%**	**-64.0%**	**48.2%**	**186.7%**	**-14.2%**

- 침목별 비교 시, 광폭침목은 기존 침목에 비해 궤도틀림 진전 효과가 낮게 나왔으나, 이는 시공 중 용접 불량으로 궤도틀림이 급하게 진전되어 나타났으나, 이후 용접부는 연마차 연마를 통해 문제를 해결함.
- 해당 구간을 제외하고 평가 시, **광폭침목(good)**의 궤도틀림 진전 효과는 **약 48%의 개선 효과를 보임**. 이 특성은 일반선의 HFS와 유사한 값으로 볼 수 있음.
- 즉 **전반적으로 광폭침목이나 HFS 모두 궤도틀림 진전률 저감 효과는 충분히 발현되고 있는 것으로 판단됨.**

④ 고속선 다짐 이력 분석

㉮ 다짐 이력

표 19 고속선 테스트베드 구축 전, 후 다짐 이력표

설치구간		테스트베드 구축 전 (2018.01 ~ 2018.10)		테스트베드 구축 후 (2018.11 ~ 2019.07)		STA.
		횟수	연장(m)	횟수	연장(m)	
광폭침목	인력다짐	18 (100%)	187	5 (28%)	43	183k194-183k361
	장비다짐	32 (100%)	1,223	1 (3%)	16	
HFS	인력다짐	14 (100%)	170	0 (-)	0	183k361-183k458
	장비다짐	32 (100%)	964	7 (22%)	60	

㉯ 다짐 이력 분석

○ 궤도틀림 진전률은 목표인 70%를 달성하지는 못했지만, 유지보수 작업량으로 판단 시

30% 이내를 충분히 달성하였음을 알 수 있음,

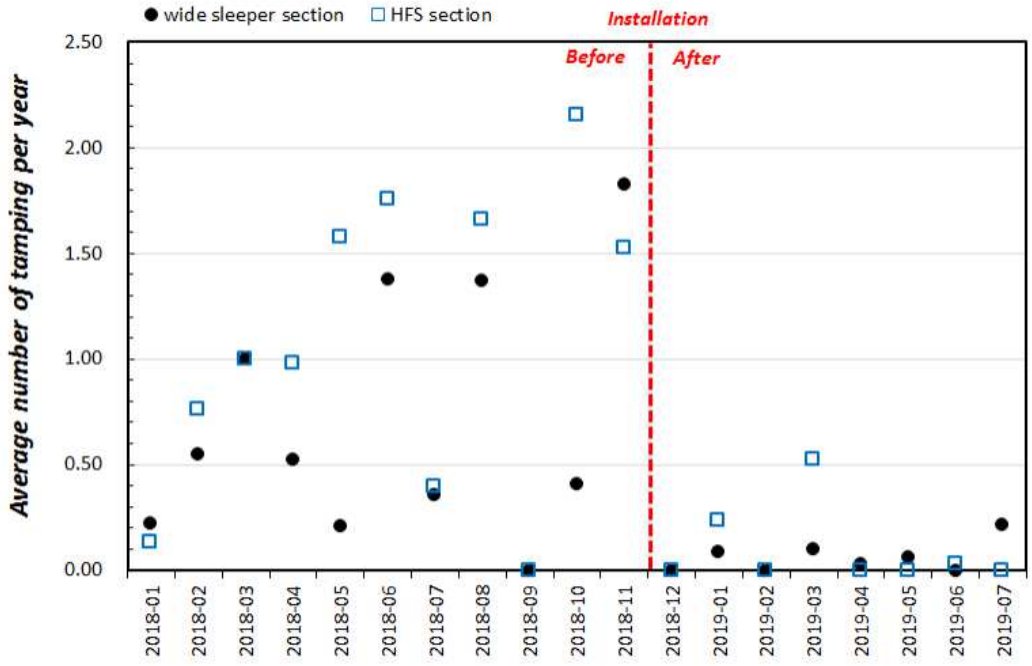


그림 229 고속선 시험부설 구간 개량 작업 전후 궤도 유지보수 작업량 비교

(라) 궤도 응답 측정 결과

① 궤도 응답 측정 일정

○ 1차 측정 (부설 후 1차 궤도 측정) : 2018년 12월 19일 07~19시

○ 2차 측정 (부설 후 2차 궤도 측정) : 2019년 09월 25일 07~19시

② 궤도 응답 측정 방법

○ 궤도응답을 측정하기 위해 테스트베드 구축 이후 두 차례에 걸쳐 계측을 수행함. 측정 센서는 아래 표와 같으며, 설치된 센서의 사진을 첨부함.

표 20 고속선 테스트베드 구축 후 궤도응답 센서 설치 현황

구 분		일반 침목	테스트베드 구축구간		계
			광폭	HFS	
레일 및 침목 거동	레일 윤중(Vertical Load)	2	2	2	6
	레일 횡압(Lateral Load)	2	2	2	6
	레일 응력(Stress)	2	2	2	6
	침목 수직변위	2	2	2	6
도상 거동	도상저항력(Ballast Resistance)	2	2	2	6
계		10	10	10	30

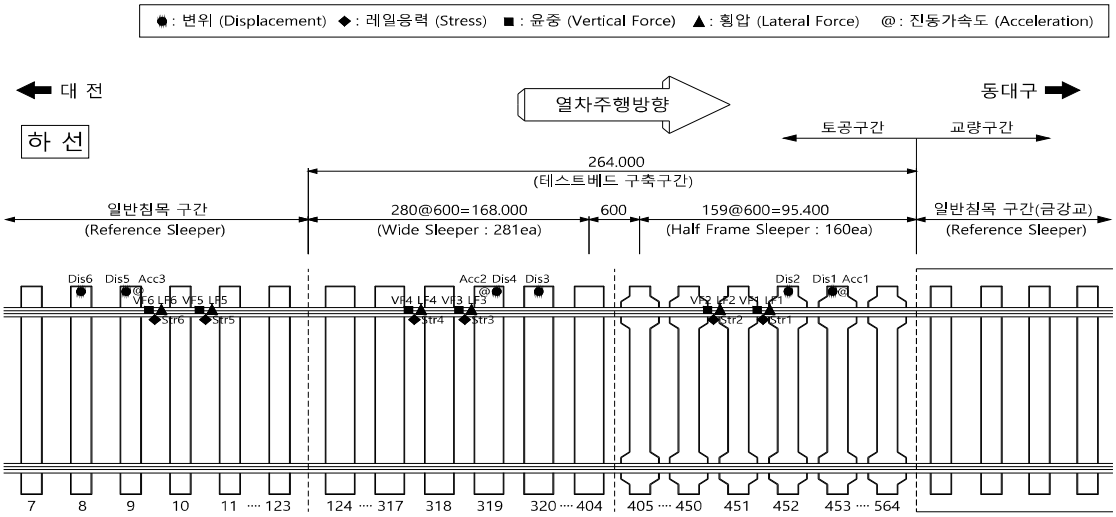


그림 230 고속선 시험부설 구간 센서 설치 위치도

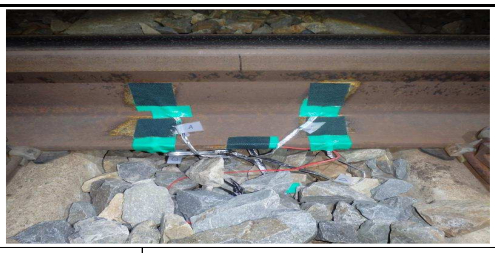
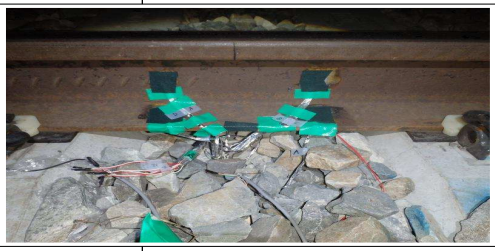
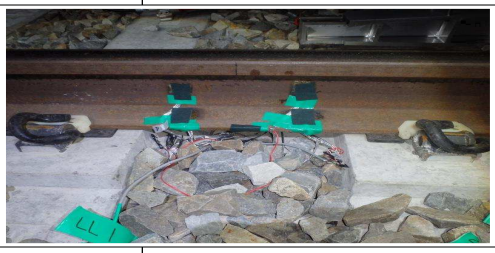
			
일반침목	레일 윤중, 횡압 및 저부응력	일반침목	침목변위
			
광폭침목	레일 윤중, 횡압 및 저부응력	광폭침목	침목변위
			
HFS침목	레일 윤중, 횡압 및 저부응력	HFS침목	침목변위
			
윤중검증시험		Data Logger	

그림 231 고속선 시험부설 구간 센서 설치 및 현장계측 광경

③ 윤중 측정 결과 및 분석

○ **윤중은 평균 68~78kN의 범위로 분포**하며, 침목 유형에 따른 윤중 변화는 크지 않음.
○ 횡압은 평균 -2~-6kN으로 작은 범위로 분포하며, 침목 유형에 따른 변화는 크지 않음.

표 21 고속선 시험부설 구간 윤중/횡압 계측 결과

위치	열차 종류	1차계측				2차계측			
		윤중 (kN)		횡압 (kN)		윤중 (kN)		횡압 (kN)	
		평균	최대	평균	최대	평균	최대	평균	최대
HFS	KTX	73.73	94.45	-5.54	-10.79	68.11	86.49	-5.29	-10.11
	SRT	77.71	103.85	-5.61	-10.21	70.19	82.59	-4.30	-8.18
광폭 침목	KTX	71.93	89.91	-4.30	-8.89	69.98	82.35	-2.83	-4.86
	SRT	76.39	96.77	-3.34	-8.32	70.28	85.36	-2.36	-6.59
일반 침목	KTX	73.30	93.30	-5.96	-9.85	70.33	84.01	-5.20	-9.15
	SRT	74.75	101.44	-5.70	-8.97	69.62	83.29	-4.23	-7.25

※ 횡압 : (+) 궤간 외측, (-) 궤간 내측

○ VCRM에서 윤중 변동율 0.37 기준 만족 여부를 위해, 윤중 감소율을 산정함.
- KTX의 정적 윤중을 대푯값으로 하여 각 축에서 측정된 윤중으로 윤중 감소율을 산정
○ 1차 측정 결과는 0.20 이하, 2차 측정 결과는 최대 0.27 이하의 윤중 감소율을 보이고 있음.
○ **VCRM 기준에 따라 0.37 이하임을 확인함.**

표 22 윤중 변동률 결과

(a) 1차 측정

구분	HFS	광폭침목	일반침목	비고
KTX	0.065	0.056	0.038	
SRT	0.072	0.200	0.200	
최소	**0.072**	**0.200**	**0.200**	**0.200**

(b) 2차 측정

구분	HFS	광폭침목	일반침목	비고
KTX	0.188	0.228	0.193	
SRT	0.244	0.168	0.264	
최소	**0.244**	**0.228**	**0.264**	**0.264**

④ 레일 응력 측정 결과 및 분석

○ 레일 응력은 1~2차 모두 평균 23~30MPa의 범위로 분포하며, HFS와 일반침목이 유사하고, 광폭침목이 다소 높게 나타나는 경향을 보이나, 그 차이가 크지는 않음
○ **VCRM에 제시된 레일응력 기준 90MPa은 모든 침목에서 만족함.**

표 23 고속선 시험부설 구간 레일응력 계측 결과

위치	열차 종류	1차계측		2차계측	
		레일응력 (MPa)		레일응력 (MPa)	
		평균	최대	평균	최대
HFS	KTX	24.67	35.48	24.36	38.26
	SRT	25.00	42.77	25.46	39.23
광폭 침목	KTX	29.30	37.41	29.80	35.80
	SRT	28.41	40.06	26.43	38.27
일반 침목	KTX	24.91	30.93	26.49	34.68
	SRT	23.18	32.08	24.37	32.91

⑤ 침목 변위 측정 결과 및 분석

○ 침목 수직변위 1차 계측 결과에서 침목 유형별 차이를 뚜렷하게 보여주고 있음.

- 폭이 넓은 HFS와 광폭침목에서 기존침목 대비 변위가 작게 측정되는 결과를 보여주어 개량 침목의 성능 향상 효과를 확인할 수 있었음.

○ 2차 계측 결과에서 HFS는 1차 계측 결과와 차이가 없는 반면, 광폭침목은 그 변위 자체도 증가하였고 분포도 늘어난 것으로 보여짐.

- 이는 1차 계측 결과에서는 변위계 이상으로 광폭침목 1개에 대한 측정만의 결과이고, 2차 계측에서는 2개 침목에 대한 계측 결과를 합해서 보여주어 나타난 결과일 뿐 실제 거동은 그래프와는 다소 상이함을 세부 측정 결과를 통해 확인할 수 있음.

○ **각 계측 결과는 1~2차 모두 큰 차이가 없음**을 확인하였으며, 그 변위량도 매우 작으므로 **도상에 의해 적절히 지지**되고 있음을 알 수 있음.

표 24 고속선 시험부설 구간 침목 수직변위 계측 결과

위치	열차 종류	1차계측		2차계측	
		침목변위 (mm)		침목변위 (mm)	
		평균	최대	평균	최대
HFS	KTX	0.11	0.15	0.16	0.21
	SRT	0.07	0.08	0.16	0.21
광폭 침목	KTX	0.13	0.16	0.19	0.26
	SRT	0.07	0.08	0.19	0.29
일반 침목	KTX	0.19	0.27	0.19	0.31
	SRT	0.21	0.28	0.18	0.30

※ 침목변위 : (+) 하향, (−) 상향

⑥ 도상 저항력 측정 결과 및 분석

○ 테스트베드 부설 후 침목 횡변위 2mm일 때 횡하중을 측정하여 도상저항력을 측정함.

○ 도상저항력은 도상 교란 후 그 값이 감소하다가, 누적 통과통수 증가로 복원됨.

- 1차 측정은 도상저항력 장비 이상으로 측정 못하였고, 2차 측정만 수행함.

○ 기존침목은 충분히 안정화를 거친 구간으로 약 1,333kgf/m으로 측정되었으며, 기준치

900kgf/m(9kN/m)를 충분히 상회하고 있음.

○ 개량침목은 **광폭침목이 1,813kgf/m, HFS가 1,948kgf/m로 모두 기준치의 2배에 해당하는 큰 저항력을 확보**하고 있음. 따라서 VCRM 기준을 만족함.

- 종저항력을 현장에서 측정할 수 있는 장비가 없어 측정은 불가하였지만 도상 횡저항력의 증가 경향을 볼 때, **기존 침목 대비 동등 이상의 도상 종저항력을 충분히 확보할 것으로 기대됨**.

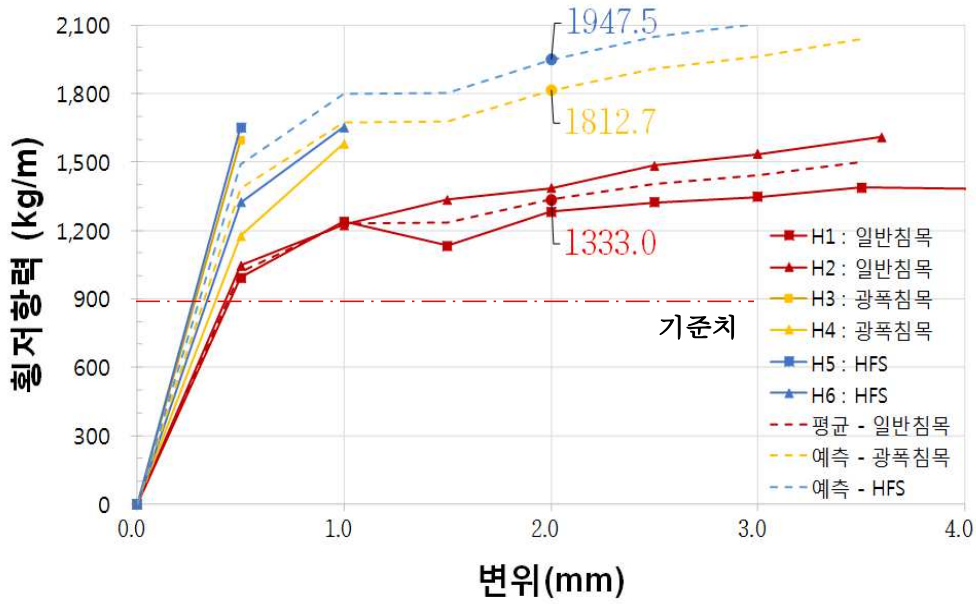
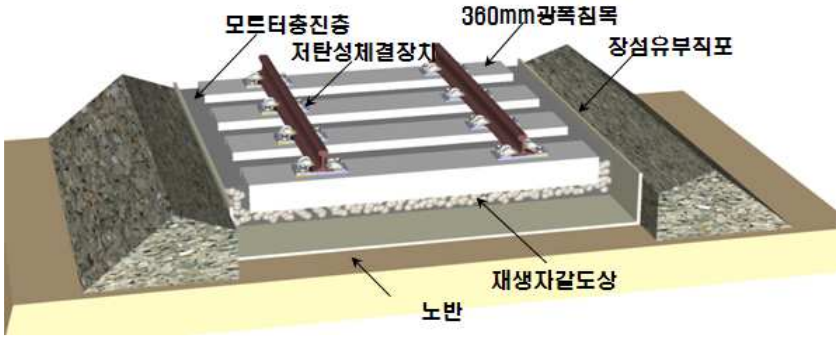


그림 232 고속선 시험부설 구간 도상 횡저항력 측정 결과 및 예측

(3세부)

가. 토공 및 터널구간 급속경화궤도 시스템 설계



<그림 2.1> 급속경화궤도 개념도

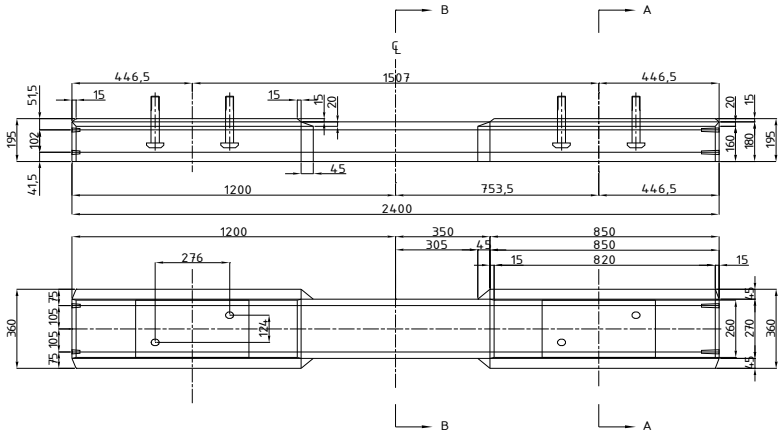
(1) 고속선 적용을 위한 설계조건

(가) 개념

○ 고속선 급속경화궤도는 고속철도(350km/h 급) 또는 고속화 노선(350km/h 미만)에서 기존 자갈을 세척자갈로 교체한 후, 침목 아래에 부직포로 감싼 소정의 자갈도상층을 모르터로 충전, 고결하여 콘크리트 슬래브 구조로 만들어 2시간 후부터 열차의 운행이 가능하여야 한다.

(나) 구성요소별 요구조건

○ 광폭침목은 하중을 효율적으로 분산하며, 단면의 폭은 360mm, 두께는 195mm를 표준으로 한다. 침목제작에 사용되는 시멘트는 3종 시멘트를 사용하며, 압축강도 50MPa 이상, 슬럼프 3±1cm를 적용하고, EN 13230-2를 만족하도록 한다.



<그림 2.2> 광폭침목의 표준단면도

○ 시멘트 모르터 충전재료는 작업 특성상 짧은 시간내에 작업이 완료되어야 하므로 초속경성, 고유동성, 충전성, 고강도성을 확보하여야 한다. 또한 모르터 조성물과 특수 첨가재의 정전기적 특징을 이용하여 모르터가 의소성유체의 물성을 갖도록 하고 자갈사이에 빈 공간이 없도록 하며 충전이 용이하여야 한다. 모르터 충전재료는 아래 표의 설계강도 및 재료특성을 충족하여야 한다.

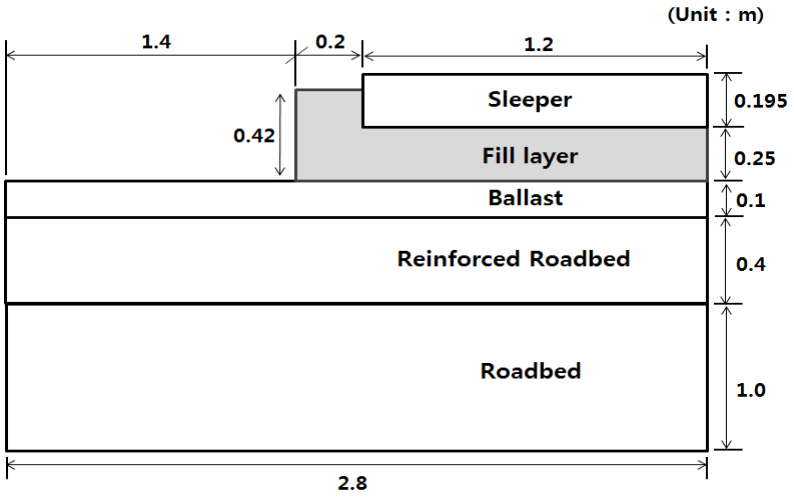
<표 2.1> 모르터 목표 품질성능 평가 기준

평가항목		목표 품질성능		
		Bascon-MF	Bascon-MF저강도	고속선 개발제품
압축강도	2hr	10MPa ↑	6MPa ↑	5MPa ↑
	28일	30MPa ↑	30MPa ↑	30MPa ↑
수축변형률	기건 5주	Min. 2,000 μ ε	-	Min. 600 μ ε
동결융해	300Cycle	-	-	60%↑

○ 토목섬유는 충진재인 시멘트 모르터의 누출을 방지하기 위하여 적용하며, 우수 또는 표면수에 의해 유입된 물은 즉시 배출할 수 있어야 하고, 성형이 자유로우며 절단 또는 접합이 용이하여야 한다. 또한 인장강도 및 투수성을 고려하여 장섬유 니들펀칭 부직포가 적합하며 인장강도는 70kN/m 이상, 투수계수는 0.15cm/sec 이상이어야 한다. 체결장치는 콘크리트궤도용을 적용하며 KRS 규격에 적합한 것이어야 한다.

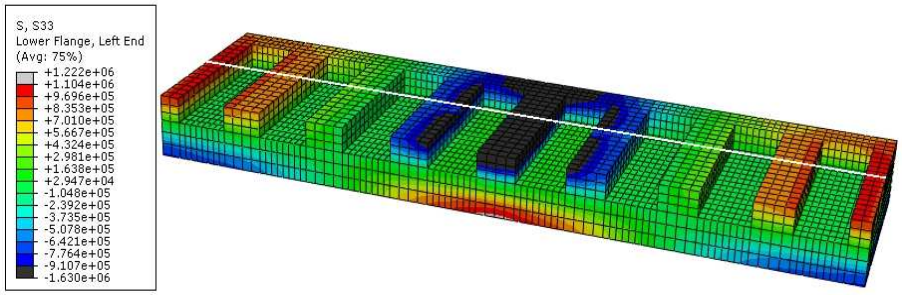
(2) 급속경화궤도 구조설계

○ 실제 거동과 유사하게 평가하기 위하여 충진층 및 노반층을 아래 그림과 같이 구성하였다. 급속경화궤도(레일, 체결구, 침목)를 포함하여 상부로부터 시멘트 모르터가 주입되는 충진층(Fill layer), 기존 도상과 세립분이 혼합되어 있는 도상층(Ballast), 강화노반층(Reinforced Roadbed) 그리고 원지반인 노반층(Roadbed)으로 구성하였으며, 노반과 충진층 및 침목은 연속체로 가정하였다.



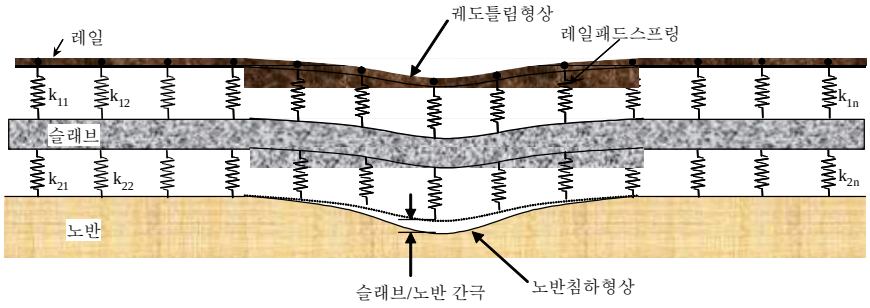
<그림 2.3> 1/2모델 설계 단면도

○ 노반의 지지강성이 국부적으로 연약한 경우에 충진층에서 나타나는 변형 특성을 검토한 결과, 연약지반의 강성이 30MPa일 때 레일방향 최대인장응력이 1.37MPa로 기존 단면의 최대응력(1.03MPa)와 비교하였을 때 약 25% 크게 나타나는 것을 확인하였다.



