

철도교량 단부 콘크리트궤도 사용성 검토 설계 기법 및 프로그램 개발 최종보고서

2019. 01. .

주관연구기관 / 대원대학교 산학협력단
협동연구기관 / 군산대학교 산학협력단
(주)글로텍

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통부 장관 (국토교통과학기술진흥원장) 귀하

‘철도교량 단부 콘크리트궤도 사용성 검토 설계 기법 및 프로그램 개발’(연구개발 기간 : 2017.04.01. ~ 2018.12.31.) 과제의 최종보고서 000부를 제출합니다.

2019. 01. .

주관연구기관명 : 대원대학교 산학협력단 (대표자) 함 흥 돈 (인)

공동연구기관명 : 군산대학교 산학협력단 (대표자) 김 동 익 (인)

공동연구기관명 : (주)글로벌텍 (대표자) 황 희 석 (인)

주관연구기관책임자: 성 덕 룡

공동연구기관책임자: 장 성 규

공동연구기관책임자: 이 성 우

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	18CTAP-C129908-02	해당 단계 연구 기간	2017.04.01.~ 2018.12.31.	단계구분	(2단계)/ (총 2단계)
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명	창의도전연구분야 기초원천 지원유형			
연구과제명	세부과제명	철도교량 단부 콘크리트궤도 사용성 검토 설계기법 및 프로그램 개발			
연구책임자	성덕룡	해당단계 참여연구원 수	총: 26명 내부: 24명 외부: 2명	해당단계 연구비	정부: 220,000천원 민간: 80,000천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계: 300,000천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 45명 내부: 41명 외부: 4명	총 연구비	정부: 370,000천원 민간: 130,000천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계: 500,000천원
연구기관명 및 소속 부서명	대원대학교 산학협력단			참여기업명 [공동]군산대학교 산학협력단 [공동](주)글로벌	
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위탁연구	연구기관명:			연구책임자:	

※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음

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

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·기탁 번호	2	2	1			2					

국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

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

요약

철도교량 단부 콘크리트궤도에서는 정·동적 작용력으로 인해 단부회전 및 단차가 발생하고 레일체결장치에 상향력 및 압축력이 발생하여 사용성 검토해야 함. 본 연구에서는 상향력 및 압축력에 영향을 주는 인자들 중 레일체결장치의 비선형 거동에 대한 검토를 수행하여 기존 철도설계지침(KR C-08090)의 레일체결장치 강성 적용방법을 보완하여 제시하였으며, 기존 철도교량 단부 콘크리트궤도 설계기법(단위하중법)을 단순화하고 설계 오류를 최소화할 수 있는 설계기법(비선형해석법)을 제시하고 검증하였음. 또한, 철도교량 단부 콘크리트궤도 사용성 검토를 일괄적으로 수행하고, 중간 검토결과를 확인할 수 있는 Matlab기반의 알고리즘을 개발하여 검증하였고, 이를 바탕으로 GUI기반의 전용 해석프로그램을 개발함.

보고서 면수

249

요약문

연구의 목적 및 내용	1. 연구목적 • 단순하고 검증된 철도교량 단부 콘크리트궤도 사용성 검토 설계방법 필요 • 신뢰성 있는 철도교량 단부 콘크리트궤도 사용성 검토 전용 프로그램 필요 2. 연구목표 • 철도교량 단부 콘크리트궤도 사용성 검토 설계기법 및 프로그램 개발 3. 연구내용 (1) 1차년도 ① 국내외 관련자료 조사(기준, 보고서, 논문, S/W 등) ② 철도교량 단부 콘크리트궤도 사용성 검토 영향인자 분석 ③ 철도교량 단부 콘크리트궤도 사용성 검토 알고리즘 분석 및 설계 ④ 철도교량 단부 콘크리트궤도 사용성 검토 영향인자 수치해석 (2) 2차년도 ① 실내시험을 통한 철도교량 단부 사용성 검토 영향인자 보정 ② 철도교량 단부 콘크리트궤도 사용성 검토 설계기법 개발 ③ 철도교량 단부 콘크리트궤도 사용성 검토 알고리즘 및 프로그램 개발				
연구개발성과	1. 기술적 성과 (1) 철도교량 단부 콘크리트궤도 사용성 검토 비선형 설계기법 개발 (2) 철도교량 단부 콘크리트궤도 사용성 검토 프로그램 개발 (3) 특허출원 : 2건, 특허등록 : 2건, 소프트웨어 등록 : 2건 2. 학술적 성과 (1) 국외학술지 논문집(SCIE급) 게재 : 2건 (2) 국내외 학술대회 논문 발표 : 국외 1건, 국내 2건 (3) 인력양성 : 공학석사 1명 3. 실용적 성과 • 본 연구를 통한 비선형해석방법 도출 및 이에 대한 신뢰성 검증 • 철도교량 단부 콘크리트궤도 사용성 검토에 영향을 미치는 주요 인자 중 레일체결장치의 수직강성(비선형거동특성)에 대한 적용 방안 수립 • 본 연구를 통한 기존 설계기법(KR C-08090)을 적용한 철도교량 단부 콘크리트궤도 사용성 검토 전용 프로그램 개발 • 장대레일 축력검토 프로그램과 연계할 수 있는 기초원천 기술 확보				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	• 검토과정의 단순화를 통한 검토시간 단축 및 설계오류 최소화 • 신뢰성 있는 해석결과 값 도출을 통한 과학적이고 합리적인 설계 가능 • 기존 설계기법에 의한 결과 값 대비 약 30%이상 저감된 결과 값 도출로 철도교량 단부 콘크리트궤도에 사용되는 고가의 특수 레일체결장치(ERL, ZLR) 및 궤도구조(횡단궤도구조) 사용 최소화를 통한 철도교량 건설비 저감 효과 • 콘크리트궤도가 부설된 도시철도, 일반철도 및 고속철도 교량상 단부 콘크리트궤도의 사용성 및 안정성 확보방안으로 활용 • 철도교량 단부 사용성 검토를 위한 용역, 프로그램 판매 및 임차 등을 통한 수익창출				
국문핵심어 (5개 이내)	철도교량단부	콘크리트궤도	사용성	설계기법	소프트웨어
영문핵심어 (5개 이내)	Deck end of railway bridge	Concrete track	Serviceability	Design method	Software

※ 국문으로 작성(영문 핵심어 제외)

< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요	5
2. 연구수행내용 및 성과	11
3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	236
4. 연구개발성과의 활용 계획 등	246
붙임. 참고 문헌	247

<별첨> 주관연구기관의 자체평가 의견서

1. 연구개발과제의 개요

가. 연구개발의 목적 및 필요성

(1) 연구개발의 필요성

- 콘크리트궤도와 철도구조물의 상호작용에 따른 문제는 토공-교량 연결부(교대부), 교량상판 단부의 변형(단차 및 회전)에 의해 궤도의 변형이 발생하고, 이로 인해 레일 체결장치에 과도한 응력이 작용할 수 있어 그 심각성이 큼. 이러한 부가적인 상호작용력은 구조물 경계 단부 궤도의 빈번한 유지보수를 유발할 수 있으므로 설계 단계에서 충분한 검토가 이루어져야 함

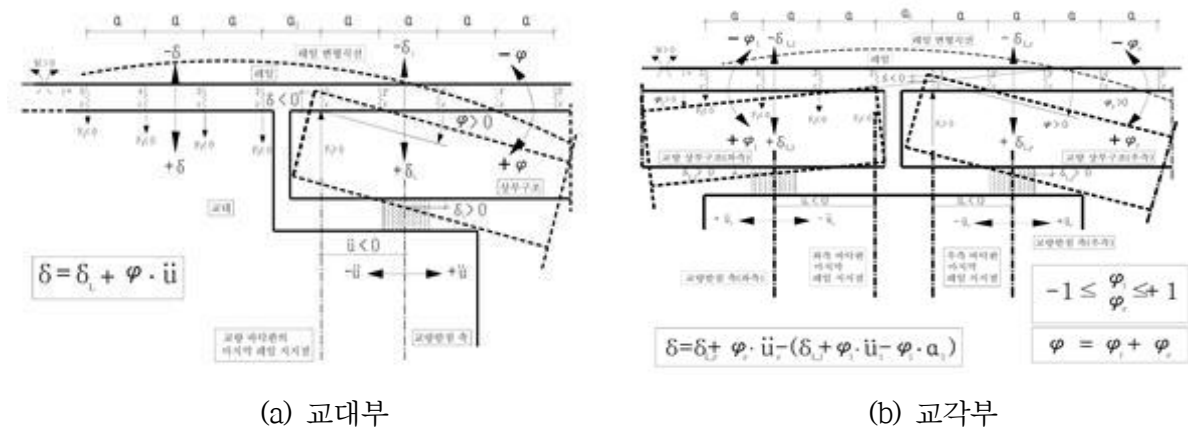


그림 1 철도교량 상부구조와 레일의 변형

- 철도교량 신축부(불연속지점)에서는 궤도-교량 상대변위 및 단차 발생, 상판 회전, 교각의 기초침하에 따른 변위 발생, 단부회전에 의한 상향력 발생으로 인해 레일 체결장치의 파손이 발생함



그림 2 철도교량 단부에서의 레일체결장치 손상 사례

- 교량상판 단부에서 콘크리트궤도의 사용성을 보장하기 위해서는 교량상판 단부의 회전 및 단차로 인해 레일지지점의 레일체결장치에 발생하는 수직하중이 레일체결장치의 탄성지지체, 체결클립 혹은 클램프 및 앵커시스템에서 공용기간 동안 아무런 손상 없이 충분히 흡수할 수 있어야 함

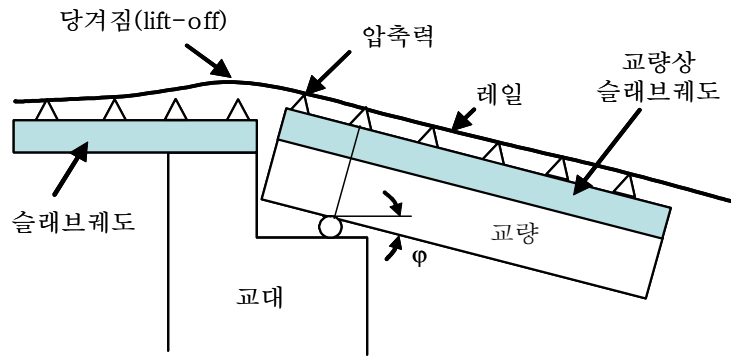


그림 3 철도교량 단부에서의 변형에 의한 레일체결장치
작용력

- 콘크리트궤도가 부설된 철도교량의 경우에는 교량의 수직 운동(휨거동)에 따라 발생하는 압축력과 인장력 및 하중통과에 따른 부반력 등이 반복적으로 작용하여 교량 상부구조가 거동함에 따라 레일지지점(레일체결장치 위치)에 비교적 많은 부담이 가해짐. 이 영역에서 콘크리트궤도 레일체결장치의 사용성을 보장하기 위해서는 레일 지지점(레일체결장치 위치)에 가해지는 상향력과 압축력이 적절한 수준의 탄성으로 설계된 레일체결장치에 의해 완화되어야 함
- 강재거더로 이루어진 교량구조의 경우 상대적으로 유연한 휨거동을 보이므로 단부의 상향력 및 압축력이 과다할 수 있기 때문에 설계 시 이에 대한 면밀한 검토가 요구됨
- 또한, 한국철도시설공단에서 발주하여 한국철도기술연구원에서 수행한 “콘크리트궤도 인터페이스 성능향상에 대한 연구 용역(설계지침)”은 독일의 “Anforderungskatalog zum Bau der Festen Fahrbahn, 3. überarbeitete Auflage, Stand 15.10.1995, Deutsche Bahn Gruppe, DB Netz” 과 “DS-804”를 기초로 연구되었으며, 결과보고서의 내용에 횡단궤도시스템에 대한 내용이 교량단부 사용성 향상을 위한 방안으로 간단하게 소개된 바 있음
- 독일에서 발간된 “Feste Fahrbahn, Konstruktion und Bauarten für Eisenbahn und Straßenbahn, Edgar Darr, Werner Fiebig, Eurail press”에는 콘크리트궤도가 부설된 철도교량의 설계 및 시공사례에 대한 소개에 횡단궤도시스템과 관련한 내용이 수록되어 있으며, 유럽의 철도 선진국에서는 일반적이면서도 철도교량 단부 궤도의 안정

성 확보를 위한 대안으로 제시됨

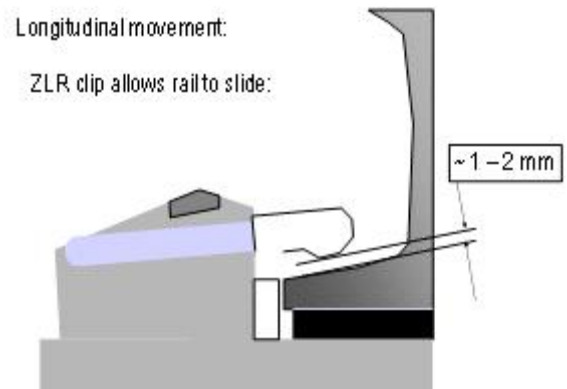


그림 4 교량신축이음부 횡단궤도시스템(Switch bridge구조, 패널형식) 시공사례

- 콘크리트궤도가 부설된 철도교량에 대해서는 단부의 사용성 검토를 위한 기준(DS 804, KR C 08090)이 제시되어 있으며, 기준을 만족하지 못하는 개소에 대해서는 고가의 종방향활동체결구 또는 횡단궤도시스템을 적용함으로써 추가 건설비가 발생하게 됨



(a) 교량단부용 특수 레일체결장치(ERL)



(b) 교량단부용 특수 레일체결장치(ZLR)

그림 5 철도교량 단부 특수 레일체결장치 예

- 또한, 철도교량 단부 콘크리트궤도 사용성 검토 기준은 국외 설계기준(DS 804)을 준용하고 있으며, 검토과정에서 설계자들이 적용하는데 어려움이 있음
- 따라서 본 연구에서는 철도교량 단부 콘크리트궤도 사용성 검토를 위한 영향인자들에 대해 실내시험을 통한 검증 및 보정방법을 도출하여 설계가이드라인을 제공하고, 독립적으로 이루어지고 있는 검토과정을 일괄적으로 설계 할 수 있는 프로그램을 개발하고자 함

(2) 연구개발의 목적

- 본 연구에서는 철도교량 단부 콘크리트궤도 사용성 검토를 위한 영향인자들에 대해 실내시험을 통한 검증 및 보정방법을 도출하여 설계가이드라인을 제공하고, 독립적으로 이루어지고 있는 검토과정을 일괄적으로 설계 할 수 있는 프로그램을 개발하고자 함
- 철도교량 단부 콘크리트궤도 사용성 검토 시 레일체결장치 비선형거동을 고려한 설계기법 제안
- 철도교량 단부 콘크리트궤도 사용성 검토를 위한 신뢰성 있는 프로그램(S/W) 개발

표 1 연구개발 목표

구분	내용
최종 목표	철도교량 단부 콘크리트궤도 사용성 검토 설계기법 및 프로그램 개발
세부 목표	[1차년도] - 철도교량 단부 콘크리트궤도 사용성 검토 영향인자 보정 - 철도교량 단부 콘크리트궤도 사용성 검토 알고리즘 설계 - 철도교량 단부 콘크리트궤도 사용성 검토 프로그램 설계 (정량적 목표) 국외학술지 논문게재 : 1건, 특허출원 : 1건 (정량적 성과) 국외학술지 논문게재 : 1건, 특허출원 : 1건 [2차년도] - 철도교량 단부 콘크리트궤도 사용성 검토 설계기법 개발 - 철도교량 단부 콘크리트궤도 사용성 검토 알고리즘 개발 - 철도교량 단부 콘크리트궤도 사용성 검토 프로그램 개발 (정량적 목표) 국외학술지 논문게재 : 1건, 특허등록 : 1건, SW등록 : 1건 (정량적 성과) 국외학술지 논문게재 : 1건, 특허출원 : 1건, 특허등록 : 1건 SW등록 : 2건, 인력양성(석사) : 1명

나. 연구개발의 정의 및 범위

(1) 연구개발의 정의

- 콘크리트궤도가 부설된 철도교량의 단부에서는 교량의 정, 동적거동에 의해 발생하는 레일의 상향력과 압축력으로 인해 레일체결장치의 사용성(파손 및 성능저하)을 검토하도록 되어 있음
- 본 연구에서는 철도교량 단부 콘크리트궤도 레일체결장치의 사용성에 영향을 미치는 주요인자들 중 레일체결장치의 체결력에 대한 거동 분석을 실시하여 레일체결장치의 비선형거동을 고려한 설계기법을 제시 함
- 본 연구에서는 기존 설계기준(KR C-08090)에서 제시한 단위하중법을 대체할 수 있는 비선형해석방법(설계기법)을 제시 함
- 또한, 기존 설계기준(KR C-08090)에 제시된 검토 절차를 적용한 알고리즘을 개발하고 이를 적용한 전용 소프트웨어(해석프로그램)를 개발 함

(2) 연구개발의 내용 및 범위

표 2 연구내용 및 범위

주요 연구내용	세부 연구내용	연구방법
철도교량 단부 콘크리트케도 사용성 검토 설계기법 개발	국내외 관련자료 조사	- 철도교량 단부 콘크리트케도 거동 특성 조사 - 철도교량 단부 콘크리트케도에 작용하는 하중 조건 조사 - 철도교량 단부 콘크리트케도 사용성 평가 기준 조사
	주요 영향인자에 대한 실내시험	- 레일체결장치 실내시험 방법 수립 - 레일체결장치 실내시험 결과 분석
	주요 영향인자를 고려한 수치해석	- 국외기준 비교를 통한 해석모델 검증 - 레일체결장치 비선형 거동을 고려한 수치해석 - 주요 영향인자를 고려한 수치해석
	철도교량 단부 모형 실내시험	- 철도교량 단부 모형 실내시험 방법 수립 (교각부, 교대부) - 철도교량 단부 모형 실내시험 결과 분석
	철도교량 단부 모형 수치해석	- 수치해석 모델링 - 수치해석 결과 및 분석
	철도교량 단부 콘크리트케도 사용성 검토 영향인자 보정	철도교량 단부 콘크리트케도 영향인자 보정방법 제시
	철도교량 단부 콘크리트케도 사용성 검토 설계기법 개발	- 비선형 설계기법 제시 - 기존 및 제안된 설계기법 비교분석
철도교량 단부 콘크리트케도 사용성 검토 알고리즘 개발	국내외 문헌조사	- 국내외 관련 기준 조사 - 국내외 관련 논문 조사
	철도교량 단부 콘크리트케도 사용성 검토 알고리즘 설계	- 유한요소 프로그래밍 방법 제시 - 알고리즘 검증
	철도교량 단부 콘크리트케도 사용성 검토 알고리즘 개발	- 영향인자 보정을 고려한 알고리즘 개발 - 유한요소해석 프로그램을 통한 알고리즘 검증 - 실 철도교량 적용을 통한 알고리즘 검증
철도교량 단부 콘크리트케도 사용성 검토 프로그램 개발	국내외 관련 소프트웨어 조사	국내외 관련 SW 사용 사례 조사
	목표성능 설정	- 수요자 요구조건 분석 - 목표성능 설정
	알고리즘 적용 인자 분석	- 알고리즘 적용 인자 분석 - 기존 업무프로세스 분석
	프로그램 설계	- 프로그램 기능 구성 - DATA BASE 구조 설계 - DATA BASE 관계도 구성
	프로그램 개발	철도교량 단부 콘크리트케도 사용성 검토 프로그램 개발(GUI 기반)

2. 연구수행 내용 및 성과

2.1 철도교량 단부 콘크리트궤도 사용성 검토 설계기법 개발

가. 국내·외 관련자료 조사

(1) 철도교량 단부 콘크리트궤도 거동 특성

자갈궤도가 부설된 교량의 경우 교량상판과 레일 및 침목을 포함하는 레일지지점 사이에 도상자갈이 존재하여 구조적으로 분리됨에 따라 교량상판의 거동이 궤도의 변형에 직접적으로 영향을 미치지 않는 못한다. 하지만 콘크리트궤도가 부설된 교량의 경우에는 교량상판에 고정되어 있는 콘크리트궤도의 레일과 레일지지점은 교량 단부의 회전에 의한 교량의 거동에 궤도가 종속적으로 함께 변형하게 되고, 이러한 변형곡선(곡률, curvature)은 궤도구성품에 직접적인 상호 작용력으로 작용하게 된다. 이러한 교량 단부의 회전에 따른 레일의 변형과정에서 교량측 레일지지점은 압축력이, 교대측 레일지지점에는 상향력이 발생하게 된다. 이러한 철도교량 단부에서 콘크리트궤도의 사용성을 보장하기 위해서는 교량 단부 회전 및 단차로 인해 레일지지점의 레일체결장치에 발생하는 상호작용력(상향력 및 압축력)이 레일체결장치의 탄성패드 및 체결구에서 공용기간 동안 아무런 손상 없이 충분히 흡수할 수 있어야 한다.

철도교량에 설치되는 콘크리트궤도는 형식에 따라 구조적인 특성 및 형상은 다르나 대체로 아래 그림과 같이 레일과 레일체결장치가 콘크리트 도상층에 고정되는 궤도층과 궤도구조를 고정시키고 교량 바닥면을 보호하는 교면보호층으로 구성되어 있다. 경부고속철도 2단계 및 호남고속철도 구간에서 채택한 Rheda 2000 시스템에서는 이 층을 각각 TCL(Track Concrete Layer)과 PCL(Protection Concrete Layer)로 구분하고 있다. 철도교량상 콘크리트궤도의 구성요소 및 기능은 아래 표와 같다.

표 3 철도교량상 콘크리트궤도의 구성요소와 기능

구성요소	기능
보호콘크리트층(PCL)	교량상면 보호 및 캠플레이트와 일체설치로 TCL에서 발생하는 종/횡하중을 교량으로 전달
완충재	고탄성 재료를 부착하여 TCL과 발생하는 하중을 완화
탄성분리재	PCL과 TCL을 구조적으로 분리하여 교량구조물 변위가 궤도구조에 미치는 영향을 최소화하기 위해 설치
궤도콘크리트층(TCL)	열차하중을 노반(교량 상부구조)으로 널리 분포하고 궤도틀림에 저항하는 콘크리트층

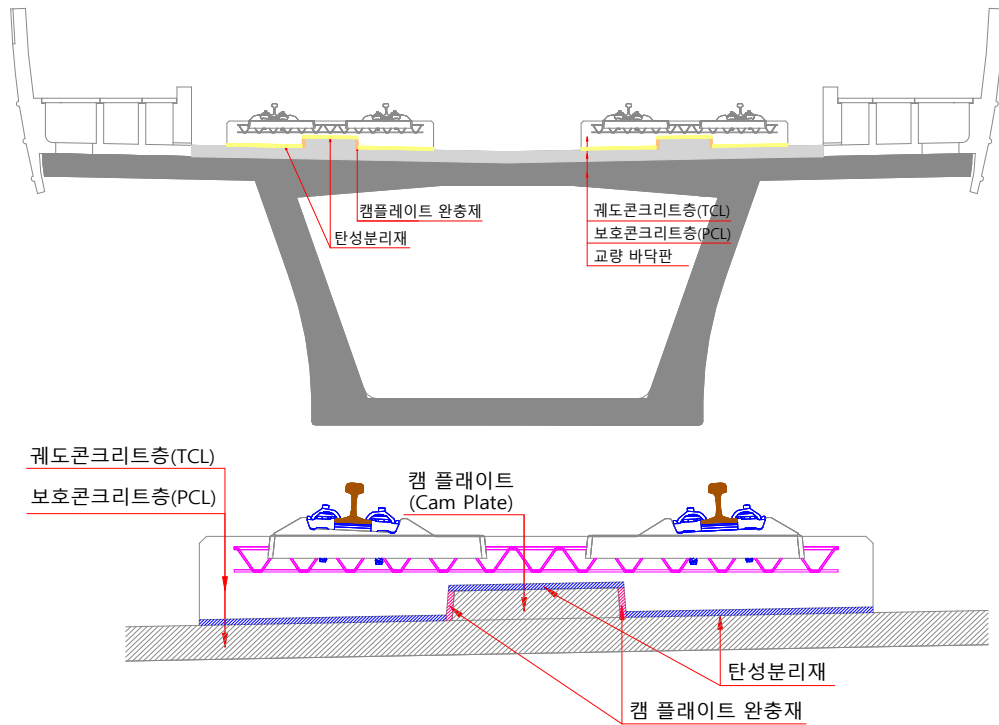


그림 6 철도교량상 콘크리트궤도 표준단면(호남고속철도)

철도교량상 콘크리트궤도는 TCL과 PCL이 탄성분리재에 의해 구조적으로 분리되어 있으나, TCL이 상대적으로 중량과 강성이 크기 때문에 교량 상부구조물의 처짐이나 수평하중에 의한 교각의 변형으로 인한 변위가 발생하면 바닥판의 변형이 궤도구조로 그대로 전달된다.

따라서 TCL에 고정된 레일 및 레일지지점은 교량구조의 거동에 직접적인 영향을 받는 구조적 특징을 가지고 있으며, 이와 같은 교량상 콘크리트궤도의 거동특성에 따라 교량단부 콘크리트궤도에서는 아래 그림과 같이 교량 바닥판의 변형에 의한 레일의 휨 변

형이 발생하게 된다.

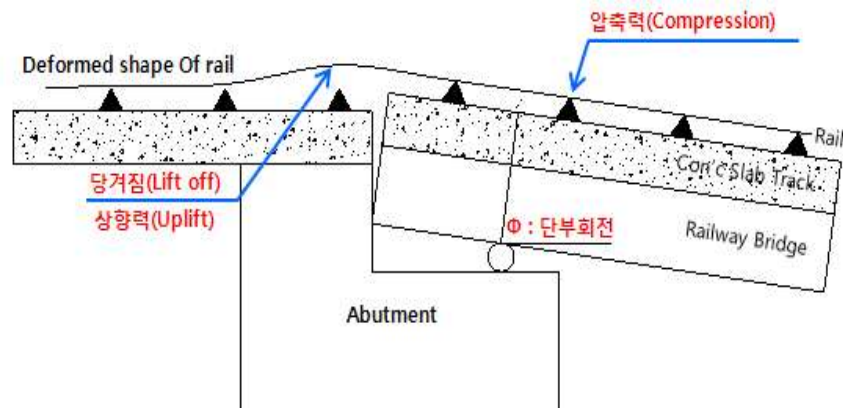


그림 7 교량 단부에서의 바닥판과 레일의 변형

이와 같은 철도교량 변형에 의한 레일의 휨 변형으로 교대측 레일지지점에는 레일을 위로 당겨 올리는 상향력(Uplift force)이 작용하며, 교량측 레일지지점에는 레일지지점이 누리는 압축력(Compression force)이 작용하게 된다.

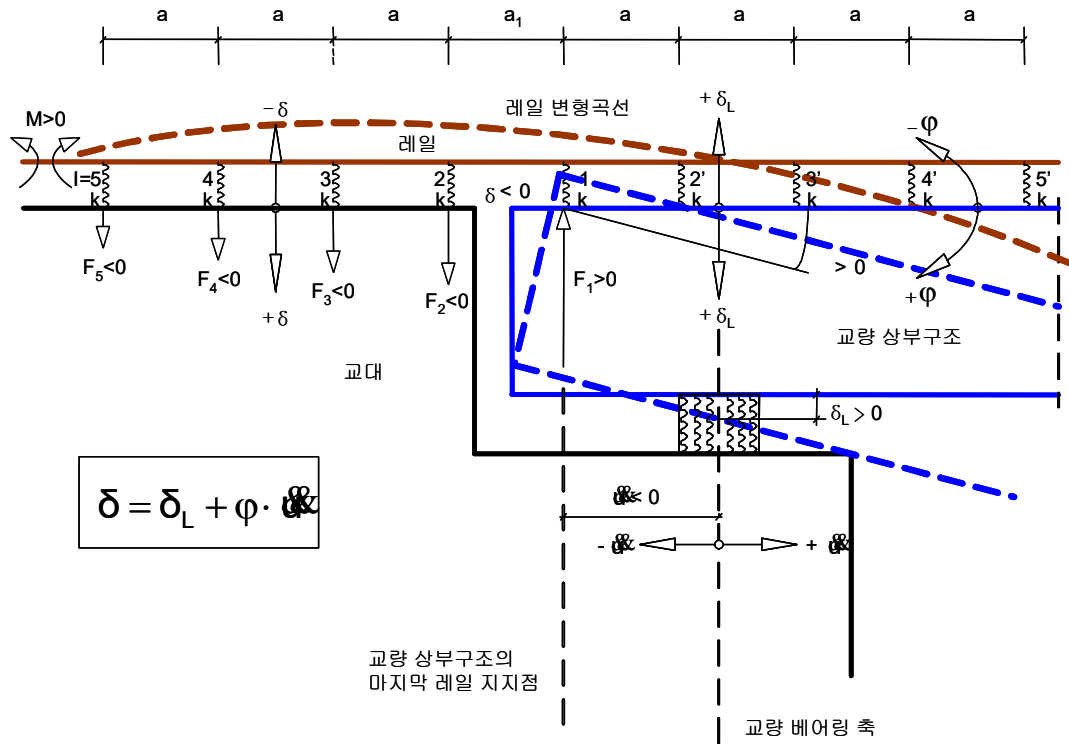
이러한 교량단부 레일지지점에 작용하는 교량단부-궤도 상호작용력이 레일체결장치의 성능을 유지할 수 있는 범위를 벗어나게 되면 레일의 안정성과 기능에 문제가 발생하여 열차운행의 안정성이 저하된다. 이와 같은 문제를 방지하고자 독일의 DS 804 App. 29에서는 교량 단부에 위치하는 레일체결장치의 사용성을 확보하기 위해 레일지지점에 발생하는 상향력이 레일체결장치의 탄성에 의해 흡수되어 체결구의 성능이 유지될 수 있어야 하며, 동시에 체결력에 의해 레일 하부의 탄성패드와 작용하고 있던 프리스트레스 압축력이 완전히 소산되지 않아야 한다고 규정하고 있다. 또한, 압축력 작용 시에는 탄성 패드에 발생하는 압축변위가 패드의 허용압축변위 이내로 유지되도록 할 것을 요구하고 있다.

(가) 레일 지지간격과 교량지점-레일지지점 간 거리

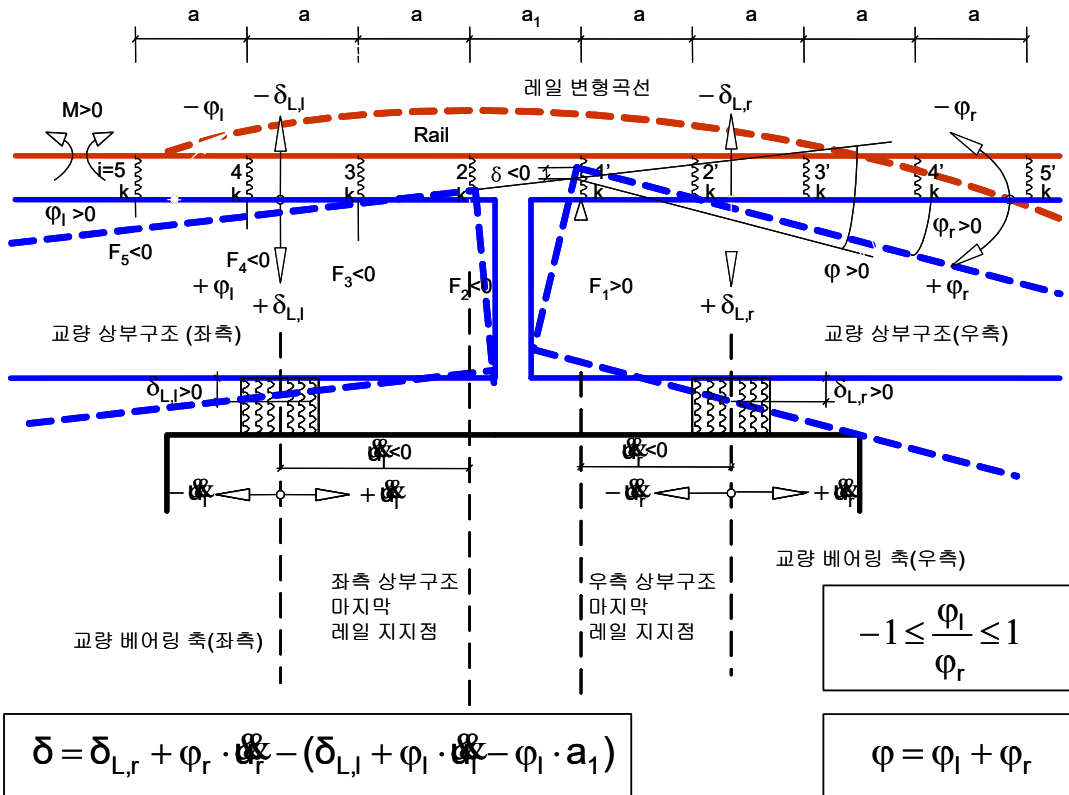
교량 상부구조의 변형거동에 따른 레일지지점 작용력 발생현상과 부호규약은 다음과 같다.

단부회전과 단차 등 교량 상부구조의 변형은 레일의 변형을 동반하게 되고, 레일이 상부구조 위에 고정된 슬래브에 직접 체결되는 콘크리트궤도의 특성 상 레일의 변형은 직접 레일체결장치에 전달된다. 기하학적 구조와 관련하여 교량 지점(bearing)과 교량 상부구조 단부의 마지막 레일지지점 간의 거리(u)와 교량 상부구조 연결부의 레일 지지간격

(a₁) 등이 레일 지지점의 작용하는 힘에 대해 중요한 영향인자가 된다.



(a) 교대부



(b) 교각부

그림 8 교량 상부구조와 레일의 변형

(나) 레일지지점의 특성

① 레일지지점의 연직 수직강성

레일지지점(체결장치)의 정/동적 연직 수직강성은 「레일체결장치 성능시방서」에서 정하는 시험방법에 따라 측정한 값으로 한다.(측정 온도는 상온 기준, 동적 수직강성 측정 시 가진 주파수 4 ± 1 Hz)

② 레일 지지점의 허용 상향력

상향력의 한계는 레일체결장치의 초기 체결력으로 「레일체결장치 성능시방서」에 규정된 시험방법을 적용하여 측정한다. 다만 활동체결구(Zero Longitudinal Resistance Fastener)와 같이 초기 체결력으로 한계상태를 규정할 수 없는 경우는 관련 시험자료 등 충분한 근거가 있다면 해당 레일체결장치 제조사에서 제시하는 값을 적용할 수 있다.

③ 탄성패드의 변형한계

압축력의 한계는 탄성패드의 피로수명을 보장할 수 있는 변형한계로 주어져야 한다. 변형한계는 패드두께의 20%를 기준값으로 하되, 시험자료 등 충분한 근거가 있다면 제조사에서 제시하는 값을 적용할 수 있다.

(다) 궤도-교량 상호작용에 관한 영향인자

이밖에 교량상 장대레일 축력과 관련된 궤도와 교량의 상호작용에 관한 영향인자를 고려하여야 한다(「궤도-교량 종방향 상호작용 해석지침(KR C-08080)」 참조).

(2) 철도교량 단부 콘크리트궤도에 작용하는 하중조건

교량 상부구조의 변형을 일으키는 작용으로는 다음과 같은 요소를 고려하여야 한다.

표 4 철도교량 단부 콘크리트궤도에 작용하는 하중조건

구 분		하중조건
정적 작용 하중	단부회전	① 궤도 부설 후 크리프와 건조수축에 의해 발생하는 장기처짐
		② 교량 상부구조의 상·하면 온도차
		③ 교각 기초의 잔류 부등침하
동적 작용 하중	단차	① 레일과 교량 상부구조의 온도차에 의한 교각 상부 회전
		② 교각 전후면 온도차에 의한 교각 상부회전
	단부회전	① 열차 수직하중
동적 작용 하중	단차	① 시·계동하중에 의한 교각 상부 회전
		② 열차 수직하중에 의한 탄성받침에서의 연직 변형
	축하중에 의한 직접 작용력	① 축하중에 의한 직접 작용력

(가) 정적작용 하중

① 단부회전

㉔ 교량 및 궤도의 자중 및 크리프와 건조수축의 영향

크리프와 건조수축에 의한 상부구조의 장기처짐은 다음 식과 같이 산정할 수 있다.
단, 크리프와 건조수축은 궤도 부설 후 발생분만을 고려한다.

$$\varphi_{\infty} = \varphi_0 + \varphi_{C+S} \quad (1)$$

여기서,

φ_{∞} : 교량 장기처짐에 의한 회전각

φ_0 : 교량과 궤도 자중에 의한 탄성처짐에 의한 회전각

φ_{C+S} : 크리프 건조수축 영향에 의한 장기처짐에 의한 회전각

크리프와 건조수축에 의한 장기처짐은 엄밀한 계산을 통해 산정해야 한다(철도설계기준 「8.2.2」 참조). 그러나 철근콘크리트 보에 있어서 편의상의 이유로 상세 계산을 하지 않는 경우에는 아래 식을 적용해도 좋다.

$$\varphi_{\infty} = \varphi_0 + \varphi_{C+S} = \lambda \varphi_0 \quad (2)$$

여기서,

$$\lambda = \frac{\xi}{1+50\rho'} : \text{장기 처짐계수}$$

ξ : 지속하중의 작용시간에 대한 계수 (아래 표 참조)

ρ' : 압축철근비

표 5 시간경과계수(철도설계기준 「8.5.4」 참조)

시간(개월)	ξ
3	1.0
6	1.2
12	1.4
≥ 60	2.0

[참고]

<식 (1)>에 따라 장기 처짐을 산정할 경우 궤도 부설 이후의 장기 처짐은 아래와 같이 산정할 수 있다.

