

보안 과제(), 일반 과제(○) / 공개(○), 비공개() 발간등록번호(11-B552989-000352-01)
국토교통기술촉진연구사업 제2차 연도 최종보고서

R&D / 20CTAP-C152026-02

철도교량의 실주행열차에 의한 현장재하시험 및 공용 내하력 평가기법에 대한 도로교와의 분리적용 최종보고서

2020. 12. 31.

주관연구기관 : 부천대학교 산학협력단

공동연구기관 : 서울과학기술대학교 산학협력단
(주)지오코리아이앤지

위탁연구기관 : (주)공항철도, (주)삼림엔지니어링

국토교통부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통과학기술진흥원장 귀하

‘철도교량의 실주행열차에 의한 현장재하시험 및 공용 내하력 평가기법에 대한 도로교와의 분리적용’(연구개발 기간 : 2019. 04.15 ~ 2020.12.31) 과제의 최종보고서를 제출합니다.

2020. 12. 31.

주관연구기관명 :	부천대학교 산학협력단	(대표자) 김 병 곤 (인)
공동연구기관명 :	서울과학기술대학교 산학협력단	(대표자) 권 용 재 (인)
참여기관명 :	(주)지오코리아이엔지	(대표자) 이 강 중 (인)
	(주)공향철도	(대표자) 김 한 영 (인)
	(주)삼림엔지니어링	(대표자) 김 인 석 (인)

주관연구기관책임자:	부천대학교 산학협력단	최 준 혁
공동연구기관책임자:	서울과학기술대학교 산학협력단	박 용 걸
참여기관책임자:	(주)지오코리아이엔지	이 강 중
	(주)공향철도	송 봉 환
	(주)삼림엔지니어링	이 승 수

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	20CTAP-C152026-02	해당 단계 연구 기간	2020.01.01. ~2020.12.31	단계구분	2/2
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진사업			
	세부사업명				
연구과제명	대과제명	철도교량의 실주행열차에 의한 현장재하시험 및 공용내하력 평가기법에 대한 도로교와의 분리적용			
	세부과제명				
연구책임자	최준혁	해당단계 참여연구원 수	총: 20명 내부: 20명 외부: 명	해당단계 연구비	정부:191,000천원 민간: 69,000천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계:260,000천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 20명 내부: 20명 외부: 명	총 연구비	정부:345,000천원 민간: 124,000천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계:469,000천원
연구기관명 및 소속 부서명	(주관)부천대학교 산학협력단 (공동)서울과학기술대학교 산학협력단			참여기업명 : (주)지오코리아이엔지	
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위탁연구	(주)공항철도 (주)삼립엔지니어링			송봉환 이승수	

※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음

연구개발성과의 보안등급 및 사유	
----------------------	--

9대 성과 등록·기탁번호

구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설 · 장비	기술요약 정보	소프트 웨어	화합물	생명자원		신품종	
								생명 정보	생물 자원	정보	실물
등록·기 탁 번호	5	-	2	-	-	-	-	-	-	-	-

국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

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

·철도교량의 안전성 평가를 위한 정·동적 현장재하시험 및 내하력 평가의 개선을 위하여 상시열차주행시험에 의한 현장시험 및 평가방법에 대한 절차와 기준을 제시함
·열차하중의 크기 측정을 위한 윤중시험, 현장재하시험 및 계측, 구조해석 모델, 안전성 평가항목에 대한 기존의 도로교 평가 기준과 분리된 철도교량의 내하력 평가기준을 제시함

보고서 면수
113page

요 약 문

연구의 목적 및 내용	[연구의 목적] 현행 도로교 기반의 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침에 대해 철도교의 상시주행열차를 활용한 현장재하시험 계측 및 분석과 궤도구조를 포함한 구조해석으로 부터 철도교의 공용내하력 산정방법을 도출하고, 철도교의 구조안전진단 평가기준을 도로교의 평가기준과의 구분하여 적용하는 방안을 제시함 [주요 연구내용] ○ 철도교량의 상시주행열차에 의한 현장재하시험/측정응답 분석방법 제시 - 철도교량의 상시주행열차에 의한 궤도 및 교량구조물의 응답 데이터 획득을 위한 현장재하시험 및 측정응답 분석 - 열차 운중측정시험에 의한 열차하중의 추정, 정적 및 동적하중에 의한 구조물의 동적증폭 효과 분석과 교량 조건에 따른 영향 정도의 비교, 분석 - 현장재하시험의 계측과정 및 계측항목의 적절성, 측정결과의 분석방법 제시 - 현장재하시험 및 내하력 평가과정에서의 분석방법, 구조안전성 평가 방법 등 철도교의 안전성 평가 절차 제시 ○ 궤도구조, 열차하중, 궤도 및 교량 상호작용 등을 고려한 철도교의 구조해석모델 제시 - 궤도구조의 작용력과 주행열차의 하중특성을 고려한 작용하중 산정방법과 구조해석 및 현장측정결과 분석을 통한 구조해석 모델 제시 ○ 시험주행열차 및 상시주행열차에 의한 현장재하시험 결과분석 - 시험주행열차에 의한 정,동적 현장재하시험 및 계측 - 상시주행열차에 의한 측정응답 분석과 철도교량의 공용내하력 산정방법 제시 ○ 실주행열차에 의한 철도교의 구조안전진단 평가기준 적용 방안 제시				
연구개발성과	○ 철도교량의 상시주행열차에 의한 현장재하시험 및 측정응답 분석방법과 궤도구조를 포함한 철도교의 구조해석과 공용내하력 산정방법을 통하여 철도교의 구조안전진단 평가기준을 제시하고, 도로교의 현장재하시험 및 안전성 평가기준과 분리적용하는 내용이 포함된 현행 ‘안전점검 및 정밀안전진단 세부지침’의 개선안을 제시함 ○ 연구개발성과 - 인력양성 : 석사 2명, 박사 1명 - 논문 : SCI논문 3편, 국내 등재학회지 논문 4편, 국내학회 학술발표회 2편 - 보고서 : 보고서 2편(철도교량 구조안전진단 평가기준 표준(안), 철도교량 현장재하시험 및 내하력 평가 절차서(안))				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	○ 시험주행열차에 의한 현장재하시험의 수행이 어려운 철도교의 측정방법의 개선을 통하여 현장재하시험의 안전 및 편의성과 공용내하력 산정, 구조안전진단 평가의 신뢰도를 높이고, 안전진단비용의 대폭 절감을 도모함. ○ 현 철도교의 현장측정 결과의 분석과 공용내하력 산정의 문제점을 해소하고, 도로교의 평가 기준과 구분 적용하는 합리적 방안을 제안함으로써, 철도교량의 현장재하시험의 측정응답을 보다 안전하게 획득하고, 철도교의 특성을 고려한 현장재하시험 및 안전성 평가기준의 근거를 마련함				
국문핵심어 (5개 이내)	철도교	안전진단	내하력	동적하중	유지관리
영문핵심어 (5개 이내)	railway bridge	safety diagnostic	load-carrying capacity	moving load	maintenance

※ 국문으로 작성(영문 핵심어 제외)

〈 목 차 〉

1. 연구개발과제의 개요	5
1.1 연구의 필요성	5
1.2 연구 개발의 목표	7
2. 연구수행내용 및 성과	10
2.1 연구개발 추진전략·방법	10
2.2 연구개발 추진체계	12
2.3 추진일정	13
2.4 연구결과	14
2.4.1 연도별 주요 연구내용	14
2.4.2 구조안전성 평가기준 분석	15
2.4.3 현장재하시험 및 안전성 평가 이력 분석	27
2.4.4 계측 및 측정결과 분석 방법	34
2.4.5 궤도구조 및 실주행열차의 크기를 고려한 철도교의 구조해석 모델	47
2.4.6 상시주행열차에 의한 현장재하시험 및 결과분석	60
2.4.7 철도교량 구조안전진단 평가기준 표준(안)	95
2.5 연구개발 성과	103
2.5.1 국내·외 논문 게재	103
2.5.2 학위논문	104
2.5.3 표준(안) 및 보고서 원문	104
3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	105
3.1 목표	105
3.2 목표 달성여부	106
4. 연구개발성과의 활용 계획 등	108
4.1 연구개발성과의 기대효과	108
4.2 연구개발성과의 활용	108
4.3 연구의 한계 및 추가 연구의 필요성	109
붙임. 참고문헌	111

1. 연구개발과제의 개요

1.1 연구의 필요성

가. 관련법령 상 안전점검 등에 관한 사항

교량의 안전성 평가는 건설기술관리법 시행령 제95조, 시행규칙 제52조에 의한 시설물의 안전점검 등에 관한 관련 법령에 의해 관리, 평가되도록 하고 있음

시설물의 안전 및 유지관리에 관한 특별법 시행령 (2021.1.5.) [별표 7]	시설물의 안전 및 유지관리에 관한 특별법 시행규칙(2020.12.11.) 제18조
[안전점검등 결과보고서에 포함되어야 할 사항] · 시설물의 개요 및 이력사항, 진단의 범위 및 과업 내용 등 정밀안전진단의 개요 · 설계도면, 구조계산서 및 보수·보강 이력 등 자료 수립 및 분석 · 외관조사 결과분석, 재료시험 및 측정 결과분석 등 현장조사 및 시험 · 콘크리트 또는 강재 등 시설물의 상태평가 · 시설물의 구조해석 등 안전성 평가 · 시설물의 종합평가 · 보수·보강 방법 · 종합결론 및 건의사항 · 그 밖에 정밀안전진단에 관한 것으로서 국토교통부장관이 정하는 사항	[제18조 안전점검 등에 관한 지침] · 육안검사에 의한 결함의 종류, 보고방법 및 평가방법 등에 관한 사항 · 결함부위의 확정방법에 관한 사항 · 시설물의 결함원인 분석에 관한 사항 · 시설물의 상태에 관한 평가기준 및 평가방법에 관한 사항 · 시설물 하중내하력(荷重耐荷力)의 평가방법에 관한 사항 · 시설물 관리대장의 작성에 관한 사항

나. 철도교 현장재하시험의 문제점

「시설물의 안전점검 및 정밀안전진단 실시 등에 관한 지침」(2016) (이하 ‘지침’으로 함)에서의 교량 현장재하시험은 재하시험열차와 상시운행열차에 의한 정적 및 동적응답을 계측하여 분석, 평가를 하도록 되어 있으나 재하시험의 경우 열차 운행이 중단되는 새벽 약 2시간 동안의 열차 차단 시간내에 재하시험을 수행하여야 하므로 재하시험시의 안전사고 우려, 시간 제약, 인력작업 등 열악한 환경하에서 재하시험이 수행되고 있음

구분	재하시험열차	상시운행열차 (고속철도 예)
현장재하 시험 및 분석(예)	· 재하시험열차의 정, 동적응답 계측 · 열차운행 종료 후 실시 (AM 02:00~04:00) · 실측 정적응답 계측/ 분석 시험열차를 저속(10km/h)의 속도로 주행하여 계측한 동적응답곡선을 Low Pass Filter에 의해 동적효과를 제거하여 정적효과를 구함	· 상시운행열차의 동적응답 계측 - 170km/h (시험운행열차) - 250~300km/h (상시운행열차) · 실측 정적응답 계측/ 분석 상시운행열차의 동적응답곡선을 Low Pass Filter에 의해 동적효과를 제거하여 정적효과를 구함

구조안전진단의 평가내용은 도로교와 철도교 모두 공용내하력에 의한 구조 안전성을 평가하도록 되어 있으나, 철도교는 도로교와 달리 주행안전성과 승차감 등에 대한 검토 및 평가가 수행되도록 설계기준에 제시되어 있어 「안전점검 및 정밀안전진단 세부지침」(2017)(이하 ‘세부지침’이라 함)에 의한 도로교의 구조안전성 평가 기준으로는 철도교의 구조 안전성 확보를 위한 평가기준으로 활용하기에 한계가 있음

또한, 철도교의 공용내하력을 산정하기 위한 현장재하시험은 철도 운행 특성상 새벽 2~3시간 내로 제한되어 평가항목에 대한 시험 수행이 어렵고(차량기지 위치, 회차, 시험비용 과다 등), 시험일정에 대한 사전 승인, 일정 변경 또는 조정이 곤란할 뿐만 아니라, 시험당일 기후 악조건(우천, 폭한, 폭서 등) 시에는 계측데이터에 예상치 않은 측정 오차가 포함될 수 있으며, 시험 중 계측시스템 및 안전문제 발생 시 적절한 대처가 어려운 실정에 놓여 있어 철도교의 특성을 고려한 현재보다 개선된 평가 기준이 마련되어야 함

기준/조건	평가 내용	검토 목적
진단조건 (도로교/ 철도교)	• 공용내하력 산정 - 정적응답비 (정적 변위 및 변형율 활용) - 동적응답비 산정 (동적 충격계수 활용) • 측정 고유진동수를 이용한 해석모델 검토 • 활하중 횡분배 효과 분석 • 중립축위치 분석으로 보-슬래브 합성작용확인	공용내하력에 의한 구조안전성평가
설계조건 (철도교)	• 주행안전(정)성 및 승차감검토 - 공진가능성 평가 - 상판 연직가속도 제한조건 검토 - 교량 연직처짐 검토 - 교량상판 단부회전각, 종방향변위 검토	주행안전성을 위한 한계조건평가

따라서, 철도교의 구조 안전성 평가의 개선을 위해서는 세부지침에 제시된 도로교 기반의 설계하중 의한 시험주행열차를 이용한 표준현장재하시험 방법을 기본으로 하되 철도교의 상시운행열차 주행 시 궤도구조에 발생하는 정, 동적운중을 측정하여 철도교의 구조해석결과 및 현장측정응답으로부터 공용내하력과 구조안전성에 대한 평가 방법을 개발함으로써 철도교의 특성에 적합한 구조물 안전 평가와 철도교의 평가 결과에 대한 신뢰성을 제공할 수 있음

1.2 연구 개발의 목표

가. 연구 개발의 최종 목표

구분	내용
최종 목표	○ 현행 시설물안전특별법 상, 도로교 기반의 구조물(정밀)안전진단/ 점검에 대해, 철도교의 상시주행열차를 활용한 현장재하시험/분석과 궤도구조를 포함한 구조해석으로 부터 철도교 공용내하력 산정방법을 도출하고, 실주행열차의 하중 크기를 고려한 철도교의 구조안전진단 평가기준의 도로교의 평가기준과의 구분 적용방안을 제시
세부 목표	○ 철도교량의 상시주행열차에 의한 현장재하시험/ 측정응답 분석방법 제시 ○ 궤도구조 및 실주행열차의 하중 전달고려방법을 고려한 철도교의 구조해석모델 개발 ○ 시험주행열차 및 상시주행열차에 의한 현장재하시험 및 결과분석 ○ 실주행열차의 하중 크기를 고려한 철도교의 구조안전진단 평가기준의 구분 적용방안 제시

나. 연구 개발 목표의 내용

① 개발 목표

- 주관연구기관(부천대학교): 실주행열차 하중을 고려한 철도교의 구조안전진단 평가기준의 구분 적용방안 제시
- 공동연구기관(서울과학기술대학교): 궤도구조 및 실주행열차 하중의 크기를 고려한 철도교의 구조해석모델 개발
- 참여기관((주)지오코리아이엔지): 시험주행열차 및 상시주행열차에 의한 현장재하시험 및 결과분석
- 위탁연구기관((주)공항철도): 현장재하시험 테스트베드(Test bed) 활용
- 위탁연구기관(삼립엔지니어링): 철도교 현장재하시험 계측 및 측정결과 분석

② 개발 내용 및 범위

- 주관연구기관(부천대학교): 철도교의 구조안전진단 평가기준의 구분 적용방안 제시
 - 도로교의 공용내하력 산정방법과 구조안전진단 평가기준과의 구분 및 현행 관련 지침 및 기준상의 분리 적용 방안 도출
 - 시험주행열차 및 상시주행열차에 대한 철도교의 구조안전성 평가 기준 설정 및 세부 절차 마련
 - 철도교와 도로교의 구조안전진단 평가기준의 세부사항 및 평가절차 정립
 - 궤도구조의 성능평가 및 항목 분석, 철도교 구조안전성 평가 내용의 상호영향 분석 및 평가기준의 개선안 마련
 - 실주행열차 하중의 크기를 고려한 철도교와 도로교의 공용내하력 산정방법과 구조안전진단 평가기준 구분 적용방안 제시
 - 상시주행열차의 특성을 고려한 철도교 구조 안전진단 평가기준 표준(안) 개발제시

- 공동연구기관(서울과학기술대학교):궤도구조 및 실주행열차 하중의 크기를고려한 철도교의 구조해석모델 개발
 - 궤도구조 및 구조물과의 관계를 고려한 철도교의 구조해석모델 개발
 - 궤도구조 및 성능평가, 실주행열차 하중의 크기 관련 매개변수에 의한 해석결과의 차이 및 영향 분석
 - 열차 주행특성을 고려한 철도교량 구조해석
 - 기존 철도교 측정 사례 분석을 통한 궤도성능 평가 항목의 영향 분석 및 해석 결과 분석
 - 철도교의 현장재하 시험결과를 고려한 최적 구조해석모델 개발
 - 현장측정결과의 분석 및 해석모델의 검증, 현장계측결과의 정합성 분석
 - 콘크리트교와 강교의 형식 중 대표 교량을 선정하여 현장 재하시험에 의한 측정결과와 구조해석 모델에 의한 해석결과와의 비교 분석 실시하고 기존 해석모델의 개선방안 제시
 - 궤도구조(레일, 침목 등)에 작용하는 실제 열차하중을 파악하기 위하여 궤도구조를 대상으로 하중시험과 실응력을 측정하고 하중데이터를 파악함
 - 궤도구조에 작용하는 하중을 구조물의 작용하중을 단계별로 재하하여 전체 구조계에 대한 구조해석모델에 의한 해석결과와 단계별 하중 적용 해석에 대한 결과를 비교하여 궤도구조 및 열차주행특성을 고려한 해석결과의 적용방안을 분석함
 - 구조물의 형식, 궤도구조의 형식, 노후화 정도에 따라 달라지는 구조물의 거동을 영향을 평가하기 위하여 측정 대상 구조물 형식을 2가지 이상으로 하고 구조해석시 매개변수 조정을 통한 구조물의 상태를 반영하여 구조물의 상태가 건전한 경우와 노후화가 된 경우에 대한 비교 분석, 그리고 현장 측정결과와의 비교를 수행함으로써 구조물의 여러 가지 상태에 대한 건전성 평가 결과의 신뢰도를 높일 수 있도록 함
- 공동연구기관((주)지오코리아이엔지) : 시험주행열차 및 상시주행열차에 의한 현장재하시험 및 결과분석
 - 윤중측정시험을 통한 열차 재하 하중 기준설정 시험
 - 시험주행열차에 의한 정동적 현장재하시험 및 구조물 계측실험
 - 상시주행열차에 의한 현장재하시험 측정응답 분석 방법 문제점 및 개선점 도출
 - 상시주행열차의 정,동적 현장측정응답을 이용한 응답비 및 공용내하력 산정방법 도출
 - 공용내하력 산정방법에 따른 평가결과의 분석과 현행 평가 방식의 한계 및 문제점 분석
 - 궤도구조를 포함한 구조 해석과 상시주행열차에 의한 구조물 응답을 이용한 철도교량의 공용내하력 산정방법 제시
 - 철도교의 시험주행열차 및 상시주행열차의 현장측정응답과 궤도구조를 포함한 구조해석결과에 의한 공용내하력 산정방법의 비교, 검토
 - 주관기관과 협업을 통한 현장재하시험 및 내하력 평가결과 분석, 평가기준,평가절차 마련
 - 상시주행열차에 의한 현장시험 및 측정방법

- 시험 주행 열차에 의한 궤도의 작용하중 기준값을 설정하고 레일 및 침목에 궤도성능 검증시 사용하는 방법으로 부착한 센서로부터 상시 열차하중 이력을 모니터링함. 그 결과로부터 상시 열차하중의 크기와 이력 특성을 파악하고 이를 다시 구조해석결과의 하중으로 활용하여 구조해석결과와 비교 분석함
 - 기존의 교량구조물에 부착한 센서에 의해 교량의 응답은 분석하는 방법과 궤도에 작용하는 하중의 직접적 측정결과를 다시 구조물의 하중으로 작용시킨 경우와의 비교 분석을 통하여 측정방법의 적정성을 분석함
 - 시험계측에 의한 계측센서의 민감도 시험 분석 연구
 - 현장재하시험에서 계측 결과에 영향을 미치는 인자로 센서의 부착각도, 온도영향 보정 방법, 케이블 길이의 영향, 정전압기 사용여부에 대한 계측결과 비교(변형률게이지, 변위게이지 등)
 - 동일 위치에서 측정 방법을 달리 한 경우의 계측값 차이 분석
 - 현장재하시험에서의 계측 방법에 대한 가이드라인 제시
- － 위탁연구기관((주)공향철도): 현장재하시험 테스트베드(Test bed) 활용
- 현장재하시험을 위한 테스트베드 제공 및 활용
 - 시험열차 및 선로선형, 노반조건 등 평가결과의 영향 변수 분석 및 관련 데이터 제공
 - 실주행 열차재하시험시 테스트베드는 (주)공향철도 관리 구간의 교량을 우선 대상으로 추진하되 현장재하시험시에는 한국철도공사 또는 한국철도시설공단 관할 구간의 교량 구조물을 대상으로 현장재하시험을 측정하는 방안을 협의하도록 함
- － 위탁연구기관((주)삼림엔지니어링): 현장재하시험 및 데이터 분석, 내하력 평가 수행
- 현장재하시험에 따른 계측기 설치 및 데이터 측정
 - 측정한 Data를 통한 안정성, 사용성 항목 평가
 - 측정 Data 분석 및 결과분석

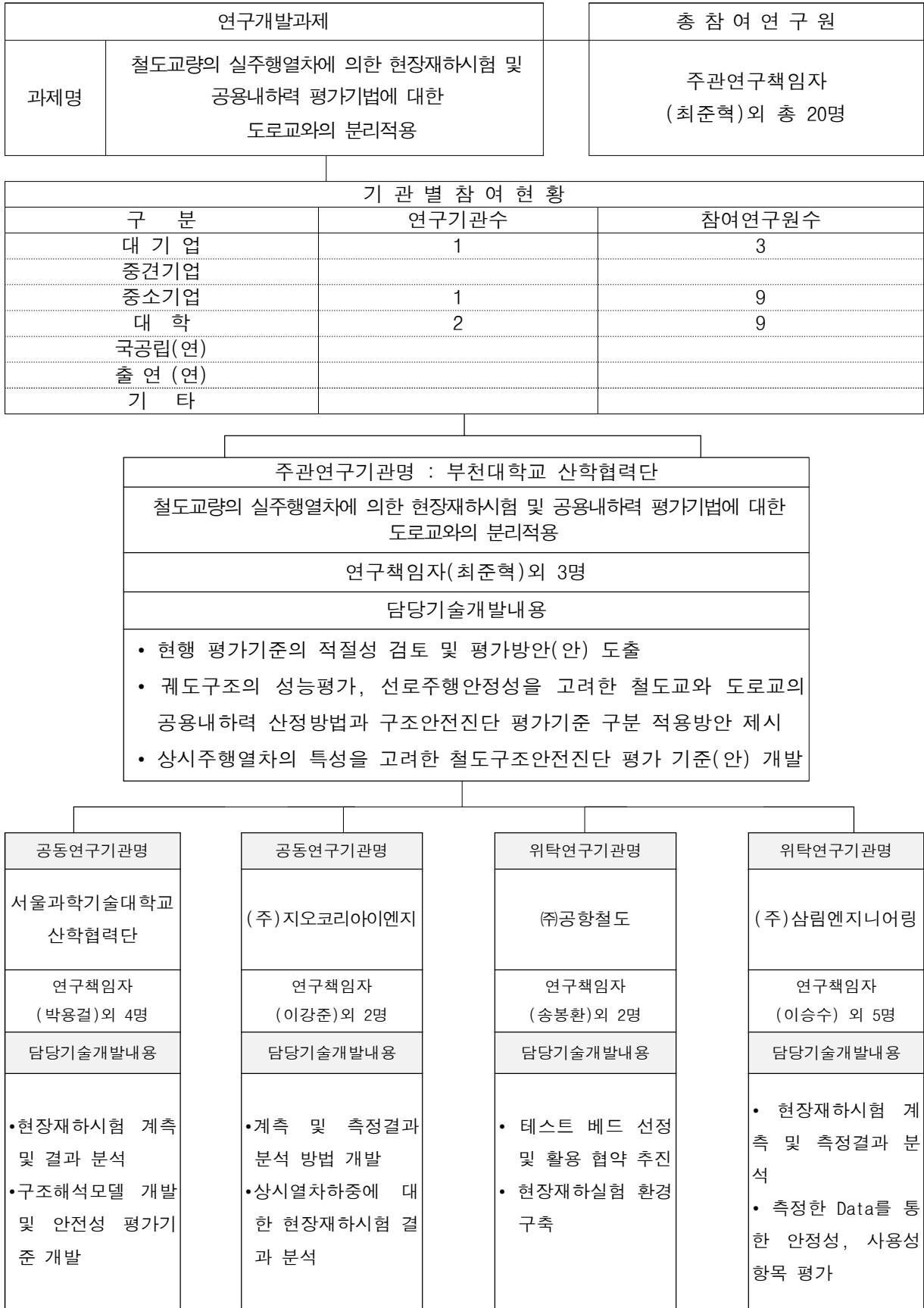
2. 연구수행내용 및 성과

2.1 연구개발 추진전략 · 방법

구분	추진전략 및 방법	비고
구조안전성 평가기준 분석 	• 관련 문헌 및 기준 조사, 분석 • 도로교 및 철도교 관련 평가기준에 대한 세부 검토 • 현행 평가기준의 적절성 검토 및 평가방안(안) 도출 → 추진 목표 달성과 향후 연구 성과의 활용을 고려하여 구조물 안전성 평가기준, 설계기준 외 시설물 유지보수관련 기준 분석도 포함하여 현장 적용성 및 향후 유지관리의 합리성 제고를 위한 방안을 고려함	
현장재하시험 및 안전성 평가 이력 분석 	• 기존의 도로교 및 철도교 안전도 평가 자료를 통한 평가 방업 및 평가 절차, 현장재하시험 방법의 분석 → 공동연구기관은 다수의 철도관련 R&D 및 안전진단 관련 프로젝트 수행 경력을 보유하고 있으며 관련 자료 및 실측 데이터를 보유하고 있어 연구수행의 원활한 추진이 가능함	
현장재하시험 계측 및 측정결과 분석 방법 개발 	• 현장재하시험 과정의 계측센서의 선정, 계측 항목 및 센서 종류별 계측준비, 계측결과에의 영향 변수, 계측결과에의 데이터 검출 방법, 측정결과에의 분석 방법 등 전반의 과정에 걸친 계측 방안 제시 → 참여기업은 각종 구조물의 현장계측, 해석 및 평가 등을 수행하고 있는 국내 중소기업으로써, 많은 연구실적과 계측실적을 가지고 있으며, 센서 및 IoT, 통신, 데이터 분석 기술을 보유하고 있어 원활한 업무진행이 가능함 → 또한, 계측 및 측정결과에의 분석은 2차년도에 현장재하시험과 구조물 안전성 평가결과에 직접적 영향을 미치므로 주관연구기관과 공동연구기관과의 협업을 통하여 연구 내용을 공유하고 공동 분석을 추진할 계획임	
현장 테스트 베드 구축 	• 현장재하시험 테스트 베드 조사 및 관련기관 협의, 현장재하시험 환경 구축 → 참여기업은 철도시설을 운영 및 관리하는 철도운영기관으로써 연구개발을 위한 현장적용성 평가, 시험개소선정 등에 Know-how를 가지고 있어 원활한 업무진행이 가능하며, 향후 연구성과에 대한 활용이 가능한 수요처임.	

구분	추진전략 및 방법	비고
철도교의 구조해석모델 개발 	• 궤도구조 및 선로주행안정성을 고려한 철도교의 구조해석모델 개발 및 매개변수 연구 → 현장측정결과의 분석 및 해석모델의 검증, 현장계측결과의 비교 분석 → 현장재하시험 결과를 고려한 구조해석 모델 개발 및 기존 구조해석모델 개선방안 제시	
현장재하시험 및 결과분석 	• 시험주행열차에 의한 정동적 현장재하시험 및 구조물 계측실험 (현장 테스트 베드 활용) • 상시주행열차에 의한 현장재하시험 측정응답 분석 방법 문제점 및 개선점 도출(공항철도 구간 외 한국철도공사 관할 교량에 대해서도 추진토록 협의) → 공동연구기관과의 연구내용과 상호 정합성이 있어야 하므로 철도교의 시험주행열차 및 상시주행열차의 현장측정응답과 궤도구조를 포함한 구조해석결과에 의한 분석결과에 대한 비교 분석을 실시함 → 또한, 연구설과물로 계측준비에서 분석에 이르기까지 이련의 과정에 대한 지침을 마련할 필요가 있으며 이를 위해 주관기관과의 협업을 통하여 추진함	
구조안전진단 평가기준의 개발 (최종연구목표)	• 궤도구조의 성능평가, 실주행열차의 하중크기를 고려한 철도교와 도로교의 공용내하력 산정방법과 구조안전진단 평가기준 구분 적용방안 제시 • 상시주행열차의 특성을 고려한 철도구조안전진단 평가 기준(안) 제시 → 연구성과의 목표 달성을 위하여 공동연구기관의 구조해석 연구와 참여기업의 현장계측결과의 연구 성과를 기반으로 철도교의 구조안전성 평가기준을 개발함	
상시 자문위원회	• 본 연구의 원활한 진행 및 사업화를 위해 관련 전문연구기관(한국철도기술연구원), 한국철도시설공단, 철도운영기관(한국철도공사), 한국철도학회의 철도교량전문가가 포함된 전문가자문위원단을 구성하여 상시자문을 받으며 운영할 계획임.	

2.2 연구개발 추진체계



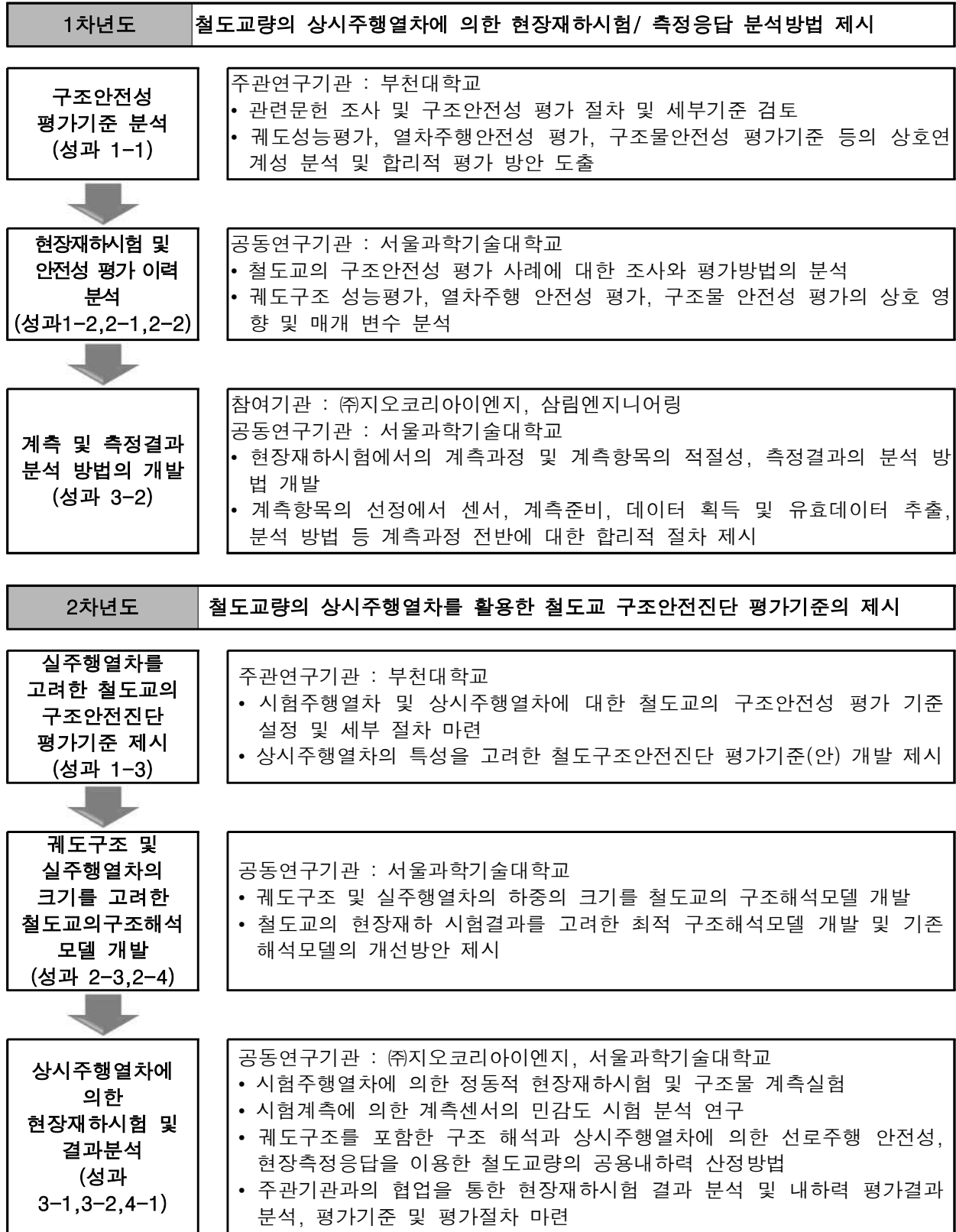
2.3 추진일정

1차년도														비고
일련 번호	연구내용	추진 일정												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1	계획수립 및 자료조사													
2	평가기준 분석													
3	철도교 평가 이력 조사													
4	매개변수 영향 검토													
5	궤도성능평가 분석													
6	열차주행안전성평 가 분석													
7	기존 측정결과 분석													
8	구조안전성 평가 방안 마련													
9	테스트베드 구축													

2차년도														비고
일련 번호	연구내용	추진 일정												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1	실내실험, 분석 (궤도윤충실험)													
2	구조해석 모델링 및 분석													
3	현장측정데이터 분석													
4	현장재하시험 (기관협의)													
5	궤도 현장측정시험 (기관협의)													
6	구조해석 및 현장재하시험 결과 분석													
7	동적응답처리 기법 개발													
8	구조안전성 평가 방안 마련													
9	내하력 평가 기법 마련													
10	철도교 안전성 평가 지침 작성													

2.4 연구결과

2.4.1 연도별 주요 연구내용



2.4.2 구조안전성 평가기준 분석(연구성과 1-1)

(1) 시설물의 안전 및 유지관리에 관한 특별법 (2019. 2. 15.)

표 2.4.1 시설물의 종류

구분	시설물의 종류
제1종 시설물	·고속철도 교량, 연장 500미터 이상의 도로 및 철도 교량 ·고속철도 및 도시철도 터널, 연장 1000미터 이상의 도로 및 철도 터널
제2종 시설물	·연장 100미터 이상의 도로 및 철도 교량 ·고속국도, 일반국도, 특별시도 및 광역시도 도로터널 및 특별시 또는 광역시에 있는 철도터널
제3종 시설물	·제1종시설물 및 제2종시설물 외에 안전관리가 필요한 소규모 시설물

표 2.4.2 시설물의 종류별 적용범위

구분	도로교	철도교
제1종 시설물	·상부구조형식이 현수교·사장교·아치교·트러스교인 교량 ·최대 경간장 50m 이상의 교량(한 경간 교량 제외) ·연장 500m 이상의 교량 ·폭 12m 이상이고 연장 500m 이상인 복개구조물	·고속철도 교량 ·도시철도의 교량 및 고가교 ·상부구조형식이 트러스교 및 아치교인 교량 ·연장 500m 이상의 교량
제2종 시설물	·경간장 50m 이상인 한 경간 교량 ·제1종시설물에 해당하지 않는 교량으로서 연장 100m 이상의 교량 ·제1종시설물에 해당하지 않는 복개구조물로서 폭 6m 이상이고 연장 100m 이상인 복개구조물	·제1종 시설물에 해당하지 않는 교량으로서 연장 100m 이상의 교량
제3종 시설물	·「도로법」상 도로교량 연장 20m 이상 ~ 100m 미만 교량 ·「농어촌도로정비법」상 도로교량 연장 20m 이상 교량 ·비법정도로 상 도로교량 연장 20m 이상 교량	·연장 100m 미만 철도교량

표 2.4.3 시설물의 유지관리 및 성능평가

구분	주요내용
시설물의 유지관리	·완공된 시설물의 기능을 보전하고 시설물이용자의 편의와 안전을 높이기 위하여 시설물을 일상적으로 점검·정비하고 손상된 부분을 원상복구하며 경과시간에 따라 요구되는 시설물의 개량·보수·보강에 필요한 활동을 하는 것 ·안전점검 및 정밀안전진단 → 유지관리 ·세부지침 : 시설물의 안전 및 유지관리 실시등에 관한 세부지침(안전점검·진단편)
시설물의 성능평가	·시설물의 기능을 유지하기 위하여 요구되는 시설물의 구조적 안전성, 내구성, 사용성 등의 성능을 종합적으로 평가하는 것 ·안전점검 및 정밀안전진단 → 성능평가 ·세부지침 : 시설물의 안전 및 유지관리 실시등에 관한 세부지침(성능평가편)

(2) 시설물의 안전 및 유지관리 실시 등에 관한 세부지침(안전점검·진단편)

가. 안전성평가 기준

교량의 안전성평가는 내하력평가 개념으로 규정되어 왔으나 내하력은 활하중 여유도로서 하중비에 따라 내하력의 변동폭이 크게 변하므로 교량의 안전성을 일관되게 평가하는 기준으로 적절하지 못하다. 따라서 안전성평가는 교량의 안전을 개념을 도입하여 평가하였다. 그러나 안전율이 0.9에서 1.0 사이에 있어 재하시험에 의한 공용내하력 평가를 실시한 경우 공용내하력 산정결과에 따라 안전성평가 결과를 산정한다.

표 2.4.4 구조물의 안전성평가 기준

기준	안전성평가 기준	비 고
A	$SF > 1.0$	◦허용응력설계법 $SF(\text{안전율}) = \frac{\text{허용응력}}{\text{발생응력}} = \frac{f_a}{f_{d+l}}$ ◦강도설계법 $SF(\text{안전율}) = \frac{\text{설계강도}}{\text{소요강도}} = \frac{\phi M_n}{M}$
B	$0.9 \leq SF < 1$ 이나, 공용내하력이 설계하중보다 크게 평가된 경우	
C	$0.9 \leq SF < 1$	
D	$0.75 \leq SF < 0.9$	
E	$SF < 0.75$	

나. 안전성평가 산정 방법

1) 허용응력법에 의한 공용내하력 평가

가) 내하율의 평가

허용응력법에 의한 교량부재의 내하율 산정 시에 하중조합으로는 $D+L(1+i)$ 를 사용하므로 하중계수는 각각 1.0이 된다. 사용재료의 허용응력은 강재의 경우 사용재료에 따른 항복응력을 사용하여 건설기준코드(구 도로교 설계기준, 철도 설계기준) 규정에 의거 부재종류에 따라 결정한다.

고정하중과 활하중에 의한 응력은 대상 부재단면에 있어서 철근 및 강재부식, 콘크리트의 탄산화, 염해, 동해 등에 의한 강도저하와 단면손실 등을 고려하여 계산한다. 이때 고정하중은 현재 교량에 작용하고 있는 모든 고정하중을 가능한 한 정확히 고려한다. 활하중은 현행 건설기준코드(구 도로교 설계기준, 철도 설계기준)의 설계활하중을 사용한다.

허용응력법에 의한 내하율은 강 부재의 내하력 산정 시 적용하는 것이 바람직하며, 허용응력법에 의한 교량부재의 내하율은 다음 식으로 계산한다.

$$\text{내하율}(RF) = \frac{f_a - f_d}{f_l (1+i)}$$

여기서, f_a = 실측 허용응력

f_d = 실측 고정하중에 의한 응력

f_l = 설계 활하중(도로교의 경우 DB, DL하중, 철도교의 경우 KRL하중)에 의한 응력

i = 충격계수로서 건설기준코드(구 도로교 설계기준, 철도 설계기준)에서 제시한 설계 충격계수를 적용한다.