<그림 2.4> 충진층에서 발생하는 레일방향 인장응력 contour

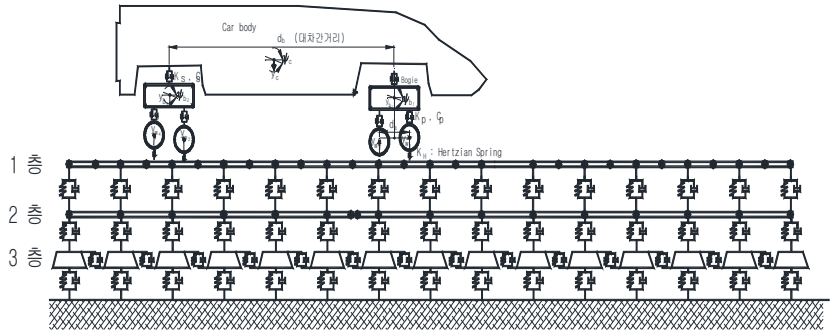
○ 슬래브와 노반 사이에 간극(gap)이 존재하는 경우에 충진층에서 나타나는 변형 특성을 검토한 결과, 간극이 있을 때 최대인장응력이 2.45MPa로 기본 단면의 최대응력과 비교하여 약 2.4배 크게 나타났고, 최대변위는 1.59mm로 기존 단면의 변위 0.34mm과 비교하여 약 4.6배 크게 나타나는 것을 확인하였다.



<그림 2.5> 노반침하구간 슬래브궤도 처짐형상

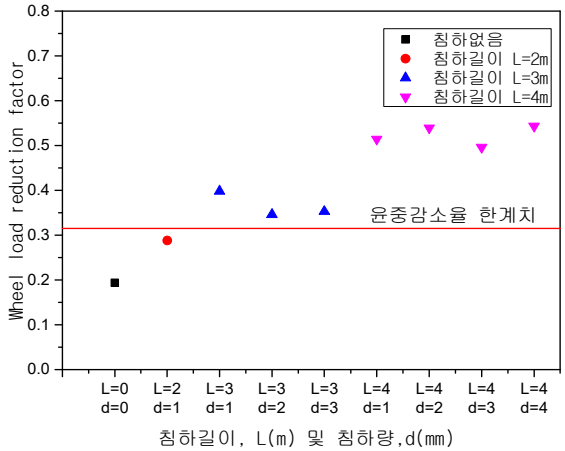
(3) 차량 주행안정성 및 궤도안정성 검토

○ 상부의 레일 및 슬래브는 티모센코 보요소(Timoshenko Beam Element), 레일과 슬래브를 연결하는 체결구는 스프링(Linear Spring) 및 댐퍼(Damper), 하부의 얇은 자갈층은 스프링 및 댐퍼로 지지되는 질점요소, 및 최하부의 강화노반 및 노반은 Winkler 기초로 모델링되었다. 차량/궤도 상호작용 해석시 해석모델의 급속경화궤도 길이는 슬래브판 5개를 포함하여 총 149.76m, 슬래브 이음부 위치 및 슬래브 길이의 영향을 검토하였다.

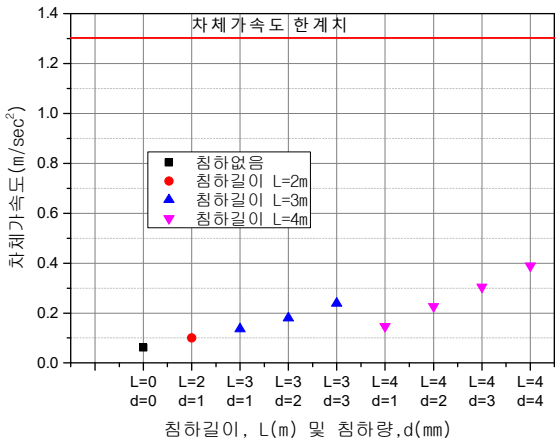


<그림 2.6> 차량/궤도 상호작용 모델링

○ KTX 10량 1편성이 400km/h로 주행시, 주행안정성 및 승차감 확보여부를 검토하기 위해 윤중변동율 및 차체가속도를 검토하였고, 궤도의 구조안정성을 검토하기 위하여 레일저부 및 슬래브 응력을 검토하였다. 9가지 노반침하형상에 따른 윤중변동율을 검토한 결과 슬래브 단부에서 침하길이 2m 이내, 침하량 1mm 이하로 엄격하게 관리하여야 하는 것으로 나타났으며, 차체의 최대가속도를 검토한 결과 슬래브 단부에서 노반이 침하함에 따라 차체 진동에 따른 승차감 저하는 크지 않는 것으로 나타났다.



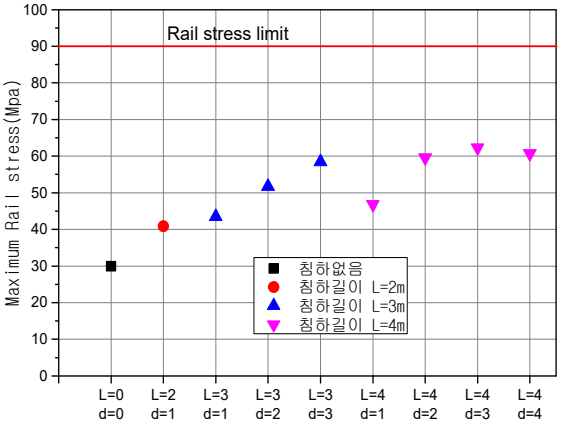
슬래브 단부에서 윤중변동율 변화



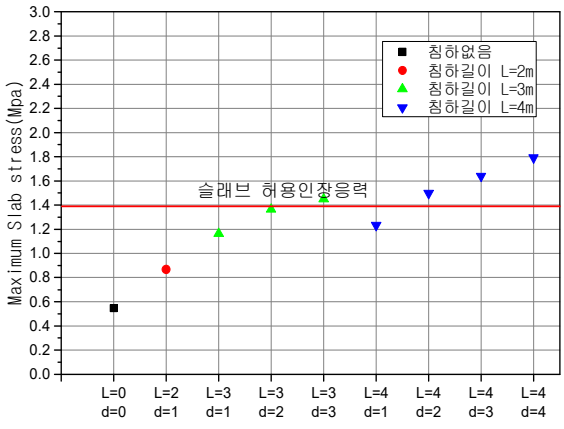
슬래브 단부에서 최대수직가속도 변화

<그림 2.7> 슬래브 단부에서의 검토 결과

○ 노반침하형상에 따른 슬래브 조인트부에서 레일저부응력을 검토한 결과 슬래브 단부에서 노반이 침하하더라도 레일저부응력은 허용응력 이하로 발생하는 것으로 나타나 레일의 구조안정성이 확보되는 것으로 나타났다. 슬래브 단부에서 2m 이격된 지점에서 슬래브 인장응력을 검토한 결과 궤도슬래브의 구조적 안정성을 확보하기 위해서는 노반 침하량을 1mm 이하로 제한하여야 하는 것으로 나타났다.



슬래브 조인트부에서 레일저부 최대응력 변화



슬래브 조인트부에서 최대응력 변화(2m 이격)

<그림 2.8> 슬래브 조인트부에서의 검토 결과

(4) 노반 상부층의 밀도변화에 의한 궤도특성 검토

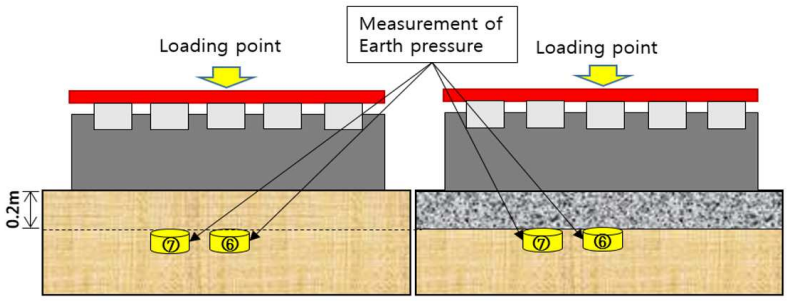
○ 노반 상부층의 밀도변화에 따른 급속경화궤도의 영향을 평가하기 위하여 실물크기의 공시체를 제작하여 반복하중에 의한 궤도특성을 측정하였다. 시험단면은 도상이 완전히 제거되고 노반면에 궤도가 시공되는 경우와 도상층의 일부가 잔존하는 경우에 대하여 실험을 수행하였다. 반복재하에 따른 변화를 측정하기 위하여 변위계, 토압계, 가속도계를 각각 설치하였으며, 변위계는 하중재하지점 기준으로 침목상면우측, 침목상면좌측에 각 1개소씩 설치하였고, 토압계는 하중재하 직하부와 인접침목 궤도하면으로부터 0.2m 깊이 강화노반에 매설하였다.



노반면에 궤도 시공(도상 완전제거 후)

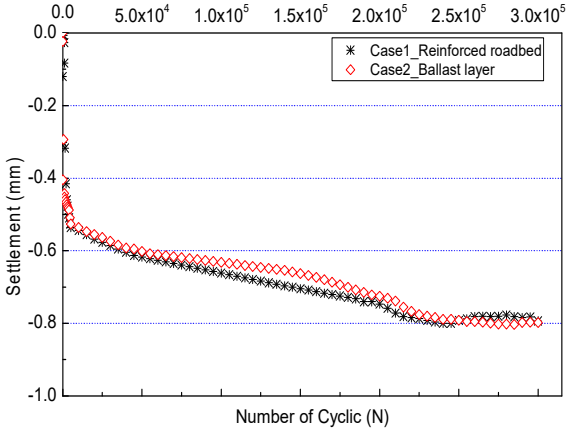


도상층 일부가 잔존하는 면에 궤도 시공

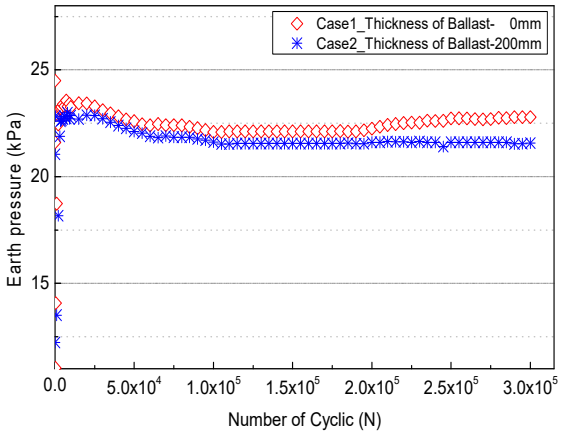


<그림 2.9> 계측센서 설치위치도

○ 누적 소성침하는 재하 초기시점인 1,000회에서 5.68mm 침하가 발생하였고 20만회에서 0.782mm로 점진적으로 증가하다고 20만회가 지나면서 거의 수렴하는 경향을 나타냈다. 토압계는 압력이 작용하는 면을 보호하고, 하중이 균일하게 작용하도록 보호층으로 표준사를 감싼 후 매설하여 측정하였으며, 하중재하 직하부에서 최대 토압이 강화노반에서 23.5kPa로 측정되었다.



누적소성침하값



하중재하 직하면에서 토압 평균값

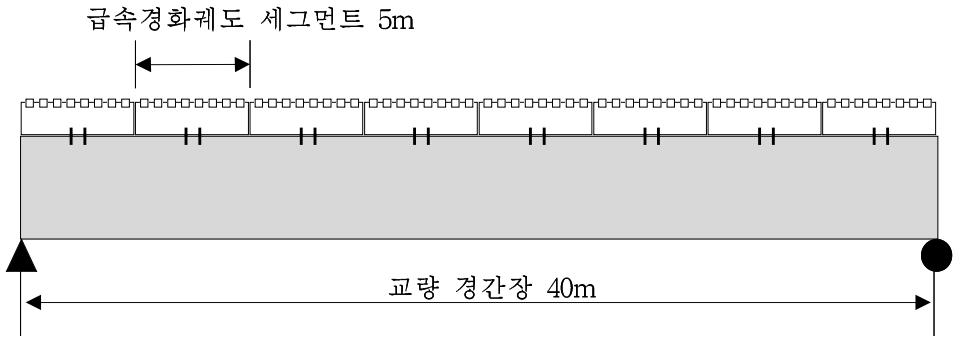
<그림 2.10> 실내실험 계측 결과

나. 교량구간 급속경화궤도 시스템 설계

(1) 교량구간 급속경화궤도의 특징

○ 교량구간의 콘크리트궤도는 궤도 콘크리트의 건조수축 및 온도변화에 따른 종방향 신축과 교량의 휨변위에 대응하기 위하여 일반적으로 4~8m 간격으로 불연속되며, 궤도 콘크리트 슬래브가 횡방향 및 종방향으로 고정되도록 하기 위하여 내부에 3개 또는 4개의 캠플레이트가 설치된다. 그러나 교량에서 캠플레이트를 설치하게 되면 캠플레이트 시공에 많은 시간이 소요되어 급속경화 기술 적용이 불가능하게 되므로, 볼트형 앵커를 이용하여 교량 바닥판과 급속경화된 궤도를 일체화시킨다. 경화궤도는 내부에 철근이 없어 균열에 민감하지만 중앙부에 앵커를 설치하게 되면 균일 온도하중과 건조수축의

효과가 구속되지 않아 균열이 줄어든다.



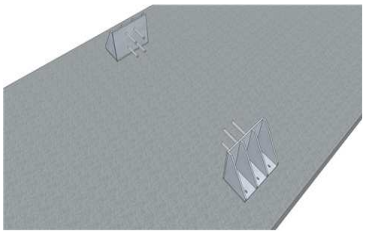
<그림 2.11> 세그먼트 중앙부에만 앵커를 설치한 교량구간 급속경화궤도 개념도

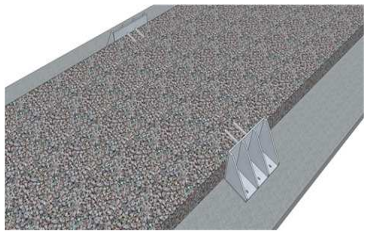
(2) 교량용 급속경화궤도 앵커 구조 설계 및 시공

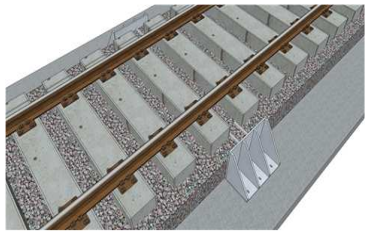
(가) 궤도 세그먼트 후설치 앵커 설계

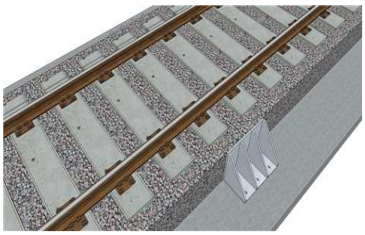
○ ‘KR C 14020 궤도 선형 및 배선 3.3(2) (2014)’에 따라 설계속도 350km/h, 최소 곡선반경 4,700m, 급속경화궤도 세그먼트 길이 5m를 기준으로 지간길이 40m인 교량을 대상으로 급속경화궤도에 작용하는 설계하중을 산정한 결과, 종방향 하중은 300kN이고 횡방향 하중은 220kN으로 계산되었다. 이를 AASHTO LRFD 및 Eurocode 4에 제시된 설계기준을 준용하여 스터드의 수량을 산정한 결과 머리붙이 스터드 지름 19mm, 헤드를 포함한 길이 300mm인 스터드 8개가 필요한 것으로 계산되었다. 그러나 궤도와 교면의 표면마찰을 고려하여 후설치 앵커는 HILTI의 20mm HIT-Z M20를 6개를 설치하는 것으로 개선하였다.

(나) 스터드가 용접된 앵커플레이트 및 후설치 앵커를 활용한 시공 순서(안)


① 앵커블럭 거치


② 자갈 부설


③ 침목 및 레일 설치


④ 자갈 추가 부설

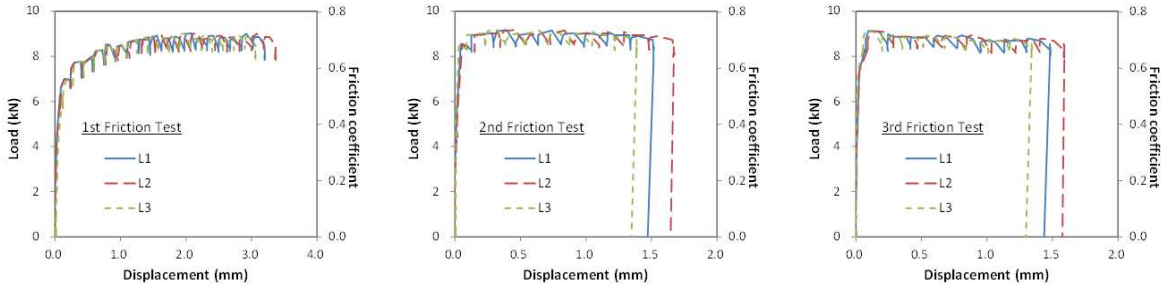

⑤ 모르타르 주입


⑥ 후설치 앵커 시공 및 완료

(3) 교량상 급속경화궤도 표면 마찰 거동

(가) 동마찰계수 산정

○ 교량 바닥판과 급속경화궤도 사이의 마찰 거동을 분석하기 위해 가력 속도를 분당 1.0mm로 3회에 걸쳐 시험한 결과 0.684, 0.703, 0.691로 나타나 동마찰계수를 0.7로 적용하였다.



① 1차 시험 ② 2차 시험 ③ 3차 시험

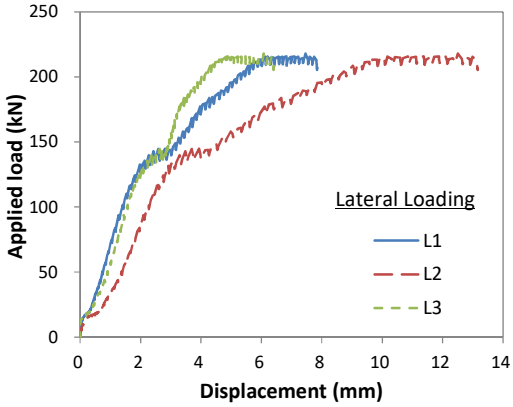
<그림 2.12> 급속경화궤도 마찰거동 시험 결과

(나) 앵커구조의 횡방향 거동 검토

○ 가력 초기에는 급속경화궤도의 들림 현상이 발생하지 않았으나 하중이 증가함에 따라 급속경화궤도가 조금씩 들리는 것으로 나타났다. 하지만 최대 내하력 발현시에도 들림이 경미해 구조거동에 영향을 거의 미치지 않는 것으로 판단되었다. 또한 안전성을 확보하는 급속경화궤도 앵커를 설계함에 있어 급속경화궤도 미끌림을 2mm 까지 고려하는 것이 합리적이라 판단된다.



급속경화궤도 횡방향 거동 실험 모습



급속경화궤도 횡방향 거동 실험 결과

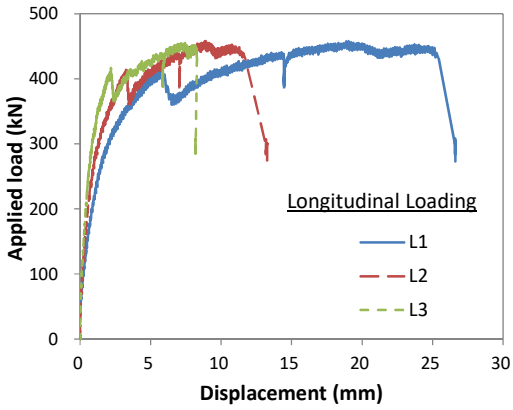
<그림 2.13> 급속경화궤도 횡방향 실험 결과

(다) 앵커구조의 종방향 거동 검토

○ 하중이 증가함에 따라 앵커 블록 인근의 급속경화궤도에 균열이 발생하기 시작했으며, 나중에 후설치 앵커 블록에 용접된 스터드 인근의 급속경화궤도 손상으로 인하여 미끌림이 증가하여 하중이 일부 감소하였다가 후설치 앵커의 지지로 인해 다시 하중이 증가하는 것으로 나타났다. 이후 미끌림이 증가하더라도 하중이 거의 증가하지 않았으며

후설치 앵커 볼트의 손상이 확연하게 나타났다. 횡방향 거동 검토와 마찬가지로 급속경화궤도 미끌림을 2mm 까지 고려하는 것이 합리적이라 판단된다.





급속경화궤도 종방향 거동 실험 모습　　급속경화궤도 종방향 거동 실험 결과

〈그림 2.14〉 급속경화궤도 종방향 실험 결과

다. 고속선 급속경화궤도용 충전재료 개발 및 성능 평가

(1) 충전재료 목표 품질성능

○ 고속선 급속경화궤도용 충전재료 개발을 위해 필요한 압축강도 및 내구성을 만족하는 최적의 배합 도출을 목표로 하였다. 수축특성을 개선할 수 있는 충전재료 개발에 초점을 맞춰 도출한 목표 품질성능은 다음과 같다.

〈표 2.2〉 충전재료 목표 품질 성능

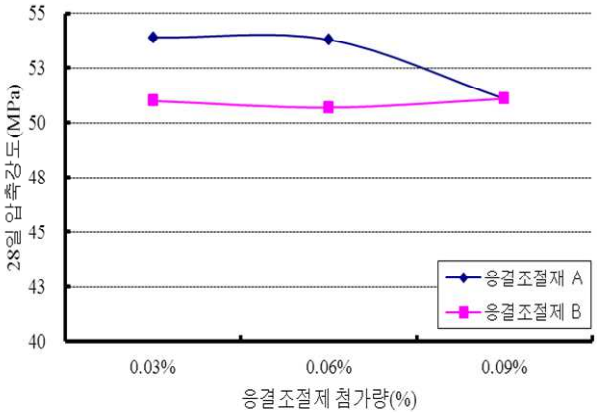
평가 Level	요구특성		목표 품질성능		
			Bascon-MF	Bascon-MF 저강도	신규개발제품
모르타르	유동성(0~20분)		8±2초	8±2초	8±2초
	압축강도	2hr	10MPa 이상	6MPa 이상	5MPa 이상
		28日	40MPa 이상	40MPa 이상	40MPa 이상
	수축변형률	91日	-	-	600×10^{-6} 이하
콘크리트	압축강도	2hr	10MPa 이상	6MPa 이상	5MPa 이상
		28日	30MPa 이상	30MPa 이상	30MPa 이상
	수축변형률	91日	-	-	300×10^{-6} 이하
	동결융해	300Cy	-	-	60% 이상

(2) 재료설계 검토

(가) 압축강도 배합

○ 고속선 급속경화궤도용 충전재료는 재령 2시간에 5MPa 이상의 강도를 발현하고 유동성

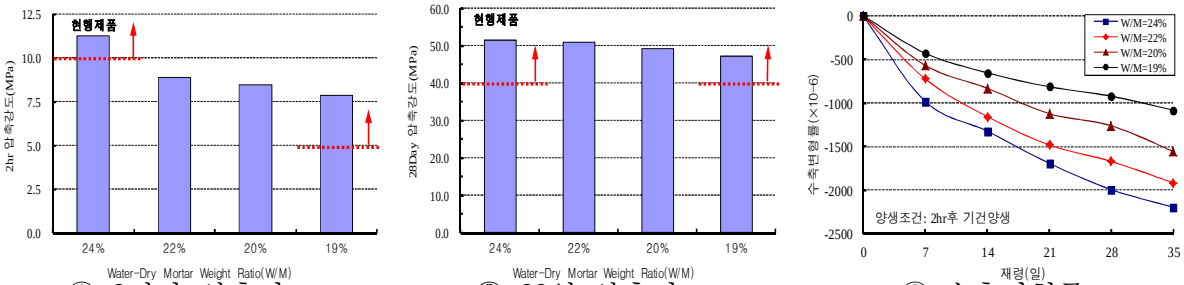
이 우수하여야 한다. 수 시간내에 압축강도를 발현하기 위하여 충전모르터의 결합재로 속경성 시멘트가 사용되는데, 속경성 시멘트는 성형 혹은 타설 등의 작업을 할 경우 칼륨 알루미네이트의 Ettringite 결정 생성에 따라 급결성 또는 순결성을 나타내어 유동성이 급격히 저하하여 현장에서 작업시간의 확보에 어려움이 있다. 따라서 프리팩트 콘크리트 적용은 고유동성 뿐만 아니라 가사시간이 확보되어 부재의 구석까지 스며들어야 하기 때문에 응결지연 방법으로 응결조절제를 사용하는데, 응결 시간과 응결조절제 첨가량 사이에 일정한 관계가 있어 가사시간을 설정할 수 있는 조건이 요구되어야 한다. 모르타르 최고온도 도달시간 측면에서 응결조절제 첨가량이 증가할수록 최고 온도 도달 시간이 늦어져 응결 지연에 따른 강도 감소가 나타났다. 최고온도 도달 측면에서 응결조절제 첨가량 변화에 따른 온도의 차이는 나타나지 않았다. 또한 응결조절제 B를 사용하였을 경우 응결조절제 A에 비해 응결지연 효과가 더 큰 것으로 나타났다. 결론적으로 응결조절제는 시간강도(2hr)에 미치는 영향은 지대하지만, 장기강도(28일)에 미치는 영향은 작게 나타났다.