- 가정 : 교량 건설 후 1년 후 궤도를 부설

압축철근비(ρ') = 0.002

- 총 장기처짐 계수 :

$$\lambda_{tot} = \frac{\xi}{1+50\rho'} = \frac{2.0}{1+50 \times 0.002} = 1.818$$

- 궤도 부설 시(1년)까지 장기처짐 계수 :

$$\lambda_{track} = \frac{\xi}{1+50\rho'} = \frac{1.4}{1+50 \times 0.002} = 1.273$$

$\therefore$ 궤도 부설 이후 발생하는 장기 처짐 계수

$$\lambda_{net} = 1.818 - 1.273 = 0.545$$

따라서 이 경우 궤도+교량 자중에 의한 탄성처짐의 0.545배의 부가적인 처짐이 발생

㉠ 교량 상부구조의 상·하면 온도차

교량 상부구조의 상·하면 온도차(ΔT)에 따른 단부의 회전각(ϕ)은 다음 식과 같이 산정할 수 있다. 온도차는 상부의 온도가 높은 경우를 (+)로 할 경우, 최대 3° C, 최소 -6° C의 값을 고려한다. 단, 아치교나 사장교 등 특수교량의 경우에는 별도의 엄밀 계산을 통

해 회전각을 산정할 수 있다.

$$\varphi = \frac{\alpha \Delta T L}{2h} \quad (3)$$

여기서,

α : 콘크리트 열팽창계수, ΔT : 교량 상부구조 상하면의 온도차, L : 지간

h : 상부구조의 높이

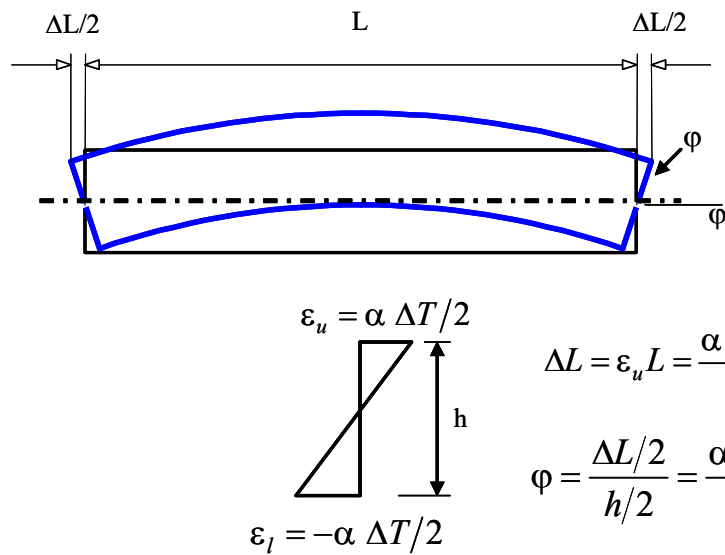


그림 9 교량 상부구조 상하면 온도차에 의한 단부 회전

㊤ 교각 기초의 잔류 부등침하

교각 기초의 침하로 인해 발생하는 상부구조의 단부 회전각은 아래 식과 같이 산정할 수 있다. 교각의 잔류 부등침하량은 최대 5mm로 한다.

$$\varphi = \frac{\Delta s}{L} \quad (4)$$

여기서, Δs : 교각의 잔류 부등침하량

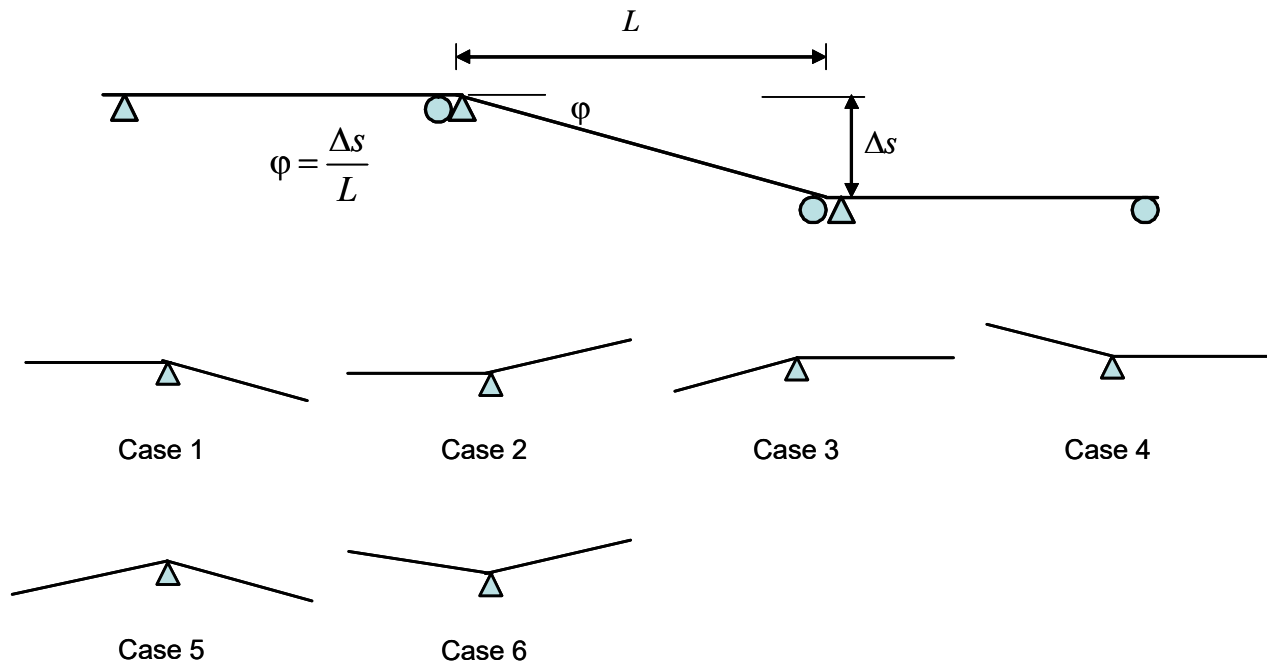


그림 10 교각 기초의 침하에 의한 단부회전

② 단차

㉓ 레일과 교량 상부구조의 온도차에 의한 교각 상부 회전

레일과 교량상부구조와 온도차이가 발생할 경우, 레일과 교량상의 상호작용에 의하여 교각상부에 수평하중이 작용하게 되며, 교각은 휨변형이 발생하게 된다. 이 경우 교각 상면의 경사에 의하여 일정 거리로 이격된 두 교좌장치 사이에는 단차가 발생하게 된다. 교각 상부 회전변위를 구하기 위한 교량과 궤도의 모형화, 레일과 교량의 온도변화, 해석방법은 「궤도/교량 상호작용력 해석(KR C-08080)」에서 정하는 바에 따른다.

㉔ 교각 전·후면 온도차에 의한 교각 상부 회전

교각의 전·후면 온도차에 의한 교각의 상부 회전각은 아래 식에 따라 결정할 수 있다. 이 때, 교각 전·후면의 온도차는 최대 5° C로 한다.

$$\delta = \varphi_p d_{br} \quad (5)$$

$$\varphi_p = \alpha \Delta T_p \frac{H_p}{D_p} \quad (6)$$

여기서,

φ_p : 교각 상부 회전각, ΔT_p : 교각 전·후면 온도차 (최대 5° C)

H_p : 교각 높이, d_{br} : 교량 지점 사이의 간격

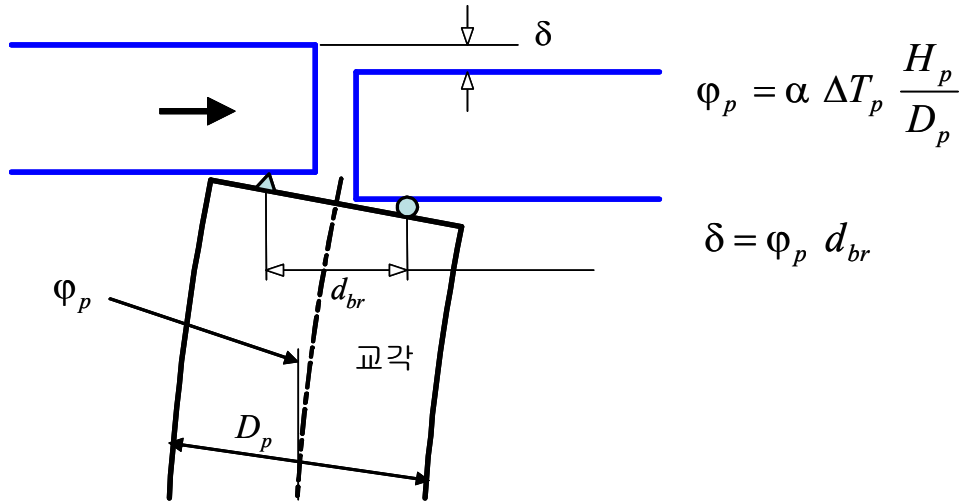


그림 11 교각 전·후면 온도차에 의한 교각 상부 회전과 단차 발생기구

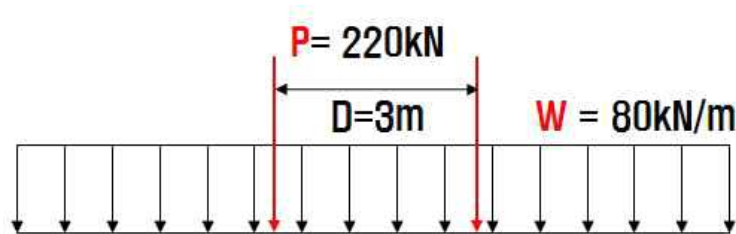
(나) 동적작용 하중

① 단부회전

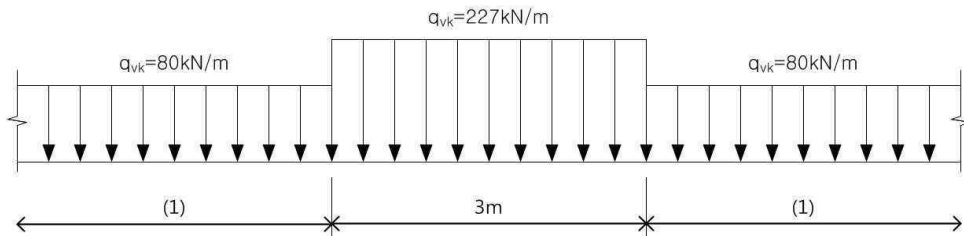
㉔ 열차 수직하중

아래 표준하중선도에 계수 λ 와 $(1+\phi)$ 를 각각 곱한 등가 등분포하중을 적용한다.

- 여객화물혼용선의 경우



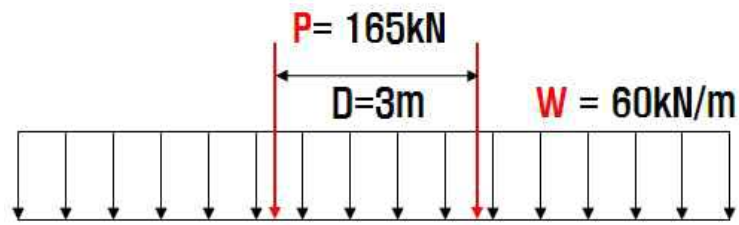
(a) KRL-2012 하중선도



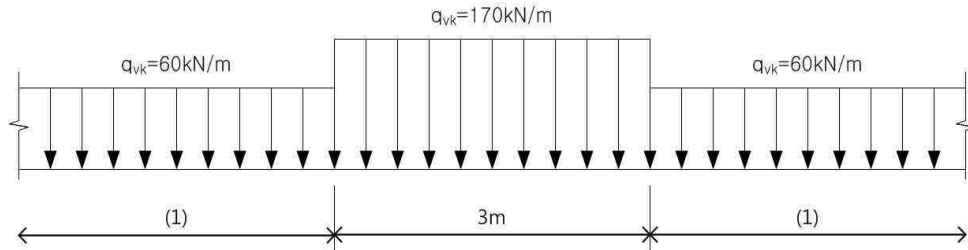
(b) KRL-2012 등가하중선도

그림 12 여객화물혼용선의 표준하중(KRL2012하중)

- 여객전용선의 경우



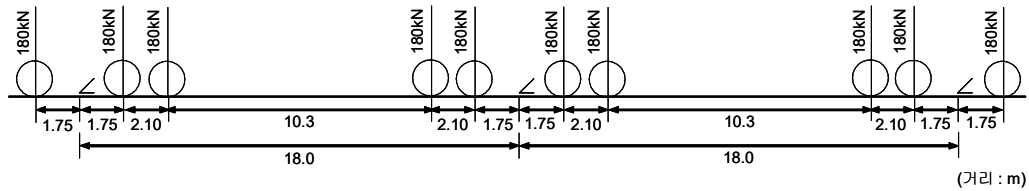
(a) KRL-2012 하중선도



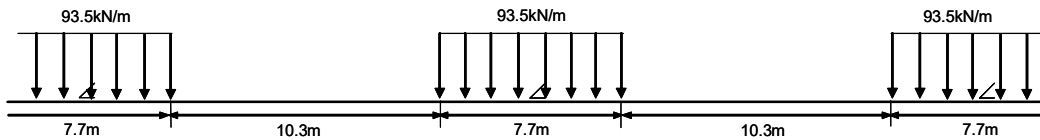
(b) KRL-2012 등가하중선도

그림 13 여객전용선의 표준하중(0.75KRL2012하중)

- 전동차 전용선의 경우



(a) EL-18 하중선도



(b) EL-18 등가분포 하중선도

그림 14 시속 200km/h 미만 전동차 전용선의 표준하중(EL-18)

복선일 경우 단선 및 복선 재하하여 불리한 경우를 적용하고, 복선 이상의 궤도에 대해서는 단선, 복선 및 복선 이상까지 하중을 재하하여 불리한 경우를 적용하며, 재하 하중의 크기(하중계수)는 다음 표에 따른다.

표 6 열차 수직하중 재하방법

교량 상 궤도의 수			하중이 재하되는	하중이 재하되는	하중계수
1	2	≥ 3	궤도의 수	궤도	
			1	T_1	1
			2	T_1 T_2	1
			≥ 3	T_i ($i=1,2, \dots, n$)	0.75

※ 계수 λ 및 $(1+\phi)$ 의 산정

λ : 실열차하중을 고려한 보정계수

· 여객열차전용 $\lambda = 0.8 - 0.4(L-3)/7$ ($0.4 \leq \lambda \leq 0.8$)

· 화물열차 $\lambda = 1.0$

여기서, L : 교량의 경간 (m)

$1+\phi$: 실열차하중에 의한 충격계수

계수 $(1+\phi)$ 의 산정은 아래 그림에 따르고, 그래프 간 중간값은 선형보간에 의하여 결정한다. 단, 경간과 속도가 아래 그림의 범위를 벗어나는 경우에는 아래의 식으로 산정할 수 있다.

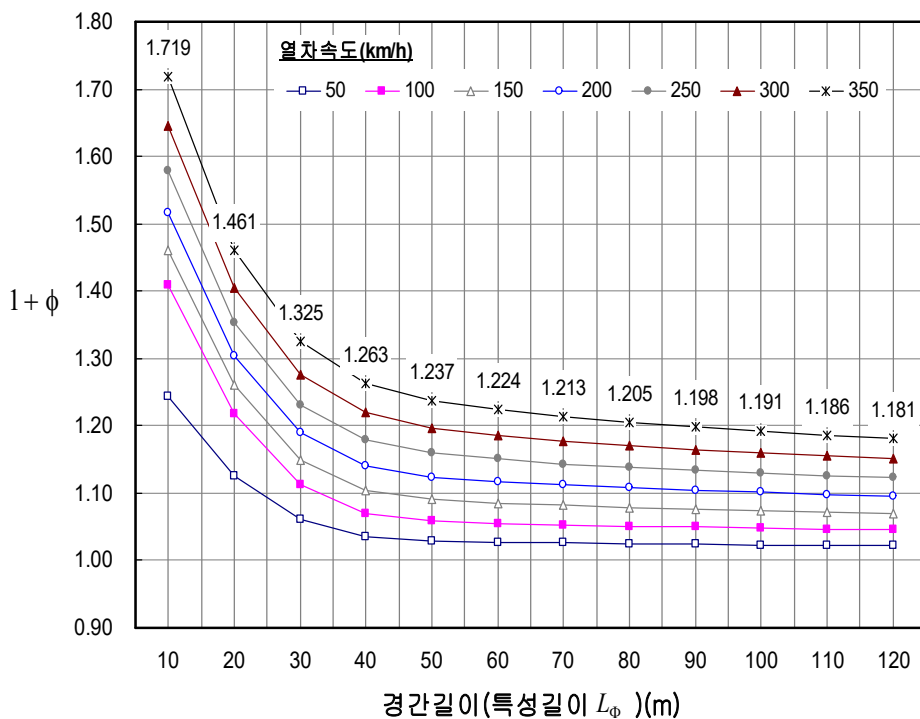


그림 15 교량 경간과 속도에 따른 계수 $(1+\phi)$ 값의 변화

$$1 + \phi = 1 + \phi' + 0.5\phi'' \quad (7)$$

$$\phi' = \frac{K}{1 - K + K^4} \quad (K < 0.76 \text{ 일 때})$$

$$\phi' = 1.325 \quad (K \geq 0.76 \text{ 일 때})$$

$$K = \frac{v}{2L_{\phi} n_0} \quad (8)$$

L_{ϕ} : 거더의 특성길이 (아래 표 참조)

n_0 : 거더의 고유진동수 (실제 고유진동수 대신 아래의 상한치를 적용해도 좋다)

고유진동수의 상한치 $n_0 = 94.76L_{\phi}^{-0.748}$

$$\phi'' = \frac{\alpha}{100} \left[56 e^{-\left(\frac{L_{\phi}}{10}\right)^2} + 50 \left(\frac{L_{\phi} n_0}{80} - 1 \right) e^{-\left(\frac{L_{\phi}}{20}\right)} \right] (\phi'' \geq 0) \quad (9)$$

$\alpha = v/22$ ($v \leq 22\text{km/h}$ 일 때)

$\alpha = 1$ ($v > 22\text{km/h}$ 일 때)

v : 열차 최고 주행속도

표 7 주거더의 특성길이(L_ϕ)의 산정방법

Case	구조 요소	특성길이 L_{ϕ}										
1	단순 지지되는 거더와 슬래브 (콘크리트에 매립된 철골 포함)	주거더 방향의 경간										
2	다음의 길이를 갖는 n 경간의 연속 거더와 슬래브 $L_m = 1/n(L_1 + L_2 + .. + L_n)$	$L_{\phi} = k \times L_m$ 단, L_{ϕ} 는 L_i 최대값 (i=1.....n) 보다는 작아야 함. <table><tr><td>$n =$</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>≥ 5</td></tr><tr><td>$k =$</td><td>1.2</td><td>1.3</td><td>1.4</td><td>1.5</td></tr></table>	$n =$	2	3	4	≥ 5	$k =$	1.2	1.3	1.4	1.5
$n =$	2	3	4	≥ 5								
$k =$	1.2	1.3	1.4	1.5								
3	Portal frame과 closed frame 또는 박스부재 - 단경간 - 다경간	3경간 연속보로 간주 (프레임이나 박스부재의 수직 및 수평 길이를 이용하여 2항에 따라 산정) 다경간 연속보로 간주 (단부 수직부재와 수평부재의 길이를 이용하여 2항에 따라 산정)										
4	single arch, archrib, bowstring의 보강된 거더	경간의 반(half span)										
5	solid spandrels retaining fill이 있는 일련의 아치	clear opening의 2배										
6	보강 거더와 연결된 현수봉(suspension bars)	현수봉 종방향 간격의 4배										

② 단차

㉓ 시·제동하중에 의한 교각 상부 회전

교량과 궤도의 모형화, 시·제동하중의 크기와 재하방법, 해석방법 등은 「궤도-교량 종방향 상호작용 해석(KR C-08080)」에서 정하는 바에 따른다.

㉔ 열차 수직하중에 의한 탄성받침에서의 연직 변형

열차 수직하중은 「(2)동적하중작용-가)단부회전-①열차수직하중」항에 준한다.

㉔ 축하중에 의한 직접 작용력

축하중에 의해 직접 레일 지지점에 가해지는 하중을 산정하기 위하여 단일 축하중은 충격과 곡선부에서의 증감을 고려하여 다음의 값으로 한다.

$$P = f_{dyn} f_c P_{stat} \quad (10)$$

여기서

P_{stat} : 정적 윤중 (kN) (표준하중선도의 축중의 1/2)

$f_{dyn} = 1 + 3\bar{s}$: 동적충격계수

$\bar{s}$: 윤중변동의 표준편차

$V > 60\text{km/h}$, $\bar{s} = 0.167$ $f_{dyn} = 1.5$

$V \leq 60\text{km/h}$, $\bar{s} = 0.0$ $f_{dyn} = 1.0$

$f_c = 1.1 \sim 1.2$: 곡선부 원심력에 의한 윤중의 증감계수

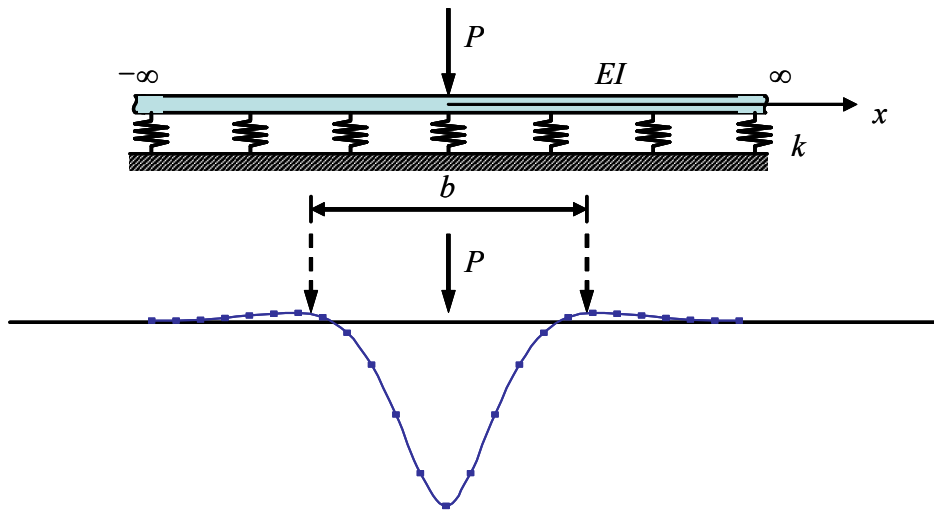


그림 16 축하중에 의한 레일체결장치 연직반력의 영향선

(3) 철도교량 단부 콘크리트궤도 사용성 평가 기준

“콘크리트궤도 인터페이스 성능향상에 관한 연구, 한국철도시설공단, 2010”의 연구 결과 국내 고속철도(경부2단계) 교량의 단부 사용성 검토에서 기준값(17kN)을 초과하는 개소가 다수 발생하였으며, 별도의 상향력 저감대책으로 ZLR(종방향활동체결장치)를 적용하였다. 국내 경부고속철도 2단계구간에 부설된 종방향활동체결구(ZLR)는 토인슬레이터와 레일저부 간격확보 불량과 단부회전으로 인해 체결구 손상, 패드 이탈, 스테인레스 판 파손, 패드 경화 등이 발생하고 있다.

국내에서는 독일(DS804-App29)의 기준을 준용하여 한국철도시설공단에서 제정한 고속철도설계기준에서 제시하고 있는 “콘크리트궤도 부설 교량의 단부 사용성 검토”를 궤도설계 시 시행하도록 되어 있으며, 해당 검토내용은 콘크리트궤도가 부설된 철도교량의 궤도 유지보수 요인을 줄이고 단부 궤도의 사용성을 향상시키기 위해 교량상판 단부의 단차 및 회전에 대한 레일체결구의 안전성 검토결과를 제시하는 것을 목적으로 수행되는 설계과정의 검토이다.

철도교량 단부 콘크리트궤도 사용성 평가기준은 독일 DS804에 제시되어 있으며, 국내에서는 이를 준용하여 2012년 「교량단부 콘크리트궤도 사용성 검토(KR C-08090), 한국철도시설공단」을 제정하였고, 2014년 개정하였다. 본 절에서는 KR C-08090에서 제시되어 있는 철도교량 단부 콘크리트궤도 사용성 검토 기준을 기술하였다.

(가) 레일체결장치 상향력(uplift force)

단일 레일체결장치에 작용하는 상향력은 아래의 기준을 만족해야 한다.

$$\max |F_d| \leq Z_u / \gamma_M \quad (11)$$

$$F_d = \phi_{d,stat} F(LF1; k_{stat}, a, a_1) + \phi_{d,dyn} F(LF1; k_{dyn}, a, a_1) + \delta_{d,stat} F(LF2; k_{stat}, a, a_1) + \delta_{d,dyn} F(LF2; k_{dyn}, a, a_1) + \frac{P_d}{100} \min F(LF3; k_{dyn}, a)$$

$$\begin{aligned} \phi_{d,stat} &= \sum \gamma_F \phi_{stat} & \phi_{d,dyn} &= \sum \gamma_F \phi_{dyn} \\ \delta_{d,stat} &= \sum \gamma_F \delta_{stat} & \delta_{d,dyn} &= \sum \gamma_F \delta_{dyn} & P_d &= \gamma_F m P \end{aligned}$$

여기서

F_d : 레일체결장치 작용력 설계값

Z_u : 레일 지지점 상향력의 허용값, 즉 레일체결장치 초기 체결력

$F(LF1; k_{stat} \text{ or } k_{dyn}, a, a_1)$: 단위 단부회전($\phi=1\%$)에 의한 레일체결장치 작용력

$F(LF2; k_{stat} \text{ or } k_{dyn}, a, a_1)$: 단위 단차($\delta=1\text{mm}$)에 의한 레일체결장치 작용력

$F(LF3; k_{dyn}, a)$: 단위 축하중(100kN)에 의한 레일체결장치 직접 작용력

k_{stat}, k_{dyn} : 레일 지지점 정적 또는 동적 연직 수직강성

a : 일반 구간의 레일 지지간격 (등간격)

a_1 : 교량 상부구조 연결부의 레일 지지간격

γ_F : 부분안전계수

γ_M : 레일 지지점 저항에 관한 안전계수, 일반적인 경우 $\gamma_M = 1.0$

ϕ_{stat} : 정적 작용에 의한 단부 회전각의 계산값

ϕ_{dyn} : 동적 작용에 의한 단부 회전각의 계산값

δ_{stat} : 정적 작용에 의한 단차의 계산값

δ_{dyn} : 동적 작용에 의한 단차의 계산값

P : 축하중

m : 인접 축하중의 영향을 고려하기 위한 계수

$b \approx$ 축간거리(d)인 경우, $m = 2$

$b \neq$ 축간거리(d)인 경우, $m = 1$

ϕ_d, δ_d, P_d : 단부회전, 단차 및 축하중의 계산값에 부분안전계수를 곱한 설계값

(나) 레일체결장치 압축력(compression)

단일 레일체결장치에 작용하는 압축력은 아래의 기준을 만족해야 한다.

$$\frac{\max |F_d|}{k_{stat}} \leq s_D \quad (12)$$

$$F_d = \phi_{d,dyn} F(LF1; k_{stat}, a, a_1) + \delta_{d,dyn} F(LF2; k_{stat}, a, a_1) + \frac{P_d}{100} \max F(LF3; k_{stat}, a)$$

$$\phi_{d,dyn} = \sum \gamma_F \phi_{dyn} \quad \delta_{d,dyn} = \sum \gamma_F \delta_{dyn} \quad P_d = \gamma_F \alpha P$$

여기서,

s_D : 레일체결장치 탄성패드의 연직 변형한계

γ_F : 부분안전계수

α : 열차속도에 관한 계수

$V < 60\text{km/h}$ 인 경우, $\alpha = 1.0$

$V \geq 60\text{km/h}$ 인 경우, $\alpha = 0.8$

k_{stat} : 정적 수직강성(※압축력에 대한 검토에 있어서 동적 수직강성은 안전측의 검토를 위해 정적 수직강성을 적용함)

표 8 부분안전계수와 레일체결장치 수직강성의 적용방법(KR C-08090)

구분	작용력	부분안전계수 γ_F	체결장치 수직강성	
			상향력 검토	압축력 검토
정적	자중 + 잔류 크리프 및 건조수축 (궤도 부설 이후)	1.0	k_{stat}	k_{stat}
	교량 상부구조 상·하면 온도차	1.0		
	교각 잔류 부등침하	1.0		
	레일-교량 상부구조 온도차에 의한 교각 상부 회전	1.0		
	교각 전·후면 온도차에 의한 교각 상부 회전	1.0		
동적	열차 수직하중	1.3	k_{dyn}	
	시 · 제동하중에 의한 교각 상부 회전	1.0		
	축하중에 의한 직접 작용력	1.3		

(다) 상향력에 의한 슬래브의 들림(lift-off)

상향력에 의해 슬래브와 보호층 콘크리트 간의 분리가 발생할 가능성에 대하여 검토해야 한다. 슬래브와 보호층 콘크리트 간 분리 방지를 위해 특정 하중조합에 의해 발생하는 상향력의 합력은 아래의 기준을 만족해야 한다.

$$e = \frac{\sum M}{\sum V} \leq \frac{L_s}{6} \quad (13)$$

$$\sum M = 2 \sum F_{d,i} d_i \quad \sum V = w L_s - 2 \sum F_{d,i} \geq 0$$

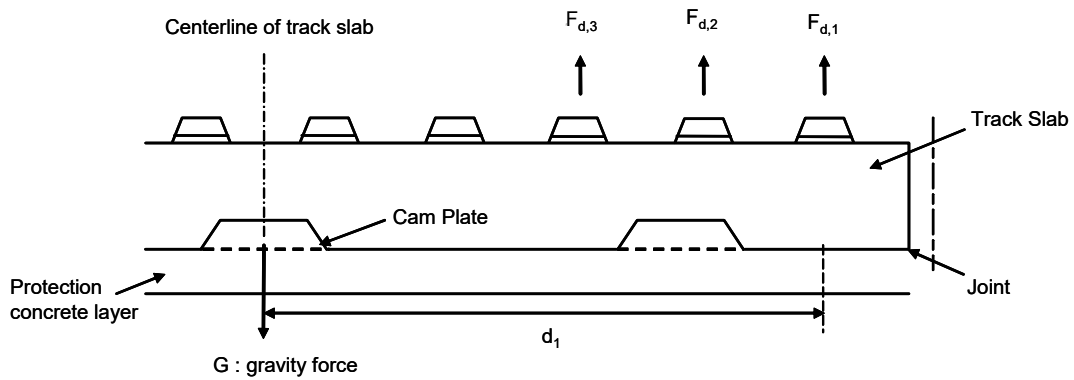
여기서,

w : 궤도 단위 길이당 자중

L_s : 슬래브의 길이

$F_{d,i}$: 각 레일 지지점에서의 상향력 ($i = 1, 2, \dots, n$)

d_i : 슬래브 중심선에서 각 레일 지지점까지의 거리



$$\left. \begin{aligned} \Sigma M &= (F_{d,1} \times d_1 + F_{d,2} \times (d_1 - a) + F_{d,3} \times (d_1 - 2a)) \times 2 \\ \Sigma V &= w \cdot L_s - (F_{d,1} + F_{d,2} + F_{d,3}) \times 2 \geq 0 \end{aligned} \right\} e = \frac{\Sigma M}{\Sigma V} \leq \frac{L_s}{6} ?$$

그림 17 슬래브의 들림에 대한 안정성 검토

한국철도시설공단 설계지침(KR C-08090)에서 제시하고 있는 레일체결장치 작용력의 산정 및 검토 절차는 다음과 같다.

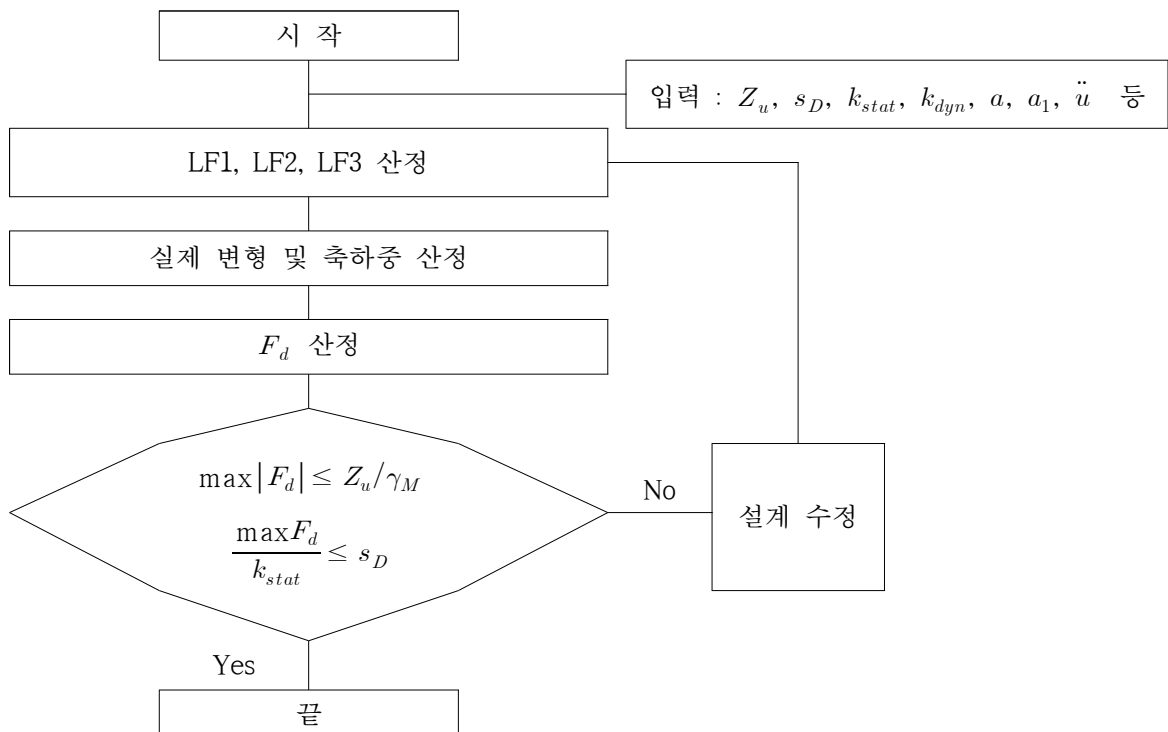
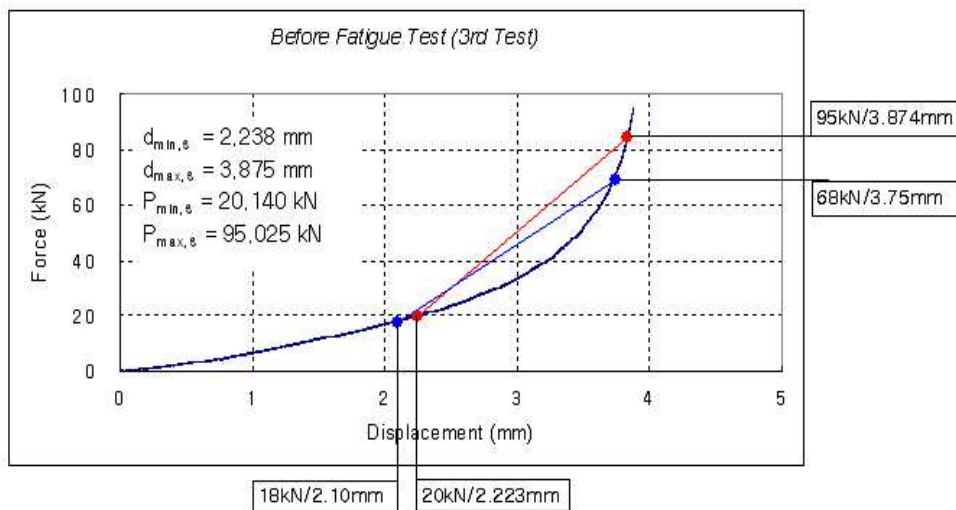


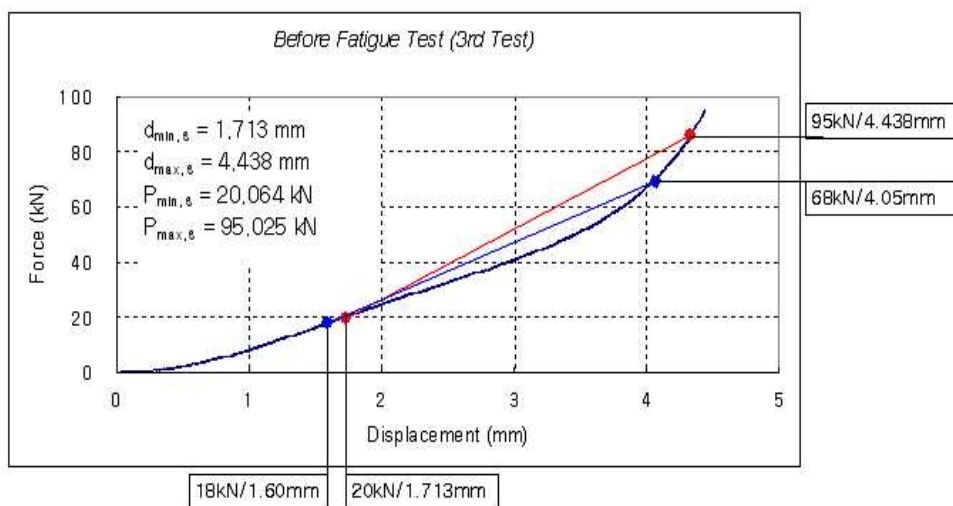
그림 18 레일체결장치 작용력의 산정 및 검토 절차 (KR C-08090)

나. 주요 영향인자에 대한 실내시험

아래 그림은 경부고속철도 2단계 구간 설계에서 검토된 콘크리트궤도용 레일체결장치에 대한 하중-변위 그래프를 나타낸다. 아래 그림을 보면 동일한 하중이 작용하더라도 레일체결장치의 탄성수준에 따라 초기변위 및 최대변위는 상당히 큰 차이가 발생하고, 그 기울기 역시 차이를 나타낸다. 여기서 초기하중(체결력)-변위 대비 최대하중-변위의 기울기가 레일체결장치의 연직 수직강성을 의미하며, 사용된 탄성재료의 재료적 특성 및 레일패드의 형상 등에 영향을 받아 초기하중인 체결력 도입에 따른 초기 변위량이 상이하게 나타난다. 이러한 레일체결장치의 연직 수직강성은 초기체결력 도입 시 발생하는 레일패드의 초기 압축변형량에 영향을 미친다.



(a) SFC



(b) System300-1

그림 19 콘크리트궤도용 레일체결장치별 하중-변위 그래프

(Ref. 경부고속철도 대구~부산간 궤도공사 실시설계보고서, 한국철도시설공단, 2006)

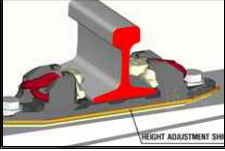
콘크리트궤도에서 사용되고 있는 레일체결장치의 체결력시험 결과, 상향력에 대해 레일체결장치는 비선형적인 거동을 하게 된다. 하지만 아래 표와 같이 KR C-08090에서는 하중조건에 따른 레일체결장치 수직강성을 「레일체결장치 성능시방서」에 의한 선형적인 정/동적 연직 수직강성을 적용하도록 하고 있다. 여기서 정/동적 연직 수직강성은 레일체결장치 탄성패드의 정·동적 수직강성에 의해 결정된다.