나) 공용내하력의 산정

허용응력법에 의한 교량부재의 공용내하력은 다음 식으로 계산한다.

$$\text{공용내하력}(P) = K_s \times RF \times P_r$$

여기서, K_s = 응답보정계수 = $\frac{\delta_{\text{계산}}}{\delta_{\text{실측}}} \cdot \frac{1+i_{\text{계산}}}{1+i_{\text{실측}}}$

$i_{\text{계산}}$ = 도로교의 경우 건설기준코드(구 도로교 설계기준), 철도교의 경우 건설기준코드(구 철도 설계기준)의 설계충격계수

$i_{\text{실측}}$ = 동적재하시험으로부터 평가된 최대 충격계수

P_r = 설계 활하중(도로교의 경우 DB 또는 DL하중, 철도교의 경우 LS하중)

$\delta_{\text{계산}}(\delta_{\text{실측}})$ = 이론적인 처짐량 (실측 처짐량)

$\epsilon_{\text{계산}}(\epsilon_{\text{실측}})$ = 이론적인 변형률 (실측 변형률)

2) 강도설계법에 의한 공용내하력 평가

가) 내하율의 평가

강도설계법에 의한 교량부재의 내하율 산정 시 도로교량 하중조합은 $1.3D+2.15L(1+i)$, 철도교량 하중조합은 $1.35D+1.85L(1+i)$ 을 사용하므로 하중계수는 각각 도로교량 1.3, 2.15, 철도교량 1.35, 1.85가 된다.

단면강도는 단면의 현재 상태, 즉 재료강도와 단면손실 등을 고려하여 건설기준코드(구 도로교 설계기준, 철도 설계기준)의 공칭강도와 강도감소 계수에 따라 계산한다.

교량 설계시의 부재강도 감소계수는 부재강도의 산정에 있어서 재료강도에 대한 불확실성, 설계와 시공단면의 오차 등을 고려하는 계수이나 내하력 평가 시에는 그러한 불확실성은 상당히 감소하므로 오히려 공용 중에 부재단면의 손상정도에 따라 결정한다.

그러나 부재단면의 손상정도를 정량적으로 평가하기가 어려우므로 공칭강도의 산정 시는 교량의 현재 상태에 따른 단면감소와 코어 강도에 따른 재료강도를 고려하고 강도감소계수는 설계시의 값을 그대로 사용한다.

고정하중과 활하중에 의한 단면력은 현재 작용하고 있는 고정하중과 현행 건설기준코드(구 도로교 설계기준)의 설계 활하중(DB 또는 DL하중) 및 건설기준코드(구 철도 설계기준)의 설계활하중(KRL하중)을 사용하여 구조해석을 통하여 구한다.

- 강도설계법에 의한 내하율은 콘크리트 부재의 내하력 산정에 적용하는 것이 바람직하다.

$$\text{내하율}(RF) = \frac{\phi M_n - \gamma_d M_d}{\gamma_l M_l (1+i)}$$

여기서, ϕM_n = 극한 저항모멘트 (강구조물 $\phi = 1$, RC·PC구조물의 휨부재 $\phi = 0.85$)

M_d = 실측 고정하중모멘트

M_l = 설계 활하중에 의한 모멘트

(도로교의 경우 DB 또는 DL하중, 철도교의 경우 KRL하중)

γ_l = 활하중 계수 = 2.15

γ_d = 고정하중 계수 = 1.30

i = 건설기준코드(구 도로교 설계기준)에서 제시한 설계 충격계수를 적용한다.

나) 공용내하력의 산정

강도설계법에 의한 교량부재의 공용내하력은 다음 식으로 계산한다.

$$\text{공용내하력}(P) = K_s \times RF \times P_r$$

여기서, K_s = 응답보정계수 = $\frac{\delta_{\text{계산}}}{\delta_{\text{실측}}} \cdot \frac{1+i_{\text{계산}}}{1+i_{\text{실측}}}$

$i_{\text{계산}}$ = 도로교의 경우 건설기준코드(구 도로교 설계기준), 철도교의 경우 건설기준코드(구 철도 설계기준)의 설계충격계수

$i_{\text{실측}}$ = 동적재하시험으로부터 평가된 최대 충격계수

P_r = 설계 활하중(도로교의 경우 DB 또는 DL하중, 철도교의 경우 LS하중)

$\delta_{\text{계산}}(\delta_{\text{실측}})$ = 이론적인 처짐량 (실측 처짐량)

$\epsilon_{\text{계산}}(\epsilon_{\text{실측}})$ = 이론적인 변형률 (실측 변형률)

(3) 시설물의 안전 및 유지관리 실시 등에 관한 세부지침(성능평가편)

—교량의 성능평가 항목

- 안전성능 : 상태안전성능, 구조안전성능
- 내구성능 : 콘크리트, 강재
- 사용성능 : 사용성, 기능성

— 구조안전성능 평가 항목(상부구조)

- 공용내하력 : 시설물의 안전 및 유지관리 실시 등에 관한 세부지침(안전점검·진단

편)의 내용과 동일

- 주행안전성(철도교량에 적용) : 고유 휨 진동수, 임계속도, 연직가속도, 연직처짐, 면틀림, 종방향 변위, 단차
- 종방향 변위, 단차는 자갈궤도만 평가

(4) 외국의 내하력 평가기준

가) 미국

미국의 경우 일반적으로 구조해석 결과만으로 내하력을 평가하는데 AASHTO의 기준에 따라 내하력을 계산하고 점검빈도, 교통량, 외관상태의 간단한 사항을 고려한 계수를 적용하여 내하력을 평가하고 있다. 2003년에는 기존의 AASHTODP 의한 내하력 평가방법이 신뢰성에 기반을 두지 않음으로써 일관성 있는 안전수준을 제공하지 못할 수 있다는 우려때문에 ASHTO LRFR(Load and Resistance Factor Rating)평가법이 제안되었다.

AASHTO LRFR는 하중저항계수 판정법을 사용하며 기존 방법의 응답비(K_a)와 재하차량의 신뢰여부에 대한 응답비(K_b)에 의한 응답보정계수를 고려하여 내하등급을 3단계로 구분하여 수행한다.

다음 식은 LRFR에 의하여 내하등급을 평가할 때 사용되는 식으로, 저항에 해당되는 $C = \phi_c \phi_s \phi R_n$ 이고, ϕ_c 는 상태계수(condition factor), ϕ_s 는 시스템계수(system factor), ϕ 는 LRFD의 강도감소계수, R_n 은 공칭강도이다. 이때, 상태계수는 대상교량의 열화속도를 고려하기 위한 상태평가 결과를 반영한다.

$$\text{내하율}(RF) = \frac{C - (r_{dc})(DC) - (r_{DW}) \pm (r_p)(P)}{(r_L)(LL + IM)}$$

여기서, RF : 내하등급

C : 저항($C = \phi_c \phi_s \phi R_n$, 강도한계상태, 사용한계상태)

DC : 구조부재의 사하중 효과

DW : 표면마모와 유틸리티로 인한 사용하중 효과

P : 사하중 이외의 하중효과

LL : 활하중 효과

IM : 동적증폭효과

γ_{DC} : 구조부재에 의한 LRFD 하중계수

γ_{DW} : 표면마모와 유틸리티에 의한 LRFD하중계수

γ_P : 사하중 이외의 고정하중에 대한 LRFD하중계수

γ_L : 평가 활하중 계수

ϕ_c : 상태평가계수

ϕ_s : 시스템계수

ϕ : LRFD의 강도감소계수

R_n : 공칭강도

나) 일본

일본에서는 구조계산에 의하여 내하력을 구하고 실제단면, 외관상태, 재하시험결과를 이용하여 실제 교량의 거동과 계산시의 가정에서 발생하는 차이 등에 의한 여유를 고려하는 내하력 평가방법을 사용하고 있다.

1) 허용응력법

이 방법은 현재 국내의 허용응력법과 동일하며 노면, 교통, 기타조건에 대한 보정계수를 적용하고 있다. 내하력은 기본내하력에 보정계수를 곱한 공용내하력에 의한 공용하중으로 교량의 내하력을 산정하고 있다.

$$P = \text{설계하중} \times \frac{f_a - f_d}{f_l}$$

$$P' = P \times K_s \times K_t \times K_r \times K_o$$

여기서, K_o : 기타 보정계수(장래의 공용 기대년수, 노선 중요도 등)

K_r : 노면상태 보정계수(0.85~1.0)

K_s : 응력보정계수($=\epsilon_{\text{계산}}/\epsilon_{\text{실측}}$)

K_t : 교축방향 분포계수($=K_{tl} \times K_{tw}$)

P : 기본내하력

P' : 공용내하력

2) 휨파괴

콘크리트교의 내하력을 산정하는 경우 사용되며, 설계 활하중에 대한 콘크리트 거더의 휨파괴에 대한 안전율은 다음과 같다.

$$\gamma = f \times \frac{M_u - 1.1M_d}{M_l}$$

여기서, γ : 설계활하중에 대한 거더의 휨파괴 안전율

f : 실측응력에 대한 계산응력치의 비

M_u : 거더의 파괴에 대한 저항휨모멘트

M_d : 현재의 고정하중에 대한 휨모멘트

M_l : 설계활하중에 대한 휨모멘트

다) 캐나다

1) OHBDC(Ontario Highway Bridge Design Code)

국내 기준이나 AASHTO LRFR 평가법과는 다르게 기본내하율의 개념을 사용하지 않고 해석을 통한 내하력 평가결과를 그대로 적용하거나, 해석적인 방법으로는 교량의 실제 거동을 평가하기 어렵다고 판단하는 경우 재하시험을 통한 내하력 평가를 수행하여 그 결과를 교량에 적용한다. OHBDC에서는 극한한계상태, 파괴한계상태, 사용한계상태에 대해 해석적인 내하력 평가를 수행하며 각각의 한계 상태에 대한 내용은 다음과 같다.

- 극한한계상태 : 석재로 된 교대, 기둥, 옹벽을 제외한 교량의 내하력과 안정성, 차량제한을 계산하는데 사용
- 파괴한계상태 : 파괴징후가 보일 경우 그 영향을 받는 부재와 교량의 내하력평가
- 사용한계상태 : 석재로 된 교대, 기둥, 옹벽의 내하력과 안정성, 차량 제한을 계산하는데 사용, 교량의 경우는 과도한 균열이나 변형, 응력 또는 진동을 받을 경우 사용성한계상태에 대한 점검을 수행.

해석적으로 계산된 내하력 결과는 Scale-down factor(F)로 표현되며 교량의 종류에 따라 각기 다른 식을 사용한다.

$$\text{콘크리트 슬래브 교량} : F = \frac{R_f}{L_o}$$

$$\text{석조아치} : F = \frac{R_f}{L_a}$$

$$\text{교대, 기둥, 옹벽} : F = \frac{\text{사용성한계상태응력} - \text{영구하중응력}}{\text{고정하중응력}}$$

$$\text{일반적 교량} : F = \frac{R_f - \text{영구하중에 의한 하중효과}}{\text{고정하중에 의한 하중효과}}$$

$$\text{재하시험을 수행한 경우} : F = \frac{L_f}{\text{활하중에 의한 하중효과}}$$

여기서, F : Scale-down factor

L_f : 시험하중에 의한 최대 하중효과

2) CHBDC(Canadian Highway Bridge design Code)

내하력 평가를 극한한계상태법, 사용한계상태법, 평균하중법(Mean Load Method) 중 하나로 수행하도록 규정하고 있다. 대부분의 교량은 극한한계상태에 대한 평가를 사용하며, 재하시험의 결과는 OHBDC와 동일한 방법을 사용하고 있다.

$$F = \frac{U\phi R - \sum \alpha_D D - \sum \alpha_A A}{\alpha_L L(1+I)}$$

여기서, R : 계수값이 적용되지 않은 공칭저항강도

D : 계수값이 적용되지 않은 고정하중효과

A : 풍하중, 크리프, 건조수축, 온도변화 등의 추가하중과 그 외의 부속물에 의한 하중효과

L : 계수값이 적용되지 않은 활하중 효과

I : 충격계수

U : 저항수정계수

ϕ : 저항계수

α_D : 고정하중계수

α_A : 추가하중계수

α_L : 활하중계수

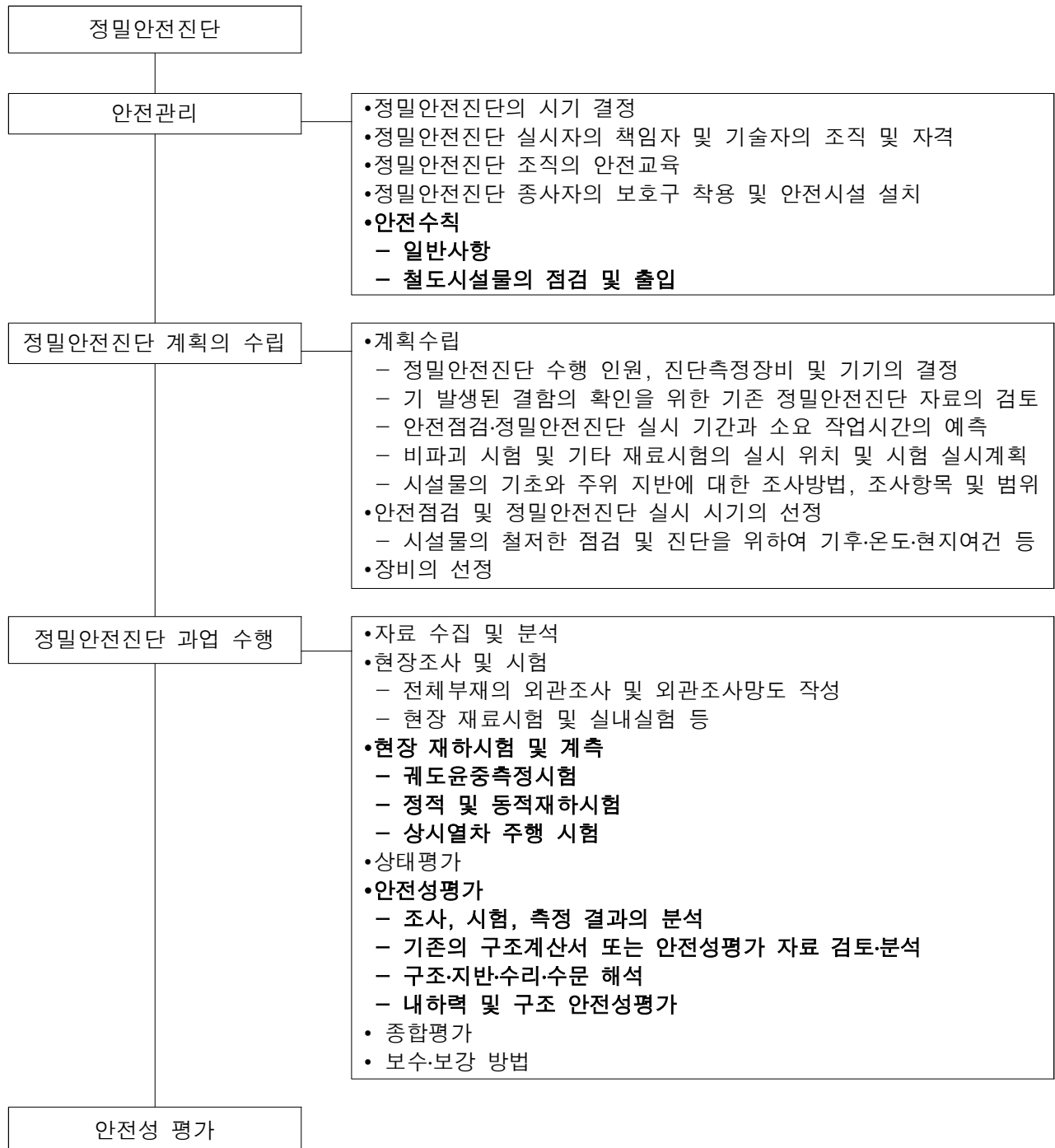
R 은 열화를 고려한 공칭강도로서 단면손실 등 평가시 상태를 반영하여 구한 설계기준의 공칭 강도에 다음 평가까지 진행될 열화를 고려하기 위해 열화불확실성계수(Deterioration Uncertainty Factor) $\delta = C^{(n-1)}$ (C : 열화속도, 정보 없으면 0.96)를 곱하여 사용할 것을 추천하고 있다. 열화불확실성계수가 AASHTO LRFR의 상태 계수에 대응 되는 값이다.

저항강도수정계수(Resistance Adjustment Factor) U 는 지나친 안전측 평가가 과도한 경제적 비용을 초래하게 되므로 이러한 평가원리가 반영된 부재의 연성확보에 따르는 계수이다.

AASHTO LRFR의 시스템 계수와 같은 계수가 식에는 없으나, CHBDC에서는 구조계에 따른 목표 신뢰도가 구분되고 하중계수가 다르게 되어 구조해석으로 산정한 단면력 값에 이미 반영되어 있다고 볼 수 있다.

(5) 구조안전성 평가 절차

철도교량의 구조안전성 평가는 정밀안전진단의 일환으로 수행되며 철도교의 특성을 고려한 현장측정시험과 안전성 평가 방법 마련이 필요함. 즉, 도로교와 달리 열차의 충격을 파악하기 위한 열차윤중시험(궤도윤중측정시험)과 정적 및 동적 현장재하시험, 상시열차에 의한 상시열차주행시험으로 구분할 수 있으며, 철도교의 현장재하시험 현장여건을 반영하기 위한 안전성 평가 방법의 개선이 요구됨



(6) 구조안전성 평가 항목 설정

가. 구조안전성 평가 방법

1) 응답보정계수 산정

재하시험을 통해 실측된 구조물의 변형률(응력), 변위와 구조해석을 통해 구현된 모델링상에서 재하시험 하중과 동일한 하중을 재하했을 경우 나타나는 이론적인 변형률(응력), 변위의 비를 분석하여 공용내하력에 반영하게 되는 값을 응답보정계수라고 한다.

응답보정계수 산정과정을 식으로 나타내면 다음과 같으며, 재하시험에서 얻어진 변형률(응력), 변위 외 동적재하시험 결과에 의한 충격계수를 일반적으로 포함하게 된다.

$$\text{응답보정계수}(K_s) = \frac{\text{해석변위(or 응력)}}{\text{실측변위(or 응력)}} \times \frac{1+\text{이론충격계수}(i)}{1+\text{실측충격계수}(i)}$$

2) 고속철도 운행 한계조건 검토

철도설계기준(2015) 8.6절 「운행을 위한 한계조건(p8-82)」에 의하면 고속열차(KTX)의 운행 안전성(동적거동)을 평가하기 위한 항목들로 대상 교량의 상판 수직가속도, 그리고 승차감을 고려한 연직처짐 등에 대한 평가가 요구된다.

3) 충격계수 산정

동적하중에 의한 충격의 영향은 동적주행시험에서 각 속도별로 측정된 변형률 또는 처짐의 시간이력곡선으로부터 실측충격계수를 산정하여 고려된다. 동적주행시험 결과로부터 산정된 실측충격계수가 『철도설계기준』에서 규정한 충격계수의 적용한계를 초과하는 경우에는 원인을 분석하여야 한다. 실측충격계수 산정에는 다음 식을 적용하여 각 주행속도별로 계산된 충격계수의 최댓값을 실측충격계수로 결정한다.

$$i = \frac{A_{dyn}}{A_{sta}} - 1$$

여기서, A_{dyn} : 최대 동적응답(주행속도별)

A_{sta} : 최대 정적응답

4) 고유진동수 분석

동적재하시험에서 가속도 센서를 통해 측정된 가속도신호에 대하여 FFT(Fast Fourier Transform)분석하면 구조물의 실측 고유진동수를 산정할 수 있다. 이 때, 시험열차가 교량을 통과한 후 구조물에 남아있는 여진구간에서의 가속도를 분석하는 것이 무엇보다 중요하며 이론적인 고유치 해석을 선행하거나 종전의 사례를 검토하여 대상 구조물의 진동수를 예측하여 진동수의 측정범위를 결정하여야 한다. 또한, 계측값의 신뢰성을 확보하기 위해서는 대상구조물

의 주파수를 미리 예상하는 것이 중요하다. 실측된 고유진동수는 이론적인 모델링에 의한 해석 고유진동수와 유사할 경우 모델링의 적정성을 인정받을 수 있으며, 실측 고유진동수가 해석 고유진동수를 크게 벗어날 경우 구조물 강성의 저하여부 판단 또는 해석모델링의 정확성 여부를 재검토할 필요가 있다.

5) 감쇠비 분석

감쇠란 구조물에 발생된 파동이 외력제거 시 물체 고유강성과 질량에 의해 진폭이 감소하는 현상을 말하며, 감쇠가 이루어지는 과정에서의 비율을 감쇠비라 한다.

시험열차 운영을 통하여 획득된 교량의 데이터 중 정모멘트 구간에 설치된 변위계에 대한 데이터를 Band Pass Filtering하여 1차 고유주기 파형을 추출하고 이를 이용하여 감쇠비를 산정하며 감쇠비 산정과정을 나타내면 다음과 같다.

$$\zeta = \frac{1}{2\pi j} \times \ln\left(\frac{u_i}{u_{i+j}}\right) \quad (\text{j-cycle 떨어진 두 최대변위를 고려하는 경우})$$

$$\zeta = \frac{1}{2\pi} \times \ln\left(\frac{u_i}{u_{i+1}}\right) \quad (\text{인접된 두 최대변위를 고려하는 경우})$$

6) 횡분배 검토

하중의 횡분배 효과란 교량의 상부구조에서 하중이 횡방향으로 분배되는 정도를 나타내는 것으로 처짐 및 변형률의 실측값에 의해 하중경우별로 측정단면에서 검토한다. 이 때, 무엇보다 주어지는 하중의 대칭성이 전제되어야 하므로 원칙적으로 양 선로에 동일한 하중을 각각 재하하여야 하며 동적인 특성을 배제한 정적인 하중으로 검토하여야 그 특성을 명확히 판단할 수 있다.

7) 거더의 처짐 제한 기준

국제철도연맹 UIC기준 776-3R에서는 차량의 주행안전성과 승차감을 확보하기 위하여 주행 중인 활하중에 의한 처짐한계를 차량 주행 속도 및 교량 경간 길이별로 경간의 구성에 따라 제안 하고 있다.

8) 교량 상판의 연직가속도

교량 상판 연직가속도의 과도한 발생은 궤도의 불안정성과 차륜/레일 접촉력의 감소 및 교좌 장치의 들림 등을 유발할 수 있으므로 제한되어야 한다. 상판의 연직가속도는 ERRI D214의 연구결과로부터 제한된 값으로 실험결과 자갈도상의 이상거동이 발생한 0.7~0.8g에 안전율 2를 적용하여 0.35g를 규정한 것이며, 콘크리트궤도의 경우 교좌장치의 부상을 방지하기 위해 0.5g를 규정하였다.

가속도의과도한 발생은 윤중변동의 증가와 도상의 교란, 교좌장치 부반력 발생 등을 억제하기 위한 것으로 철도교량의 안전성과 밀접한 관계에 있다.

9) 단부 회전각

UIC 774-3에 의하면, 연직하중에 의한 단부회전각은 궤도/교량 상호작용 거동을 만족시키기 위한 중요한 인자로써 상판 상부 끝단에서의 변위를 제한함으로써 도상의 안전성을 유지하도록 규정하고 있다. 또한, 단부회전각의 제한은 도상자갈 이완 및 부가적 레일응력 증가를 억제하기 위함이다. 그러나 현재 호남고속철도 교량은 일반적으로 콘크리트궤도를 적용하고 있어 도상이완의 가능성이 없으므로 단부변위를 제한하지 않고, 직접적으로 레일응력과 체결장치 부하력을 교량단부 콘크리트궤도 사용성 측면에서 검토한다. 장대레일상에서 온도변화, 시동/제동하중, 및 연직하중에 의한 상판 상부 끝단과 성토부 그리고 연속하는 두 상판 상부사이 거리의 합이 단부회전각의 최대허용치가 된다. 반면, 프랑스 기준은 상판의 양쪽 단부 사이의 회전각으로 한계치를 규정하고 있다.

10) 연직방향 장대변위의 차 및 교축방향 변위허용치

UIC 774-3R에 의하면, 연직하중에 의한 deck 상부 끝단과 성토부 그리고 연속하는 두 deck 상부사이의 거리의 한계치는 8mm로 규정되어 있다.

Eurocode 1 PART 2에 따르면, 다양한 하중에 의해 인접 교대 또는 deck과 deck 상부표면의 연직방향 상대변위의 차는 다음과 같이 규정한다.

- 3mm : 최대속도 160km/h 이하의 선로
- 2mm : 최대속도 160km/h 초과인 선로

11) 상단의 면틀림

상판의 면틀림은 차륜과 레일의 접촉에 대한 안전을 확보하여 탈선의 위험을 최소화하기 위한 것으로 3m 떨어진 두 지점에서의 양쪽레일에 대한 캔트의 변화량 (mm/궤도1m)을 의미한다. 즉 고속철도교량의 경우 실제 운행열차하중에 의한 동적해석에서 3m 떨어진 두 지점의 최대 변화량이 1.2mm이내이어야 함을 의미한다.

나. 구조안전성 평가항목의 설정

적용기준	평가내용	검토목적
진단조건 검토	• 정적 응답비 산정 • 동적 응답비 산정 • 고유진동수 산정 • 활하중 횡분배 효과 분석 • 중립축위치 분석	공용내하력 안전성 평가
설계조건 검토	• 주행안전성 및 승차감검토 • 공진가능성 평가 • 상판 연직가속도 제한 조건 검토 • 교량 연직처짐 검토 • 교량 상판 단부회전각 검토 • 교량상판 종방향 변위 검토	운행을 위한 한계조건 평가

2.4.3 현장재하시험 및 안전성 평가 이력 분석(연구성과 1-2, 2-1, 2-2)

(1) 재하시험의 종류

재하시험은 하중의 재하방법에 따라 정적재하시험과 동적재하시험, 의사정적재하시험으로 분류된다. 세 방법 모두 시험하중 이외의 차량이 완전히 통제된 상태에서 실시되어야 함이 원칙이며 각 방법별 특징을 기술하면 다음과 같다.

(가) 정적재하시험

- ① 정적하중에 대한 교량의 정적거동특성을 파악하고 처짐(변위) 및 응력의 응답비 등 내하력평가를 위한 계수를 산정하기 위하여 실시한다.
- ② 각종 센서의 부착위치, 시험하중의 재하위치는 일반적으로 최대 응답발생 부위가 되며 현장여건 상 부득이한 경우 위치를 조정할 수 있다.
- ③ 구조물의 횡분배 상태 등을 파악하기 위하여 횡단면상 대칭적으로 하중을 재하하는 것이 일반적이다.

(나) 동적재하시험

- ① 시험하중의 이동에 의해 유발되는 동적효과 및 제반 동적특성을 추정하여 대상교량의 안전성 및 사용성 평가를 위한 자료를 도출하고자 실시한다.
- ② 동적거동 특성을 파악하고자 하는 대상부재에 측정항목에 따른 센서를 부착한 후 시험열차의 속도를 저속에서 최고 운행속도까지, 단계적으로 주행시키고, 이 때 측정지점에 발생하는 처짐, 변형률 및 가속도 등을 측정하여 교량의 동적거동 상태를 파악한다.
- ③ 동적 재하시험과 함께 교량에 상시 통행하는 고속열차로 인해 발생하는 동적거동을 측정하여, 상시 운행하는 열차가 교량을 고속으로 주행할 시 유발되는 가속도를 측정하고 구조물의 충격계수, 고유진동수 등의 동적 거동상태를 추가로 분석하기도 한다.

(다) 의사정적재하시험

- ① 현장 및 시험여건 상 완전한 정적재하가 곤란할 경우 최저 속도(10km/hr 정도 이하)로 주행하여 정적효과를 얻는 경우를 말한다.
- ② 저속으로 차량을 주행시켜 얻은 데이터로부터 동적효과를 제거하여 정적효과를 구하는 시험이다.

(2) 시험경간 선정

- 주형의 손상상태, 신축이음의 상태, 받침상태, 보수 및 보강이력 등을 고려하여 종합적으로 가장 취약하고 최대응답이 발생할 것으로 예측되는 경간을 선택함이 원칙으로 한다.
- 상부구조가 2개 이상의 형식으로 구성되었거나 연속교와 단순교의 조합으로 구성된 경우, 형식별로 1개 경간을 선정하여 재하시험을 실시하는 것이 바람직하다. 단, 주 형식 이외의 나머지 형식이 주 형식의 일부로 분류 가능하거나 손상 및 노후상태, 하부구조상태, 구

성비율, 보강이력 등을 고려할 때 재하시험의 필요성이 없는 경우는 예외로 한다.

(3) 계측기 및 센서의 선정과 부착

계측기 및 센서는 일반적으로 변형률을 측정하는 변형률 게이지(Strain gauge), 처짐을 측정하는 변위변환기, 교량의 동적응답인 가속도를 측정하는 변환기를 사용한다. 재하시험에 사용되는 각 계측기 및 센서의 특징은 다음 표와 같으며, 대상교량의 구조형식 및 계측목적에 따라 센서 및 계측기의 종류, 부착위치 및 개소수를 결정한다.

종 류	특 징	
변형률 게이지	재료의 인장 또는 압축에 따라 게이지의 전기 저항변화에 따른 변형률의 측정	계측값은 부재의 결함 및 손상상태, 결선방법, 와이어의 길이 및 주변환경 등의 영향을 고려하여 센서 선정
변위 변환기	• 피스톤타입 변위센서	• 제품명에 따라 다음과 같이 분류됨. - 다이얼게이지(Dial gauge) - LVDT(Linear Variable Differential Transformer), - CDP(Cantilever type Displacement) • 정·동적 변위 측정 가능
	• 링타입 변위센서	• 정·동적 변위 측정 가능
가속도 변환기	구조물의 진동을 전기적인 신호로 변환하여 가속도를 측정	원리에 따라 전기저항식, 서보형식, 압전형식이 있음.
균열계	균열 및 신축이음의 간격변화 측정	균열의 하중의존성 검토
온도계	교량의 온도 및 부재 상·하부 온도차 측정	균열 및 처짐의 온도의존성 검토
레이저 변위계	타겟점의 레이저 계측을 통한 처짐의 측정	
경사계	경사변형(경사각) 측정을 통한 처짐의 측정	

(4) 시험결과의 분석 및 안전성 평가

가. 응답보정계수 산정

재하시험을 통해 실측된 구조물의 변형률(응력), 변위와 구조해석을 통해 구현된 모델링상에서 재하시험 하중과 동일한 하중을 재하했을 경우 나타나는 이론적인 변형률(응력), 변위의 비를 분석하여 공용내하력에 반영하게 되는 값을 응답보정계수라고 한다. 이는 정적재하시험의 결과로부터 구해지는 응답비(=실측처짐(or 변형률)/이론처짐(or 변형률))와 동적재하시험으로부터 구해지는 충격계수를 포함한 계수이며 응답보정계수 산정 시 다음 사항을 고려하여야 한다.

- ① 정적재하시험에서 계측된 결과는 기본적으로 공용내하력 평가를 위한 보정계수 산정에 반영된다. 보정계수는 구조해석 모델과 실제 교량의 차이를 시험결과와 해석결과를 바탕으로 보정하는 것이므로 보정계수 산정을 위해서 재하시험에 사용된 차량을

평가활하중으로 하여 구조해석을 수행하여야 한다.

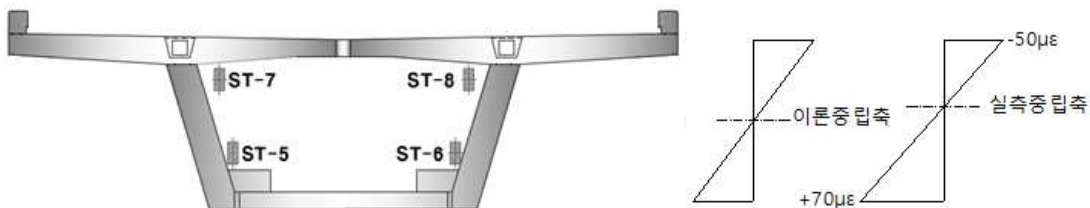
- ② 콘크리트 구조물의 경우 균열 등과 같은 결함, 손상 또는 재료의 비균질성, 이론값의 불확실성 등으로 변형률에 의한 응답비는 신뢰성이 낮으므로 콘크리트교, PSC 합성형교의 내하력 평가시 국부적인 응답을 나타내는 변형률보다 처짐에 의한 보정계수를 사용하는 것이 바람직하다.
- ③ 시험차량의 축중량이 직접적으로 재하되는 거더에 부착된 각종 센서들의 응답량은 안정된 값을 보이나, 재하된 위치로부터 멀리 떨어진 곳에서 측정된 응답량들은 변동량이 대체로 크게 증가하는 경향을 나타내고 있다. 실측 응답량은 내하력 평가에 사용되는 응력보정계수(K_s)로 활용된다는 점에서 가장 큰 응답량을 선정하는 것이 구조물의 안전도 측면에서 바람직하다.
- ④ 측정응답치가 계산응답치에 비해 매우 크게 나온 경우 또는 응답비율이 2배 이상 차이가 나는 경우 구조물의 손상여부, 구조해석 모델의 검증, 재하시험 재분석 등을 통해 원인을 분석하여야 한다.

응답보정계수 산정과정을 식으로 나타내면 다음과 같으며, 재하시험에서 얻어진 변형률(응력), 변위 외 동적재하시험 결과에 의한 충격계수를 일반적으로 포함하게 된다.

$$\text{응답보정계수}(K_s) = \frac{\text{해석변위(or 응력)}}{\text{실측변위(or 응력)}} \times \frac{1+\text{이론충격계수}(i)}{1+\text{실측충격계수}(i)}$$

나. 중립축의 위치 판단

상부 슬래브 또는 거더 상·하부에서 계측된 변형률을 이용하여 실제 중립축을 확인하고 이를 이론의 값과 비교하여 교량의 실거동 상태를 평가한다. 계측자료에 의한 중립축의 위치와 이론에 의한 위치가 크게 다른 경우 그 원인을 규명할 필요가 있다.



다. 고속철도 운행 한계조건 검토

철도설계기준(2015) 8.6절 「운행을 위한 한계조건(p8-82)」에 의하면 고속열차(KTX)의 운행 안전성(동적거동)을 평가하기 위한 항목들로 대상 교량의 상판 수직가속도, 그리고 승차감을 고려한 연직처짐 등에 대한 평가가 요구된다.

① 교량 상판의 수직가속도

교량 상판 수직가속도의 과도한 발생을 방지하여 철도교량의 안전성(궤도의 불안정성, 차륜/레일 접촉력의 감소, 교좌장치의 들림 방지)을 확보하기 위하여 상판 수직가속도를 제한하고 있으며, 검토기준은 다음과 같다.

- 자 갈 궤 도 : 0.35g
- 콘크리트궤도 : 0.50g

② 교량의 연직 처짐(승차감 기준)

승차감의 기준은 교량/열차의 상호작용을 수행해야만 얻을 수 있으므로, 이를 대체할 수 있도록 교량 경간 길이, 열차속도, 경간 수, 지지형식의 함수로 구성하여 교량의 연직 처짐으로 평가하고 있으며, 승차감을 고려한 연직 처짐(L/δ)의 규정은 다음과 같다.

표 2.4.5 연직처짐 검토를 위한 하중조합

기 준	연직 처짐 검토를 위한 하중조합
승차감	1. 표준열차하중 + 충격계수(단선 재하) 2. 실 열차하중 속도별 동적해석(단선재하) → 승차감에 대한 연직변위는 1, 2 항목 중 불리한 값을 적용함.

표 2.4.6 최대 연직처짐 제한(승차감 : 매우양호)

설계속도(V) (km/h)	거더 또는 부재의 경간										
	0~20	25	30	35	40	45	50	55	60~75	80~95	100~120
$270 < V \leq 350$	L/1500	L/1500	L/1600	L/1750	L/1900	L/2100	L/2200	L/2350	L/2500	L/2200	L/1900
$200 < V \leq 270$	L/1300	L/1400	L/1500	L/1600	L/1700	L/1900	L/2000	L/2100	L/2000	L/1700	L/1400
$V \leq 200$	L/1100	L/1200	L/1300	L/1500	L/1500	L/1400	L/1300	L/1200	L/1100	L/800	L/600

라. 충격계수 산정

동적거동 특성의 규명은 정적거동보다 다소 복잡하며 교량의 도상(레일)상태, 열차의 주행속도, 지간장, 고정하중과 활하중의 비, 구조적 특성 등의 다양한 인자들에 의하여 결정되며 정적하중보다 교량에 더 큰 영향을 줄 수 있다.

동적하중에 의한 충격의 영향은 동적주행시험에서 각 속도별로 측정된 변형률 또는 처짐의 시간이력곡선으로부터 실측충격계수를 산정하여 고려된다. 동적주행시험 결과로부터 산정된 실측충격계수가 『철도설계기준』에서 규정한 충격계수의 적용한계를 초과하는 경우에는 원인을 분석하여야 한다. 실측충격계수 산정에는 다음 식을 적용하여 각 주행속도별로 계산된 충격계수의 최댓값을 실측충격계수로 결정한다.

$$i = \frac{A_{dyn}}{A_{sta}} - 1$$

여기서, A_{dyn} : 최대 동적응답(주행속도별)

A_{sta} : 최대 정적응답

상기에서 최대 정적응답은 다음과 같은 두 가지 방법에 의해 구해진다.

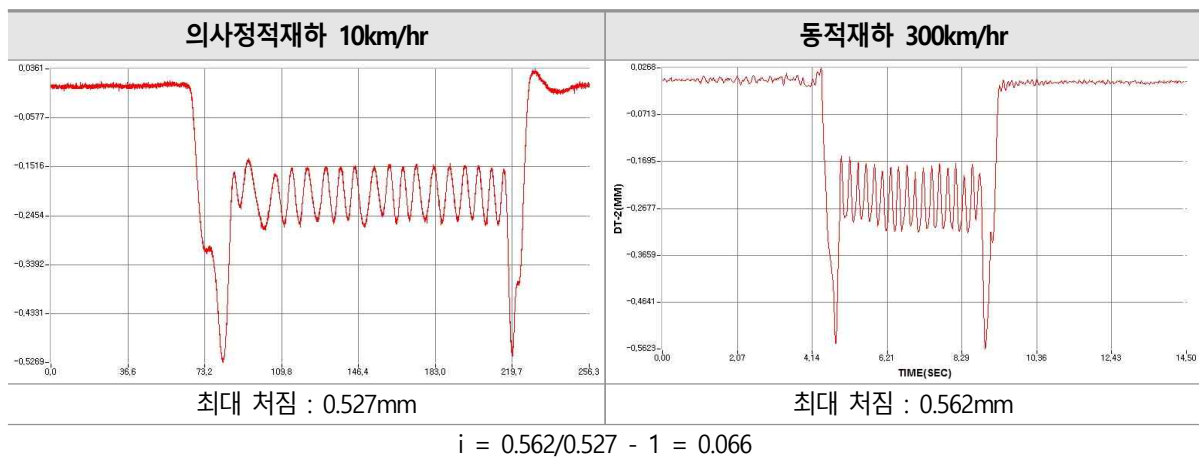
① 정적 또는 의사정적 시험에서 계측된 결과를 사용하는 방법

- 도로교량의 경우는 주행시험에서 각 주행속도마다 운전자의 숙달, 습관에 따라 정적재하시험 시 이용된 부착 게이지 위치로 차량을 주행하기 어렵고 의사정적 시험의 경우에도 노면의 요철 등의 원인으로 대상교량에 가해지는 충격이 속도별로 다르게 나타나므로 이를 정적 응답이력곡선이나 동적 응답이력곡선으로 간주하여 실측충격계수를 산정하기 어렵지만 일정한 선로를 주행하게 되는 철도교량은 하중이 가해지는 위치가 정적재하시험과 동적재하시험이 다르지 않으므로 정적재하시험에서 계측된 결과를 이용할 수 있다.

② 동적응답곡선(Dynamic response)에서 충격효과를 제거한 곡선(Filtered response)으로부터 최대 정적응답을 유추하는 방법

- 동적재하시험을 통해 계측된 변형률, 처짐의 파형으로 직접적으로 산출방법이며 일반적으로 정적재하시험을 실시하지 않는 경우에 적용한다. 실측 충격계수의 산정 과정을 예시하면 다음과 같다.

표 2.4.7 실측 충격계수 산정 예



마. 고유진동수 분석

동적재하시험에서 가속도 센서를 통해 측정된 가속도신호에 대하여 FFT(Fast Fourier Transform)분석하면 구조물의 실측 고유진동수를 산정할 수 있다. 이 때, 시험열차가 교량을 통과한 후 구조물에 남아있는 여진구간에서의 가속도를 분석하는 것이 무엇보다 중요하며 이론적인 고유치 해석을 선행하거나 종전의 사례를 검토하여 대상 구조물의 진동수를 예측하여 진동수의 측정범위를 결정하여야 한다. 또한, 계측값의 신뢰성을 확보하기 위해서는 대상구조물의 주파수를 미리 예상하는 것이 중요하다. 실측된 고유진동수는 이론적인 모델링에 의한 해석 고유진동수와 유사할 경우 모델링의 적정성을 인정받을 수 있으며, 실측 고유진동수가 해석 고유진동수를 크게 벗어날 경우 구조물 강성의 저하여부 판단 또는 해석모델링의 정확성 여부를 재검토할 필요가 있다.

바. 감쇠비 분석

감쇠란 구조물에 발생된 파동이 외력제거 시 물체 고유강성과 질량에 의해 진폭이 감소하는 현상을 말하며, 감쇠가 이루어지는 과정에서의 비율을 감쇠비라 한다.