<그림 2.15> 응결조절제 첨가량별 모르터 28일 압축강도

(나) 수축저감 배합

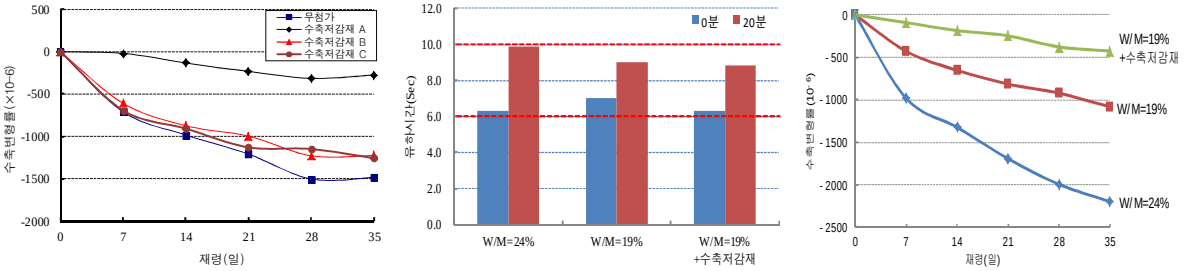
○ 수축변형률 저감을 목적으로 충전재료의 조성물을 변경하면서 W/M비를 19%까지 낮추었으며, 조성된 모르터를 가지고 유동성, 압축강도 및 수축특성을 평가하였다. 충전재료의 W/M별 유동성을 검토한 결과, W/M을 저감하여도 충전재료의 유동성 8±2초를 만족하였다. 모르터 온도를 측정 결과, W/M을 저감하면 최고온도 도달시간이 다소 지연되었지만, 목표 압축강도는 만족하는 것으로 나타났다.



① 2시간 압축강도 ② 28일 압축강도 ③ 수축변형률

<그림 2.16> W/M비별 모르터 특성

○ 수축특성을 개선하기 위해 팽창재 및 수축저감재 3종류를 선택하여 실험을 진행한 결과, 수축저감재 A는 수축저감재 무첨가(W/M=19%)에 비해 수축변형률이 큰 폭으로 감소하는 것으로 나타났으며, 수축저감재 B, C는 수축변형률이 감소하기는 하였으나 목표성능에는 도달하지 못하는 것으로 나타났다.



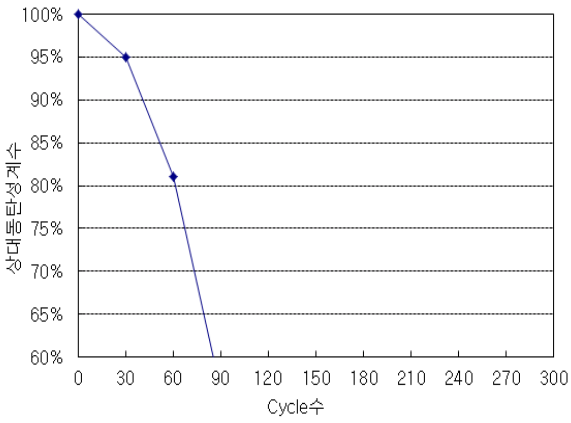
① 수축저감재별 수축특성 ② 모르터 유동특성 ③ 모르터 수축특성

〈그림 2.17〉 수축저감재 첨가배합에 따른 모르터 특성

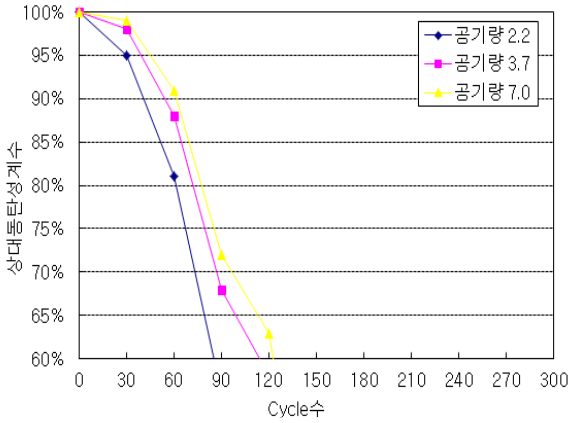
(3) 충전재료 내구성 평가

(가) 동결융해 저항성

○ 포장궤도용 재료는 현장에서 작업이 용이하며 작업후 단시간내에 차량이 통과할 수 있어야 하고, 충전 후 자갈도상과의 일체화 즉 무수축성의 특성을 갖추어야 한다. 또한 고속철도 포장궤도의 경우, 지하철과는 다르게 자연환경에 노출되기 때문에 동결융해에 대한 저항성을 갖추어야 한다. 콘크리트의 동결융해는 콘크리트 내의 물이 동계에 얼고 초봄에 녹는 현상을 말하는데, 이때 공기량이 적절하지 않거나 콘크리트가 밀실하지 않으면 표층부에서 열화하는 피해가 생긴다. 아래 그림에서 수축저감형 충전재료를 적용한 프리팩트 콘크리트의 동결융해 저항성 시험결과로서, 90cycle 전에 상대동탄성계수가 60% 이하로 동결융해 저항성이 없는 것으로 나타나 고속선 포장궤도용 충전재료로서 동결융해 저항성이 개선되어야 할 것으로 판단된다. 또한 일반적으로 콘크리트의 동결융해는 공기량의 영향을 많이 받는다. 공기량 변화에 따른 프리팩트 콘크리트의 동결융해 저항성을 시험한 결과, 공기량 증가로 인하여 동결융해 저항성이 증가하는 것으로 나타났으나 공기량 7.0% 수준에서도 동결융해 저항성이 60% 이하로 동결융해성이 없는 것으로 나타났다.



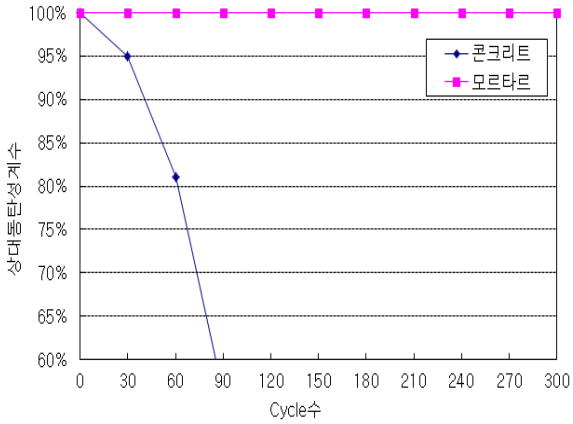
프리팩 콘크리트 동결융해 저항성 결과



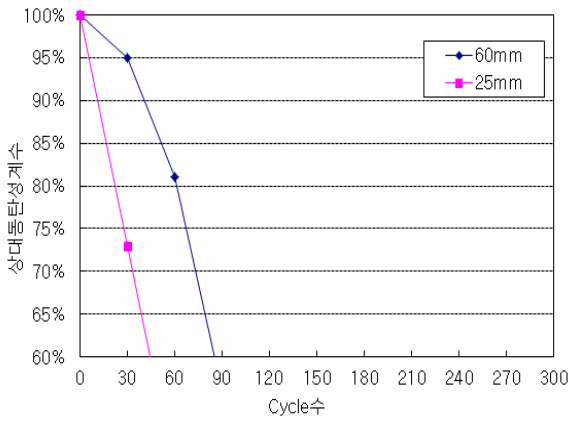
공기량별 동결융해 저항성 결과

<그림 2.18> 충전재료 동결융해 저항성 실험 결과(1)

○ 동결융해 저항성의 저하 원인을 확인하기 위하여 모르터 시험체와 프리팩트 콘크리트 시험체를 제작하여 평가하였다. 아래 그림은 모르터와 프리팩트 콘크리트의 동결융해 저항성 시험결과로서, 모르터 시험체는 300cycle에서도 100% 이상으로 동결융해 저항성을 갖는 것으로 나타났지만 콘크리트화되면 동결융해 저항성이 없어지는 것으로 나타났다. 동결융해로 파괴된 프리팩트 콘크리트를 검토해본 결과, 자갈의 탈락현상이 발생하는 것으로 나타나 고속선 충전재료의 동결융해 저항성은 모르터와 자갈의 계면부착이 지배적인 역할을 한다고 판단된다. 동결융해 저항성 시험을 위한 시험체 크기는 일반적으로 100×100×400mm로 제작하고 자갈입자 크기는 시험체 최소 치수의 1/4을 초과하지 않아야 한다. 시험체의 Scale effect 영향여부를 판단하기 위하여 자갈입자 크기의 영향을 평가한 결과, 아래 그림과 같이 자갈입자 크기가 25mm 감소하였을 때 기존 시험체에서 사용한 자갈입자 크기 60mm보다 낮게 나오는 것으로 나타나 Scale effect의 영향은 없는 것으로 판단된다.



모르터와 프리팩 콘크리트 동결융해 저항성 결과

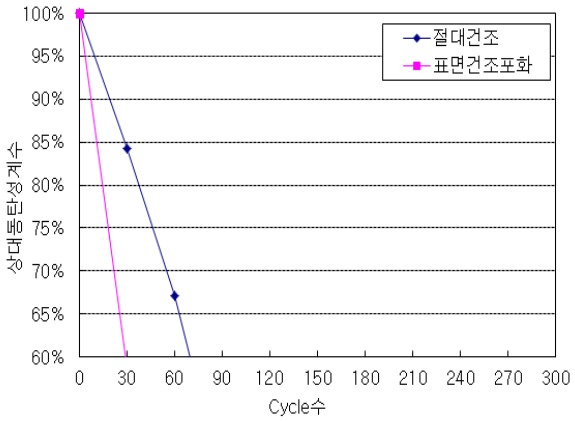


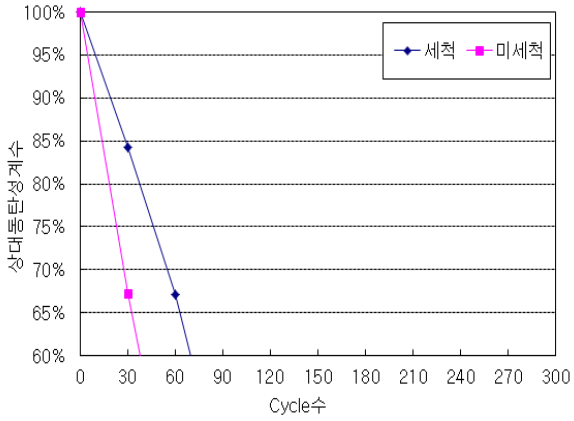
자갈 size별 동결융해 저항성 결과

<그림 2.19> 충전재료 동결융해 저항성 실험 결과(2)

○ 자갈의 함수조건에 따른 동결융해 저항성을 검토하기 위하여 절대건조상태와 표면건조포화상태로 실험한 결과, 동결융해 저항성은 절대건조상태 일때가 더 높게 나타났다. 또한 자갈 표면에 부착된 미립분의 영향을 검토한 결과, 세척 자갈의 동결융해 저항성

이 미세척 자갈보다 높게 나타나 자갈 표면의 미립분 제거가 반드시 필요한 것으로 판단되었다.

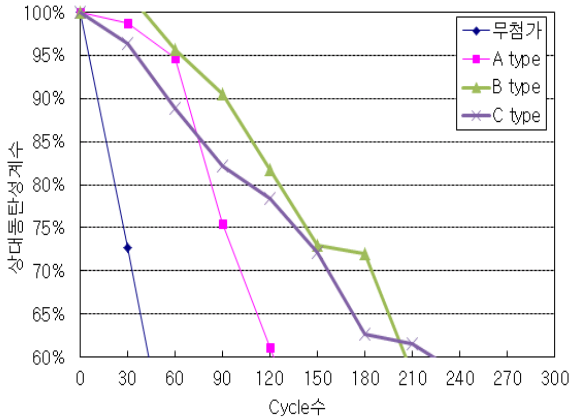


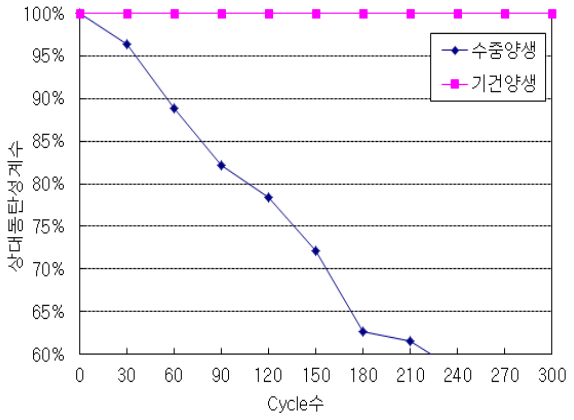


자갈 함수조건별 동결융해 저항성 결과　　자갈 세척여부에 따른 동결융해 저항성 결과

<그림 2.20> 충전재료 동결융해 저항성 실험 결과(3)

○ 충전재료와 자갈과의 부착성능을 개선하기 위하여 부착성능 개선제 활용을 통한 동결융해 저항성 개선효과를 검토한 결과, 부착성능 개선제를 첨가함에 따라 동결융해 저항성이 증가하였으나 목표수준에 도달하지 못하는 것으로 나타났으며 부착성능 개선제 중에서는 C type의 동결융해저항 개선효과가 가장 큰 것으로 나타났다. 부착성능 개선제를 사용하는 경우에 있어서 양생조건에 따른 동결융해 저항성을 평가한 결과, 기건양생일 때 300cycle에서의 상대동탄성계수가 100%로 목표품질을 만족하는 것으로 나타나 부착성능 개선제를 사용할 경우 부착성능 개선제가 자갈과 모르타르와의 부착을 개선시킬 수 있는 필름을 형성하기 위해서 기건양생이 필요한 것으로 나타났다.

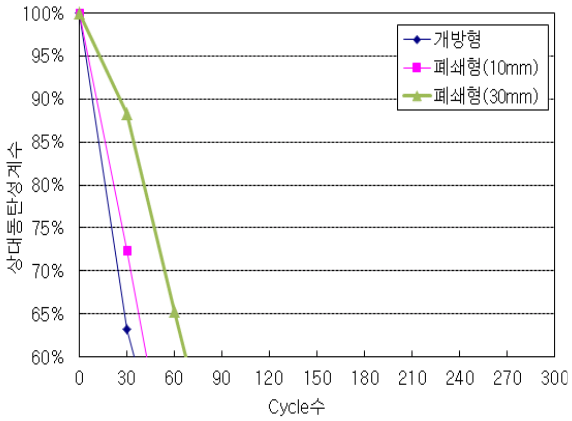


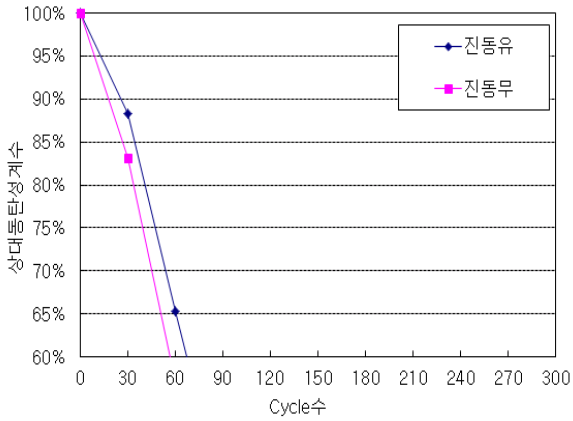


부착성능 개선재별 동결융해 저항성 결과　　앵생조건에 따른 동결융해 저항성 결과

<그림 2.21> 충전재료 동결융해 저항성 실험 결과(4)

○ 부착성능 개선재 사용으로 인한 원재료 비용의 상승을 방지하기 위하여 부착성능 개선제를 사용하지 않고 시공방법에 따른 동결융해저항 개선효과를 평가하였다. 표면부 노출상태를 개방형과 폐쇄형으로 구분하여 진동 유·무에 따른 동결융해 저항성을 검토한 결과, 동결융해 저항성은 모르터 층의 두께가 두꺼울수록 개선되는 것으로 나타났으나 진동 유·무에 따른 개선은 미비한 것으로 나타났다.



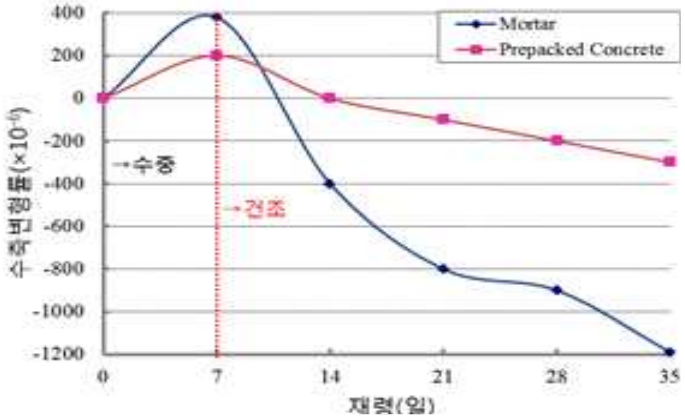


표면 노출상태에 따른 동결융해 저항성 결과　진동유·무에 따른 동결융해 저항성 결과

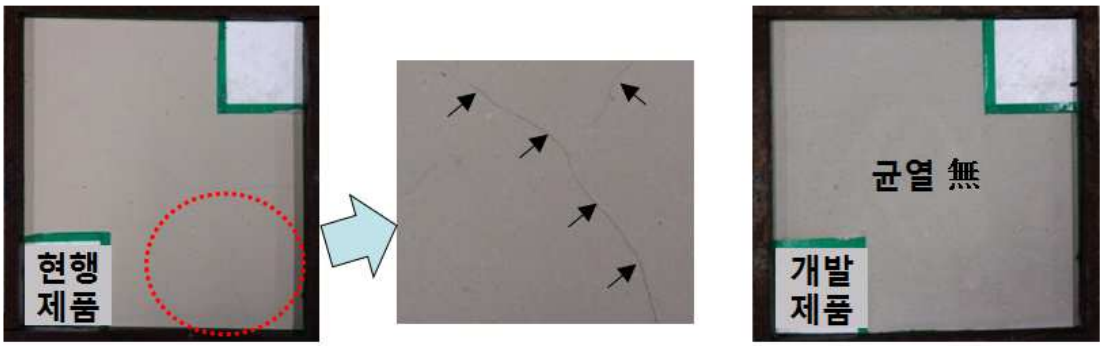
<그림 2.22> 충전재료 동결융해 저항성 실험 결과(5)

(나) 수축 저항성

○ 모르터와 프리팩 콘크리트의 수축특성을 평가한 결과, 모르터는 상당히 큰 수축량을 나타내고 있으나 프리팩 콘크리트는 400μ 이하로 적은 수축량을 나타내고 있으나, 프리팩 콘크리트를 현장에 적용한 결과 간헐적으로 수축균열이 발생하였다. 이에 따라 모르터 수축량 개선이 우선되어야 할 것으로 판단하여 수축저감형 충전재료를 개발하였고, 개발품의 균열저항성을 평가하기 위하여 현행 제품과 비교한 결과, 현행 제품의 경우 간헐적으로 균열이 발생한 것을 확인할 수 있었으나 수축저감형의 경우 균열이 발생하지 않는 것으로 나타나 콘크리트로 현장적용 시 균열은 발생하지 않을 것으로 판단된다.



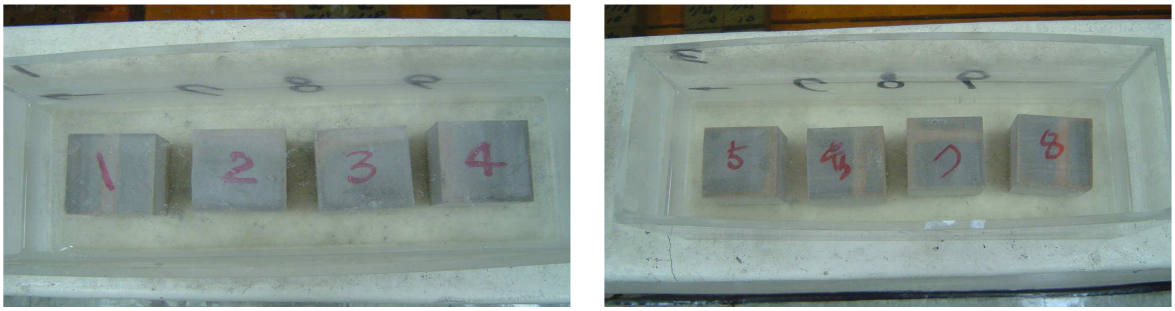
<그림 2.23> 현행 제품의 수축 특성



<그림 2.24> 현행 제품과 수축저감형 수축균열 저항성 비교 결과

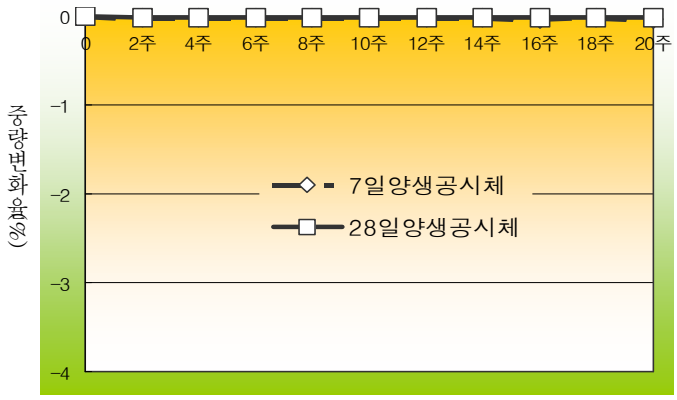
(다) 내약품성 시험

○ 철도도상의 경우 직접적으로 비와 접하기 때문에 산성비 조건에서 내약품성을 갖추어야 한다. 국내 산성비의 구성 조건과 유사하게 산성비 조건에서의 내약품성을 검토하기 위하여 국내 산성비의 중량변화율을 검토한 결과, 국내의 산성비는 Sox: 84%, Nox: 8%, Cl: 8%로 구성되어 있으며, pH 강도는 약 4 ~ 6으로 되어있다는 것으로 나타났다. 이를 근거로 하여 pH는 약 3.0의 수준의 인공 산성비를 제조하여 공시체를 침적하였다. 공시체 침적 후 내용물의 조건이 변하지 않도록 2주마다 침적용액을 교환하고 약 1주 간격으로 공시체 중량변화율을 측정하였다. 공시체는 7일 양생 및 28일 양생 공시체 두 개씩을 제작하여 침적을 실시한 결과, 중량변화율은 거의 없으므로 내산성에 대한 내구성능이 우수한 것으로 나타났다.



① 7일 양생 공시체 ② 28일 양생 공시체

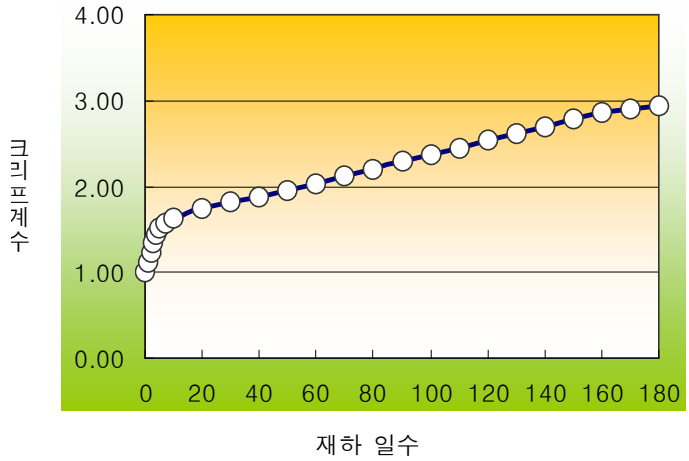
<그림 2.25> 공시체 침적 상태



<그림 2.26> 내약품성 침적 공시체 중량변화율 시험

(라) 크리프 시험

○ 지속하중하에서 시간 경과에 따른 변형 현상을 확인하기 위하여 크리프 계수를 산정하였다. 재하 일수 180일까지의 크리프계수를 측정한 결과, 1종 보통 포틀랜드시멘트를 사용했을 경우와 동등 수준의 결과가 나타나는 것으로 나타났으며 크리프 특성에도 특이점이 발견되지 않는 것으로 나타났다.



<그림 2.27> 콘크리트 크리프 시험 결과

라. 충전 모르터와 도상골재의 계면 부착특성에 따른 강도 평가

(1) 골재세척도의 영향

○ 급속경화궤도기술을 적용해 자갈궤도구조를 효율적으로 개량하는데 있어서 급속경화콘크리트의 적정 강도발현이 요구되며, 이를 위해 도상골재의 적절한 세척도가 요구된다. 따라서, 기존 주입식 모르터(Bascon MF-R)를 사용해 도상골재 세척도에 따른 강도발현 정도를 실험을 통해 정량적으로 평가하였다. 골재표면에 붙어있는 미세골재 분말의 양을 골재 무게비 0.0 wt%(0 Level), 0.2 wt%(1 Level), 0.4 wt%(2 Level), 0.6 wt%(3 Level)로 변화시키며 급속경화궤도 콘크리트강도 변화를 조사하였다.