철도교량 단부 콘크리트궤도 사용성 검토는 교량단부의 거동에 의해 레일에 상향력이 발생하게 되고, 레일체결장치는 이에 저항하게 된다. 즉, 교량단부 사용성 검토는 레일체결장치의 수직하중(↓)에 의한 탄성패드의 수직강성값보다 수직하중(↑)에 의한 레일체결구의 비선형거동을 고려할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 이에 대한 명확한 규명과 영향범위를 분석하고자 국내 콘크리트궤도에서 사용하고 있는 대표적인 레일체결장치들을 선정하였고, 상향력에 의한 레일체결장치의 비선형 거동을 시험하였다.

표 9 단부사용성 검토 시 하중조건에 따른 레일체결장치 수직강성의 적용방법(KR C-08090)

구분	작용력	부분안전계수 γ_F	체결장치 수직강성	
			상향력 검토	압축력 검토
정적	자중 + 잔류 크리프 및 건조수축 (궤도 부설 이후)	1.0	k_{stat}	k_{stat}
	교량 상부구조 상·하면 온도차	1.0		
	교각 잔류 부등침하	1.0		
	레일-교량 상부구조 온도차에 의한 교각 상부 회전	1.0		
	교각 전·후면 온도차에 의한 교각 상부 회전	1.0		
동적	열차 수직하중	1.3	k_{dyn}	
	시 · 제동하중에 의한 교각 상부 회전	1.0		
	축하중에 의한 직접 작용력	1.3		

표 10 실내시험용 레일체결장치 선정을 위한 기본제원 비교

구 분	KR형	SFC	System 300-1 / RLR	ERL
레일체결장치				
정적수직강성 [kN/mm]	29.97 (18%)	45.4 (5.65%)	28.9 (4.15%)	17.7(반복하중 전) 18.8(반복하중 후)(6%)
초기체결력 [kN]	20.19 (7.9%)	17.15 (7.17%)	16.9 (10.65%)	21.8(반복하중 전) 19.3(반복하중 후)(11%)
종방향저항력 [kN]	10.84 (10.6%)	10.84 (10.6%)	14.4 (12%)	16.0(반복하중 전) 16.3(반복하중 후)(2%)
전기절연저항 [kΩ]	42.29	31.93	16.83	24.5
부품수량[ea]	13	15	13	15
높이조정[mm]	-4/+56	-2/+55	-4/+56	
좌우조정[mm]	±16(궤간)	±18(궤간)	±16(궤간)	
체결장치 높이 [mm]	50	51	34	
기 타	국내 수급 가능 (DRB동일, 엘더스)	국내 수급에 어려움 (펜드롤코리아)	국내 수급 가능 (DRB동일)	국내 수급 가능 (BWG KOREA)
선 정	○		○	○
비 고		참고문헌 활용		

(1) 레일체결장치 실내시험 방법

(가) 실내시험 방법

철도교량 단부 콘크리트궤도 사용성 검토 시 적용되는 주요 영향인자 중 레일체결장치 정/동적 수직강성이 있다. 현재 단부 사용성 검토 시에는 상향력에 의한 레일체결장치 정/동적 수직강성은 정/동적 수직강성 시험을 통해 도출된 값을 적용하고 있다. 하지만 단부 사용성 검토는 상향력에 의한 레일체결장치의 거동을 확인할 필요가 있으며, 이를 위해 본 연구에서는 한국철도표준규격(KRS TR 0014-15R, 레일체결장치)에서 제시하고 있는 체결력 시험을 통해 상향력에 의한 레일체결장치의 거동을 분석하고자 하였다.

KRS TR 0014-15R에서 제시하고 있는 체결력 시험은 레일패드를 포함한 조립체에 대한 것으로 하중재하 및 측정방법은 다음과 같다.

레일체결장치를 이용하여 레일을 침목에 고정시킨 후, 조립체를 정반에 고정하고 레일 좌면부의 직각 방향으로 하중(P)을 가할 수 있도록 아래 그림과 같이 체결력 시험체를 설치한다. 레일의 변위(d)를 측정할 수 있도록 레일 저부 가장자리 4곳에 변위계를 설치하고 0점을 설정한다.

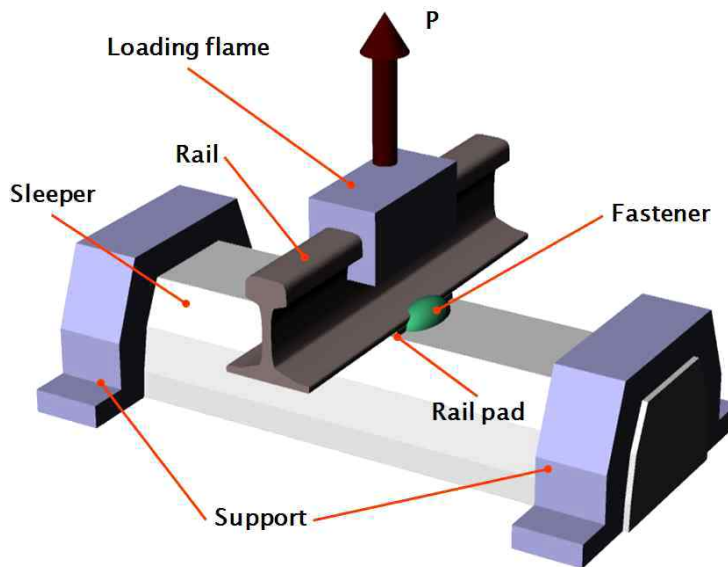


그림 20 레일체결장치 체결력 시험방법 (KRS TR 0014-15R)

레일저부가 기울어짐 없이 레일 좌면부와 평행을 유지하면서 레일패드가 제거될 때까지 10kN/min을 초과하지 않는 속도로 레일에 상향력을 가한다. 패드를 제거하고 변위계의 평균값이 0이 될 때까지 하중을 감소시킨다. 이때의 하중(P)을 기록한 후, 0.9 P 까지

하중을 감소시키고 다시 1.1P가 될 때까지 하중을 증가시킨다. 아래 하중-변위 그래프에서 P_0 가 해당 체결시스템의 체결력이 된다. 동일한 방법으로 2회에 걸쳐 추가시험을 실시한 후, 체결력 평균값을 계산한다.

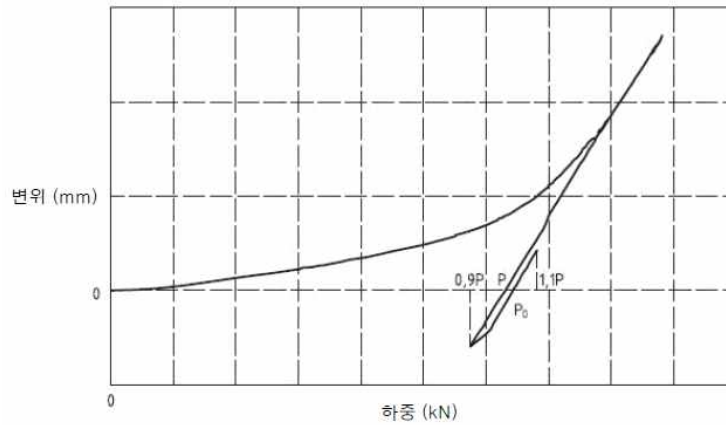


그림 21 레일체결장치 체결력 시험결과 (KRS TR 0014-15R)

본 연구에서 수행한 실내시험방법은 KRS TR 0014-15R에서 제시하고 있는 체결력 시험을 준용하였으나, 상향력에 의한 레일체결장치의 비선형 거동을 분석하고자 실내시험을 수행하였기 때문에 패드가 제거되는 시점까지 측정을 하였고, 시험체별로 3회씩 시험을 실시하였다.

(나) 레일체결장치 시험 CASE

표 11 레일체결장치 시험 CASE

구 분		정적강성	동적강성	시험횟수	비 고
Case 1	KR형 레일체결장치	30 kN/mm	60 kN/mm	3	본 연구
Case 2	System 300-1 (SKL15)	30 kN/mm	60 kN/mm	3	본 연구
Case 3	System 300-1 (SKL15B)	30 kN/mm	60 kN/mm	3	본 연구
Case 4	특수레일체결장치 (ERL, SKL12)	20 kN/mm	50 kN/mm	3	본 연구
-	SFC (SFC 1501)	30 kN/mm	60 kN/mm	3	Ref. Yang, 2017



(a) Case 1 (KR형 레일체결장치)



(b) Case 2 (System 300-1, SKL15)



(c) Case 3 (System 300-1, SKL15B)



(d) Case 4 (ERL, SKL12)

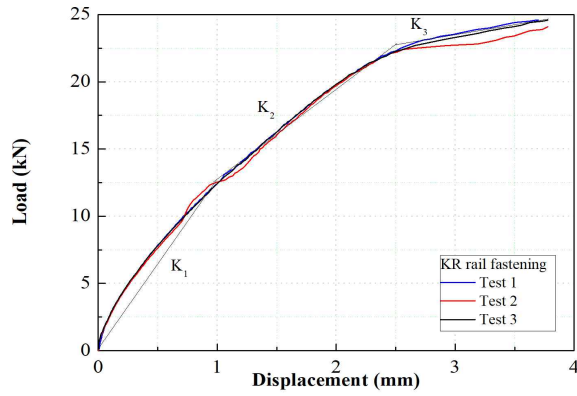


(e) 실내시험방법 예

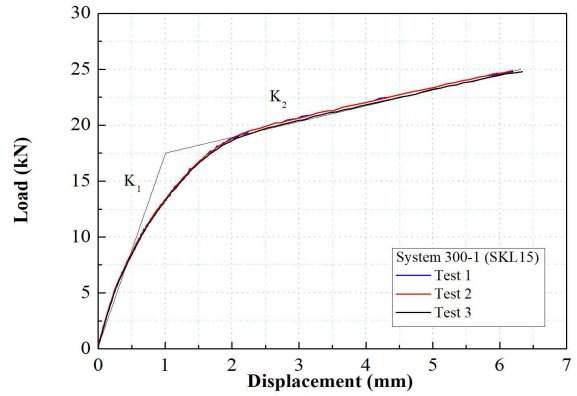
그림 22 실내시험용 시험체 및 시험방법

(2) 레일체결장치 실내시험 결과 분석

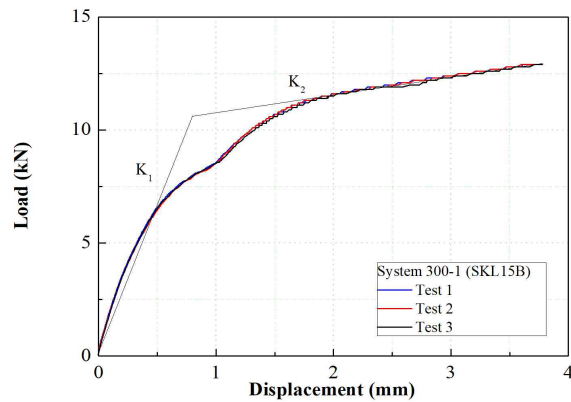
국내에서 대표적으로 사용하고 있는 레일체결장치 4가지 종류에 대한 실내시험결과는 다음과 같다.



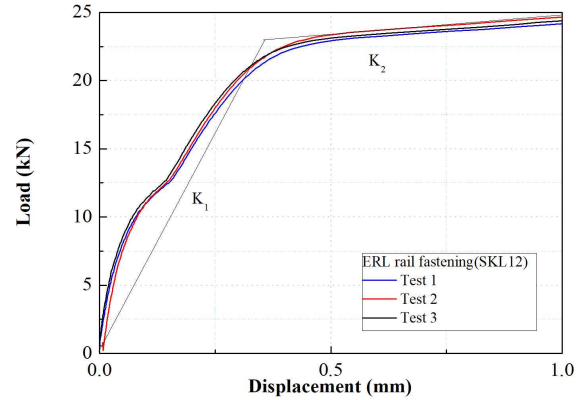
(a) Case 1 (KR형 레일체결장치)



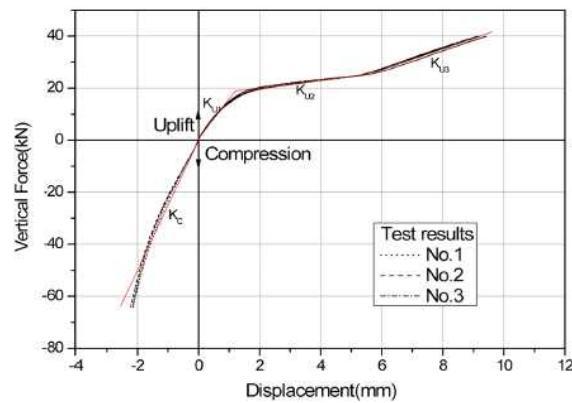
(b) Case 2 (System 300-1, SKL15)



(c) Case 3 (System 300-1, SKL15B)



(d) Case 4 (ERL, SKL12)



(e) SFC (Ref. Yang, 2017)

그림 23 실내시험 결과 - 레일체결장치 비선형 거동

실내시험 결과, 레일체결장치 종류별 수직 상방향(↑)에 따라 비선형 거동을 보였으며, 그 크기는 모두 상이한 것으로 나타났다. 즉, 레일체결장치 종류별 수직 상방향(↑)에 대한 비선형 거동특성을 단부 사용성 검토 시 고려할 필요가 있으며, 이에 따른 영향범위를 분석하여 적용여부를 검토할 필요가 있다.

(3) 소결론

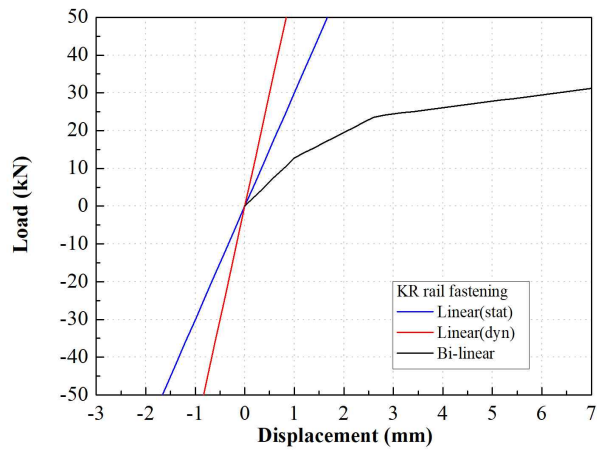
국내에서 대표적으로 사용하고 있는 레일체결장치 종류에 대한 실내시험결과를 바탕으로 아래 그림과 같이 레일체결장치 거동(Bi-linear)에 대한 이상화된 그래프를 제시하였다.

표 12 레일체결장치 종류별 이상화 모델

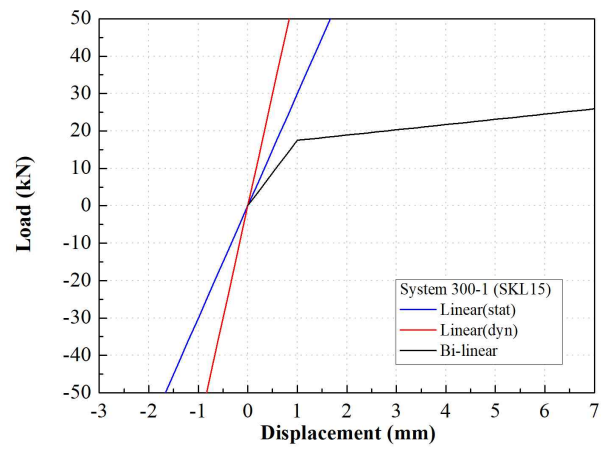
구 분			K ₁	K ₂	K ₃
Case 1	KR형 레일체결장치	Range (mm)	0.0~1.0	1.0~2.5	2.5≤
		Stiffness (kN/mm)	12.8	6.7	1.7
Case 2	System 300-1 (SKL15)	Range (mm)	0.0~1.0	1.0~6.3	6.3≤
		Stiffness (kN/mm)	17.5	1.4	1.4
Case 3	System 300-1 (SKL15B)	Range (mm)	0.0~0.8	0.8~3.8	3.8≤
		Stiffness (kN/mm)	13.4	0.7	0.7
Case 4	특수레일체결장치 (ERL, SKL12)	Range (mm)	0.0~0.4	0.4~1.0	1.0≤
		Stiffness (kN/mm)	57.5	3.2	3.2
Ref.	SFC ¹⁾	Range (mm)	0.0~1.1	1.1~5.7	5.7≤
Yang, 2017	(SFC 1501)	Stiffness (kN/mm)	15.8	1.5	4.1

¹⁾ Yang(2017)의 경우 압축(compression)에 대해서 정적하중에 따른 결과값을 적용하여 상향력을 검토함

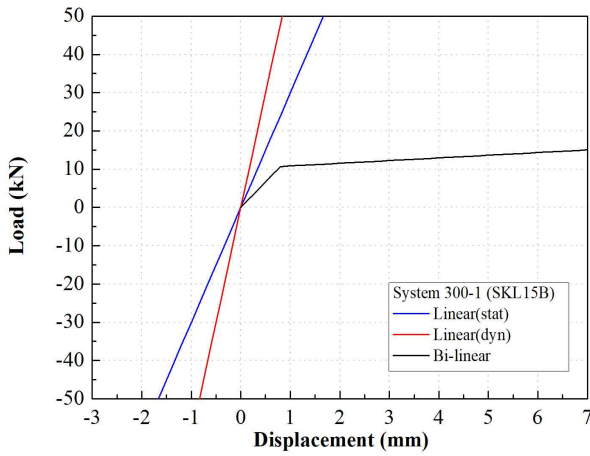
본 연구에서는 정/동적 작용력에 따라 압축력 및 상향력 검토 시 수직하방향(↓) 하중에 대해서는 레일체결장치의 정/동적 수직강성을 적용하고, 수직상방향(↑) 하중에 대해서는 레일체결장치의 거동(Bi-linear)특성을 적용하고자 한다.



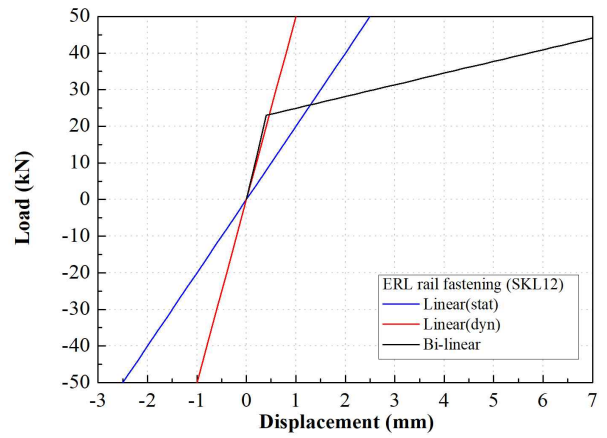
(a) Case 1 (KR형 레일체결장치)



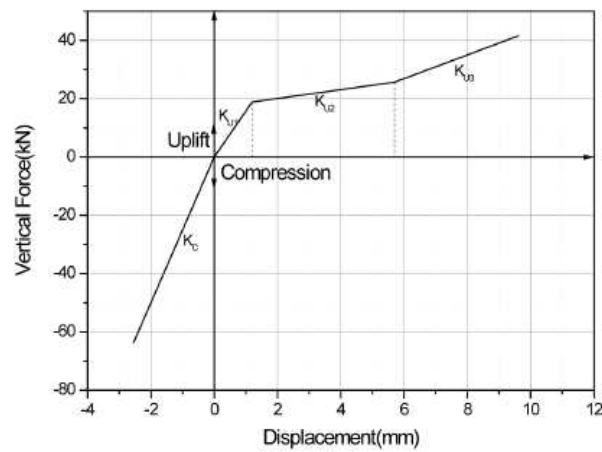
(b) Case 2 (System 300-1, SKL15)



(c) Case 3 (System 300-1, SKL15B)



(d) Case 4 (ERL, SKL12)



(e) SFC (Ref. Yang, 2017)

그림 24 실내시험 결과 분석 - 레일체결장치 비선형 거동 이상화

라. 주요 영향인자를 고려한 수치해석

콘크리트궤도가 부설된 철도교량에 대해서는 교량단부 사용성 검토를 위한 기준(DS 804, KR C-08090)이 제시되어 있으며, 기준을 만족하지 못하는 개소에 대해서는 고가의 종방향활동체결구 또는 횡단궤도시스템을 적용함으로써 추가 건설비가 발생하게 된다. 또한, 교량 단부 콘크리트궤도 사용성 검토 기준은 국외 설계기준을 준용하고 있으며, 검토과정이 복잡하고 어려워 설계 적용이 매우 제한적으로 이루어지고 있다. 따라서 본 절에서는 교량 단부 콘크리트궤도 사용성 검토를 위한 영향인자들에 대해서 유한요소해석프로그램인 SAP2000을 이용하여 해석적 방법으로 영향을 검토하였다.

(1) 국외기준(DS804) 비교를 통한 해석모델 검증

해석모델의 검증방법으로는 DS 804에서 제시한 LF3에 대한 지점반력과 모멘트와 SAP2000을 사용하여 계산된 지점반력과 모멘트를 비교함으로써 해석적 방법을 검증하였다.

(가) 검증 모델

콘크리트궤도가 부설된 교량의 해석적 모델링에 있어 고려되어야 할 요소로는 교량의 받침, 슬래브, 레일체결장치, 레일이 있으며, 교량의 거더는 하중을 직접 받는 레일에 비하여 상대적으로 강성이 크므로 교량의 상부 슬래브 없이 레일을 지지하는 지점으로 가정하였다. 레일 레일체결장치는 탄성스프링(선형 링크요소)으로 모델링하였으며, 해석에 사용된 레일은 DS 804에서 제시된 UIC 60을 사용하여 검토하였다. 레일의 단면 특성은 단면적 $A = 7.686 \times 10^3 \text{ mm}^2$, 단면2차모멘트 $I = 3.055 \times 10^7 \text{ mm}^4$, 레일의 탄성계수 $E = 210 \text{ GPa}$ 을 사용하였다. 검증을 위해 사용된 궤도 시스템에 이상화된 모델과 SAP2000으로 모델링한 궤도 시스템은 아래 그림과 같다. 레일은 빔요소로 모델링하였으며, 레일체결장치는 선형 링크 요소를 사용하였다. 각 지점에 대해서는 고정조건으로 가정하였다.

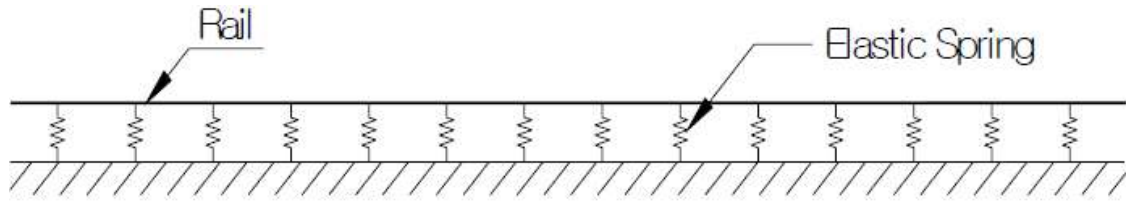


그림 25 해석에 사용된 궤도구조 요소

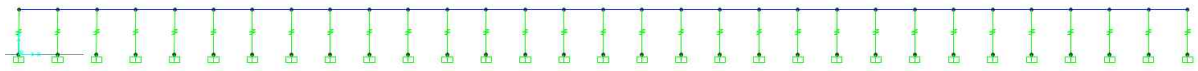


그림 26 SAP2000으로 모델링된 궤도시스템

(나) 레일체결장치에 대한 지지점 반력

콘크리트궤도가 부설된 교량의 해석적 모델링에 있어 고려되어야 할 요소로는 지점 및 레일체결장치에 작용하는 힘과 레일에서의 모멘트를 확인하기 위하여 LF3 단위하중 100kN을 레일 중앙부 지점 위에 적용하였으며, DS 804와 비교를 위해 침목간격 600mm에 대한 레일체결장치의 강성을 30 ~ 55kN/mm 까지 변화를 주어 해석을 수행하였다. 아래 그림은 레일체결장치의 강성 30kN/mm과 55kN/mm에 대한 지점반력을 나타내었으며, 각 레일체결장치 강성에 따른 최대 및 최소 반력을 아래 표에 나타내었다.

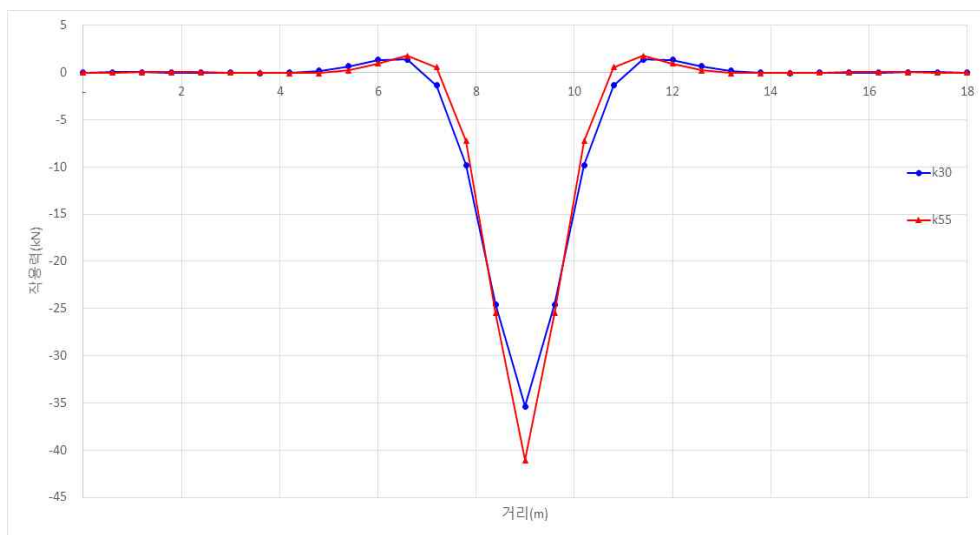


그림 27 LF3 하중에 대한 레일체결장치 강성에 따른 지점 반력(600mm)

표 13 레일체결장치 강성에 따른 지지점 최대 및 최소 반력(지지점 간격=600mm)

		레일체결장치 강성 (kN/mm)					
		30	35	40	45	50	55
최대반력 (kN)	SAP2000	-35.36	-36.74	-37.97	-39.09	-40.11	-41.06
	DS 804	-35.36	-36.74	-37.97	-39.09	-40.11	-41.06
최소반력 (kN)	SAP2000	1.35	1.52	1.63	1.69	1.73	1.74
	DS 804	1.53	1.55	1.63	1.69	1.73	1.74

상기 표에 알 수 있듯이 레일체결장치 강성 30kN/mm에서는 다소 차이가 있지만, 이후 35 ~ 55kN/mm 까지는 DS 804와 SAP2000에 의한 해석결과가 동일한 것을 볼 수 있다. 아래 그림에는 침목간격(지지점 간격)이 650mm에 대한 지지점 반력과 상향력을 나타내고 있다.

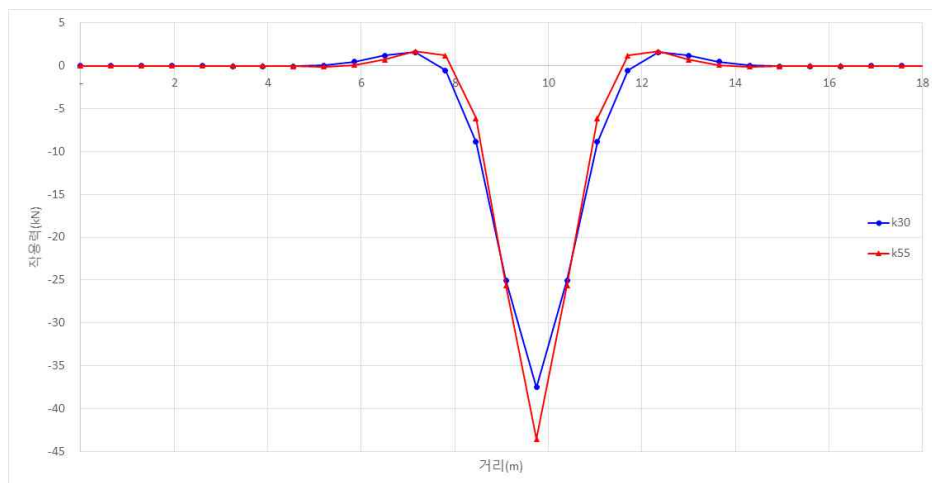


그림 28 LF3 하중에 대한 레일체결장치 강성에 따른 지점 반력(650mm)

표 14 레일체결장치 강성에 따른 지지점 최대 및 최소 반력(지지점 간격=650mm)

		레일체결장치 강성 (kN/mm)					
		30	35	40	45	50	55
최대반력 (kN)	SAP2000	-37.53	-38.98	-40.28	-41.46	-42.54	-43.54
	DS 804	-37.53	-38.98	-40.28	-41.46	-42.54	-43.54
최소반력 (kN)	SAP2000	1.59	1.69	1.73	1.74	1.73	1.70
	DS 804	1.59	1.69	1.73	1.74	1.81	1.89

상기 해석결과에서 보면, 지지점 최대 반력은 DS 804와 SAP2000 모델 결과가 동일하고, 최소 반력에 대해서는 레일체결장치 강성이 50kN/mm 이상일 때 차이를 보이고 있으나, 그 크기는 크지 않았다.

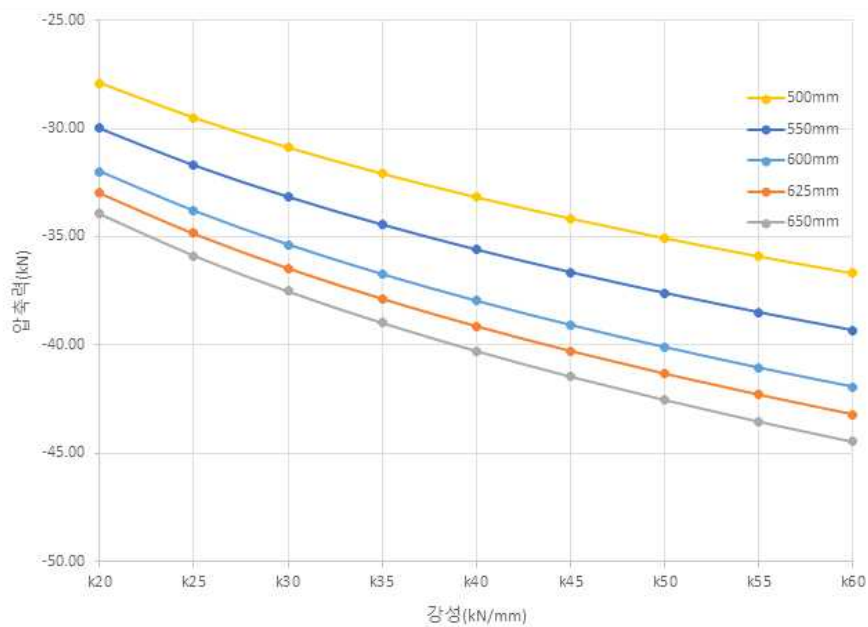


그림 29 지지점 간격과 레일체결장치 강성에 따른 지지점 반력

본 절에서 DS 804에서 제시된 선형 레일체결장치에 대한 모델과 SAP2000을 이용하여 해석적 방법으로 검증을 시도하였으며, 비교 결과 SAP2000을 이용한 해석에서도 충분히 타당한 결과를 얻을 수 있음을 확인하였고, 추후 수행할 실내시험에 대한 예비 해석을 위한 충분한 도구로 사용될 수 있음을 확인하였다.

(2) 레일체결장치 비선형 거동을 고려한 수치해석

(가) 개요

독일의 DS 804 철도구조물 설계기준에서는 콘크리트궤도를 부설하는 교량에서 수직하중을 비롯한 여러 환경요인에 의한 요인을 고려하여 레일체결장치에 작용하는 하중을 엄격하게 평가하도록 하고 있다. 국내의 KR C-08090에서도 마찬가지로 DS 804에 근간을 두고 있다. DS 804 및 KR C-08090에서는 레일체결장치의 들림 강성을 압축과 같은 강성을 사용하고 있으며, 콘크리트궤도 단부에서는 궤도에 작용하는 여러 하중에 의한 상판의 회전 및 수직 단차로 인한 레일체결장치에 큰 상향력이 작용하게 된다. 레일체결장치의 기준을 초과하는 상향력이 발생하는 경우에는 활동체결장치와 같은 고가의 레일체결장치 및 횡단궤도시스템을 도입해야 되며, 추가적인 건설비가 발생하게 된다.

따라서 본 연구에서는 레일체결장치에 대한 비선형 특성을 확인하기 위하여 레일체결장치의 체결력 시험으로부터 도출된 레일체결장치의 비선형 거동특성을 이용하여 DS 804에서의 지지점 구간 600mm의 레일체결장치 강성 40kN/mm에 해당하는 경우에 대하여 비선형 해석을 수행하였다.

비선형해석에 사용될 레일체결장치의 거동 특성은 레일체결장치의 체결력 시험 시 하중-변위 곡선을 이용하였으며, 아래 그림과 같다. 압축강성에 대해서는 DS 804에 제시된 40kN/mm를 사용하였다.

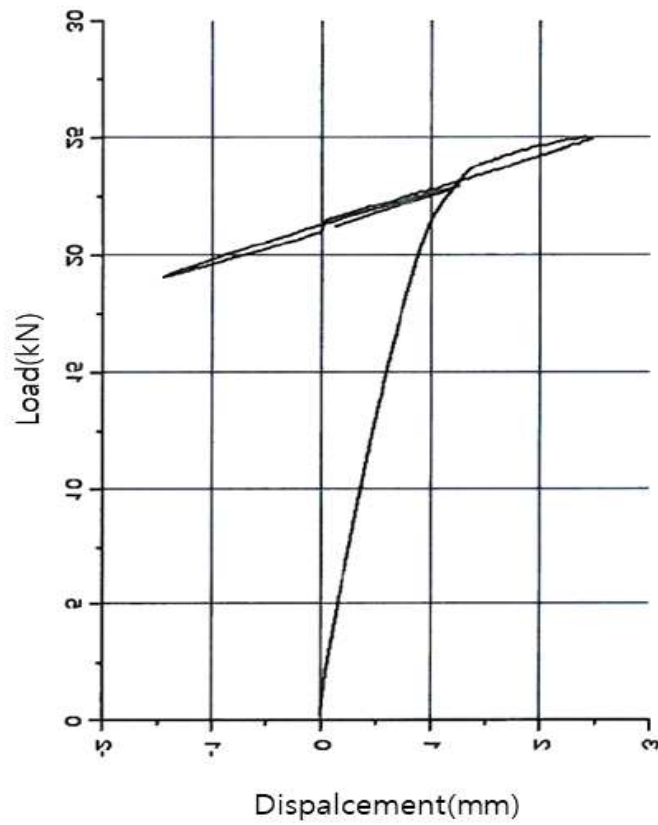


그림 30 레일체결장치 체결력 시험 시 하중-변위 곡선

(나) 수치해석 결과

아래 그림은 레일체결장치를 선형, 비선형으로 고려했을 때 레일에서 발생하는 압축과 인장력에 대한 해석결과를 나타낸다.

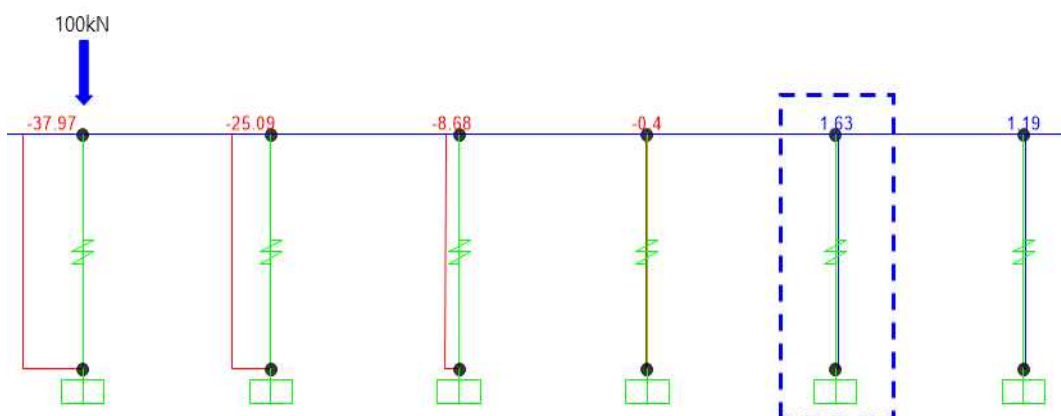


그림 31 레일체결장치의 강성을 선형으로 고려할 경우 발생 압축과 인장력
(압축, 인장 강성: 40kN/mm)

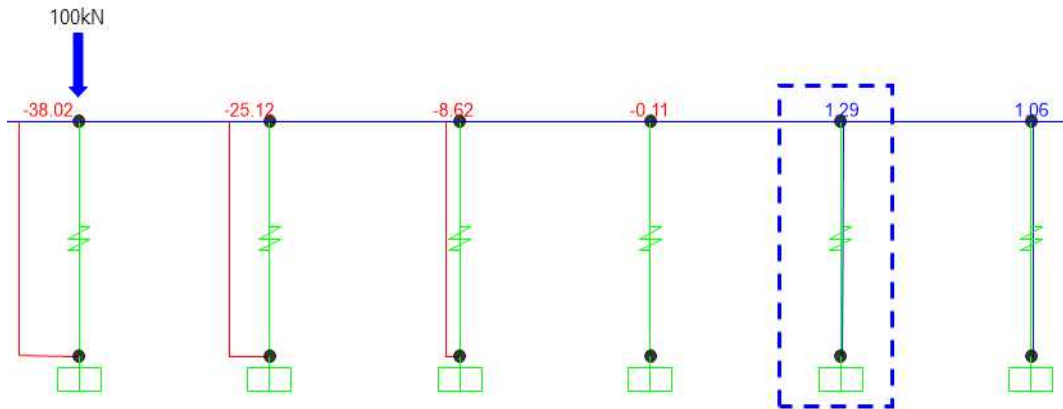


그림 32 레일체결장치의 강성을 비선형으로 고려할 경우 발생 압축과 인장력
(압축강성 : 40kN/mm, 인장강성 : 비선형성 고려)

단위하중 100kN에 대하여 레일체결장치의 강성을 선형으로 고려할 경우, 작용하는 압축력은 37.97kN이었으며, 비선형으로 고려 시 압축력은 38.02kN으로 약 0.1%의 미소한 변화가 있었지만, 상향력에 대해서는 선형으로 고려할 경우 최대 상향력은 1.63kN, 비선형으로 고려할 경우 1.29kN으로 약 20% 감소하는 것을 볼 수 있다.