시험열차 운영을 통하여 획득된 교량의 데이터 중 정모멘트 구간에 설치된 변위계에 대한 데이터를 Band Pass Filtering하여 1차 고유주기 파형을 추출하고 이를 이용하여 감쇠비를 산정하며 감쇠비 산정과정을 나타내면 다음과 같다.

$$\zeta = \frac{1}{2\pi j} \times \ln\left(\frac{u_i}{u_{i+j}}\right) \quad (j\text{-cycle 떨어진 두 최대변위를 고려하는 경우})$$

$$\zeta = \frac{1}{2\pi} \times \ln\left(\frac{u_i}{u_{i+1}}\right) \quad (\text{인접된 두 최대변위를 고려하는 경우})$$

(5) 기존 철도교량 현장재하시험결과 사례 조사

① Concrete PSC BOX 형식

No.	Section	Bridge	Type	Composition	Span Length	Remark
1	10-4	성동고가	PSCB	1@40	40	Simple
2	10-4	금강고가	PSCB	1@40	40	Simple
3	10-5	가야고가	PSCB	1@40	40	Simple
4	12-1	신경주역사	PSCB	1@24	24	Simple
5	12-5	삼정제1고가	PSCB	1@40	40	Simple
6	13-1	진티고가	PSCB	1@40	40	Simple
7	13-1	진티고가2	PSCB	1@35	35	Simple
8	13-1	반곡고가	PSCB	1@32.5	32.5	Simple
9	13-1	반곡고가2	PSCB	1@35	35	Simple
10	13-1	반곡고가3	PSCB	1@40	40	Simple
11	13-2	중괘고가	PSCB	1@40	40	Simple
12	13-2	하잠교	PSCB	1@35	35	Simple
13	13-2	사촌교	PSCB	1@40	40	Simple
14	13-2	사촌교2	PSCB	1@35	35	Simple
15	13-2	중령고가	PSCB	1@30	30	Simple
16	13-2	중령고가2	PSCB	1@35	35	Simple
17	13-2	외양고가	PSCB	1@40	40	Simple
18	14-1	임기제2고가	PSCB	1@40	40	Simple
19	14-1	법기고가	PSCB	1@40	40	Simple
20	14-1	송정고가	PSCB	1@40	40	Simple
21	10-4	남천1교	PSCB	2@40	40	Continuous
22	10-5	오목고가	PSCB	2@35	35	Continuous
23	10-5	오목고가	PSCB	2@40	40	Continuous
24	10-5	가야고가	PSCB	3@25	25	Continuous
25	10-5	가야고가	PSCB	2@40	40	Continuous
26	11-1	광석고가	PSCB	2@40	40	Continuous
27	12-2	덕천고가	PSCB	2@40	40	Continuous
28	12-3	이조천교	PSCB	2@40	40	Continuous
29	12-3	활천2교	PSCB	2@40	40	Continuous
30	12-3	복안천교	PSCB	3@25	25	Continuous
31	12-5	삼정제1고가	PSCB	2@40	40	Continuous
32	12-5	서하고가	PSCB	2@40	40	Continuous

② Concrete RPF Girder 형식

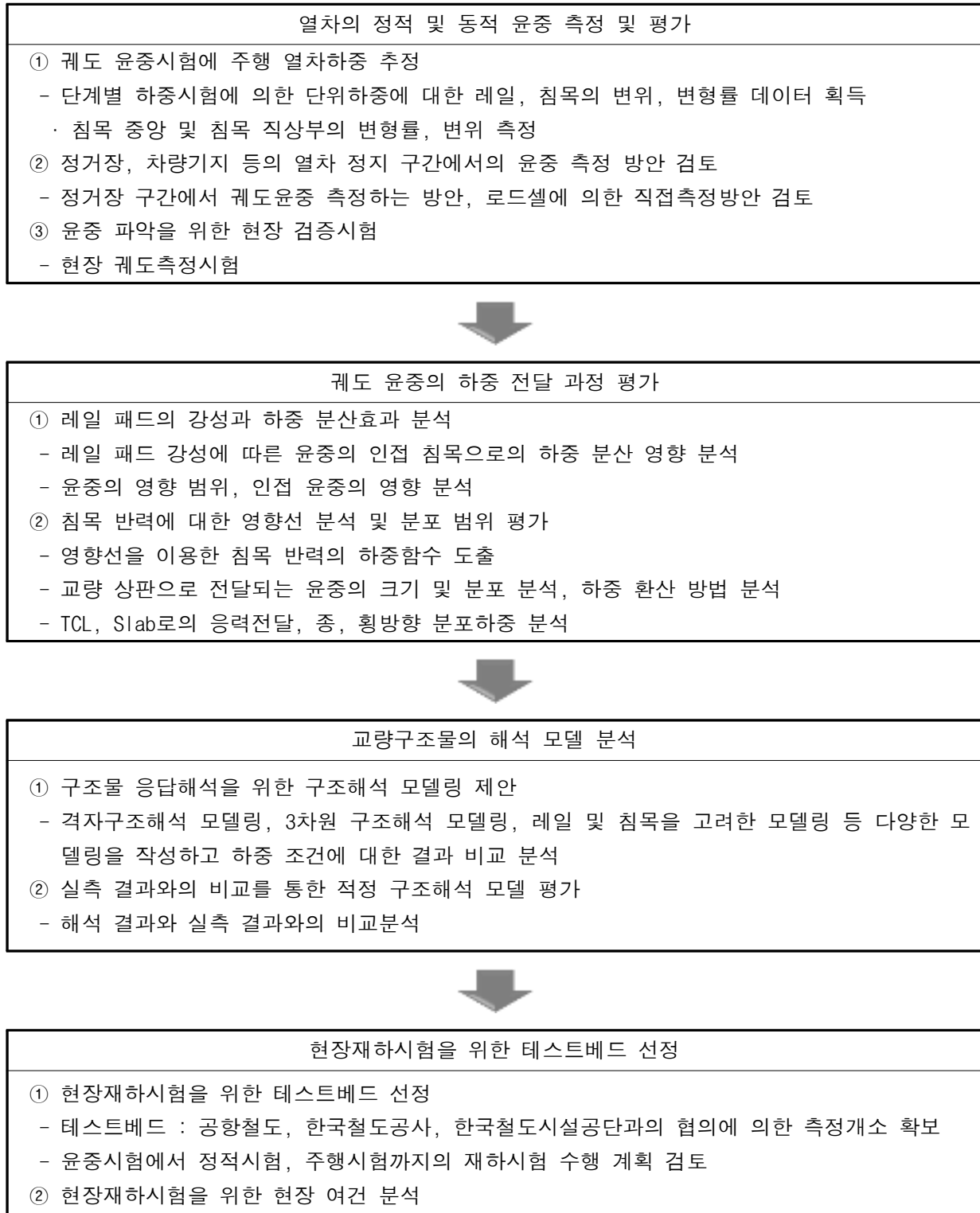
No.	Section	Bridge	Type	Composition	Span Length	Remark
1	10-3B	고모고가	RPFB	1@40	40	Simple
2	10-3B	고모고가	RPFB	1@30	30	Simple
3	10-3B	고모고가	PSCB	1@25	25	Simple

③ Steel BOX 형식

No.	Section	Bridge	Type	Composition	Span Length	Remark
1	10-4	성동고가	STB	1@54	54	Simple
2	10-5	오목고가	STB	1@40	40	Simple
3	10-5	가야고가	STB	1@50	50	Simple
4	12-1	신경주역사	STB	1@50	50	Simple

2.4.4 계측 및 측정결과 분석 방법(연구성과 3-2)

(1) 계측 및 측정결과 분석방법



(2) 윤중측정시험

① 측정장비 및 센서 종류

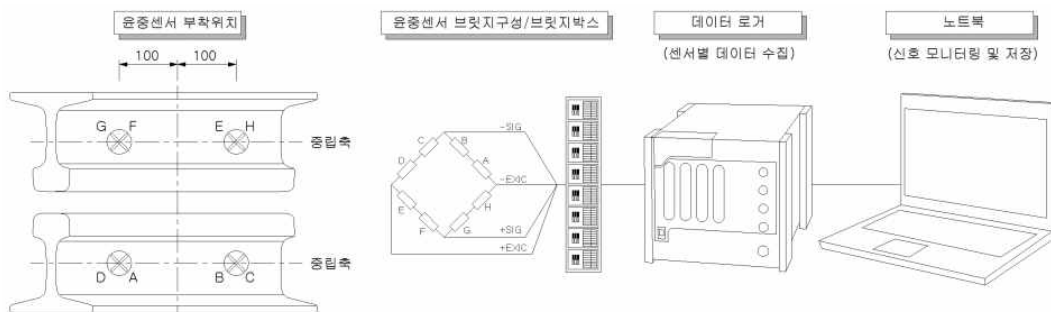
장비명	모델명		규격	제조사	용도
재하시험장비	DRA-30A		30Cannel	Tokyo Sokki	재하시험 센서값 측정
컴퓨터	-		-	Samsung	계측DATA 수집 및 저장
변위변환기	교량	OU-30	30mm	Tokyo Sokki	변위 측정
	궤도	CDP-10	10mm		
변형률게이지	교량	FLA-5	접착식	Tokyo Sokki	변형률 측정
	궤도	FLA-5	접착식		
리드와이어	소켓식(4선)		-	한국	게이지, 장비 연결

② 센서별 기본 사양

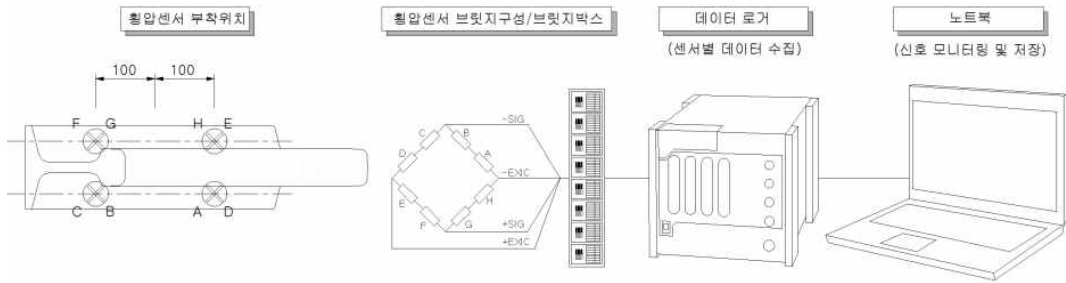
구분	센서			측정기
	변형률계	변위계	가속도계	
사양 및 성능	- 재료 : 폴리에스테르 - 저항소자 : Cu-Ni선 - 사용온도범위 : $-20 \sim 80^{\circ}\text{C}$ - 성능: $20,000 \times 10^{-6}$ Strain - 저항치 : 120Ω - 제원 ☞길이 : 60mm ☞폭 : 1mm - 응답주파수 : 20kHz	- 타입 : CDP(고감도변위계) - 용량 : 50mm - 출력 : $5\text{mV/V} \pm 0.1\%$ ($10,000 \times 10^{-6} \pm 0.1\%$) - 응답주파수 : 6Hz - 사용온도범위 : $0 \sim 60^{\circ}\text{C}$ - 저항치 : 350Ω	○ ARF-20A - 용량 : 2.04g - 출력 : 0.5mV/V - 응답주파수 : 80Hz - 사용온도범위 : $-10 \sim 50^{\circ}\text{C}$ - 허용과부하 : 300% - 저항치 : 120Ω	- 제품명 : DRA-30A - 제조사 : TOKYO SOKKI - 측정범위 : $\pm 50000\text{Strain}$ - 정밀도 : $\pm 2 \times 10^{-6}$: Strain - 응답주파수 : 2kHz(Max) 32bit A/D converter - 필터대역 : $10 \sim 5000\text{Hz}$

③ 윤중 측정방법

윤중은 침목간 중심에서 각 100mm 떨어진 위치의 중립축에 45° 의 각도를 가지고 8방향으로 스트레인게이지를 부착하고, 이를 결선하여 단면휨의 영향을 배제하여 전단변형을 측정하여 산정하였다(전단력이 윤중이 된다). 이 상태에서 윤중 검정기를 이용하여 10kN 단위로 40kN까지 재하하고 윤중을 검정하였다.



(a) 윤중



(b) 횡압

그림 2.4.1 게이지 부착 방법과 계측 시스템

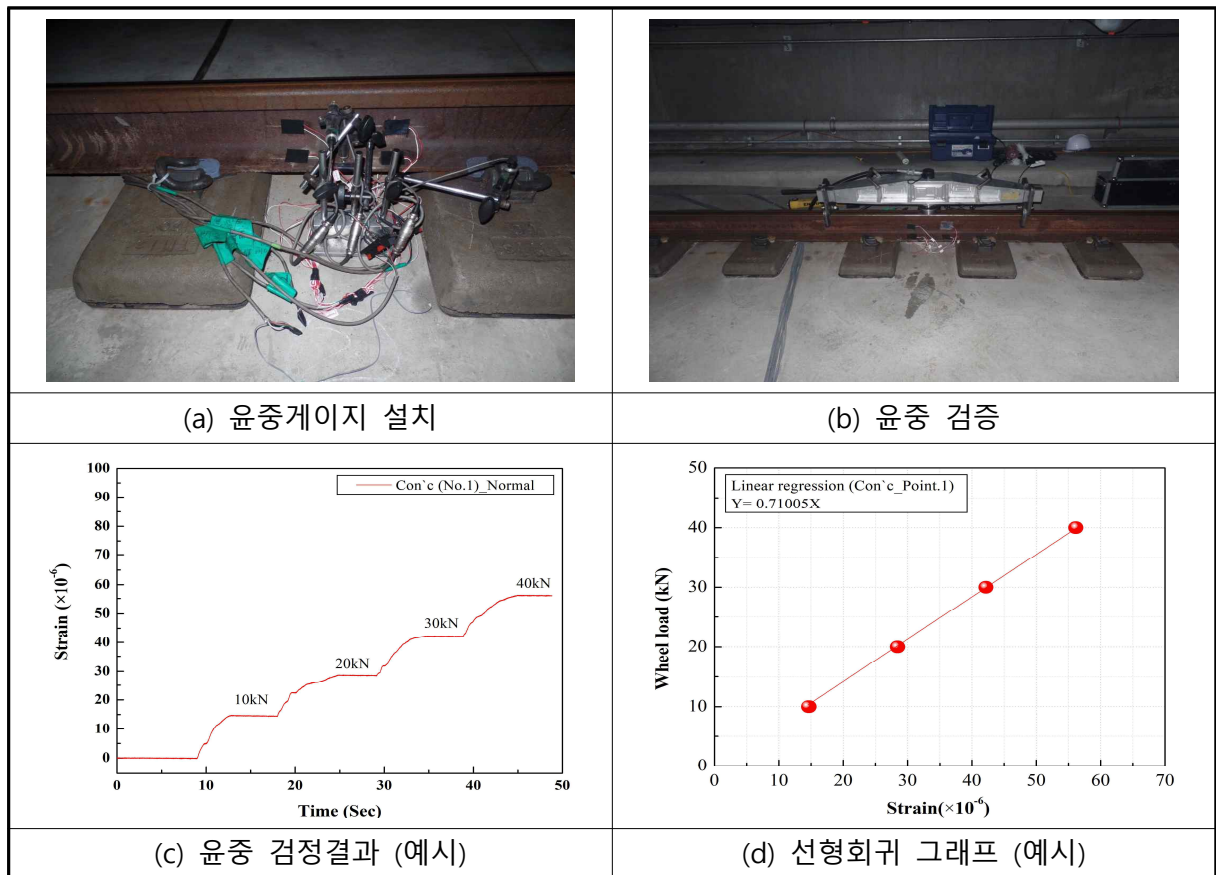


그림 2.4.2 윤중 검증방법

변위는 콘크리트 궤도 고정점을 설치한 후 레일 수직 및 수평 변위와 침목 수직변위를 측정하였다. 침목 간 레일 중심위치에서 레일 수직변위는 레일 저부 상면에, 레일 수평변위는 레일 두부 측면에 설치하였으며 근접한 위치의 침목에 침목 수직변위를 설치하였다.

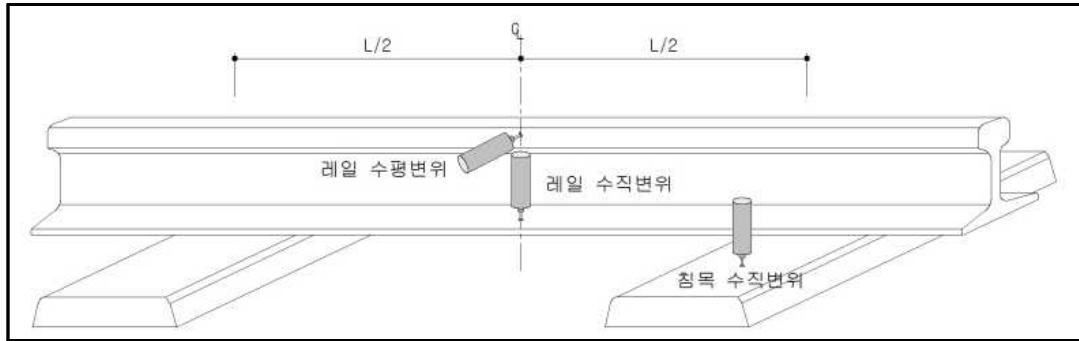


그림 2.4.3 변위계 설치방법



그림 2.4.4 변위계 설치광경

④ 윤중 측정시험 결과

가. 대상교량

열차 차량의 실하중을 측정하기 위한 윤중측정시험은 본 연구의 테스트베드 교량인 경부 고속철도 구간의 활천2교를 대상으로 시험하였다.

시설물명	활천제2교	시험위치	S1~S2 (2@40m, FSM) S3 (1@40m, FSM)
구조형식	PSC BOX Girder	준공년도	2008년 05월
교량제원	L=120.0m B=14.0m	하부구조	중공박스형 교대 2기 중공원형 교각 2기
설계하중	HL하중	기초형식	직접기초

나. 시험 방법

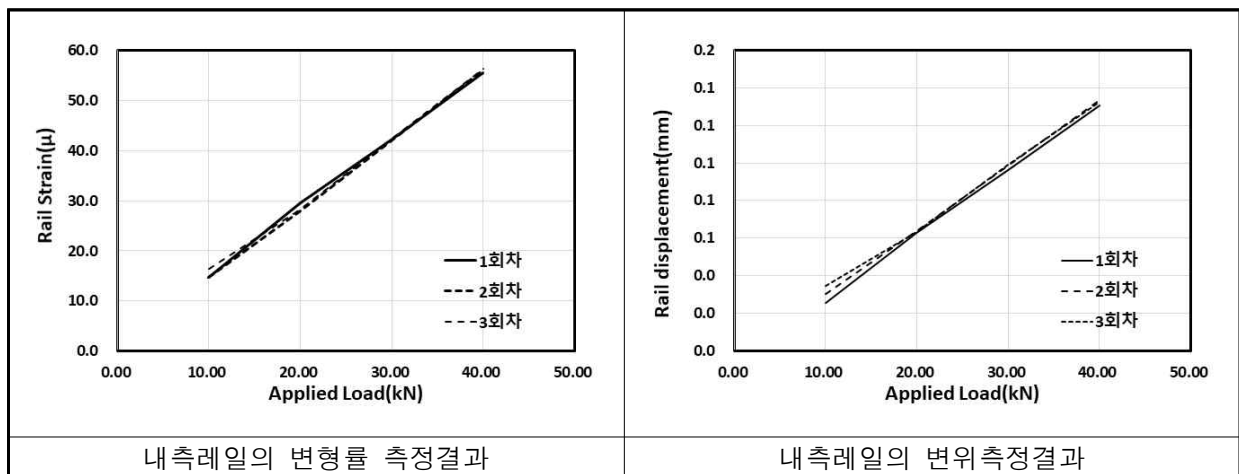
윤증시험은 하선 선로에 대해 외측레일과 내측레일에 대해 침목 중앙부(1,3번)와 침목 직상부(2,4번)에 대해 측정하였으며 윤증 및 횡압을 측정하였다. 윤증 및 횡압 측정은 각 시험개소마다 3회씩 측정하였으며, 결과값의 평균값을 시험값으로 취하였다.

Time	Calibration	시험 위치
01:38~01:40	3번 윤증 검증	
01:41~01:43	4번 윤증 검증	
01:46	3번 횡압 검증	
01:51~01:53	1번 윤증 검증	
01:54~01:57	2번 윤증 검증	
02:03	1번 횡압 검증	

〈윤증 및 횡압시험 전경〉

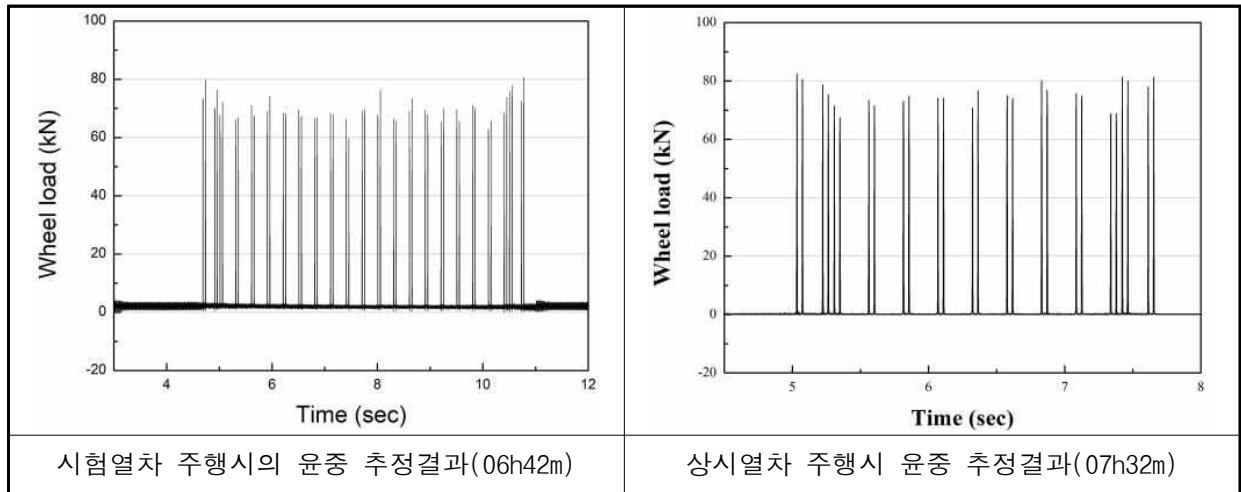


다. 레일 변형률 및 변위 측정결과



라. 윤증 추정 결과

윤중시험 결과로부터 획득한 침목 중앙에서의 변형률을 이용하여 시험열차 및 상시열차의 축중을 환산하여 추정하였다.



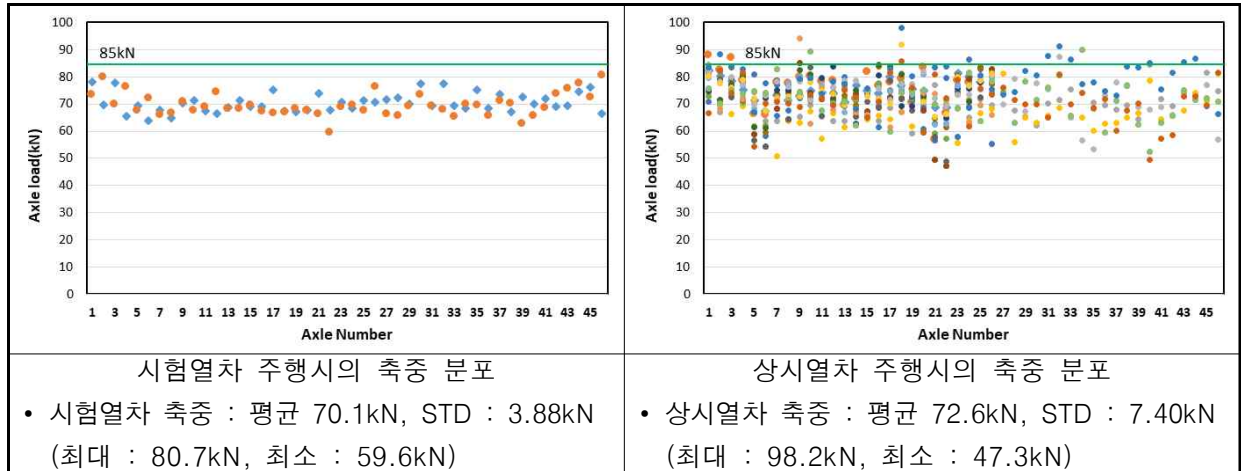
⑤ 열차의 윤중 측정 결과의 분석

실제 열차의 설계하중은 축당 85kN으로서 교량의 안전성 평가시 설계하중을 그대로 적용하고 있으나 이 설계하중은 열차의 자체 중량 외 설비, 장비, 화물 등 부가 중량을 포함한 중량이므로 실제 중량과의 차이가 발생할 수 있다. 또한 안전성 평가 측면에서 도로교의 경우 차량의 계중을 통하여 중량을 미리 파악하고 실측 하중을 이용한 구조해석 값과 비교를 수행하고 있으나, 철도교는 차량기지에서 모든 차량의 중량을 측정하거나 부가 중량을 파악하여 열차의 하중을 파악하는 것은 매우 어려운 일이다. 따라서, 열차의 실 중량을 파악하고 향후 상시운행열차의 하중을 파악하여 안전성 평가에 고려하기 위해서는 열차의 윤중 측정 과정이 필요하게 된다.

본 연구는 이러한 문제의 해결방안의 하나로 궤도의 윤중측정을 통한 열차의 실측 하중과 설계하중의 차이를 분석하였으며, 실측 중량에 의한 하중을 이용할 경우 그 영향이 어느정도 되는지 파악하고자 하였다.

상기의 윤중측정과정을 통하여 의사정적재하 및 상시열차재하 상태에서 열차의 윤중을 측정하고 그 결과를 분석한 결과, 시험열차에 의한 경우 평균 70.1kN, 상시열차에 의한 경우 평균 72.6kN이 측정되어 각각 설계하중 85kN의 82%, 85%로서 각각 18%, 15% 작은 값을 나타내었다. 또한, 상시열차의 경우 시험열차보다 평균축중이 약 4%정도 높은 것으로 나타났으며 축중의 표준편차, 즉 변동성도 큰 것으로 나타났다.

이러한 결과는 열차의 윤중을 궤도상에서 측정하였기 때문에 궤도의 연속성과 레일패드와 같은 완충장치 등으로 열차 하중이 침목상에서 그대로 하부로 전달되는 것이 아니라 분산되는 것에 원인이 있다고 판단된다. 그러나 하중의 그 자체의 크기로 본다면 하중이 분산되더라도 교량으로 가해지는 하중이 동일할 수 있으나 그 분포정도 또는 실제 하중의 크기의 변동성은 명확히 정의하기 어렵다. 또한, 실제 열차의 하중이 설계하중보다 작다면, 응답보정계수 산정시 실측응답과 해석응답을 비교하는 방식에서는 하중의 차이가 해석값에 영향을 주기 때문에 결과적으로는 안전성 평가결과에 영향을 미치게 되며 그러한 영향의 정도는 추가 연구가 필요하다



(3) 교량 현장재하시험

① 대상 교량

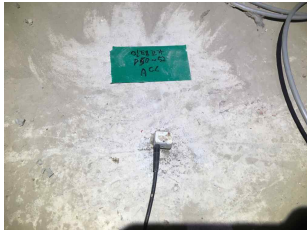
현장재하시험은 경부고속철도 구간의 철도교량에 대한 정밀안전진단의 일환으로 수행된 현장재하시험 데이터 중 PSC BOX교량 32개 교량을 대상으로 분석하였다. 대상교량은 단순교로서 지간 35m의 교량 5개, 지간 40m의 교량 12개, 지간 35m 미만의 교량 3개이며, 2경간 연속교는 지간 25m의 교량 2개, 지간 35m의 교량 1개, 지간 40m의 교량 9개이다.

표 2.4.8 동적응답 분석을 위한 현장재하시험 대상 교량

번호	구성	지간(m)	비고	번호	구성	지간(m)	비고
1	1@40	40	Simple	17	1@40	40	Simple
2	1@40	40	Simple	18	1@40	40	Simple
3	1@40	40	Simple	19	1@40	40	Simple
4	1@24	24	Simple	20	1@40	40	Simple
5	1@40	40	Simple	21	2@40	40	Continuous
6	1@40	40	Simple	22	2@35	35	Continuous
7	1@35	35	Simple	23	2@40	40	Continuous
8	1@32.5	32.5	Simple	24	3@25	25	Continuous
9	1@35	35	Simple	25	2@40	40	Continuous
10	1@40	40	Simple	26	2@40	40	Continuous
11	1@40	40	Simple	27	2@40	40	Continuous
12	1@35	35	Simple	28	2@40	40	Continuous
13	1@40	40	Simple	29	2@40	40	Continuous
14	1@35	35	Simple	30	3@25	25	Continuous
15	1@30	30	Simple	31	2@40	40	Continuous
16	1@35	35	Simple	32	2@40	40	Continuous

② 시험장비 및 센서제원

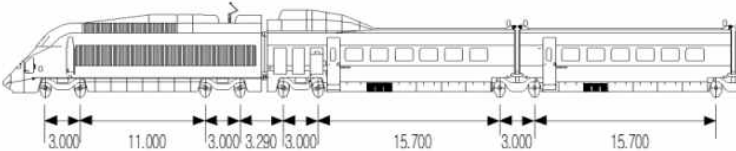
센서 및 장비명		모델명	정격용량	제작사
센서	변형률계	PL-60-11-1L	$20,000 \times 10^{-6}$ Strain	TOKYO SOKKI(일본)
	변위계	CDP-50	50mm	TOKYO SOKKI(일본)
		OU-30	30mm	TOKYO SOKKI(일본)
	가속도계	ARF-10A, 20A	1.02g, 2.04g	TOKYO SOKKI(일본)
측정기	정·동적 재하시험기	DRA-30A	—	TOKYO SOKKI(일본)

		
변형률 게이지	변위 게이지	가속도 게이지

③ 시험열차 제원

표 2.4.9 시험하중 제원 및 축하중

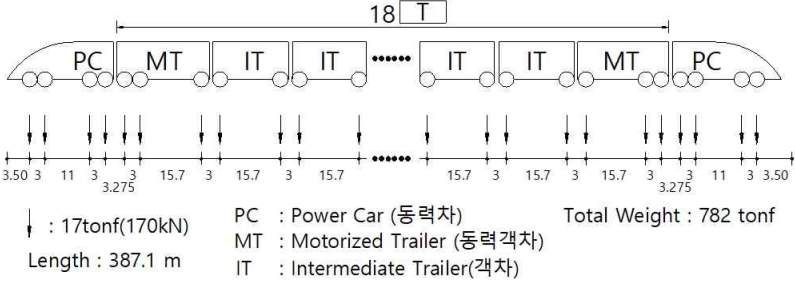
계측 열차 종류 (KTX 열차(20량))		축 하 중		비 고
		동력차(PC)	객차(MT, IT())	
시험열차	170km/h	170kN	170kN	상·하선 매일 1회 운행
상시열차	250 ~ 300km/h	170kN	170kN+승객탑승	상시 주행



동력차 동력객차 객차



18 T



↓ : 17tonf(170kN) PC : Power Car (동력차) Total Weight : 782 tonf
Length : 387.1 m MT : Motorized Trailer (동력객차)
IT : Intermediate Trailer (객차)

④ 시험방법

현장재하시험 열차는 KTX차량으로서 정적 및 동적재하시험에 사용되는 재하시험열차(Testing train), 운영 개시 전 시험운전하는 시험운행열차(First train), 운영 개시 후 통과하는 상시운행열차(Service train)로 구분하였다.

시험운행열차는 170km/rh로 주행하며 상, 하선 각 1회 주행한다. 상시운행열차는 KTX 열차 또는 KTX-S 열차로써 130~300km/hr의 속도로 선로조건에 따라 속도가 다르며

승객이 탑승한다. 정적재하시험은 차량의 완전 정차가 곤란하여 의사정적재하로 하였다. 동적재하시험은 현장여건을 고려하여 특정속도 범위내에서 증속운행하였다.

현장재하시험에 사용된 센서들은 변형률게이지, 처짐기, 가속도계로서 사전 구조해석에 의해 최대응답이 발생하는 지점에 부착하였다. 대상 교량은 PSC BOX 교량으로써 1 cell형식이며 단면은 좌우 대칭이다. 응답값 계측을 위한 변형률게이지는 박스단면 내부의 상하면에 부착하였고 가속도계는 슬래브 상부, 처짐기는 박스 단면 하면의 좌우측 연단에 부착하였다.

(4) 현장재하시험 결과 분석

① 측점위치에 따른 영향

지간 40m의 단순 교량을 대상으로 상선 또는 하선의 하중 중심선에 주행선로에 가까운 쪽과 먼쪽의 변위에 대한 충격계수를 계산하였다. 여기서 충격계수는 각 교량의 의사정적시험을 기준으로 동적재하시험 및 상시열차에 대한 충격계수를 모두 포함하여 나타낸 것이다. 가까운 쪽의 충격계수는 평균 1.004, 변동계수 2.967%이며, 먼 쪽의 충격계수는 평균 1.070, 변동계수 6.427%로 계산되어 먼쪽의 충격계수가 두배 이상의 큰 편차를 나타내었다. 충격계수는 열차속도가 증가할수록 증가하였으며, 먼 쪽의 충격계수의 증가율은 가까운 쪽 보다 그 영향이 크게 나타남을 알 수 있다. 또한, 동일 속도에 대해서 충격계수의 분산은 먼 쪽이 가까운 쪽 보다 더 크게 나타났으며 비틀림에 의한 추가 변위와 변동성도 크게 작용함을 알 수 있다. PSC BOX 교량은 BOX 단면형식으로서 하중 재하시 비틀림 변형이 크게 발생하므로 교량의 도심위치에서 멀어질수록 비틀림에 의한 회전변위값은 커지게 되므로 교량 하면에서 하중재하위치와 가까운 쪽(near side, DT1)과 먼 쪽(far side, DT2)의 변위차이가 크게 발생한다. 따라서, 측정결과 분석시 측정점의 위치와 관계없이 최대값만을 선택하여 응답보정계수의 분석에 사용하는 경우 구조해석에서 단면의 비틀림의 영향이 고려되지 않거나 교량의 동적증폭효과가 큰 경우 양 측점에서의 응답값의 차이는 커지게 되므로 주의할 필요가 있다.

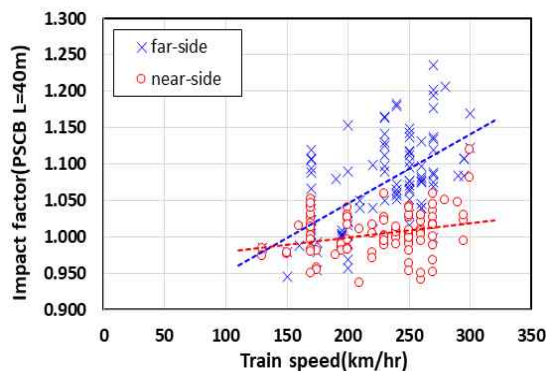


그림 2.4.5 측점위치에 따른 충격계수의 영향

② 정적재하시험결과에 대한 동적재하시험 및 상시열차주행 응답의 비교

동적재하시험(test train)과 상시열차주행(service train)에 의한 충격계수의 차이를 비교하기 위하여 의사정적시험에 의한 변위를 기준으로 동적재하시험과 상시열차주행시의

충격계수를 각각 구하였다. 동적재하시험 및 상시열차주행은 선로 조건에 따라 속도의 제한이 있으므로 교량마다 주행속도는 다르지만 동적재하시험의 주행속도는 130~270km/hr의 범위에서, 상시열차는 110~300km/hr의 범위에서 측정되었다. 동적주행시험은 대체로 230km/hr, 250km/hr, 270km/hr 속도가 가장 많고 상시열차의 주행속도는 비교적 넓은 속도 범위에서 주행되었다. 그 결과 동적재하시험 및 상시열차 모두 속도가 증가함에 따라 증가하였으며 0.870~1.130 범위에 분포하였다. 230km/hr 또는 250km/hr에서 동적재하시험에 의한 충격계수가 크게 나타나고 있으나 속도가 증가할수록 상시열차주행에 의한 충격계수가 더 크게 나타남을 확인 할 수 있다.

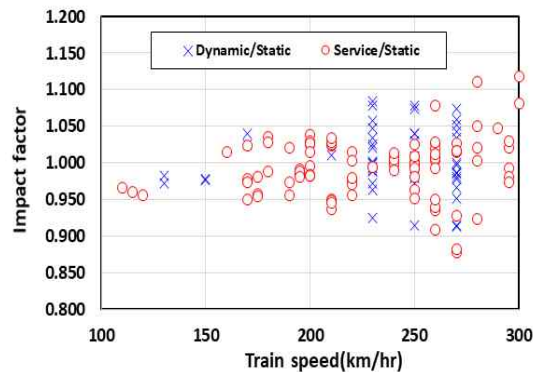


그림 2.4.6 정적재하시험에 대한 동적주행 및 상시주행시의 충격계수

③ 최초열차주행에 대한 동적재하시험 및 상시열차주행 응답의 비교

그림은 최초열차(first train)에 의한 최대변위값을 기준으로 동적재하시험 및 상시열차주행시의 변위에 대한 충격계수를 계산하여 나타낸 것이다. 현장재하시험에서 정적재하시험 또는 의사정적재하시험이 어려운 경우 열차 운영 개시전 1회 운행하는 열차의 응답을 충격계수 값으로 계산하였을 때 동적주행시험 및 상시열차주행 결과와 얼마나 차이가 있는지를 파악하기 위한 것으로 최초열차는 승객이 탑승하지 않은 상태이므로 승객으로 인한 열차하중의 영향을 배제한 경우에 대해 정적재하시험 결과와의 차이를 파악할 수 있다. 그 결과 열차 주행속도별 충격계수는 정적재하시험을 기준으로 한 경우와 유사한 분포를 나타내지만 최대 충격계수는 약 0.890~1.100의 범위로 나타났다. Table 3의 충격계수의 최대값을 보면 최초열차의 경우 0.942~1.100의 범위로 재하시험열차보다는 크고 상시열차보다는 작은 값을 나타내었다.

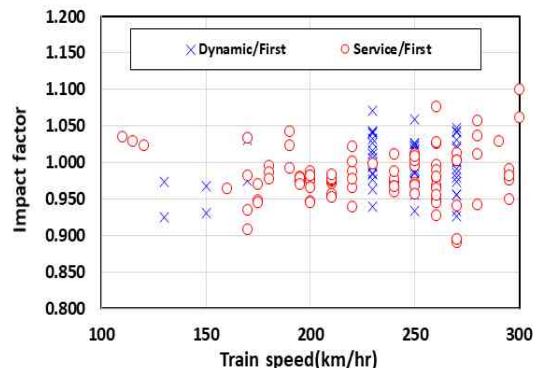


그림 2.4.7 최초열차에 대한 동적주행 및 상시주행시의 충격계수

④ 상시주행 시험결과와 활용시 내하력에 따른 미치는 영향

응답보정계수의 산정시 상시열차주행에 의한 응답을 활용하기 위한 기준값으로서 정적재하시험 결과와 최초열차주행시의 응답을 각각 적용하였을 때 상시열차주행 응답의 충격계수 차이를 비교하였다. 여기서 정적재하시험은 의사정적재하시험에 의한 결과이다. 대상교량에 대해 정적재하시험 및 최초열차주행에 대한 상시열차주행의 최대 충격계수의 절대값을 나타낸 것으로 교량별로 최대값이 발생하는 조건이 다를 수 있다. 즉, 어떤 교량은 정적재하시험에 의한 충격계수가 크고, 어떤 교량은 최초열차에 의한 충격계수의 영향이 더 크게 나타났다. 이는 최대 변위가 발생하는 위치, 속도에 따른 동적증폭효과의 정도, 동적 주행시의 진동특성 등 여러 가지 원인이 있을 것으로 판단되나 명확히 구분하기는 어렵다.

아래 표의 충격계수의 최대값의 차이로 보면 재하시험과 상시열차에 의한 충격계수의 차이는 약 -5.93~4.96%, 최초열차와 상시열차의 충격계수의 차이는 약 -5.32~7.18%로서 약 $\pm 6\sim 7\%$ 정도 발생하였다.