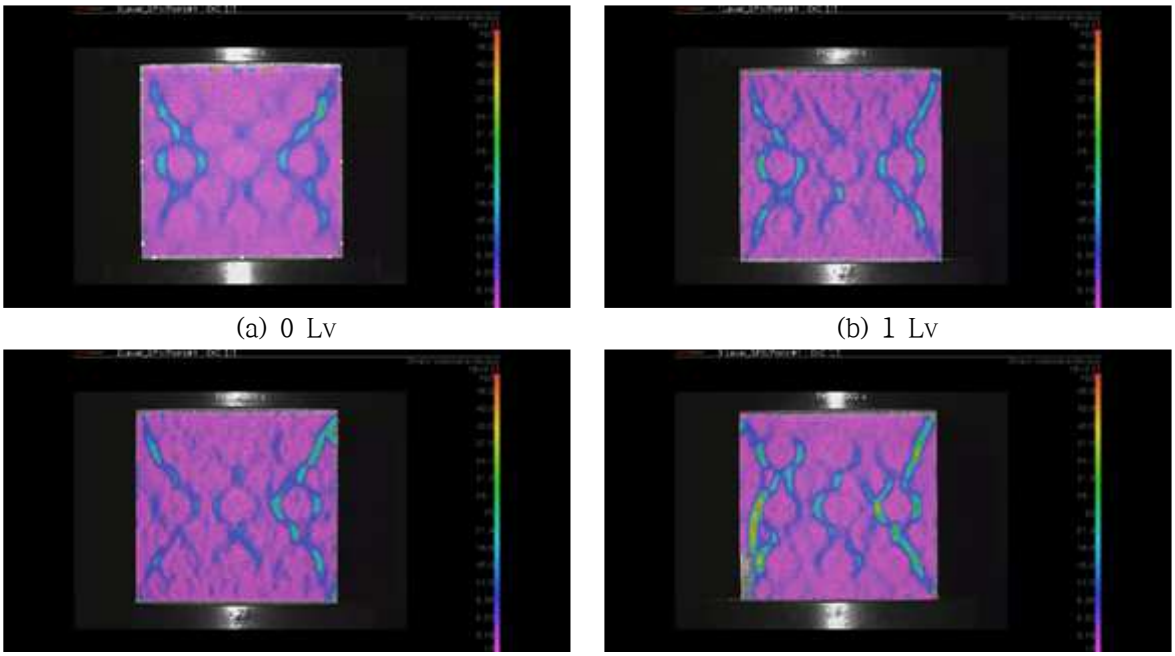


(a) 0 Lv (b) 1 Lv (c) 2 Lv (d) 3 Lv

<그림 2.28> 골재 표면오염도

○ 압축시험 결과, 골재표면 미세분말량 3 Lv에서 최대하중을 받는 상태에서 골재의 탈착과 모르터의 균열이 심각한 것으로 나타났다. 이는 골재표면 오염도로 인해 골재와 모

르터 간의 부착감소 뿐만아니라 모르터의 공극을 유발하여 응력집중을 발생시킨 것으로 판단된다. 급속경화궤도의 기초 역할을 하는 골재와 충전모르터의 골재표면 오염도가 증가할 경우, 강도의 감소뿐만 아니라 압축변형률 또한 상당한 증가를 나타났다. 따라서 동일하중 하에서 부등침하 혹은 계면의 파괴로 부정적인 영향을 미칠 것으로 판단된다.



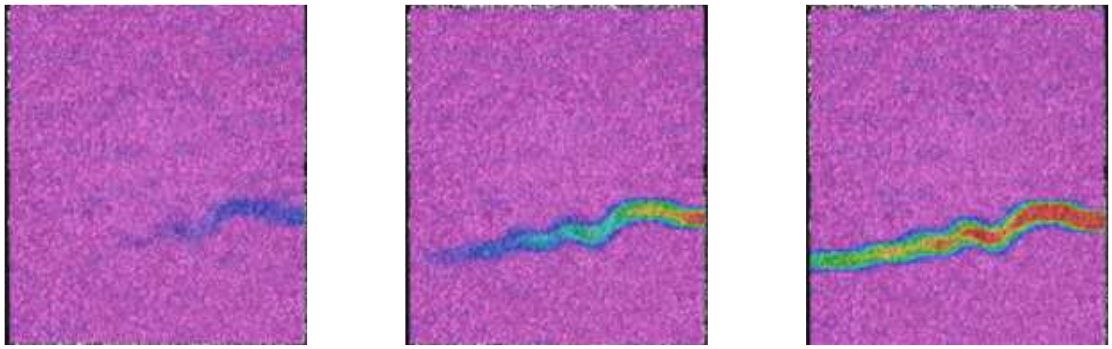
(a) 0 Lv (b) 1 Lv

(c) 2 Lv (d) 3 Lv

〈그림 2.29〉 오염도별 최고하중시 횡방향 변형률 Contour map

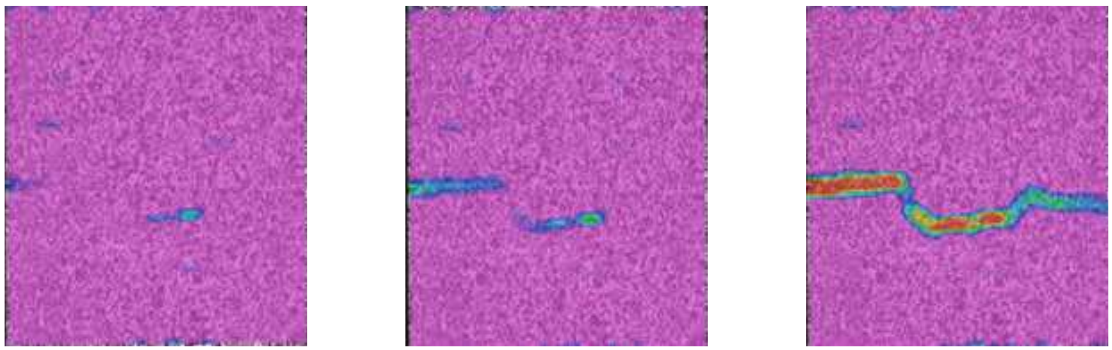
○ 인장시험 결과, 골재표면 오염도가 0 Lv에서 2 Lv로 증가함에 따라 인장강도는 0.49MPa에서 0.47MPa로 0.02MPa(약 4.0%) 감소하였다. 하지만 골재표면 오염도가 3 Lv로 증가하게 되면 0 Lv과 비교하여 0.20MPa(약 40.0%) 감소하여 3 Lv 오염도 수준에서 인장강도가 급격하게 감소되는 것으로 나타났다.

○ 골재표면 오염도 3 Lv에서 인장강도의 급격한 감소 원인을 확인하기 위하여 인장실험 중 균열의 진전을 0 Lv와 비교하였다. 균열의 진전을 검토한 결과, 골재표면 오염도 0 Lv에서는 시험체 측면에서 발생하여 골재의 면을 따라 진전되는 것으로 나타났으나 골재표면 오염도 3 Lv에서는 시험체 측면과 모르터와 골재 계면에서 동시에 발생하는 것으로 나타났다. 즉, 모르터와 골재의 부착면에 오염도가 3 Lv으로 묻어있는 경우, 균열의 진전이 시험체 측면과 부착면에서 동시에 발생될 정도로 강도가 현저히 감소되는 것으로 나타났다.



(a) (b) (c)

<그림 2.30> 오염도 0 Lv에서의 종방향 변형률 Contour map 변화



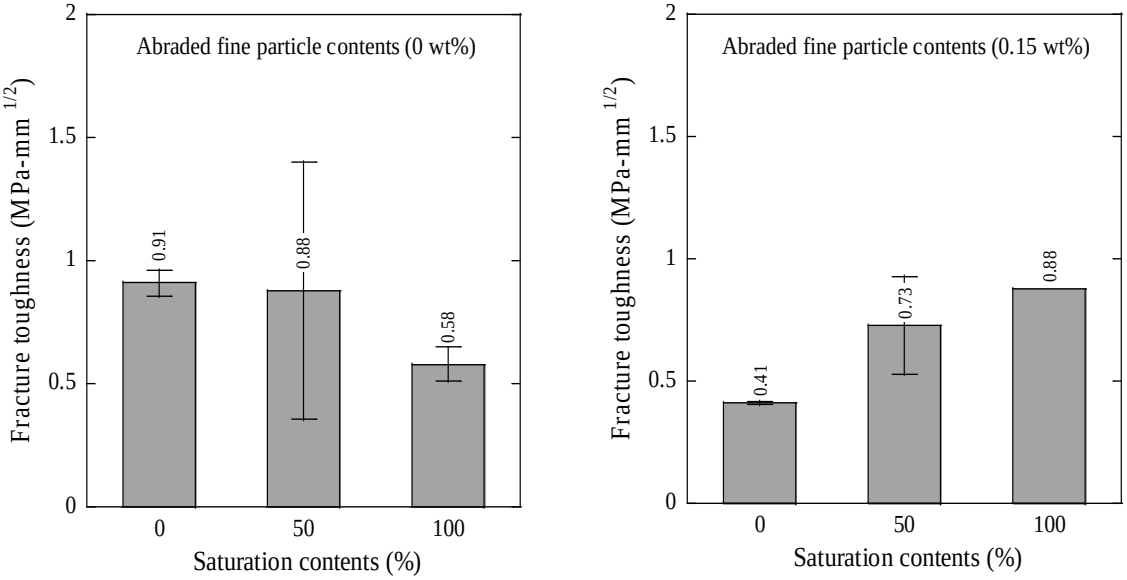
(a) (b) (c)

<그림 2.31> 오염도 3 Lv에서의 종방향 변형률 Contour map 변화

(2) 골재 세척도와 골재 수분포화도의 영향

○ 골재표면 오염도가 없는 골재에서 포화도가 0%에서 100%로 증가함에 따라 계면 파괴인성치는 0.91MPa · $mm^{1/2}$에서 0.58MPa · $mm^{1/2}$로 약 36% 감소하는 것으로 나타났다. 골재표면 오염도 0.15 wt%에서 포화도가 0%에서 100%로 증가함에 따라 계면 파괴인성치는 0.41MPa · $mm^{1/2}$에서 0.88MPa · $mm^{1/2}$로 약 2.1배 증가하는 것으로 나타났다.

○ 골재 수분포화도는 골재표면에 미세골재 분말이 존재할 때 모르터와 골재사이 오염도를 모르터 내부로 침투시켜 부착에 긍정적인 효과를 보여주었으나, 골재 자체의 표면에 수분포화도는 모르터와 골재의 부착에서 수분의 증발로 인해 계면 공극률을 상승시켜 부정적인 영향을 미친 것으로 판단된다.



(a) 골재표면 오염도 0.00 wt% (b) 골재표면 오염도 0.15 wt%

<그림 2.32> 골재 수분포화도에 따른 계면 파괴인성치

(3) 모래 입경크기 및 혼합비율의 영향

○ 모래 입경크기 및 모래 혼합비율에 따른 재령 2시간 및 7일 콘크리트 압축강도는 다음의 표와 같다. 콘크리트 압축강도는 모르터 압축강도 결과와 반대로 40-N에서 가장 높은 결과를 보여주며, 입경크기가 큰 모래의 함량이 증가함에 따라 콘크리트 압축강도가 증가하는 것으로 판단된다.

<표 2.3> 모래 입경크기 및 모래 혼합비율에 따른 콘크리트 압축강도

시리즈	재령 2시간 압축강도 (MPa)	재령 7일 압축강도 (MPa)
H1-N	22.2 (1.1)	39.2 (2.7)
H2-N	23.0 (1.8)	42.8 (1.4)
H3-N	22.4 (1.2)	38.1 (0.5)
40-N	23.3 (1.9)	43.3 (1.5)
60-N	19.6 (1.5)	40.7 (1.7)

(4) 폴리머 및 혼화재 첨가의 영향

○ 폴리머 및 혼화재 첨가에 따른 재령 2시간 및 7일 콘크리트 압축강도는 다음의 표와 같다. 폴리머 및 혼화재 첨가에 따른 재령 2시간 콘크리트 압축강도는 H1-PB에서 24.0 MPa로 가장 크게 나타났고, 재령 7일에서는 모르터 압축강도와 동일하게 H1-S에서 월등히 높은 51.9 MPa로 나타났다. H1-F에서는 재령 7일 콘크리트 압축강도가 12.8 MPa로 매우 낮게 나타났으나, H1-F를 제외한 모든 시리즈에서는 기존 주입식 모르터(Bascon MF-R)와 비교하여 재령 2시간 및 7일에서 높은 결과를 나타냈다.

<표 2.4> 폴리머 및 혼화재 첨가에 따른 콘크리트 압축강도

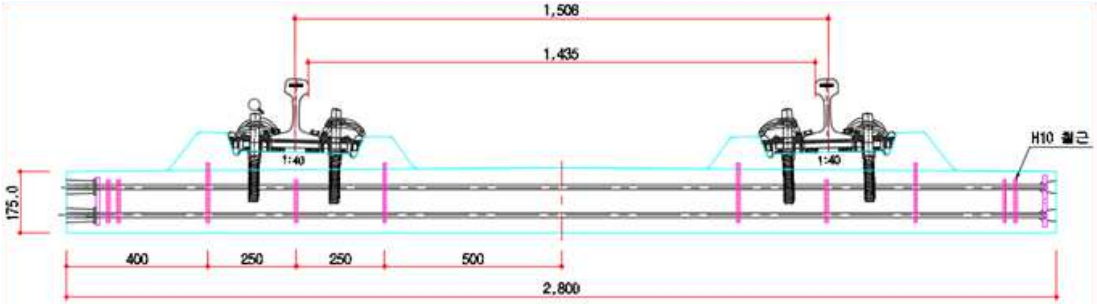
시리즈	재령 2시간 압축강도 (MPa)	재령 7일 압축강도 (MPa)
H1-PA	18.5 (0.6)	31.0 (2.5)
H1-PB	24.0 (1.6)	35.5 (7.0)
H1-S	21.8 (1.1)	51.9 (1.5)
H1-G	19.1 (0.2)	35.9 (1.8)
H1-F	N.A.	12.8 (0.5)

마. 급속경화궤도용 침목 설계 및 성능 시험

(1) 장침목(CK-600) 설계 및 제작

○ 급속경화궤도용 장침목 설계를 위해서는 침목에 작용하는 하중이 산정되어야 하며, 이를 위해서는 선로 조건이 적절히 가정되어야 한다. 급속경화궤도화가 되면 고속으로 열차가 운행하는 조건으로 검토되어야 하나, 급속궤도경화 전에는 자갈도상에 광폭 PSC 침목이 부설되고 자갈도상 방치 및 안정화까지 서행조건으로 열차가 운행되는 상황이 가정되어야 한다. 또한 급속경화궤도화가 되면 장침목은 콘크리트 슬래브궤도에 매립되는 형식이 되기 때문에 오히려 자갈도상에 부설된 상태에서 열차 하중을 받을 때가 더 취약한 상황에 놓이게 된다. 따라서 급속경화궤도용 장침목 설계 및 단면 검토 시 자갈도상 선로로 가정하였고, 열차는 여객 및 화물 혼용으로 가정하여 축중을 220 kN으로 가정하였으며, 열차 운행속도는 서행운행을 감안하여 90 km/h로 설정하였고, 침목간격은 0.6 m, 레일은 60 kg KR형식, 레일체결장치는 System 300-1을 가정하였다.

○ 급속경화궤도는 자갈궤도를 콘크리트궤도로 개량하는 궤도구조 개량공법으로서 콘크리트 궤도에 준하는 성능이 확보되어야 한다. 따라서 고탄성의 체결장치와 인터페이스가 될 수 있으며 하중분포 면적을 넓힐 수 있는 광폭 형태의 침목이 설계 및 제작될 필요가 있다. 이러한 요구사항을 충족할 수 있도록 급속경화궤도용 장침목 단면을 다음 그림과 같이 설정하였다. 특이사항으로는 레일 좌면부 폭을 600 mm, 고탄성 체결장치가 적용을 위해 레일 좌면부 형상 설정, 충진재 주입량 감소, 콘크리트궤도화 되었을 때 구조안전성을 향상시키기 위해 침목 길이를 2.8 m로 설정하였다.



<그림 2.33> 급속경화궤도용 장침목 강봉 및 철근 배치

○ 급속경화궤도용 장침목 설계단면 검토 결과, 레일 좌면부 및 침목 중앙부 모두 설계 요

구조건을 만족하였다. 침목 제작공정은 형틀검사 → 강봉 및 보강철근 배근 → 콘크리트 타설 → 증기양생 → 탈형 → 겉모양 및 치수검사 → 프리스트레스 도입 및 정착 순이다.


① 침목 형틀검사


② 강봉 및 보강철근 배치


③ 탈형


④ 겉모양 및 치수 검사

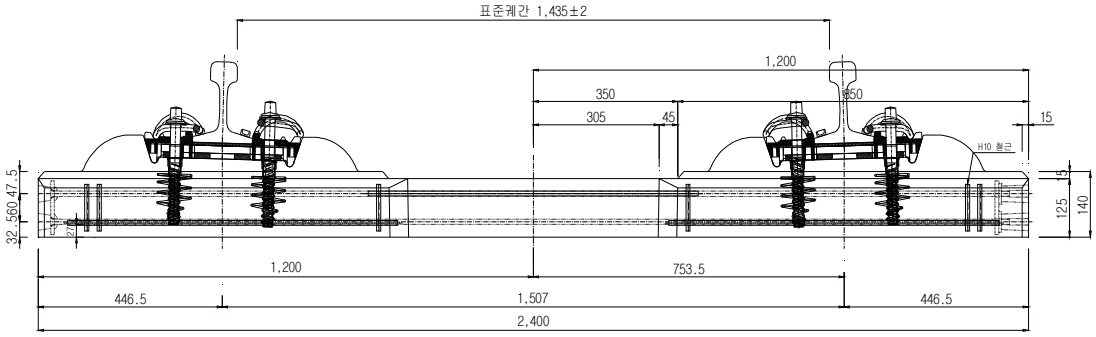

⑤ 프리스트레스 도입 및 정착


⑥ 습윤 양생

<그림 2.34> 급속경화궤도용 장침목 제작 과정

(2) 슬림형 침목(MF-140) 설계 및 제작

○ 급속경화궤도용 슬림형 침목단면은 레일 좌면부 및 침목 중앙부 단면높이가 각각 140 mm 및 125 mm로 다른 유형의 침목에 비해서 낮게 설정되었다. 일부 터널구간의 경우, 도상두께 확보를 위해서는 침목 높이가 조정되어야 하며 이를 위해 기존 침목(철도현장에 널리 사용되고 있는 2.4 m 길이 침목) 대비 55 mm 정도 두께를 감소시켰으며, ALT형 체결장치, System 300-1형 체결장치 등 다양한 고탄성 체결장치가 적용될 수 있도록 레일 좌면부 폭을 260 mm로 설정하였다.



<그림 2.35> 급속경화궤도용 슬림형 침목 강봉 및 철근 배치

○ 급속경화궤도용 슬림형 침목 설계단면 검토 결과, 레일 좌면부 및 침목 중앙부 모두 설

계 요구조건을 만족하였다. 따라서 그림 5.29의 일반도를 적용하여 실제 슬림형 침목을 제작하였다. 침목 제작공정은 형틀검사 → 강봉 및 보강철근 배근 → 콘크리트 타설 → 증기양생 → 탈형 → 겉모양 및 치수검사 → 프리스트레스 도입 및 정착 순이다.


① 강봉 및 보강철근 배치


② 콘크리트 타설


③ 진동다짐 및 면고르기


④ 증기양생


⑤ 습윤 양생

<그림 2.36> 급속경화궤도용 슬림형 침목 제작 과정

(3) 급속경화궤도용 침목 성능 시험

○ 급속경화궤도용 장침목 설계 검증을 위하여 16개 시험체를 제작하였다. KRS TR 0008-15R에 제시된 설계승인 시험에 따라 성능시험을 수행하였으며, 시험 항목은 정적 휨강도 시험(정·부모멘트), 동적 휨강도 시험(정모멘트) 및 피로 시험(정모멘트)이며, 각 시험 항목별 합격 기준은 다음과 같다. 침목 설계 결과, 레일 좌면부 설계모멘트는 18.71 kN· m, 침목 중앙부 설계모멘트는 7.53 kN·m로 나타났다.

<표 2.5> 급속경화궤도용 장침목 정적 휨 강도 시험 결과(레일 좌면부)

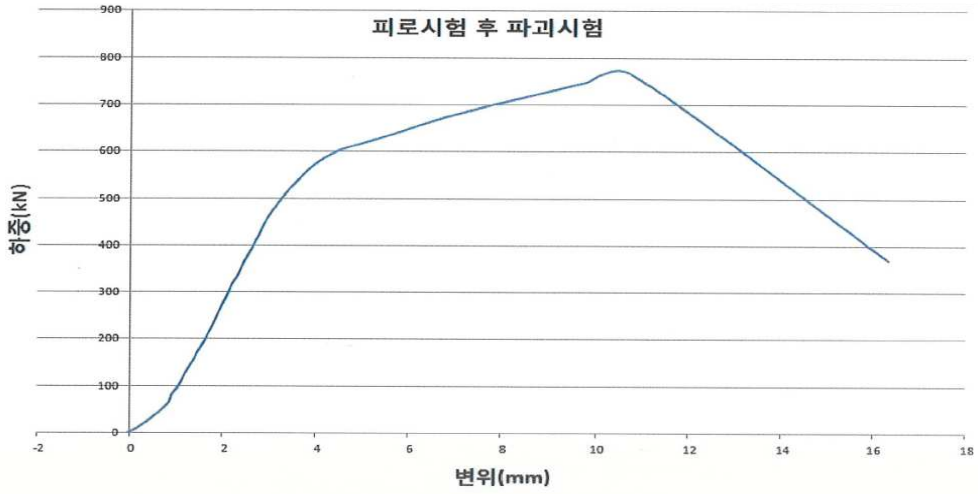
시험체	F_{r_r} (kN)		$F_{r_{0.05}}$ (kN)		F_{r_B} (kN)		비 고
No.1	379.7	> 149.68	519.7	> 269.4	669.7	> 374.2	
No.2	369.7		429.7		859.7		
No.3	189.7		459.7		669.7		
No.4	429.7		469.7		699.7		
No.5	399.7		419.7		829.7		
No.6	359.7		519.7		719.7		

<표 2.6> 급속경화궤도용 장침목 정적 휨 강도 시험 결과(침목 중앙부)

시험체	$F_{c_{rn}}$(kN)		$F_{c_{Bn}}$(kN)		비 고
No.7	66.4	> 21.51	101.4	-	
No.8	71.4		116.4		
No.9	61.4		106.4		

<표 2.7> 급속경화궤도용 장침목 동적 휨 강도 시험 결과(레일 좌면부)

시험체	F_{r_r}(kN)		$F_{r_{0.05}}$(kN)		F_{r_B}(kN)		비 고
No.10	209.7	-	304.7	> 224.5	569.7	> 329.3	
No.11	244.7		389.7		509.7		
No.12	324.7		469.7		609.7		
No.13	244.7		389.7		569.7		
No.14	189.7		389.7		569.7		
No.15	349.7		429.7		549.7		



<그림 2.37> 피로시험 후 파괴시험시 하중-변위 곡선

○ 급속경화궤도용 슬림형 침목 설계 검증을 위해 16개 시험체를 제작하였다. KRS TR 0008-15R에 제시된 설계승인 시험에 따라 성능시험을 수행하였으며, 시험 항목은 정적 휨강도 시험(정・부모멘트), 동적 휨강도 시험(정모멘트) 및 피로 시험(정모멘트)이며, 각 시험 항목별 합격 기준은 다음과 같다. 침목 설계 결과, 레일 좌면부 설계모멘트는 12.68 kN・ m, 침목 중앙부 설계모멘트는 10.8kN・m로 나타났다.