레일체결장치의 강성을 비선형으로 고려할 경우, 1mm 이하 변위에서의 강성은 약 24kN/mm으로 선형 강성 40kN/mm과 비교하여 40% 강성 저감에 따른 비선형 레일체결장치의 최대 상향력은 약 20% 감소하는 관계를 볼 수 있다.

즉, 레일체결장치의 거동을 선형 강성 모델로 사용할 경우 보수적인 레일체결장치를 설계할 수 있으나, 상대적으로 비선형 강성 모델 보다 기준을 상회할 수 있으며, 이는 공사비 증가의 원인이 될 수 있다. 따라서 각 레일체결장치 종류에 따른 정밀한 연직강성시험을 통하여 레일체결장치의 비선형거동 특성을 고려할 필요가 있으며, 이를 통해 철도교량 단부 콘크리트궤도 사용성 검토가 보다 합리적인 설계로 이어질 수 있을 것으로 판단된다.

(3) 주요 영향인자를 고려한 수치해석

본 절에서는 2차년도에 수행 예정인 실내 모형시험(거더시험체)을 위한 예비해석을 통해 주요 영향인자(신축구간 이격거리, 교량받침 위치)에 대한 분석을 수행하였다. 실내 모형시험 해석모델은 유한요소해석 프로그램인 SAP2000을 사용하였다.

(가) 시험체 구성

실내 모형시험체의 구성은 아래 표와 같으며, 상부구조 형상은 아래 그림에 나타내었다. 실내 모형시험체는 H형강과 콘크리트슬래브를 이용하여 교량 거더 형상을 모사하였으며, 상판 위에 TCL을 설치하여 모형시험체가 구성되었다.

표 15 실내 모형시험체 제원

주요부품	제원
레일	UIC60(60EI)
레일체결시스템	KR형 레일체결장치($K_{sta}=30\text{kN/mm}$)
침목	Bi-block(KR형)
H-Beam	H-Beam($300 \times 300 \times 10 \times 15$), 연장 : 5.5m
강종	SM490
콘크리트	$f_{ck}=45\text{MPa}$

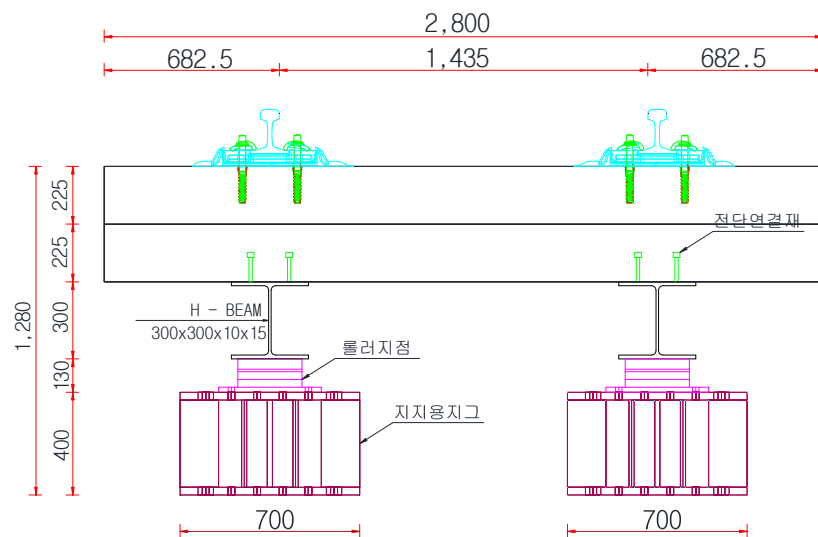


그림 33 실내 모형시험체 단면 형상

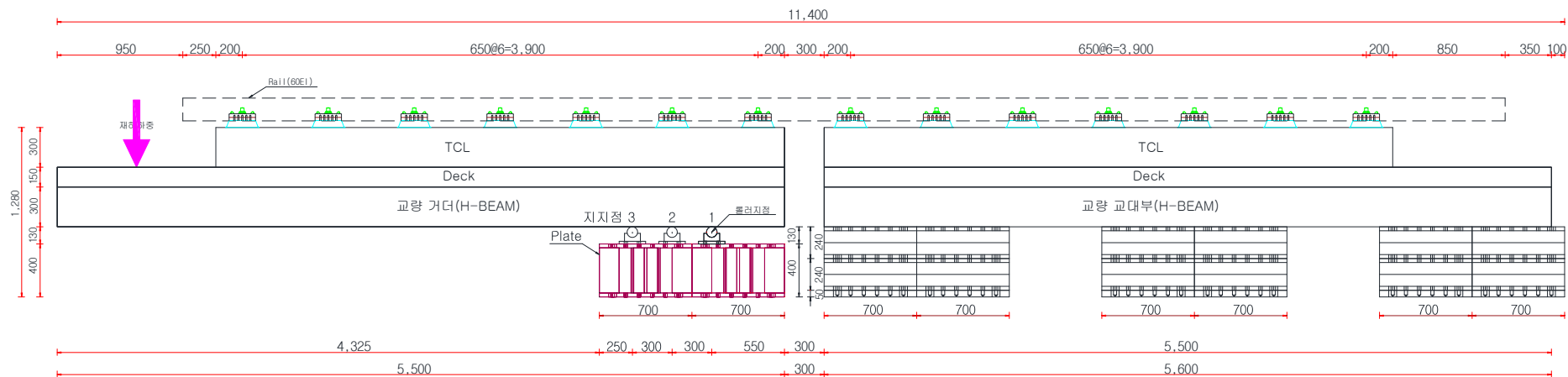


그림 34 실내 모형시험체 종단면 형상(교대부)

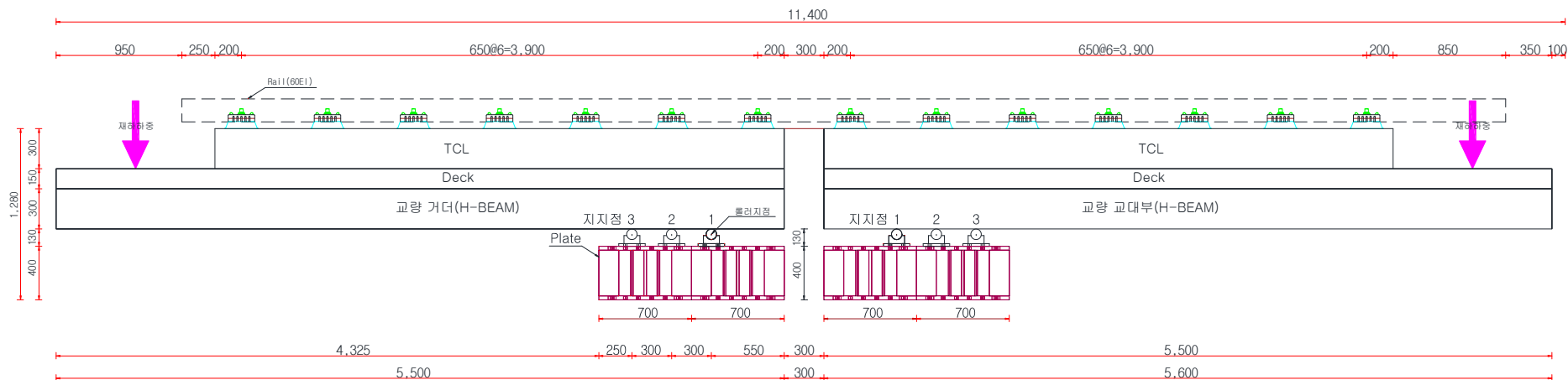


그림 35 실내 모형시험체 종단면 형상(교각부)

(나) 합성거더 모델 검증

본 해석에 앞서 H형강과 콘크리트 재료의 합성거더에 대한 검증을 수행한 후에 본 해석을 수행하였다. SAP2000을 이용한 합성거더 모델 검증은 아래 그림과 같은 합성거더 형상을 사용하여 모델링 하였다.

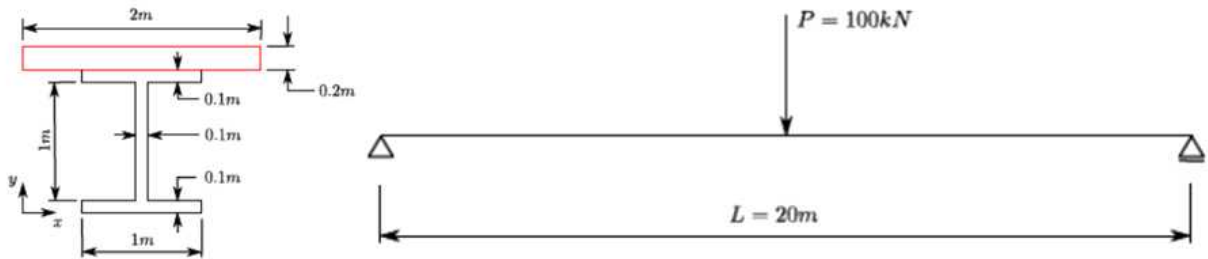


그림 36 합성거더 검증 모델

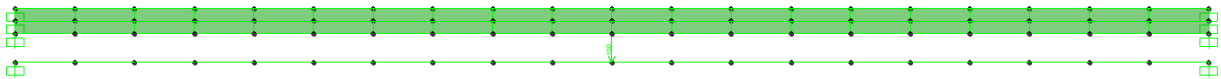


그림 37 합성거더 모델링 (SAP2000)

이론식으로 계산된 합성거더의 처짐은 다음 식과 같이 계산되었으며, 최대 처짐은 0.8097mm가 발생하였으며, SAP2000에 의한 해석결과 중앙에서의 최대 변위는 0.8313mm 발생하는 것으로 나타났다. 즉, 합성거더에 대한 해석모델 검증을 완료하였다.

$$A_{\text{girder}} := (1\text{m}) \cdot (1.2\text{m}) - (0.9\text{m}) \cdot (1\text{m}) = 0.3\text{m}^2$$

$$I_{\text{girder}} := \frac{1}{12}(1\text{m}) \cdot (1.2\text{m})^3 - \frac{1}{12}(0.9\text{m}) \cdot (1\text{m})^3 = 0.069\text{m}^4$$

$$y_{\text{cg_girder}} := 0.6\text{m}$$

$$A_{\text{deck}} := (0.2\text{m})(2\text{m}) = 0.4\text{m}^2$$

$$I_{\text{deck}} := \frac{1}{12}(2\text{m})(0.2\text{m})^3 = 1.333 \times 10^{-3}\text{m}^4$$

$$y_{\text{cg_deck}} := 1.3\text{m}$$

$$y_{\text{cg_composite}} := \frac{y_{\text{cg_girder}} \cdot A_{\text{girder}}^2 + y_{\text{cg_deck}} \cdot A_{\text{deck}}^2}{A_{\text{girder}}^2 + A_{\text{deck}}^2} = 1.048\text{m}$$

$$I_{\text{composite}} := I_{\text{girder}} + I_{\text{deck}} + A_{\text{girder}} \cdot (y_{\text{cg_composite}} - y_{\text{cg_girder}})^2 + A_{\text{deck}} \cdot (y_{\text{cg_composite}} - y_{\text{cg_deck}})^2 = 0.156 \text{ m}^4$$

$$A_{\text{composite}} := A_{\text{girder}} + A_{\text{deck}} = 0.7 \text{ m}^2$$

$$E := 33 \text{ GPa}$$

$$P := 100 \text{ kN}$$

$$\text{Length} := 20 \text{ m}$$

$$\Delta := \frac{P \cdot \text{Length}^3}{192 \cdot E \cdot I_{\text{composite}}} = 8.097 \times 10^{-4} \text{ m}$$

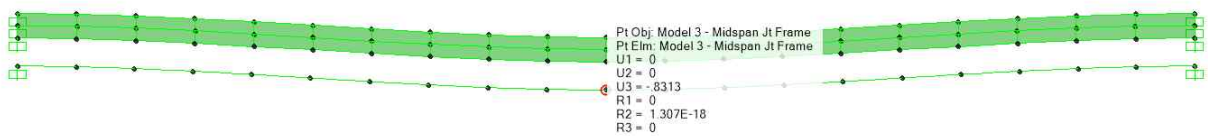


그림 38 SAP2000을 이용한 해석결과 - 거더 최대 변위

(다) 주요 영향인자에 의한 해석적 검토

① 실내 모형시험 해석모델

실내 모형시험체에 대한 해석을 위해 유한요소해석 프로그램인 SAP2000을 사용하여 아래 그림과 같이 모델링하였다. 해석모델의 우측은 교대를 모사하였고, 각 노드 절점의 경계조건은 고정으로 하였다. 좌측 교량구간은 단부에서 힌지조건을 주었으며, 실내 모형시험 시 하중재하(로드셀)에 의해 가진되는 부분에 변위하중 조건을 지정하였다.

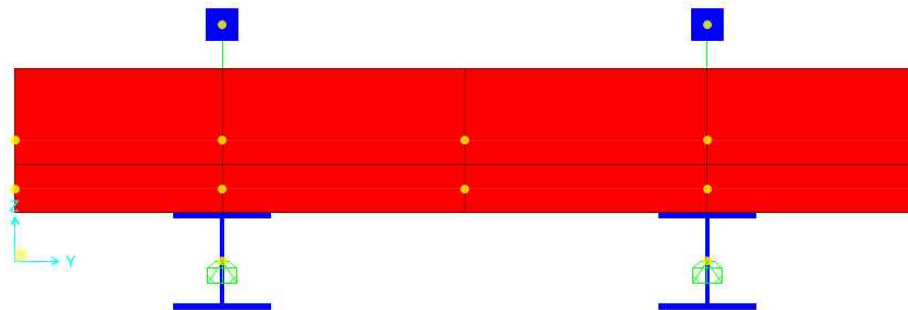


그림 39 실내 모형시험체 해석모델 - 횡단면

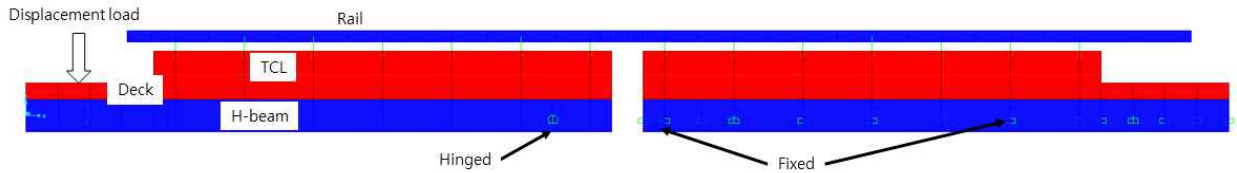


그림 40 실내 모형시험 해석모델 종단면(교대부)

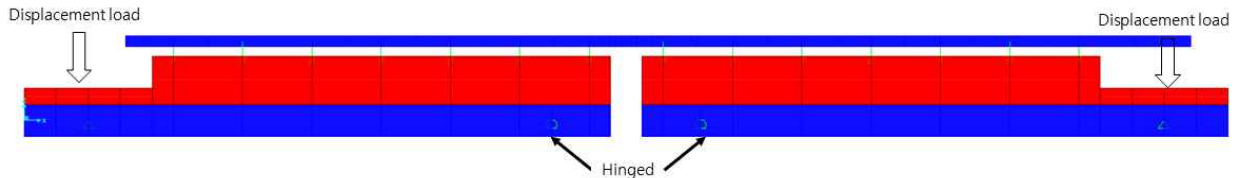


그림 41 실내 모형시험 해석모델 종단면(교각부)

실내 모형시험 해석모델에 대하여 아래 표의 해석 case에 따라 신축구간 이격거리의 영향, 교량받침 위치에 따른 레일체결장치에 작용하는 힘에 대하여 해석을 수행하였다. Case 1 ~ Case 4의 경우, 변위하중을 10 ~ 90mm 까지 증가시켰으며, 해석 후 레일체결 장치의 변위, 레일체결장치에 작용하는 힘, 레일 변위와 거더 변위를 확인하였다. Case 5 ~ Case 8의 경우, 왼쪽에 90mm의 변위하중을 준 상태에서 오른쪽 거더에 변위하중을 10 ~ 90mm 까지 증가시켜가며 결과를 확인하였다. 해석 후 레일체결장치의 변위, 레일 체결장치에 작용하는 힘, 레일 및 거더 변위를 확인하였다.

표 16 실내 모형시험 해석 case

구 분	신축구간 이격거리 (mm)	교량받침위치	패드강성	비고
Case 1	300	1번째 레일지지점 직하부 (p01)	29.97 kN/mm	교대부
Case 2	300	3번째 레일지지점 직하부 (p03)	29.97 kN/mm	
Case 3	900	1번째 레일지지점 직하부 (p01)	29.97 kN/mm	
Case 4	900	3번째 레일지지점 직하부 (p03)	29.97 kN/mm	
Case 5	300	1번째 레일지지점 직하부 (p01)	29.97 kN/mm	교각부
Case 6	300	3번째 레일지지점 직하부 (p03)	29.97 kN/mm	
Case 7	900	1번째 레일지지점 직하부 (p01)	29.97 kN/mm	
Case 8	900	3번째 레일지지점 직하부 (p03)	29.97 kN/mm	

② 교대부 해석결과

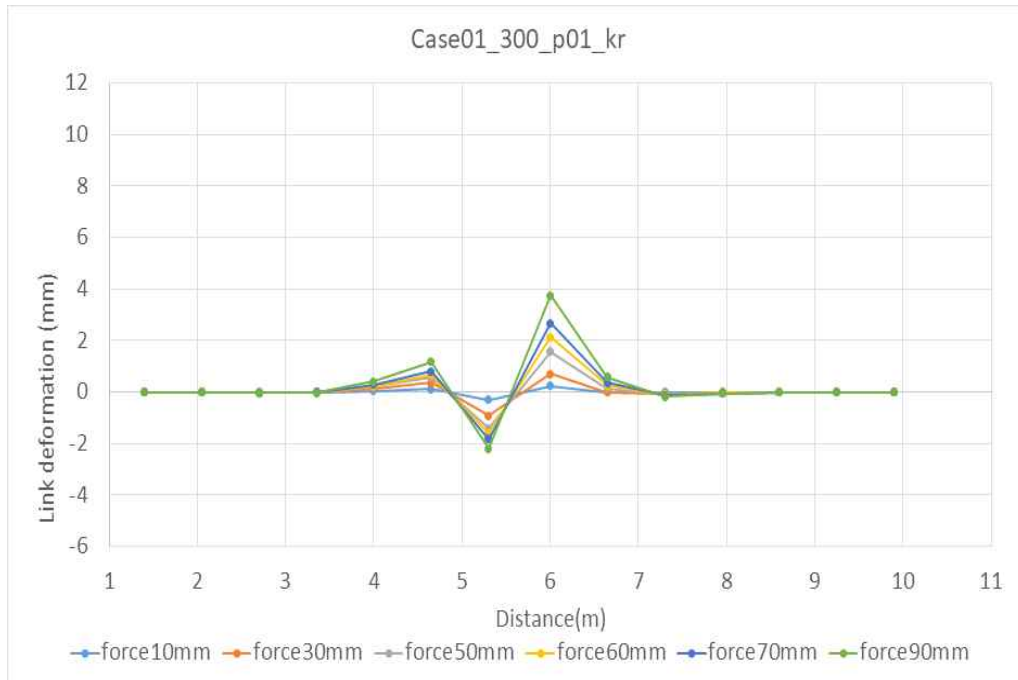


그림 42 레일체결장치 변위 (Case 1)

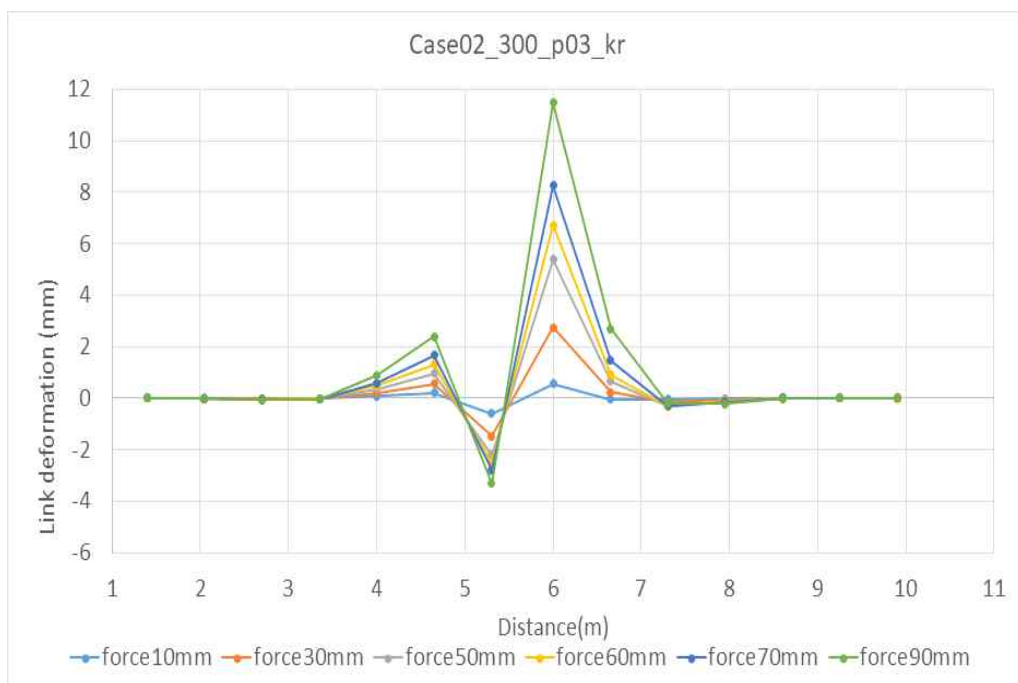


그림 43 레일체결장치 변위 (Case 2)

상기 그림에서와 같이 신축이격거리 300mm 조건에서 교량받침의 위치를 p01에서 p03으로 이동하였을 경우, 레일패드에 작용하는 압축력과 레일체결장치에 작용하는 상향력이 증가하는 것을 확인할 수 있다.

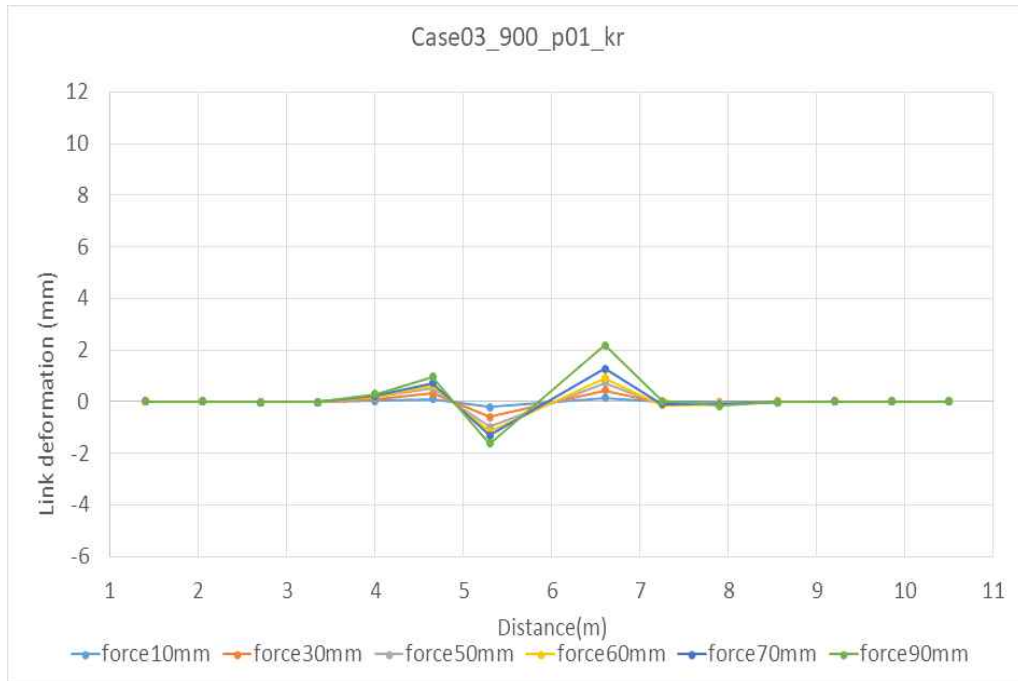


그림 44 레일체결장치 변위 (Case 3)

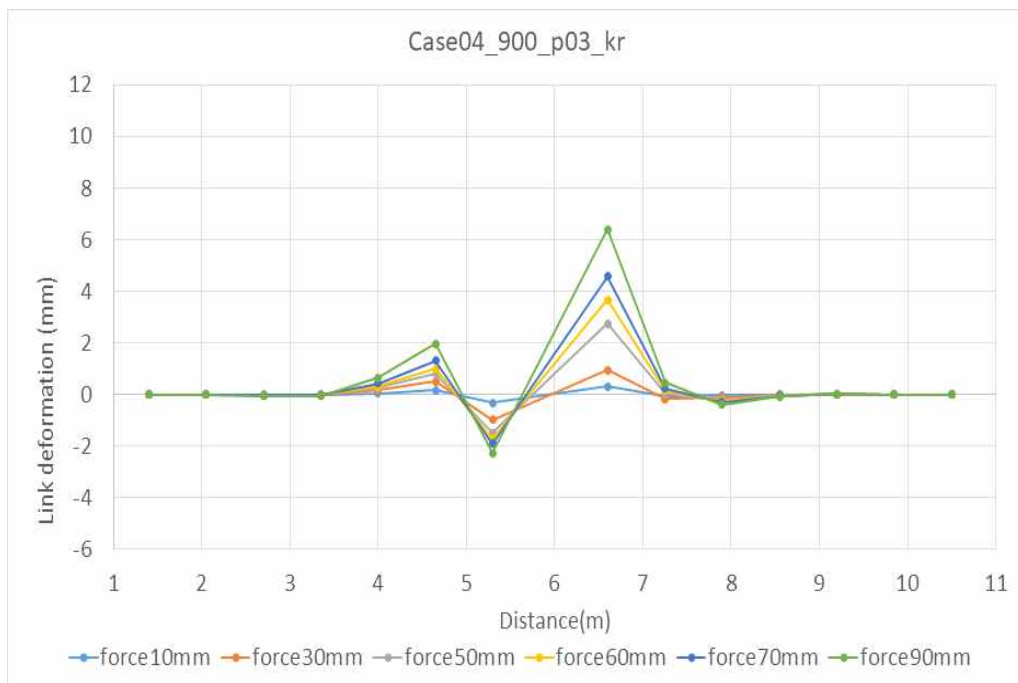


그림 45 레일체결장치 변위 (Case 4)

상기 그림에서와 같이 신축이격거리 900mm 조건에서 교량받침의 위치를 p01에서 p03으로 이동하였을 경우에서도, 레일패드에 작용하는 압축력과 레일체결장치에 작용하는 상향력이 증가하는 것을 확인할 수 있다.

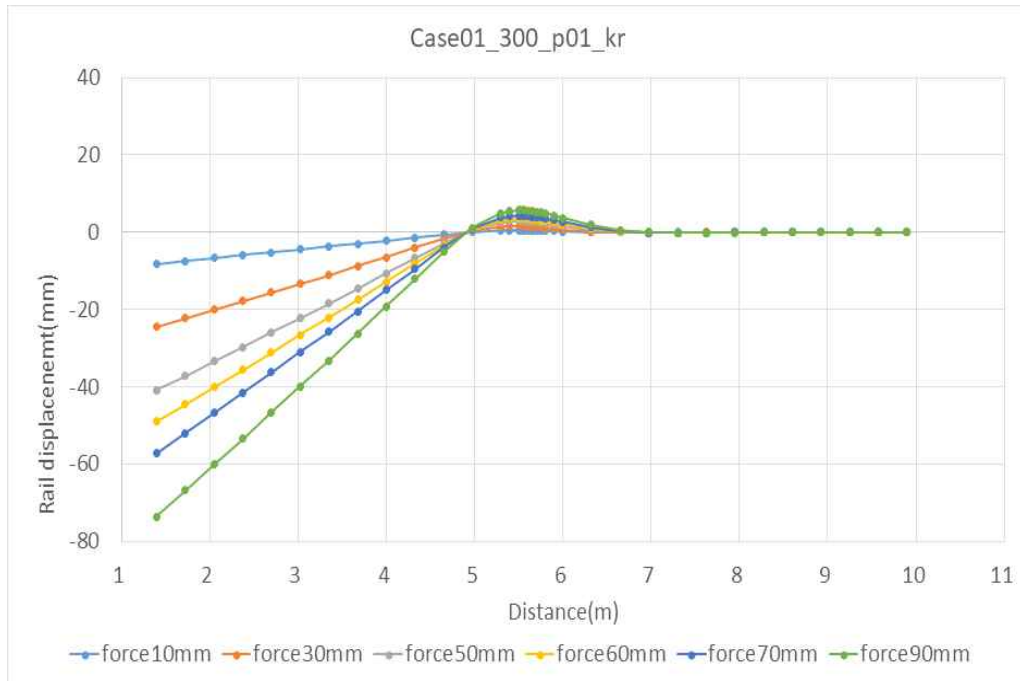


그림 46 레일 변위 (Case 1)

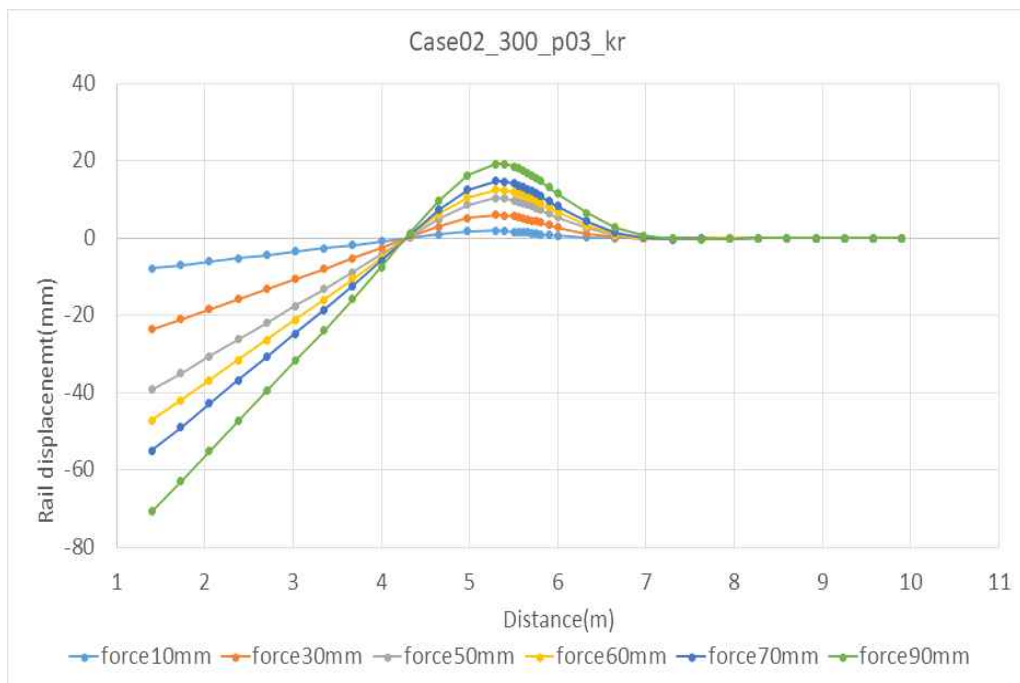


그림 47 레일 변위 (Case 2)

상기 그림에서와 같이 신축이격거리 300mm 조건에서 교량받침의 위치를 p01에서 p03으로 이동하였을 경우에 레일의 절대 변위가 증가하는 것을 확인할 수 있다.

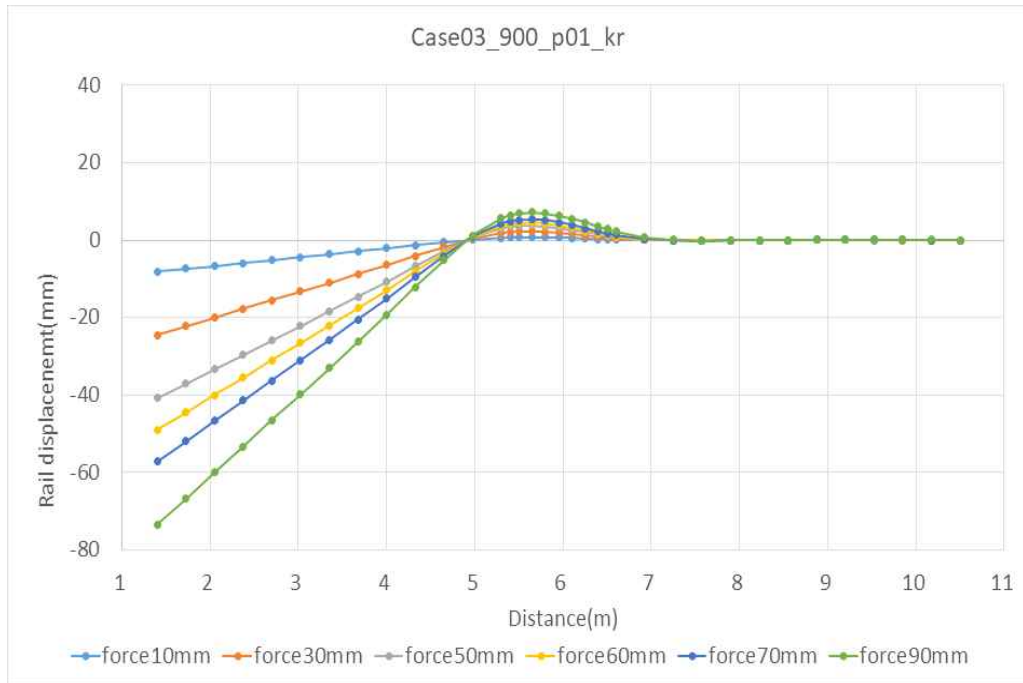


그림 48 레일 변위 (Case 3)

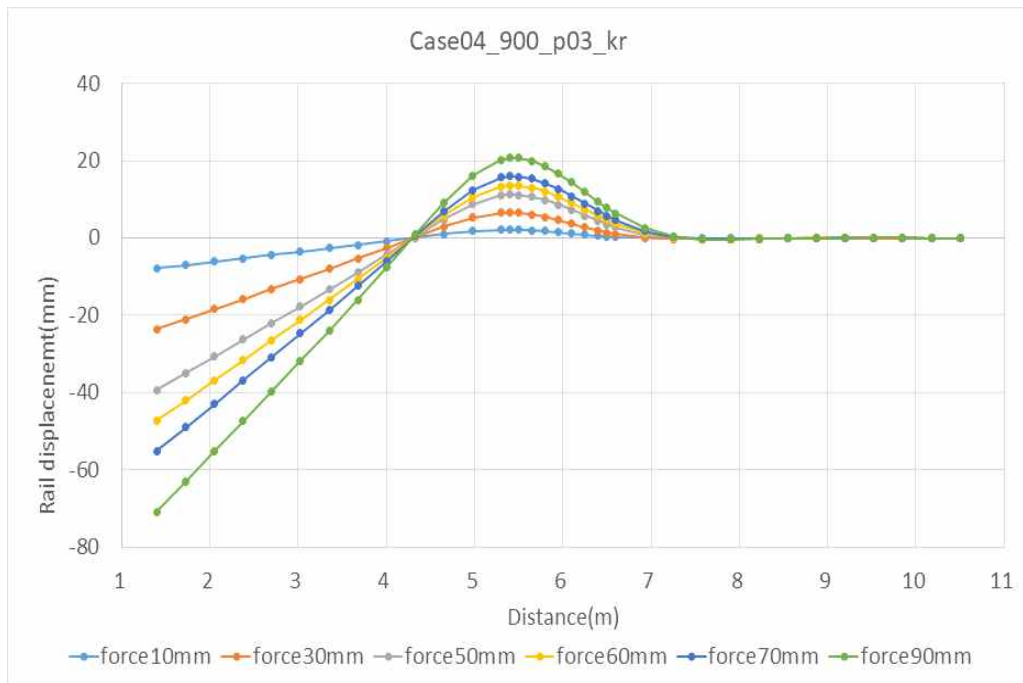


그림 49 레일 변위 (Case 4)

상기 그림에서와 같이 신축이격거리 900mm 조건에서 교량받침의 위치를 p01에서 p03으로 이동하였을 경우에도 레일의 절대 변위가 증가하는 것을 확인할 수 있다.