〈단순 PSC BOX교에서의 최대 충격계수의 차이〉

No.	Service/Static (a)	Dynamic/Static (b)	Service/First (c)	Difference (b-a)%	Difference (c-a)%
1	0.991	1.041	0.981	4.96	-0.96
2	1.039	1.025	0.989	-1.45	-5.06
3	1.027	1.026	0.996	-0.15	-3.06
4	0.935	0.973	0.949	3.75	1.42
5	1.007	1.029	0.969	2.21	-3.85
6	1.004	0.996	1.023	-0.74	1.90
7	1.021	1.047	1.043	2.63	2.27
8	1.004	1.034	1.012	3.05	0.86
9	1.111	1.085	1.057	-2.57	-5.32
10	1.078	1.078	1.027	0.00	-5.15
11	1.050	1.041	-	-0.96	-
12	1.006	0.989	1.077	-1.67	7.18
13	1.029	1.021	0.984	-0.77	-4.53
14	1.024	1.008	1.034	-1.61	1.00
15	1.022	1.002	1.036	-1.97	1.49
16	0.923	0.963	0.942	4.05	1.91
17	1.119	1.059	1.100	-5.93	-1.89
18	1.026	0.999	1.013	-2.72	-1.38
19	1.013	1.043	1.012	2.99	-0.08
20	0.994	0.988	0.999	-0.54	0.53

한편, 국내에서 사용되고 있는 교량의 내하력 평가는 구조물의 기본 내하력에 구조물의 정적응답과 동적응답에 의한 응답보정계수를 적용하는 방법을 사용한다. 내하력 평가의 산식을 구조물의 변위응답으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 RF &= RF_0 \times K_s \\
 &= RF_0 \times \frac{\delta_{st,cal}}{\delta_{st,mcs}} \times \frac{1+i_{dyn,cal}}{1+i_{dyn,mcs}}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

여기서, RF 는 교량의 내하력이며, RF_0 는 교량의 기본내하력, K_s 는 정적 및 동적응답 보정계수이다. $\delta_{st,cal}$ 과 $\delta_{st,mcs}$ 는 교량의 정적변위로서 각각 해석값과 실측값이다. $1+i_{dyn,cal}$ 과 $1+i_{dyn,mcs}$ 는 각각 충격계수로서 해석값과 실측값이다.

현장재하시험으로부터 얻은 실측값을 활용하기 위하여 식(1)의 보정계수항을 전개하면 식(2)와 같이 표현될 수 있다. 즉, 식(2)에서 보여지듯이 동적응답 보정계수항의 분모항을 실측정적변위($\delta_{st,mcs}$)와 실측동적변위($\delta_{dyn,mcs}$)로 나타내면 실측정적변위는 서로 상쇄되므로 평가식은 비교적 간단히 재정리 될 수 있다. 그러나 이러한 계산 방법은 정적응답 보정계수와 동적응답보정계수의 산출과정을 단순히 수학적 기호에 의해 산정한 것으로 정적 및 동적응답보정계수의 산출과정과 의미를 검토할 필요가 있다.

$$\begin{aligned}
 RF &= RF_0 \times \frac{\delta_{st,cal}}{\delta_{st,mcs}} \times \frac{1+i_{dyn,cal}}{1+i_{dyn,mcs}} \\
 &= RF_0 \times \frac{\delta_{st,cal}}{\delta_{st,mcs}} \times \frac{1+i_{dyn,cal}}{\frac{\delta_{dyn,mcs}}{\delta_{st,mcs}}} \\
 &= RF_0 \times \frac{\delta_{st,cal} \times (1+i_{dyn,cal})}{\delta_{dyn,mcs}}
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

식(2)에서 정적응답보정계수는 각 측정점에서 측정된 실측정적변위($\delta_{st,mcs}$)에 대해 그 각각의 측정에서의 해석정적변위($\delta_{st,cal}$)의 비를 나타낸 것으로 최대값 또는 수용가능한 값들 중의 평균값을 사용한다. 동적응답보정계수의 실측충격계수($1+i_{dyn,mcs}$)는 실측정적변위($\delta_{st,mcs}$)에 대한 실측동적변위($\delta_{dyn,mcs}$)의 비로서 실측정적변위($\delta_{st,mcs}$)는 의사정적상태 또는 완전 정차시의 특정 지점에서의 변위값이며, 실측동적변위($\delta_{dyn,mcs}$)는 그 측정에서의 교량의 동적증폭 효과를 고려하기 위한 증속 주행시험 결과로 얻어진 실측 최대값이다. 따라서, 정적응답보정계수와 동적응답보정계수는 개념적으로 구조물의 정적 및 동적거동을 나타내기 위한 것이며, 동일한 기호로 표시되는 실측정적변위($\delta_{st,mcs}$)는 동적응답보정계수의 실측정적변위($\delta_{st,mcs}$)와 다를 수 있다. 따라서, 식(2)의 분모항의 정적응답보정계수와 동적응답보정계수의 실측정적변위($\delta_{st,mcs}$)는 경우에 따라서는 같은 측정점에서 각 주행조건에 따라 최대값을 나타내는 경우도 있을 수 있으나, 각각의 측정위치, 하중의 재하상태, 교량의 동적효과 등에 있어서 다른 값을 나타낼 수 있다.

따라서, 상기의 단순PSC BOX 교량을 대상으로 분석한 결과에 기초하여 재하시험대신 상시열차의 응답을 활용할 경우 정적재하시험에 의한 충격계수의 약 $\pm 6\sim 7\%$ 변동범위가 발생할 수 있음을 고려하고 내하력 평가식의 응답보정계수의 의미를 종합적으로 고려하면 상시운행열차에 의한 충격계수의 변동성만에 의한 내하율 영향은 0.943~1.064 정도의 값의 범위로 계산된다. 이 결과는 상시운행열차에 의한 측정값의 변동성만을 고

려한 것으로 수정된 응답보정계수식에서 해석값과 고려된 변수는 고려되지 않은 값이다. 즉, 응답보정계수에서 계산값 또는 해석값은 기존 또는 수정 응답보정계수의 값에는 영향을 주지 않은 실측값 변수에만 영향을 주는 것으로 단순히 유사변수에 의한 간략화에 의한 단순화된 식이 아니라 기존 식의 변수의 의미가 유지된 상태에서 변수의 변동성을 나타낸 것이다. 내하율 측면에서 변수가 될 수 있는 열차 운중의 실제 크기, 계산 충격계수의 산정값의 타당성은 실제 내하율에 영향을 미치는 변수이지만 상시열차에 의한 응답보정계수 사용여부에 대한 문제에서는 별도로 고려될 필요가 있다.

그래서, 본 연구의 목적 범위내에서 기존의 재하시험에 의한 정적 및 동적시험결과에 의한 실측값 대신 상시운행열차에 의한 실측값을 사용할 경우 기존 재하시험결과 대비 약 $\pm 7\%$ 정도의 편차가 발생할 수 있고 이 값은 내하력의 약 6% 정도의 변화를 줄 수 있다. 따라서, 현장재하시험 여건이 좋지 않은 상황에서 안전성 평가가 필요한 경우 상기의 내하력의 평가의 변동성이 허용된다면 상시운행열차에 의한 응답보정계수의 산정 및 내하력 평가도 가능하다고 할 수 있다.

2.4.5 궤도구조 및 실주행열차의 크기를 고려한 철도교의 구조해석 모델 (연구성과 2-3, 2-4)

(1) 열차의 하중의 분배 및 고려방법

① 레일 및 침목 위치에서의 하중 영향선

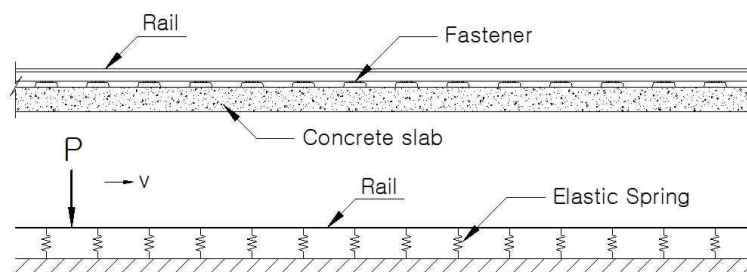
레일에 작용하는 열차하중은 레일패드와 침목을 통하여 교량 상판으로 전달되므로 열차하중의 전달과정에 있어서의 하중의 크기 및 분포, 레일패드의 강성의 영향 등을 분석하였다.

레일은 침목상의 연속보로서 레일패드에 의해 스프링으로 지지되어 있는 것으로 하여 연속지지스프링 구조로 모델링하였으며, 침목 직상 및 침목 중앙부의 레일 위치에서 영향선을 다음과 같은 조건에서 구하였다.

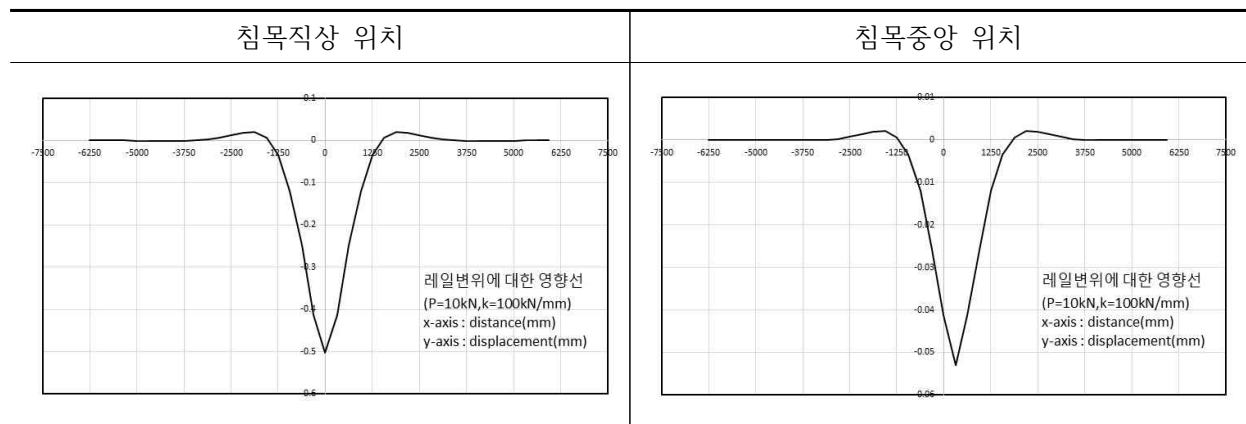
표 2.4.10 레일제원 및 물성치

레일 제원	단면적 (cm^2)	단면2차모멘트 (cm^4)	탄성계수 (MPa)	레일패드강성 (kN/mm)
	76.86	3,055	210,000	100

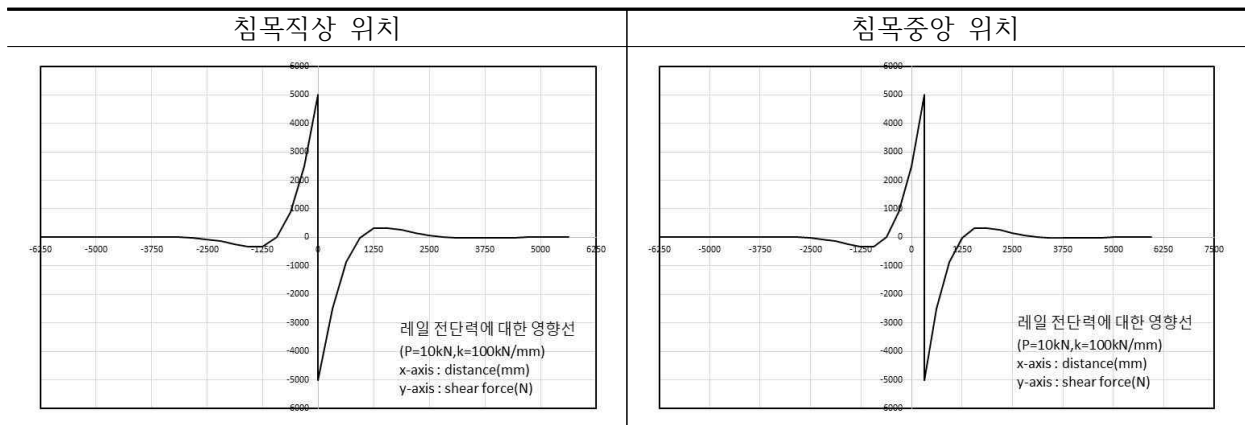
－ 구조해석 모델링



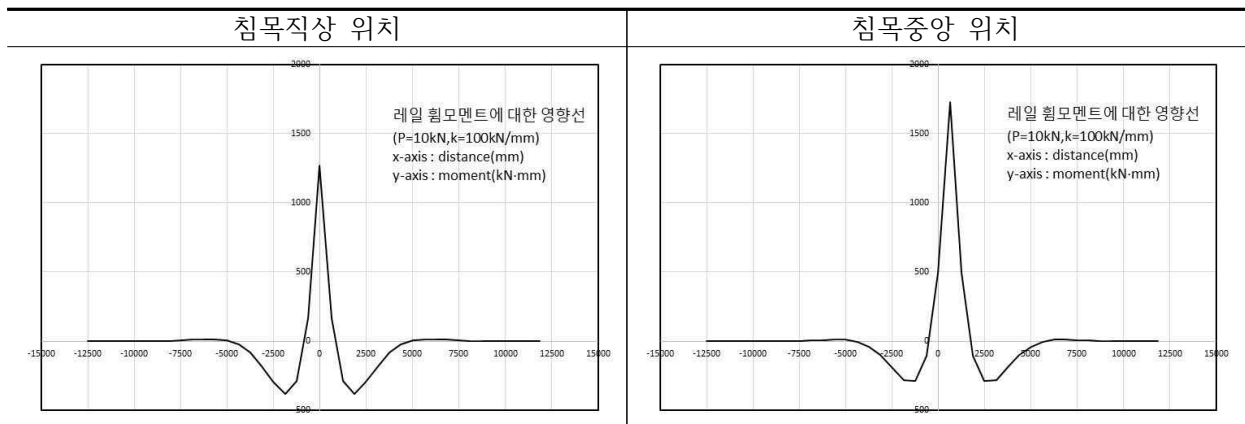
－ 레일 변위에 대한 영향선 : 하중 10kN 재하시



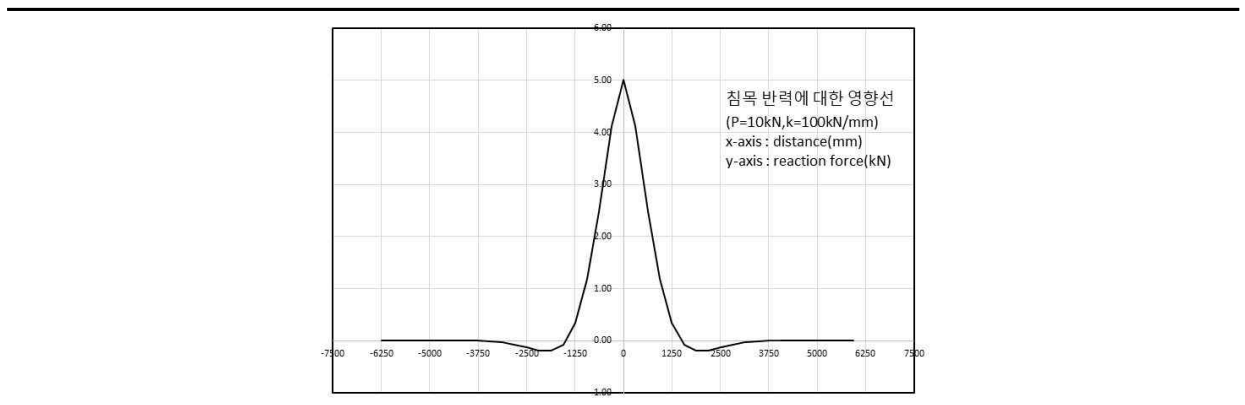
– 레일 전단력에 대한 영향선 : 하중 10kN 재하시



– 레일 모멘트에 대한 영향선 : 하중 10kN 재하시

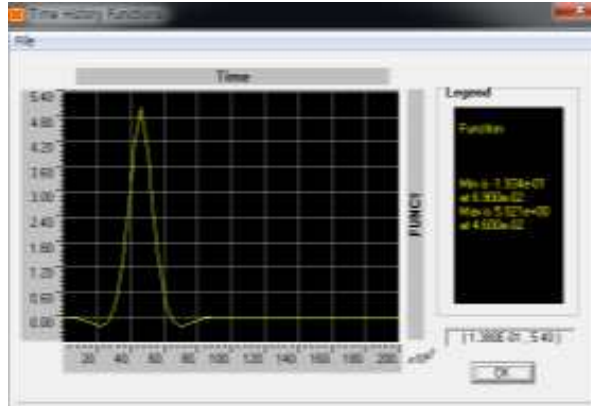


– 침목 반력에 대한 영향선 : 하중 10kN 재하시



② 단일 축하중에 대한 하중함수(P=10kN)

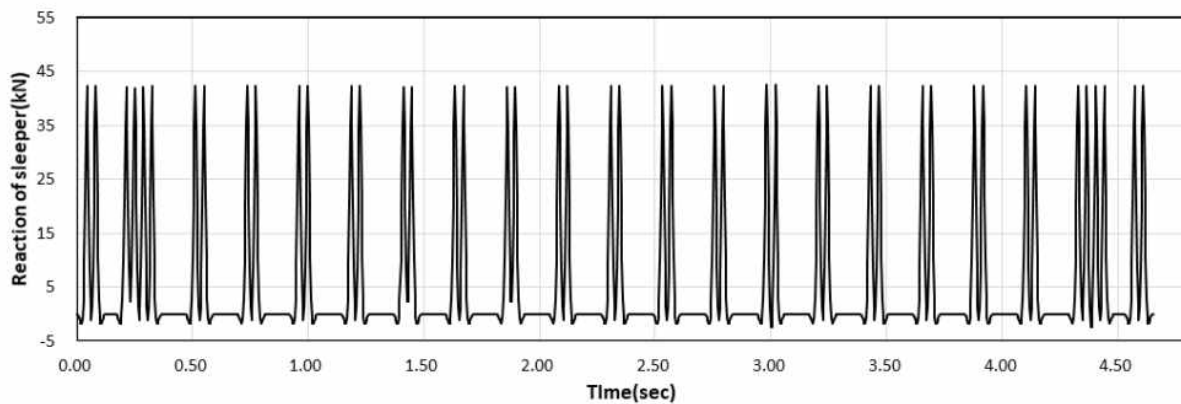
열차주행시 임의의 침목에는 임의의 열차 축중과 인접해 있는 축중으로 인해 열차하중의 중첩이 발생한다. 이로 인해 임의의 침목에서는 최대 반력이 발생하며 열차의 축중 수와 인접거리의 영향을 고려한 침목의 반력을 계산할 수 있다. 이 침목의 반력은 도상과 구조물로 전달되는 하중으로 열차의 주행 효과를 나타낼 수 있는 하중함수가 된다.



침목하중에 대한 Load Function($V=300\text{km/h}$)

③ 영향선에 의한 열차하중의 계산값

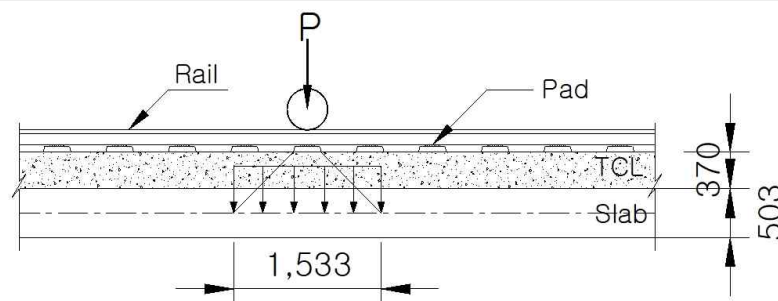
- 축중 : 85kN, 레일패드강성 : 100kN/mm, KTX 열차 주행시, $V=300\text{km/hr}$



④ 도상에 의한 종방향 하중 분산효과

- TCL층 두께를 370mm로 가정하고 상부슬래브 두께를 고려할 경우 침목에 작용하는 하중은 종방향으로 상부슬래브의 단면 도심축을 기준으로 1,533mm에 걸쳐 등분포하중으로 분포함

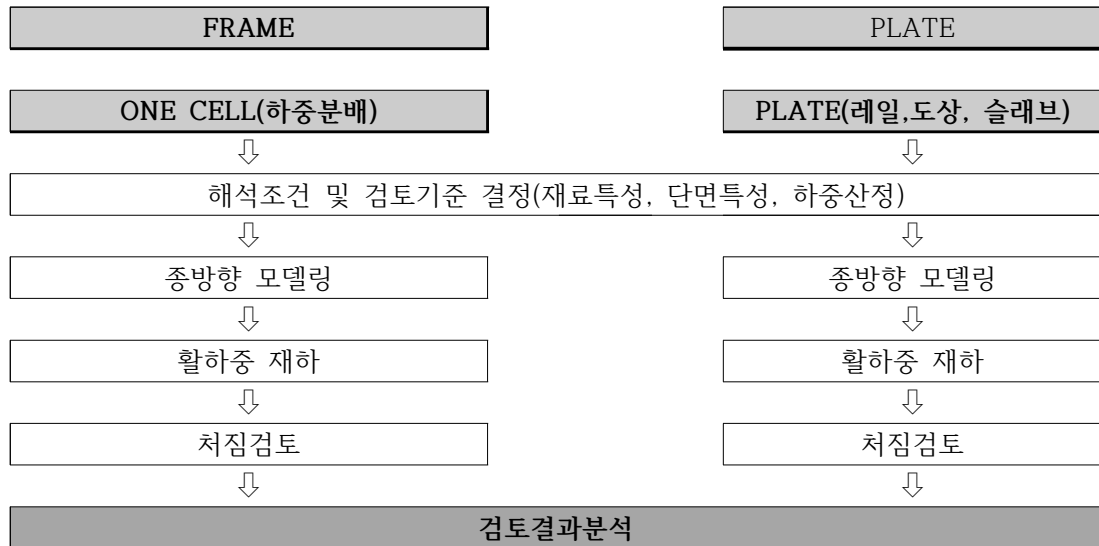
종방향 하중 분포



(2) 궤도 및 교량구조의 구조해석 모델

가. 해석모델링

① 해석절차



② 해석모델

구 분		모델 조건	하중조건
Model 1	1-1	Frame 모델 (Beam Model)	집중하중(170kN) 재하
	1-2		집중하중(170kN) 편재하(상선 또는 하선)
	1-3		중방향 분포하중(106.25kN) 재하
	1-4		중방향 분포하중(106.25kN) 편재하(상선 또는 하선)
Model 2	2-1	3차원 Plate 모델 (단면)	집중하중(170kN) 재하(상선 또는 하선중심)
	2-1		중방향 분포하중(106.25kN) 재하(상선 또는 하선)
	2-3		중방향+횡방향 분포하중(35.967kN) 재하(상선 또는 하선)
Model 3	3-1	3차원 Plate 모델 (단면+Con'c 도상)	집중하중(170kN) 재하(상선 또는 하선)
	3-1		중방향 분포하중(106.25kN) 재하(상선 또는 하선)
	3-3		중방향+횡방향 분포하중(35.967kN) 재하(상선 또는 하선)
Model 4	3-1	3차원 Plate 모델 (단면+Con'c 도상 +Rail)	집중하중(170kN) 재하(상선 또는 하선)
	3-1		중방향 분포하중(106.25kN) 재하(상선 또는 하선)
	3-3		중방향+횡방향 분포하중(35.967kN) 재하(상선 또는 하선)
Model 5	5-1	3차원 Plate 모델 (단면+Con'c 도상 +Rail)	집중하중(170kN) 재하, 중방향 분포하중(106.25kN), 중방향+횡 방향 분포하중(35.967kN) 재하(상선 또는 하선) 지점부 강성변화 모델($k = 10^{10} kN/mm$)
	5-2		집중하중(170kN) 재하, 중방향 분포하중(106.25kN), 중방향+횡 방향 분포하중(35.967kN) 재하(상선 또는 하선) 지점부 강성변화 모델($k = 10^8 kN/mm$)
	5-3		집중하중(170kN) 재하, 중방향 분포하중(106.25kN), 중방향+횡 방향 분포하중(35.967kN) 재하(상선 또는 하선) 지점부 강성변화 모델($k = 10^6 kN/mm$)

A 3D perspective view of a rectangular reinforced concrete slab. The slab is light blue and has a grid of darker blue reinforcement bars embedded within it. The bars are arranged in a regular pattern across the top surface. The slab is supported by a base, and there is a small square opening on the left side of the front face.

A 3D finite element mesh of a cantilever beam. The beam is rectangular with a U-shaped notch at the fixed end. The mesh is composed of a grid of small, rectangular elements, colored in a light blue/cyan. The beam is oriented horizontally, with the fixed end on the left and the free end on the right.

– 51 –

④ 일반사항 및 해석조건

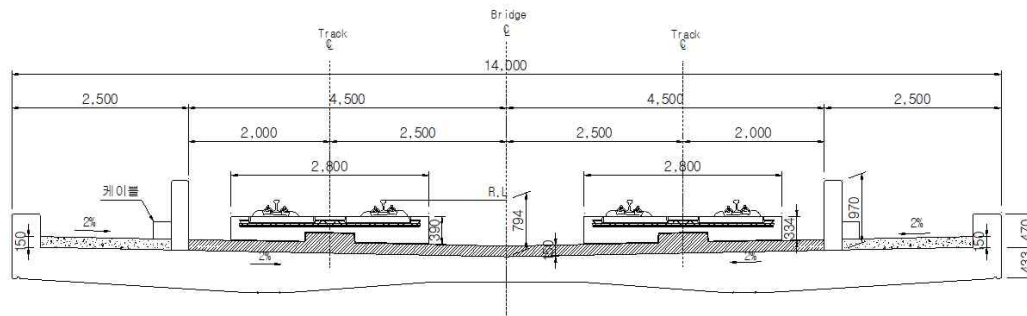


그림 2.4.11 분포폭당 열차하중

- 횡방향 하중분포폭 : $a_1 = b + 2a + h = 2.80 + 2 \times 0.15 + 0.35 = 3.45 \text{ m}$
- 횡방향 하중분포폭 : $a_2 = 0.3 + 0.512 + 0.35/2 = 0.987 \text{ m}$
- 종방향 하중분포폭 : $b = 2(s + a) + h = 2((0.39 + 0.339)/2 + 0.15) + 0.35 = 1.37 \text{ m}$
- 분포폭당 열차하중 : $w_l = P / (a_1 \times b) = 170 / (3.450 \times 1.600) = 35.967 \text{ kN/m}^2$
- 종방향 열차하중 : $P_l = P / b = 170 / 1.37 = 106.25 \text{ kN/m}^2$

- － 하중재하도

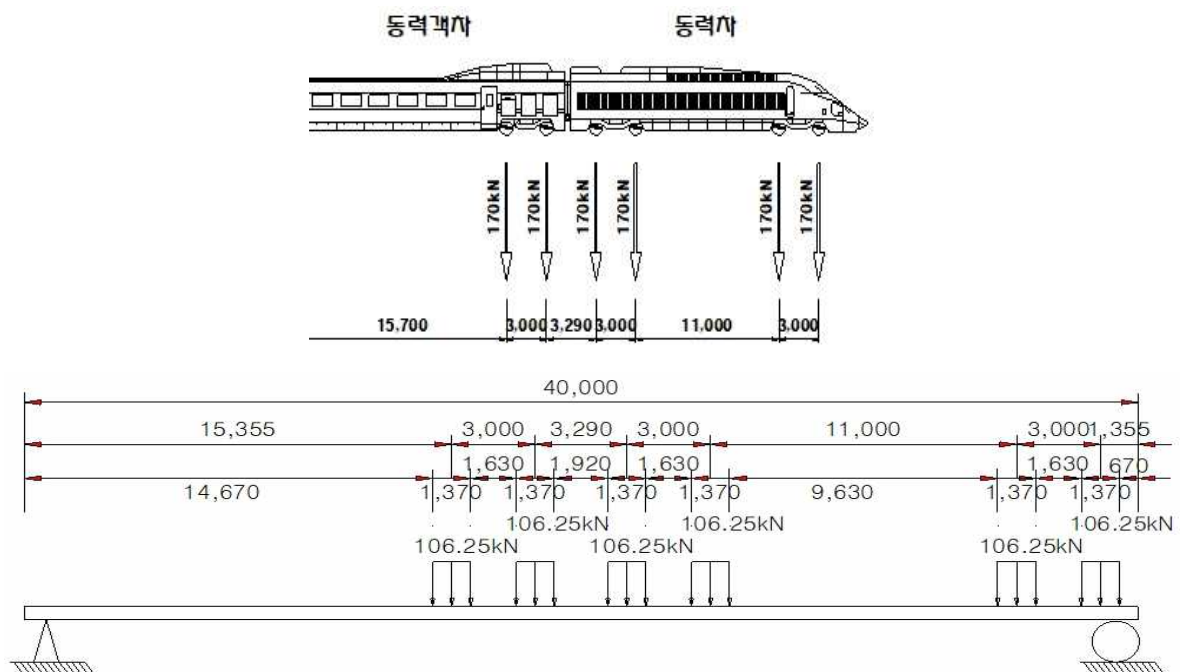
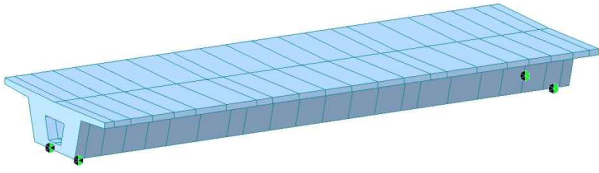
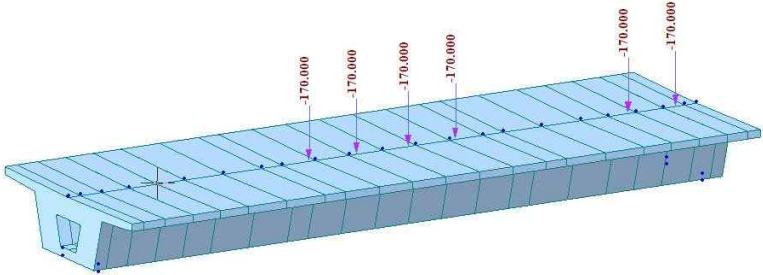
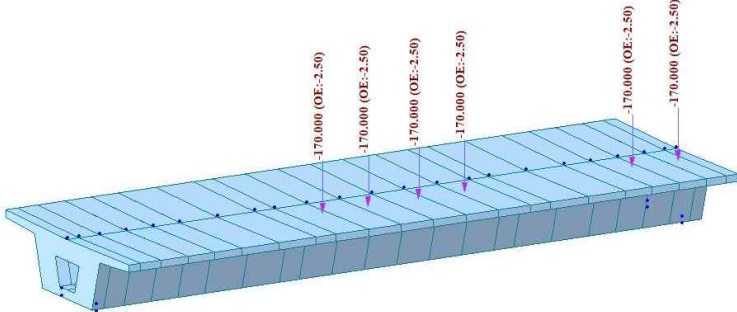
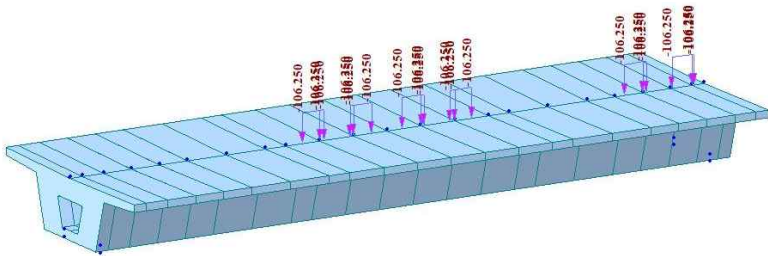
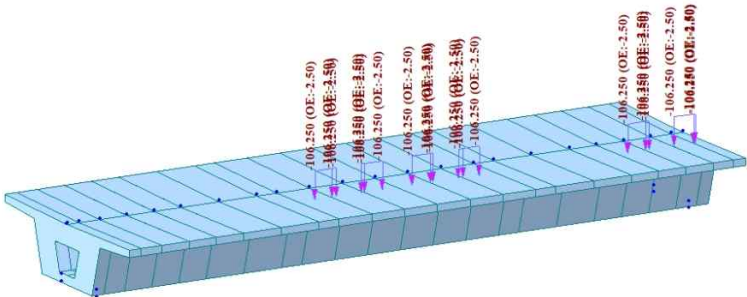


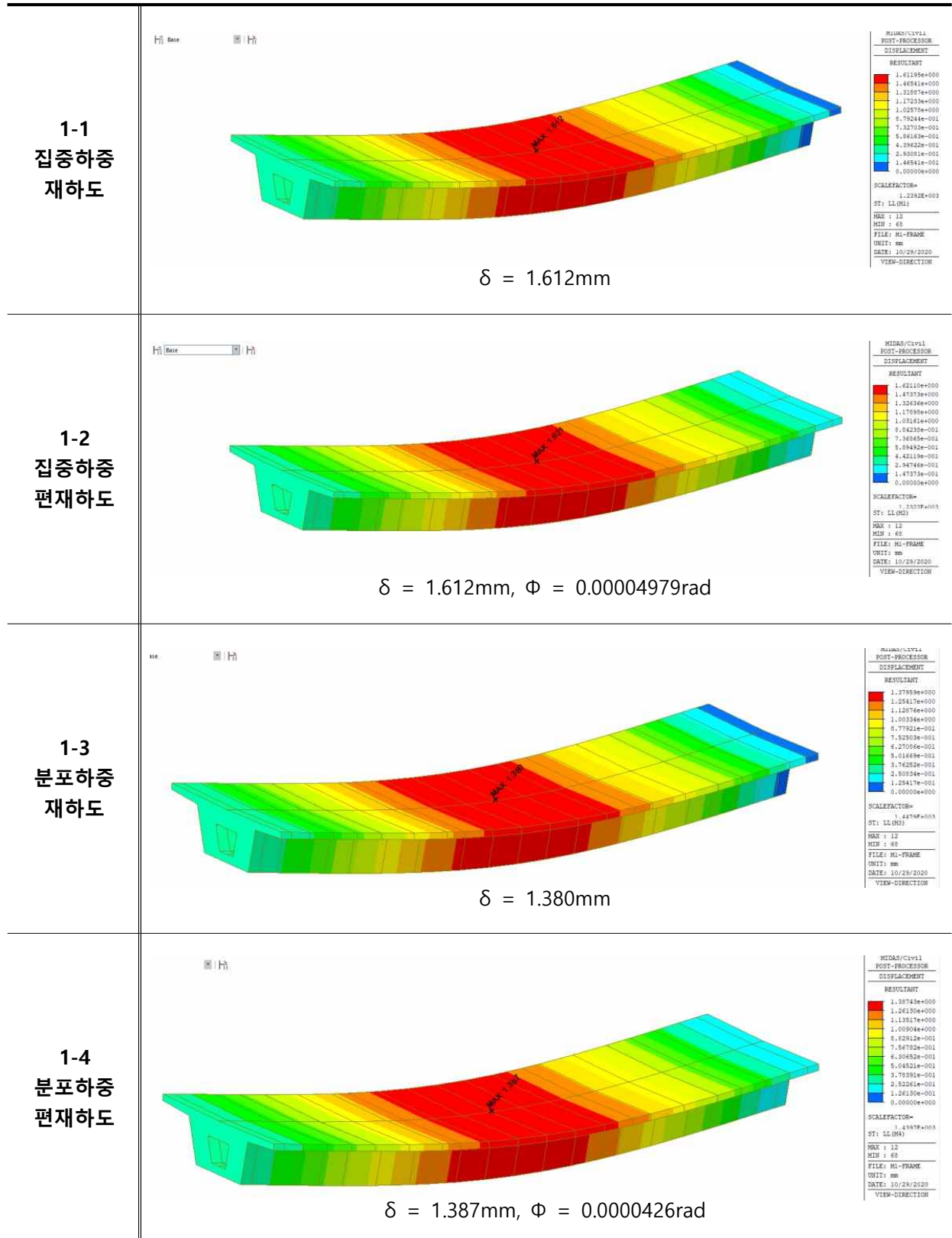
그림 2.4.12 하중재하도

(3) FRAME(Beam) 모형의 구조해석 예시(모델 1)

- [Model 1] Frame 모델, 하중 고려 방법에 따른 연직처짐 및 비틀림 처짐 검토

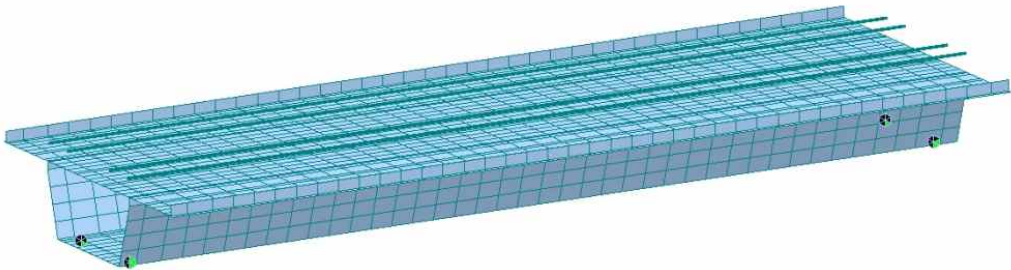
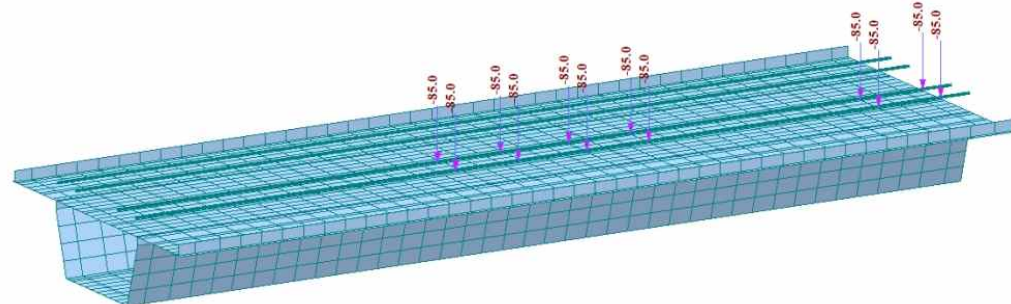
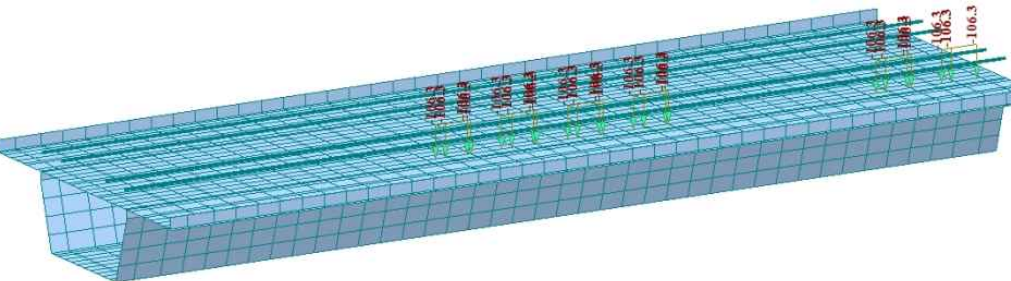
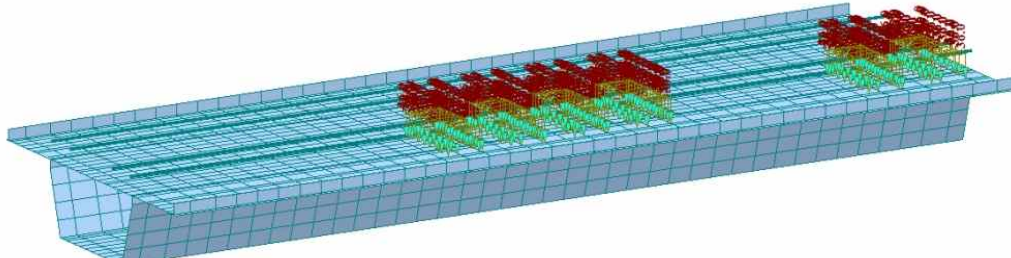
Model 1 모델링 및 경계조건	
1-1 집중하중 재하도	
1-2 집중하중 편재하도	
1-3 분포하중 재하도	
1-4 분포하중 편재하도	

- [Model 1] Frame 모델, 하중 고려 방법에 따른 연직처짐 및 회전각

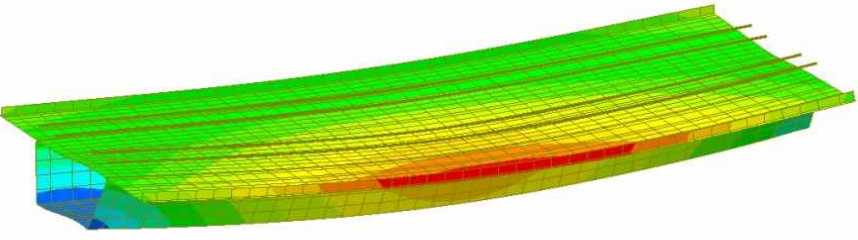
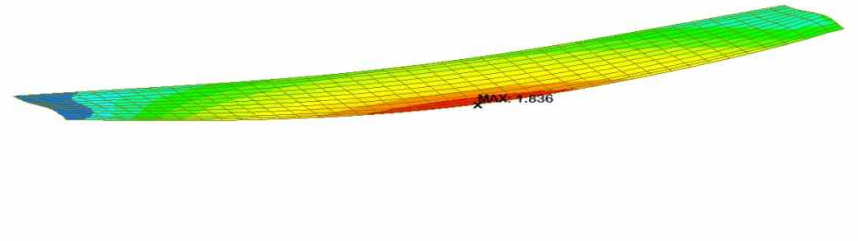
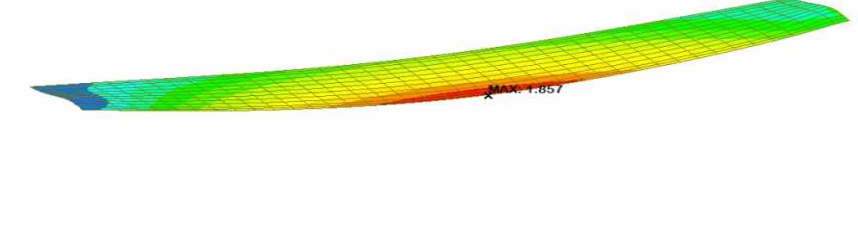
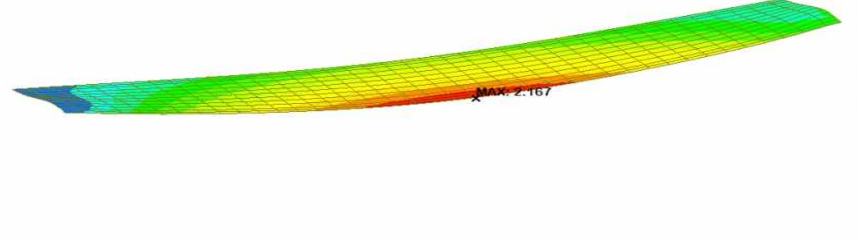


(4) 철도교 도상 및 레일을 고려한 PLATE 모델 및 구조해석 예시(모델4)

- [Model 4] PLATE 모델(단면+도상+레일), 하중재하 방법에 따른 처침 검토

Model 4 모델링 및 경계조건	
4-1 집중하중 재하도	
4-2 종방향 분포하중 재하도	
4-3 종방향 + 횡방향 분포하중 재하도	

- [Model 4] 박스단면+콘크리트 도상+레일을 고려한 모델의 박스거더 하면의 처짐 검토

해석결과 (전체모델)	 MIDAS/Civil POST-PROCESSOR DISPLACEMENT RESULTANT 3.00617e-003 2.73288e-003 2.45959e-003 2.19631e-003 1.91302e-003 1.63973e-003 1.36644e-003 1.09315e-003 8.19865e-004 5.46576e-004 2.73288e-004 0.00000e+000 SCALEFACTOR= 6.6530E+003 ST: AA MAX: 1382 MIN: 174 FILE: M4-PLATE+ UNIT: mm DATE: 10/29/2020 VIEW-DIRECTION
4-1 집중하중 재하도 (박스하면)	 MIDAS/Civil POST-PROCESSOR DISPLACEMENT RESULTANT 1.83551e+000 1.46864e+000 1.50178e+000 1.33491e+000 1.16805e+000 1.00118e+000 8.34320e-001 6.67456e-001 5.00592e-001 3.39728e-001 1.68844e-001 0.00000e+000 SCALEFACTOR= 1.0846E+003 ST: CC MAX: 1373 MIN: 174 FILE: M4-PLATE+ UNIT: mm DATE: 10/29/2020 VIEW-DIRECTION 박스하면 상선측 $\delta = 1.836\text{mm}$, 하선측 $\delta = 0.816\text{mm}$,
4-2 종방향 분포하중 재하도 (박스하면)	 MIDAS/Civil POST-PROCESSOR DISPLACEMENT RESULTANT 1.85687e+000 1.68806e+000 1.51825e+000 1.35045e+000 1.18164e+000 1.01284e+000 8.44030e-001 6.75224e-001 5.06419e-001 3.37612e-001 1.68806e-001 0.00000e+000 SCALEFACTOR= 1.0771E+003 ST: BB MAX: 1373 MIN: 174 FILE: M4-PLATE+ UNIT: mm DATE: 10/29/2020 VIEW-DIRECTION 박스하면 상선측 $\delta = 1.857\text{mm}$, 하선측 $\delta = 0.824\text{mm}$,
4-3 종방향 + 횡방향 분포하중 재하도 (박스하면)	 MIDAS/Civil POST-PROCESSOR DISPLACEMENT RESULTANT 2.16675e+000 1.96977e+000 1.77279e+000 1.57581e+000 1.37884e+000 1.18186e+000 9.84084e-001 7.87907e-001 5.90931e-001 3.93954e-001 1.96977e-001 0.00000e+000 SCALEFACTOR= 8.3304E+003 ST: AA MAX: 1373 MIN: 174 FILE: M4-PLATE+ UNIT: mm DATE: 10/29/2020 VIEW-DIRECTION 박스하면 상선측 $\delta = 2.167\text{mm}$, 하선측 $\delta = 0.965\text{mm}$,

(5) 해석결과 요약

① 모델링 요소 따른 검토결과

Frame요소와 Plate요소를 사용한 구조해석 모델의 비교검토 결과 Plate 요소의 의한 처짐 값이 하선측(하중재하부) 변위는 약 27% 크게 나타났으며, 상선측(하중 비재하) 변위는 약 42% 작은 값을 나타냄. 이는 Frame 요소를 사용한 모델의 경우 비틀림 거동을 이론값에 의해 산정하게 되는데 이는 작용하중에 의한 복합적인 거동을 사실적으로 재하는데 제한적이기 때문인 것으로 판단됨.