<표 2.8> 급속경화궤도용 슬림형 침목 정적 휨 강도 시험 결과(레일 좌면부)

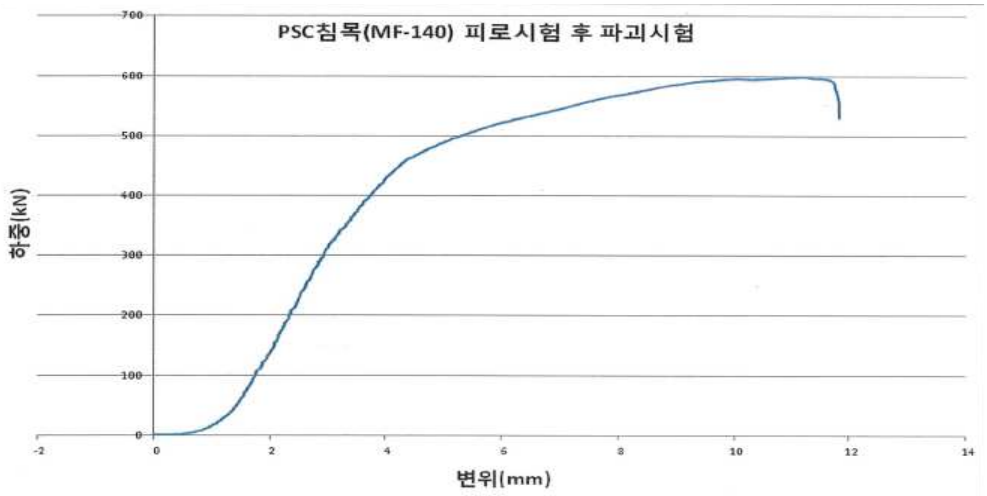
시험체	F_{r_r}(kN)		$F_{r_{0.05}}$(kN)		F_{r_B}(kN)		비 고
No.1	266.8	> 126.8	386.8	> 228.24	646.8	> 317.0	
No.2	156.8		286.8		506.8		
No.3	236.8		406.8		536.8		
No.4	256.8		416.8		606.8		
No.5	226.8		466.8		616.8		
No.6	236.8		316.8		656.8		

<표 2.9> 급속경화궤도용 슬림형 침목 정적 휨 강도 시험 결과(침목 중앙부)

시험체	$F_{c_{rn}}$(kN)		$F_{c_{Bn}}$(kN)		비 고
No.7	35.8	> 30.86	85.8	-	
No.8	35.8		90.8		
No.9	40.8		85.8		

<표 2.10> 급속경화궤도용 슬림형 침목 동적 휨 강도 시험 결과(레일 좌면부)

시험체	F_{r_r}(kN)		$F_{r_{0.05}}$(kN)		F_{r_B}(kN)		비 고
No.10	246.8	-	376.8	> 190.2	446.8	> 278.96	
No.11	286.8		426.8		476.8		
No.12	206.8		326.8		456.8		
No.13	306.8		326.8		466.8		
No.14	306.8		446.8		536.8		
No.15	226.8		366.8		456.58		



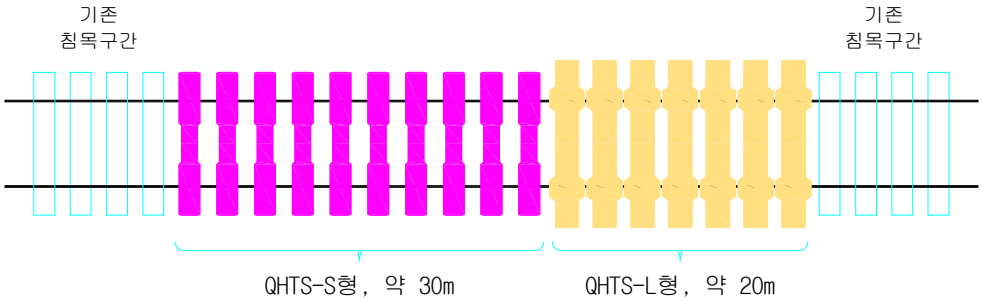
<그림 2.38> 피로시험 후 파괴시험시 하중-변위 곡선

(4) 급속경화궤도용 침목 시험부설

○ 급속경화궤도용 침목은 서울교통공사 군자차량기지 내 입출고선에 연장 50m(광폭침목 L형 20m, 광폭침목(QHTS) S형 30 m)로 시공하였다. 침목시공 현장사진, 배치도, 주요공정 및 현장설치시험 항목 및 기준은 다음과 같다.



<그림 2.39> 서울교통공사 군자기지 입출고선 현장



<그림 2.40> 침목시공 배치도

<표 2.11> 급속경화궤도 현장시험부설 주요 시공 공정

순서	공사내용	비고
1	자재 확인(사전 준비)	1일차
2	선로 차단	2일차
3	자재 반입	개발침목
4	체결장치 해체	차단시간, 50m/일
5	자갈파기 및 기존 침목 제거	
6	개발 침목 배열	
7	자갈정리	
8	체결장치 체결	
9	선형 조정	
10	전차선 확인/조정	3일차 작업
11	차량통과 확인 및 정리	3일차 작업

<표 2.12> 급속경화궤도 현장설치시험 및 기준

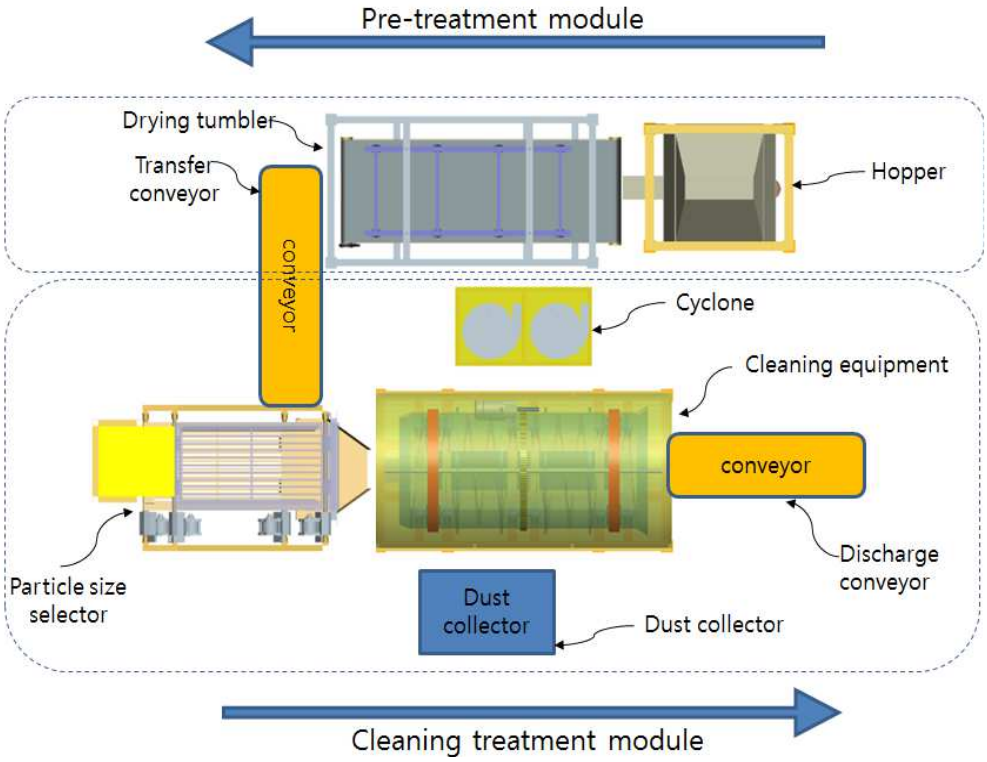
항목	기준
침목 상면 모서리 깨짐 또는 균열	허용 없음
레일 좌면부 측면 콘크리트 깨짐 및 균열	허용 없음

바. 건식자갈세척장비 개발

(1) 건식자갈세척장비의 구성

○ 건식자갈세척장비는 기존 노상의 자갈을 회수하고 회수된 자갈을 본 장비를 이용해 입도선별 및 세척처리함으로써 도상에 재사용할 수 있도록 하는 장비이다. 본 장비를 이용하여 처리된 자갈은 단순히 자갈을 재활용하는 용도 이외에 급속경화 콘크리트도상의 기본 골재로 사용이 가능하도록 콘크리트와 부착력 향상을 위해 자갈표면의 이물질을 제거한다. 자갈의 세척은 고압공기와 투사재를 이용한 블라스팅 표면처리 방법이 적용되기 때문에 세척을 위한 물이나 별도의 유체가 필요하지 않다. 이러한 방식은 세척 시 발생하는 오염물질을 최소화할 수 있으며 이에 따른 환경오염도 최소화할 수 있는 친환경 기술이다.

○ 건식자갈세척장비는 모듈화하여 분류하면 전처리모듈과 세척모듈로 구분된다. 장비 모듈화 및 이에 따른 분류는 자갈 오염도에 따라 처리공정을 유동적으로 설정하여 장비 운용의 경제성을 높이기 위함이다.



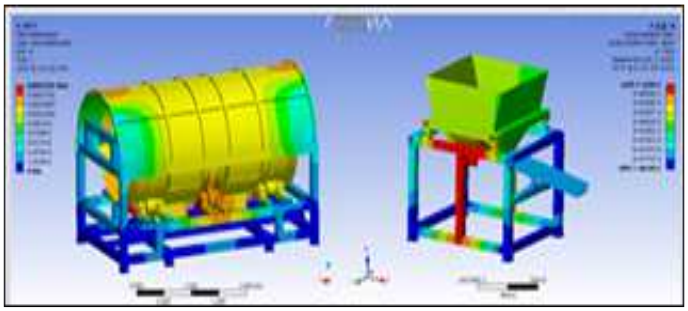
<그림 2.41> 건식자갈세척장비 구성

○ 자갈세척기의 처리용량은 여러 파라미터들의 영향을 받는다. 따라서 각 파라미터의 설정이 매우 중요하며 1일 처리용량 목표는 80m^{3}로 사업계획서의 50m^{3}보다 1.6배 높게 설정하였다. 또한 연속 작업이 가능하도록 드럼형태의 세척기로 설계하였으며, 설계인자 중 가장 중요한 인자는 드럼 반지름과 회전수로 자갈세척기의 처리용량을 결정하는 가장 중요한 인자이다. 드럼 반지름은 별도로 개발된 드럼 반지름 설계 프로그램을 이용하여 드럼이 안정적인 범위 내에서 동작할 수 있도록 설정하였다. 설계프로그램을 이용해 계산된 파라미터는 드럼 반지름이 750mm일 때 최대 드럼회전수는 34.5rpm인 것으로 도출되었으며, 골재직경에 따른 드럼 회전수의 변화는 없었다. 따라서 드럼 반지름 750mm, 최대 드럼회전수는 안전을 고려하여 20rpm으로 도출하였고, 도출된 파라미

터를 기반으로 장비용량 처리프로그램을 이용해 용량을 계산하고 장비의 적합성을 예측하였다.

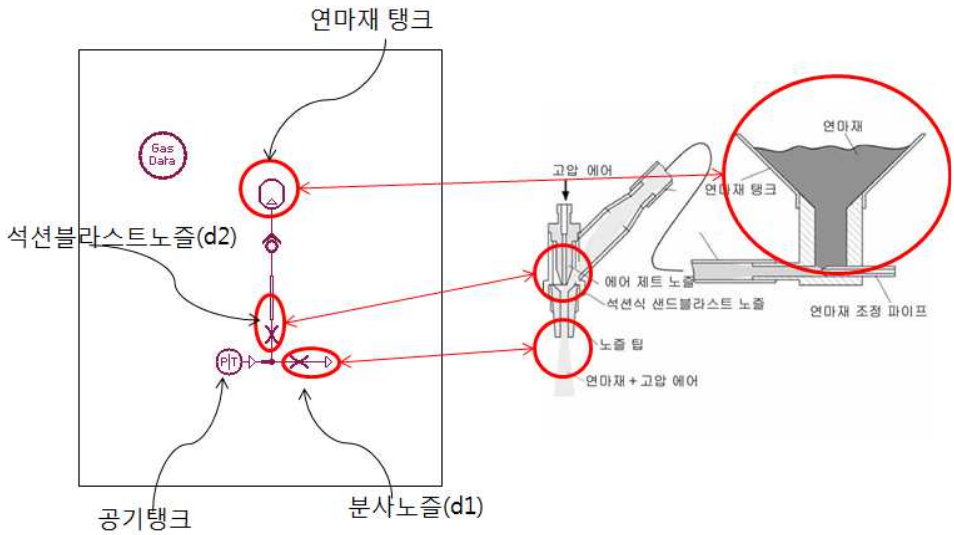


〈그림 2.42〉 세척시스템 3D 모델링



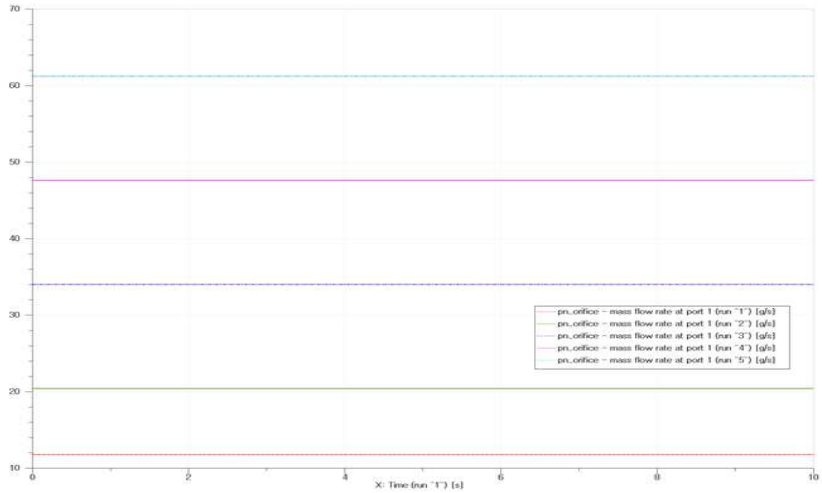
〈그림 2.43〉 세척시스템 구조해석

○ 흡입식 노즐분사기는 고압의 공기를 분사할 때 주위에서 발생하는 음압을 이용하여 투사재를 흡입하고 동시에 투사재를 분사하는 원리이다. 흡입식 노즐분사기의 성능은 분사공기의 압력, 공기 분사노즐의 직경에 가장 많은 영향을 받으며 각 파라미터에 따른 흡입력과 공기분사량을 시뮬레이션하여 흡입식 노즐분사기의 성능을 예측하고 분석하였다.



〈그림 2.44〉 흡입식 노즐분사기 시뮬레이션 모델

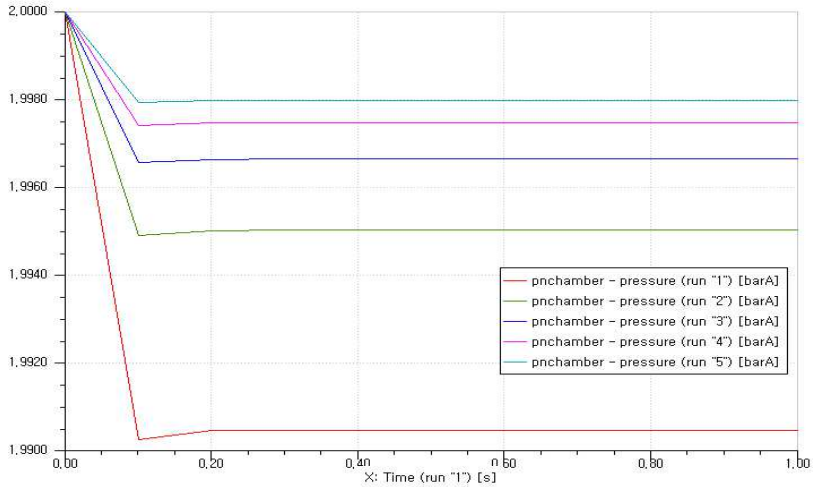
○ 시뮬레이션 파라미터는 분사노즐의 넓이를 각각 5, 10, 15, 20, 25mm^{2}로 임의로 설정하였으며 각 파라미터에 따른 공기분사량 변화를 검토하였다. 공기분사량 시뮬레이션 결과, 분사노즐의 면적에 따른 공기분사량은 아래 그림과 같다. 분사노즐의 면적에 따라 분사공기량은 증가하는 경향을 나타냈으며, 단위는 g/s이다.



<그림 2.45> 분사노즐 면적에 따른 공기분사량 시뮬레이션 결과

○ 투사재의 흡입력은 분사되는 공기 주변의 압력이 낮아져 투사재가 압력이 낮은 방향으로 이동하면서 분사공기와 결합되어 투사된다. 이러한 저압으로 인한 흡입식 분사기법은 투사재가 흡입되는 오리피스의 직경에 따라 그 흡입력이 결정되며, 흡입력을 결정하는 주요인자는 투사재를 저장하는 챔버의 압력변화이다. 따라서 석션블라스트 노즐 직경(d2)에 따른 투사재 저장 챔버의 압력변화를 확인하기 위해 임의로 투사재 저장 챔버의 압력을 2bar로 설정하고 압력의 변화를 확인하였다. 석션블라스트 노즐 직경은 오리피스의 넓이로 대체하여 그림과 같이 8.63, 15, 25, 35, 45mm^{2}으로 설정하였다.

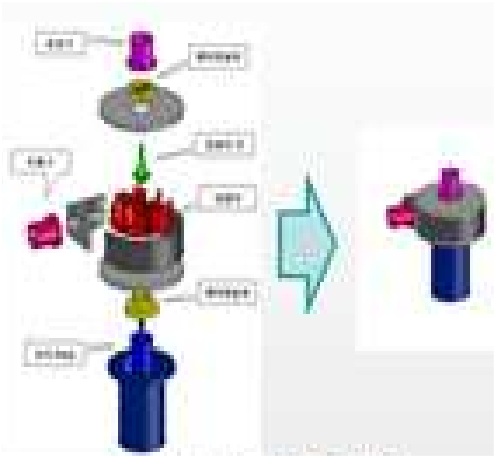
○ 투사재 흡입력 시뮬레이션 결과, 노즐 면적이 작을수록 투사재 저장 챔버 내부의 압력변화가 크게 나타났으며 이에 따라 흡입력도 증가하는 것으로 판단된다. 투사재 흡입력 시뮬레이션의 경우, 약 0.1초 이내에 그 흡입력이 결정되는 것으로 나타났으며 오리피스의 면적과 정비례하지 않는 것으로 나타났다. 이러한 결과를 토대로 오리피스 면적이 일정 면적 이상이 되어도 흡입력은 크게 변하지 않는 것으로 판단된다.



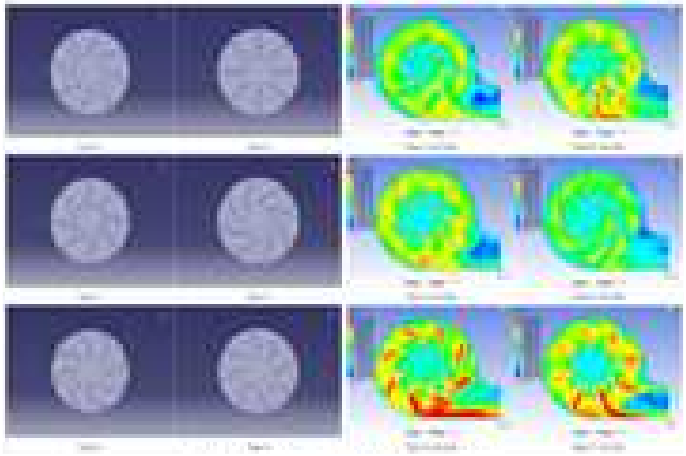
<그림 2.46> 투사재 흡입력 시뮬레이션 결과

○ 임펠러는 형상에 따라 유량 및 속도 등에서 상당한 차이가 발생한다. 따라서 최적화를

위한 시뮬레이션이 수행되어야 하며, 임의의 임펠러 형상을 제안하여 시뮬레이션을 수행하였다. 임펠러의 형상은 기본형상에서부터 총 6 종류의 형상을 제안하였으며 각 형상에 따라 배출되는 투사재의 최고속도, 최대 유량 등을 시뮬레이션하였다. 출구에서의 Velocity Contour를 확인하면 짙은 파란색으로 나타나는 곳은 Reverse flow가 발생하는 지역이다. 모든 경우에서 Reverse flow가 발생하였으나, Type A, D에서 나타나는 Reverse flow 영역이 상대적으로 크게 보인다. 검토결과, 출구가 전체 형상에서 차지하는 크기가 크다고 생각되며 출구의 크기를 줄이면 Reverse flow 영역을 줄일 수 있을 것으로 예상된다.



〈그림 2.47〉 임펠러 투사장치 설계



〈그림 2.48〉 임펠러 투사기 시뮬레이션



ⓐ 임펠러 투사기 시험전 자갈



ⓑ 임펠러 투사기 시험후 자갈

〈그림 2.49〉 임펠러 투사기 시험전·후 자갈의 상태

(2) 건식자갈세척장비의 개선

○ 개발된 건식자살세척장비의 시공공정은 다음과 같다.



〈 자갈투입 〉



〈 입도선별 〉



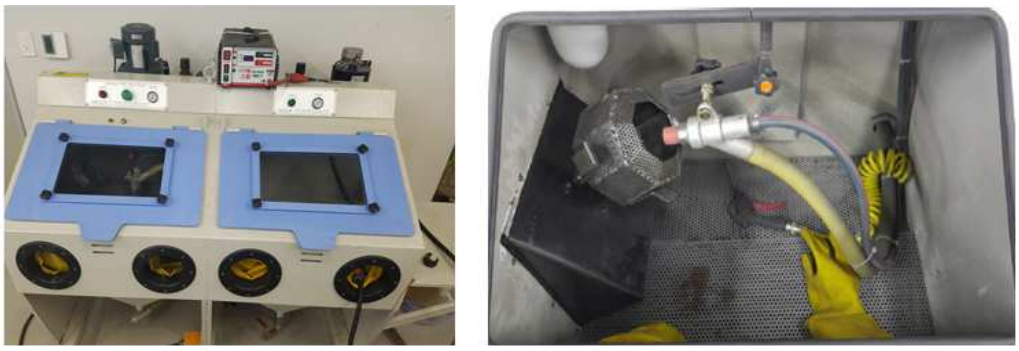
〈자갈 블라스팅 세척〉



〈 자갈배출 〉

○ 블라스팅 마모감량율 시험을 위해 품질 최소기준을 확인하여 현장에서 적합한 블라스

팅 마모감량 시험기를 이용한 순환골재 품질평가방안(블라스팅 세기, 가동시간 등)을 제시하였다. 아래 그림에서 장비의 객관성을 갖추기 위하여 회전식 용기에 투사재를 일정위치에서 주입하는 형식으로 변경하여 회전속도 및 투사재 압력조절이 가능한 형태로 수정하였다.



<그림 2.50> 수정된 블라스팅 시험기

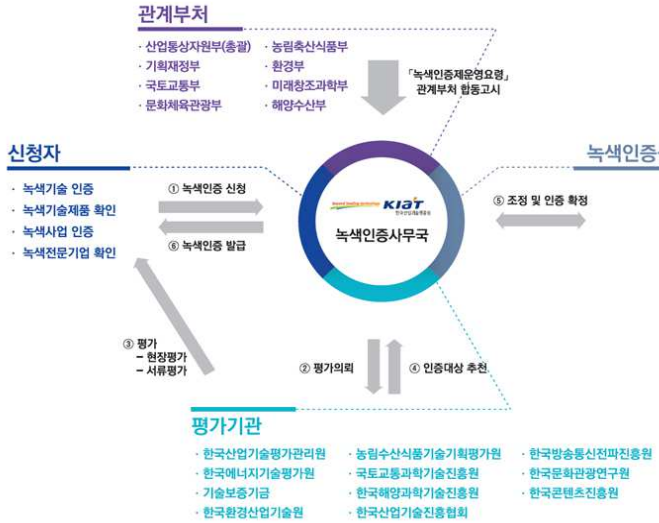
○ 장비에서 연마재 순환의 문제점을 해결하기 위하여 집진기 위치를 싸이클론에서 최대한 가깝게 이동하여 배관의 길이를 줄여 흡입력을 오랫동안 유지시켜 줄 수 있게 하였다. 현재 1단 구조의 서랍식 메쉬망 구조를 2단 구조로 변경하여 이물질 제거 작업시 연마재와 함께 회수되지 않아 석션식 블라스트 노즐의 이물질 막힘현상을 현저히 줄이게 되었다. 개선된 장비의 모습은 아래 그림과 같으며, 연마재 순환이 보다 월활하게 되어 연마재 탱크용량도 2배로 확대하였다.



<그림 2.51> 건식세척자갈장비 연마재 순환 개선

(3) 녹색기술 인증

○ 녹색기술 인증의 목적은 신성장동력인 녹색기술의 활용을 촉진해 에너지 및 자원 사용을 절감하여 환경보호 등으로 성장동력과 일자리 창출을 위함이다. 『저탄소 녹색성장 기본법』 제32조 녹색기술녹색산업의 표준화 및 인증 등(2010.01.13. 공포), 동법 시행령 제19조 녹색기술·녹색사업의 적합성 인증 및 녹색전문기업 확인(2010.04.13.), 녹색인증제 운영요령(관계부처 합동고시, 2010.04.14.)의 법적근거를 가진다.

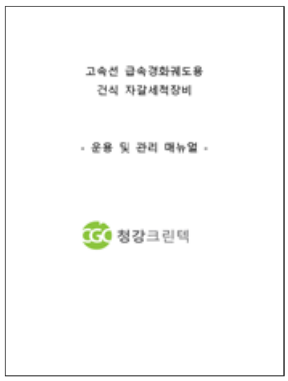


<그림 2.52> 녹색기술인증 운영체계



<그림 2.53> 녹색기술인증서





<그림 2.54> 공사시방서, 운용 및 관리매뉴얼

(4) 세척골재 품질관리기준

○ 급속경화궤도 기술을 이용한 최상의 선로상태 확보 및 유지보수 최적화를 위한 도상자갈 품질기준은 다음과 같다.