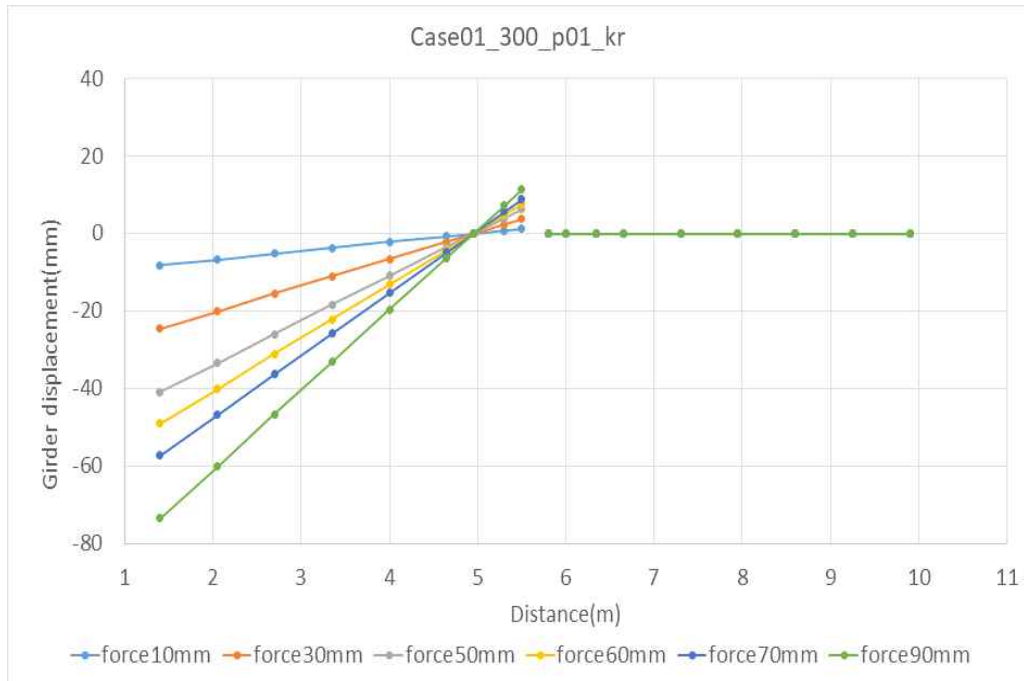


그림 50 거더 변위 (Case 1)

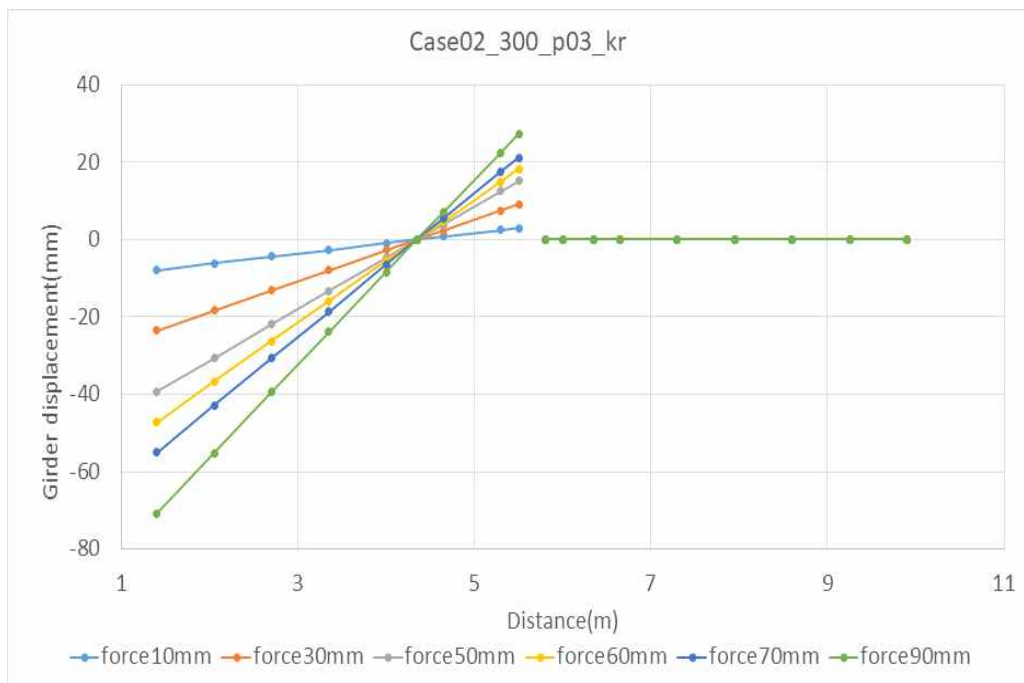


그림 51 거더 변위 (Case 2)

상기 그림에서와 같이 신축이격거리 300mm 조건에서 교량받침의 위치를 p01에서 p03으로 이동하였을 경우 힌지점의 이동으로 같은 조건의 변위하중에 대하여 거더의 변위가 증가하는 것을 확인할 수 있다.

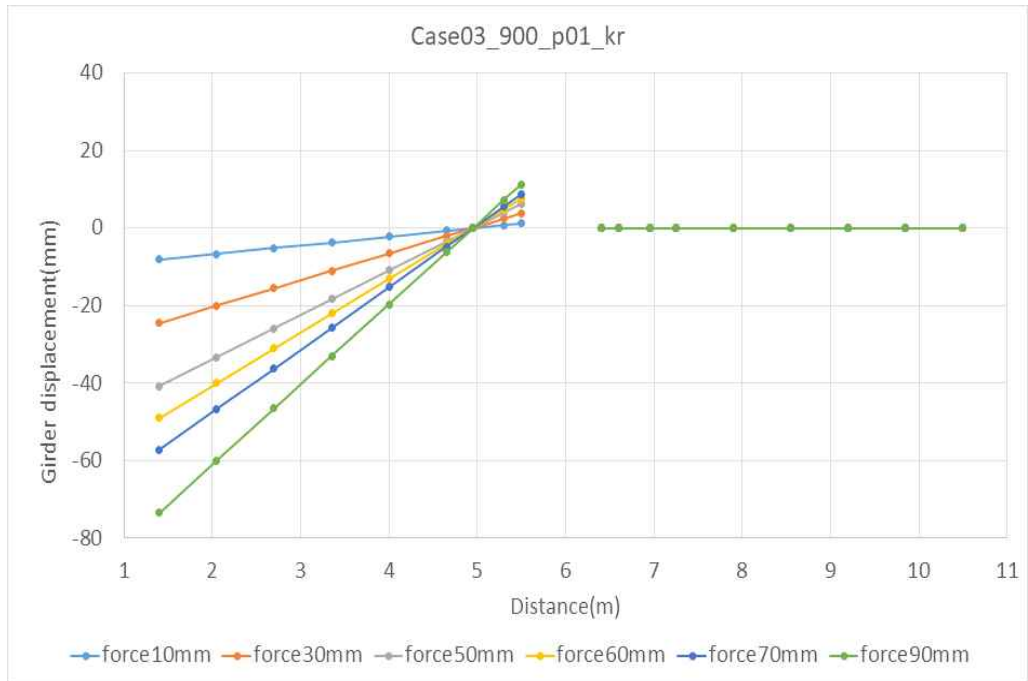


그림 52 거더 변위 (Case 3)

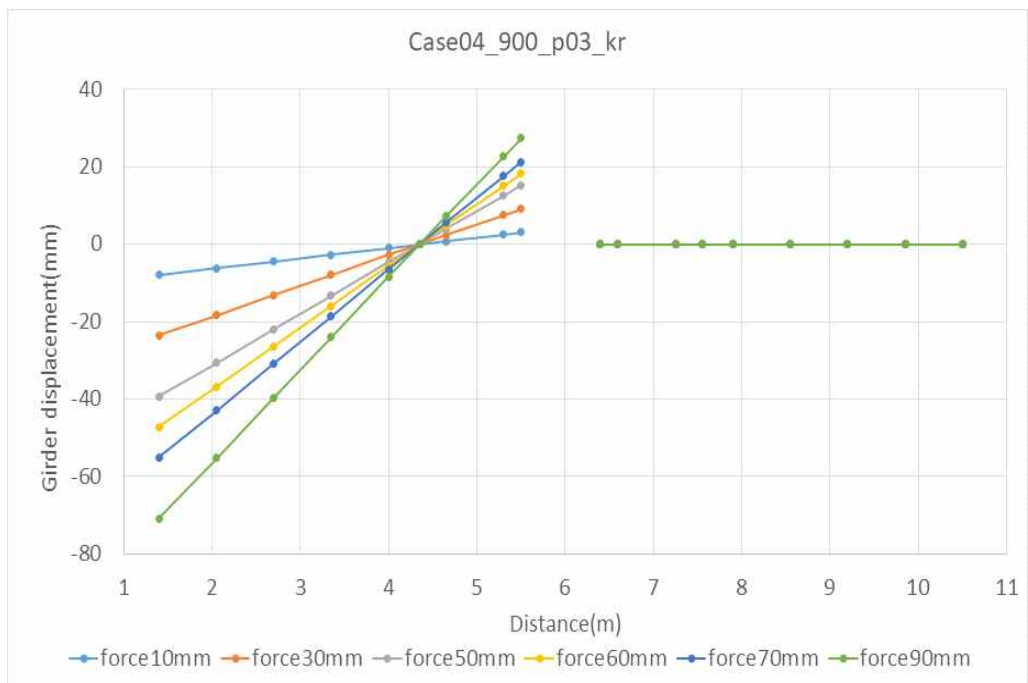


그림 53 거더 변위 (Case 4)

상기 그림에서와 같이 신축이격거리 900mm 조건에서 교량받침의 위치를 p01에서 p03으로 이동하였을 경우에도 거더의 변위가 증가하는 것을 확인할 수 있다.

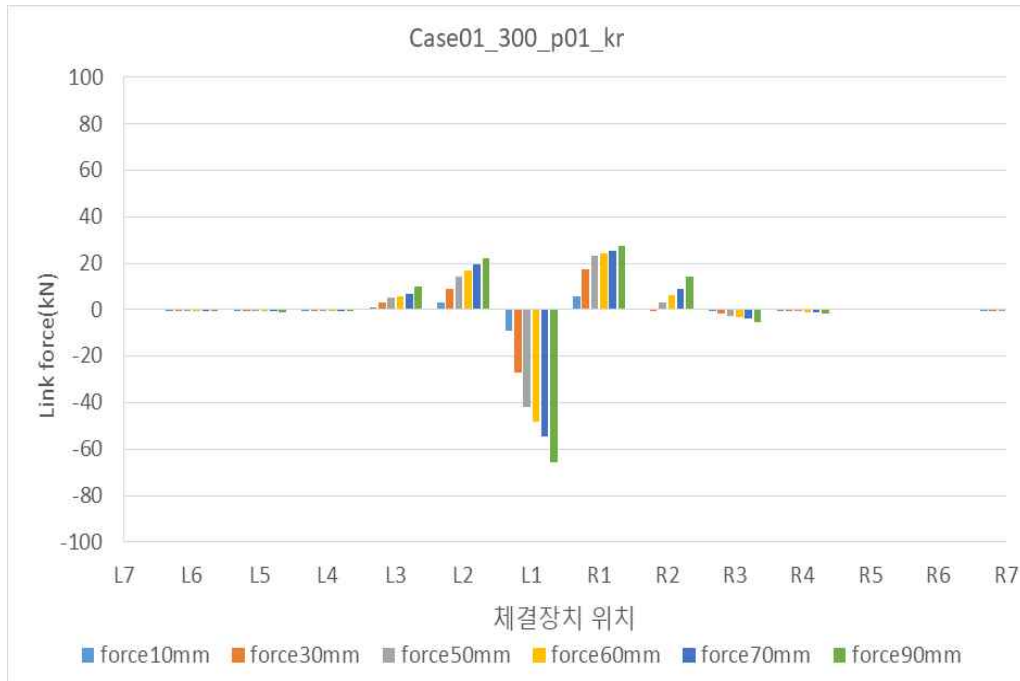


그림 54 레일체결장치에 작용하는 힘 (Case 1)

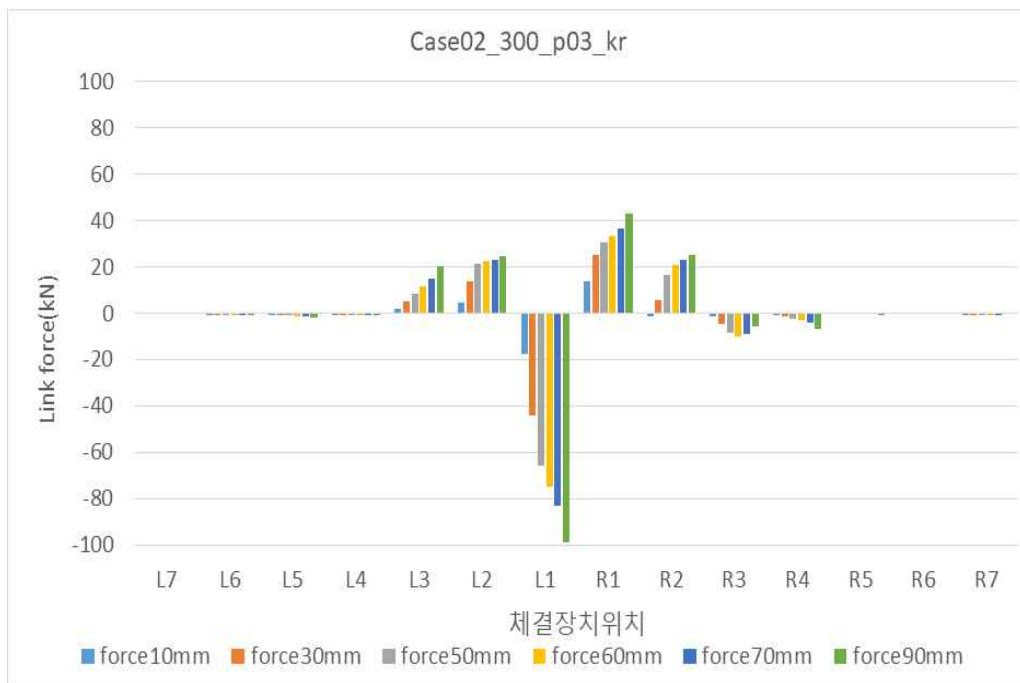


그림 55 레일체결장치에 작용하는 힘 (Case 2)

상기 그림에서와 같이 레일체결장치에 작용하는 힘은 교량받침의 위치를 p01에서 p03으로 이동하였을 경우에 압축력과 상향력 모두 커지는 것으로 확인되었다.

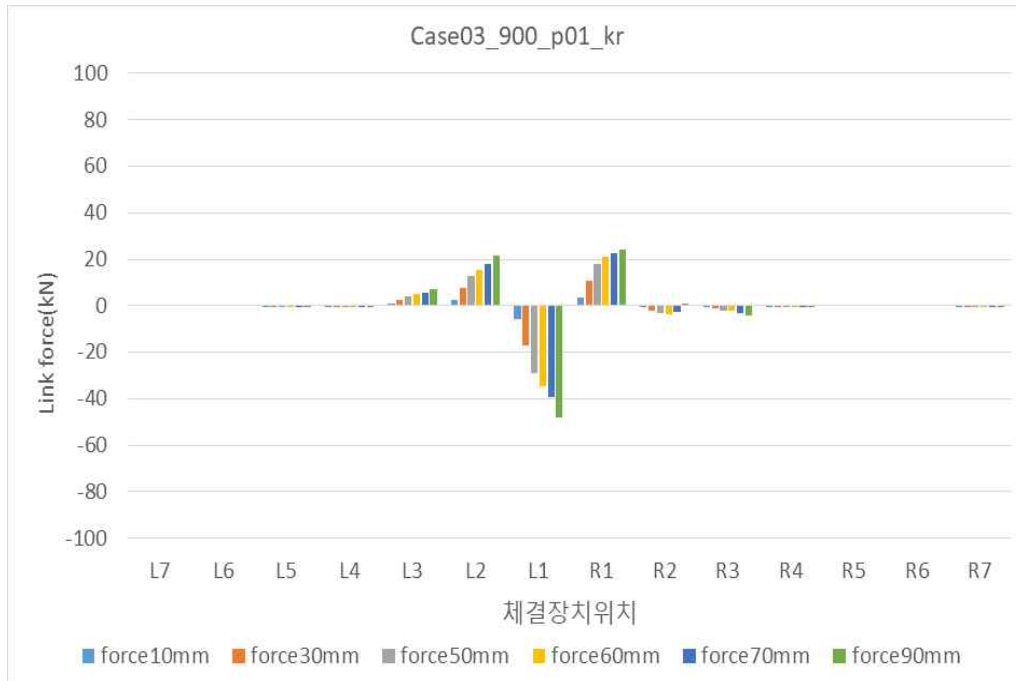


그림 56 레일체결장치에 작용하는 힘 (Case 3)

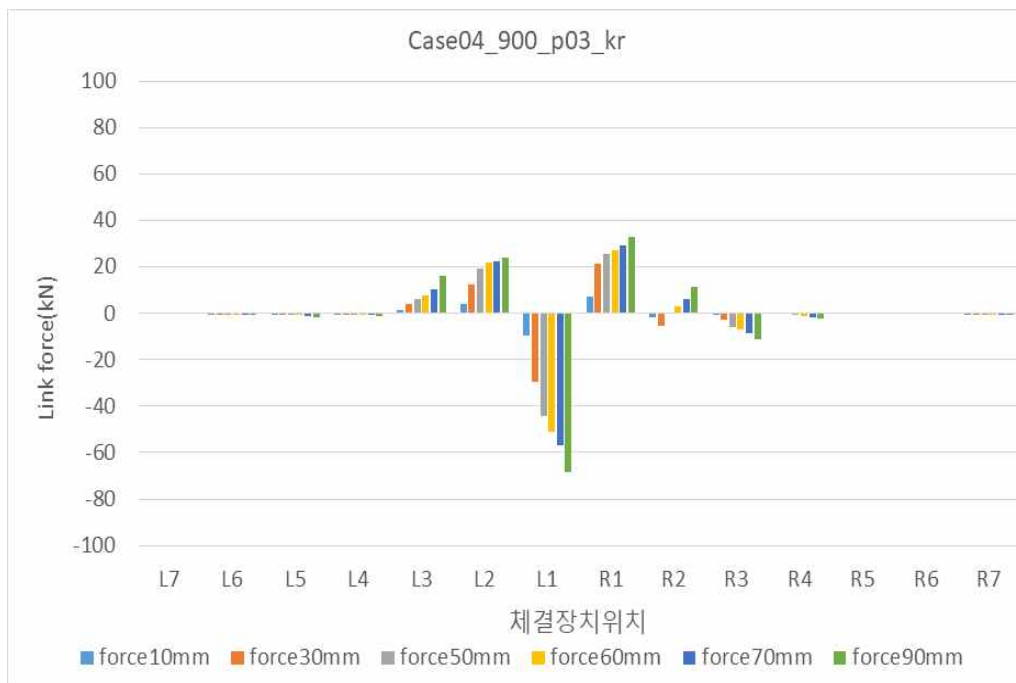


그림 57 레일체결장치에 작용하는 힘 (Case 4)

상기 그림에서와 같이 Case 3과 Case 4에서도 교량받침의 위치를 p01에서 p03으로 이동하였을 경우에 압축력과 상향력 모두 증가하는 것으로 확인되었다.

따라서 신축이격거리 300mm를 기준으로 교량받침의 위치를 p01에서 p03으로 옮길 경우, 동일 조건의 변위 하중일 때 교량받침과 교량상판 단부의 길이가 길어지므로 레일체결장치에 작용하는 힘은 커지는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 신축이격거리 900mm를 기준으로 했을 때도 같은 경향을 나타냈다.

하지만, 교량받침의 위치를 기준으로 하여 신축이격거리를 300mm에서 900mm로 늘린 경우, 우측거더(교대부) 첫 번째 레일체결장치에서 발생하는 변위와 작용력은 다소 감소하는 경향을 보였다. 이러한 결과는 좌측거더의 마지막 레일체결장치와 우측거더(교대부)의 첫 번째 레일체결장치의 이격거리가 각각 0.7m, 1.3m로, 좌측거더의 회전변위로 인한 우측거더(교대부) 첫 번째 레일체결장치에 작용하는 힘(레일들림, 상향력)이 신축이격거리 300mm일 때가 크기 때문이다.

③ 교각부 해석결과

교각부 해석결과에서도 교대부와 동일 조건의 신축이격거리 및 교량받침위치 조건에 대해서 해석을 수행하였다.

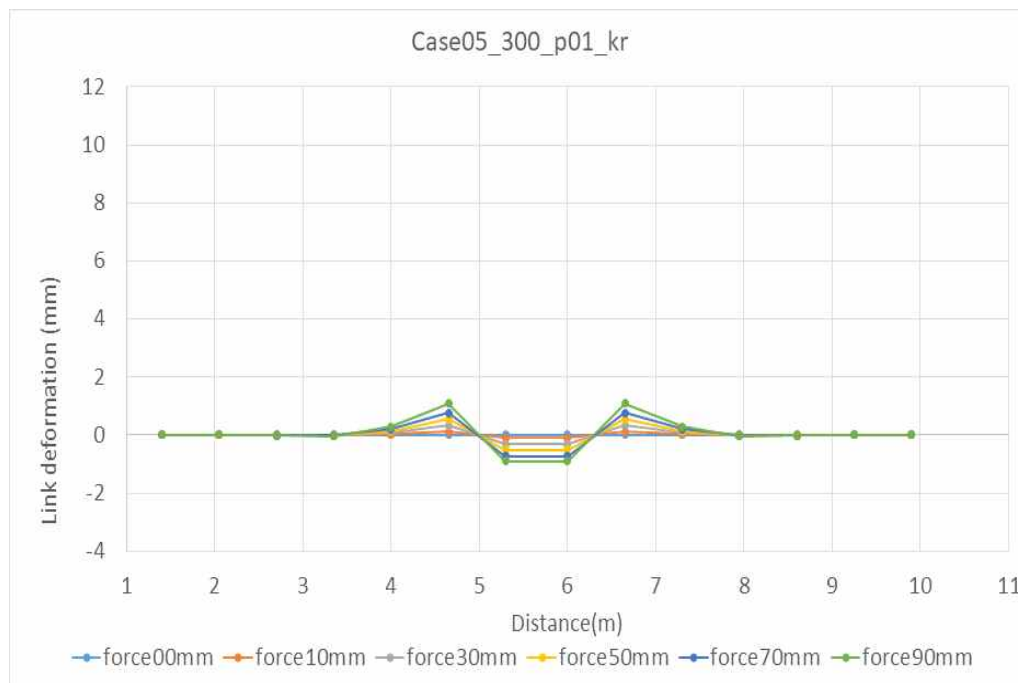


그림 58 레일체결장치 변위 (Case 5)

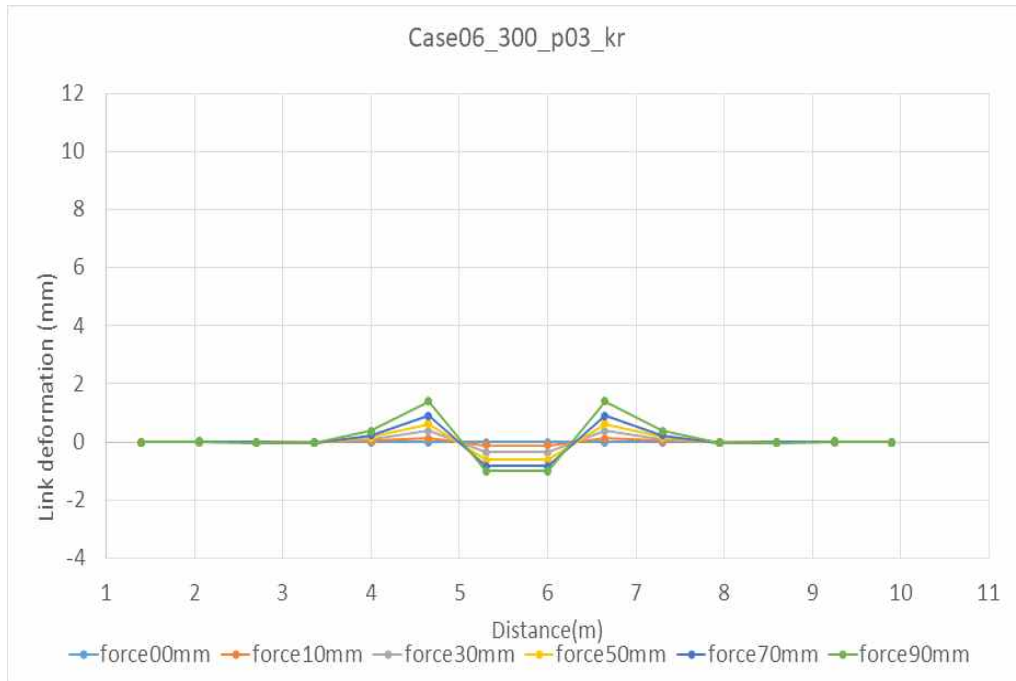


그림 59 레일체결장치 변위 (Case 6)

상기 그림에서와 같이 신축이격거리 300mm 조건에서 교량받침의 위치를 p01에서 p03으로 이동하였을 경우, 레일패드의 압축력과 레일체결장치의 상향력이 증가하는 것을 확인할 수 있다.

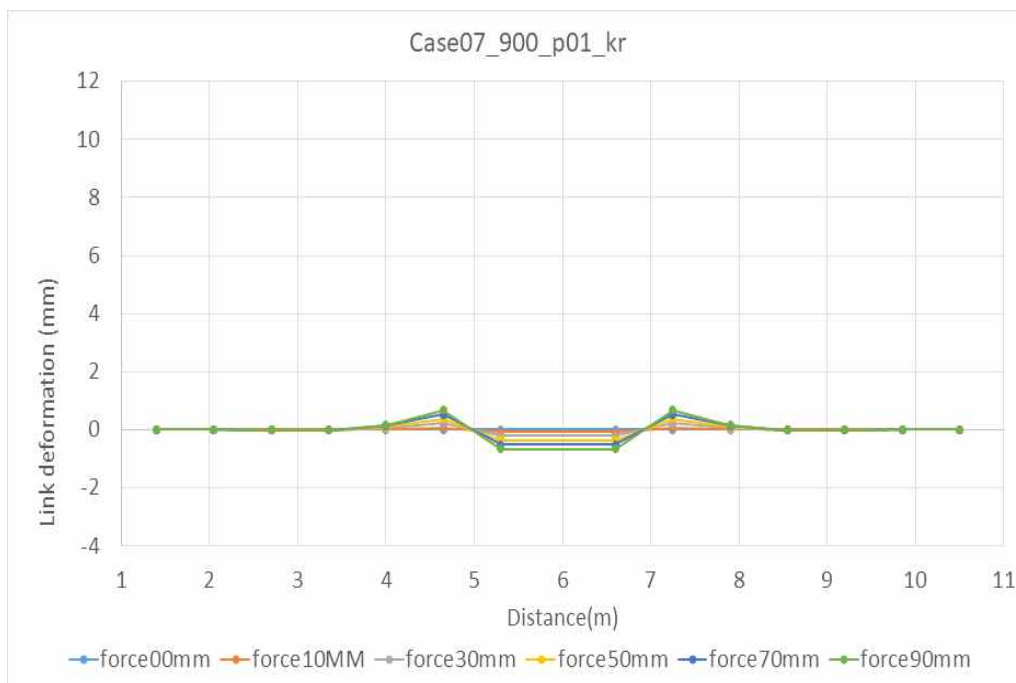


그림 60 레일체결장치 변위 (Case 7)

상기 그림에서와 같이 신축이음 간격 900mm에서도 교량받침의 위치를 p01에서 p03으로 이동하였을 경우에 압축력과 상향력 모두 커지는 것으로 확인되었다.

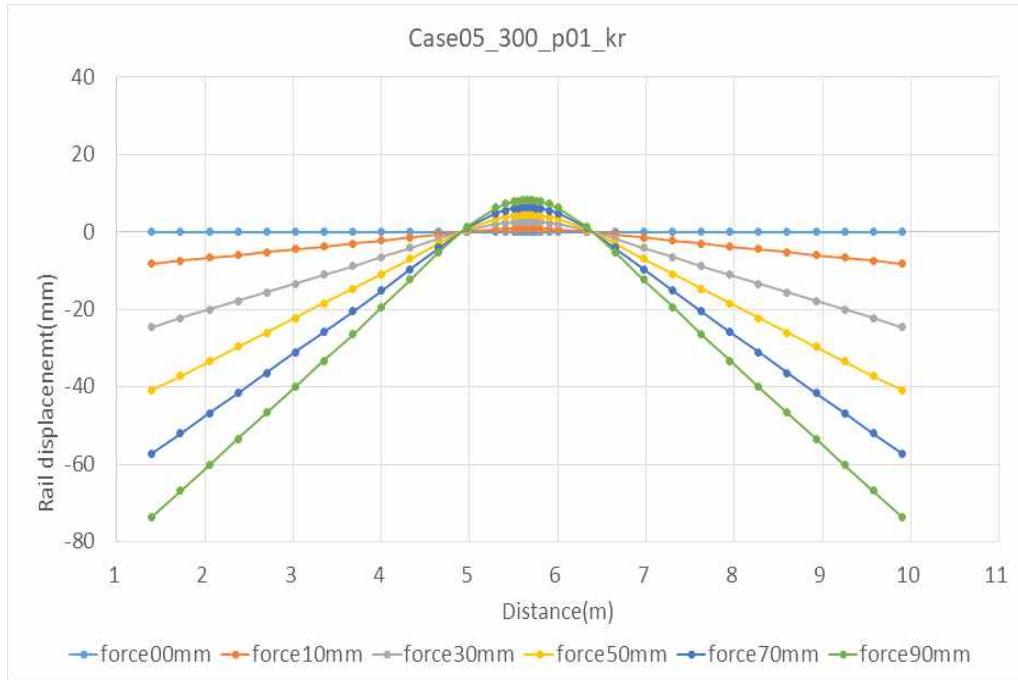


그림 61 레일 변위 (Case 5)

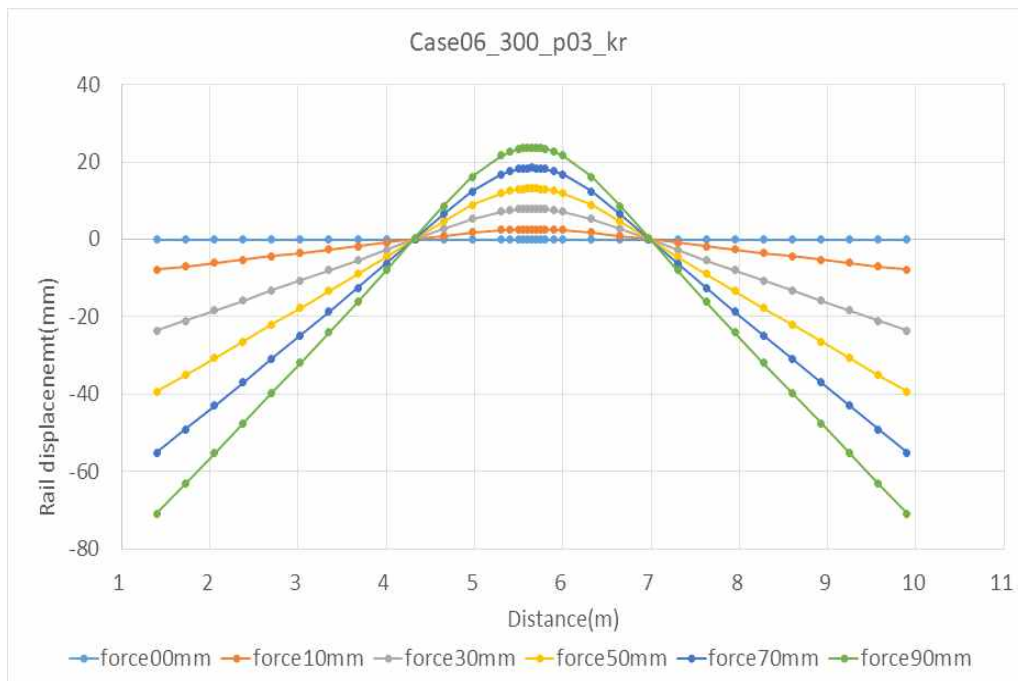


그림 62 레일 변위 (Case 6)

상기 그림에서와 같이 신축이격거리 300mm 조건에서 교량받침의 위치를 p01에서 p03으로 이동하였을 경우에 레일의 절대 변위가 증가하는 것을 확인할 수 있다.

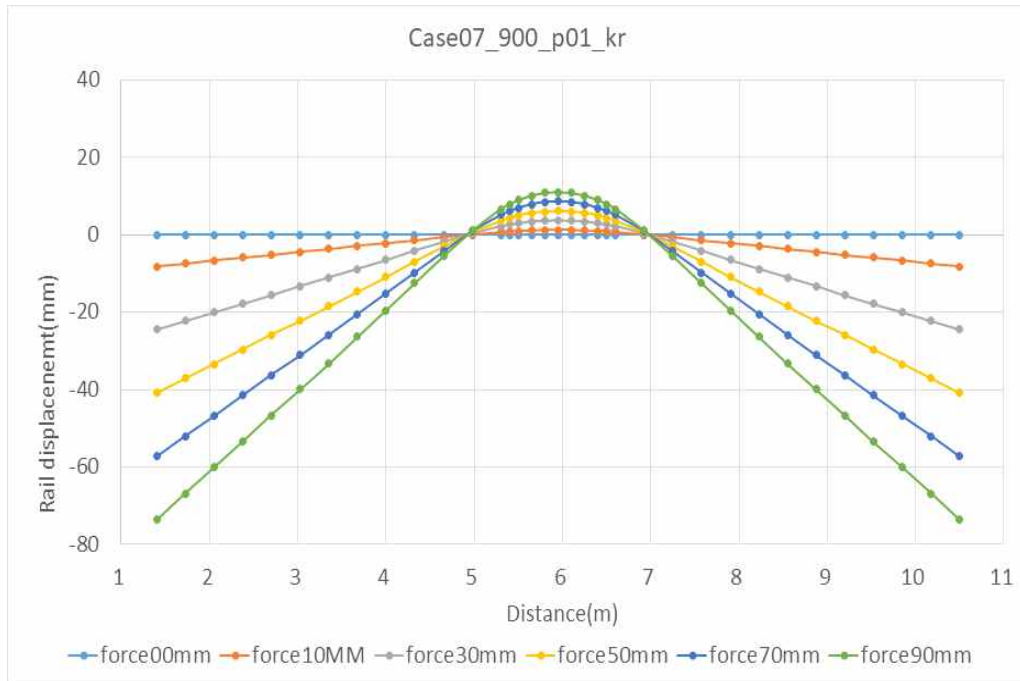


그림 63 레일 변위 (Case 7)

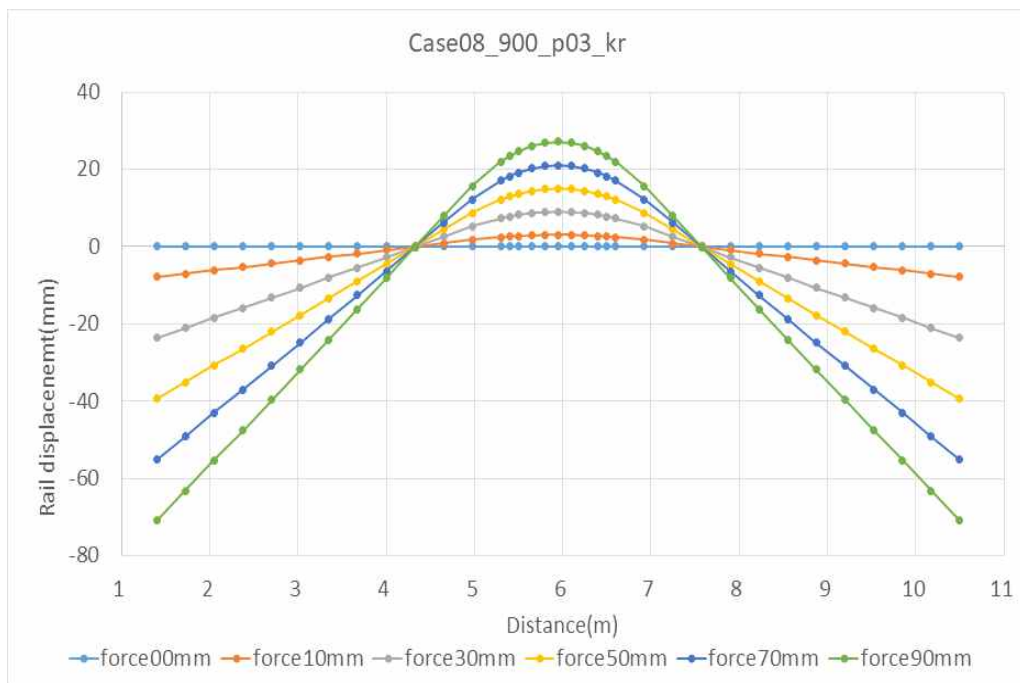


그림 64 레일 변위 (Case 8)

상기 그림에서와 같이 신축이격거리 900mm 조건에서 교량받침의 위치를 p01에서 p03으로 이동하였을 경우에도 레일의 절대 변위가 증가하는 것을 확인할 수 있다.

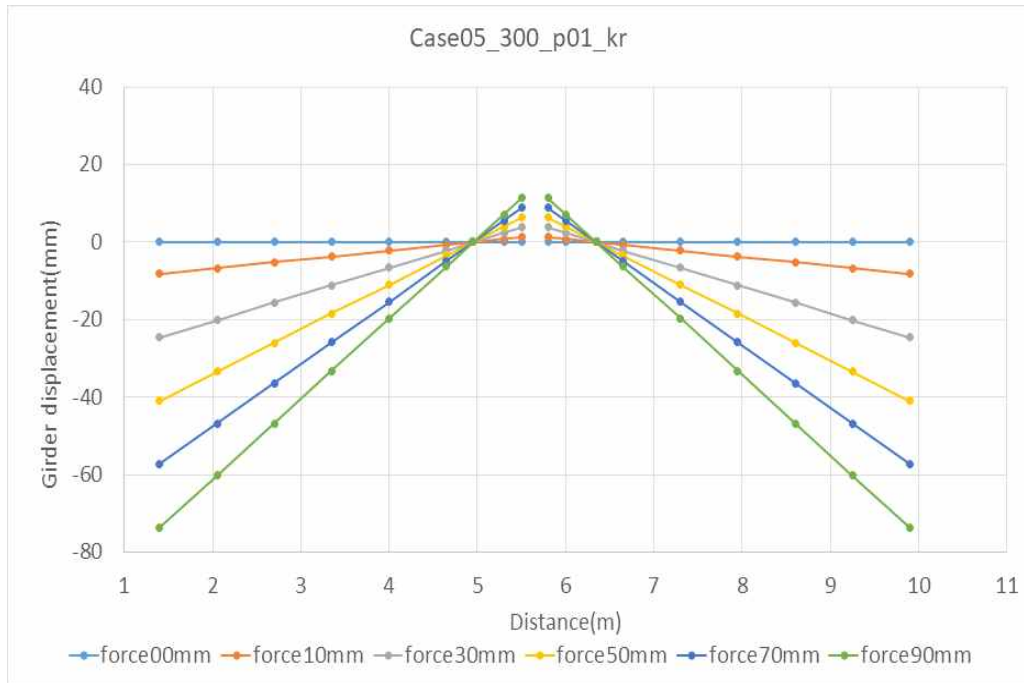


그림 65 거더 변위 (Case 5)

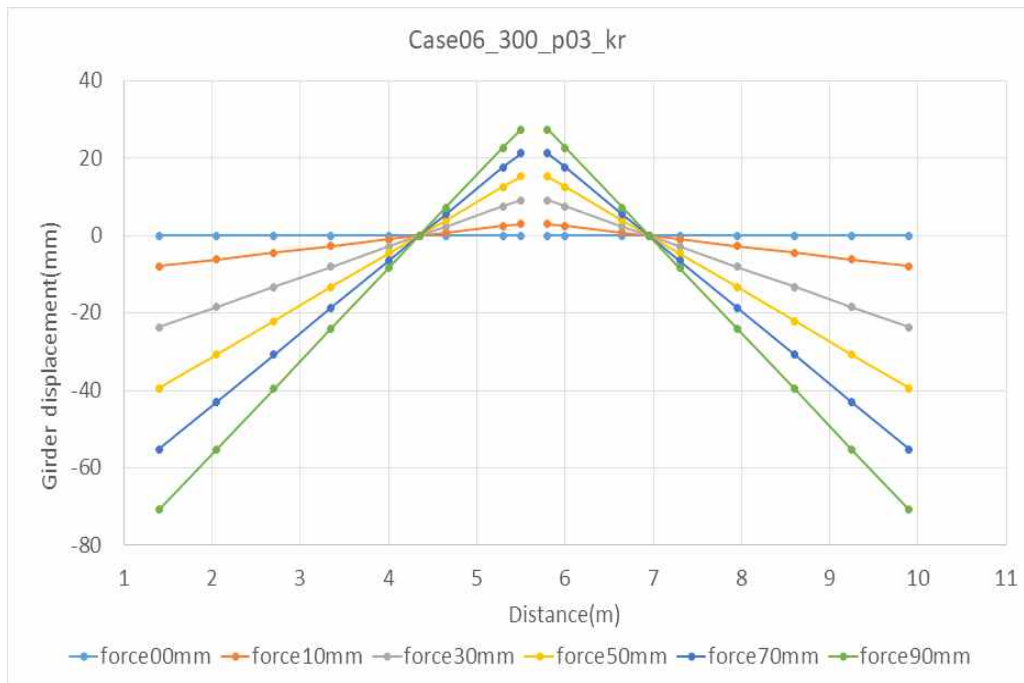


그림 66 거더 변위 (Case 6)

상기 그림에서와 같이 300mm 조건에서 교량받침의 위치를 p01에서 p03으로 이동하였을 경우 거더의 변위가 증가하는 것을 확인할 수 있다.