② 하중재하 방법 및 단면모델 방법에 따른 검토결과

기본 단면 모델링에 추가로 콘크리트 도상 및 레일을 추가로 모델링하여 검토한 결과 도상 및 레일 모델링에 따른 단면 강성 증가로 처짐 값은 감소하는 경향을 나타내고 있으나, 감소하는 처짐 값의 크기는 크지 않다.

콘크리트 도상의 추가 모델은 하중재하 방법에 따른 영향 없이, 강성증가에 따른 처짐값 감소량은 약 12%(0.245mm~0.289mm)로 나타나고 있으며, 철도레일의 추가 모델에 따른 감소량은 약 0.4%(0.008mm)의 감소된 값을 나타냄.

③ 받침강성 변화에 따른 검토결과

받침강성 변화에 따른 구조검토 결과 받침강성이 $k = \infty$, $k = 10^{10} \text{ kN/mm}$, $k = 10^8 \text{ kN/mm}$ 의 경우에는 구조물 정적 처짐 값의 변화가 미미하므로, 받침강성의 영향 없음, 그러나 받침강성이 $k = 10^6 \text{ kN/mm}$ 의 경우 0.7mm~0.8mm(약 35%)의 처짐 값이 증가하는 것을 알 수 있으며, 받침강성이 크게 줄어드는 경우 처짐 값이 증가하는 것으로 나타남

④ 해석결과 종합

- Frame요소 사용 모델링과 Plate 요소 사용 모델링의 비교검토 결과 Frame요소 사용 모델은 비틀림 변위 산정시 복합적인 비틀림 거동을 반영하지 못하여 신뢰성이 떨어지므로, Plate 요소를 사용한 모델링이 작용 하중을 보다 사실적으로 묘사함.
- 하중재하 방법을 집중하중, 종방향 분포하중, 종·횡방향 분포하중으로 모델링하여 비교 검토한 결과 집중하중 < 종방향 분포하중 < 종·횡방향 분포하중의 순서대로 처짐 값이 크게 나타나며, 이는 교량에 열차하중에 재하될 때 보다 작용하중을 실제에 가깝게 모델링하였기 때문이며, 하중재하 방법에 따라 처짐 값의 차이가 크지 않으므로 그 영향은 크지 않은 것으로 판단됨.
- 콘크리트 도상 및 레일의 추가모델에 따른 영향검토에서는 콘크리트 도상의 경우 단면 강성이 커지므로, 처짐 값은 약 12% (0.25mm) 감소하지만, 그 크기가 작아 콘크리트 도상의 모델링 여부에 따른 영향은 크지 않음. 또한 철도레일의 따른 처짐 값의 변화가 거의 없으므로 철도레일의 모델 여부에 따른 영향은 미미한 것으로 나타남.
- 교량 받침강성을 변수로 하는 모델의 구조검토 결과, 받침강성이 단순지점(무한강성), $k = 10^{10} \text{ kN/mm}$, $k = 10^8 \text{ kN/mm}$ 의 경우 거의 동일한 처짐 값을 나타내지만, 받침강성이 비교적 낮은 $k = 10^6 \text{ kN/mm}$ 의 경우 처짐 값이 0.8mm(약 35%) 증가한 것으로 나타나 받침강성의 영

향이 크게 작용하는 것으로 나타났으며, 받침강성이 이보다 더 낮은 경우 그 영향은 더 커질 것으로 판단된다.

(6) 교량 받침의 영향

교량의 구조해석 모델링에 영향을 미치는 변수들 중 하중의 분배와 관련된 변수는 해석 결과의 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났으나 받침 강성의 변화에 대해서는 그 영향이 큰 것으로 나타났다. 따라서, 교량 받침의 종류와 강성, 기존의 문헌 조사 결과로부터 구조해석 모델링 및 내하력 평가시 고려사항으로 검토하였다.

① 철도교량의 대표적인 받침

가. 스페리컬받침

스페리컬받침(고력황동받침판 받침)은 받침판의 한쪽을 평면, 다른 면은 곡면으로 하여 상·하부판과 각각 면접촉을 시켜서 미끄럼에 의해 평면 접촉부에서 신축을, 곡면 접촉부에서 회전을 가능하게 한 받침이다.

나. 탄성받침

탄성받침은 내부에 1개 이상의 강판을 보강하여 압축변형시 고무 측면의 팽출현상을 억제하여 내하력을 증가시킨 받침으로 교량받침으로 주로 사용한다. 천연고무 또는 합성고무(Neoprene)를 재질로 하는 탄성받침은 별도의 다른 부품이 필요없이 설치할 수 있는 매우 간단한 형식의 것이며, 설치 높이가 낮고 임의의 형상으로 제작이 가능하며 특히 설계가 매우 간단하다.

② 받침 손상의 원인

- 누수와 부식, 시공초차에 의한 경사, 설계하중 초과에 의한 하중, 들뜸 등
- 고무받침의 균열 및 환경적인 요인에 의한 재료물성의 변화에 의한 손상
- 하부구조의 침하 등에 의한 손상
- 품질관리 미숙으로 무수축 모르타의 균열에 따른 손상
- 설계 및 시공오차에 의해 발생한 교량받침에서의 국부 응력집중에 의한 손상
- 각종 교량받침 부품의 노후화에 따른 손상

③ 받침의 강성

교량의 구조해석시 교량의 받침조건 즉, 수직 또는 수평강성을 고려함에 있어 강성받침에 해당하는 스페리컬 받침은 수직방향의 미소변위가 발생이 가능하지만 거의 없기 때문에 무한 강성으로 보통 고려된다. 그러나 탄성받침에 해당하는 고무받침 또는 디스크받침의 경우는 장기하중에 대해 재질의 열화, 크리프 현상 등으로 경화되는 경향이 있고 그 결과 강성에 영향을 준다. 탄성받침의 강성은 그 종류와 용량, 탄성체의 재질, 두께 등에 따라 강성의 편차가 매우 크기 때문에 간단히 구하기는 어려우며 강성 곡선 또한

비선형을 나타내므로 본 연구에서는 탄성받침의 전반적인 강성의 범위 정도를 파악하였으며 상기 구조해석결과에서 받침의 영향이 크게 작용할 수 있는 만큼 구조해석시 고려되어야 할 사항을 제시하고자 하였다.

국내의 탄성받침에 대한 기준은 한국산업규격인 KS F 4420에 규정되고 있으나, 주로 제작·성능평가와 관련된 조항들로 탄성받침에 대한 설계, 제작, 성능평가, 유지관리와 관련한 데이터는 매우 부족한 실정이며 설계 허용 값과 강성 설정은 Eurocode의 기준을 준용하고 있다. 탄성고무받침의 압축탄성계수와 관련된 값을 문헌자료를 인용하여 나타내면 다음과 같다. 이 그래프에서 압축탄성계수의 개략적 범위 0~4000은 앞서 제시한 받침의 강성값으로 환산하면 전단계수를 0.9으로 가정하였을 때 $0 \sim 3 \times 10^7 \text{ kN/mm}^2$ 정도에 해당하는 값으로 탄성받침의 경우 교량의 열차 주행에 의한 실측값의 변화는 상대적으로 그 영향이 크다고 할 수 있다.

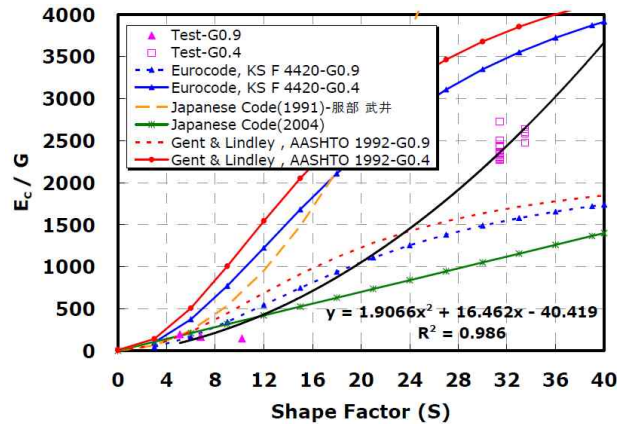


그림 2.4.13 탄성받침의 압축탄성계수(EN 1337-3, 2005)

④ 구조해석시 고려사항

교량의 안전성 평가시 고려되는 교량의 구조해석의 해석값은 상부 하중의 하중분배보다 상대적으로 교량받침의 강성에 큰 영향을 받으며 이는 탄성받침의 경우처럼 강성이 비교적 작은 경우 그 영향이 크다. 그러나 구조해석 모델링시 받침 강성의 크기, 시간의 경과에 따른 열화의 정도와 정량적값의 설정 등은 정하기 어렵기 때문에 장기계측에 의한 데이터의 축적이 필요하며, 강성변화에 대한 구조해석 값의 변동과 열화 손상과의 관계 등의 평가는 향후 추가 연구가 필요하다.

2.4.6 상시주행열차에 의한 현장재하시험 및 결과분석

(연구성과 3-1, 3-2, 4-1)

(1) 시험계측에 의한 민감도 분석

재하시험에서는 하중작용에 의한 교량의 거동을 계측하는 과정이 포함되며 계측된 결과는 경험적 방법 이외에 검증하기가 어렵기 때문에 신뢰성 있는 계측결과를 도출하여야 한다. 따라서, 계측기 및 센서가 재하시험 결과 등 철도교의 내하력 평가에 영향을 미칠 수 있는 요인들은 다음과 같다.

가. 센서 설치 방법

① 곡면 부착의 영향

변형률 게이지 설치 시 표면 청결작업 과정에서 표면이 오목 또는 볼록한 형태의 곡면을 형성하는 경우 저항값의 변화를 가져오므로 게이지 부착면은 가급적 평면이 되도록 하여야 한다.

② 응력집중 부분의 부착

단면급변부, 부재의 연결부는 대표적인 응력집중부이며 이러한 곳에 게이지를 부착하는 경우는 계측의 목적이 국부적 응력집중을 파악하고자 하는 것인 지, 전체적인 공칭응력을 파악하고자 하는 것인 지를 판단하여 적절한 위치를 선정하여야 한다. 공칭응력의 파악이 목적인 경우에는 응력집중부에서 일정거리 이격시켜 게이지를 측정하는 것이 바람직하다.

③ 센서 게이지율의 보정

사용계측기의 게이지율과 센서의 게이지율이 다른 경우는 이를 보정하여 사용한다.

④ 각도 오차

측정방향과 센서의 방향이 일치하지 않는 경우 설치각도 오차가 발생하므로 센서 설치 시 측정방향과 일치하도록 방향을 조정하여야 한다.

⑤ 센서 이동 오차

교고가 높은 상부구조의 계측에서 비계를 이용하는 경우 비계 이동 또는 흔들림에 따른 계측오차가 발생할 수 있으므로 지지점의 고정에 유의하여야 한다.

나. 온도에 의한 영향

전기저항식 센서를 사용하여 측정한 값의 정밀도는 환경, 재질, 시간, 회로 그리고 측정기 등의 영향을 받으며 그 중에서도 가장 큰 인자로서는 측정중의 온도변화에 의한 계측값

의 변화이다. 센서를 측정하고자 하는 곳에 부착하면 하중을 가하지 않은 상태에서도 온도의 변화에 따라 저항 값이 달라져 계측값에 영향을 주게 된다. 일반적으로 변형게이지에 대한 온도보상은 비교적 양호하게 이루어지고 있으나 직사광선에 노출된 리드와이어에 대한 온도보상은 등한 시 하고 있다. 재하시험시 계측에서 온도의 영향을 최소화하는 방법은 다음과 같다.

① 회로에 의한 방법

저항변화 또는 전압변화를 통해서 외부로부터 발생하는 변형률에 해당하는 것을 스트레인 게이지에 대한 열변형률로 상쇄시키는 방법이다.

② 자기 온도보상형 게이지에 의한 방법

스트레인게이지 자신의 저항온도계수를 제거함으로써 실제 발생하는 열변형률 감소를 최소화하는 방법이다.

③ 리드와이어 결선 방식에 의한 방법

리드와이어의 길이가 길어져도 출력전압의 영점조정이 용이해지며, 주변온도에 대한 리드와이어의 저항변화를 서로 상쇄시키는 결선방법이다.

다. 습도에 의한 영향

센서의 측정값은 센서 주변의 습도에 의해서도 큰 영향을 받는다. 습기 또는 수분에 의해 저항소자가 전기분해 또는 부식을 일으켰을 때 저항값의 변화가 생기거나 단선이 되어 영점의 이동으로 측정값의 오차를 발생시킨다. 일반적으로 실내에서 짧은 시간 계측이 이루어지는 경우는 방습처리가 불필요할 수 있으나 장시간 습한 현장에서 재하시험을 실시하는 경우는 방습처리가 필수적이다.

위와 같이 센서는 직사광선, 습기, 이물질에 의한 손상 및 간섭을 받지 않도록 방습 및 보호처리를 하여야 하며 우천시나 대기온도가 계측기의 작동범위를 벗어날 때는 적절한 대책을 마련하지 않는 한 재하시험을 실시하지 않아야 한다.

라. 리드와이어 길이에 의한 영향

센서와 측정장비를 연결하는 리드와이어 길이가 너무 길면 저항값이 변화하여 정밀한 측정이 불가능하므로 주의하여야 한다. 정적측정의 경우 50m, 동적측정의 경우 30m이하로 제한하는 것이 바람직하다. 리드와이어 길이 영향을 최소화하는 방안은 다음과 같다.

- ① 리드와이어는 가능한 굵은 동선을 사용하여 선의 저항값을 극소로 한다.
- ② 내·외부 잡신호 침투를 소화하기 위하여 차폐 가능한 선을 선택함
- ③ 리드와이어는 두 가닥씩 꼬여있는 선을 사용
- ④ 가능한 리드와이어 길이를 최소화할 수 있는 방법을 모색함.

마. 잡신호의 영향

전기저항식 센서로부터 계측된 값은 센서에서 발생하는 매우 미소한 전기적 신호로부터 변환된다. 이 전기적 신호에 계측기의 내·외부에서 발생하는 자기장, 고전압 및 부전기 사용 등의 원인으로 인한 잡신호(노이즈)가 혼입되면 원하는 신호에 대한 계측오차를 발생시키므로 충전전 잡신호를 제거시켜야 한다.

(2) 계측에 의한 영향인자 민감도 실험

가. 실험개요

본 연구에서는 현장계측을 수행하는 과정에서 사용되는 장비와 기기에 대한 계측결과의 민감도에 관한 결과를 분석하였으며, 여기서 사용된 변수는 계측시 사용되는 케이블의 길이 (5m, 10m, 20m, 40m, 100m) 및 전원공급장치 (콘센트 전원 및 혼다 발전기 가솔린 i EU-22)의 종류이다. 각 변수에 따른 결과 비교를 위해, 실내시험을 통한 변형률 계측 결과 값에 대한 비교를 수행하였으며, 본 시험에 사용된 조건은 다음과 같다.

표 2.4.11 시험 조건

변수 항목	규격	조건	
케이블 길이	조작선 UL2464 데이터 전선 케이블 AWG24 0.3 2C	5가지 길이별 실험 데이터 민감도 결과값 비교검토	5m
			10m
			20m
			40m
			100m
전원 공급 장치	콘센트 전원	전원 공급장치별 실험 데이터 민감도 결과값 비교검토	220V
	발전기 (혼다 발전기 가솔린 i EU-22)		



〈일반 UL2464, 24AWG 케이블〉



〈발전기 가솔린 i EU-22〉

나. 실험 방법

민감도 실험은 일반 궤도성능검증 시 실행하는 윤중검증시험 방법으로 수행하였다. 윤중검증시험에 투입된 주요 사용장비는 다음과 같다.

표 2.4.12 윤중검증 장비 투입장비 현황

구분	제품명	규격	제 회사
센서	2축 변형률 게이지	FCA-5-11-1L	TokyoSokki(일본)
계측기기	동적응답측정기	MGC Plus	HBM(독일)
		SDA-810(8ch)	TokyoSokki(일본)
	브릿지박스	DB-120(1ch, 8ch)	KYOWA(일본)
	노트북	Windows10	SAMSUNG(한국)

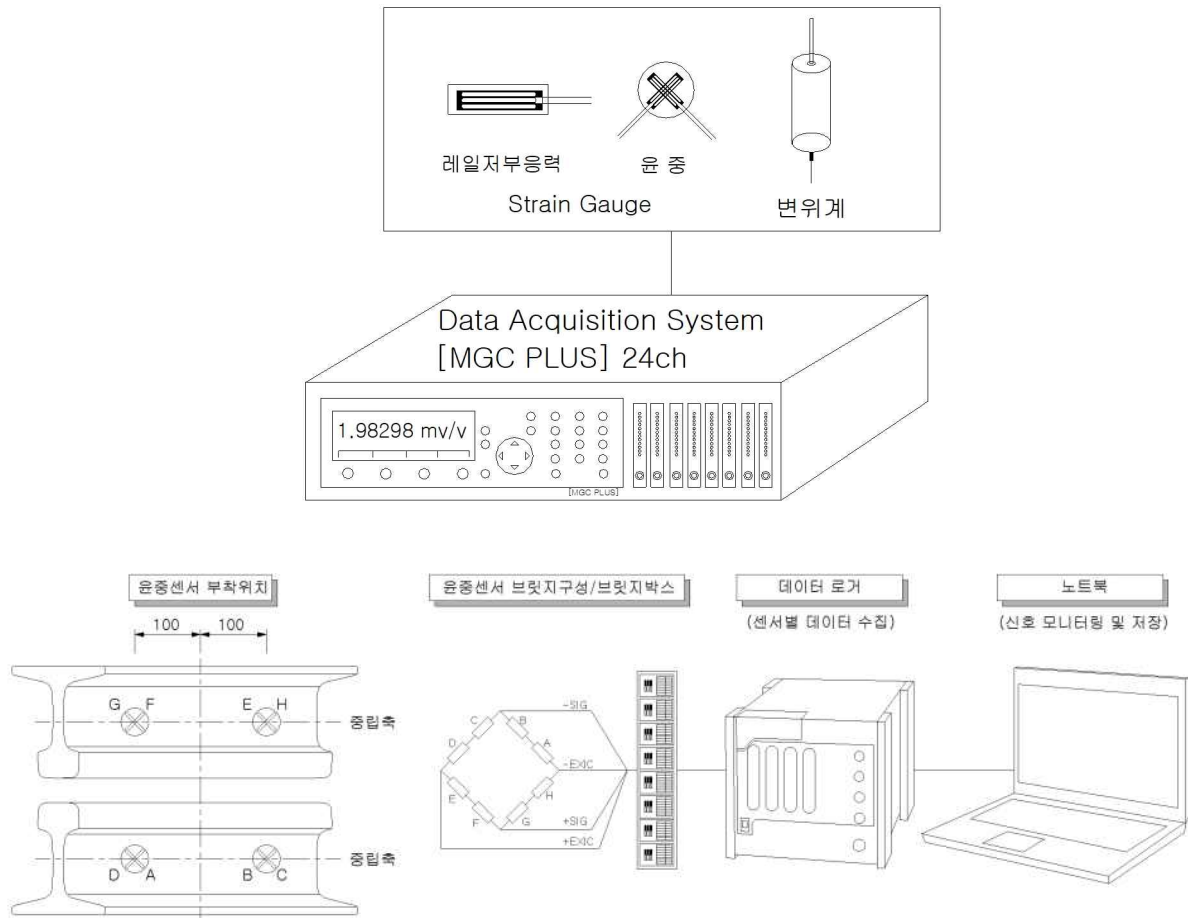


그림 2.4.14 게이지 부착 방법과 계측 시스템

다. 실내 실험

윤중은 침목간 중심에서 각 100mm 떨어진 위치의 중립축에 45° 의 각도를 가지고 8방향으로 스트레인게이지를 부착하고, 이를 결선하여 단면휨의 영향을 배제하여 전단변형을 측정하여 산정하였다(전단력이 윤중이 된다). 이 상태에서 윤중 검정기를 이용하여 10kN 단위로 40kN까지 재하하고 윤중을 검정하였다. 횡압은 침목간 중심에서 각 100mm 떨어진 위치의 레일 저부상면에서 내측으로 46mm 떨어진 위치에 8방향으로 스트레인 게이지를 부착하여 측정하였다. 이는 결선면내에서의 레일 종방향 휨 영향을 배제시키고 전단력만을 측정하기 위한 것이다. 이러한 전단력은 레일에 직각으로 작용하는 횡압을 의미한다. 이 상태에서 검정기를 이용하여 10kN단위로 40kN까지 재하하고 횡압을 검정하였다.

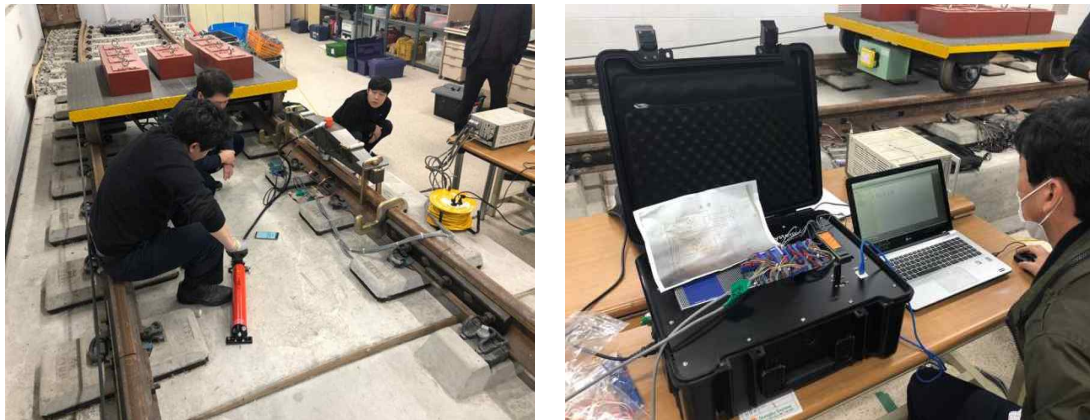


그림 2.4.15 윤중 검정 실내 실험 수행 현황

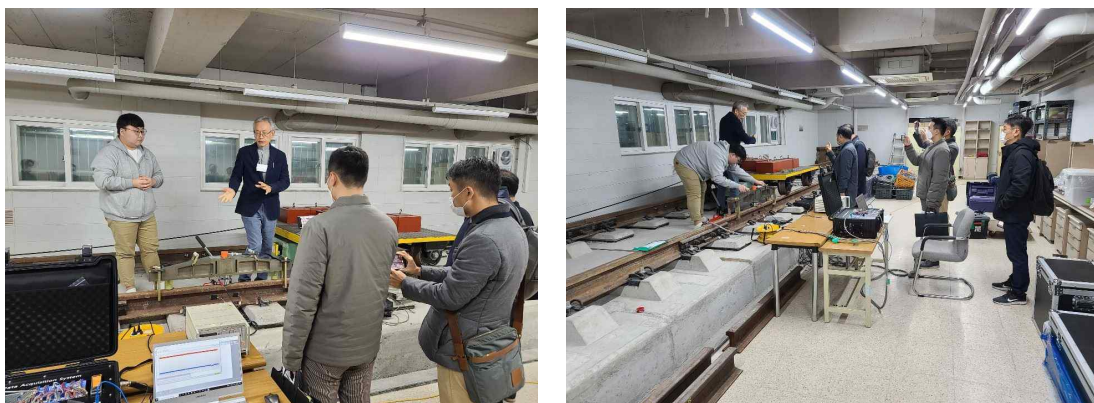


그림 2.4.16 실내시험 전경

일반적으로 윤중 검정시험을 통해 획득한 발생변형률과 작용하중과의 관계에 대한 선형 관계식은 선형회귀분석법 (Linear Regression)을 이용하여 도출함으로서, 레일에 재하한 정적 작용하중에 의한 측정변형률(데이터 수집장치에 저장된 변형률 데이터)을 레일에 작용한 윤중으로 환산하고자 수행한 선형회귀분석의 결과를 예시로 나타내었다. 이와 같이 본 실험에서는 윤중 검정 시험을 수행하여 도출한 데이터를 다양한 케이블 길이 (5, 10,

20, 40, 100m) 조건별로, 또한 전원 공급장치유형별로 (콘센트 전원 및 Honda 발전기 가솔린 I EU-22) 동일한 윤중검정실험을 수행하였다.

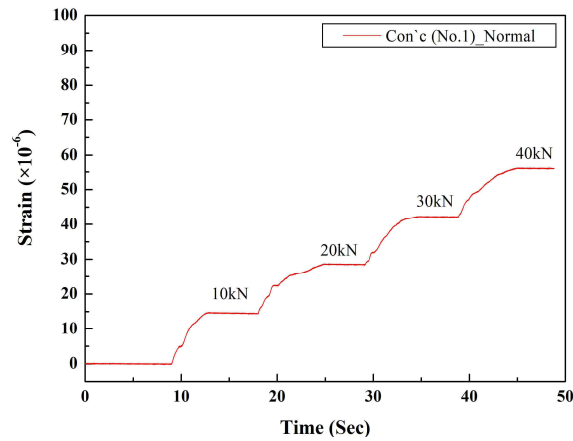
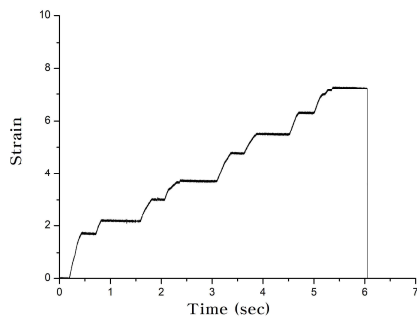


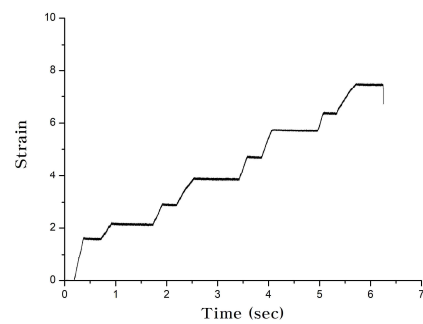
그림 2.4.17 윤중 검정 데이터 (예시)

라. 실험 결과

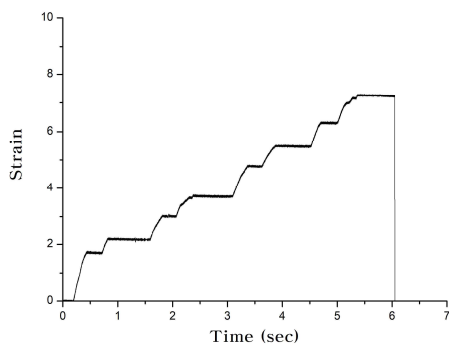
케이블 길이(5m, 10m, 20m, 40m, 100m)를 변수로 하여, 실내에서 윤중검증시험을 수행하였으며, 전원공급장치 별로 다음과 같이 결과를 정리하였다.



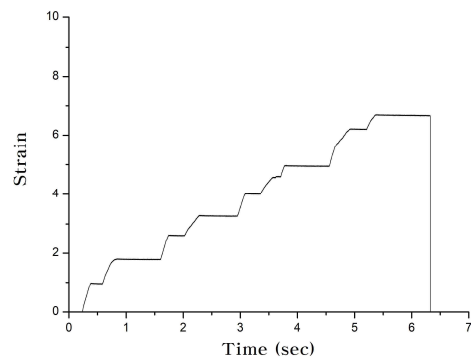
(a) 5m



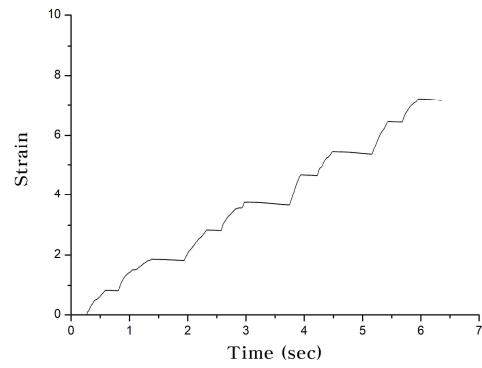
(b) 10m



(c) 20m

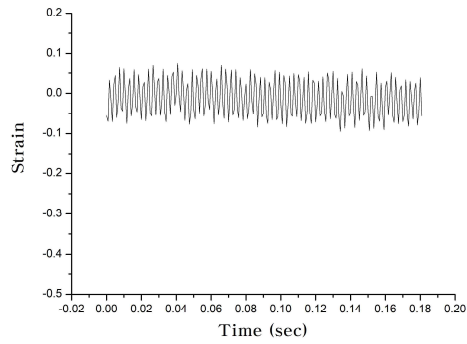


(d) 40m

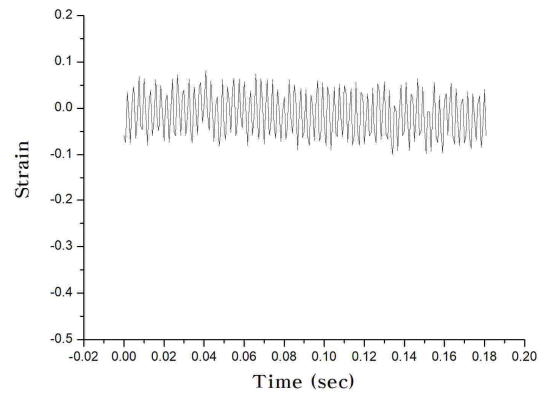


(e) 100m

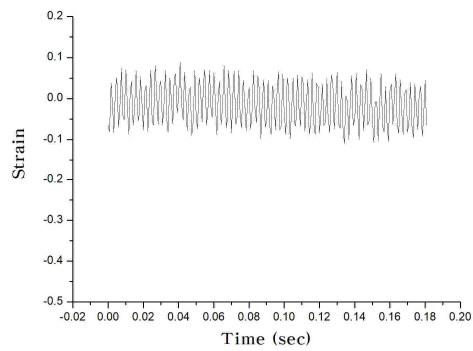
그림 2.4.18 케이블 길이별 결과데이터 (발전기 전원공급장치 사용)



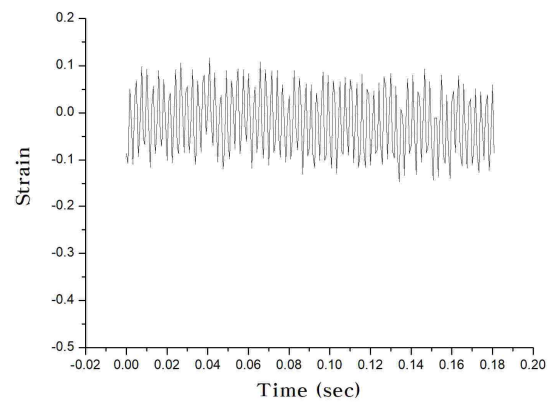
(a) 5m



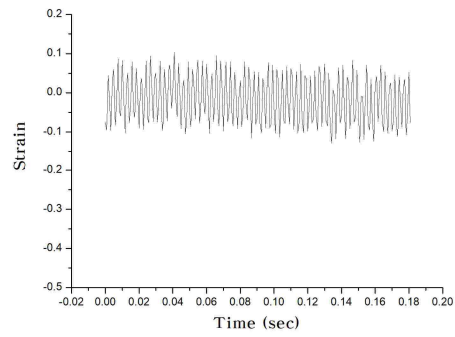
(b) 10m



(c) 20m



(d) 40m

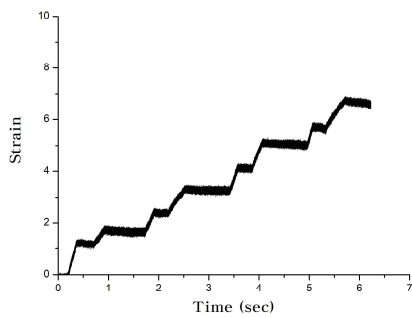


(e) 100m

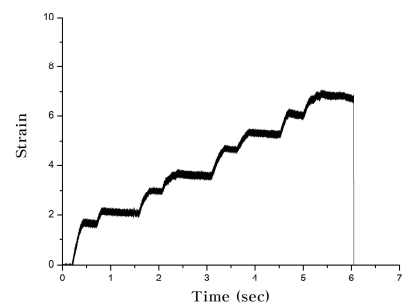
그림 2.4.19 케이블 길이별 노이즈 발생률 결과데이터 (발전기 전원공급장치 사용)

표 2.4.13 케이블 길이별 노이즈 및 Peak 결과 값 비교결과(발전기 전원공급장치 사용)

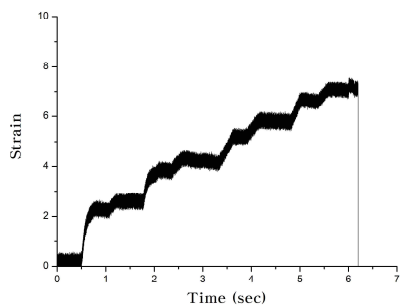
Cable length (m)	Noise bandwidth (micro strain)	Peak result (micro strain)	Peak difference (micro strain)
5	0.17	7.31	—
10	0.18	7.52	0.21
20	0.20	7.36	0.05
40	0.26	6.70	-0.61
100	0.23	7.23	-0.08



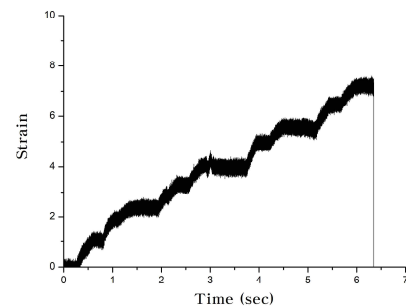
(a) 5m



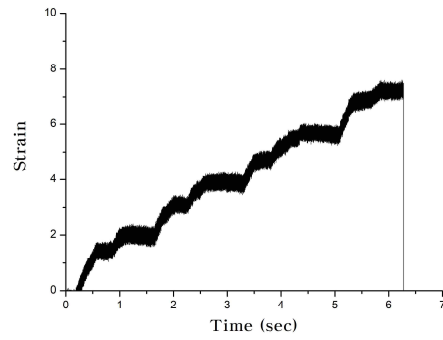
(b) 10m



(c) 20m

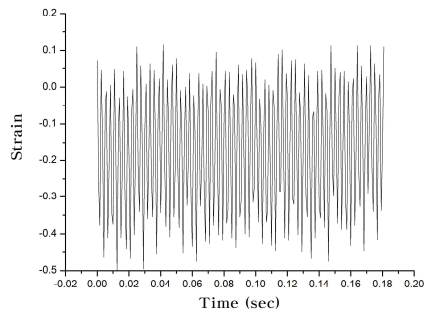


(d) 40m

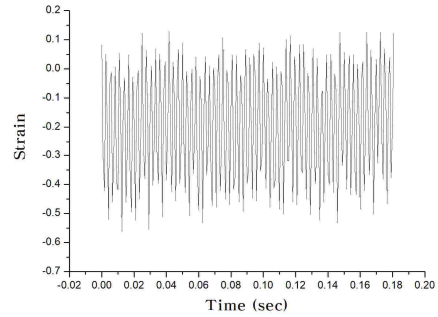


(e) 100m

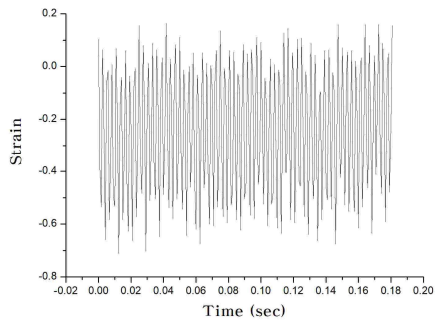
그림 2.4.20 케이블 길이별 결과데이터



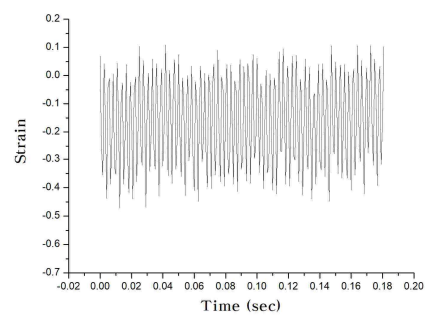
(a) 5m



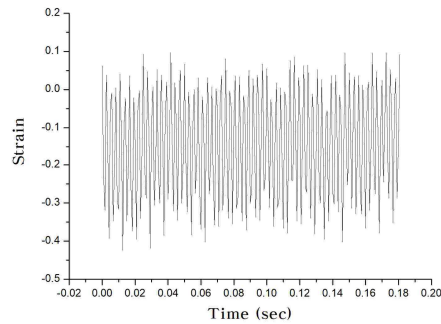
(b) 10m



(c) 20m



(d) 40m



(e) 100m

그림 2.4.21 케이블 길이별 노이즈 발생률 결과데이터 (콘센트 전원공급장치 사용)

표 2.4.14 케이블 길이별 노이즈 및 Peak 결과 값 비교결과(콘센트 전원공급장치 사용)

Cable length (m)	Noise bandwidth (micro strain)	Peak result (micro strain)	Peak difference (micro strain)
5	0.62	6.91	—
10	0.69	7.08	0.17
20	0.87	7.55	0.64
40	0.58	7.60	0.69
100	0.52	7.61	0.7

실험결과 발전기를 사용한 경우 노이즈의 변동폭은 $0.17 \sim 0.26 \mu$ (strain)으로서 케이블의 길이가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보이고 있으나 100m에서는 다시 감소하는 경향을 나타내었다. Peak값의 경우는 케이블 길이 10m에서 최대값을 나타내었으나 케이블 길이 5m와의 차이는 최대 0.61μ 의 차이를 나타내었다.