<표 2.13> 급속경화궤도용 순환 및 세척골재의 품질관리기준(안)

항 목	기준	시험 및 검사방법
① 입도(mm)	22.4 ~ 63	KS F 2502
② 흡수율(%)	3.0 이하	KS F 2503
③ 마모감량(%)	40 이하	KS F 2508
④ 0.08㎜체 통과량 시험시 손실양(%)	0.5 이하	KS F 2511
⑤ 콘크리트압축강도 (MPa)	2시간 6 이상	KS F 2405
	28일 30 이상	
⑥ 알칼리골재반응	무해할 것	KS F 2545
⑦ 안정성(%)	12 이하	KS F 2507
⑧ 이물질 함유량(%)	유기이물질 1.0 이하(용적)	KS F 2576
	무기이물질 1.0 이하(질량)	
⑨ 블라스팅 중량 손실(%)	0.15 이하	자체 기준

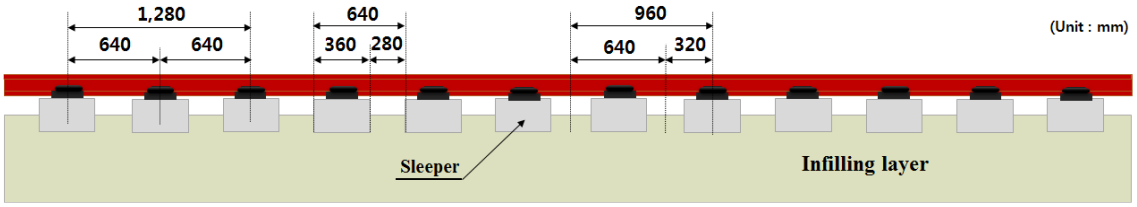
사. 대용량 주입장비 개발

(1) 대용량 주입장비 설계 목표

○ 고속선 투입을 위하여 개발한 대용량 주입장비는 기존 인력시공을 통한 작업량 10m/day 한계를 극복하고 품질확보를 고려한 장비이다. 당초 100m/day 타설을 목표로 설정되었으나 100m/day 타설을 위한 건조 모르터 이송을 위해서는 장비가 비대해져 활용성과 효율성이 떨어지는 것으로 나타났다. 따라서 60m/day 이상 타설이 가능한 장비를 2편성하여 고속선에 투입하는 것을 목표로 대용량 주입장비를 제작하였다.

<표 2.14> 급속경화궤도용 대용량 주입장비 제원(1편성 기준)

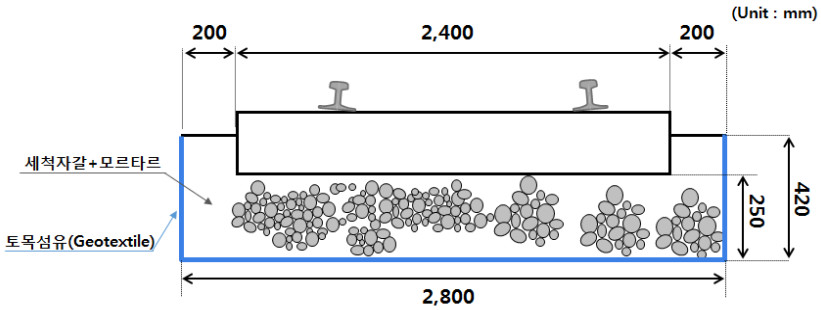
설계 사항	설계목표	제작사항	비 고
모르터 교반 효율	28m^3(60m/day) 0.8m^3(2분30초)/cycle	0.2m^3 (1분30초)	총 4대
건조 모르터 투입시간		400kg (30초)	1대 기준
혼합수 투입시간		96kg (30초)	w/c 24%
모르터 주입시간	28m^3	0.8m^3/(2분30초)	35cycle/day
건조 모르터 적재용량	60ton(30ton x 2)	30ton	100m 기준
혼합수 적재용량	20ton	40ton	100m 기준



<그림 2.55> 급속경화궤도 설계단면 측면도

(2) 대용량 주입장비 용량 검토

○ 대용량 주입장비 설계목표 달성을 위하여 Cement silo tank 및 Water tank의 용량을 검토하였다. 검토에 적용된 급속경화궤도 표준단면과 개발한 대용량 주입장비의 용량 산출근거는 아래와 같다.



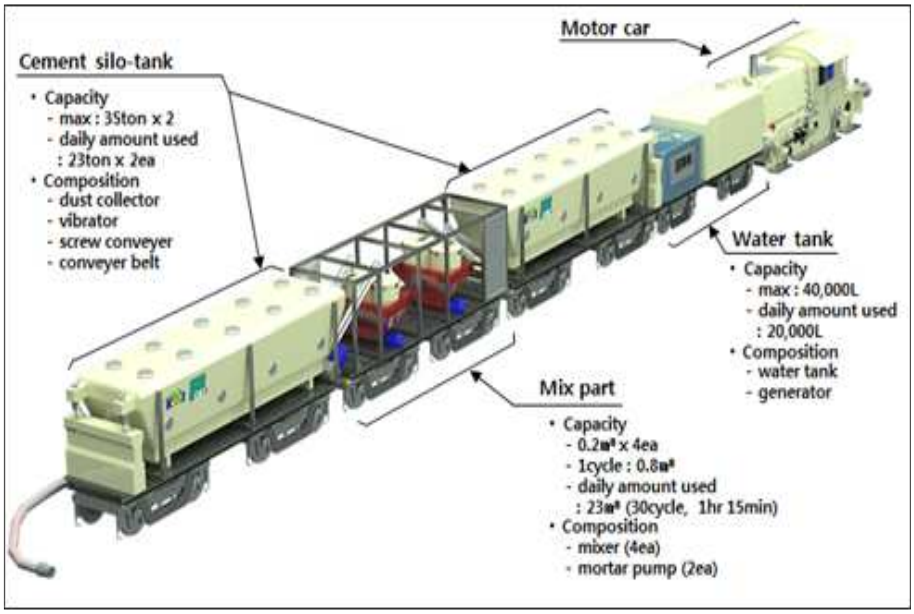
<그림 2.56> 급속경화궤도 표준단면

<표 2.15> 급속경화궤도 표준단면에 대한 재료 산출(1편성 50m 기준)

구분	산출근거	용량산정	비고
표준단면 부피 ($1m^3$당)	2.8(B)x0.42(H)x1.0(L) m	$1.18m^3$	표준단면 산출
	2.4(B)x0.17(H)x0.36(L) m	$0.15m^3$	침목 공제량(1정)
	0.147(m^3) x 1.5(ea)	$0.22m^3$	침목공제량(1m 기준)
	1.176(m^3) - 0.22(m^3)	$0.96m^3$	표준단면 부피산정($1m^3$ 당)
Cement silo-tank 설계용량	0.955(m^3) x 40%	$0.38m^3$	공극률 40% 적용
	0.382(m^3) x 50 x (120%)	$22.94m^3$	설계용량 120%할증적용
	22.94(m^3) x 2(t/m^3)	46ton	45.87ton≒46ton
	46ton / 2	23ton	Cement silo-tank (1대 기준)
Water tank 설계용량	46ton x 24% x (150%)	17ton	W/C 24% (할증 150%) ※ 물청소 용도

(3) 대용량 주입장비 구성

○ 대용량 주입장비는 크게 세부분으로 나누어진다. 아래 그림과 같이 건조 모르터와 물의 교반을 수행하고 메인 컨트롤 박스를 통해 전체 토출과 재료 유입을 조절하는 Main Mix Part, 40ton 이상의 건조 모르터를 이송할 수 있는 용적과 Main Mix Part로 빠른 시간내에 재료를 투입할 수 있는 스크류 컨베이어벨트로 구성된 Silo Tank, 20㎥의 배합을 위한 물량 및 뒷정리용 물을 저장할 수 있는 용적과 Main Mix Part로 건조 모르터와 물을 정량 이송할 수 있는 물 펌프로 구성되어진 Water Tank로 구성되어 있다. 이와 같이 3가지의 Part로 구성된 주입장비는 모터카를 통해 이송되며 각각의 역할을 통해 모르터의 자동화 및 기계화 주입이 가능하다.



<그림 2.57> 대용량 주입장비 개념도

(4) 대용량 주입장비 개선

○ Silo Tank는 Main Mix Part와 연결된 부분으로 건조 모르터의 적재와 교반기 내부로 건조 모르터를 투입하는 기능을 한다. 주입장비는 차단시간 내에 이루어지는 작업으로 교반기 믹싱시간과 함께 교반기 내부로 자재 투입시간을 단축하는 것이 중요하다. 앞에서 언급했던 바와 같이, 1cycle은 3분으로 설계되었고 고속 믹싱시간을 1분으로 하였을 때의 여유시간을 포함하여 1분30초 내에 모든 재료의 투입이 완료되어야 한다. 현재 설계된 스크류 컨베이어 용량은 1분 이내에 각각의 교반기로 500kg의 건조 모르터를 이송할 수 있다. 아래의 완성된 Silo Tank 시제품에서 하부에 장착된 집진기는 터널작업 등에서 발생하는 미립자를 제거하기 위하여 환경적인 요소와 시공적인 요소를 고려하여 설계되었고, 건조 모르터의 뭉침 현상을 방지하기 위하여 Tank 외부에 바이브레이터를 설치하였다.



<그림 2.58> 대용량 주입장비 개발

○ 대용량 주입장비의 시험시공을 통해 장비 개선사항을 검토하였다. 검토결과, Main Control Box는 간편화하여 시공성을 확보하도록 하였고, 팔각형의 Main Mix Part는 원형으로 변경해 작업 연속성 및 품질 균질성을 확보하였으며, Cement Silo Tank는 내구성 및 연속성 확보가 가능하도록 개선하였다.



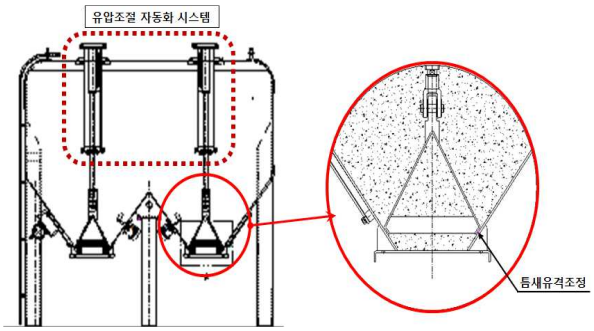
<그림 2.59> Main Control Box 개선




<그림 2.60> Main Mix Part 개선



<그림 2.61> Cement Silo Tank 시제품



<그림 2.62> Cement Silo Tank 내부구조 개선

아. 궤광리프팅장비 개발

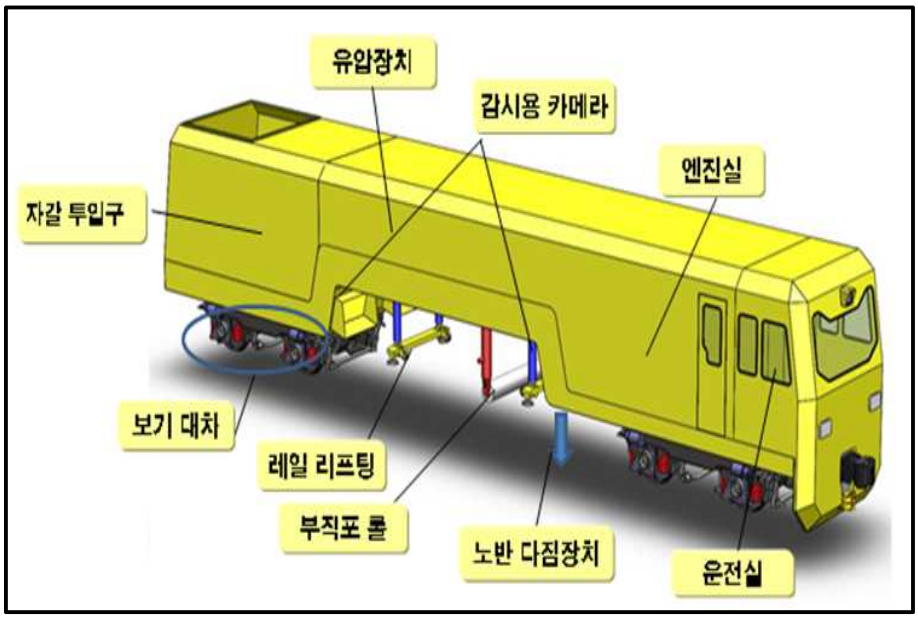
(1) 궤광리프팅장비 설계 기준

○ 궤광리프팅장비는 자주식으로서 전·후 양방향 주행 및 작업이 가능해야 하며, 작업 목적의 운전시에는 전방의 Main 운전실에서만 작동이 가능하여야 한다. 궤광리프팅장비는 레일주행 및 궤광을 들어올린 상태에서 부직포와 자갈을 살포하며 주행이 가능하도록 운전실, 기관실, 레일캐치, 캐터필러, 자갈호퍼, 스크래퍼, 부직포 롤링바, 보기대차 등으로 설계되었다.

○ 궤광리프팅장비 요구사항으로는 작업속도는 100m/h 이상(정속운전 가능), 호퍼용량은 5.5m^3, 최대 작업구배는 30‰ 이상, 레일리프팅 장치로는 더블캐치(전·후 2세트), 캐터필러 주행능력은 300ton 이상 등이다. 궤광리프팅장비에 요구되는 기능을 살펴보면, 첫째, 작업에서 주행모드로 또는 주행에서 작업모드로 짧은 시간에 쉽게 변경할 수 있어야 하고, 둘째, 장비의 모든 작업장치, 각종장치 및 구조부재들은 신뢰도가 높은 재료를 사용하여야 하며, 셋째, 차량 운전과 정비에 소요되는 인력 및 비용을 최소화하기 위해 운전과 정비가 편해야 하고, 넷째, 조작실의 운전 조작 판넬에서는 엔진, 유압, 공기압, 발전기 등의 작동상태를 확인할 수 있는 계기판이 설치되어야 한다.

○ 궤광리프팅장비의 설계는 고속선 시공공정에서 Critical Path로 예상되는 부직포 설치, 거푸집 설치, 자갈 살포의 기능을 수행하도록 하였다. 이 부분은 기존 일반선에서 인력시공되는 작업으로 시공 과정에서 많은 시간이 소요되며 복잡한 과정을 가지는 공정들이다. 그러나 기존 자갈을 철거한 후 흐트러진 표면 자갈 또는 노반을 다지고 그 위에 부직포를 설치하며 침목에서 일정한 간격으로 거푸집을 설치하고 그 안쪽으로 자갈을

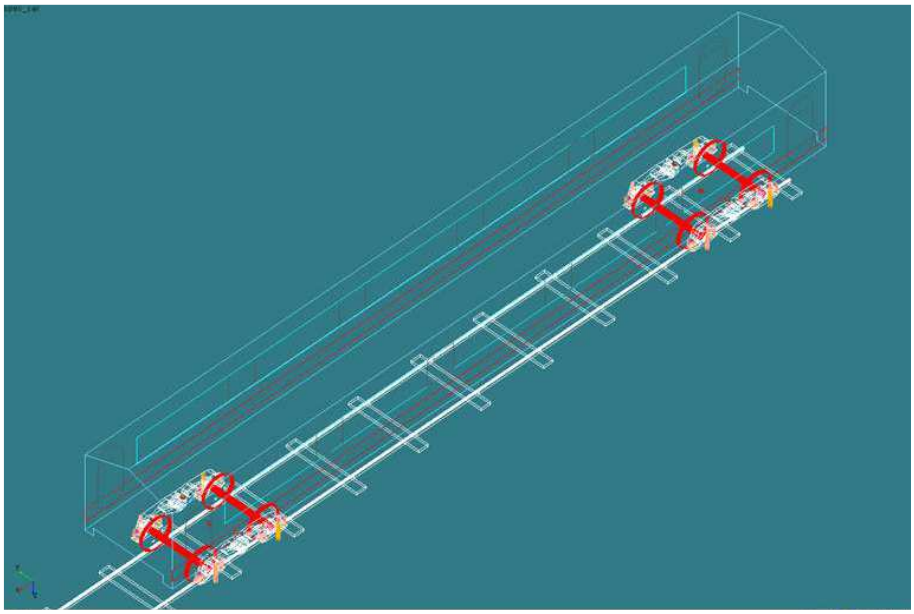
살포하는 공정은 기존 침목이 광폭침목으로 교환된 후에 작업되어야 하므로 기존선보다 어려울 것으로 예상된다. 따라서, 전체 공정의 기계화를 통해 품질성과 시공성을 향상시키기 위한 목적의 설계를 수행하였다.



<그림 2.63> 궤광리프팅장비 최초 설계안

(2) 궤광리프팅장비 구조해석 및 주행안정성 평가

○ 궤광리프팅장비는 총 길이 21m로서 기존에 존재하지 않는 형식과 기능을 가진 장비이다. 철도안전법의 형식승인에는 연구과제로 개발되는 차량은 형식승인을 하지 않아도 되지만 운행시에 문제가 되지 않도록 주행안정성 평가를 설계 과정에서 진행하였다. 해석은 철도차량 동특성 해석프로그램인 Vi Rail을 이용하였고, 차량 동역학 해석을 위해 차량구조를 질량, Spring 및 Damper의 수학적 요소로 모델링하였다. 본 해석에 사용된 모델링은 차체와 2개의 대차 프레임, 4개의 윤축 질량 요소로 하여 그 사이에 Spring과 Damper를 연결해 모델링하였다. 대차 프레임과 윤축 사이의 1차 현가장치는 Coil Spring과 Damper로 구성되었고, 대차 프레임과 차체사이 2차 현가장치는 Center Pivot과 Elastic Side Beater로 구성되었다. 또한, 차체와 대차를 연결하는 Center Pivot은 전후·좌우방향으로 강성이 큰 Cone형으로 연결되어 있고, 좌우 Rolling은 Elastic Side Bearer가 지지하도록 모델링하였다.



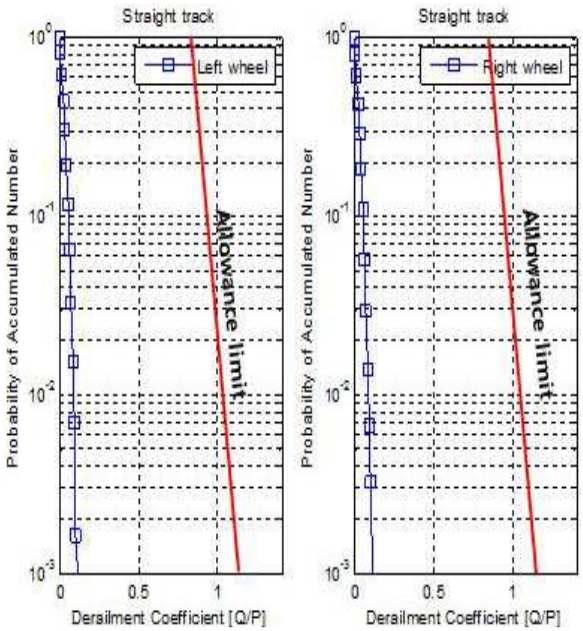
〈그림 2.64〉 궤광리프팅장비 모델링

○ 주행안정성 차량이 공차상태로 운행하는 것을 고려해 공차 조건을 대상으로 해석하였으며, 외부 가진에 대한 윤축의 횡방향 변위가 발생할 때의 속도를 임계속도로 산출하였다. 해석 결과, 신조시는 임계속도가 충분히 안정적이며 차륜이 마모됨에 따라 마모로 인한 Conicity가 0.3까지 최고속도의 임계속도를 갖는 것으로 나타났다.

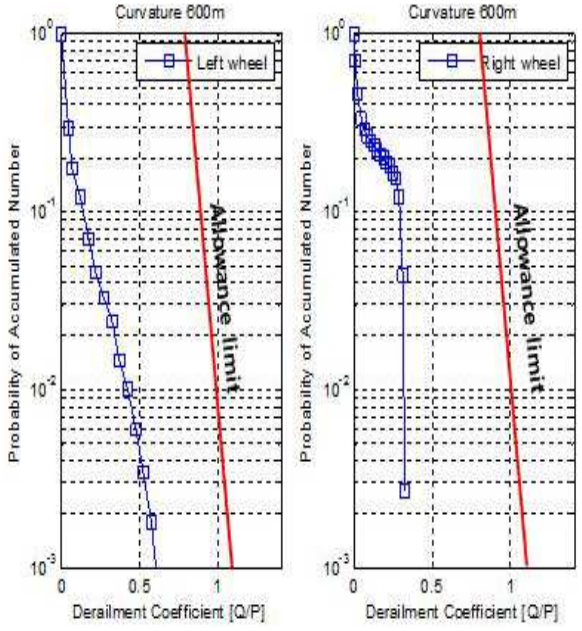
〈표 2.16〉 궤광리프팅장비 주행안정성 해석 결과

구 분	해석 결과 (km/h)	판정기준
신조시 (C=0.05)	122.4	운행 최고속도 (70km/h) 이상
마모시 (C=0.10)	100.8	
마모시 (C=0.20)	86.4	
마모시 (C=0.30)	79.2	

○ 동적 탈선계수를 구하기 위해서 단위길이당 탈선계수(Y/Q) 중 가장 큰 값을 해당구간의 탈선계수 대푯값으로 한다. 이런 방식으로 구해진 탈선계수를 빈도누적확률을 계산한 결과, 동적 탈선계수가 허용한도 이내에 있는 것으로 나타났다.

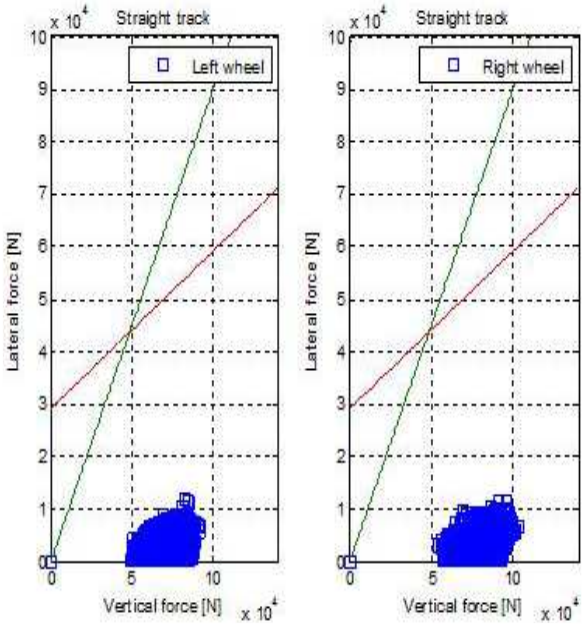


<그림 2.65> 직선선로에서의 탈선계수

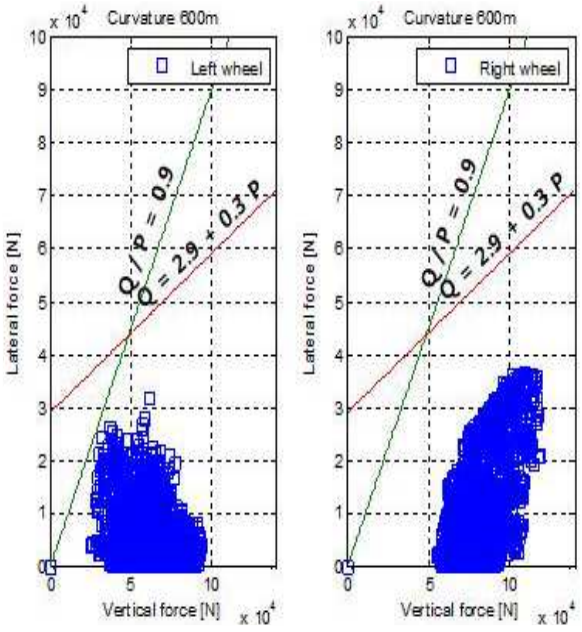


<그림 2.66> 곡선 R600에서 동적 탈선계수

○ 횡력은 탈선계수 해석결과에 대해 단위길이당 탈선계수(Y/Q) 중 가장 큰 값을 해당구간의 차륜 횡압 대푯값으로 읽는다. 곡선반경별, 동적 차륜횡압을 허용기준과 함께 그래프로 표시한 결과, 모두 허용기준 내에 있는 것으로 나타났다.



<그림 2.67> 직선선로에서의 횡압



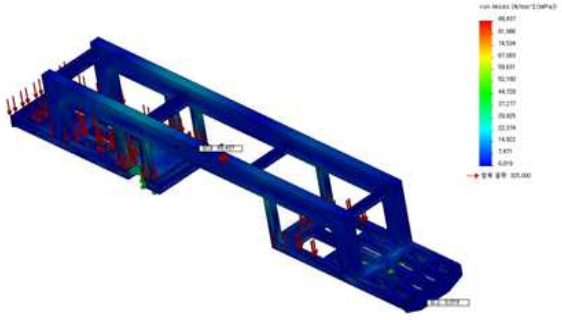
<그림 2.68> 곡선 R600에서 횡압

○ 차량이 선로 위를 달릴 때 궤도불규칙도 의한 차량거동을 직선선로 및 곡선반경별로 진동 수준을 해석하여 평가기준과 검토한 결과, 차량의 동적해석결과 직선 및 곡선에서 모두 허가기준 이내에 있는 것으로 나타났다.

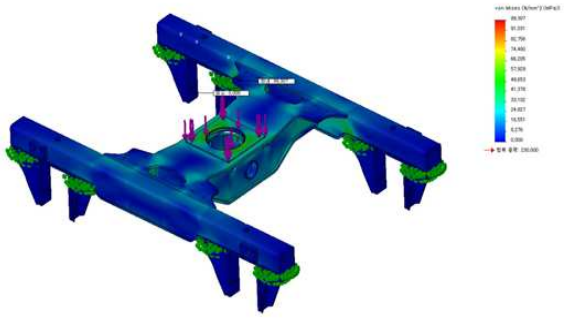
<표 2.17> 차량 동적거동 해석 평가기준

평가 항목	직선 선로 (80km/h)	R600 선로 (70km/h)	R250 선로 (50km/h)	평가기준
대차 횡가속도 (m/s^2)	2.02	3.18	1.51	10.67
차체 횡가속도 (m/s^2)	0.66	1.14	1.12	3.00
차체 상하가속도 (m/s^2)	0.83	0.98	0.77	5.00

○ 궤광리프팅장비 해석결과, 차체프레임의 최대응력은 89.43MPa로 항복응력 325.0MPa 보다 작게 나타났고, 보기프레임의 최대응력은 99.31MPa로 항복응력 230.0MPa 보다 작게 나타나 궤광리프트장비는 안전하게 설계된 것으로 나타났다.