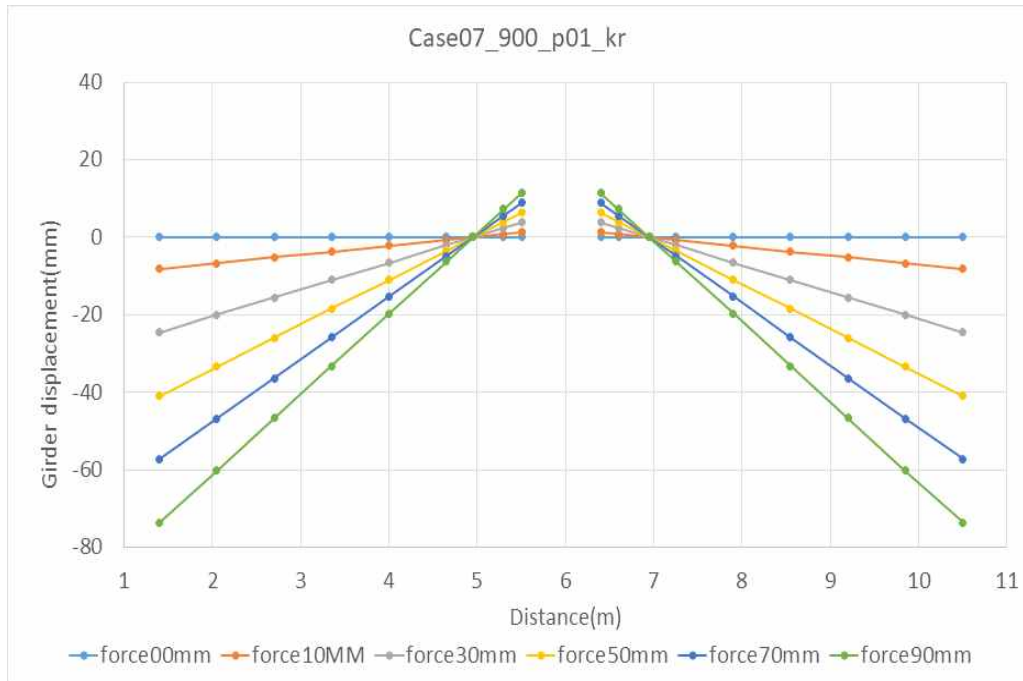


그림 67 거더 변위 (Case 7)

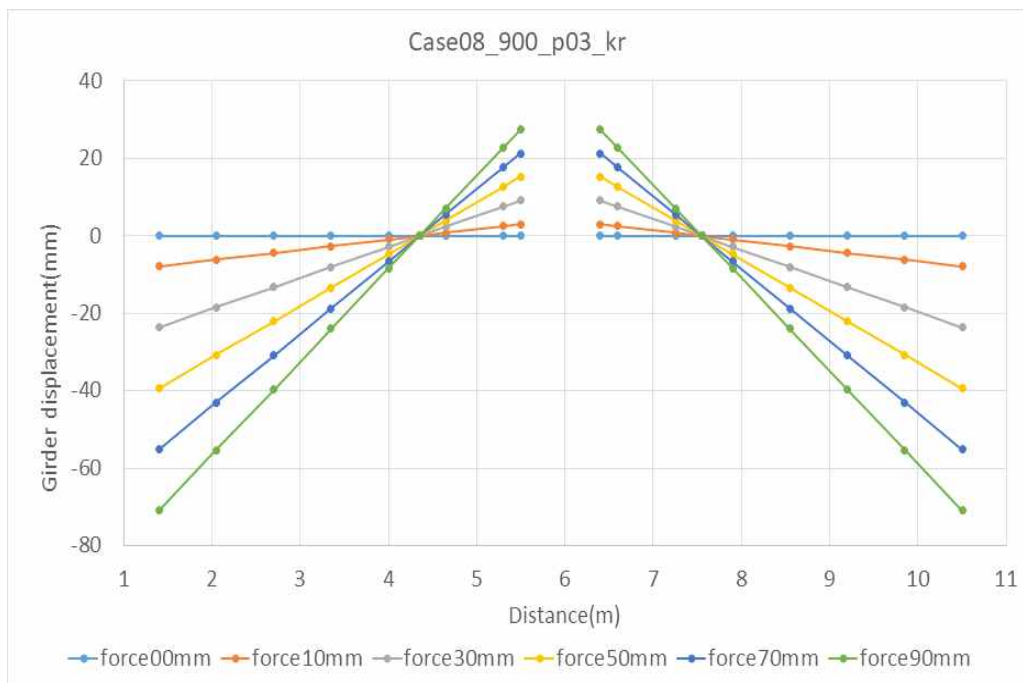


그림 68 거더 변위 (Case 8)

상기 그림에서와 같이 신축이격거리 900mm 조건에서 교량받침의 위치를 p01에서 p03으로 이동하였을 경우에도 거더의 변위가 증가하는 것을 확인할 수 있다.

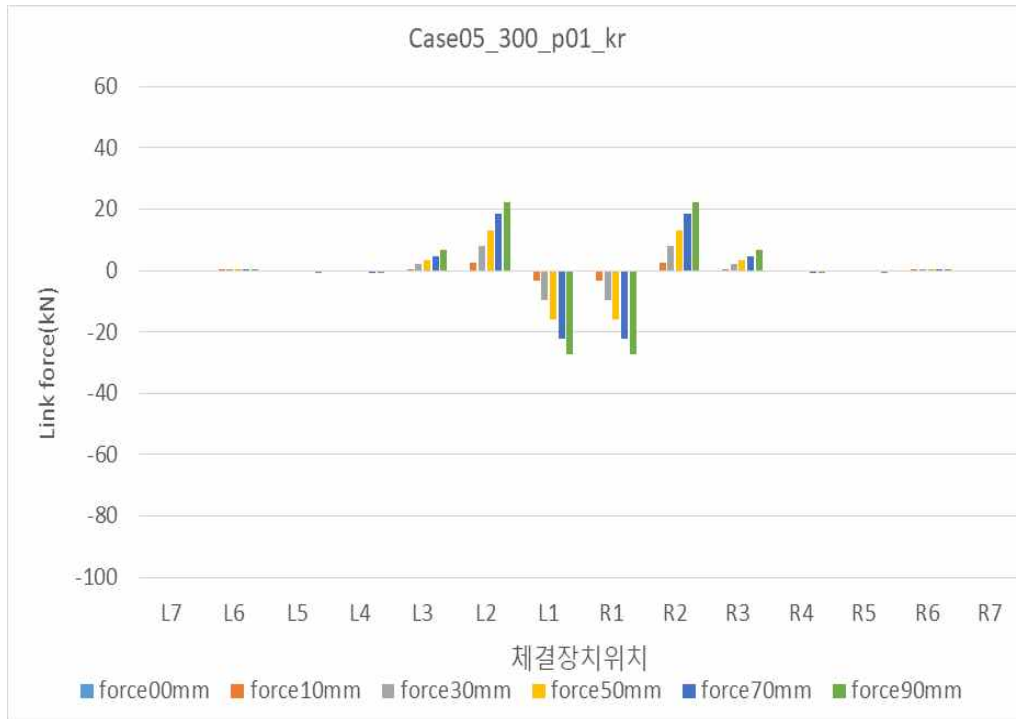


그림 69 레일체결장치에 작용하는 힘 (Case 5)

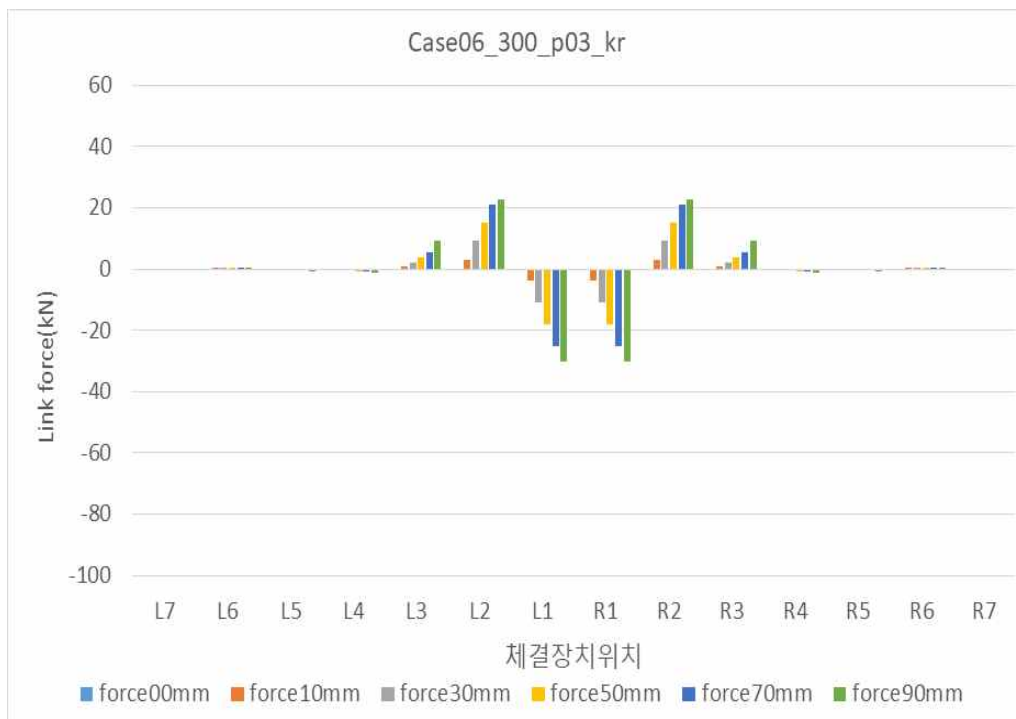


그림 70 레일체결장치에 작용하는 힘 (Case 6)

상기 그림에서와 같이 레일체결장치에 작용하는 힘도 교량받침의 위치를 p01에서 p03으로 이동하였을 경우에 압축력과 상향력 모두 커지는 것으로 확인된다.

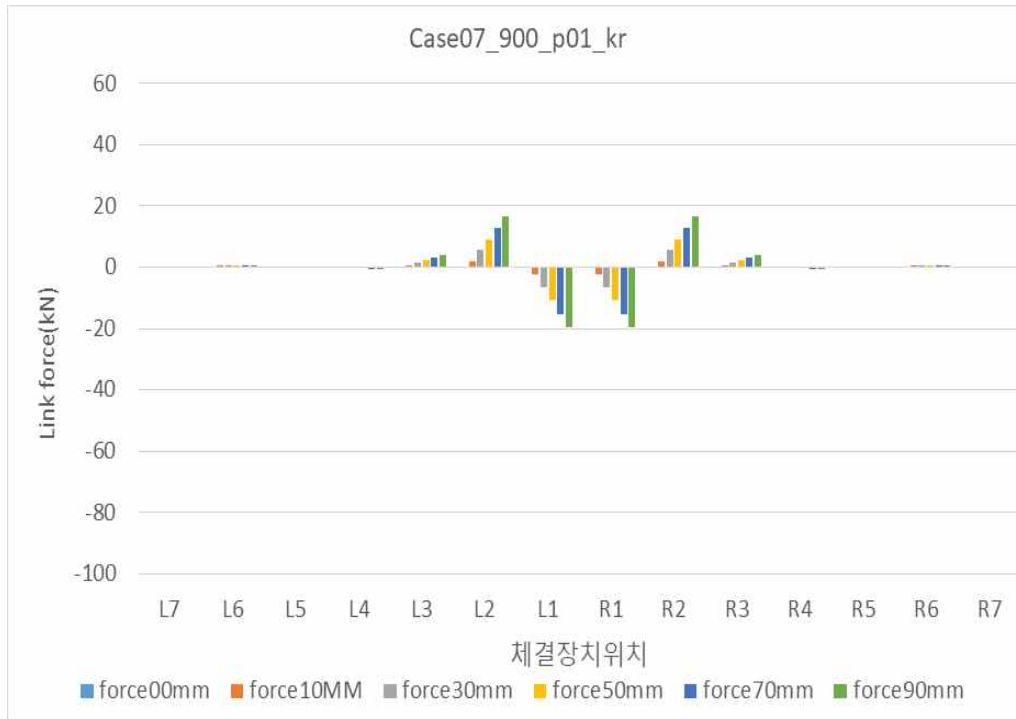


그림 71 레일체결장치에 작용하는 힘 (Case 7)

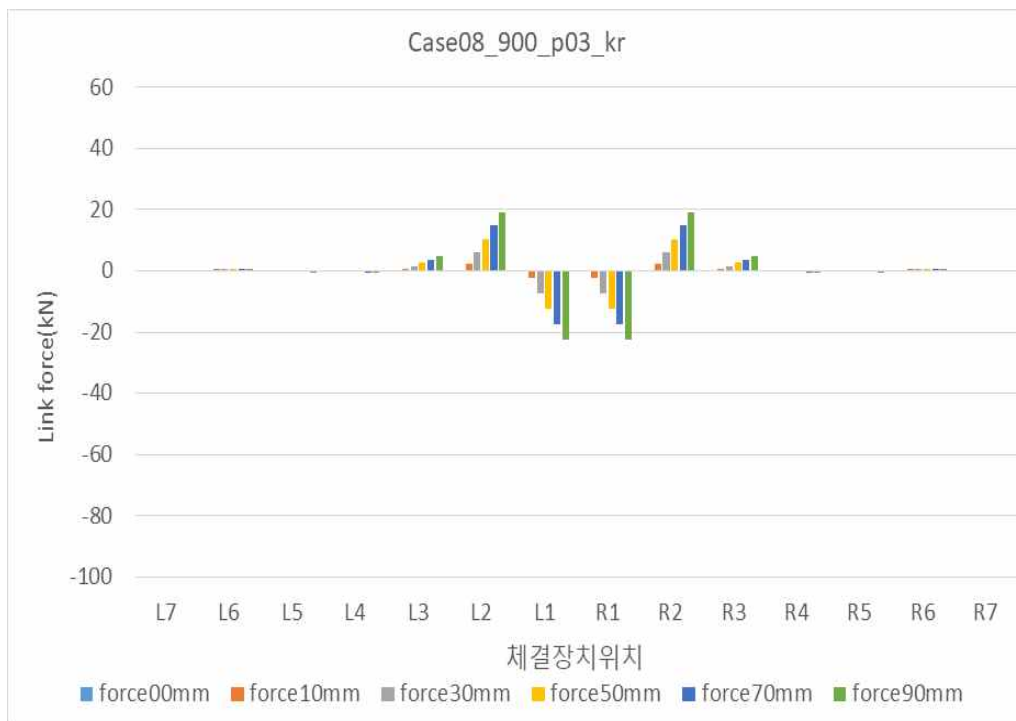


그림 72 레일체결장치에 작용하는 힘(Case 8)

상기 그림에서와 같이 Case 7과 Case 8에서도 교량받침의 위치를 p01에서 p03으로 이동하였을 경우에 압축력과 상향력 모두 커지는 것으로 확인되었다.

해석결과, 신축이격거리 300mm를 기준으로 교량받침의 위치를 p01에서 p03으로 옮길 경우, 동일 조건의 변위 하중일 때 교량받침과 교량상판 단부의 길이가 증가하여 레일 체결장치에 작용하는 힘은 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 신축이격거리 900mm를 기준으로 했을 때도 동일한 경향을 나타냈다. 또한, 교대부의 결과와 비슷한 경향을 보이지만, 그 크기는 교대부에 비해 작은 것으로 나타났다.

교량받침의 위치를 기준으로 하여 신축이격거리를 300mm에서 900mm로 늘린 경우, 우측거더 첫 번째 레일체결장치에서 발생하는 변위와 작용력은 다소 감소하는 경향을 보였다. 이러한 결과는 좌측거더의 마지막 레일체결장치와 우측거더의 첫 번째 레일체결장치의 이격거리가 각각 0.7m, 1.3m로, 좌측거더의 회전변위로 인한 우측거더 첫 번째 레일체결장치에 작용하는 힘(레일들림, 상향력)이 신축이격거리 300mm일 때가 크기 때문이다.

④ 교대부에 비해 교각부 작용력이 작은 이유 분석

교각부 해석에서 교각 좌우에 변위하중을 주었을 때, 레일체결장치에 작용하는 힘이 교대부의 해석결과보다 상대적으로 작게 나타났다. 이 결과가 타당한지에 대한 추가 해석을 수행하였다.

해석모델은 교각부 해석모델을 사용하였으며, 왼쪽 교각부에 90mm 하중을 주고 동시에 오른쪽 교각부에 0mm, 10mm, 30mm, 50mm, 70mm, 90mm 하중을 점차적으로 증가시켰을 때, 해석모델에서 보여주는 결과를 확인하였다.

교량받침 위치 p03일 때, 신축이격거리 300mm 및 900mm에 대한 결과를 아래 그림에 나타냈다.

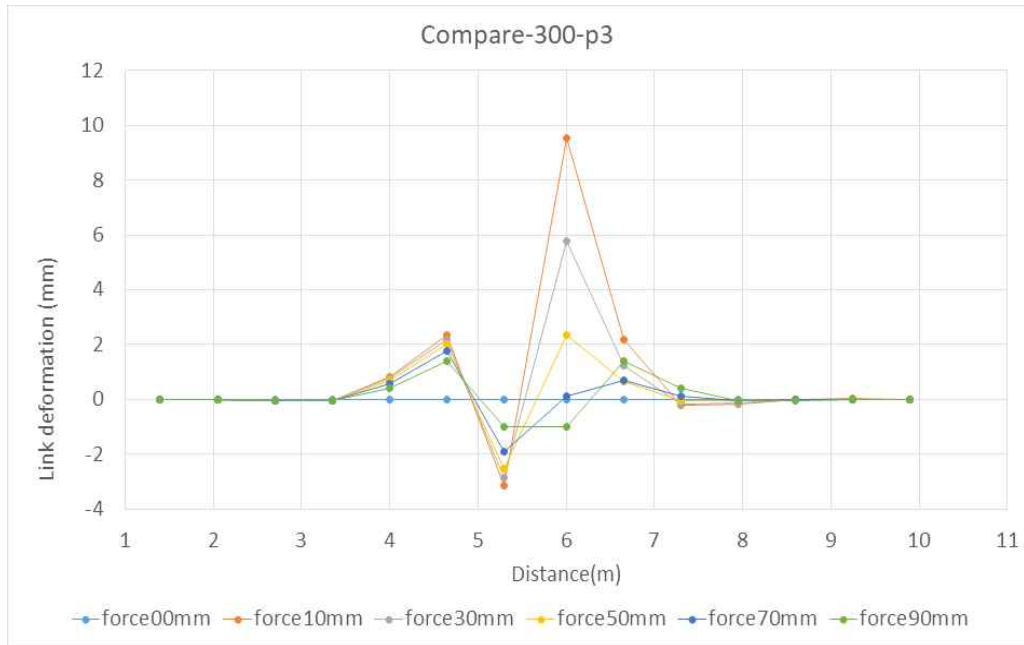


그림 73 레일체결장치 변위

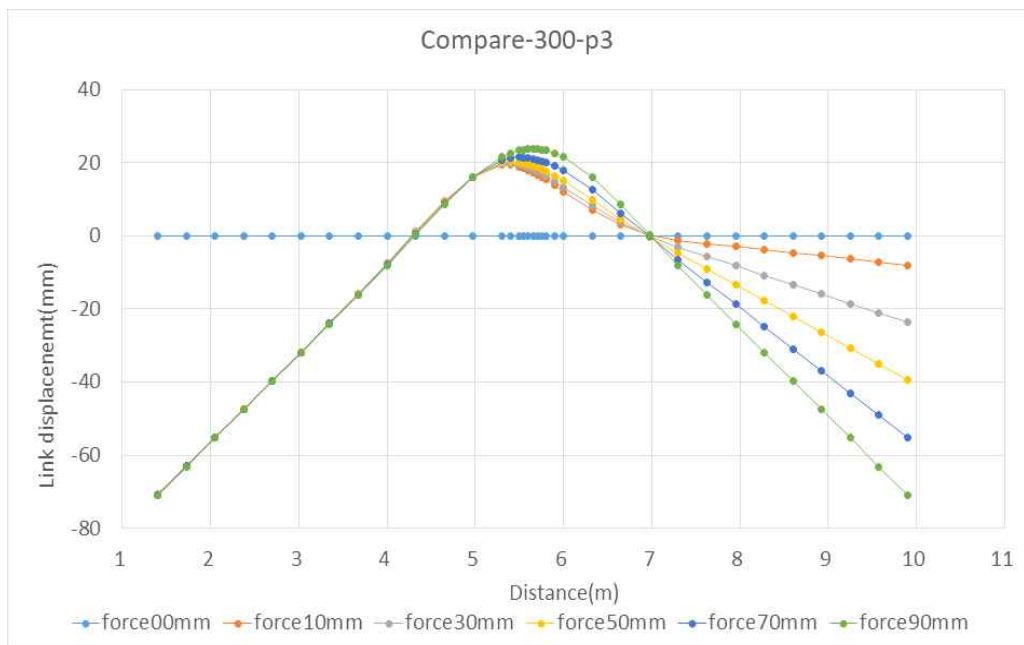


그림 74 레일 변위

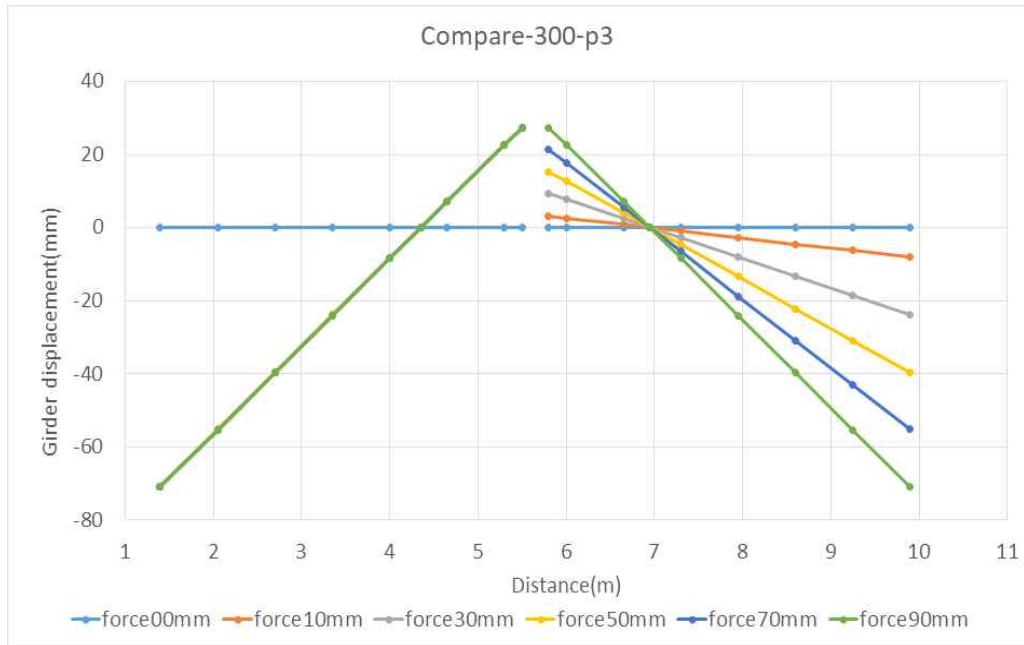


그림 75 거더 변위

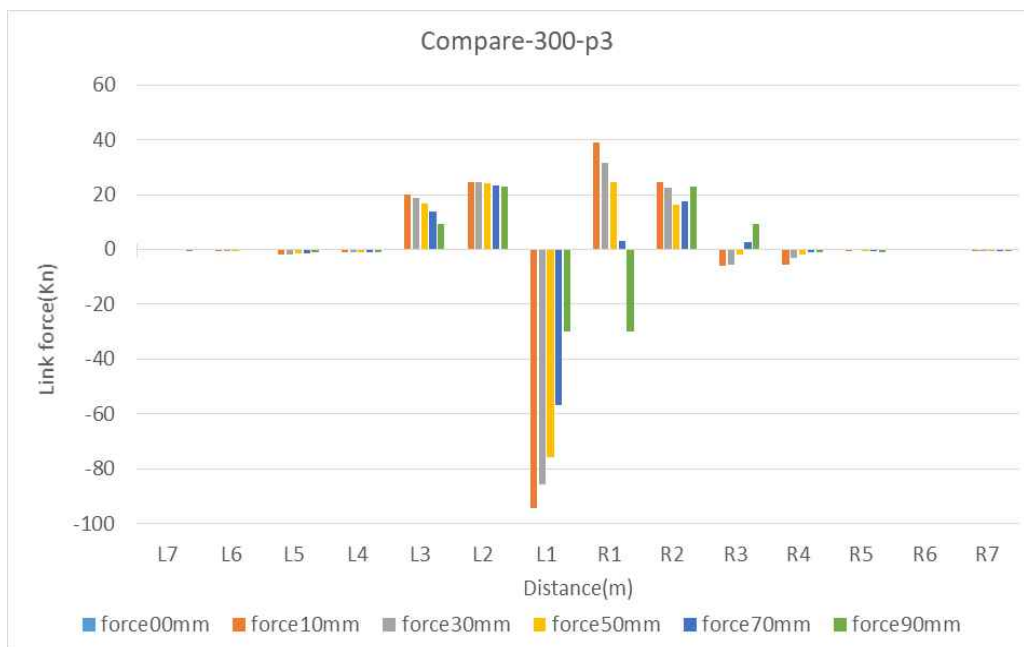


그림 76 레일체결장치에 작용하는 힘

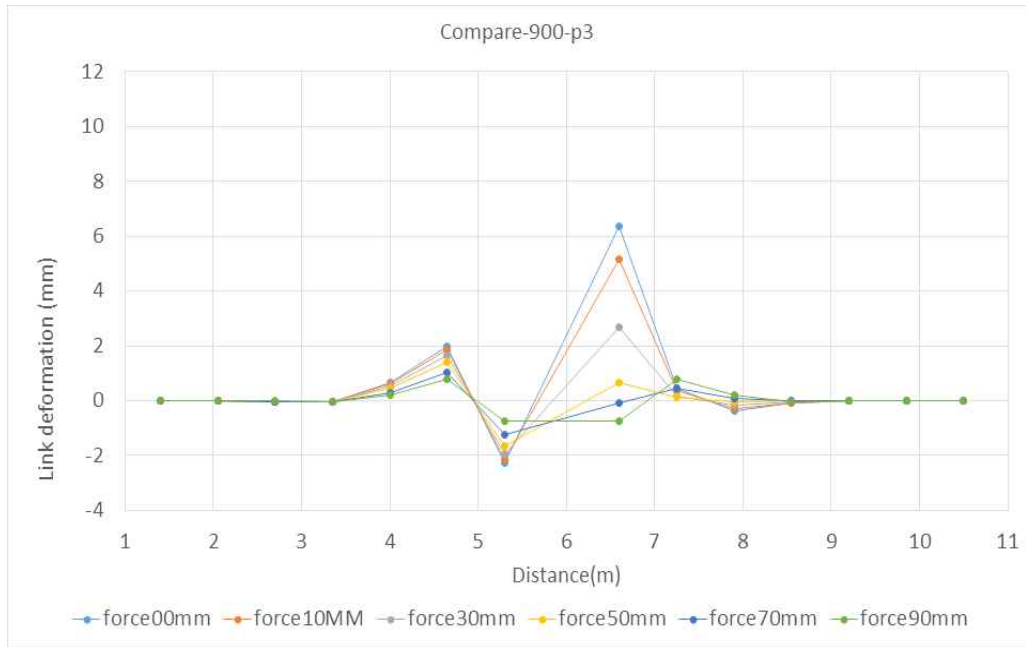


그림 77 레일체결장치 변위

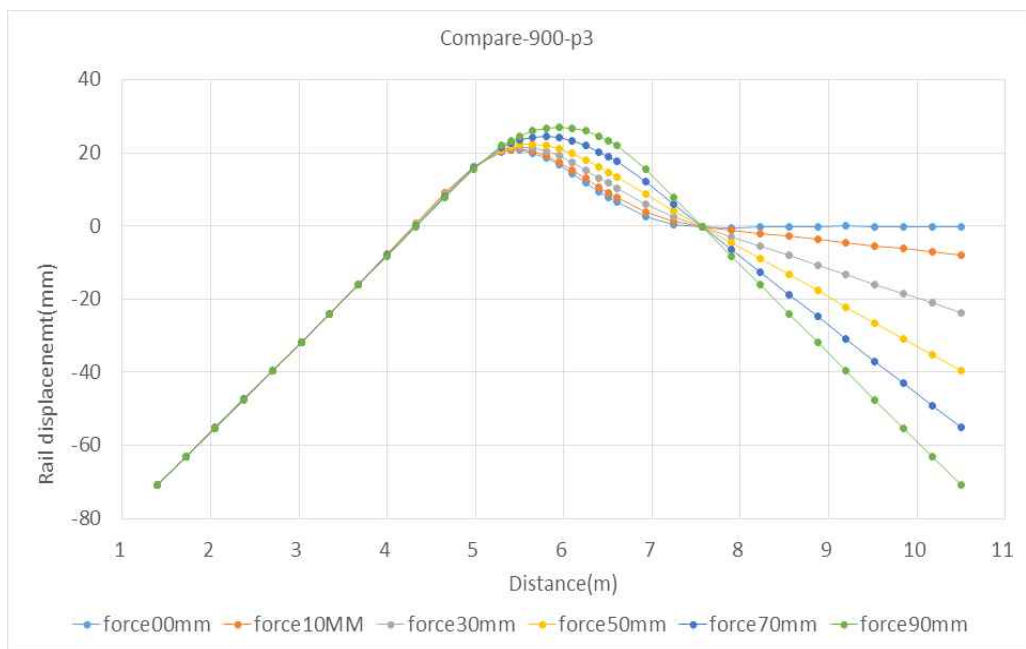


그림 78 레일 변위

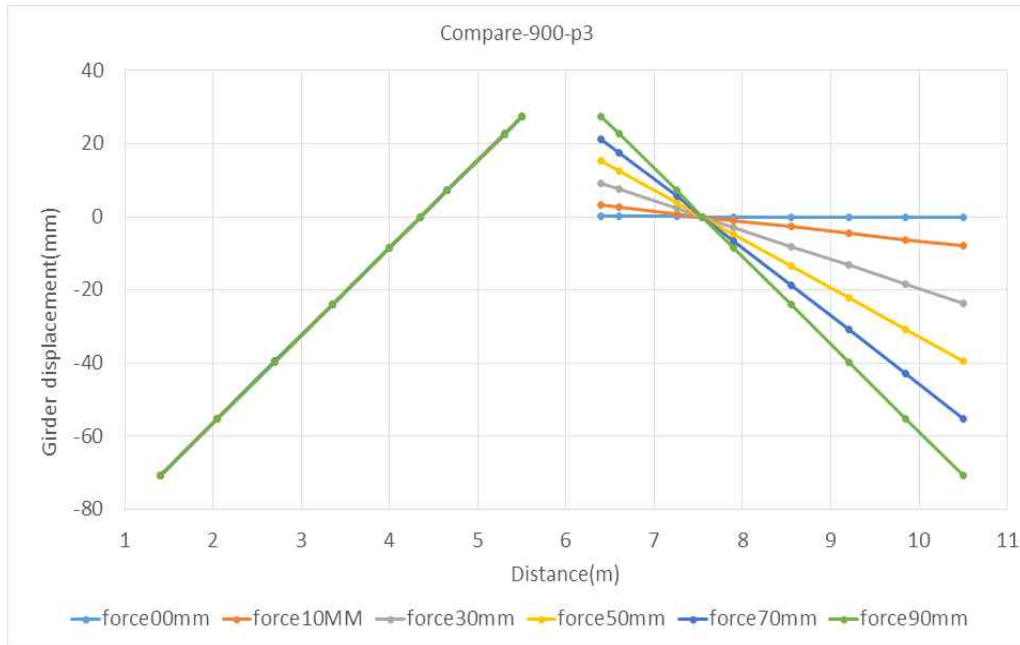


그림 79 거더 변위

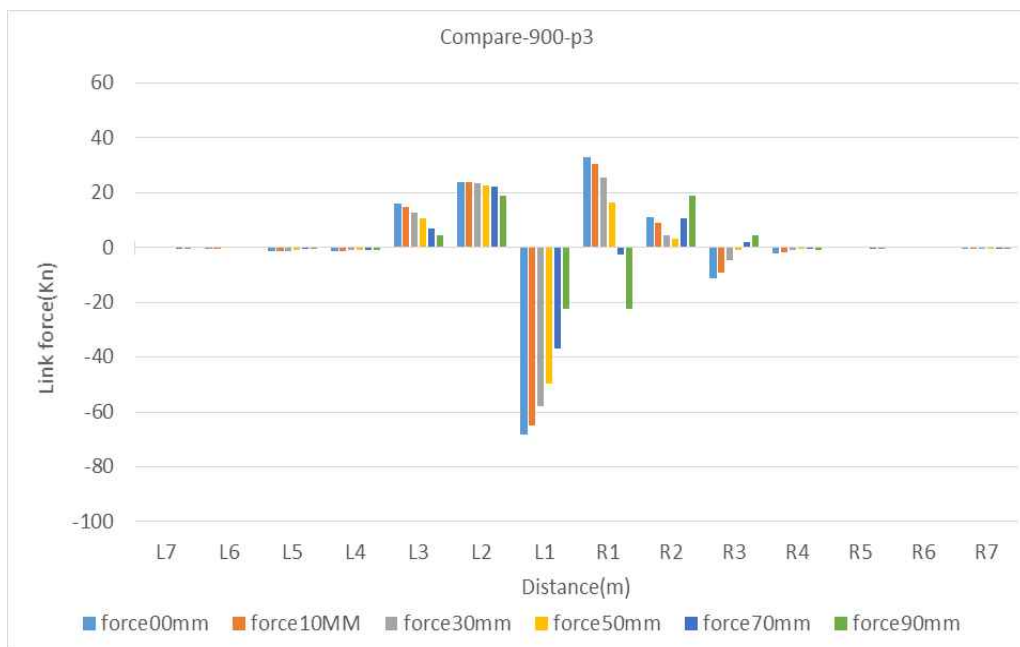


그림 80 레일체결장치에 작용하는 힘

왼쪽 교각부에만 90mm하중을 주었을 때, 큰 압축력과 상향력을 보였지만, 오른쪽 교각부에 순차적으로 변위하중을 주었을 때의 해석결과는 아래 그림과 같이 레일체결장치에 작용하는 작용력이 감소하는 것을 확인 할 수 있었다. 이러한 이유는 왼쪽 교각부에만 90mm 하중을 주었을 때, 단부에서의 왼쪽 거더와 오른쪽 거더 사이에 큰 변위차로 인하여 왼쪽 단부 위의 레일체결장치에는 큰 압축력이 작용하고, 오른쪽 교각부 위의 레

일체결장치에는 큰 상향력이 작용하기 때문인 것으로 판단된다. 점차 오른쪽 교각에서 변위하중을 가해주면, 상대적으로 거더 단부에서의 상대변위 차가 줄어들면서 레일체결장치에 작용하는 힘도 줄어드는 것으로 판단된다.

(4) 소결론

주요 영향인자(신축구간길이, 교량받침의 위치)에 대한 수치해석에서는 다음과 같은 소결론을 도출하였다.

- DS 804를 대상으로 해석모델을 검증하였으며, 레일체결장치의 강성을 선형 모델과 비선형 모델로 구현하여 해석한 결과, 비선형 모델 적용 시 레일체결장치의 최대 상향력이 약 20% 감소됨을 확인하였다.
- 주요 영향인자(신축구간거리, 교량받침위치)에 대한 수치해석결과, 교량받침의 위치가 교량상판 단부 마지막지점의 레일체결장치와 멀어질수록 레일체결장치에 불리한 결과를 나타내었고, 신축이격거리가 300mm에서 900mm로 멀어질 때 레일체결장치에 작용하는 힘은 감소하는 것으로 나타났다.
- 교대부에서의 레일체결장치에 작용하는 힘이 교각부에서 레일체결장치에 작용하는 힘보다 크게 나타났으며, 이에 대한 추가적인 해석을 통해 결과의 타당성을 보여주었다. 하지만, 이 결과는 변위하중이 경간에 작용하였을 때의 결과를 나타내며, 차량 하중이 단부를 통과할 때의 결과 등을 고려해야 할 것으로 판단된다.

라. 철도교량 단부 모형 실내시험

철도교량 단부 콘크리트궤도 레일체결장치의 설치간격 증가는 레일 휨변형의 증가를 초래하여 궤도틀림에 영향을 미칠 수 있으며, 고속열차 주행시 열차 주행안정성 저하요인이 되기도 한다. 또한, 단부회전과 단차 등에 의해 발생된 교량 상부구조의 변형은 레일의 변형을 동반하게 되고 레일의 변형은 레일체결장치에 작용력으로 발생하게 된다. 콘크리트궤도가 부설된 철도교량 단부의 레일체결장치에 작용하는 작용력에 영향을 미치는 주요인자들은 교량 상부구조의 마지막 레일지지점 위치(교량받침과 교량단부간 거리)와 레일지지간격(레일체결장치 설치간격) 등과 같은 교량 및 궤도의 기하학적 구조와 관련이 있다.