한편, 콘센트 전원을 사용한 경우 노이즈의 변동폭은 $0.52 \sim 0.87$ 로 케이블길이가 증가할 수록 오히려 약간 줄어드는 경향을 나타내었다. 그러나 Peak 값은 케이블길이가 증가함에 딸 오히려 약간 증가하는 것으로 나타났으며 케이블길이 5m를 기준으로 볼 때 0.69μ 의 차이를 나타내었다.

이러한 결과로부터 전원장치 및 케이블 길이에 따라 노이즈 변동폭과 Peak값의 뚜렷한 관계는 명확히 나타나지 않았으며, 두가지 전원의 종류에서 Peak 값은 유사하나 콘센트 전원보다는 발전기의 전원이 상대적으로 노이즈가 작은 것을 알 수 있다. 또한, 케이블 길이를 100m까지 연장하여 변형률을 측정된 결과 콘센트의 경우가 노이즈 폭이 0.87μ 로써 가장 크게 나타났으나 이 정도의 변형률은 레일 또는 구조물의 변형률 측정값의 최소단위인 1μ 이하로써 무시할 수 있는 정도이다. 일반적으로 strain gage에 의한 변형률 측정시 최소단위로 1μ 로 설정하여 사용하고 있으므로 케이블의 길이에 따른 변화 정도, 전원장치의 종류에 따른 노이즈 변동범위 등을 고려하더라도 작은 값의 범위에서는 차이가 있으나 계측 값의 수준에 있어서는 큰 영향이 없는 것으로 판단된다.

(3) 열차하중 측정을 위한 윤중시험기 개발 및 검증 실험

가. 개요

주행하는 차량에 의해 레일과 궤도에 작용하는 윤중을 측정하는 방법은 두 가지로서 차량상에서 윤중을 측정하는 방법과 지상에서 측정하는 방법이 있다. 차량상에서 측정하면 차량주행에 따른 전체 선로의 재하상태를 알 수 있으며, 지상에서 측정하면 측정지점의 선로/궤도상태와 통과하는 모든 차량에 의한 궤도작용력의 상황을 알 수 있다. 일반적으로 윤중을 측정하는 방법으로는 지상에서 측정하는 방법이 이용되는데, 센서의 설치가 비교적 간편하고 정확한 하중값을 얻을 수 있을 뿐만 아니라, 궤도의 한 지점을 주행하는 모든 열차의 윤중을 측정할 수 있는 장점이 있다.

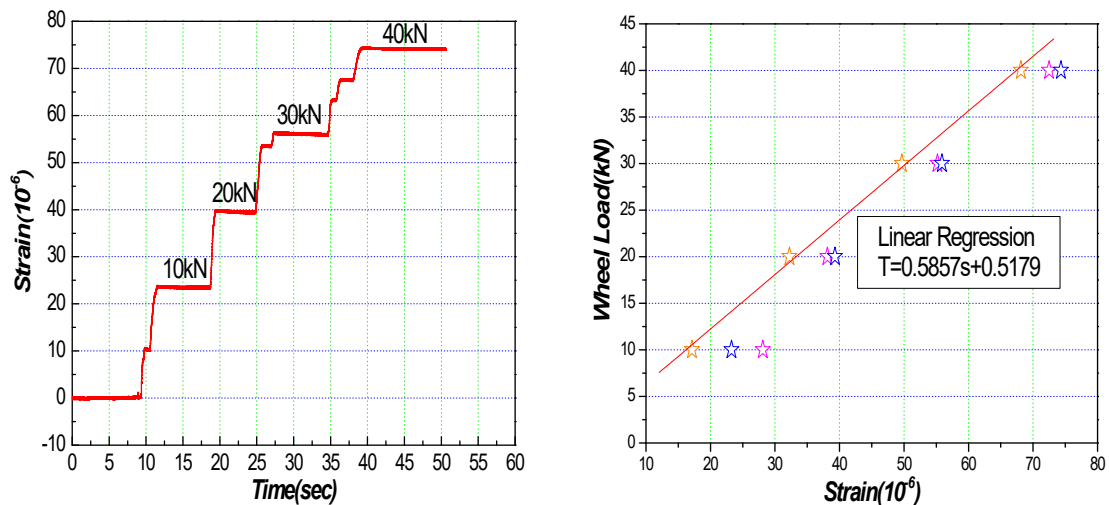
1) 윤중검정 (Calibration)

레일에 부착한 변형률게이지를 통하여 직접 측정한 값은 변형률 데이터로써 전단변형과 비례하여 발생한다. 전단변형은 역시 윤중과 비례하여 발생하므로 데이터 수집장비(Data Acquisition System)를 통하여 얻은 변형률을 실제 작용하는 윤중의 절대량으로 환산하기 위하여 윤중 검정(Calibration)을 수행하고, 이때 얻어진 정적 윤중데이터를 이용하여 선형회귀분석(Linear Regression)을 통해 환산 윤중값(kN)을 도출할 수 있다. 그림 과 같이 윤중게이지를 레일에 부착하고, 유압잭과 Load cell을 이용하여 0kN에서 40~50kN까지 정적하중을 단계적으로 가압하여 이때 발생한 변형률측정값을 기록한다. 이때 오차발생과 선형회귀식의 신뢰성을 고려하여 3회 이상 동일한 실험을 반복한다.



〈검정기를 사용한 윤중 가압 현장전경〉

윤중 검정시험을 통해 획득한 발생변형률과 작용하중과의 관계에 대한 선형관계식은 선형회귀분석법 (Linear Regression)을 이용하여 도출한다. 그림 3은 레일에 재하한 정적 작용하중에 의한 측정변형률(데이터 수집장치에 저장된 변형률 데이터)을 레일에 작용한 윤중으로 환산하고자 수행한 선형회귀분석의 결과를 나타낸다.



〈측정변형률과 윤중의 선형회귀분석 결과(예)〉

2) 횡압 검정 (Calibration)

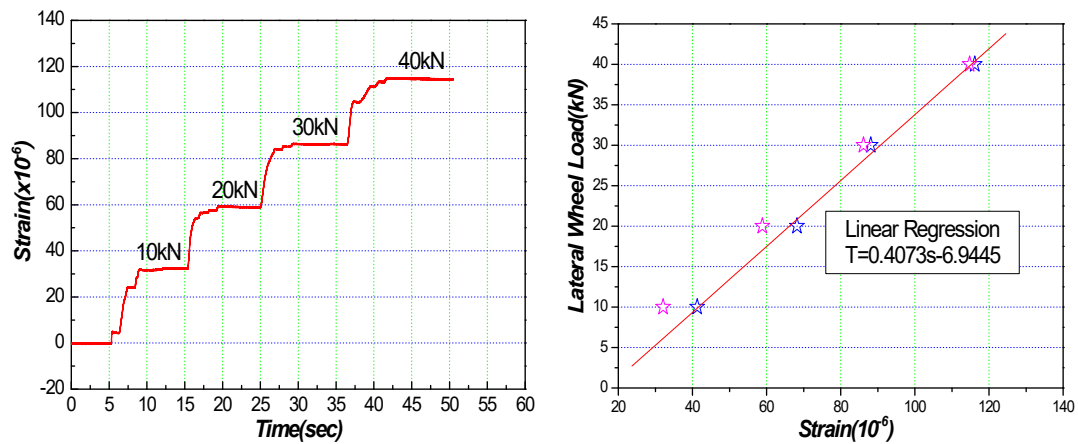
횡압게이지와 Data Acquisition System을 통하여 측정한 변형률데이터(ϵ , 10^{-6})를 횡압의 절대량으로 환산하기 위하여 횡압 검정(Calibration)을 수행한다. 또한, 횡압 검정(Calibration)의 경우도 윤중과 동일한 방법으로 횡압 검정을 수행하며, 이때 얻어진 정적 변형률-횡압 데이터를 이용하여 선형회귀분석(Linear Regression)을 통해 수평전단변형률-환산횡압 관계를 도출함으로써 동적응답 데이터수집장치로 부터 현장측정된 변형률값에 대한 환산동적횡압값(kN)을 산출할 수 있다.

횡압게이지를 레일에 부착하고, 유압잭을 이용하여 그림 5와 같이 0kN에서 40~50kN까지 정적수평하중을 단계적으로 가압하여 이때 발생한 정적 변형률-횡압 측정값을 기록한다. 이때 오차발생과 선형회귀식의 신뢰성을 고려하여 3회 이상 동일한 실험을 반복한다.

재하시간에 따른 내·외측 레일의 정적 횡방향작용력 (데이터 수집장치에 저장된 변형률 데이터)을 도시한 그림과 측정 변형률을 레일에 작용한 횡압으로 환산하고자 수행한 선형회귀분석 결과를 나타낸다.

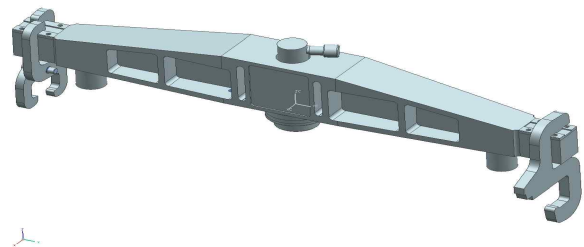
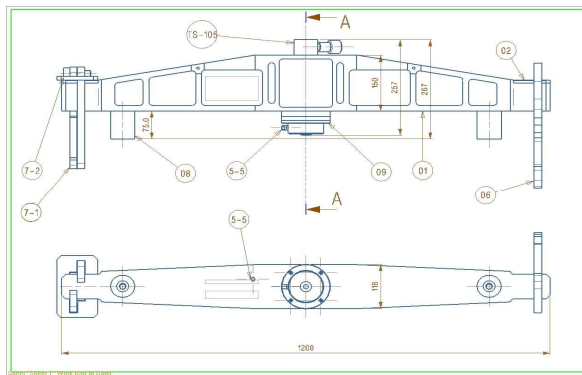


〈검정기를 사용한 횡압 가압 현장전경〉



<측정변형률과 횡압의 선형회귀분석 결과(예)>

3) 신규 개발 윤중/횡압검정기 상세도



4) 신규 개발 윤중/횡압검정기 스펙

제품 구성	- 윤중기 본체 (Body), 측정 인디게이터 - 통신장치가 포함된 일체형 - 측정 거치대 일체 - 유압 펌프, 측정 보조장치 외 - 케이스
재료 및 Software	- 본체 재질: 알루미늄 특수강, 탄소특수강 외 - 측정 거치대 재질: 탄소 특수강 - 모니터링 하드웨어 - 아두이노, 통신 방식 - 블루투스 - 어플리케이션 - 안드로이드 앱
Dimension	- 본체 사이즈: 1200(L)x267(B)x 118(T) - 본체 무게 : Body - 21.5kg - 실린더 - 9.5kg, 우레탄 - 0.8kg - 측정거치대 무게 : 4.7kg x 2ea (횡압용), 3.5kg x 2ea (윤중용) - 안전 지그: 0.8kg x 2ea
Capacity	- Max Load : 5ton - 권장 사양 : Load : 4.5 ton 이내

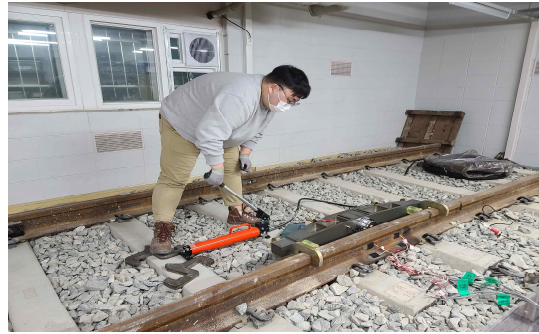
나. 윤중/횡압 실험방법 및 결과

1) 윤중검정 : 수직전단하중(윤중)-수직전단변형률 시험

- 자갈도상 실험 (실하중/ 기존장비/ 개발장비) - 각 3회
- 콘크리트도상 실험 (실하중/ 기존장비/ 개발장비) - 각 3회



(a) 윤중 검정

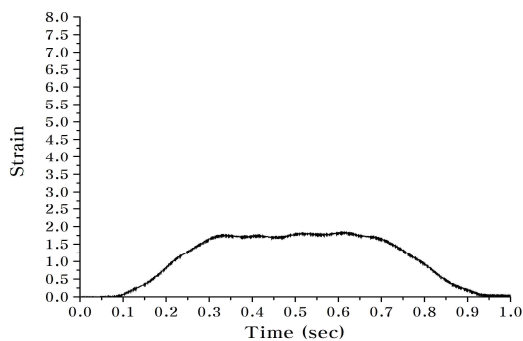


(b) 횡압 검정

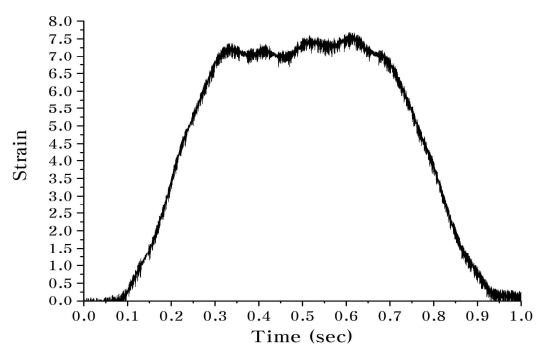
〈자갈도상 정밀검정시험〉

- 실하중(윤중) 정밀검증시험결과

구분	1회		2회		3회	
	전단력	전단 변형률	전단력	전단 변형률	전단력	전단 변형률
자갈도상	10kN	1.85	10kN	2.07	10kN	1.74
	20kN	3.64	20kN	4.08	20kN	3.87
	30kN	5.76	30kN	6.46	30kN	5.42
	40kN	7.84	40kN	8.80	40kN	8.64
콘트리트도상	10kN	3.84	10kN	4.31	10kN	5.23
	20kN	6.23	20kN	6.99	20kN	7.72
	30kN	9.87	30kN	10.25	30kN	10.84
	40kN	13.54	40kN	13.48	40kN	13.21



(a) 10 kN - 1축 윤중



(b) 40 kN - 1축 윤중

〈실하중(윤중) 정밀검증시험결과 (자갈 도상) (예시)〉

2) 횡압검정 : 수평전단하중(횡압)-수평전단변형률 시험

- 자갈도상 실험 (실하중/ 기존장비/ 개발장비) - 각 3회
- 콘크리트도상 실험 (실하중/ 기존장비/ 개발장비) - 각 3회



(a) 윤중 검정

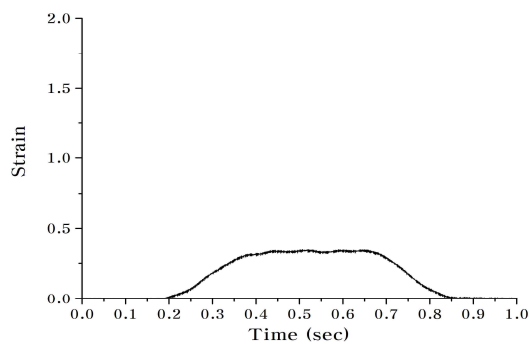


(b) 횡압 검정

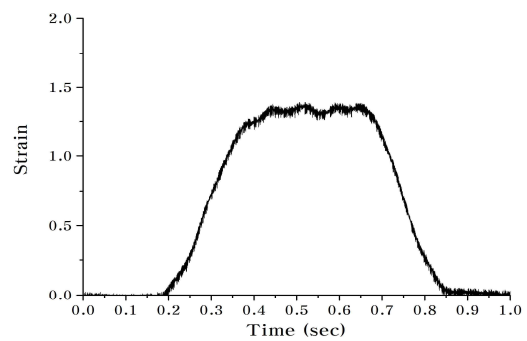
〈콘크리트도상 정밀검정시험〉

- 실하중(횡압) 정밀검증시험결과

구분	1회		2회		3회	
	전단력	전단 변형률	전단력	전단 변형률	전단력	전단 변형률
자갈도상	10kN	0.43	10kN	0.54	10kN	0.56
	20kN	0.87	20kN	0.79	20kN	0.82
	30kN	1.13	30kN	1.32	30kN	1.21
	40kN	2.08	40kN	2.03	40kN	2.12
콘트리트 도상	10kN	1.23	10kN	1.12	10kN	1.36
	20kN	2.09	20kN	2.23	20kN	1.89
	30kN	3.12	30kN	2.98	30kN	3.21
	40kN	4.34	40kN	4.23	40kN	4.53



(a) 10 kN - 1축 윤중



(b) 40 kN - 1축 윤중

〈실하중(횡압) 정밀검증시험결과 (자갈 도상) (예시)〉

다. 윤중/횡압 실험결과

[윤중실험결과]

1) 자갈도상

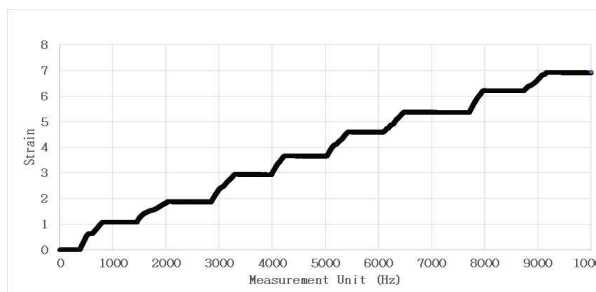
〈 기존 횡압검정기 정밀검증 시험결과 (자갈도상) 〉

단계	1회		2회		3회	
	윤중 (kN)	변형률	윤중 (kN)	변형률	윤중 (kN)	변형률
1단계	5	1.06	5	1.16	5	1.32
2단계	10	1.86	10	2.09	10	2.31
3단계	15	2.87	15	2.70	15	3.57
4단계	20	3.69	20	3.54	20	4.59
5단계	25	4.72	25	5.30	25	5.87
6단계	30	5.49	30	6.17	30	6.82
7단계	35	6.32	35	6.80	35	7.86
8단계	40	7.09	40	7.56	40	8.81

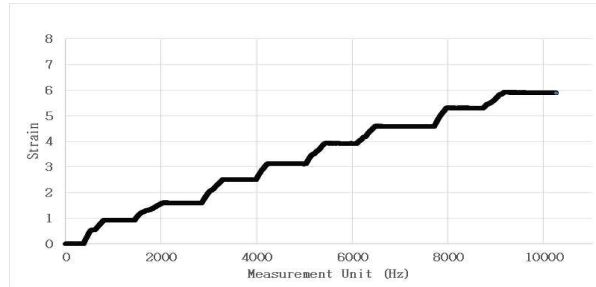
(2) 신규 개발 검정기

〈 신규 개발 횡압검정기 정밀검증 시험결과 (자갈도상) 〉

단계	1회		2회		3회	
	윤중 (kN)	변형률	윤중 (kN)	변형률	윤중 (kN)	변형률
1단계	5	0.97	5	0.94	5	0.96
2단계	10	1.87	10	1.83	10	1.85
3단계	15	2.76	15	2.82	15	2.72
4단계	20	3.79	20	3.82	20	3.69
5단계	25	4.37	25	4.28	25	4.32
6단계	30	5.57	30	5.59	30	5.68
7단계	35	6.72	35	6.81	35	6.59
8단계	40	8.41	40	8.43	40	8.32



〈기존 윤중검정기 정밀검증시험결과 예시
(자갈도상)〉



〈신규 개발 윤중검정기 정밀검증시험결과 예시
(자갈도상)〉

2) 콘크리트도상

(1) 기존 횡압검정기

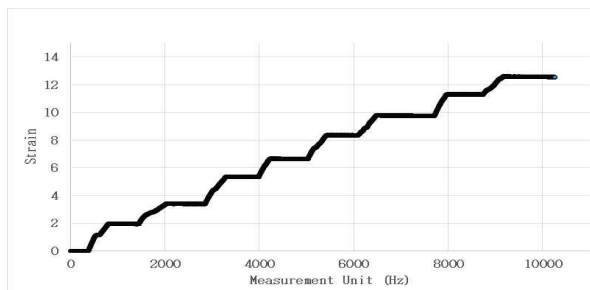
〈 기존 횡압검정기 정밀검정시험 결과 (콘크리트도상) 〉

단계	1회		2회		3회	
	윤중(kN)	변형률	윤중(kN)	변형률	윤중(kN)	변형률
1단계	5	1.28	5	1.86	5	2.27
2단계	10	3.82	10	3.11	10	3.51
3단계	15	4.57	15	5.73	15	5.63
4단계	20	6.54	20	6.23	20	6.95
5단계	25	7.34	25	7.78	25	8.43
6단계	30	10.54	30	10.84	30	10.34
7단계	35	11.95	35	11.08	35	11.52
8단계	40	12.84	40	12.36	40	12.67

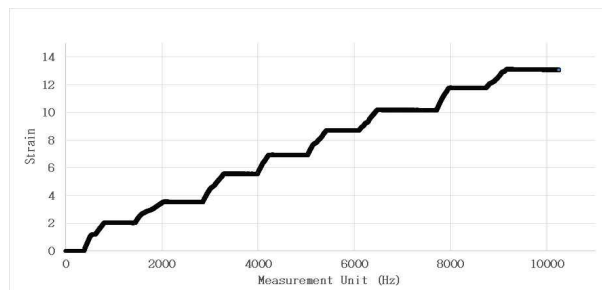
(2) 신규 개발 횡압검정기

〈 신규 개발 횡압검정기 정밀검정시험 결과 (콘크리트도상) 〉

단계	1회		2회		3회	
	윤중(kN)	변형률	윤중(kN)	변형률	윤중(kN)	변형률
1단계	5	2.03	5	1.93	5	1.81
2단계	10	3.78	10	4.08	10	4.06
3단계	15	5.58	15	5.46	15	5.62
4단계	20	6.23	20	6.28	20	6.13
5단계	25	8.78	25	8.56	25	8.75
6단계	30	11.43	30	11.27	30	11.32
7단계	35	12.23	35	12.41	35	12.74
8단계	40	13.18	40	13.09	40	13.23



〈기존 윤중검정기 정밀검증 시험결과 예시
(콘크리트도상)〉



〈신규 개발 윤중검정기 정밀검증 시험결과
예시 (콘크리트도상)〉

[횡압실험결과]

1) 자갈도상

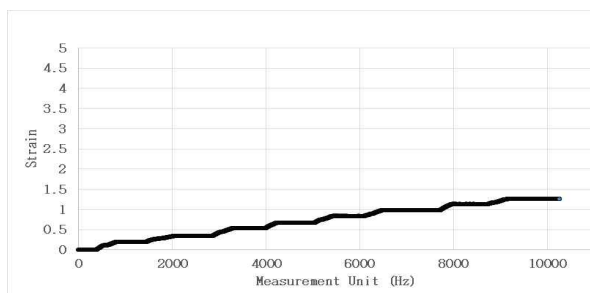
〈 기존 횡압검정기 정밀검증 시험결과 (자갈도상) 〉

단계	1회		2회		3회	
	횡압(kN)	변형률	횡압(kN)	변형률	횡압(kN)	변형률
1단계	5	0.25	5	0.24	5	0.25
2단계	10	0.51	10	0.48	10	0.50
3단계	15	0.76	15	0.72	15	0.75
4단계	20	1.01	20	0.96	20	1.01
5단계	25	1.26	25	1.19	25	1.26
6단계	30	1.52	30	1.43	30	1.51
7단계	35	1.77	35	1.67	35	1.76
8단계	40	2.02	40	1.91	40	2.01

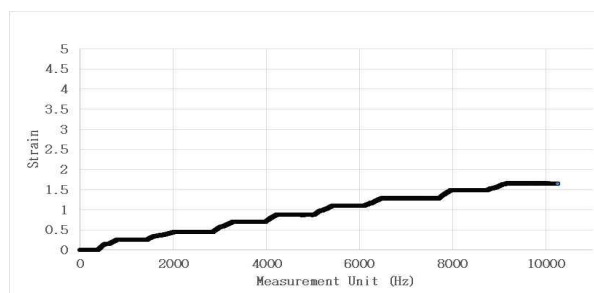
(2) 신규 개발 검정기

〈 신규 개발 횡압검정기 정밀검증 시험결과 (자갈도상) 〉

단계	1회		2회		3회	
	횡압(kN)	변형률	횡압(kN)	변형률	횡압(kN)	변형률
1단계	5	0.43	5	0.34	5	0.37
2단계	10	0.80	10	0.72	10	0.82
3단계	15	1.18	15	0.97	15	1.14
4단계	20	1.32	20	1.12	20	1.24
5단계	25	1.45	25	1.35	25	1.48
6단계	30	1.59	30	1.57	30	1.64
7단계	35	1.71	35	1.76	35	1.89
8단계	40	1.98	40	1.97	40	2.06



〈기존 횡압검정기 정밀검증 시험결과 예시 (자갈도상) 〉



〈신규 개발 횡압검정기 정밀검증 시험결과 예시 (자갈도상)〉

2) 콘크리트도상

(1) 기존 횡압검정기

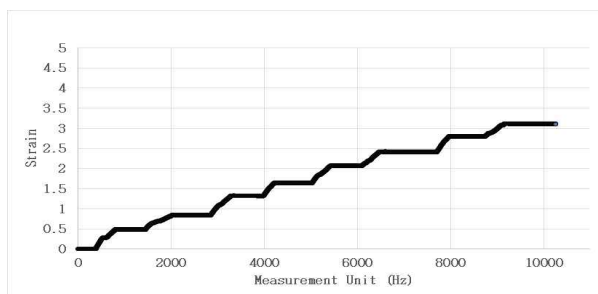
〈 기존 횡압검정기 정밀검정시험 결과 (콘크리트도상) 〉

단계	1회		2회		3회	
	횡압(kN)	변형률	횡압(kN)	변형률	횡압(kN)	변형률
1단계	5	0.51	5	0.49	5	0.51
2단계	10	1.02	10	0.97	10	1.02
3단계	15	1.56	15	1.46	15	1.53
4단계	20	2.04	20	1.95	20	2.04
5단계	25	2.55	25	2.43	25	2.55
6단계	30	3.06	30	2.92	30	3.06
7단계	35	3.57	35	3.40	35	3.57
8단계	40	4.08	40	3.89	40	4.08

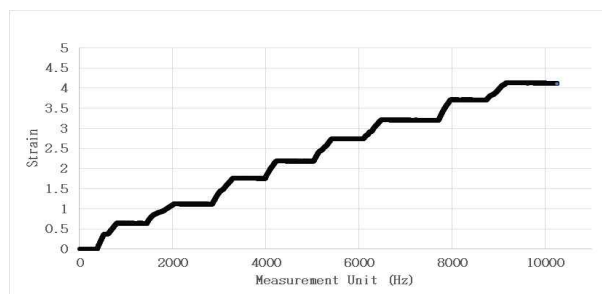
(2) 신규 개발 횡압검정기

〈 신규 개발 횡압검정기 정밀검정시험 결과 (콘크리트도상) 〉

단계	1회		2회		3회	
	횡압(kN)	변형률	횡압(kN)	변형률	횡압(kN)	변형률
1단계	5	0.72	5	0.97	5	0.82
2단계	10	1.34	10	1.61	10	1.58
3단계	15	1.98	15	1.83	15	1.91
4단계	20	2.21	20	2.15	20	2.38
5단계	25	2.77	25	2.77	25	2.85
6단계	30	3.61	30	3.57	30	3.62
7단계	35	3.86	35	3.89	35	4.04
8단계	40	4.16	40	4.17	40	4.29



〈기존 횡압검정기 정밀검증 시험결과 예시 (콘크리트도상)〉



〈신규 개발 횡압검정기 정밀검증 시험결과 예시 (콘크리트도상) 〉

라. 윤중 검증 정밀도 분석

1) 자갈도상 윤중검정 정밀도 분석

	실하중-변형률		기존 검정기			신규 개발 검정기		
	변형률	기준 (%)	변형률	대비 (%)	오차 (%)	변형률	대비 (%)	오차 (%)
1회	7.84	100	7.09	90	-10	8.41	107	+7
2회	8.80	100	7.56	86	-14	8.43	96	-4
3회	8.64	100	8.81	102	+2	8.32	96	-4
평균오차 (%)	8.43	100	7.82	93	-7	8.39	99	-1

2) 콘크리트도상 윤중검정 정밀도 분석

	실하중-변형률		기존 검정기			신규 개발 검정기		
	변형률	기준 (%)	변형률	대비 (%)	오차 (%)	변형률	대비 (%)	오차 (%)
1회	13.54	100	12.84	95	-5	13.18	97	-3
2회	13.48	100	12.36	92	-8	13.09	97	-3
3회	13.21	100	12.67	96	-4	13.23	101	+1
평균오차 (%)	13.98	100	12.68	94	-6	13.17	98	-2

신규 개발된 윤중검정기의 정밀도 분석을 위하여, 실하중(윤중)과 기존검정기, 신규 개발 검정기에 대한 도상형식별 정밀검증시험을 실시하고, 모든 시험결과 Data의 회귀분석을 수행하였다. 분석 결과, 자갈도상의 경우, 실하중(윤중) 대비, 기존검정기는 약 (-)7%의 오차가 발생하였으며, 신규개발검정기의 경우 약 (-)1%의 오차가 발생하였다.

또한, 콘크리트도상의 경우는 실하중(윤중) 대비, 기존검정기는 약 (-)6%의 오차가 발생하였으며, 신규개발검정기는 약 (-)2%의 오차가 발생하였다.

윤중검정시험 Data의 회귀분석을 통한 정밀도 분석 결과, 기존 윤중검정기와 신규 개발 윤중검정기 모두 충분한 정밀도를 확보하였고, 신규 개발 윤중검정기의 정밀도가 다소 높은 것으로 나타났다.

마. 횡압 검증 정밀도 분석

1) 자갈도상 횡압검정 정밀도 분석

	실하중-변형률		기존 검정기			신규 개발 검정기		
	변형률	기준 (%)	변형률	대비 (%)	오차 (%)	변형률	대비 (%)	오차 (%)
1회	2.08	100	2.02	97	-3	1.98	95	-5
2회	2.03	100	1.91	94	-6	1.97	97	-3
3회	2.12	100	2.01	95	-5	2.06	97	-3
평균 오차 (%)	2.07	100	1.98	98	-5	2.01	96	-4

2) 콘크리트도상 횡압검정 정밀도 분석

	실하중-변형률		기존 검정기			신규 개발 검정기		
	변형률	기준 (%)	변형률	대비 (%)	오차 (%)	변형률	대비 (%)	오차 (%)
1회	4.34	100	4.08	94	-6	4.16	96	-4
2회	4.23	100	3.89	92	-8	4.17	99	-1
3회	4.53	100	4.08	90	-10	4.29	95	-5
평균 오차 (%)	4.37	100	4.02	92	-8	4.21	96	-4

신규 개발된 횡압검정기의 정밀도 분석을 위하여, 실하중(횡압)과 기존검정기, 신규 개발 검정기에 대한 도상형식별 정밀검증시험을 실시하고, 모든 시험결과 Data의 회귀분석을 수행하였다. 분석 결과, 자갈도상의 경우 실하중(횡압) 대비, 기존검정기의 경우 약 (-)5%의 오차가 발생하였고, 신규개발 검정기의 경우 약 (-)4%의 오차가 발생하였다.

또한, 콘크리트도상의 경우 실하중(횡압) 대비, 기존검정기의 경우 약 (-)8%의 오차가 발생하였고, 신규개발검정기의 경우 약 (-)4%의 오차가 발생하였다.

따라서, 기존 검정기와 신규 개발 검정기에 대하여 정밀 윤중 및 횡압검정시험을 수행하였으며, 이를 실하중-변형률 시험데이터와 비교한 결과, 최대 오차율이 기존 검정기는 약 8% 발생하였으며, 신규 검정기는 약 4% 발생하는 것으로 나타나, 신규 개발 검정기의 정밀도가 다소 높은 것으로 분석되었다.

(4) 테스트 베드를 활용한 상시열차 현장재하시험 및 안전성 평가

[테스트베드 교량 1 : 강박스(Steel Box)거더교]

가. 테스트베드(Test Bed) 교량 개요

1) 검토조건

- ① 교량의 구조형식 및 노후화 정도에 따라 거동이 다르므로, 현재 철도교량 중 일반적인 적용을 위한 교량형식
- ② 시험열차 및 상시운행열차 현장재하시험을 위한 접근성 등 계측환경
- ③ 기존 교량 계측데이터 및 관련된 용역자료 유무

2) 대상교량 검토: 일반적인 철도교량인 강박스거더교 형식 선정(100m 이상)

구분	마곡대교	대덕1교	비고
교량형식	ST Box+Truss+ST Box	ST Box+Arch	
연장	2,392m (1,010+1090+292)	285m (45+55+60+125)	
최대경간	ST Box 45m Truss 120m	ST Box 60m Arch 125m	
시험환경 (접근성 등)	하부 점검시설을 통한 접근 및 계측 가능	선로를 통한 접근	
기존자료	초기점검 보고서 KTX운행 관련 안전도 평가 보고서 디젤중련 관련 안전성 검토보고서	초기점검 보고서 디젤중련 관련 안전성 검토보고서	
기타	유지관리 계측	유지관리 계측	
선정	1순위	2순위	

3) 테스트베드 교량(마곡대교)

시설물명		교량 시점위치(읍면동리까지 기입)			교량 종점위치(읍면동리까지 기입)			설계활하중	허용통행하중	
공항철도 교량(마곡대교)		서울특별시 강서구 마곡동			경기도 고양시 덕양구 현천동			EL-18	18 ton	
연장			폭(m)			차로수			내전결계적용여부	
길이(m)	경간수	최대	보도	차도	계	상행	하행	계		
2,390	39	120	8.3	2.4	10.7	1	1	2		
상부구조	경간구성		8@45 + 2@40 + 59 + 58 + 59 + 2@52 + 3@45 + 2@55 + 45 + 4@80 + 85 + 3@120 + 85 + 3@80 + 45 + 2@55 + 3@45 = 2390						하부통과 제한높이(m)	
	구분	경간형식		받침종류		신축이음종류		5		
	대표	트리스교(TR)		pot bearing		방수형 탄성 볼판재				
	기타	강박스거더교(STB)				시트형				
하부구조	구분	교각			교대			교차노선 (또는 교차하천)	교차하천 최고수심(m)	
		형식	기초형식		형식	기초형식				
	대표	중력식(G)				중력식	강관말뚝기초		한강	5
	기타	현장타설말뚝기초								
하천해상교량 해당여부		비해당		부착시설내용						
기타 상세제원										



나. 현장재하시험

1) 개요

본 장에서는 실제 공항철도 주행구간 중 마곡대교를 대상으로 하여, 시험주행열차와 상시주행열차를 이용한 철도교량 및 궤도의 정동적 응답을 측정하였으며 계측항목은 다음과 같다.

표 2.4.15 성능시험기준 (궤도성능시험 평가기준)

측 정 항 목	단 위
윤중	kN
레일 수직 변위	mm
교량 중앙부 처짐	mm
교량 변형률	—

본 과업에서 수행한 현장재하시험 계획은 다음과 같다.

- ① 현장답사일시 : 2020. 4. 3 (금)
- ② 측정일시 : 2020. 4. 27. ~ 29.
- ③ 측정구간 : 경기 고양시 덕양구 소재 ‘마곡대교’ 상선 및 하선 15k320 ~ 15k365, L=45m(P8 ~ P9)”
- ④ 참여기관 : 부천대학교(2명), 서울과학기술대학교(6명), 공항철도(직원 관재 포함 총 8명), 삼림엔지니어링(4명)
- ⑤ 현장시험 작업순서 및 일자별 작업내용

표 2.4.16 현장시험 작업순서

작업순서	작업계획(교량)	작업계획(궤도)
현장착수 전 안전관리	- 측정인원 안전교육 실시 - 현장 안전관리자 배치	· 측정인원 안전교육 실시 · 현장 안전관리자 배치
센서 설치 (측정항목)	- Strain gauge 설치(교량) - 변위계 설치(교량)	- 윤중게이지 설치(2point) - 변위계 설치(침목직상부 3 point) - 침목 간 변위계 (2 point)
계측	- 교량 정/동적응답 측정	- 궤도 정/동적응답 측정
철수 및 도장 보수	- 교량 하부면 게이지 철거 후 도장작업	- 계측장비 철거

표 2.4.17 일자별 작업내용

날짜	시간	작업내용(교량)	시간	작업내용(궤도)	비고
2020. 04. 27.	01:00 ~04:00	현장안전교육	01:00 ~04:00	현장안전교육	시험주행열차: AREX, 주행속도: 20km/h, 60km/h, 및 최대속도
		변위계, Steel Gauge 설치		궤도계측장비 설치	
				윤중검증	
2020. 04. 28.	01:00 ~04:00	정/동적응답 측정	01:00 ~04:00	시험주행열차 정/동적응답 측정	
2020. 04. 29.	01:00 ~04:00	교량하부 도장 보수 및 계측장비 해체	01:00 ~04:00	철수	

* 사다리차 현장 진출입 허가 필요 (공항철도 위탁)

2) 윤중

윤중은 침목간 중심에서 각 100mm 떨어진 위치의 중립축에 45° 의 각도를 가지고 8방향으로 스트레인게이지를 부착하고, 이를 결선하여 단면휨의 영향을 배제하여 전단변형을 측정하여 산정하였다(전단력이 윤중이 된다). 이 상태에서 윤중 검정기를 이용하여 10kN 단위로 40kN까지 재 하하고 윤중을 검정하였다.