<그림 2.69> 리프팅프레임 응력도



<그림 2.70> 보기프레임 응력도

자. 급속경화궤도 취약구간 보강방안

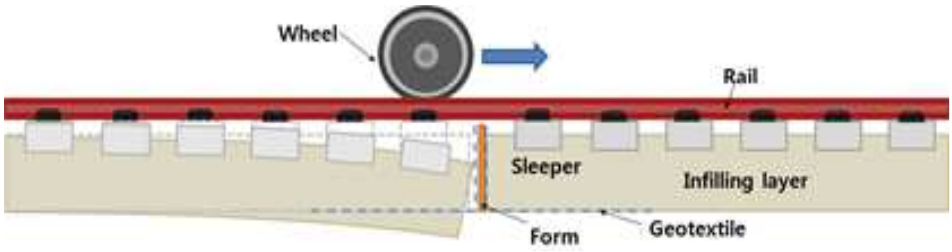
(1) 급속경화궤도 시공시 예상 취약구간

○ 기존 자갈도상궤도의 문제점을 개선하고 향후 열차속도 및 하중 증가에 따른 자갈도상궤도의 부정적 영향을 감소시키기 위해서는 생력화궤도구조가 필요하며, 그 방안으로 신생선에 대해서는 콘크리트궤도를 적용하고 기존선에 대해서는 급속경화궤도 적용이 가능하다. 급속경화궤도는 자갈도상궤도의 문제점 개선이 가능하고, 유지보수비용 감소가 가능하며 열차의 차단시간 동안 공사완료가 가능한 공법이다. 그러나 아직까지 시험부설 및 사용선 적용사례가 많지 않은 실정이다. 본 연구에서는 급속경화궤도 시공시 예상되는 취약구간, 즉 이음매부, 접속부, 노반연약구간, 하부 자갈두께변화 등에 따른 영향을 수치해석적으로 분석하고 보강방안을 검토하였다.

(2) 고속선 적용에 따른 시공이음매부 보강방안

○ 일반선을 대상으로 급속경화궤도 해석 및 실험결과, 급속경화궤도 시공이음부는 안정한 것으로 나타났다. 그러나 고속선에 적용할 경우, 열차하중에 증가로 인하여 시공이음부의 과도한 수직 처짐 및 연직가속도 발생의 위험이 있기 때문에 급속경화궤도의 장기

내구성 확보를 위하여 시공이음부의 보강방안 적용이 필수적이다. 또한 급속경화궤도 시공은 열차 차단시간 내에 완료되어야 하므로, 최적의 시공이음부의 보강방안 적용에는 보강효과뿐만 아니라 시공성이 필요하다. 이동하중해석에서 시공이음부의 동적특성을 분석하기 위하여 시공이음부에 인접한 침목부근에서 발생하는 수직 처짐 및 연직가속도 해석결과를 분석하였다.

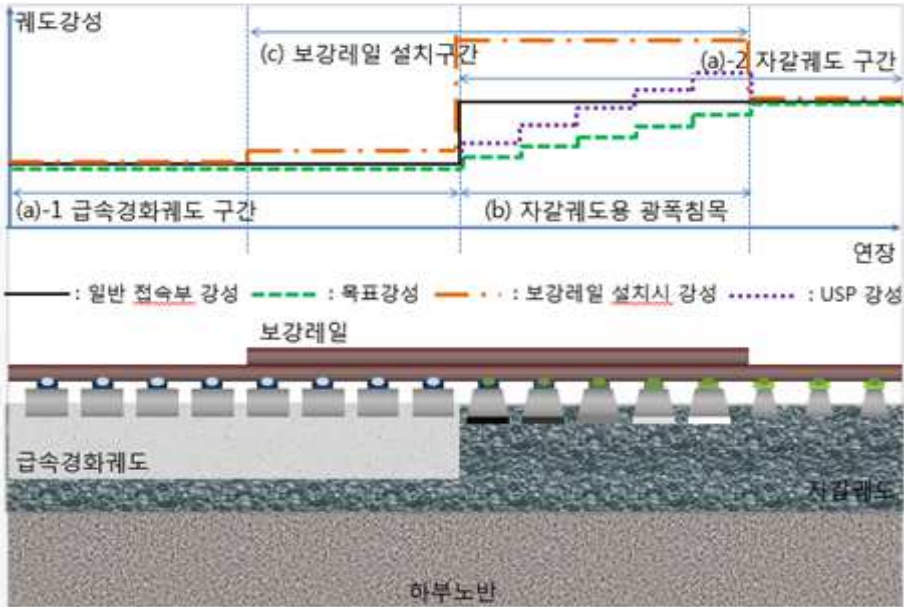


<그림 2.71> 시공이음매부 보강방안(Interlocking & Geogrid)

(3) 궤도 접속부에 대한 보강방안

○ 철도에서 접속부는 교량과 토공, 터널과 토공, 유도상궤도에서 무도상궤도로 옮겨가는 구간, 또는 궤도의 하부구조 강성이 변화하는 구간을 말한다. 즉, 궤도시스템의 구조 강성이 변화하여 철도의 안정성과 신뢰성에 큰 영향을 미치는 구간이다. 이러한 구간은 강성차이에 따른 불균등 침하가 발생하고, 이에 따른 충격하중 효과로 인하여 진입구간인 토공부분에 상대적인 과대 침하가 발생된다. 불균등 침하는 차량의 운행안정성에 영향을 미치며 승차감 저하 등에 영향을 미치는 요소로서 지속적인 유지보수를 필요로 한다. 또한 차륜에 상하 진동을 유발하여 윤중변동과 차체의 요동을 발생시키며, 궤도지지상태의 불균일을 발생시켜 부가(-)적인 레일응력이나 체결장치의 체결력 과대화를 유발하는 레일의 부상현상(Uplifting) 등을 발생할 가능성이 있다. 그러므로 차량의 주행안전성 및 궤도보수상의 관점에서 접속부의 영향은 매우 중요한 검토사항이라고 할 수 있다.

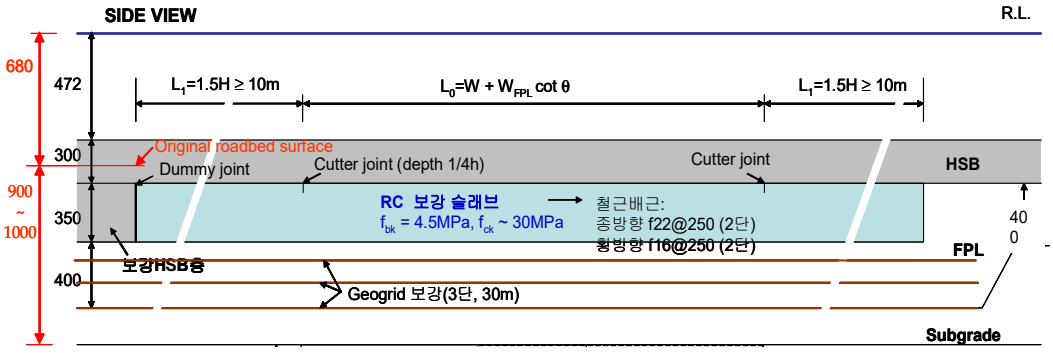
○ 보강레일을 설치할 경우, 급속경화궤도 쪽에서는 레일 패드의 강성이 낮고 침목 이하의 강성은 거의 무한대로 가정할 수 있기 때문에 침목과 침목을 연결하는 보강레일의 실질적인 보강 효과가 미미하다고 할 수 있다. 그러나 도상탄성이 큰 자갈궤도 측면에서는 보강레일의 강성 증가효과가 크기 때문에 자갈궤도의 침하를 억제하기 위한 대책으로써 적용될 수 있다. 따라서 보강레일 설치 시・종점부의 강성 변화를 조정할 때에도 급속경화궤도에 별도의 레일패드 강성변화를 두지 않아도 무방할 것으로 판단되며, 자갈궤도 쪽에서는 레일패드나 USP의 강성 조정이 필요할 것으로 판단된다.



<그림 2.72> 보강레일, 접속부용 광폭침목, 저탄성패드 적용

(4) 연약지반구간에 대한 보강구간

○ 일반철도 영업선의 개량공사 시 충분한 노반의 지지력 확보는 궤도의 내구성 확보를 위하여 가장 중요한 요소이며, 콘크리트궤도로 개량할 경우에는 궤도침하를 방지하기 위하여 균일한 노반강성 확보가 필수적이다. 콘크리트궤도에서 발생하는 침하의 원인은 반복되는 열차의 이동하중, 이음매의 단차, 국부침하 또는 배수불량에 의한 노반 연약화 등 다양하다. 급속경화궤도는 시공시 노반보강이 불가능하기 때문에 궤도와 노반의 인터페이스부에서 강성을 보강하는 것이 합리적이다. 토목섬유는 도상자갈 교환을 위한 시설장비를 이용하여 손쉽게 설치할 수 있는 장점이 있다. 도상자갈 교환을 위한 시설장비들은 궤도에 영향을 주지 않고 하부의 자갈을 추출하거나 일시적으로 들어 올린 후 자갈을 교환할 수도 있다. 토목섬유를 이용하여 지지력을 확보하는 방안으로는 치환, 다짐, 고결 등 여러 방법이 있으므로 시공공기 및 시공조건을 감안하여 시공방법을 적용하여야 한다. 채용한 토목섬유는 지반보강용으로 인장강도가 크고, 크리프 등을 고려한 장기적인 인장강도가 확보될 수 있는 지오그리드(Biaxial Polypropylene Geogrid)를 적용하였다.



<그림 2.73> 연약지반구간 적용 사례

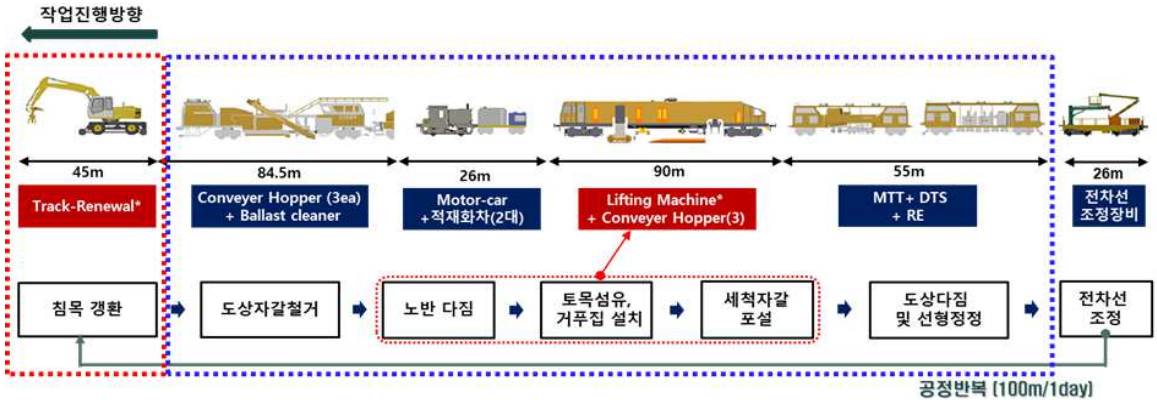
(5) 하부자갈층 두께 변화구간에 보강방안

○ 급속경화궤도의 구조적 안정성 및 경제성을 고려한 최적표준설계단면을 광폭침목의 하면으로 250mm의 도상층을 콘크리트화하여, 노반상부 구조는 강화노반층과 그 위에 도상자갈층이 100mm 존재하는 구조 특성을 가지고 있다. 급속경화궤도 단면의 특성을 평가하기 위하여 급속경화궤도의 최적설계표준단면을 근간으로 궤도를 모델링하였고, 노반 상부층의 도상자갈 두께를 변화시키며 정정하중, 반복하중, 충격하중 및 열차하중에 의한 영향을 검토하였다. 정적하중의 경우, 도상자갈의 강성이 증가함에 따라서 변위가 점진적으로 감소하는 경향을 나타냈으며, 100MPa부터는 차이가 다소 낮게 나타났다. Half-sine파 형태의 충격하중의 경우, 강성에 따른 경향은 있지만 차이가 미미하게 나타나 강화노반과 도상자갈의 두께에 따른 궤도에 미치는 진동 특성은 없는 것으로 판단된다. 열차하중의 경우, 진동에너지 크기를 비교하는데 유효한 RMS를 이용해 검토한 결과, 궤도에서 차이가 미미하게 나타나 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. 충격 및 열차하중의 경우, 도상자갈층의 두께 및 강성이 증가함에 따라서 진동가속도가 증가하는 경향이 나타났다.

차. 급속경화궤도 시공공정 개발

(1) 기계화 시공공정 설계

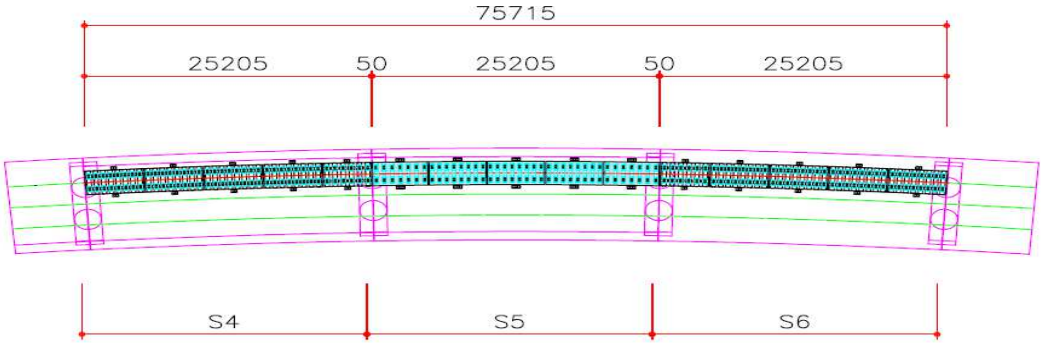
○ 기존의 침목교환은 백호를 이용하여 침목을 제거한 후 노후자갈 제거를 실시하여 시간이 오래 걸렸다. 하지만 기계화 시공공정에서는 개발 중인 장비를 이용하여 침목을 교환한 후에 Ballast Cleaner를 이용해 자갈만 제거하게 된다. 또한, Critical path인 부직포 설치, 거푸집 설치, 자갈 살포 기능을 리프팅 머신 투입 한번으로 해결할 수 있도록 공정을 단순화하였다. 인력에 의한 작업은 거푸집 설치와 부직포 틀을 잡아주는 정도이며 리프팅머신이 교환된 침목과 레일을 들어서 작업이 수월하게 진행될 수 있다. 나머지 자갈다짐 기능은 MTT 투입으로 이루어지며, 도상 안정화 단계를 거친 후에 주입개발장비가 투입되어 2편성으로 100m 이상의 작업을 완료할 수 있다.



<그림 2.74> 기계화 시공공정 개념도

(2) 교량구간 시험부설

○ 시험부설 교량은 대전 남연결선 소정 1교(충북 옥천군 옥천읍 삼청리)이며, 선로조건은 종곡선 25‰, 평면곡선 R600, 캔트 125mm이다. 시험부설교량의 경간구성 및 시공공정은 다음과 같다.



<그림 2.75> 소정1교 경간 구성(L=75m)



〈그림 2.76〉 소정1교 급속경화궤도 시공 순서

(3) 철도종합시험선로 시험부설

○ 개발된 급속경화궤도 구조와 기계화 시공 장비들의 적용성 및 성능을 종합적으로 검증하기 위하여, 아래와 같이 “철도종합시험선로(충청북도 청주시 오송읍~세종특별자치시 전동면)” 시험4터널 및 토공구간에 급속경화궤도를 시험시공(총 시공연장 : 165 m)하였다. 여기서, 철도종합시험선로는 세계에서 5번째로 건설된 철도 전용 시험선으로서 200 km/h 이상의 고속철도 시험운행이 가능하며, 국내에서 생산된 철도용품 및 시스템의 적용성 평가와 해외수출 열차의 성능시험을 목적으로 건설되었다. 시험선로는 총연장 12.990 km이며 회전반경 250 m의 급곡선 및 경사 35 ‰의 급구배 구간을 포함하여 9개의 교량과 6개의 터널로 구성되었다.



〈그림 2.77〉 철도종합시험선로 및 급속경화궤도 시험시공 위치



(a) 선형측량 (b) 침목교환 (c) 기존자갈 철거

(d) 토목섬유 및 거푸집 설치 (e) 세척자갈 포설 (f) 도상다짐 및 안정화

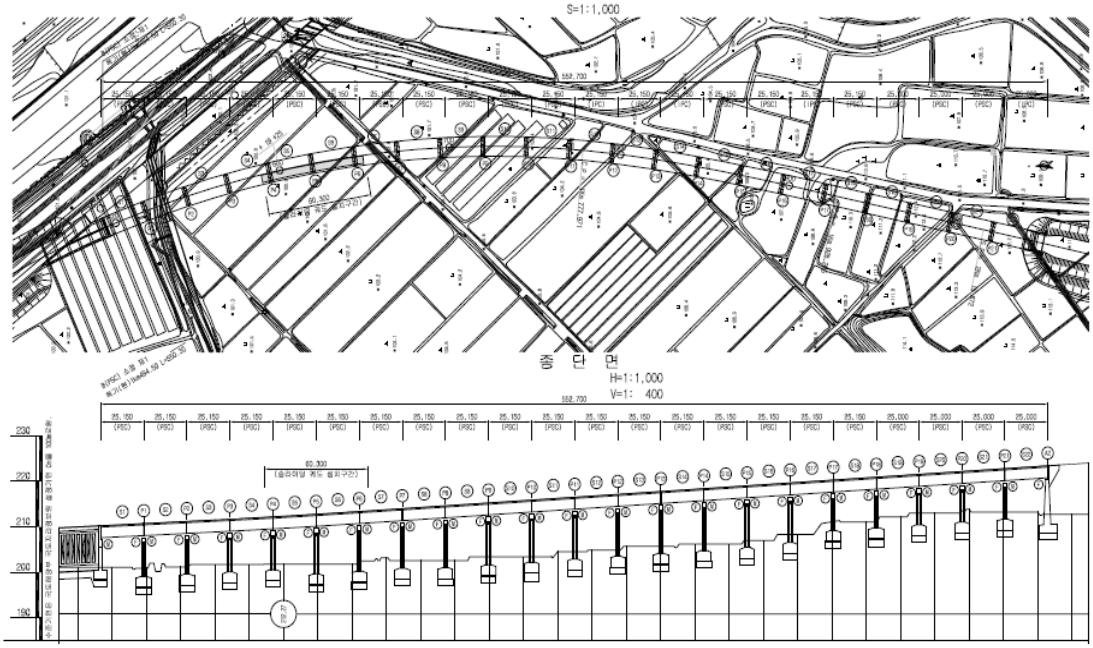
(g) 시멘트 모르터 충전 (h) 충전완료 및 주변정리 (i) 급속경화궤도 완료

〈그림 2.78〉 기계화 장비를 이용한 급속경화궤도 시공 순서

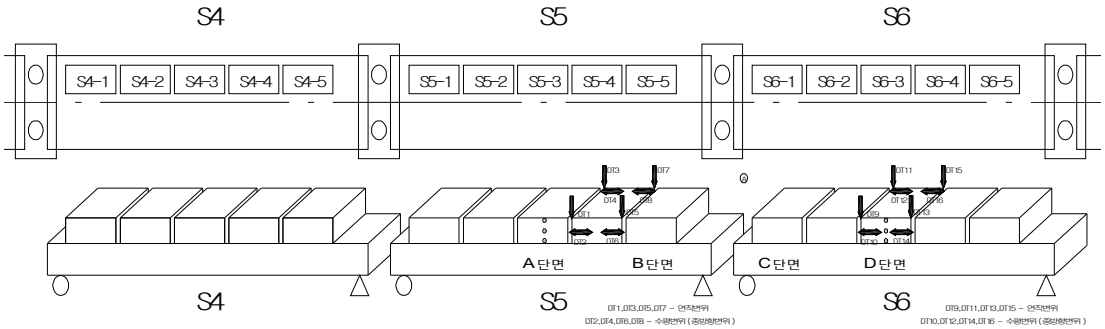
카. 급속경화궤도 성능검증

(1) 교량구간 급속경화궤도 현장 계측 및 시험

○ 대전 남연결선 소정 1교 4경간에 급속경화궤도를 시공하였다. 교량 구간의 급속경화궤도는 교량과 궤도를 일체화시키는 앵커구조가 존재한다. 이러한 앵커구조 거동을 평가하기 위하여 횡방향 가력시험과 온도하중에 따른 궤도의 거동을 평가하기 위한 계측을 시행하였다. 소정 1교 종평면도 및 계측센서 배치도는 아래와 같다.



<그림 2.79> 대전 남연결선 소정 1교 종평면도



<그림 2.80> 대전 남연결선 소정 1교 계측센서 배치도

○ 온도하중에 따른 궤도거동을 파악하기 위하여 8월, 10월, 12월에 일교차가 가장 큰 일자에 48시간 계측을 실시하였다. 데이터의 측정은 해당 월에 30일 측정을 수행하였으며, 측정된 데이터를 이용, 대기온도를 기준으로 일교차가 가장 큰 48시간 데이터의 계측 결과는 다음과 같다. 각 측정 월별 최대 대기온도 차이와 그때 궤도슬래브 상하면의 최대 온도차는 아래와 같다. 궤도슬래브에 휨변형을 유발할 수 있는 상하면 온도차는 대기 온도차보다 작아서 일교차가 20℃ 이상 발생해도 궤도슬래브에 발생하는 상하면 온도차는 10℃ 이내에 머무는 것을 확인할 수 있다.

○ 급속경화궤도 슬래브 세그먼트 두께는 일반적으로 530mm를 사용하며 설계시 온도경사는 0.04℃/mm를 적용한다. 따라서 설계시 적용한 상하면 온도차는 21.2℃이므로, 현장에서 발생하는 온도차는 설계시 반영한 온도차 이내에 머무르는 것을 현장 계측을 통하여 확인하였다. 계측결과, 수평변위는 최대값이 0.23 mm로 매우 적은 것으로 확인되었으며, 온도변화에 따른 변위기울기도 0.01mm/℃에 불과하여 온도에 따른 영향이 거의 없는 것으로 확인되었다. 시험시공 현장이 R600인 급곡선 구간임에도 온도변화에 따른 수평변위가 극히 작아 궤도구조의 수평저항력이 우수한 것으로 판단된다. 수직변

위의 경우, 앵커플레이트가 설치된 교량구간은 10월에 1.05mm로 크게 나타났으며 앵커블록이 설치된 교량에서는 비교적 작게 나타났다. 그러나 이 차이가 앵커구조에 의한 것인지 교량 위치에 의한 것인지 명확하지 않았으며, 변위기울기는 월별로 많은 차이를 보여 0.01～0.04mm/℃까지 차이를 보였다. 수직방향 최대변위도 1.05mm에 머물러 궤도구조의 구조적 안전성이나 열차의 고속주행에 영향을 미치지 않는 정도의 매우 적은 변위가 나타난 것으로 확인되었다.

<표 2.18> 현장 계측 최대 대기온도차 및 궤도슬래브 상하면 온도차

측정일 (48 hr)	최대 일교차 [℃]	궤도 슬래브 상하면 최대 온도차 [℃]
18.08.26～08.27	17.85	9.35
18.10.30～10.31	22.44	6.93
18.12.13～12.14	17.18	5.44

○ 소정 1교 상하행선에 슬라이딩궤도와 급속경화궤도를 시험시공하였으며, 침목운반 트레일러를 이용해 중앙부에 수직하중을 재하하였으며, 수직하중 재하에 따른 교량처짐이 궤도에 미치는 영향을 검토하기 위하여 궤도의 변위 및 앵커의 변형률을 계측하였다.



<그림 2.81> 소정 1교 수직하중 시험 전경

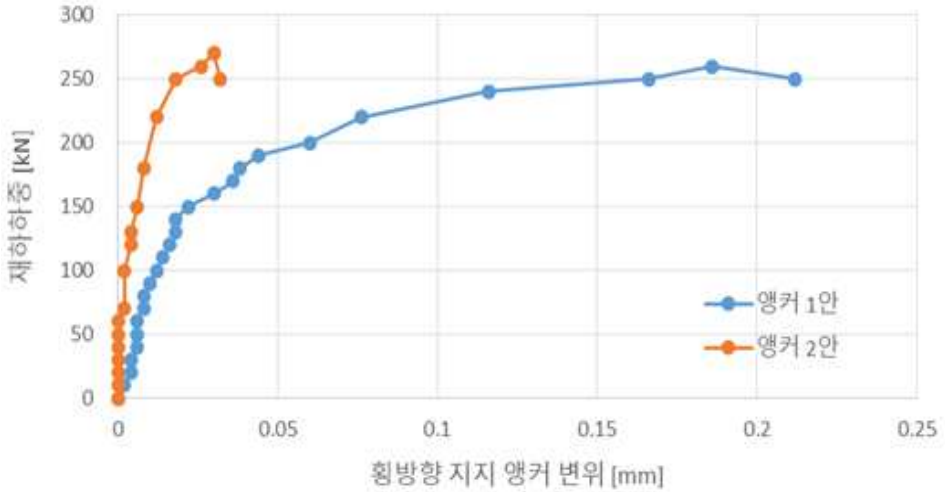
○ 62톤의 수직하중을 소정1교 중앙 경간에 재하한 결과, 궤도의 최대 수직처짐은 0.02mm, 최대 수평변형은 0.03mm에 머물러 교량 처짐에 의한 궤도 안정성은 문제가 없는 것으로 나타났다.