실제 교량을 대상으로 수행되는 현장재하시험은 재하하중 외의 다양한 조건과 인자들에 따라 실험 환경이 제한적이므로 이를 고려한 모형 시험을 통해 상세하게 분석을 하는 것이 효과적이며, 모형 시험을 수행하기 위해서는 레일체결장치간의 간격, 축하중 작용시 레일과 거더의 영향 범위, 레일체결장치 등 주요 인자들의 영향 검토를 통하여 실내시험 결과의 신뢰도를 올리는데 그 목적이 있다.

기존 연구들에서 제시된 철도교량 단부 콘크리트궤도의 거동특성 및 사용성 평가와 관련된 이론과 평가기법에 대해 철도교량의 교대부와 교각부를 축소시킨 모형 실험을 수행하였다. 철도교량 단부 모형 실내시험에서는 교대부와 교각부에서 거더의 수직방향 휨거동이 교량 단부 레일체결장치의 거동에 미치는 영향에 대한 매개변수 실험을 수행하였으며, 이 때, 교량 상부구조의 마지막 레일지지점 위치(교량받침과 교량단부간 거리)와 레일지지간격(레일체결장치 설치간격)을 고려하였다.

(1) 철도교량 단부 모형 실내시험 방법

(가) 실내시험 조건

① 시험체 구성 및 제원

실내시험에서 철도교량은 거더변위를 크게하여 단부거동을 명확하게 확인하기 위해 H-Beam으로 모형화하였으며, 궤도시스템은 국내에서 사용되고 있는 KR60레일과 KR-II 레일체결장치를 적용하였다. 여기서 H-Beam의 강종은 일반 구조용 강재인 SM490을 사용하였으며, H-Beam과 레일체결장치를 직접 연결하는 구조로 하였다. 궤도길이는 수치 해석을 통하여 자중에 의한 처짐이 발생되지 않는 범위로 산정하였다.

실내 시험체는 교량 단부회전에 따른 레일 변형의 영향범위를 파악하고 경계조건의 효과를 최소화 할 수 있도록 가력지점부터 교대부 마지막 레일체결장치까지의 길이를 충분히 고려하여 제작하였다. 또한, 실험체를 교각부와 교대부로 구분지어 실험할 수 있도록 제작하였으며, 설계제원은 아래와 같다.

표 17 실내 시험체의 주요 구성품

주요 구성품	제 원
① 레일	KR60 레일
② 레일체결장치	KR-II 레일체결장치
③ H-Beam(mm)	400 x 400 x 13 x 21, SM490 steel

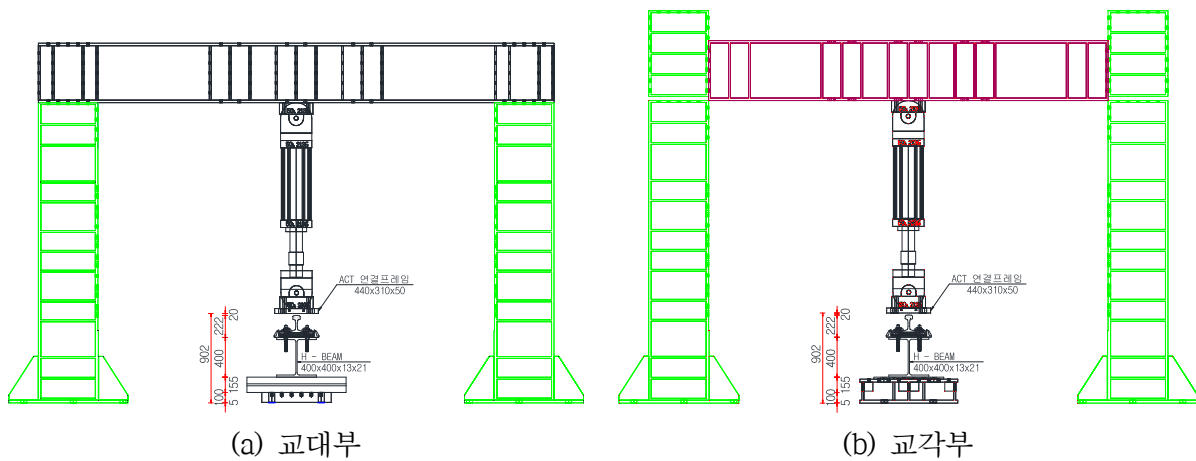


그림 81 철도교량 단부 모형 실내시험 Setting

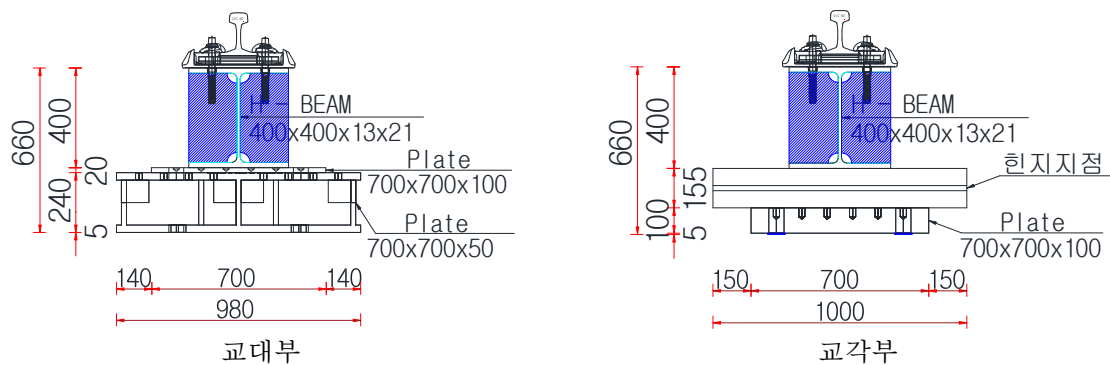


그림 82 철도교량 단부 모형 시험체 단면도

수직하중에 의해 거더 시험체의 휨 변형이 발생되지 않도록(H-Beam의 탄성범위에 있도록) 거더를 제작하였으며, 실제 콘크리트궤도와 다르지만 교량(거더)의 휨 거동에 의한 단부 레일체결장치의 영향분석을 위한 시험 목적에 적합하게 레일과 레일체결장치, 거더가 직접 연결된 형상으로 제작하였다.

㉑ 교대부

아래 그림은 실내 모형시험의 교대부로 좌측 및 우측 거더 길이는 각각 10.05m 이고, 좌측 경간은 힌지-롤러 받침으로 지지되어 있으며, 오른쪽 교대부는 바닥과 고정되어 있다. 좌측 교대부의 중앙에서 액츄에이터를 이용하여 하중을 가하였다.

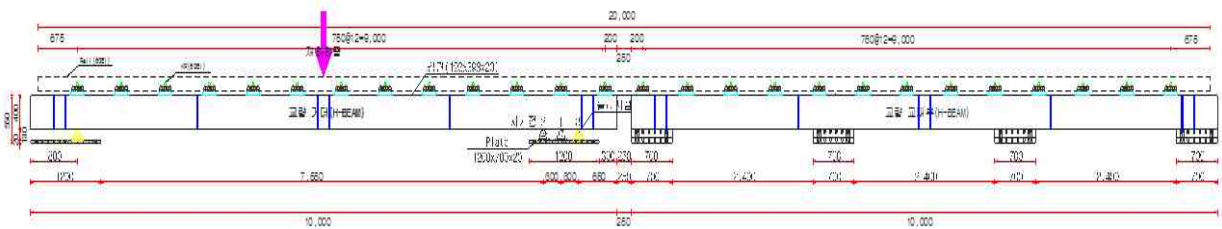


그림 83 교대부 모델

㉒ 교각부

아래 그림은 실내 모형시험의 교각부로 좌측 및 우측 거더 길이는 각각 10.05m 이고, 좌측경간은 힌지-롤러, 우측경간은 롤러-힌지 받침으로 지지되어 있다. 하중은 좌측 및 우측의 액츄에이터를 이용하여 거더1 재하, 거더1, 2 동시재하하는 방법을 사용하였다.

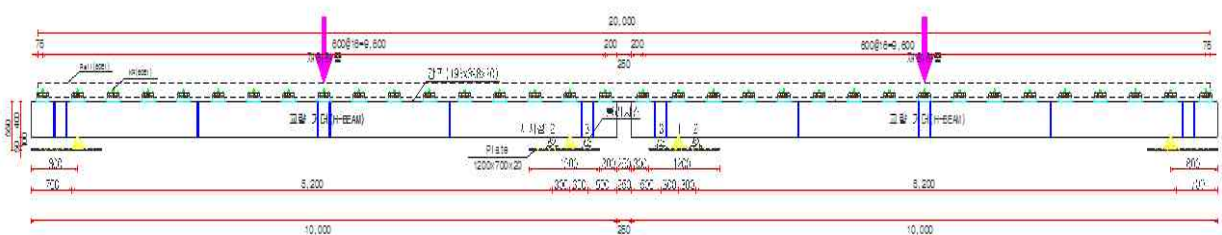


그림 84 교각부 모델

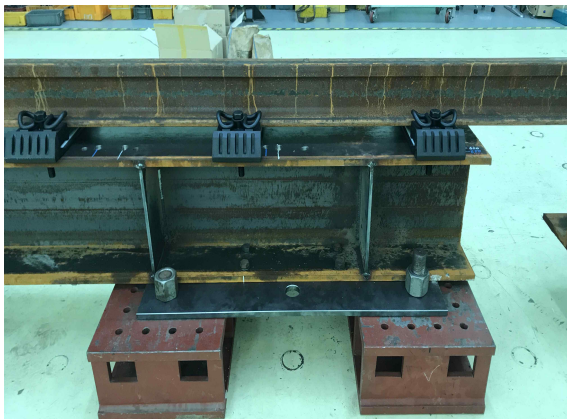
또한, H-Beam 상부 플랜지의 휨 변형 발생을 제어하고자 하중재하위치와 교량받침위치 H-Beam 복부에 스티프너를 설치하였다.



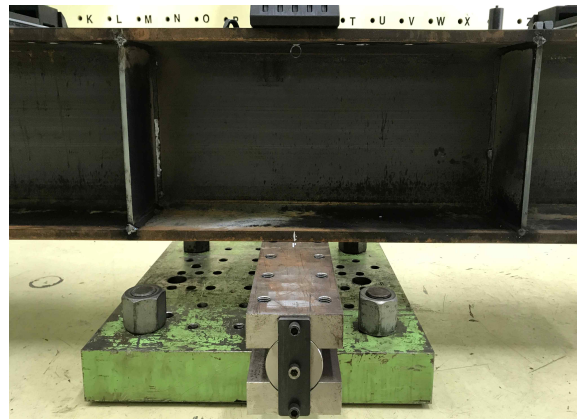
그림 85 하중재하위치 스티프너 설치

② 시험체 지점조건

교대부는 고정지지점으로 만들기 위해 바닥판과 H-Beam을 고정시켰으며, 교각부는 양단 H-Beam을 롤러지지점으로 설치하였다.



교대부 (하부고정)



교량받침 (롤러지지점조건)

그림 86 실내 시험체 지점조건

③ 레일체결장치 간격 및 교량받침 위치 변화 방법

실내시험체는 교대부와 교각부로 구분하였고, 레일체결장치 설치간격은 750, 650, 600mm로 변경할 수 있도록 H-Beam 상부 플랜지에 미리 홀(hole)을 제작하였으며, 교량 신축구간길이(유간)는 500mm로 가정하였다. 교대쪽 첫 번째 레일체결장치와 교량쪽 첫 번째 레일체결장치 간격은 900mm로 설정하였다.

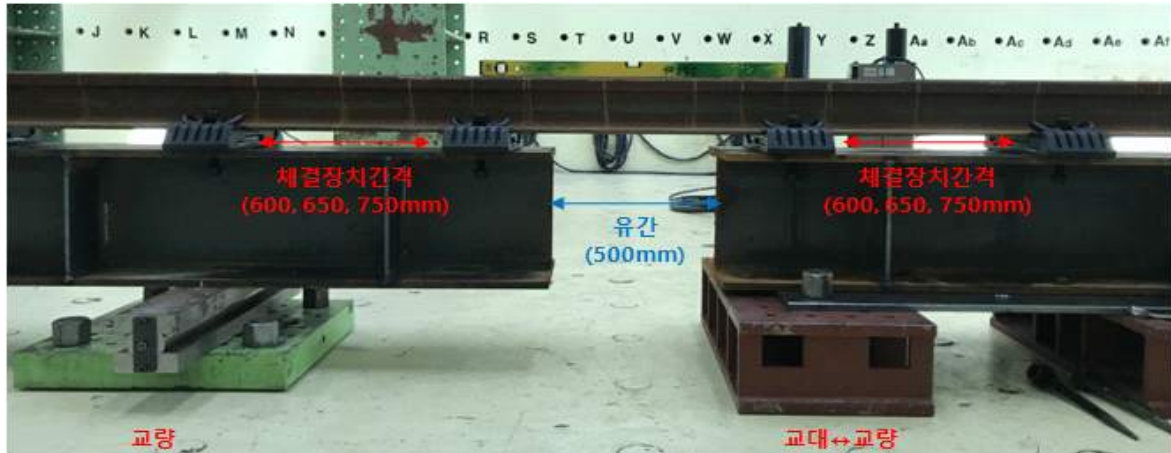


그림 87 레일체결장치 간격에 따른 시험체

상향력이 최대 발생될 것으로 예상되는 레일체결장치간격 750mm를 기준으로 거더 단부로부터 두 번째에 위치한 레일체결장치의 직하부에 교량받침을 설치하는 것을 기준으로 하였다. 이는 거더 중심측으로 185mm의 여유를 가질 수 있는 거리이며, 185mm 여유값을 고려하여 교량받침위치를 이동하면서 실험을 수행하였다.

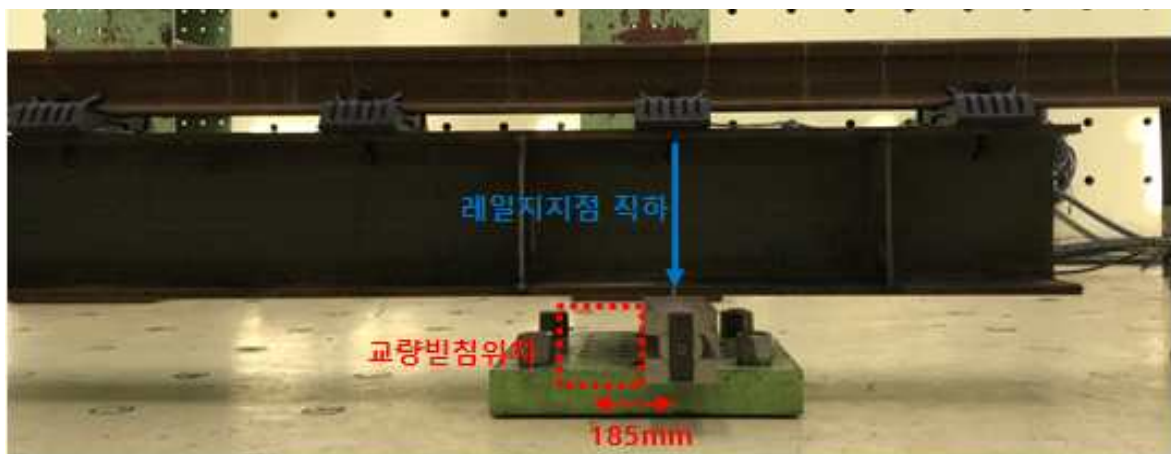


그림 88 교량받침 위치 설정

④ 실내시험 Case

정적재하시험은 아래 표와 같이 50kN 단위로 증가시키면서 0~350kN까지 재하하였으며, 교각부에서는 하중에 의하여 레일 끝단에서와 레일 중앙부에서의 최대 휨 응력 위치에 따른 레일과 거더의 영향을 분석하고자 거더1 재하(편재하)와 거더1, 2 재하(양방향 동시재하)로 2가지 형태의 하중제어방식으로 수행하였으며, 실내시험 Case는 아래와 같다.

표 18 실내시험 Case

구 분	체결구간격 (mm)	교량받침위치 (거더 끝단으로부터의 거리)	모델	하중조건			
Case 1	750	1번 지지점 (950mm)	교대부	Statics	0~350kN, 50kN단위 STEP		
Case 2	750	2번 지지점 (1135mm)		Statics	0~350kN, 50kN단위 STEP		
Case 3	600	2번 지지점 (1135mm)		Statics	0~350kN, 50kN단위 STEP		
Case 4	650	2번 지지점 (1135mm)		Statics	0~350kN, 50kN단위 STEP		
Case 5-1	650	2번 지지점 (1135mm)	교각부	Statics	0~400kN, 100kN단위	좌측거더 재하 (편측재하)	
Case 5-2						좌,우측거더 재하 (양측재하)	
Case 6-1	600	2번 지지점 (1135mm)		Statics	0~350kN, 100kN단위	좌측거더 재하 (편측재하)	
Case 6-2						좌,우측거더 재하 (양측재하)	
Case 7-1	750	2번 지지점 (1135mm)		Statics	0~400kN, 100kN단위	좌측거더 재하 (편측재하)	
Case 7-2						좌,우측거더 재하 (양측재하)	

(나) 실내시험 계측방법

case별 센서설치 위치는 동일하며 센서설치 개요도는 아래와 같다. 교량단부회전에 기인한 레일의 변형수준을 정량적으로 파악하고자 레일과 거더의 변위를 측정하였다. 이때, 교량 및 교대 시험체의 거동에 변위계(LVDT)가 간섭 받지 않도록 별도의 프레임을 설치하였으며, 이를 통하여 레일과 거더 변위를 측정하여 단부궤도 레일체결장치에 발생하는 상향력의 영향을 확인하였다. 변위계 설치 위치는 단부 중심으로부터 좌우 레일과 거더부의 상, 하 동일 위치에 변위계를 설치하여 측정하였다. 교대부 시험체의 경우 교각부에서 거더 거동에 따라 레일체결장치 변위 경향이 다를 것으로 예상되는 거더에 변위계를 추가로 설치하였으며, 교각부 시험체의 경우 단부중심으로부터 좌우 동일하게 설치하였다.

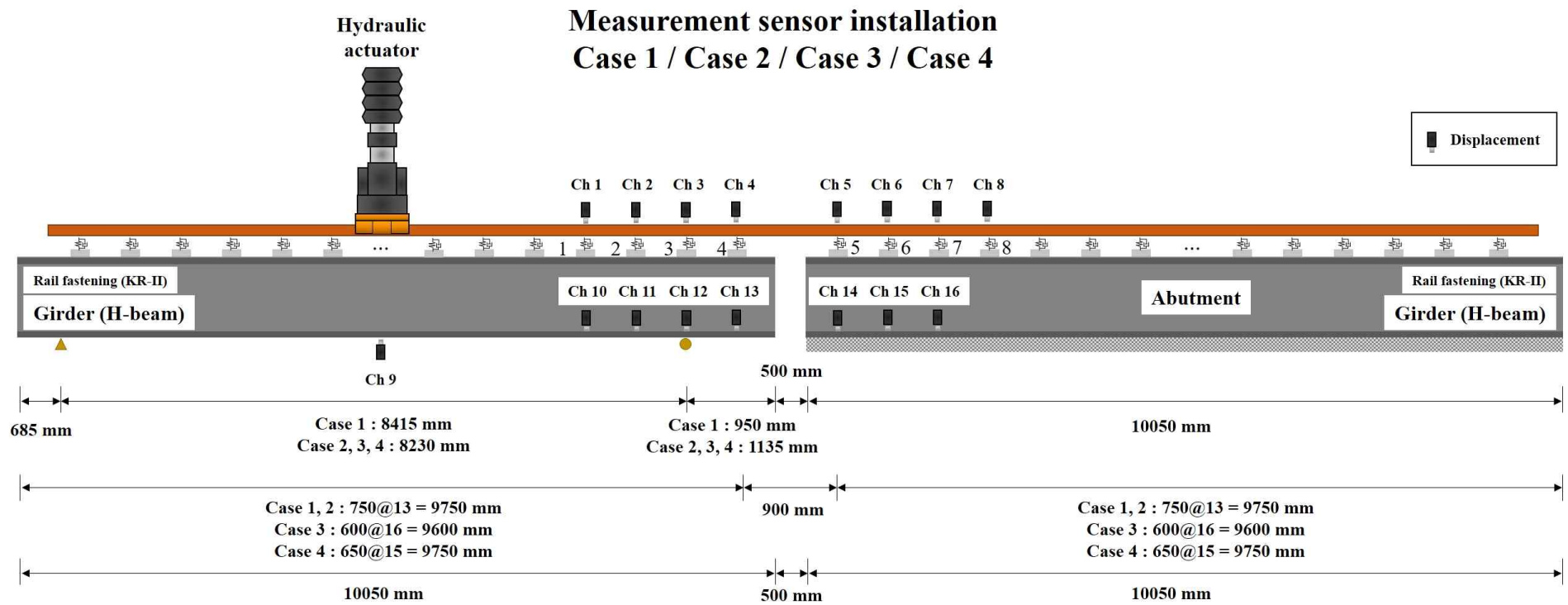


그림 89 철도교량 단부 모형 실내시험 조건 - 교대부

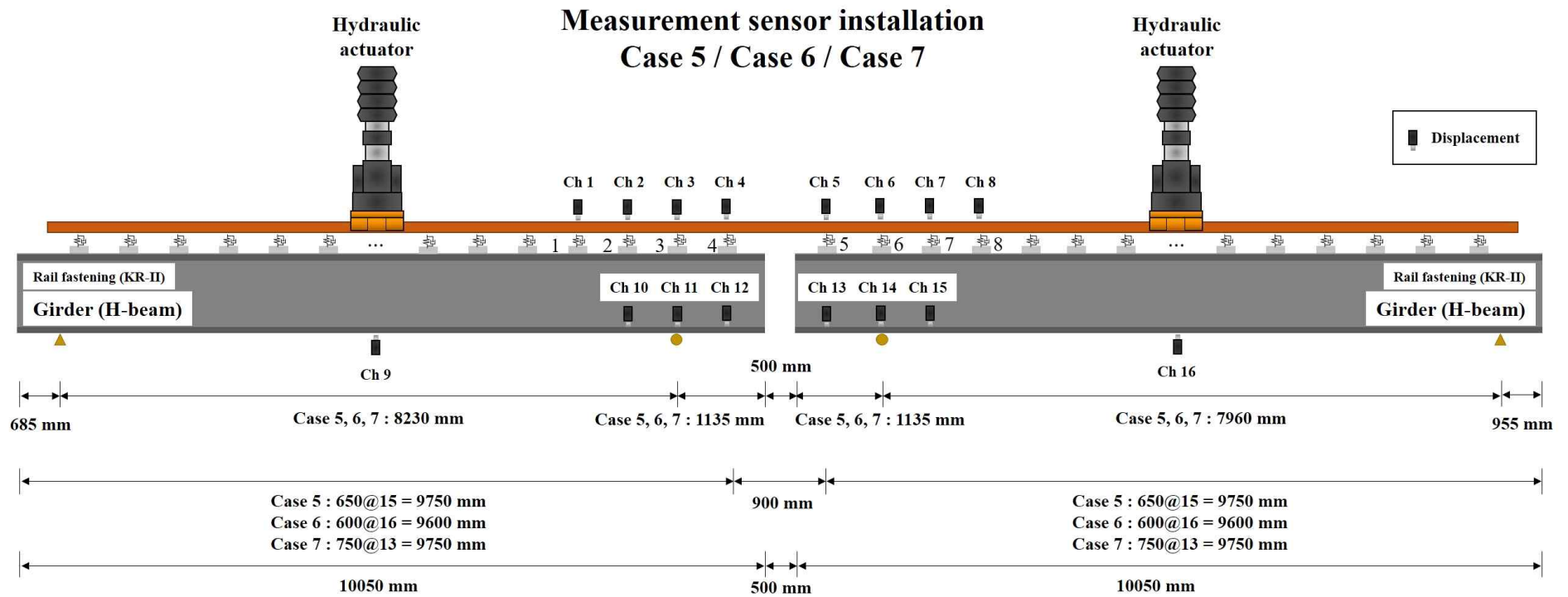


그림 90 철도교량 단부 모형 실내시험 조건 - 교각부

① 레일 변위

레일체결장치 변위의 경우에는 레일 직하부 탄성패드의 변위를 직접 측정하기에 무리가 있으므로 체결구 상부의 레일에서 발생하는 변위량 측정을 통해 확인하였다. 따라서 단부 레일체결장치 변위 측정 시 패드변위가 측정되는 것이 아니라 레일의 들림량 및 눌림량에 따른 레일의 상향변위와 하향변위를 측정할 수 있도록 아래 그림과 같이 레일 상부에 변위계를 설치하였다.

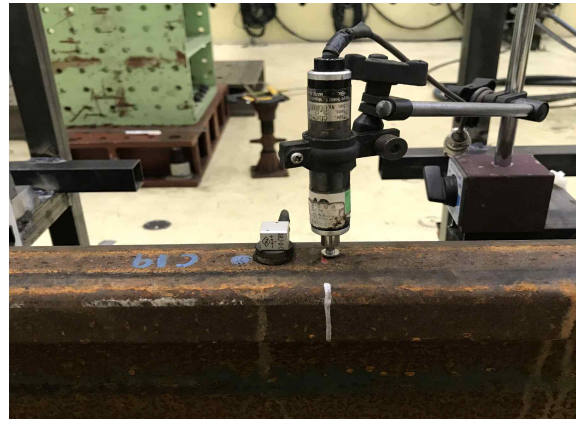


그림 91 변위계(LVDT) 설치 전경 - 레일 변위

② 거더 변위

거더 변위는 하중이 재하되는 거더 중앙부와 거더 단부에서 변위계(LVDT)를 설치하였다.



그림 92 변위계(LVDT) 설치 전경 - 거더 변위

(2) 철도교량 단부 모형 실내시험 결과 및 분석

실내시험은 교대부와 교각부로 모형화 할 수 있도록 하였다. Case 1~4는 교대부 시험체로 레일체결장치 간격을 750mm, 650mm, 600mm로 변화를 주었으며, 교량받침위치 1번 지지점에서 2번 지지점으로 변화를 주어 거더와 거더 단부 레일의 변위를 측정하였다. Case 5~7은 교각부 시험체로 레일체결장치 간격을 750mm, 650mm, 600mm로 변화를 주었으며, 좌측 거더에만 하중을 주는 편재하방식과 좌, 우측 거더에 동시에 하중을 주는 양방향재하 방식으로 실험을 진행하였고, 거더와 거더 단부 레일의 변위를 측정하였다.

(가) 실내시험 결과

① 교대부

좌측거더 중앙부에 하중을 재함에 따라 교량받침의 회전에 따른 거더 단부 H-beam과 레일의 변위를 측정하였으며, 거더 단부 H-beam의 변위는 하중이 재하되는 좌측거더 중앙부에 근접한 1번 측정위치에서 최대 (-)변위가 발생하였고, 거더 단부에 근접 할수록 (-)변위는 감소하였다. 거더 단부 마지막 4번 측정위치는 최대 (+)변위가 발생하였으며, 점점 (+)변위는 감소하기 시작하여 교대부에서는 변위가 거의 발생하지 않는 것으로 나타났다. 즉, 교대부 우측거더의 들림을 최소화함에 따라 본 실내시험이 교대부를 모형화 되었다고 판단할 수 있다.

거더 단부 레일 변위는 좌측거더 하중재하지점으로부터 거더 단부지점까지는 거더 변위 발생경향과 유사한 양상으로 나타났으며, 교대부(우측거더)에서는 레일 변위가 급격하게 감소하지 않고 완만하게 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 변위차이는 레일체결장치에 발생하는 변위로서 체결력과 관계가 있으며, 1~4번 측정위치는 대부분 (-)변위, 5~7번 측정위치에서는 (+)변위가 발생하였다.

좌측 거더(H-beam) 단부, 레일, 레일체결장치 변위 순으로 결과를 정리하였으며, 그 결과는 아래 그림과 같다.

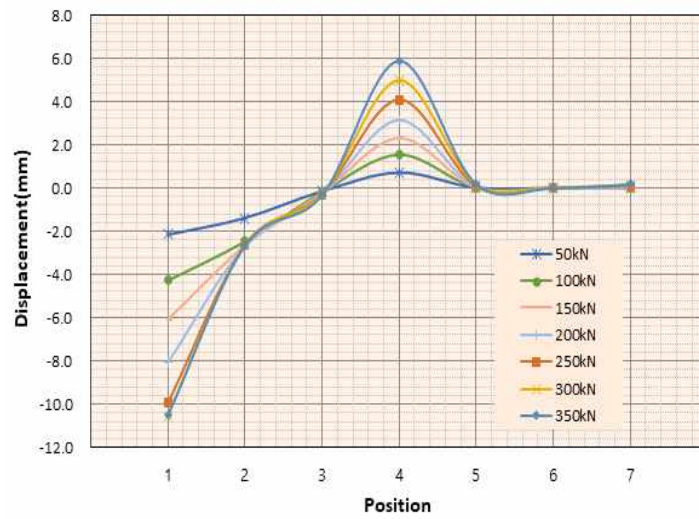


그림 93 거더 단부 H-beam 변위 : case 1

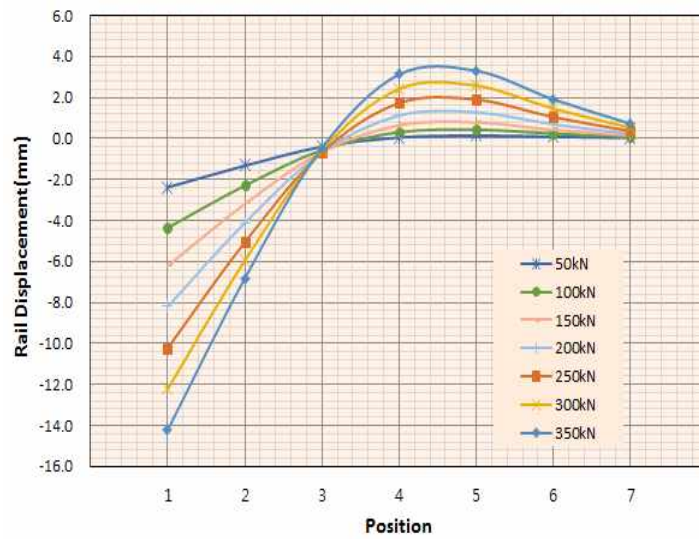


그림 94 거더 단부 레일 변위 : case 1

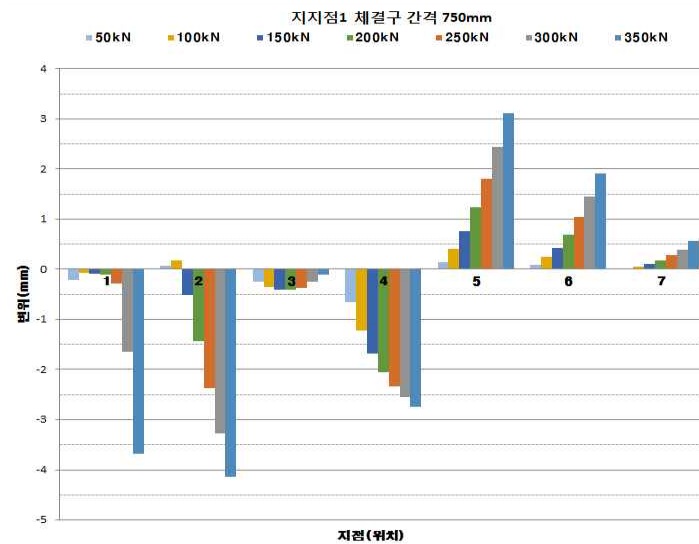


그림 95 레일체결장치 변위 : case 1

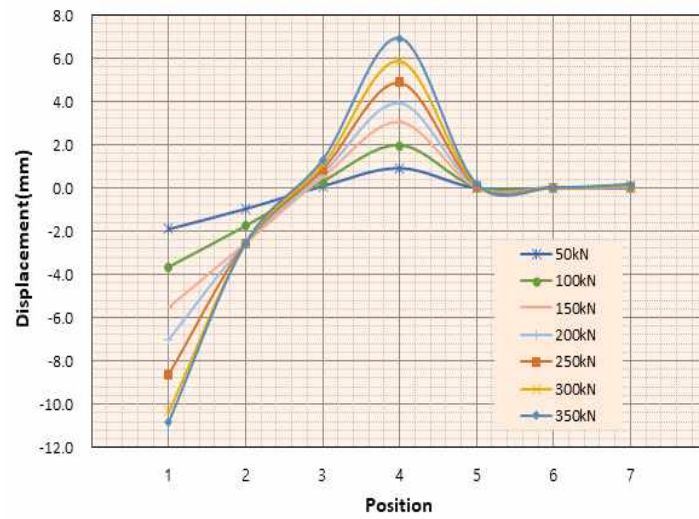


그림 96 거더 단부 H-beam 변위 : case 2

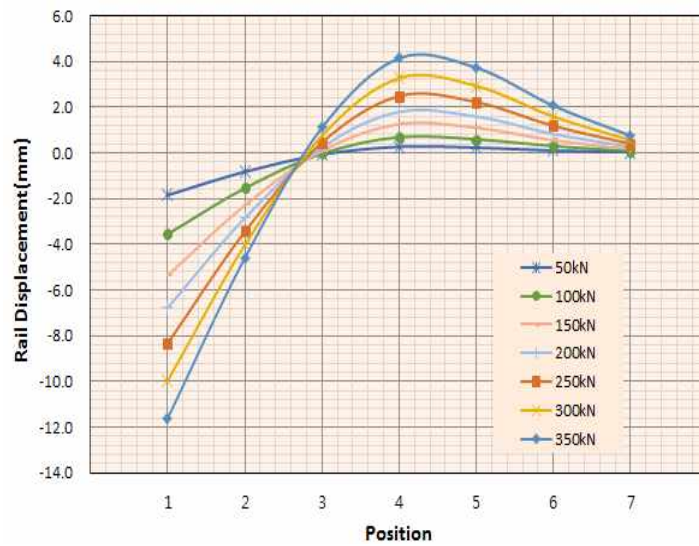


그림 97 거더 단부 레일 변위 : case 2

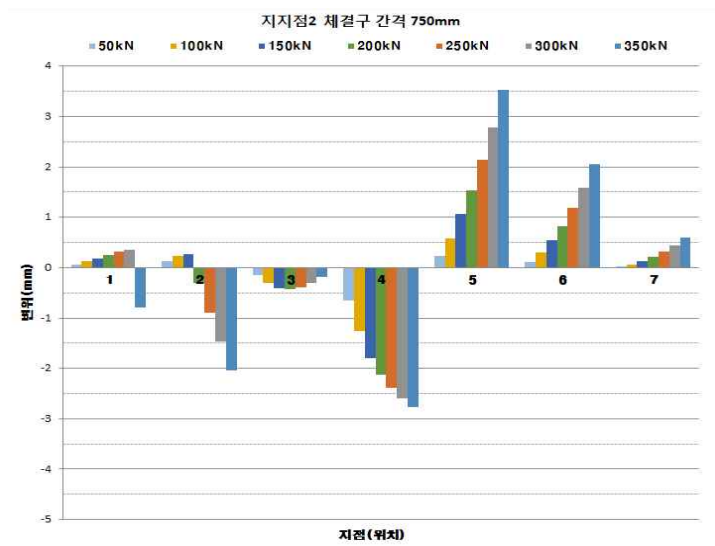


그림 98 레일체결장치 변위 : case 2

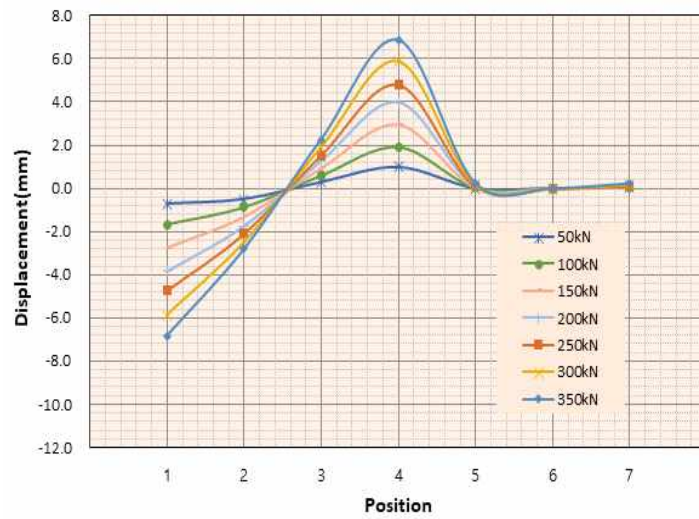


그림 99 거더 단부 H-beam 변위 : case 3

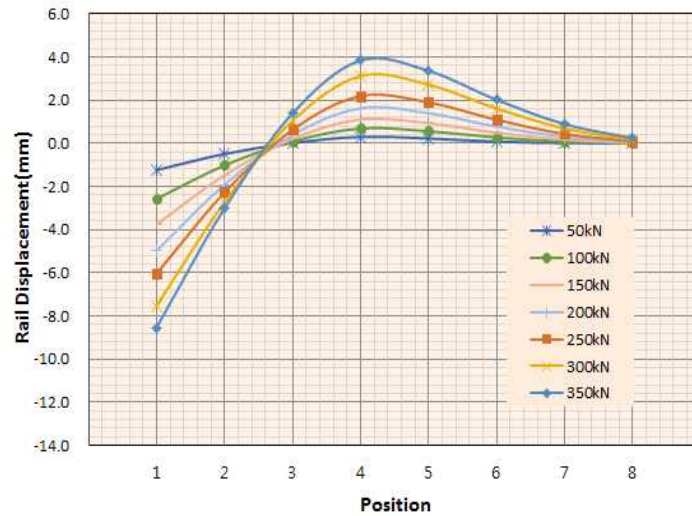


그림 100 거더 단부 레일 변위 : case 3

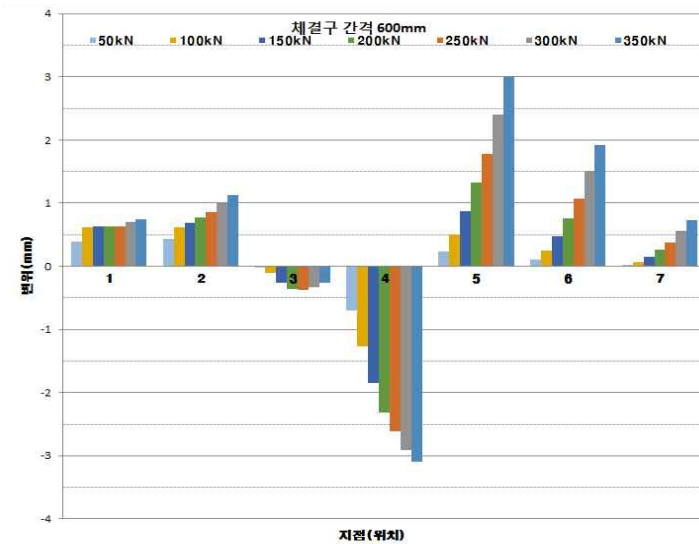


그림 101 레일체결장치 변위 : case 3

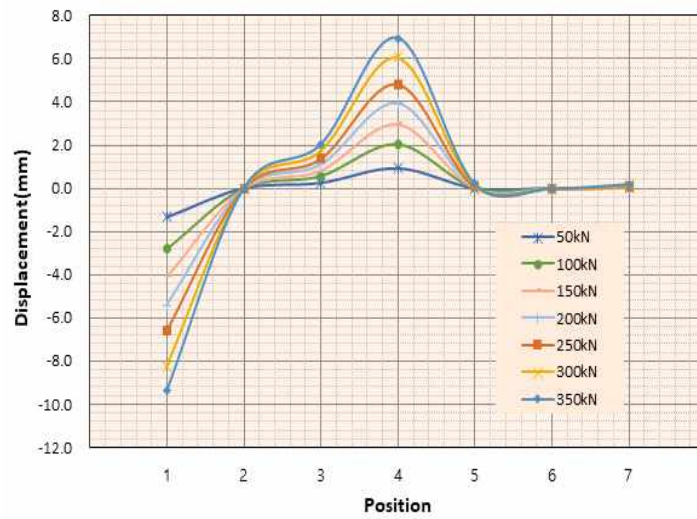


그림 102 거더 단부 H-beam 변위 : case 4

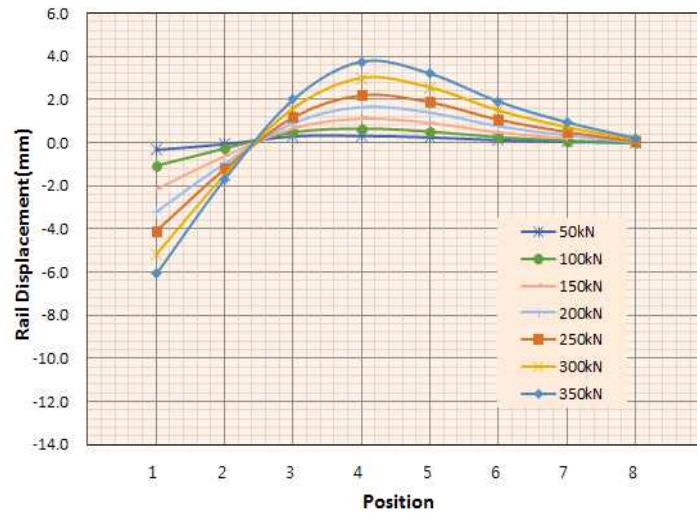


그림 103 거더 단부 레일 변위 : case 4

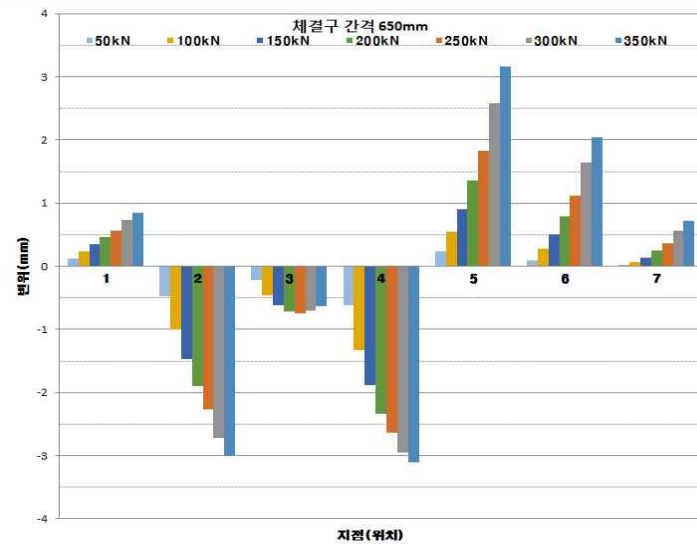


그림 104 레일 체결장치 변위 : case 4

② 교각부

교각부 시험체의 경우, 좌측거더에만 하중을 재하하는 편재하방식과 좌우측거더에 하중을 재하하는 양방향재하방식으로 실험하였다. 편재하방식의 좌측 거더 단부와 레일의 변위는 하중재하위치와 근접한 1번 측정위치에서 최대 (-)변위가 발생하였고, 좌측 거더 마지막 측정위치인 3번 측정위치에서 최대 (+)변위가 발생하였다. 하중재하가 없는 우측 거더 4번~6번 측정위치의 우측 거더와 레일의 변위는 3번 측정위치의 변위값과 유사하게 나타났다. 양방향 재하방식의 경우 좌우 대칭형으로 하중재하위치와 근접한 1번과 6번 측정위치에서 최대 (-)변위가 발생하였으며, 거더 단부 중심인 3번, 4번에서 최대 (+)변위가 발생하였다.