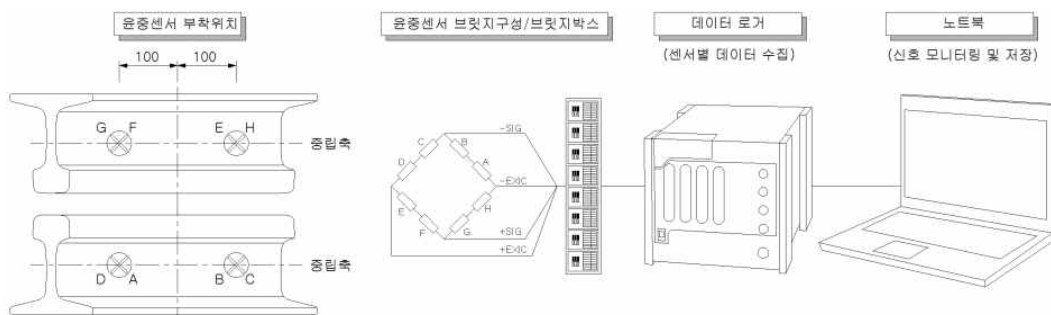


그림 2.4.22 게이지 부착 방법과 계측 시스템

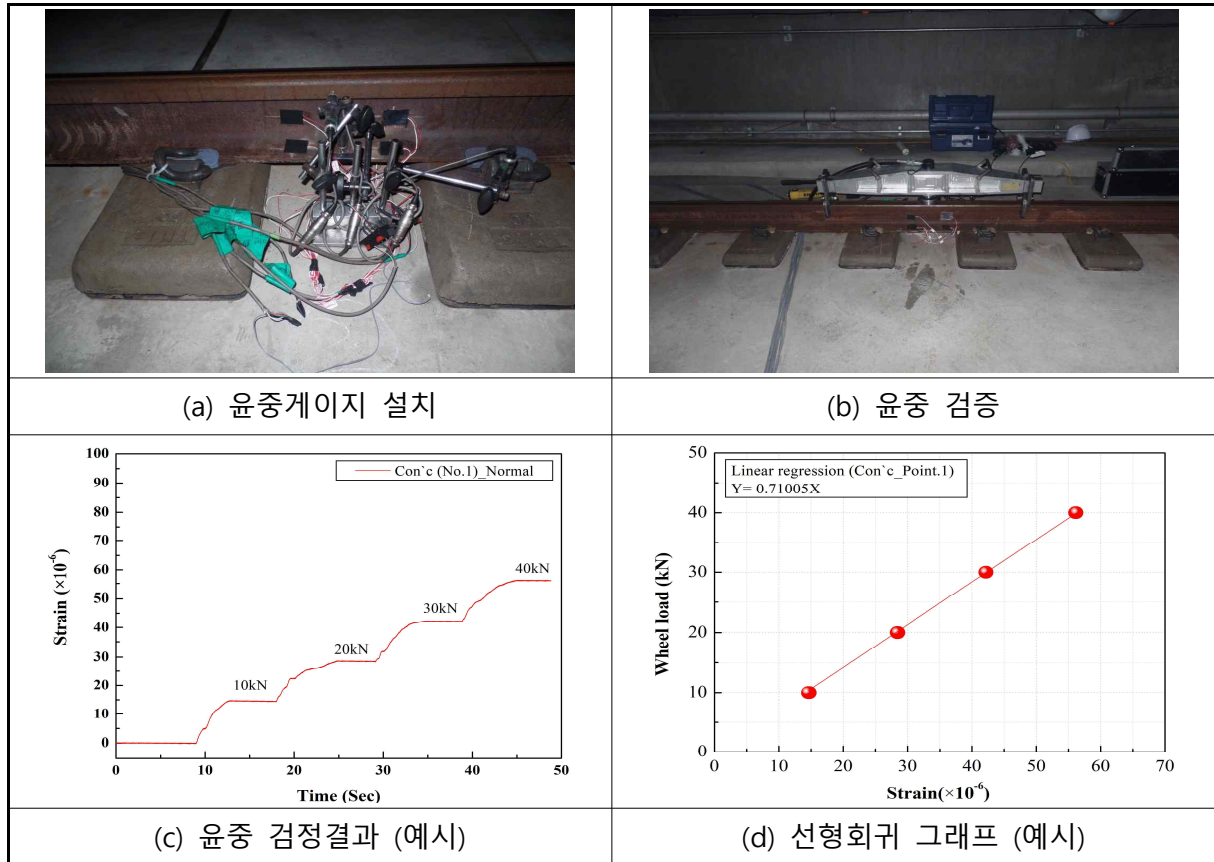
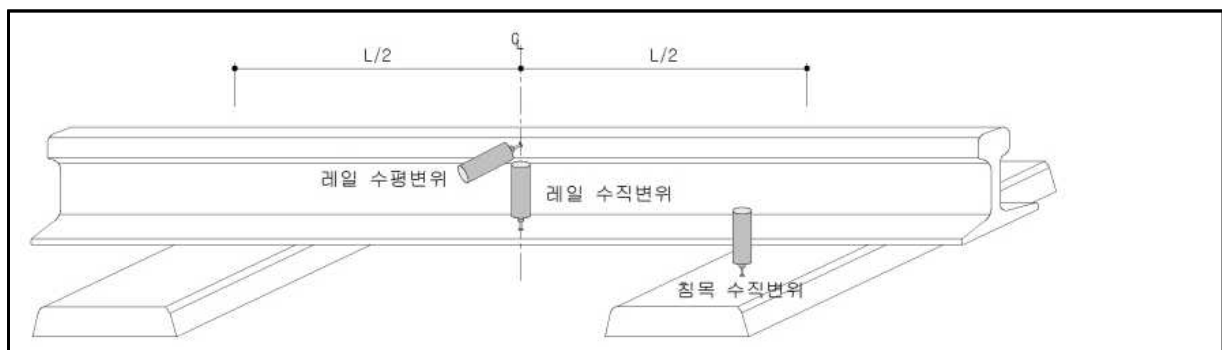
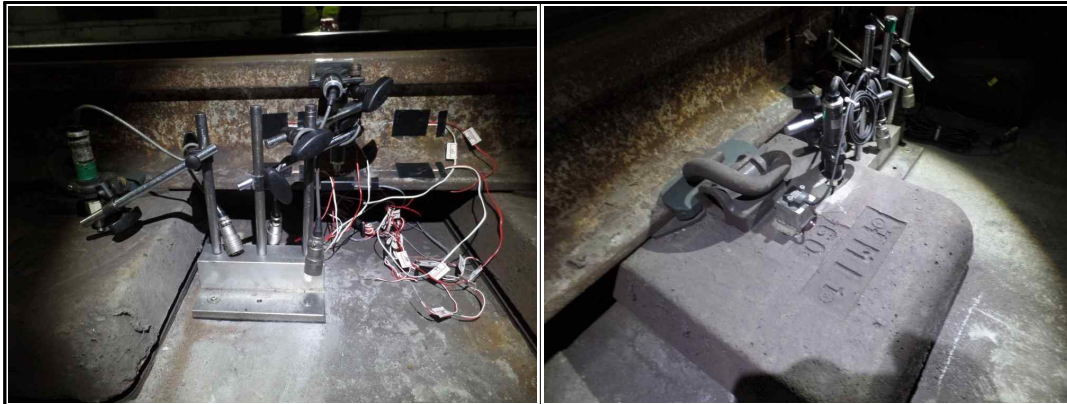


그림 2.4.23 윤중 검증방법

3) 레일 수직 변위

변위는 콘크리트 궤도 고정점을 설치한 후 레일 수직 및 수평 변위와 침목 수직변위를 측정하였다. 침목 간 레일 중심위치에서 레일 수직변위는 레일 저부 상면에, 레일 수평변위는 레일 두부 측면에 설치하였으며 근접한 위치의 침목에 침목 수직변위를 설치하였다.





(a) 레일 수직 및 수평 변위계 설치

그림 2.4.24 변위계 설치광경

다. 측정결과

1) 재하시험열차

마곡대교 계측구간 중 직선부(L=45m)의 현장재하시험을 위해 윤중, 레일 수직변위, 교량 처짐, 및 변형률 등 시험열차에 대한 일련의 계측을 수행하였으며 그 결과를 요약·정리하면 다음과 같다.

표 2.4.18 윤중 계측 결과 (시험열차)

시험 열차 속도		최대 윤중 (kN)	
		Point 1	Point 2
5km/hr	1차	253.41	351.21
	2차	269.71	359.75
20km/hr	1차	263.42	308.67
	2차	259.32	313.98
40km/hr	1차	237.76	287.69
	2차	264.59	268.42
110km/hr	1차	178.74	망실
	2차	234.22	224.76
	3차	158.84	214.93

표 2.4.19 레일 수직 변위 계측 결과 (시험열차)

시험 열차 속도		레일 최대 변위 (mm)						
		Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Point 7
5km/hr	1차	1.93	5.66	2.48	1.37	1.42	1.21	1.28
	2차	1.79	5.43	4.66	1.39	1.22	1.19	1.39
20km/hr	1차	6.81	3.47	2.44	1.34	1.89	1.28	1.43
	2차	1.37	3.12	2.27	3.37	2.38	2.56	1.52
40km/hr	1차	4.27	1.13	1.79	1.83	2.06	1.34	1.67
	2차	3.04	3.88	1.42	1.78	1.27	1.28	2.37
110km/hr	1차	4.78	1.59	0.53	1.17	3.25	1.26	1.47
	2차	2.12	2.37	1.04	1.03	1.22	1.31	2.46
	3차	1.47	1.78	2.36	1.11	1.25	1.36	망실

표 2.4.20 교량 처짐 계측 결과 (시험열차)

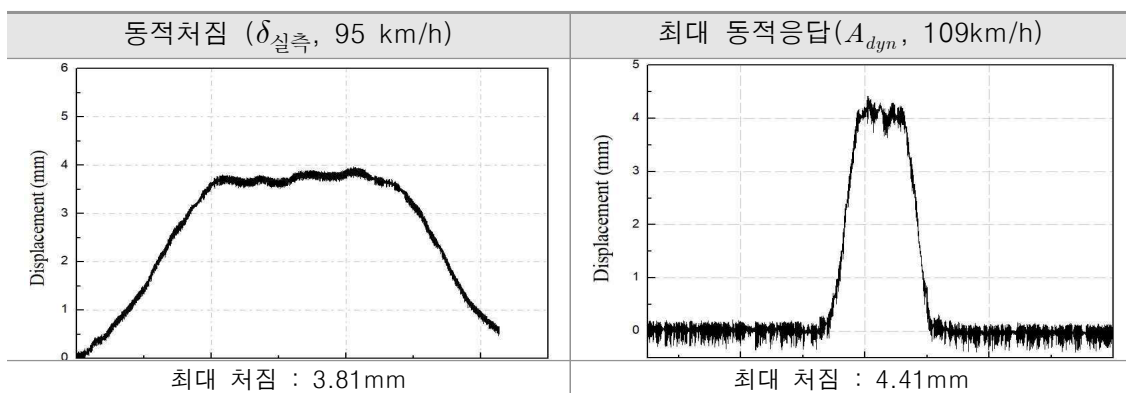
시험 열차 속도		최대 처짐 (mm)		충격계수	
		Point 1	Point 2	Point 1	Point 2
5km/hr	1차	3.27	3.68	—	—
	2차	3.45	3.77	—	—
	평균	3.36	3.725	—	—
20km/h	1차	3.32	3.58	0.988	0.961
	2차	3.42	3.64	1.018	0.977
40km/h	1차	3.38	3.72	1.006	0.999
	2차	3.35	3.68	0.997	0.988
110km/h	1차	3.27	3.58	0.973	0.961
	2차	3.54	3.71	1.054	0.996
	3차	3.36	3.64	1.000	0.977

2) 상시 주행 열차

마곡대교 계측구간 중 직선부(L=45m)의 현장재하시험 을 위해 윤중, 레일 수직변위, 교량 처짐, 및 변형률 등 상시주행에 대한 일련의 계측을 수행하였으며 그 결과를 요약·정리하면 다음과 같다.

상시주행 열차 속도 (km/h)	최대 처짐 (mm)		충격계수	
	Point 1	Point 2	Point 1	Point 2
109	3.68	3.88	1.095	1.042
98	3.43	3.81	1.021	1.023
97	3.37	3.74	1.003	1.004
103	3.71	4.09	1.104	1.098
89	3.44	3.78	1.024	1.015
105	3.81	4.11	1.134	1.103
87	3.57	3.92	1.063	1.052
101	3.47	3.82	1.033	1.026
95	3.65	3.81	1.086	1.023

그림 2.4.25 상시주행열차에 따른 교량 동적처짐($\delta_{\text{실측}}$) 예시



3) 현장시험결과와 분석

마곡대교 구간에 대한 현장재하시험결과와 변위체 대한 교량의 충격계수는 재하시험에서 의사정적상태의 변위값에 대해 충격계수는 1.054로 나타났으며, 상시주행시의 변위에 대해서는 충격계수가 1.134로 나타났다.

라. 구조해석

1) 구조해석 개요

응답보정계수 산정을 위해, 대상교량 모델링을 통한 FE해석을 수행하였으며, 대상교량에 대한 종평면도 및 표준횡단면도는 아래 그림과 같다.

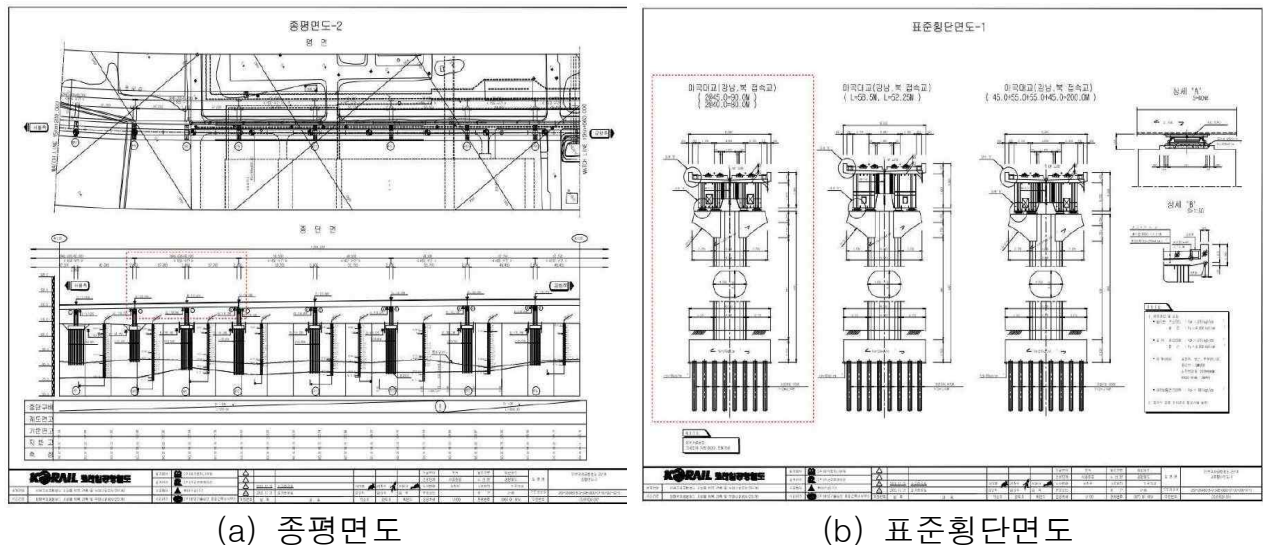


그림 2.4.26 대상교량(마곡대교) 종평면도 및 표준횡단면도

2) 구조해석

정적응답비 산정 중 해석변위($\delta_{\text{해석}}$)의 경우, 대상교량에 대한 구조해석을 통해 구현된 모델링상에서 하중 재하를 통해 나타나는 이론적 변위 중 최대값을 의미한다. 정적응답비 산정에 따른 결과는 기본적으로 공용내하력 평가를 위한 보정계수 산정에 반영되며, 본 장기자문에서는 『KR C-080410, 2014』의 『교량 설계일반』에 의거한 표준열차하중 KRL-2012를 재하하여 교량의 최대 변위값을 산정하였다.

여기서 기존 및 수정 응답보정계수의 산정시 구조해석 값은 동일하게 적용되므로 실제 열차하중의 윤중측정값은 측정값의 편차가 크고, 받침강성의 경우 현재 상태에 대한 강성을 정의하기가 어려우므로 고려하지 않고, 하중은 차량의 설계하중, 받침은 무한강성으로 적용하였다.

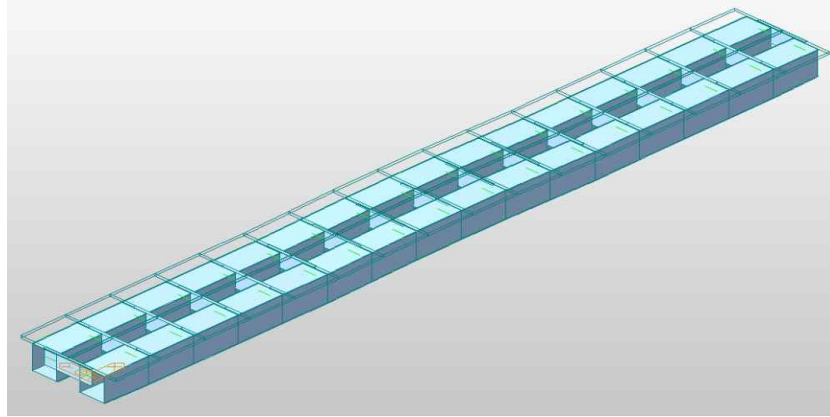


그림 2.4.27 마곡대교 유한요소해석 모델

마. 응답보정계수 산정 결과

1) 기존 응답보정계수 산정

$$\text{기존 응답보정계수}(K_s) = \frac{\text{해석변위}(\delta_{\text{해석}})}{\text{실측변위}(\delta_{\text{실측}})} \times \frac{1 + \text{이론충격계수}(i_{\text{이론}})}{1 + \text{실측충격계수}(i_{\text{실측}})}$$

응답보정계수의 계산에 있어 해석변위($\delta_{\text{해석}}$)의 경우 대상교량 모델링에 따른 FE해석결과 최대변위인 4.725mm를 사용하였으며, 실측변위($\delta_{\text{실측}}$)의 경우 의사정적 시험을 통해 계측한 결과인 3.71mm를 사용하였다. 이론충격계수의 경우 「교량설계하중 (일반설계법, 2016)」을 바탕으로 산정한 L_c 값 0.034를 적용하였으며, 실측충격계수의 경우 의사정적 시험에서 계측된 결과와 더불어 재하시험열차에 의한 교량 최대 변위값을 이용해 계산한 1.054를 적용하였다. 이에 따른 기존 응답보정계수 산정결과는 다음과 같다.

표 2.4.21 기존 응답보정계수 산정결과

해석변위 (mm)	실측변위 (mm)	1+이론충격계수	1+실측충격계수	응답보정계수
4.725	3.71	1.034	1.054	1.249

2) 수정 응답보정계수 산정 결과

응답보정계수를 제안하는 수정 응답보정계수를 적용할 경우 다음과 같이 계산된다.

$$\text{수정 응답보정계수}(K_s) = \frac{\text{해석변위}(\delta_{\text{해석}})}{1} \times \frac{1 + \text{이론충격계수}(i_{\text{이론}})}{\text{동적처짐}(\delta_{\text{실측}})}$$

응답보정계수의 계산에 있어 해석변위($\delta_{\text{해석}}$)의 경우 대상교량 모델링에 따른 FE해석결과 최대변위인 4.725mm를 사용하였으며, 실측변위($\delta_{\text{실측}}$)의 경우 상시주행열차에 의한

결과인 4.11mm를 사용하였다. 수정 응답보정계수에서는 해석변위 및 이론충격계수의 값은 동일하며 실측충격계수의 계산은 계산상 불필요하며 동적처짐만 고려된다. 따라서, 응답보정계수의 산정결과는 다음과 같다.

표 2.4.22 기존 응답보정계수 산정결과

해석변위 (mm)	동적처짐 (mm)	1+이론충격계수	1+실측충격계수	응답보정계수
4.725	4.11	1.034	—	1.188

수정 응답보정계수에서는 구조해석에 의한 해석값과 이론충격계수가 기존 응답보정계수 산정식과 동일하므로 동적변위 만을 이용하면 응답보정계수의 산정이 용이하다. 동적변위 측정값 각각에 대해 응답보정계수를 계산하여 다음 표에 나타내었다. 이 수정 응답보정계수는 기존 응답보정계수 1.249 대비 0.951~1.046의 범위에 분포하며 약 $\pm 5\%$ 정도의 범위내에 있음을 알 수 있다. 따라서, 수정 응답보정계수는 기존의 응답보정계수와 비교하여 어느 정도의 변동성이 발생할 수 있는 범위를 허용하는 조건하에서 기존 응답보정계수를 대체하여 사용할 수 있다고 판단된다.

표 2.4.23 열차속도별 수정 응답보정계수 산정결과 (마곡대교)

열차속도 (km/h)	설계처짐 (mm)	1+이론충격계수 ($i_{이론}$)	동적처짐(point1,2 중 최대값)($\delta_{실측}$)	수정 응답보정계수
109	4.725	0.034	3.88	1.259
98			3.81	1.282
97			3.74	1.306
103			4.09	1.195
89			3.78	1.293
105			4.11	1.189
87			3.92	1.246
101			3.82	1.279
95			3.81	1.282

[테스트베드 교량 2 : 콘크리트 박스(Concrete Box)거더교]

가. 테스트베드 교량 개요

실 구조물에 대한 현장재하시험으로부터 주행차량의 하중과 구조물의 동적응답을 파악하기 위하여 궤도윤중시험, 시험열차 및 상시열차에 대한 구조물 응답 측정을 실시하였다.

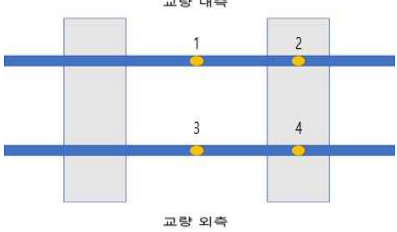
			
시설물명	활천제2교	시험위치	S1~S2 (2@40m, FSM) S3 (1@40m, FSM)
구조형식	PSC BOX Girder	준공년도	2008년 05월
교량제원	L=120.0m B=14.0m	하부구조	중공박스형 교대 2기 중공원형 교각 2기
설계하중	HL하중	기초형식	직접기초

나. 현장재하시험

1) 윤중측정시험

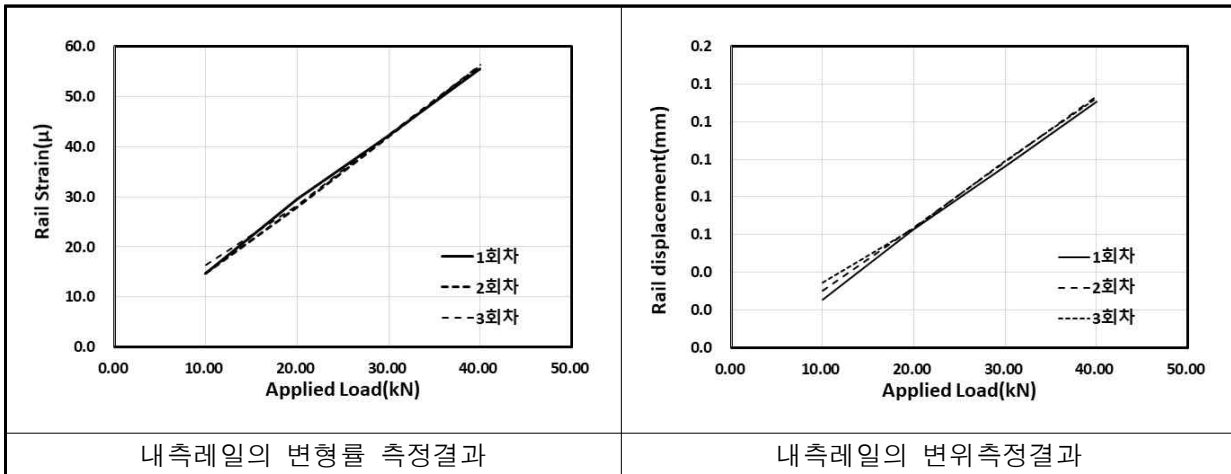
윤중은 침목간 중심에서 각 100mm 떨어진 위치의 중립축에 45°의 각도를 가지고 8방향으로 스트레인게이지를 부착하고, 이를 결선하여 단면휨의 영향을 배제한 후 전단변형을 측정하여 산정하였다. 이 상태에서 윤중검증기를 이용하여 10kN 단위로 40kN까지 가압하며 윤중을 검증하였다.

윤중시험은 하선 선로에 대해 외측레일과 내측레일에 대해 침목 중앙부(1,3번)와 침목 직상부(2,4번)에 대해 측정하였으며 윤중 및 횡압을 측정하였다. 윤중 및 횡압 측정은 각 시험개소마다 3회씩 측정하였으며, 결과값의 평균값을 시험값으로 취하였다.

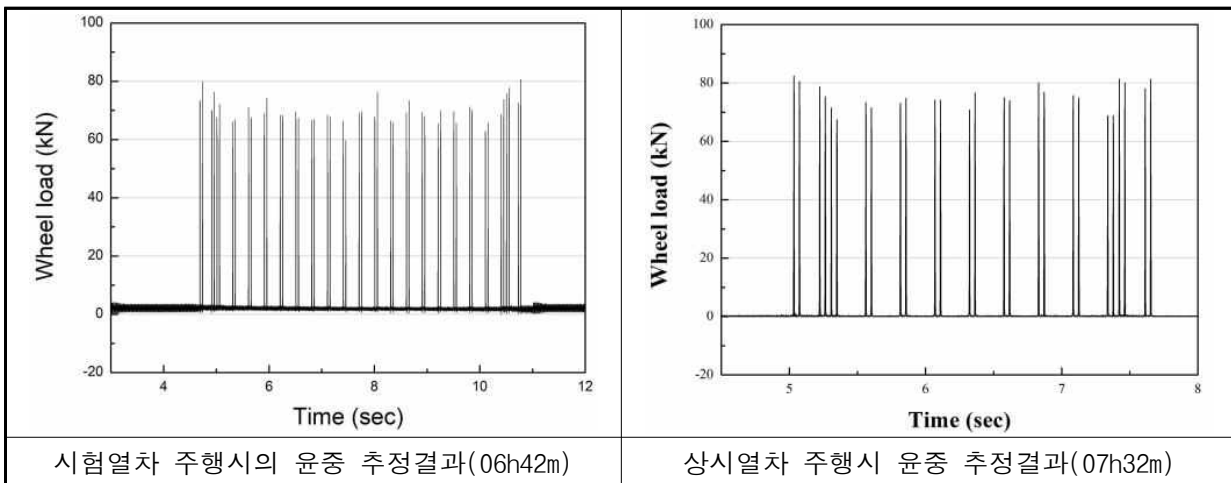
Time	Calibration	시험 위치
01:38~01:40	3번 윤중 검증	
01:41~01:43	4번 윤중 검증	
01:46	3번 횡압 검증	
01:51~01:53	1번 윤중 검증	
01:54~01:57	2번 윤중 검증	
02:03	1번 횡압 검증	

단위 하중에 의한 레일의 변형률, 변위에 대한 응답을 구하기 위하여 레일의 각 위치에 변형률, 변위를 측정하였다. 변형률은 침목 중앙과 침목 직상의 위치에 부착하였으며, 변위는 침목 중앙부에 부착하였다.

〈윤중 및 횡압시험 전경〉

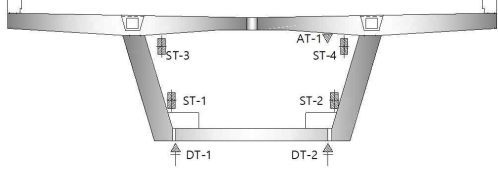


윤중시험 결과로부터 획득한 침목 중앙에서의 변형률을 이용하여 시험열차 및 상시열차의 축중을 환산하여 추정하였으며 그 결과는 다음과 같다.



2) 교량 재하시험

가. 현장측정

정모멘트부(A A단면)	현장측정 준비	
		

나. 시험열차 및 운행열차

시험열차 종류		편성	축간거리	축하중		비고
				동력차(PC)	객차(MT, IT)	
재하시험 특별편성 열차		20량	3.000mm	170kN	170kN	KTX
최초점검열차	170km/h	20량	3.000mm	170kN	170kN	KTX
상시운행열차	250~300km/h	10~20량	3.000mm	170kN	170kN+승객하중	KTX, KTX-산천

다. 처짐측정결과

D1, D2의 값의 변화가 큰 것은 상행, 하행 주행선로의 차이에 의한 것으로 결과분석시 주행선로와 측정위치를 고려하여 분석하였다.

주행 속도		처짐 범위(mm)		비고 (최대값 재하위치)
		DT1	DT2	
정적재하시험	의사정적	-0.797	-1.305	
시험열차	230km/hr	-0.820	-1.320	DT2
	250km/hr	-0.890	-1.297	DT2
	270km/hr	-0.820	-1.289	DT2
최초점검열차	170km/hr	-1.125	-1.352	DT2
	170km/hr	-1.297	-0.813	DT1
상시열차	280km/hr(22:00)_K	-0.773	-1.008	DT2
	265km/hr(22:17)_K	-1.328	-0.492	DT1
	230km/hr(22:22)_산	-0.789	-0.945	DT2
	260km/hr(22:26)_K	-1.328	-0.539	DT1
	260km/hr(22:33)_K	-0.805	-0.938	DT2
	295km/hr(22:43)_산	-1.375	-0.516	DT1
	285km/hr(22:44)_K	-0.883	-0.945	DT2
	255km/hr(22:49)_K	-0.875	-0.992	DT2
	275km/hr(22:58)_산	-1.305	-0.570	DT1
	295km/hr(22:59)_산	-0.828	-0.961	DT2
	265km/hr(23:07)_K	-1.343	-0.563	DT1
	255km/hr(23:29)_산	-0.750	-1.000	DT2

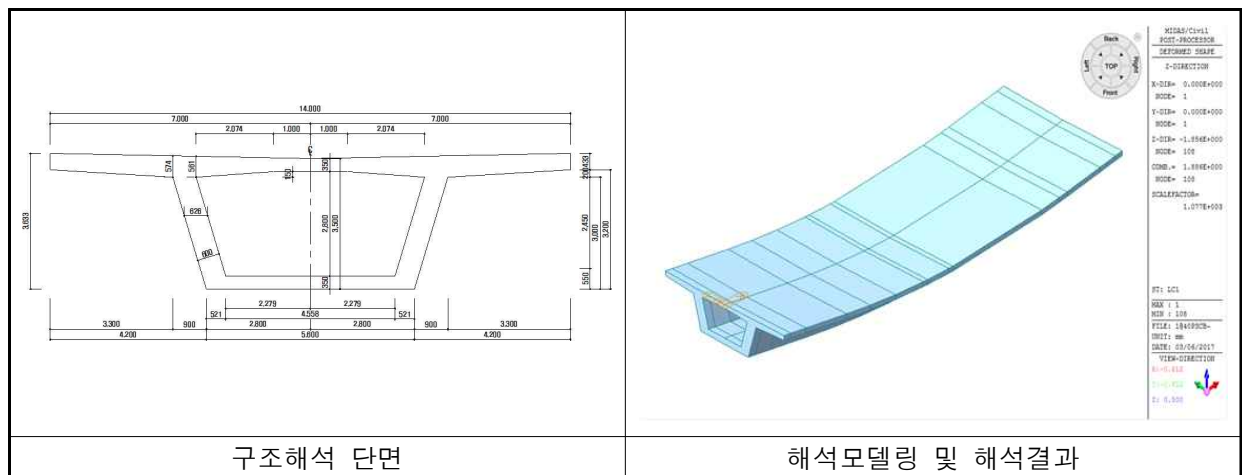
라. 충격계수의 산정

응답보정계수의 산정을 위한 충격계수의 계산결과 재하시험의 경우 측정변위는 1.320mm, 충격계수는 1.011로 나타났으며, 상시열차의 경우 측정변위는 1.375mm, 충격계수는 1.054로 나타났다.

주행속도		처짐 변위(mm)		비고 (최대값 재하위치)
		DT1	DT2	
동적재 하시험	230km/hr	0.628	1.011	DT2
	250km/hr	0.682	0.994	DT2
	270km/hr	0.628	0.988	DT2
최초점검열차	170km/hr	0.862	1.036	DT2
	170km/hr	0.994	0.623	DT1
상시열차	280km/hr(22:00)_K	0.592	0.772	DT2
	265km/hr(22:17)_K	1.018	0.377	DT1
	230km/hr(22:22)_산	0.605	0.724	DT2
	260km/hr(22:26)_K	1.018	0.413	DT1
	260km/hr(22:33)_K	0.617	0.719	DT2
	295km/hr(22:43)_산	1.054	0.395	DT1
	285km/hr(22:44)_K	0.677	0.724	DT2
	255km/hr(22:49)_K	0.670	0.760	DT2
	275km/hr(22:58)_산	1.000	0.437	DT1
	295km/hr(22:59)_산	0.634	0.736	DT2
	265km/hr(23:07)_K	1.029	0.431	DT1
	255km/hr(23:29)_산	0.575	0.766	DT2

라. 구조해석

구조해석결과 해석에 의한 최대 변위는 1.693mm으로 계산되었다.



마. 응답보정계수 산정 결과

1) 기존 응답보정계수 산정

$$\text{기존 응답보정계수}(K_s) = \frac{\text{해석변위}(\delta_{\text{해석}})}{\text{실측변위}(\delta_{\text{실측}})} \times \frac{1 + \text{이론충격계수}(i_{\text{이론}})}{1 + \text{실측충격계수}(i_{\text{실측}})}$$

응답보정계수의 계산에 있어 해석변위($\delta_{\text{해석}}$)의 경우 최대변위인 1.6935mm를 사용하였으며, 실측변위($\delta_{\text{실측}}$)의 경우 의사정적 시험을 통해 계측한 결과인 1.305mm를 사용하였다. 이론충격계수의 경우 「교량설계하중 (일반설계법, 2016)」을 바탕으로 산정한 L_c 값 1.055를 적용하였으며, 실측충격계수의 경우 재하시험결과로부터 얻은 1.036을 적용하였다. 이에 따른 기존 응답보정계수 산정결과는 다음과 같다.

표 2.4.24 기존 응답보정계수 산정결과

해석변위 (mm)	실측변위 (mm)	1+이론충격계수	1+실측충격계수	응답보정계수
1.693	1.305	1.055	1.036	1.321

2) 수정 응답보정계수 산정 결과

응답보정계수를 제안하는 수정 응답보정계수를 산정할 경우 다음과 같이 계산된다.

$$\text{수정 응답보정계수}(K_s) = \frac{\text{해석변위}(\delta_{\text{해석}})}{1} \times \frac{1 + \text{이론충격계수}(i_{\text{이론}})}{\text{동적처짐}(\delta_{\text{실측}})}$$

응답보정계수의 계산에 있어 해석변위($\delta_{\text{해석}}$)의 경우 기존 응답보정계수의 적용값과 동일하게 1.693mm를 사용하였으며, 실측변위($\delta_{\text{실측}}$)의 경우 상시주행열차에 의한 결과인 1.375mm를 사용하였다. 수정 응답보정계수에서는 해석변위 및 이론충격계수의 값은 동일하고 실측충격계수의 계산은 계산상 불필요하며 동적처짐만 고려된다. 응답보정계수의 산정결과는 다음과 같다.

표 2.4.255 기존 응답보정계수 산정결과

해석변위 (mm)	동적처짐 (mm)	1+이론충격계수	1+실측충격계수	응답보정계수
1.693	1.375	1.055	—	1.299

수정 응답보정계수에서는 구조해석에 의한 해석값과 이론충격계수가 기존 응답보정계수 산정식과 동일하므로 동적변위에 의해 계산될 수 있으며, 수정 응답보정계수는 기존 응답보정계수 1.321 대비 1.7%로 비슷하게 나타나 수정응답보정계수의 적용이 가능한 것으로 나타났다.

2.4.7 철도교량 구조안전진단 평가기준 표준(안)(연구성과 1-3)

(1) 표준(안) 작성 추진 경위

가. 목적

현행 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침은 도로교 기반의 현장재하시험 및 안전성 평가로서 철도교량의 특성 및 상시운행열차를 고려한 현장재하시험 및 안전성 평가 방법의 세부지침 개선을 통하여 철도교량 구조안전진단 평가기준 표준(안)을 마련하고자 함

나. 활용 범위 및 대상

- 활용범위 : 철도교량의 현장재하시험시 상시운행열차에 의한 현장재하시험 및 응답 평가, 안전성 평가 및 내하력 평가 방법의 근거로 활용되며 철도교량의 정, 동적 재하시험이 어려운 경우 모두 적용 가능
- 관련기관 : 한국철도공사, 국가철도공단, 공항철도, 서울교통공사, 철도운영 민간사업자, 안전진단 및 유지관리 관련 전문업체 등

다. 중간평가 자문회의

- 일정 : 2019년 11월 21일, 서울역 공항철도 회의실
- 자문기관 : 한국철도공사, 한국철도시설공단, 서울교통공사, 한국구조물안전연구원, (주)씨티씨, (주)장민ENC
- 주요내용 : 철도교량 구조안전진단 평가기준 제시 및 연구성과에 대한 관련기관 의견 수렴
- 근거자료

[illegible]

라. 추진 실적

- 2019.05.09. 철도교량 구조안전진단 평가기준 개선 방안 연구기관별 추진 방안 협의
- 2019.06.05.~10.28. 경부고속철도 현장 계측 및 회의, 철도교량 안전진단 전문업체 (주)삼림엔지니어링 협업, 서울교통공사, 한국철도공사, 한국철도시설공단 관계자 참관
- 2020.03.31.~04.29 공항철도 구간 교량 현장계측 및 회의, 계측전문기관 (주)케이엠티엘 협업, 서울교통공사 관계자 참관
- 현행 시설물의 안전 및 유지관리 실시 세부지침의 개선 방안으로부터 철도교량 구조안전진단 평가기준 표준(안)을 최종 성과물로 제시

(2) 시설물의 안전 및 유지관리 실시 등에 관한 지침(안전점검·진단 편)

지침(현행)	지침(제시안)
1.5 안전성평가 기준 및 방법 1.5.1 일반 1.5.2 안전성평가 기준 1.5.3 안전성평가 산정 방법 나. 내하력평가 1) 허용응력법에 의한 공용내하력 평가 (가) 내하율의 평가	<생략>
(나) 공용내하력의 산정 허용응력법에 의한 교량부재의 공용내하력은 다음 식으로 계산한다. $\text{공용내하력}(P) = K_s \times RF \times P_r$ <생략>	<생략>
여기서, $K_s = \text{응답보정계수} = \frac{\delta_{\text{계산}}}{\delta_{\text{실측}}} \cdot \frac{1+i_{\text{계산}}}{1+i_{\text{실측}}}$ 또는, $\text{응답보정계수} = \frac{\epsilon_{\text{계산}}}{\epsilon_{\text{실측}}} \cdot \frac{1+i_{\text{계산}}}{1+i_{\text{실측}}}$ <신설>	<도로교와 철도교 기준 분리 (안)> 여기서, $K_s = \text{응답보정계수} = \frac{\delta_{\text{계산}}}{\delta_{\text{실측}}} \cdot \frac{1+i_{\text{계산}}}{1+i_{\text{실측}}}$ 또는, $\text{응답보정계수} = \frac{\epsilon_{\text{계산}}}{\epsilon_{\text{실측}}} \cdot \frac{1+i_{\text{계산}}}{1+i_{\text{실측}}}$ 단, 철도교의 경우 (의사)정적재하시험이 곤란하여 상시주행 열차에 의한 응답을 활용할 경우 응답보정계수는 다음과 같이 산정할 수 있다. $K_s = \text{응답보정계수} = \frac{\delta_{\text{계산}}}{\delta_{\text{상시 실측}}} \cdot \frac{1+i_{\text{계산}}}{1}$ 또는, $\text{응답보정계수} = \frac{\epsilon_{\text{계산}}}{\epsilon_{\text{상시 실측}}} \cdot \frac{1+i_{\text{계산}}}{1}$
2) 강도설계법에 의한 공용내하력 평가 (가) 내하율의 평가 <생략>	<생략>
여기서, $K_s = \text{응답보정계수} = \frac{\delta_{\text{계산}}}{\delta_{\text{실측}}} \cdot \frac{1+i_{\text{계산}}}{1+i_{\text{실측}}}$ 또는, $\text{응답보정계수} = \frac{\epsilon_{\text{계산}}}{\epsilon_{\text{실측}}} \cdot \frac{1+i_{\text{계산}}}{1+i_{\text{실측}}}$ <신설>	<도로교와 철도교 기준 분리 (안)> 여기서, $K_s = \text{응답보정계수} = \frac{\delta_{\text{계산}}}{\delta_{\text{실측}}} \cdot \frac{1+i_{\text{계산}}}{1+i_{\text{실측}}}$ 또는, $\text{응답보정계수} = \frac{\epsilon_{\text{계산}}}{\epsilon_{\text{실측}}} \cdot \frac{1+i_{\text{계산}}}{1+i_{\text{실측}}}$ 단, 철도교의 경우 (의사)정적재하시험이 곤란하여 상시주행 열차에 의한 응답을 활용할 경우 응답보정계수는 다음과 같이 산정할 수 있다. $K_s = \text{응답보정계수} = \frac{\delta_{\text{계산}}}{\delta_{\text{상시 실측}}} \cdot \frac{1+i_{\text{계산}}}{1}$ 또는, $\text{응답보정계수} = \frac{\epsilon_{\text{계산}}}{\epsilon_{\text{상시 실측}}} \cdot \frac{1+i_{\text{계산}}}{1}$
다. 재하시험 1) 일반 2) 재하시험 대상교량 선정 3) 재하시험 계획 (가) 시험경간 선정	<생략>

지침(현행)	지침(제시안)
(나) 계측기 및 센서의 부착 ③ 4차선 이하 교량의 경우 계측기와 센서의 부착 위치는 시험경간 내 전 거더를 대상으로 하며 4차선 이상의 경우는 예외로 한다. 〈신설〉	〈도로교와 철도교 기준 분리 (안)〉 ③ 4차선 이하 <u>도로교</u>량의 경우 ----- ----- ----- ④ 복선 이하 <u>철도교</u>량의 경우 계측기와 센서의 부착 위치는 <u>시험경간 내 전 거더를 대상으로 하며 3복선 이상의 경우는 예외로 한다.</u>
(다) 재하하중 선택 ① 재하하중은 교량의 형식과 설계활하중 및 노후정도를 고려하여 하중재하로 인한 계측효과를 충분히 얻을 수 있도록 재하하중을 정하여야 한다. 그리고 전륜/후륜의 축중은 현행 법상 과적기준을 초과하지 않으며, 도로교설계기준의 규정을 벗어나지 않는 범위 내에서 시험 중 중량의 변화가 없는 토사를 적재한 덤프트럭을 사용한다. 〈신설〉	〈도로교와 철도교 기준 분리 (안)〉 ① ----- ----- ----- ----- ----- ----- <u>철도교의 경우 운행열차와 동일하거나 시험열차로 활용이 가능한 열차를 사용하되 열차종류 및 열차편성은 관계기관과 사전 협의하여 사용한다.</u>
② 시험차량은 성능이 양호한 차량을 선택하며, 차량에 대한 제원과 축중을 정확히 파악한다. 3차선 이상의 교량은 2대 이상을 교폭 또는 교축방향으로 동시에 재하시켜 시험하는 것이 바람직하며, 이때 트럭간 총중량의 차이는 최소화하고 가급적 같은 모델의 차량을 사용하는 것이 좋다. 〈신설〉	〈도로교와 철도교 기준 분리 (안)〉 ② ----- ----- ----- ----- ----- <u>철도교의 경우 시험열차는 차량의 제원과 축중이 조사된 차량을 사용하며 재하 방법은 관계기관과 사전협의하여 정한다. 시험열차의 축중이 명확하지 않은 경우는 열차의 축중 조사를 위한 별도의 윤중측정 시험을 사용하는 것이 좋다.</u>
(라) 재하시험 계획 (마) 안전계획 4) 정적재하시험 5) 동적재하시험 6) 의사정적재하시험	〈생략〉