○ 교량 세그먼트 중심부에 설치된 앵커 좌우로 유압잭을 설치해 횡방향 하중을 재하하였다. 앵커플레이트를 적용한 앵커 1안은 150kN부터 변위가 증가하기 시작해 250kN에서 0.2mm의 변위가 발생하였다. 앵커블록을 적용한 앵커 2안은 250kN의 하중에서부터 변위가 증가하기 시작하였으며 그때 변위는 0.02mm로 나타났다. 시험결과에 따라 앵커플레이트를 적용한 1안 앵커 보다는 앵커블록을 적용한 2안 앵커가 강성이 더 높아 현장 적용에 유리한 것으로 판단된다. 또한 250kN의 하중이 재하되었을 때 앵커구조에 발생

한 변형률을 살펴보면, 변형률이 250$\mu\varepsilon$에 불과하여 강재의 항복변형률 2000$\mu\varepsilon$을 크게 밑돌아 앵커에 전혀 손상을 유발하지 않았다. 따라서 아래의 하중변위 곡선에서의 강성 감소는 앵커의 손상에 의한 것이 아니라 앵커의 유격범위에서 궤도슬래브가 마찰거동을 한 것으로 판단된다.



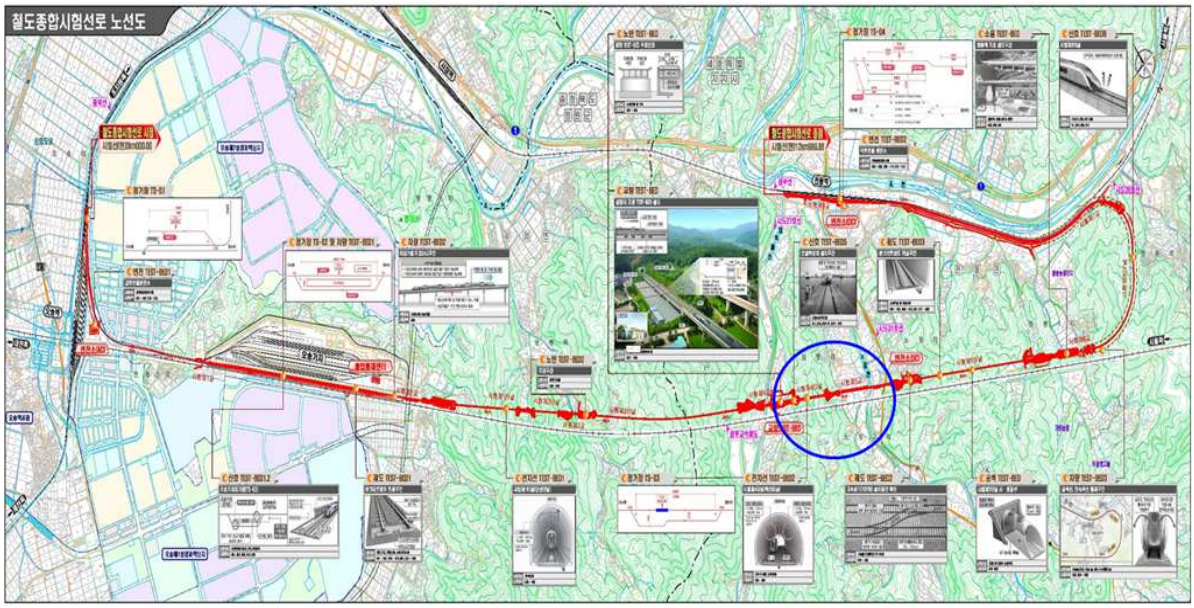
<그림 2.82> 소정 1교 횡하중 시험 전경



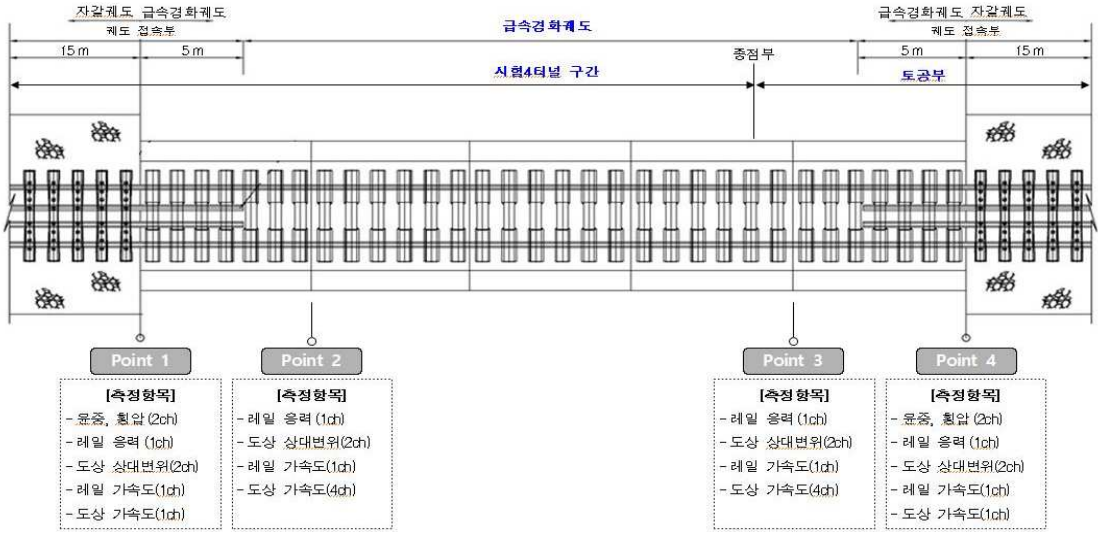
<그림 2.83> 급속경화궤도 앵커 현장 횡재하 시험 결과

(2) 철도종합시험선로 급속경화궤도 현장 계측 및 시험

○ 오송 철도종합시험선로 시험4터널 및 토공 접속부에 급속경화궤도를 시공하였다. 급속경화궤도 System의 운영상 적합성을 확인하기 위하여 HEMU를 포함하여 다양한 열차 운행시 터널부, 토공부, 터널 및 토공 접속부 구간에서 윤중/횡압, 레일가속도, 레일저부응력, 콘크리트도상 가속도, 세그먼트별 상대변위, 자갈도상-콘크리트도상 변위를 측정하였다. 철도종합시험선로 노선도 및 계측센서 배치는 아래와 같다.

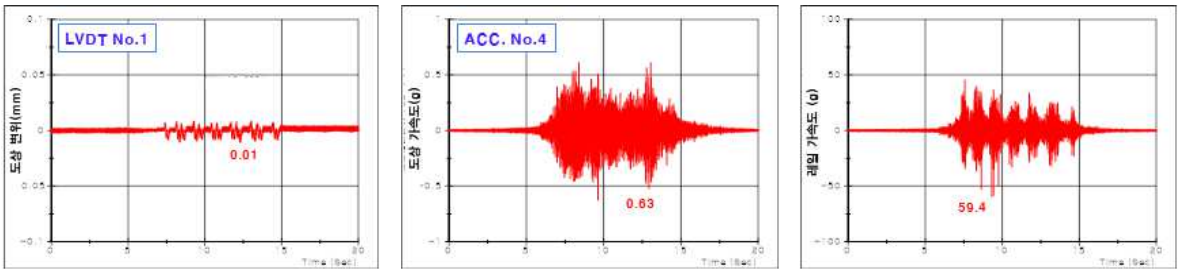


<그림 2.84> 철도종합시험선로 시공구간 노선도



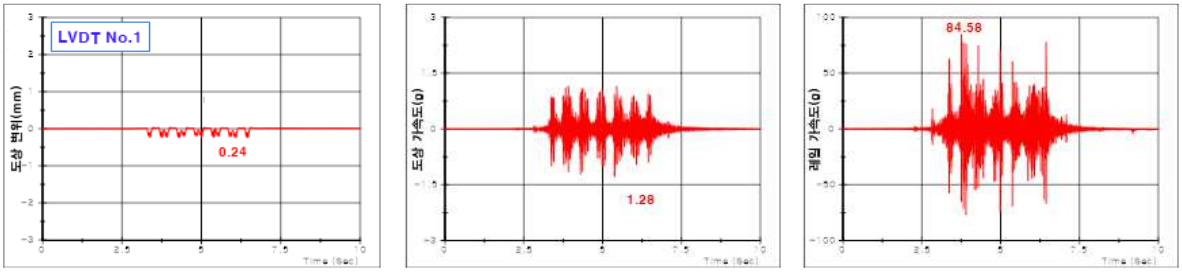
<그림 2.85> 철도종합시험선로 계측센서 배치도

○ 시험 4터널내 급속경화궤도 구간(Point 2)과 토공구간의 콘크리트도상-자갈도상 접속부(Point 4)에서 HEMU의 운행에 따른 도상변위, 도상가속도 및 레일가속도 측정결과는 다음과 같다. HEMU 차량의 운행은 차량이상으로 인하여 하행(시험4터널 → 시험5터널)일 때 최고속도는 63km/h였으며, 상행(시험5터널 → 시험4터널)일 때 최고속도는 165km/h로 상이하였다. 도상변위는 Point 2지점에서 0.01mm, Point 4지점에서 0.24mm로 나타났으며, 도상가속도는 Point 2지점에서 0.63g, Point 4지점에서 1.28g로 나타났고, 레일가속도는 Point 2지점에서 59.4g, Point 4지점에서 84.58g로 나타났다. 상행 운행시 Point 4지점에서 도상가속도가 다소 높게 나타났으나 HEMU 차량 운행으로 인한 안정성을 확보하는 것으로 나타났다.



(a) 도상변위 (b) 도상가속도 (c) 레일가속도

<그림 2.86> Point 2 지점(시험 4터널내 급속경화궤도 시공구간)에서의 계측 결과



(a) 도상변위 (b) 도상가속도 (c) 레일가속도

<그림 2.87> Point 4 지점(토공구간 콘크리트도상-자갈도상 접속부)에서의 계측 결과

타. 급속경화궤도 설계 및 해외시장진출을 위한 전략수립

(1) 서론

○ 해외 궤도개량시장 진출을 위해서는 급속경화궤도의 특장점을 명확히 하고 민·관·연 합동으로 성장동력이 큰 국가를 상대로 적극적인 학술대회, 세미나 등의 유치가 필요한 것으로 판단된다. 또한 설계기준(안)에 있어서, 본 사업은 국제적으로 범용화된 기술이 아니므로 국제표준화 대상사업으로는 부적합하다는 의견이 많았으며 고결화시공을 위한 재료, 시공방법과 장비를 체계적으로 기술하여 영문화하는 작업이 필요하다. 또한 영역별로 카테고리화 하고 전담업체가 분야별로 영업활동을 수행하는 것이 타당하다고 판단된다.

(2) 급속경화궤도 해외시장진출 전략수립

○ 급속경화궤도기술의 해외진출을 위해서는 계획단계에서부터 설계, 시공, 유지관리, 폐기단계까지의 전 과정에 대한 체계적 검토 및 자료와 관련노하우 정립이 필요하다. 해외출장을 통하여 확인할 수 있었던 사항은 동남아, 유럽 등 세계 각국의 철도 및 지하철에 대부분이 자갈도상으로 구성되어 있어 장기 사용으로 노후화시 교체작업이 필요함에 따라 열차운행선상에서 열차운행의 지장을 최소화하면서 콘크리트도상화 하는 급속경화궤도기술에 적용가능성은 충분할 것으로 판단된다.

○ 그러나 수요자 측면에서 가장 중요시하는 사항은 첫째, 경제성측면으로 타공법에 비해

건설비, 유지관리비 등 LCC 측면에서의 검토자료를 요구하고 있고, 둘째, 안전성 측면으로 열차운행의 안전, 구조적 안전성 검증, 시공사례(고속철도, 일반철도, 도시철도) 및 실적, 시공완료 후 계측자료 등에 대한 문의사항, 셋째, 시공성 측면으로 각 나라별 다양한 선로조건(궤간, 레일수, 체결장치, 침목, 분기기, 매설물 등) 및 구조물조건(토공, 터널, 교량, 건널목 등)에 대응할 수 있는 정밀 시공방법에 대하여 자료요구 및 문의사항이 있었고, 넷째, 유지보수 측면으로 시공오차에 대한 보수방안, 균열발생에 대한 대책, 탈선 등 사고발생시 보수방안, 연약지반 등 노반변형에 따른 궤도침하시 대책에 대한 자료요구가 있었음. 따라서 수요자 요구사항에 대하여 객관적이고 논리적이며 기술적으로 대응할 수 있는 충분한 노하우와 관련 자료준비가 필수적이다.

(3) 급속경화궤도 설계기준(안) 작성

○ 설계기준(안)의 작성에는 단계별로 검토가 필요할 것으로 판단된다. 1단계로 급속경화궤도 기술이 국내외에서 범용적으로 적용가능하도록 최소한의 궤도기반시설 규격, 성능평가 기준 등을 제시하는 수준으로 규정하여 우리나라 국가건설기준코드에 대응할 수 있는 기준을 작성하여 향후 국내외에 본 기술 적용시 기준으로 활용하고, 2단계로 선로조건 및 열차운행 조건에 따라 상세설계가 가능하도록 구체적인 설계조건을 제시하여 우선 우리나라 철도에 적용할 수 있도록 철도설계지침 및 편람에 대응하는 수준의 기준을 작성하여 향후 국외 진출시 각국 선로조건에 맞는 기준 작성의 기준으로 활용하며, 3단계로 급속경화궤도 시공시 원활한 공사추진과 시공품질 확보를 위한 시공지침이 필요하므로 궤도설계시 제시하여야 하는 공사시방서를 우리나라 철도건설공사 전문시방서(궤도편)에 대응하는 수준의 기준을 작성하여 국내 적용은 물론 향후 국외 진출 시 기술이전 및 공사관리의 기준으로 활용하여야 할 것으로 생각된다.

○ 기준 작성을 위해서는 본 과제의 단계별로 세밀한 기술적이 검토가 필요하며 연구과제의 전반적인 추진공정과 연계하여 추진하는 것이 바람직하다. 설계기준의 1단계로 국가건설기준에 상응하는 수준의 기본적인 설계기준(안)을 제시하고, 2단계 수준 및 3단계 수준의 설계기준(안)은 연구과제 추진공정과 연계하여 각 세부별 연구기관의 협조 및 지원을 통하여 5차년도 및 6차년도 과업으로 단계별로 추진하였다.

구 분	적용시방	비고
자갈도상	○	
콘크리트도상	○	급속경화

고속철도 자갈궤도 급속경화기술 개발

〈공사시방서(안)〉



2019. 12.

한국철도기술연구원 Korea Railroad Research Institute (주)선구엔지니어링 SunKoo Engineering

구 분	적용시방	비고
자갈도상	○	
콘크리트도상	○	급속경화

고속철도 자갈궤도 급속경화기술 개발

〈자재시방서(안)〉



2019. 12.

한국철도기술연구원 Korea Railroad Research Institute (주)선구엔지니어링 SunKoo Engineering

구 분	적용시방	비고
자갈도상	○	
콘크리트도상	○	급속경화

고속철도 자갈궤도 급속경화기술 개발

〈유지관리지침서〉



2019. 12.

한국철도기술연구원 Korea Railroad Research Institute (주)선구엔지니어링 SunKoo Engineering

3. 관련 분야 기여도 및 활용 계획

(1세부)

가. 관련 분야 기여도

(1) 시공 시뮬레이션

○ BIM에 기반한 3차원 시공 시뮬레이션을 이용하여 신규 개발 장비의 적용과 그에 따른 장비 조합으로 사전에 시공성 및 안전성 검토 가능
○ 야간작업시 사전에 공정간 간섭, 시공효율 등을 평가하여 안전과 효율성을 확보할 수 있음

(2) 궤도리프팅차량

○ 고속철도 또는 고속화노선에서 운행선의 교통지연을 최소화하면서 차단시간 내에 자갈궤도를 효과적으로 보강할 수 있는 자갈궤도 급속경화공법의 개발이 필요함
○ 기존의 급속경화공법은 주로 **인력작업에 의존**하는 방식으로 야간 차단시간 이내에 최대 20~25m의 시공만 가능하다는 단점이 있음
○ 궤도리프팅차량은 기존선로에서 자갈을 제거한 이후 처진 궤광(레일+침목, 체결된 상태)을 들어올려, 하부 도상에 토목섬유 및 거푸집을 설치할 수 있는 작업 공간을 확보하고 궤광을 들어 올린 상태로 침목 하부에 자갈을 포설하는 시공장비로 급속경화공법의 **기계화시공**을 가능하게 함으로써 인력에 의존하는 기존 급속경화공법의 작업한계를 극복할 수 있는 장비임

(3) 자갈궤도 상태평가

○ 여러 가지 자갈궤도 상태평가 기법(LWD, GPR, 이미지분석 등)을 개발함으로써 자갈궤도의 상태를 정량적으로 평가하여 유지보수 기초자료로 사용할 수 있는 방법임.

나. 활용 계획

(1) 국내 기존선 개량계획

○ **경부고속철도 1단계 구간의 대개량시기**(2025~)가 도래함에 따라 장기적인 관점에서 유지보수를 저감할 수 있는 개량기술에 대한 수요가 증가할 것으로 예상됨
○
○ 예타면제사업으로 추진 예정인 경부고속철도 1단계 **평택-오송 구간 복복선화 사업**에서 기존 자갈궤도 개량시 급속경화궤도를 적용하는 것으로 적극 검토중임

○ 광폭침목과 하프프레임침목은 횡저항력이 커서 좌굴안정성이 크고 유지보수를 저감시킬 수 있기 때문에 교량-토공 접속부와 같이 유지보수가 지속적으로 요구되는 취약개소에 적용되면 유지보수비용을 감소시킬 수 있을 것으로 기대됨

(2) 남북철도연결사업

○ 남북 철도연결은 **유라시아 대륙철도 연결**의 첫 단계로 경제, 정치, 사회문화적인 의의가 대단히 크다고 할 수 있음. 남북 철도연결이 성공적으로 진행된다면 장기적으로 유라시아 횡단철도와 연결 및 남, 북, 중, 러, 국제기구의 계획에 힘입어 한반도는 **신흥경제권역**으로 발전할 전망임

○ 북한 철도노선의 70% 이상이 일제시대에 건설되어 궤도의 수명주기를 60년으로 가정시 개보수 이상의 신설계획 또는 새로운 공법 적용이 필요한데 이를 위해 단기적으로 **막대한 예산이 소요**될 것으로 판단됨

○ 향후 남북한 교류확대를 통한 화물 및 여객 열차 이용량은 매년 급속도로 증가할 것이며, 이에 국내 철도 노선뿐 아니라, 북한철도 노선까지 **자갈궤도 유지보수 비용**이 이슈가 될 수 있음

○ 남북한 철도는 철저한 조사, 설계를 바탕으로 신설노선 및 개보수 구간에 저렴한 북한 노동력으로 자갈궤도 초기비용을 절감할 수 있으며, 향후 국내보다 더 큰 유지보수비용 절감을 기대할 수 있는 **자갈궤도 개량공법**을 적용 검토 필요

(3) 해외 고속철도 시장 진출

○ 일본 및 유럽에서는 노후 선로가 많기때문에 선로 유지보수비용 절감을 위해 **자갈궤도 개량사업을 계획**하고 있음. 일본, 영국을 비롯하여 홍콩, 싱가폴, 프랑스 등으로 점차 확대될 것으로 예상됨

○ 오스트리아 등 유럽국가와 일본에서는 **다양한 형태의 침목**이 개발되어 시험적용되고 있으며, 유지보수가 현저히 감소되고 있음이 보고됨

- 독일: 속도대역별 자갈도상궤도 구성품 적용 규정(RIL 820)을 통해 관리. 속도대역에 따라 침목 중량과 저부 면적을 변화시킨 침목을 적용
- 오스트리아: 1990년대 후반 프레임침목을 개발하여 기존선에 시험부설한 결과, 궤도틀림이 거의 발생하지 않아 기존 침목에 비해 LCC가 우수한 것으로 나타났음. 1~3세대 풀프레임 침목을 거쳐 2009년 하프프레임 침목까지 개발을 완료하여 상용화. 2009년부터 현재까지 MTT를 통한 자갈다짐을 하지않고 안정적인 궤도상태를 유지하는 것으로 나타났음
- 일본: RTRI에서 1999년 기존선 자갈궤도 개량용으로 양쪽 레일 저부에 길이방향으로 6.25m의 PSC 지지체를 거치하고 두꺼운 강관으로 두 지지체를 연결하여 궤간을 유지하는 사다리형 침목을 이용한 궤도 시스템 개발

○ 향후 국외 시장 진출을 위해 **시공속도 및 시공성** 등의 측면에서 국외 기술과 차별화된 기술 개발 필요

(2세부)

가. 연구 개발 성과의 활용 방안

○ 일반철도 및 고속철도 구간의 침목을 광폭침목(또는 HFS)으로 상용화 추진
○ 고속선, 고속화철도, 국철 등 자갈궤도 운행선의 개량사업 참여로 침목사업 확대
- 궤도틀림 저감을 통한 유지보수비 절감
○ 운행선로 곡선(R6000이하) 궤도 적용 추진(약 1,100km, 180만정)
- 건설선에 적용도 병행(HFS, I/B 구조개발 등을 통해 곡선부, 분기기 전후단, 신축구간, 접속부 등 취약구간 적용 (안정성 향상에 기여))
○ 기존선 자갈궤도 구조 개량사업 적용
○ 침목교환용 전용 장비를 통한 기계화 시공에 활용
○ 기존 철도 보강에 따른 속도 향상에 기여

나. 기대효과

(1) 기술적 측면

○고속 운행선에서 교통 지연 없이 자갈궤도를 개량하는 기술을 확보함으로써 국내 궤도 분야 기술 경쟁력 향상에 기여
○기계화에 기반한 시공기술을 확보하고, 궤도 설계분야의 우수한 전문인력을 양성함으로써 궤도 시공 및 설계분야의 기술 수준을 한 단계 향상

(2) 경제적·산업적 측면

○기술개발이 성공적으로 이루어질 경우 고속선과 기존선 개량에 적용함으로써 자갈궤도 유지보수비 절감에 기여

(3) 사회적 측면

○고속선 및 기존선 속도 향상을 통해 전국 주요 거점 90분대 달성 기여(※ “경부 및 호남고속철도 속도 향상방안 연구(교통연구원, 2011)” 에 따르면 경부고속철도의 속도를 320~350km/h로 향상시킬 경우 궤도 수명주기비용의 절감 외에도 속도 향상을 통해 2조 4천억~3조 1천억의 직・간접 편익 발생 예상)

(3세부)

가. 활용 계획

(1) 연구개발의 활용방안

구 분	활 용 방 안
연구성과 원내 활용 계획	○ 연구개발 내용 및 성과 소개를 통한 타연구 연계 - 성과품 : 급속경화궤도용 침목, 충전재 - 개발장비 : 궤도리프팅머신, 건식세척자갈장비, 충전재주입장비 - 공사시방서, 자재시방서, 유지관리지침서 등 작성
연구성과 홍보 계획	○ 연구과제의 목표는 고속철도의 궤도개량을 목표로 하고 있으나, 현재 지하철 및 기존선의 개량공법으로 적용중이기 때문에 적용성 확대를 위해 수요처의 개선사항인 안정성 향상 및 시공연장 확대를 홍보하여 수요처의 요구 만족
실용화 등 기술마케팅 실적 또는 계획	○ 수요처인 철도운영기관들에 선로개량, 속도향상, 단면확대 등에 대한 기술적 대안으로 제시 ○ 현재 궤도개량에 대한 국제설계기준이 마련되어 있지 않으므로 선제적 대응을 통하여 개발기술의 활용도 및 파급력 극대화
표준화 계획	○ 자갈궤도 급속경화궤도개량 표준화(안) 수립 ○ 급속경화궤도 공사시방서, 자재시방서 및 유지관리지침서 작성

(2) 기대효과

○ 기존에 없던 새로운 공법을 통해 차단시간 이내에 자갈궤도를 효과적으로 개량할 수 있는 자갈궤도 급속경화공법 개발

○ 자갈궤도 급속경화공법을 통한 자갈궤도 개량을 통해 기존선 노후 터널구간, 취약구간 등에 우선적으로 적용함으로써 지속적으로 투입되는 자갈 개량비용 절감

○ 차단시간 이내에 자갈궤도를 효과적으로 개량할 수 있는 자갈궤도 급속경화공법을 이용하여 기존 운행선의 교통지연 최소화를 통한 이용 승객의 불편 최소화

○ 국외 시장진출을 위한 궤도개량 표준화(안) 수립

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 철도기술연구사업의 연구보고서입니다.

2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 철도기술연구사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.

3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.