지침(현행)	지침(제시안)
〈신설〉	〈도로교와 철도교 기준 분리 (안)〉 <u>(7) 상시하중주행시험</u> <u>철도교량의 현장재하시험은 본 지침의 시험방법을 기본으로 정적 및 동적재하시험을 수행하지만 고속철도 교량과 같이 현장재하시험 수행에 많은 어려움이 있는 경우 상시주행열차에 의한 교량의 응답측정결과를 이용하여 교량의 내하력 또는 안전성을 평가할 수 있다.</u> <u>철도교량의 현장재하시험에 있어 상시하중주행시험은 차량의 통행제한이 곤란한 경우, 측정가능 시간이 짧아 재하시험을 수행하기 어려운 경우, 재하시험을 위한 현장작업의 어려움 또는 안전관리의 어려움이 예상되는 경우, 정적시험 또는 의사정적재하시험이 곤란한 경우 등에 전문가의 의견과 관할 기관과의 충분한 협의를 통하여 적용여부를 판단한다.</u> <u>상시하중주행시험은 교량을 통과하는 상시열차하중에 의한 교량의 응답을 측정하는 것이므로 통과차량의 하중, 통과 속도 등을 알고 있거나 별도의 시험을 통하여 통과차량의 하중, 통과속도 등을 파악하여야 한다.</u> <u>상시하중주행시험은 정적재하시험에 의한 결과와 비교할 때 실측충격계수의 산정값에 영향을 미치며, 변동범위도 크게 나타나므로 기존의 측정자료로부터 동적증폭효과의 변동 범위를 사전에 분석할 필요가 있다.</u> <u>또한, 상시하중주행시험에 의한 응답보정계수는 상시열차주행시험의 적용에 따른 간소화된 산정방법을 적용할 수 있다.</u>
1.6 종합평가 기준 및 방법 1.6.1 종합평가기준 1.6.2 종합평가 결과 산정 방법	〈생략〉

(3) 시설물의 안전 및 유지관리 실시 등에 관한 지침(성능평가 편) 비교표

지침(현행)	지침(제시안)
1.2 현장조사 1.2.2 현장조사 요령 가. 안전성능 평가 2) 구조안전성능 (가) 재하시험	<생략>
② 계측기 및 센서의 부착 4차선 이하 교량의 경우 계측기와 센서의 부착 위치는 시험경간 내 전 거더를 대상으로 하며 4차선 이상의 경우는 예외로 한다. <신설>	<도로교와 철도교 기준 분리 (안)> ② 계측기 및 센서의 부착 ----- ----- ----- <u>복선 이하 철도교량의 경우 계측기와 센서의 부착 위치는 시험경간 내 전 거더를 대상으로 하며 3복선 이상의 경우는 예외로 한다.</u>
③ 재하하중 선택 재하하중은 교량의 형식과 설계활하중 및 노후정도를 고려하여 하중재하로 인한 계측효과를 충분히 얻을 수 있도록 재하하중을 정하여야 한다. 그리고 전륜/후륜의 축중은 현행법상 과적기준을 초과하지 않으며, 건설기준코드(구 도로교설계기준)의 규정을 벗어나지 않는 범위 내에서 시험 중 중량의 변화가 없는 토사를 적재한 덤프트럭을 사용한다. <신설>	<도로교와 철도교 기준 분리 (안)> ③ 재하하중 선택 ----- ----- ----- ----- ----- <u>철도교의 경우 운행열차와 동일하거나 시험열차로 활용이 가능한 열차를 사용하되 열차종류 및 열차편성은 관계기관과 사전 협의하여 사용한다.</u>
시험차량은 성능이 양호한 차량을 선택하며, 차량에 대한 제원과 축중을 정확히 파악한다. 3차선 이상의 교량은 2대 이상을 교폭 또는 교축방향으로 동시에 재하시켜 시험하는 것이 바람직하며, 이때 트럭간 총중량의 차이는 최소화하고 가급적 같은 모델의 차량을 사용하는 것이 좋다. <신설>	<도로교와 철도교 기준 분리 (안)> ----- ----- ----- ----- ----- <u>철도교의 경우 시험열차는 차량의 제원과 축중이 조사된 차량을 사용하며 재하 방법은 관계기관과 사전협의하여 정한다. 시험열차의 축중이 명확하지 않은 경우는 열차의 축중 조사를 위한 별도의 윤중측정 시험을 수행한다.</u>
철도교량의 경우 실제 열차를 사용한다(무궁화 기관차, KTX, KTX-산천 등).	<생략>

지침(현행)	지침(제시안)
(5) 동적재하시험 ① 차량 주행시험 특수한 목적을 제외하고 동적재하시험은 재하차량 이외에 일반차량이 완전히 통제된 상태에서 실시한다(철도교량의 경우 실제 열차를 활용). 정적재하시험용 계측기와 동적재하시험용 계측기가 상이한 경우 계측기의 측정오차를 검정하기 위하여 동적재하시험용 계측기를 사용하여 정적재하시험과 동일한 1개 재하 경우를 선택하여 정적재하시험을 실시한다.	<생략>
시험차량의 주행속도는 상행차선과 하행차선에서 각각 최저 10km/h에서부터 현장여건상 가능한 최대 주행속도까지 10km/h 간격으로 속도를 증가시키면서 교량의 동적응답신호를 측정한다. 측정결과를 이용하여 교량의 충격계수, 동적변형률, 가속도, 진동주기, 고유 진동수에 따라 사용성능 측면에서의 교량진동 특성을 분석한다.	<도로교와 철도교 기준 분리 (안)> ----- ----- ----- ----- <u>철도교의 경우, 시험열차의 주행속도는 상선과 하선에서 최저 약 20km/h에서부터 현장여건상 가능한 최대 주행속도까지 적절한 간격으로 속도를 증가시키면서 교량의 동적응답신호를 측정한다.</u>
(6) 의사정적재하시험(도로교량에 적용) 의사정적재하시험은 동적재하시험과 마찬가지로 차량주행시험을 실시하여 계측된 응답파형으로부터 정적응답을 간접적으로 유추하는 재하시험 방법으로서 동적 측정장비를 이용할 수 있고 정적재하시험에 비하여 차량통제가 용이하기 때문에 재하시험 시간을 단축할 수 있는 장점이 있다. 따라서 의사정적재하시험은 평가대상 교량의 현장여건, 교통량 등을 감안하여 차량의 전면교통통제를 실시하는 것이 바람직하지 않다고 판단될 때 실시하도록 한다. 의사정적재하시험은 다음과 같은 요령으로 실시한다. 시험대상 교량에 정적재하시험과 같은 요령으로 재하경우별로 재하위치를 표시한다. 시험대상 교량 전후방에 신호 및 교통통제요원을 배치하고 차량의 통행이 없는 시기에 시험차량을 교량으로 유도하여 재하위치를 통과하도록 한다. 차량의 통행이 없는 시기를 확보하기 곤란한 경우에는 시험차량의 전후방에 주행유도 차량을 운행하여, 시험차량이 평가대상교량을 통과할 때까지 다른 차량의 교량진입을 통제한다. 의사정적재하시험에서 시험차량의 속도는 약 10km/h 이내의 속도를 유지하도록 한다. 의사정적재하시험에서 계측된 데이터에서 동적효과를 제거하여 정적효과를 구한다.	<생략>

지침(현행)	지침(제시안)
〈신설〉	〈도로교와 철도교 기준 분리 (안)〉 (7) <u>의사정적재하시험(철도교량에 적용)</u> 의사정적재하시험은 동적재하시험과 마찬가지로 열차주행 시험을 실시하여 계측된 응답파형으로부터 정적응답을 간접적으로 유추하는 재하시험 방법으로서 동적 측정장비를 이용할 수 있고 재하시험 시간을 단축할 수 있는 장점이 있다. 따라서 의사정적재하시험은 평가대상 교량의 현장여건, 계측시간, 열차 차단시간 등을 감안하여 필요한 경우 실시할 수 있다. 의사정적재하시험은 다음과 같은 요령으로 실시한다. 시험대상 교량에 정적재하시험과 같은 요령으로 상선 또는 하선에 열차를 주행한다. 시험대상 교량 전후방에 신호수를 배치하고 열차의 진입 여부를 신호하도록 한다. 의사정적재하시험에서 시험차량의 속도는 약 20km/h 이내에서 동적효과가 발생하지 않는 속도를 유지한다.
	〈도로교와 철도교 기준 분리 (안)〉 (8) <u>상시하중주행시험</u> 철도교량의 현장재하시험은 본 지침의 시험방법을 기본으로 정적 및 동적재하시험을 수행하지만 고속철도 교량과 같이 현장재하시험 수행에 많은 어려움이 있는 경우 상시주행 열차에 의한 교량의 응답측정결과를 이용하여 교량의 내하력 또는 안전성을 평가할 수 있다. 철도교량의 현장재하시험에 있어 상시하중주행시험은 차량의 통행제한이 곤란한 경우, 측정가능 시간이 짧아 재하시험을 수행하기 어려운 경우, 재하시험을 위한 현장작업의 어려움 또는 안전관리의 어려움이 예상되는 경우, 정적시험 또는 의사정적재하시험이 곤란한 경우 등에 전문가의 의견과 관할 기관과의 충분한 협의를 통하여 적용여부를 판단한다. 상시하중주행시험은 교량을 통과하는 상시열차하중에 의한 교량의 응답을 측정하는 것이므로 통과차량의 하중, 통과 속도 등을 알고 있거나 별도의 시험을 통하여 통과차량의 하중, 통과속도 등을 파악하여야 한다. 상시하중주행시험은 정적재하시험에 의한 결과와 비교할 때 실측충격계수의 산정값에 영향을 미치며, 변동범위도 크게 나타나므로 기존의 측정자료로부터 동적증폭효과의 변동범위를 사전에 분석할 필요가 있다. 또한, 상시하중주행시험에 의한 응답보정계수는 상시열차주행시험의 적용에 따른 간소화된 산정방법을 적용할 수 있다.

지침(현행)	지침(제시안)
1.4.3 구조안전성능평가 기준 가. 일반 나. 구조안전성능 기준 1) 내하력 평가 ① 허용응력법에 의한 공용내하력 평가	<생략>
여기서, $K_s = \text{응답보정계수} = \frac{\delta_{\text{계산}}}{\delta_{\text{실측}}} \cdot \frac{1+i_{\text{계산}}}{1+i_{\text{실측}}}$ 또는, $\text{응답보정계수} = \frac{\epsilon_{\text{계산}}}{\epsilon_{\text{실측}}} \cdot \frac{1+i_{\text{계산}}}{1+i_{\text{실측}}}$ <신설>	<도로교와 철도교 기준 분리 (안)> 여기서, $K_s = \text{응답보정계수} = \frac{\delta_{\text{계산}}}{\delta_{\text{실측}}} \cdot \frac{1+i_{\text{계산}}}{1+i_{\text{실측}}}$ 또는, $\text{응답보정계수} = \frac{\epsilon_{\text{계산}}}{\epsilon_{\text{실측}}} \cdot \frac{1+i_{\text{계산}}}{1+i_{\text{실측}}}$ <u>단, 철도교의 경우 (의사)정적재하시험이 곤란하여 상시주행 열차에 의한 응답을 활용할 경우 응답보정계수는 다음과 같이 산정할 수 있다.</u> $K_s = \text{응답보정계수} = \frac{\delta_{\text{계산}}}{\delta_{\text{상시 실측}}} \cdot \frac{1+i_{\text{계산}}}{1}$ 또는, $\text{응답보정계수} = \frac{\epsilon_{\text{계산}}}{\epsilon_{\text{상시 실측}}} \cdot \frac{1+i_{\text{계산}}}{1}$
② 강도법에 의한 공용내하력 평가	<생략>
여기서, $K_s = \text{응답보정계수} = \frac{\delta_{\text{계산}}}{\delta_{\text{실측}}} \cdot \frac{1+i_{\text{계산}}}{1+i_{\text{실측}}}$ 또는, $\text{응답보정계수} = \frac{\epsilon_{\text{계산}}}{\epsilon_{\text{실측}}} \cdot \frac{1+i_{\text{계산}}}{1+i_{\text{실측}}}$ <신설>	<도로교와 철도교 기준 분리 (안)> 여기서, $K_s = \text{응답보정계수} = \frac{\delta_{\text{계산}}}{\delta_{\text{실측}}} \cdot \frac{1+i_{\text{계산}}}{1+i_{\text{실측}}}$ 또는, $\text{응답보정계수} = \frac{\epsilon_{\text{계산}}}{\epsilon_{\text{실측}}} \cdot \frac{1+i_{\text{계산}}}{1+i_{\text{실측}}}$ <u>단, 철도교의 경우 (의사)정적재하시험이 곤란하여 상시주행 열차에 의한 응답을 활용할 경우 응답보정계수는 다음과 같이 산정할 수 있다.</u> $K_s = \text{응답보정계수} = \frac{\delta_{\text{계산}}}{\delta_{\text{상시 실측}}} \cdot \frac{1+i_{\text{계산}}}{1}$ 또는, $\text{응답보정계수} = \frac{\epsilon_{\text{계산}}}{\epsilon_{\text{상시 실측}}} \cdot \frac{1+i_{\text{계산}}}{1}$

2.5 연구개발 성과

2.5.1 국내·외 논문 게재

① 1차년도(목표 : 비SCI 2편)

– SCI/등재학회지

번호	논문명	학술지명	저자	호	국명	발행 기관	SCI 여부 (SCI/비SCI)	게재일	등록 번호*
1-1	충격계수 평가를 위한 단순보의 이동하중 응답해석	한국강구조학회 논문집	최준혁 (주저자)	제31 권 6호	(국내) 대한 민국	한국강구 조학회	비SCI	2019.12	
1-2	철도 선로구조물에 따른 궤도성능 및 선로주행안정성	한국철도학회논 문집	송충현 (주저자)	제10 권 1호	(국내) 대한 민국	한국철도 학회	비SCI	2019.10	

– 국내 및 국제학술회의 발표

번호	회의 명칭	발표자	발표 일시	장소	국명
1	대한토목학회 정기학술대회 (KSCE 2019 CONVENTION)	최준혁	2019.10.18	평창 알펜시아	대한민국

② 2차년도(목표 : SCI 3편)

– SCI/등재학회지

번호	논문명	학술지명	저자	호	국명	발행 기관	SCI 여부 (SCI/비SCI)	게재일	등록 번호*
2-1	Study on the Applicability of Dynamic Factor Standards by Comparison of Spring Constant based Dynamic Factor of Ballasted and Concrete Track Structures	Applied Science	최준혁 (교신)	Vol.10	(국외) Switzerland	MDPI	SCI	2020.11	
2-2	Study on the Applicability of Dynamic Stability Evaluation Criteria by Comparison of Trackside Measurement Results of Dierent Track Structures	Applied Science	박용걸 (교신)	Vol.10	(국외) Switzerland	MDPI	SCI	2020.11	
2-3	Separate Track Impact Factor Application Depending on Track Types through Correlative Analysis with Track Support Stiness	infra structures	박용걸 (교신)	Vol.5	(국외) Switzerland	MDPI	SCI	2020.2	

번호	논문명	학술지명	저자	호	국명	발행 기관	SCI 여부 (SCI/비SCI)	게재일	등록 번호*
2-4	시험/ 상시주행열차를 이용한 철도교량 내하력 응답보정계수 산정	한국철도학회 논문집	박용걸 (교신)	제23권 7호	대한민국	한국철도학회	비SCI	2020.07	
2-5	궤도지지강성을 고려한 동적활중계수의 적용성 평가	한국철도학회 논문집	박용걸 (교신)	제23권 12호	대한민국	한국철도학회	비SCI	2020.12	

– 국내 및 국제학술회의 발표

번호	회의 명칭	발표자	발표 일시	장소	국명
1	대한토목학회 정기학술대회 (KSCE 2020 CONVENTION)	최준혁	2020.10.22	부산	대한민국

③ 기타

– SCI/등재학회지 심사중

번호	논문명	학술지명	저자	호	국명	발행 기관	SCI 여부 (SCI/비SCI)	게재일	등록 번호*
3-1	PSC BOX 고속철도 교량의 충격계수 평가와 상시열차에 의한 계측결과와의 활용	한국철도학회 논문집	최준혁 (주저자)		(국내) 대한민국	한국철도학회	등재학회지		(심사중)

2.5.2 학위논문

번호	이름	취득년도	학위명	제목	지도교수
1	오규환	2021	공학박사	Proposal for an Evaluation Method and Standard for Waterproofing Material in Railroad Bridge Deck	박용걸
2	이재익	2020	공학석사	Evaluation of Dynamic Amplification Factor considering Total Spring Constant of Track	박용걸
3	황성준	2021	공학석사	철도 선로구조물에 따른 궤도성능 및 선로주행안전성	박용걸

2.5.3 표준(안) 및 보고서 원문

연도	보고서	발간일	등록 번호*
2020	철도교 구조안전 진단 평가기준 표준(안)	2020.12	
2020	철도교 현장재하시험 및 내하력 평가 절차서	2020.12	

3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

3.1 목표

① 연도별 세부 연구목표

세부 과제명	구분	세부 연구 목표
철도교량의 실주행열차에 의한 현장재하시험 및 공용내하력 평가 기법에 대한 도로교와의 분리적용	1차 연도 (2019)	철도교의 구조안전성 평가기준 분석
		철도교의 현장재하시험 및 안전성 평가 이력 분석
		상시주행열차에 의한 현장재하시험 계측 및 측정결과 분석 방법 개발
		현장재하시험 테스트베드(Test bed) 선정
		철도교 현장재하시험 계측 및 측정결과 분석
	2차 연도 (2020)	철도교의 구조안전성 평가기준 적용방안 제시
		궤도구조 및 실주행열차 하중의 크기를 고려한 철도교의 구조해석 모델 개발
		시험주행열차 및 상시주행열차에 의한 현장재하시험 및 결과 분석
		현장재하시험 테스트베드 활용
		현장재하시험 및 데이터 분석, 내하력평가 수행

② 연도별 정량적 연구목표

년도	성과목표	목표치	비고
1차년도	구조안전성 평가기준 분석 - 구조안전진단 관련기준 및 성과분석 - 기존 현장데이터 분석	비SCI논문 2편	
	현장재하시험 및 안전성 평가 이력 분석 - 궤도성능평가 및 열차특성 분석 - 철도교 영향인자 매개변수 연구		
	계측 및 측정결과분석방법 개발 - 시험계측		
	테스트베드(Test bed) 구축		
2차년도	구조안전진단 평가기준의 구분 적용방안 제시	SCI논문 3편 비SCI논문 2편 학술발표회 논문 1편 인력양성 석사 2명 인력양성 박사 1명 표준(안) 보고서 1편 보고서 원문 1편	
	철도교의 구조해석모델 개발		
	철도교 해석모델 개발		
	철도교의 구조해석모델 개발 - 평가절차 알고리즘 개발		
	현장재하시험 및 결과분석		

3.2 목표 달성여부

① 연도별 세부 연구 수행내용

구분	세부 연구 목표	연구수행 내용 및 결과
1차 연도 (2019)	철도교의 구조안전성 평가기준 분석	• 관련기준 문헌, 자료조사 수행 • 국내외 평가기준 조사를 기초로 구조안전성 평가를 위한 항목을 설정하였음
	철도교의 현장재하시험 및 안전성 평가 이력 분석	• 최근 수행된 경부고속철도 현장재하시험 및 안전성 평가 결과의 자료를 확보 • 콘크리트 및 강구조 교량, 거더교 형식의 자료로부터 교량의 정, 동적 거동 및 안전성 평가 항목에 의한 평가결과를 상호 비교하였음
	상시주행열차에 의한 현장재하시험 계측 및 측정결과 분석 방법 개발	• 궤도 및 교량 현장재하시험을 수행하여 궤도 및 교량 계측을 수행하였도 안전성 평가를 수행함 • 기존 교량의 현장측정데이터 및 금회 수행한 주행열차의 정, 동적하중재하시험 결과를 비교하여 안전성 평가를 위한 기초 데이터를 획득함 • 궤도 및 교량구조를 고려한 다양한 구조해석 모델을 시도함
	현장재하시험 테스트베드(Test bed) 선정	• 주행열차하중 분석을 위한 테스트베드를 관계기관과 협의하여 대상교량 및 구간을 선정하고, 2차년도에 수행하는 것으로 협의 추진함
	철도교 현장재하시험 계측 및 측정결과 분석	• 경부고속철도 교량을 대상으로 현장재하시험, 열차 운중측정시험, 상시열차하중시험을 수행함 • 현장계측 및 데이터 분석으로부터 내하력 평가 및 안전성 평가를 수행함
2차 연도 (2020)	철도교의 구조안전성 평가기준 적용방안 제시	• 교량 안전성 평가를 위한 관련기준, 문헌조사, 안전성 평가기준 분석을 통하여 철도교 특성을 고려한 평가기준 항목을 설정하고 정밀안전진단 세부지침의 관련내용에 대한 평가기준 개선방안을 제시하였음 → 철도교 구조안전진단 평가기준 표준(안) 보고서 작성
	궤도구조 및 실주행열차 하중의 크기를 고려한 철도교의 구조해석 모델 개발	• 철도 궤도 및 교량 구조물의 상호 구조계를 고려한 다양한 구조해석 모델을 제안하고, 각 해석 모델에 대한 해석 및 분석결과로부터 철도교의 거동을 잘 반영할 수 있는 구조해석 모델을 제안하였음 • 현장재하시험 및 구조해석, 내하력 및 안전성 평가를 위한 철도교량의 전반적 평가절차서를 작성함 → 철도교 현장재하시험 및 내하력 평가절차서 작성
	시험주행열차 및 상시주행열차에 의한 현장재하시험 및 결과 분석	• 경부고속철도 철도교량에 대한 현장재하시험으로 정동적재하시험 및 상시주행열차 시험을 수행하였으며, 정동적주행시험, 상시주행시험, 최초열차주행시험에 대한 분석을 실시하였으며 안전성 평가결과에의 영향정도를 분석하였음
	현장재하시험 테스트베드 활용	• 철도교량의 테스트베드 교량으로서 공항철도 구간의 철도교량을 대상으로 현장재하시험을 수행하였으며 궤도 및 교량 구조물간의 하중전달과정과 상호작용에 대한 시험연구를 수행하였음

② 연도별 정량적 연구 달성도

년도	성과목표	목표치	달성값	달성 여부
1차년도	철도교의 구조안전성 평가기준 분석	비SCI논문 2편	비SCI논문 2편 학술발표회 논문 1편	초과 달성
	철도교의 현장재하시험 및 안전성 평가 이력 분석			
	상시주행열차에 의한 현장재하시험 계측 및 측정결과 분석 방법 개발			
	현장재하시험 테스트베드(Test bed) 선정			
	철도교 현장재하시험 계측 및 측정결과 분석			
2차년도	철도교의 구조안전성 평가기준 적용방안 제시	SCI논문 3편 인력양성 석사 2명 표준(안) 보고서 1편 보고서 원문 1편	SCI논문 3편 비SCI논문 2편 학술발표회 논문 1편 인력양성 석사 2명 인력양성 박사 1명 표준(안) 보고서 1편 보고서 원문 1편	초과 달성
	궤도구조 및 실주행열차 하중의 크기를 고려한 철도교의 구조해석 모델 개발			
	시험주행열차 및 상시주행열차에 의한 현장재하시험 및 결과 분석			
	현장재하시험 테스트베드 활용			

4. 연구개발성과의 활용 계획 등

4.1 연구개발성과의 기대효과

(1) 경제적 측면

- 철도교량의 경우 정적 및 동적재하시험이 매우 어려운 조건으로 종래의 시험절차에 의해서 많은 인력과 비용, 관련기관과의 일정 조율 및 안전관리 등 행정적, 재정적, 시간적 비용이 많이 소요된다. 본 연구성과로부터 상시주행열차에 의한 절차 및 기준을 활용함으로써 현장재하시험의 안전과 편의성, 시간적, 공간적 제약의 해소가 가능하고 그에 따른 현장의 소모적 비용의 절감이 기대되며 또한, 유지관리의 시기가 도래하고 있는 철도교량의 경우 안전진단 업무에 소요되는 상당한 비용절감이 기대된다.

(2) 기술적 측면

- 철도교의 경우 도로교와 구조특성 및 하중조건이 상이하므로 공용내하력 산정을 위한 매개변수(보정계수, 충격계수 및 응답비, 내하율 등)와 궤도구조를 포함한 구조해석모델링 그리고 궤도특성 등이 고려되어야 한다. 따라서 도로교와 차별화된 철도교 공용내하력 산정방법 및 구조안전진단 평가기준을 제시함으로써 철도교의 구조물 안전진단 및 유지관리를 위한 평가 기술을 높일 수 있고, 지속적 모니터링을 통한 유지관리 데이터의 축적과 빅데이터를 활용한 철도교의 유지관리 기술의 향상을 제고할 수 있다.

(3) 정책적 측면

- 철도교량 유지관리(구조안전진단, 평가)의 전문화, 체계화를 통한 평가결과의 신뢰성을 확보하고, 현장계측에 대한 번거로움 최소화하여 유지관리의 안전성과 효율성 도모할 수 있다.
- 대부분의 철도운영기관에서 관리하는 철도교량(고가교 포함)은 『시설물의 안전관리에 관한 특별법』에 의거 매 2~5년마다 정밀안전진단이 수행되므로 현장재하시험의 개선을 통하여 유지관리를 위한 합리적 절차 및 방법을 전문기관 및 관련 업체에 제공할 수 있으며, 유지관리 정책과 연계하여 관련 기술을 개발할 수 있다.

4.2 연구개발성과의 활용

- 본 연구에서 제안하는 철도교의 상시주행열차에 의한 현장재하시험은 기존 재하시험의 문제점을 해결하고 보다 안전하게 현장실측데이터를 얻을 수 있고, 도로교와 차별화된 철도교 공용내하력 산정으로 구조안전진단 평가결과의 신뢰도를 높일 수 있으며, 재하시험을 위한 안전진단비용도 줄일 수 있는 등 기술적, 경제적, 정책적으로 기대효과가 큼. 따라서, 철도교의 특성을 고려한 궤도, 교량의 종합적 안전성 평가 방안의 기준 마련과 그에 따른 전문화된 기술을 제고할 수 있다.

- 철도교량의 공용내하력을 산정하기 위한 현장재하시험은 철도특성상 시험시간이 야간 3시간 내로 제한되어 시험주행열차에 의한 현장재하시험 수행이 어렵고(차량기지 위치, 회차, 시험비용 과다 등), 재하시험 일정이 불규칙하고, 변경이 곤란할 뿐만 아니라, 시험당일 기 후 악조건(우천/혹한/혹서 등) 시에는 계측데이터에 예상치 않은 측정오차가 포함될 수 있으며, 시험 중 계측시스템 및 안전문제 발생 시 적절한 대처가 어려운 실정이다. 따라서 시험주행열차에 의한 현장재하시험 수행이 어려운 철도교의 측정방법의 변경을 통해서 현장재하시험의 안전성과 편의성, 공용내하력 산정 및 구조안전진단 평가의 신뢰도를 높이고, 안전진단비용의 대폭 절감을 도모할 수 있으므로 측정방법, 측정센서, 무선측정장치, 궤도측정데이터와 교량 측정데이터의 연계 측정시스템의 개발로 활용할 수 있다.
- 내하력 및 안전성 평가 측면에서는 철도교의 경우 도로교와 구조특성 및 하중조건이 상이하고, 공용내하력 산정을 위한 매개변수(보정계수, 충격계수 및 응답비, 내하율 등)와 궤도 구조를 포함한 구조해석모델링 그리고 궤도 특성이 고려되어야 하므로 도로교와 차별화된 철도교 공용내하력 산정방법 및 구조안전진단 평가기준의 구분 적용이 필요하다. 현행 시설물안전특별법 상, 도로교 기반의 구조물(정밀)안전진단/ 점검에 대해, 철도교의 상시주행열차를 활용한 현장재하시험/ 분석방법과, 궤도구조를 포함 한 구조해석으로 부터 철도교 공용내하력 산정방법을 도출하고, 철도교의 구조안전진단 평가기준을 마련하는 근거로 활용할 수 있다.

4.3 연구의 한계 및 추가 연구의 필요성

- 본 연구는 현재 세부지침에 제시되어 있는 현장재하시험 방법의 적용이 어려운 철도교량의 현장재하시험 방법 개선을 목적으로 내하력 평가과정에서 고려되는 응답보정계수의 산정방법의 개선방안을 체계적으로 접근하는 것이 목적이다. 현재 국내에서 적용되는 내하력 평가 방법은 기본내하율에 응답보정계수를 곱하는 방식을 취하고 있고 그 방법은 해석값과 실측값의 정확도에 좌우된다. 또한, 국내 여러 안전진단 전문업체에서 묵시적으로 사용하고 있는 본 연구에서 제시하고자 하는 수정 응답보정계수의 산정방법은 그 산정결과에 대한 여러 가지 검증, 논의된 바가 부족한 상태에서 적용되고 있으므로 본 연구에서는 기존의 여러 가지 현장 측정데이터 및 테스트베드 교량을 대상으로 한 실측 데이터를 이용하여 실무적인 문제해결을 추진하였다.
- 그러나, 응답보정계수의 산정에서는 특히 철도교량의 경우는 열차의 실제 하중을 파악하기 어려워 열차 실하중에 의한 해석값 또는 응답값을 계산하기가 어려운 점이 있었다. 이를 위해서 본 연구에서는 궤도 윤중측정시험을 통하여 열차 하중을 추정하고자 하였으나 궤도의 복잡한 구조와 다층구조 시스템, 궤도와 교량간의 하중분배, 궤도 구성품의 강성 등에 따라 하중의 분산, 분배, 동적특성의 고려 등 복잡한 문제로 명확히 해결되지 않았다. 현재 내하력 평가과정에 있어 열차하중은 설계하중을 그대로 적용하고 있으나 승객 탑승, 화물 등의 탑재, 열차의 종류 등에 따라 열차 하중은 달라질 수 있으며, 그에 따른 해석값의 차이로 응답보정계수는 달라지게 되므로 열차하중의 추정 또는 측정은 추가 연구가 필요한 항목이

다.

- 교량의 응답보정계수에서는 열차의 주행 또는 재하로 인한 구조물의 응답에 의존하는데 해석값의 경우 열차하중 외에 받침의 강성에 의해서도 그 결과가 큰 차이를 나타내었다. 교량 받침의 강성이 어느 정도 커 강성 거동을 보이는 경우는 큰 차이가 없지만 탄성 받침의 경우 또는 받침의 열화, 들뜸 등 손상이 있는 경우 그 영향은 커지게 되므로 해석값 및 실측값의 편차가 크게 발생하게 되는 원인이 되었다. 따라서, 좀더 정밀한 구조해석 및 안전성 평가를 위해서는 교량 받침의 상태와 강성, 또한 그것이 교량의 응답에 미치는 영향 등을 정량적으로 분석하고 고려할 수 있는 연구가 필요하다.
- 본 연구에서 제시하고자 하는 수정 응답보정계수는 기존 교량의 현장측정 데이터와 테스트 베드 교량을 대상으로 한 시험결과를 기초로 기존의 응답보정계수 산정 방법을 대체할 수 있음을 나타내었다. 그러나 이는 경부고속철도 구간의 PSC BOX 교량을 대상으로 한 것이므로 다소 제한적일 수 있으므로 일반철도, 다른 형식의 교량, 다른 조건의 경우에도 추가로 검토하여 많은 데이터 및 분석결과의 축적이 필요하며, 좀더 체계화된 데이터 확보 방안의 고려가 필요하다.

참고문헌

- [1] Van Dyk, B.J.; Edwards, J.R.; Dersch, M.S.; Ruppert, C.J., Jr.; Barkan, C.P. Evaluation of Dynamic and Impact Wheel Load Factors and their 3 Application for Design. In Proceedings of the Transportation Research Board 93rd Annual Meeting, (No. 14-4714), Washington, DC, USA, 12–16 January 2014.
- [2] Le Pen, L.; Milne, D.; Thompson, D.; Powrie, W. Evaluating railway track support stiffness from trackside measurements in the absence of wheel load data. *Can. Geotech. J.* 2016, 53, 1156–1166.
- [3] Sadeghi, J.; Barati, P. Evaluation of conventional methods in analysis and design of railway track system. *Int. J. Civ. Eng.* 2010, 8, 44–56.
- [4] Jenks, C.W. Design of Track Transitions; Transportation Research Board: Washington, DC, USA, 2006.
- [5] Esveld, C. Modern Railway Track, 2nd ed.; Delft University of Technology: Delft, The Netherlands, 2001; pp. 71–80.
- [6] KR C-14060. Track Components Design; Korea Rail Network Authority: Seoul, Korea, 2019.
- [7] KR C-14030. Ballasted Track Structure; Korea Rail Network Authority: Seoul, Korea, 2017.
- [8] Zimmermann, H. Die Berechnung des Eisenbahnoberbaues; Ernst und Sohn: Berlin, Germany, 1930.
- [9] Giannakos, K. Stiffness Coefficient in the Transition Zone between Ballasted and Ballastless Track and Its Influence on Formation Stressing. In Proceedings of the 5th International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, San Diego, CA, USA, 24–29 May 2010; Volume 50, pp. 1–11.
- [10] Konstantinos, G.; Spyridon, T. Transition Zone between Ballastless and Ballasted Track: Influence of Changing Stiffness on Acting Forces. In *Procedia—Social and Behavioral Sciences*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2012; Volume 48, pp. 3548–3557.
- [11] Prakoso, P.B. The Basic Concepts of Modelling Railway Track Systems using Conventional and Finite Element Methods. *INFO Tek.* 2012, 13, 57–65.
- [12] Lewis, S.R.; Lewis, R.; Olofsson, U.; Eadie, D.T.; Cotter, J.; Lu, X. Eadie Effect of humidity, temperature and railhead contamination on the performance of friction modifiers: Pin-on-disk study, March 2013 Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F. *J. Rail Rapid Transit* 2013, 227, 115–127.
- [13] Lichtberger, B. Track Compendium. Formation, Permanent Way, Maintenance, Economics, 1st ed.; Eurail-Press: Hamburg, Germany, 2005; 633p.
- [14] Republic of Korea, Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2014), Comprehensive Railway Testing Operations, Article 13, Facility verification test
- [15] S.W. Lee, K.J. Woo, C.M. Jeong (2018. 12) Cause analysis of the electric train derailment occurred in turnout on a sharp curves, *Journal of Korean Society for Urban Railway* Vol.6, No.4, pp.411-416.
- [16] K.S. Sim, T.W. Park, J.H. Lee, G. B. Jeong (2012. 8) An Evaluation on Derailment according to Running Safety of Next-Generation High Speed Train (HEMU-430X), *Journal of the Korean Society for Railway* 15(4), 2012.8, pp.343-351.
- [17] S.H. Lee, Y.G. Park (2017) A Study for Correlation of Track Support Stiffness and Track Impact Factor according by Track Structures, Ph.D degree thesis, Seoul National University of Science and Technology, pp.23-28.
- [18] Rail Vehicle Technical Standards 3.Part 31 High Speed Rail Vehicle Technical Standards, KRTS-VE-Part31-2017(R1), 283-5.
- [19] Korea Rail Network Authority, Rev.3, (20. December 2016) KR C-14030, Ballast track structure, Daejeon, Korea, pp. 29 (in Korean).
- [20] Japan Railway Track Consultants (2009) Standard of Japan track system performance evaluation and case studies, Japan Railway Track Consultants.
- [21] K.Y. Eum, Y.H. Kim, J.W. Kim (2013. 8) Study on Dynamic Characteristics of Structure Approaches by Train Moving Loads, *Journal of the Korean Society for Railway* Vol.16, No.4, pp. 298-304.

- [22] Giannakos Konstantinos. Stiffness Coefficient in the Transition Zone Between Ballasted and Ballastless Track and Its Influence on Formation Stressing. International Conferences on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics. 2010, Volume 50, No. 5.42, pp. 1-11
- [23] Lucia Balmasada, Gallego Inmaculada, Sanchez-Cambronero Santos, Rivas Ana, Importance of Vertical Rail Track Stiffness on Dynamic Overloading: Limitations of the Eisenmann Formulation, International Congress on High-Speed Rail: Technologies and Longterm Impacts, June 2018, No. 5, pp. 301-311
- [24] Man C. Kim, Yong G. Park, Hyoung J. Lim, Sun H. Park, Jin Y. Ryu. A study on the condition assessment of ballasted tracks of various substructure types of in-service railway line, Spring academic conference Journal of the Korean Society for Railway, 2013, pp. 178-186
- [25] Jenkins, H. H., Stephenson, J. E., Clayton, G. A., Morland, G. W., and Lyon, D. (1974). "The effect of track and vehicle parameters on wheel/rail vertical dynamic forces." *Railway Eng. J.*, 3(1), 2–16.
- [26] Jong W Kim, Dal J Lee, Jong H Lee, Yoon S Kang, Yong G Park, Urban railway track structure must be redefined based on the maintenance of orbital research, Autumn academic conference Journal of the Korean Society for Railway, 2013, pp. 1155-1162
- [27] Doyle, N. F. Railway Track Design: A Review of Current Practice. BHP Melbourne Research 300 Laboratories, Bureau of Transport Economics, 1980.
- [28] Gwang T. Noh, Hyung J. Lim, Jong Y. Lee, Yong G. Park. Evaluation of Track Support Stiffness and Track Impact factor for Ballast and Concrete Type Tracks, Journal of the Korean Society for Railway, 2019, Volume 21, No. 14, pp. 389-395
- [29] Jenks, C.W. (2006). Design of track transitions, Washington DC, Transportation Research Board
- [30] Dong W. Lee, Yong G. Park, Jung Y. Choi. A Study on the Evaluation of Track Support Stiffness on the Various Track Type in Urban Transit, Journal of the Korean Society for Railway, 2011, Volume 14, No 3, pp. 262-270
- [31] Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2019) Special law on the safety and maintenance facilities.
- [32] Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2019) Detailed guidelines for safety and maintenance of facilities (Safety inspection, Diagnosis)(Bridge).
- [33] Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2017) Detailed guidelines for safety inspection and precise safety diagnosis of facilities.
- [34] M.J. Lim, I.Y.Choi, J.S.Lee, H.S. Lee (2003) Dynamic Behavior of KTX Bridges Using Field Test Data, Autumn Conference of the Korean Society for Railway, Ansan, pp. 483-488
- [35] K.S. Kyoung L.Y.I Lee, S.J. Cho (2015) An Improved Evaluation Method of Load-Carrying-Capacity for Highway Bridges Based on Field Test Data, Journal of the Korean Society of Civil Engineers, 35(1), pp.31-38
- [36] K.L. Min, S.U.Lee, I.Y.Choi, Y.K.Woo (2012) Improved load test and load carrying capacity evaluation methods for railway bridges using in-service train system(II), Spring Conference of Korean Society for Railway, Mokpo, pp. 766-769
- [37] J.J. Lee, S.J.Cho, S. Masanobu, B.Y.Chung, C.G.Lee, W.T.Lee (2006) Evaluation of Bridge Load Carrying Capacity Based on Dynamic Displacement Measurement Using Real-time Image Processing Techniques, International Journal of Steel Structure, 6(5), pp.377-385.
- [38] G.T. Noh, H.J. Lim, J.Y. Lee, Y.G. Park. (2018), "Evaluation of Track Support Stiffness and Track Impact factor for Ballast and Concrete Type Tracks", The Korean Society For Railway, 21(4), pp. 389-395.
- [39] Giannakos, K. Stiffness Coefficient in the Transition Zone Between Ballasted and Ballastless Track and Its Influence on Formation Stressing. Int. Conf. Recent Adv. Geotech. Earthq. Eng. Soil Dyn. 2010, 50, 1–11.
- [40] European Committee for Standardization, EN 1337-3 Structural Bearing-Part 2: Elastomeric Bearings, CEN, 2005

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진 사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.