거더 단부, 레일, 레일체결장치 변위 순으로 결과를 정리하였으며, 그 결과는 아래 그림과 같다.

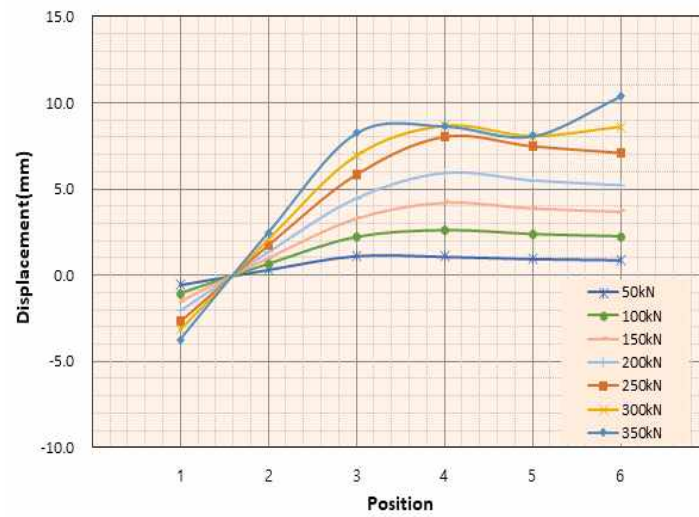


그림 105 거더 단부 H-beam 변위 : case 5-1

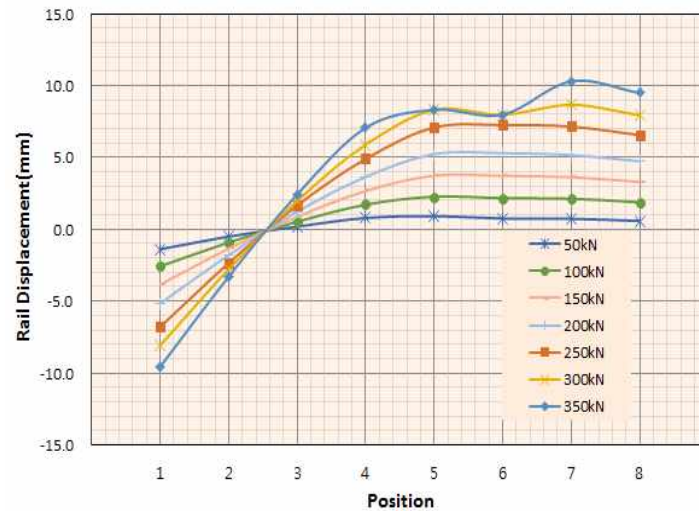


그림 106 거더 단부 레일 변위 : case 5-1

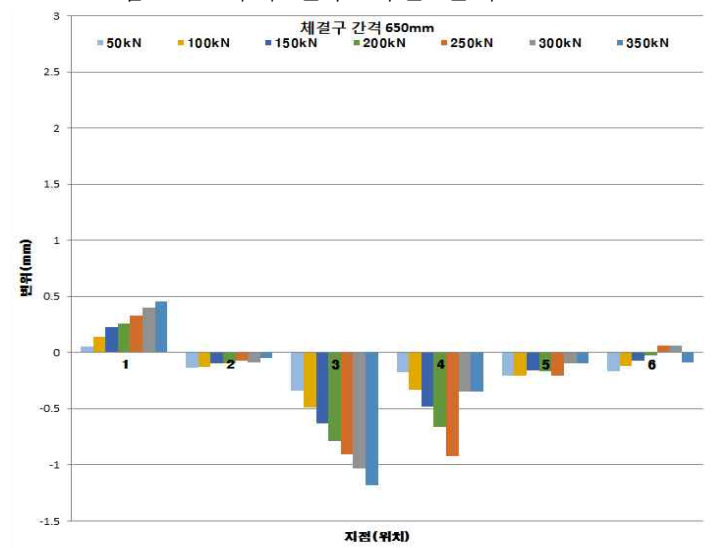


그림 107 레일체결장치 변위 : case 5-1

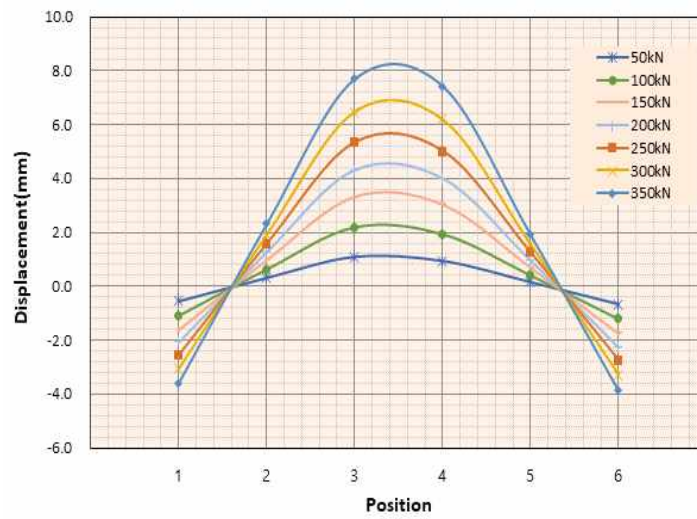


그림 108 거더 단부 H-beam 변위 : case 5-2

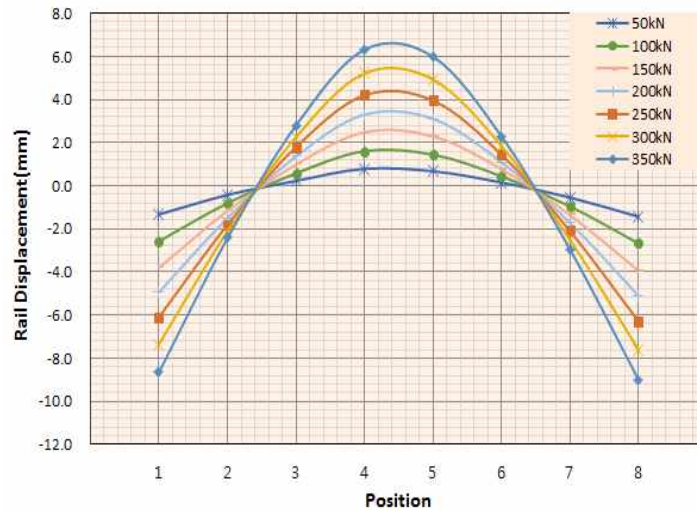


그림 109 거더 단부 레일 변위 : case 5-2

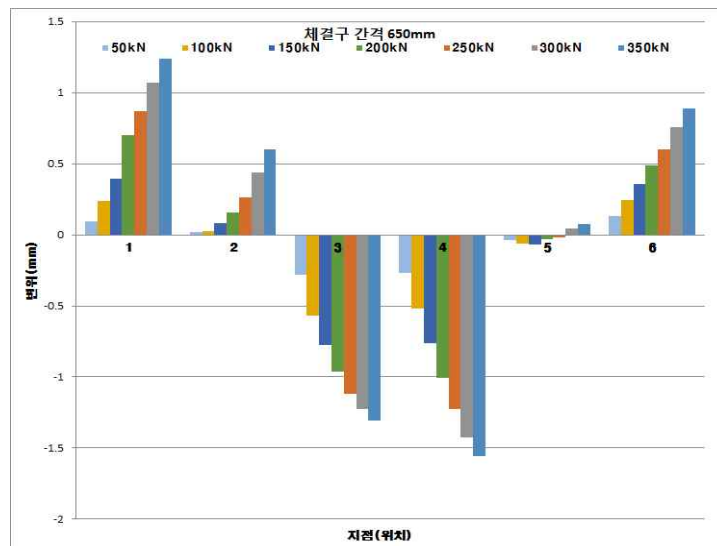


그림 110 레일체결장치 변위 : case 5-2

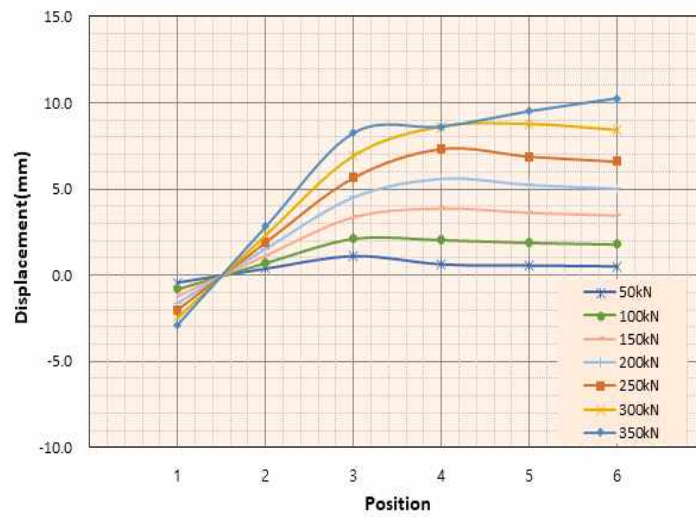


그림 111 거더 단부 H-beam 변위 : case 6-1

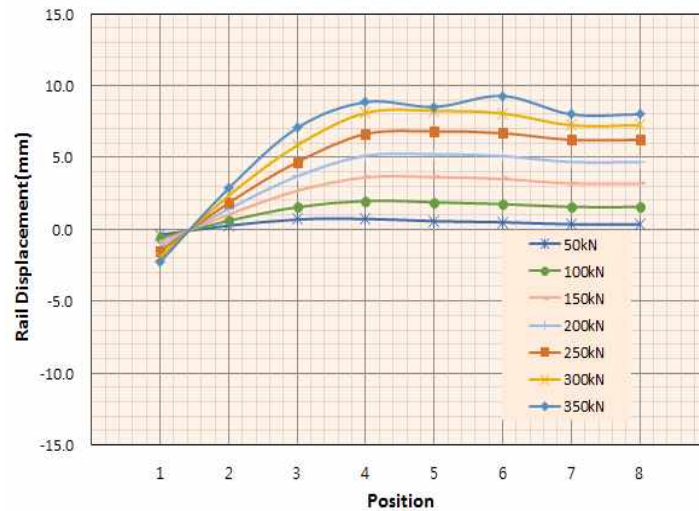


그림 112 거더 단부 레일 변위 : case 6-1

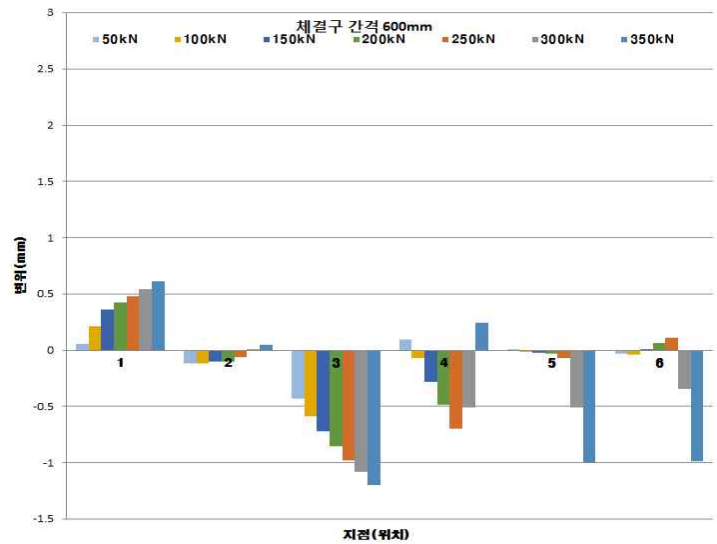


그림 113 레일채결장치 변위 : case 6-1

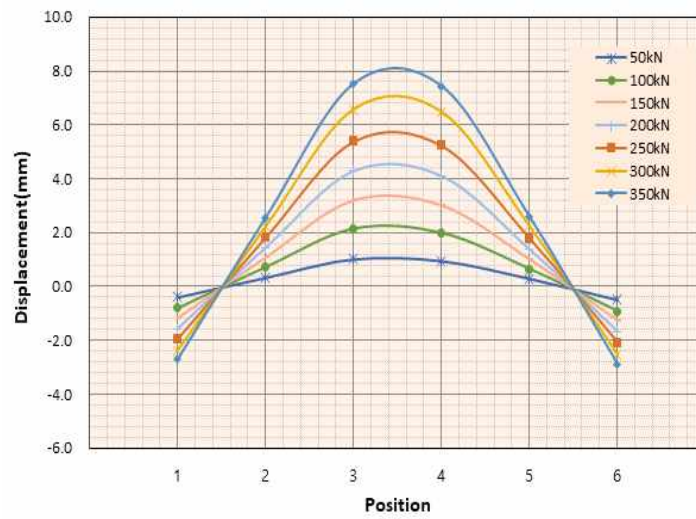


그림 114 거더 단부 H-beam 변위 : case 6-2

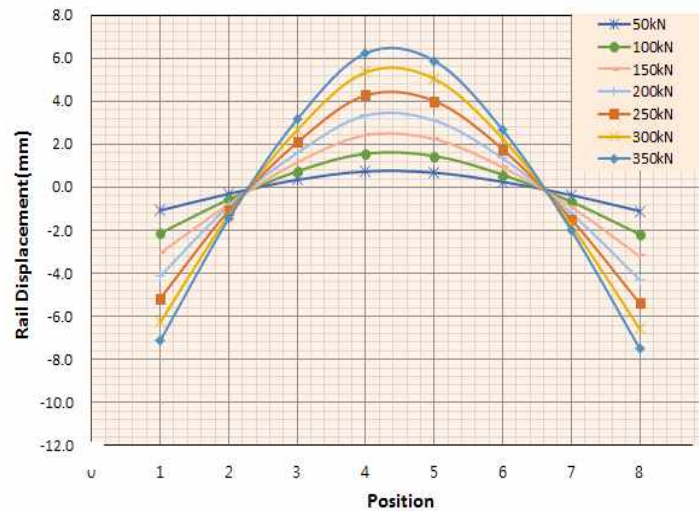


그림 115 거더 단부 레일 변위 : case 6-2

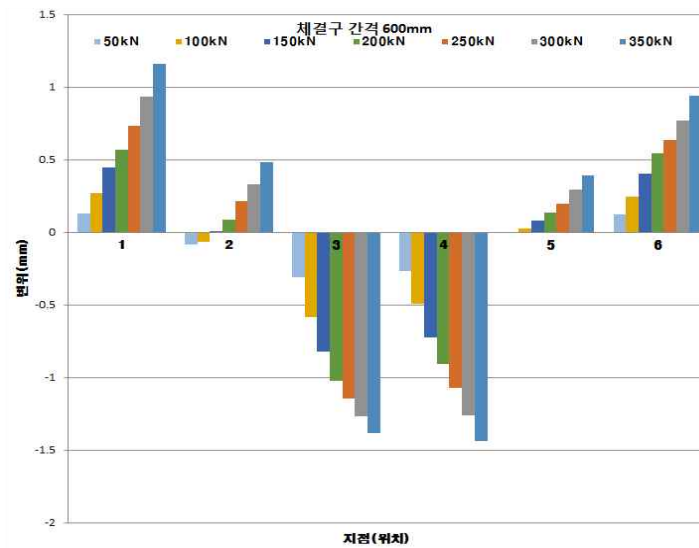


그림 116 레일체결장치 변위 : case 6-2

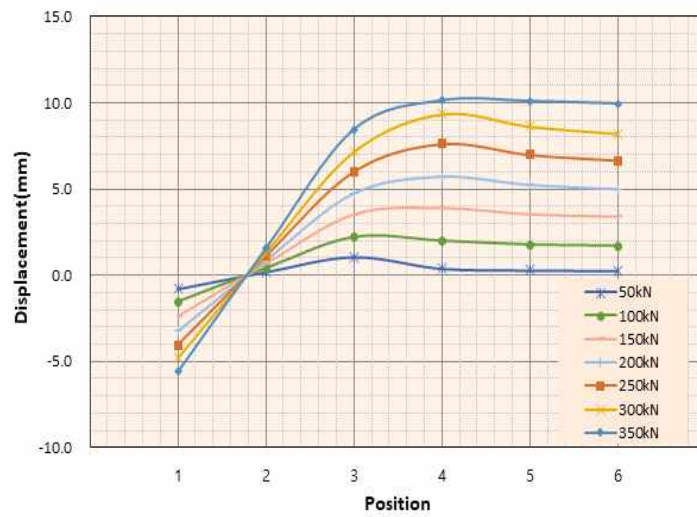


그림 117 거더 단부 H-beam 변위 : case 7-1

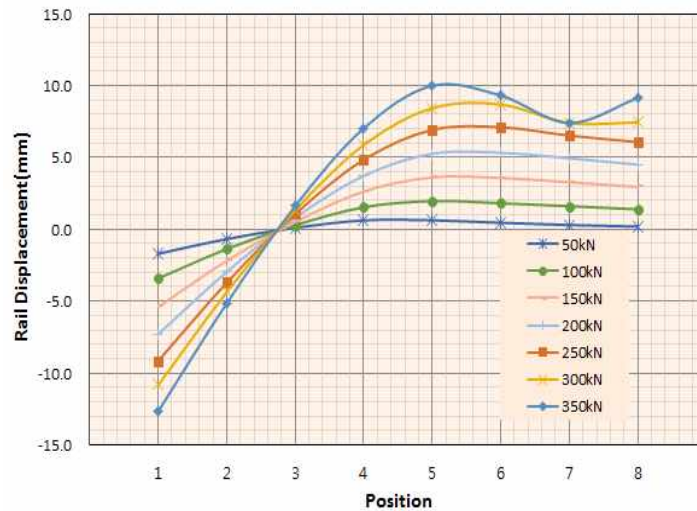


그림 118 거더 단부 레일 변위 : case 7-1

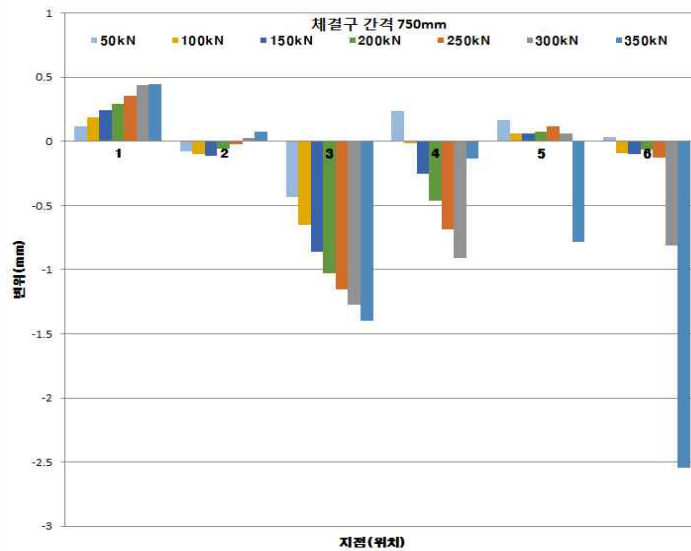


그림 119 레일체결장치 변위 : case 7-1

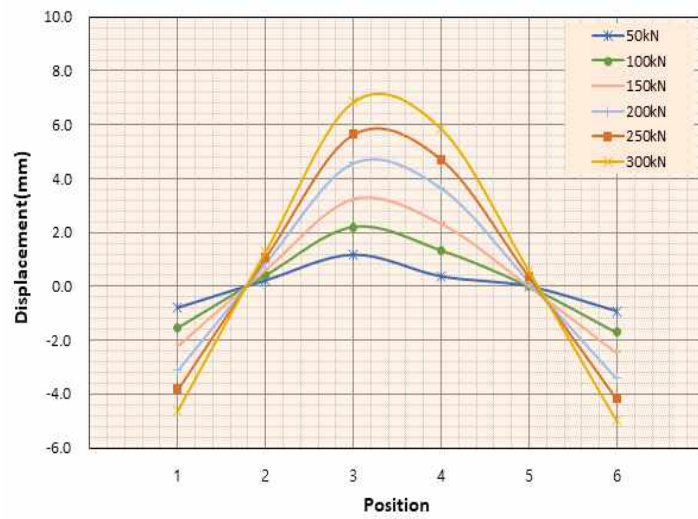


그림 120 거더 단부 H-beam 변위 : case 7-2

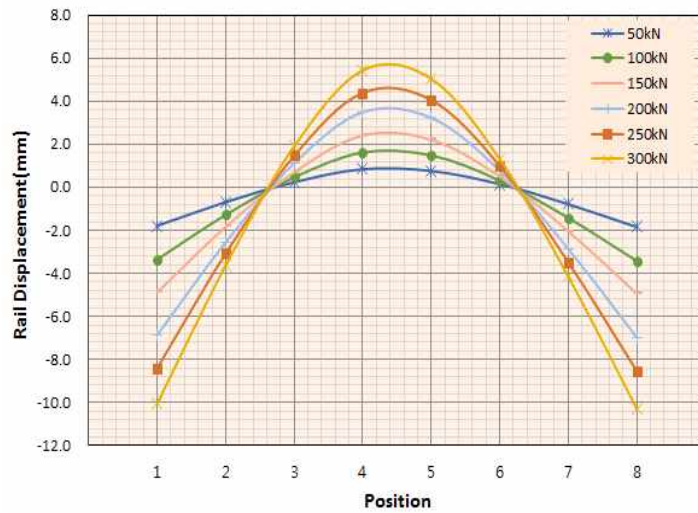


그림 121 거더 단부 레일 변위 : case 7-2

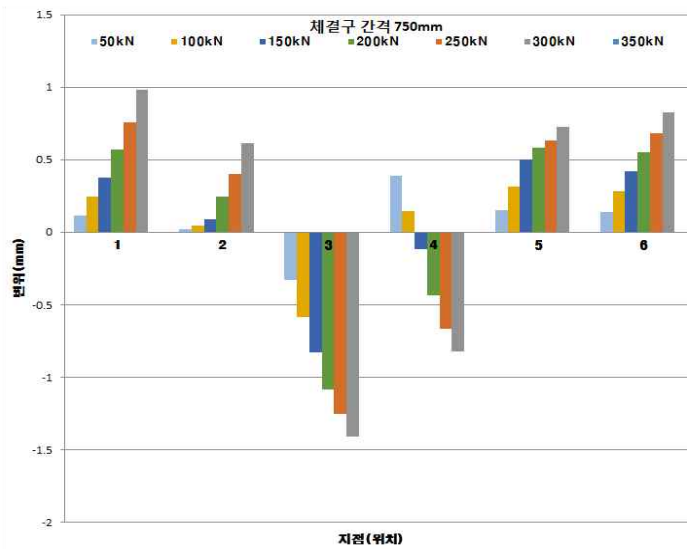


그림 122 레일체결장치 변위 : case 7-2

(나) 실내시험 결과 분석

본 연구에서는 거더의 휨 변형(교량받침의 회전=단부회전)에 따른 거더 단부, 레일, 레일체결장치의 변위를 확인하였고, 교량받침의 위치와 레일체결장치 설치간격에 따라 아래 그림과 같은 경향을 확인하였다.

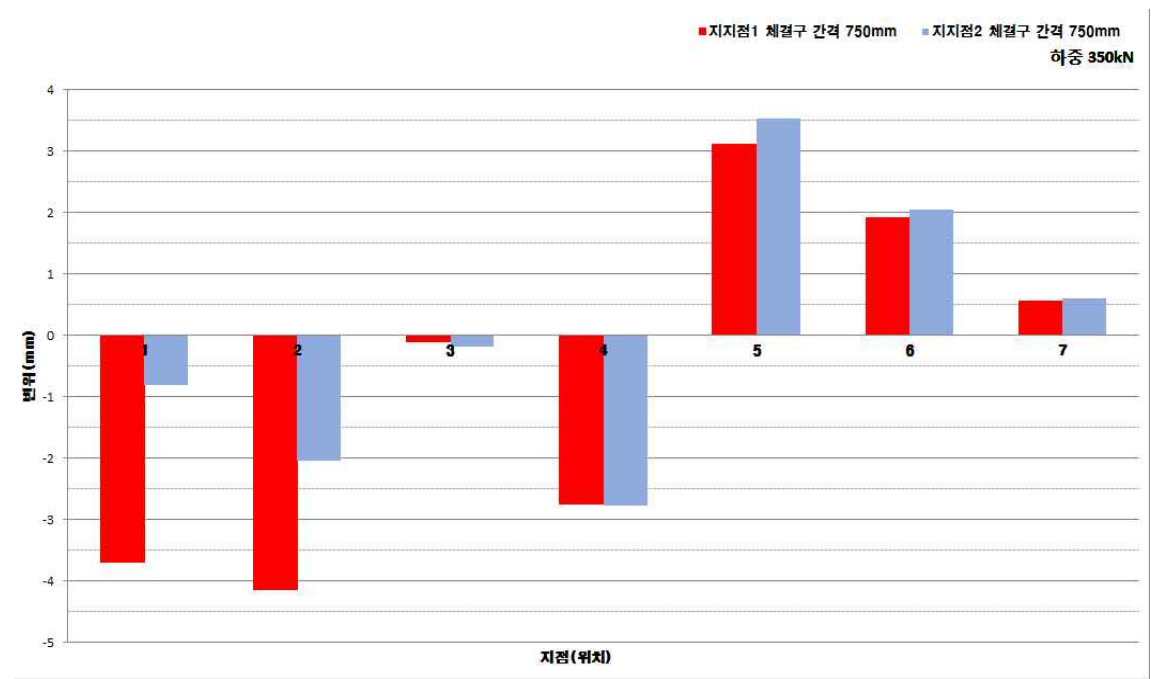


그림 123 교량받침 위치에 따른 레일체결장치 변위 (교대부)

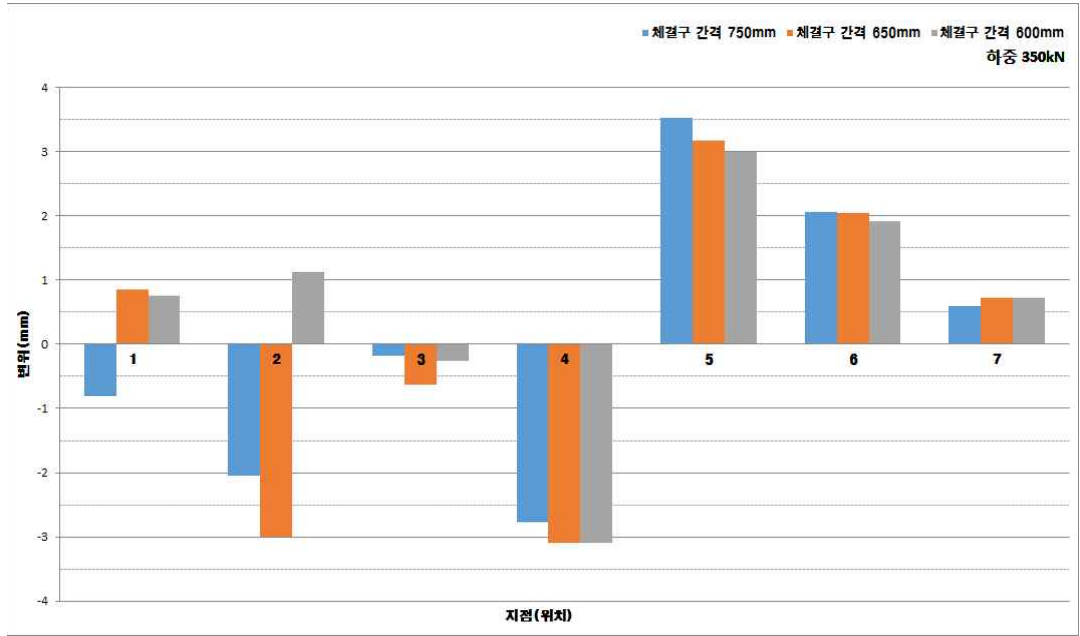


그림 124 레일체결장치 간격에 따른 레일체결장치 변위 (교대부)

교대부의 경우 거더의 휨 변형으로 인한 거더 단부와 레일의 변형 경향은 유사하게 나타났으며, 변위 발생량은 차이가 났다. 이 때, 발생한 변위차는 레일체결장치에 발생하는 변위량으로 (+) 변위량은 체결력과 관계가 있으며, 단부와 근접한 교대부(우측거더) 첫 번째 레일체결장치 위치에서 상향력이 가장 크게 발생하는 것으로 분석되었다.

Case 1, Case 2 비교를 통하여 교량받침 위치에 따른 레일체결장치 변위를 확인하였으며, 교량받침 위치의 변화로 거더 단부의 회전량이 많아질 경우 거더 단부에 설치된 레일체결장치 변위에 차이가 발생하였다. 캔틸레버보 형태의 거더 단부는 교량받침과 거더 끝단간 거리가 멀어질수록(Case 2) 교대부(우측거더) 레일체결장치에서 발생하는 상향력은 증가하였고, 좌측거더 레일체결장치에서 발생하는 압축력은 감소하는 것으로 분석되었다.

또한, 레일체결장치 설치간격에 변화를 준 Case 2, Case3, Case 4를 비교해보면, 레일체결장치 설치간격이 증가할수록 교대부(우측거더) 첫 번째 레일체결장치에서 발생하는 상향력은 증가하고, 좌측거더 레일체결장치에서 발생하는 압축력은 감소하는 경향이 나타났다. 하지만 좌측거더의 경우, 레일체결장치의 간격이 좁아질수록 압축력보다는 상향력이 발생하는 것으로 분석되었다. 이것은 교량받침의 위치와 레일체결장치 설치 위치에 따른 차이로 발생한 것이다. 즉, 철도교량 콘크리트케도 사용성 검토 시 교량받침의 위치와 레일체결장치의 위치를 고려한 해석이 필요할 것으로 판단된다.

마. 철도교량 단부 모형 수치해석

(1) 실내 모형시험에 대한 수치해석 모델

(가) 해석모델

① 교대부

교대부 실내 모형시험체는 다음 그림과 같이 좌측 및 우측 거더 길이는 각각 10.05m 이고, 좌측 경간은 힌지-롤러 받침으로 지지되어 있으며, 오른쪽 교대부는 바닥과 고정되어 있다. 좌측 거더 중앙에서 액추에이터를 이용하여 하중을 가하며, 각 Case에 따른 레일체결장치 간격은 다음 그림에 나타내었다.

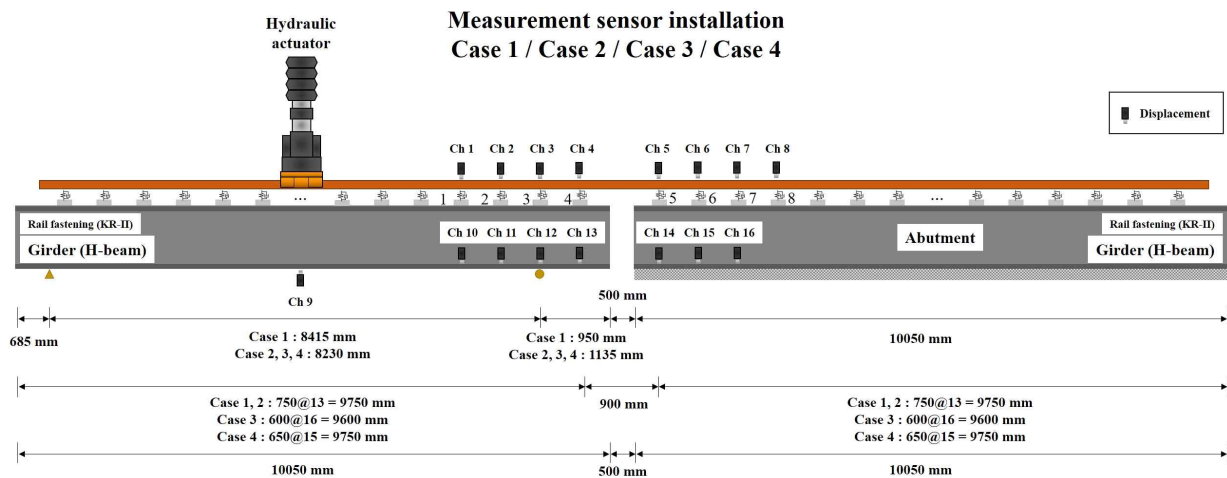


그림 125 실내 모형시험 조건 (교대부)

아래 그림은 교대부 해석모델을 나타내며, 유한요소해석 프로그램인 SAP2000을 사용하여 모델링하였다. 레일 및 거더는 Beam 요소를 사용하였으며, 레일체결장치는 선형해석 시 Linear link를 사용하였고, 비선형해석 시 Multi linear link를 사용하여 모델링하였다. 교대부 지점조건은 실내시험결과와 비교분석을 통해 실내시험결과와 가장 유사한 결과가 도출 될 수 있도록 설정하였다.

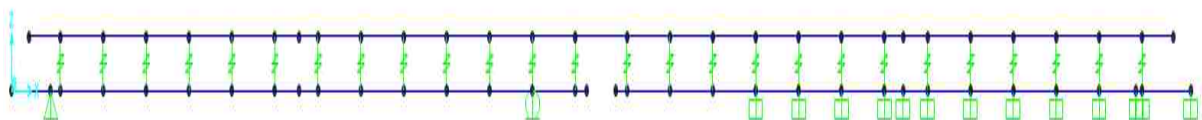


그림 126 교대부 해석모델(SAP2000)

② 교각부

아래 그림은 교각부 실내 모형시험 조건을 나타낸다. 좌측 및 우측 거더 길이는 각각 10.05m 이고, 좌측 경간은 힌지 및 롤러 받침, 우측경간은 롤러-힌지 받침으로 지지되어 있다. 하중은 좌측 및 우측의 액츄에이터를 이용하여 편측재하 또는 양측재하 하였다.

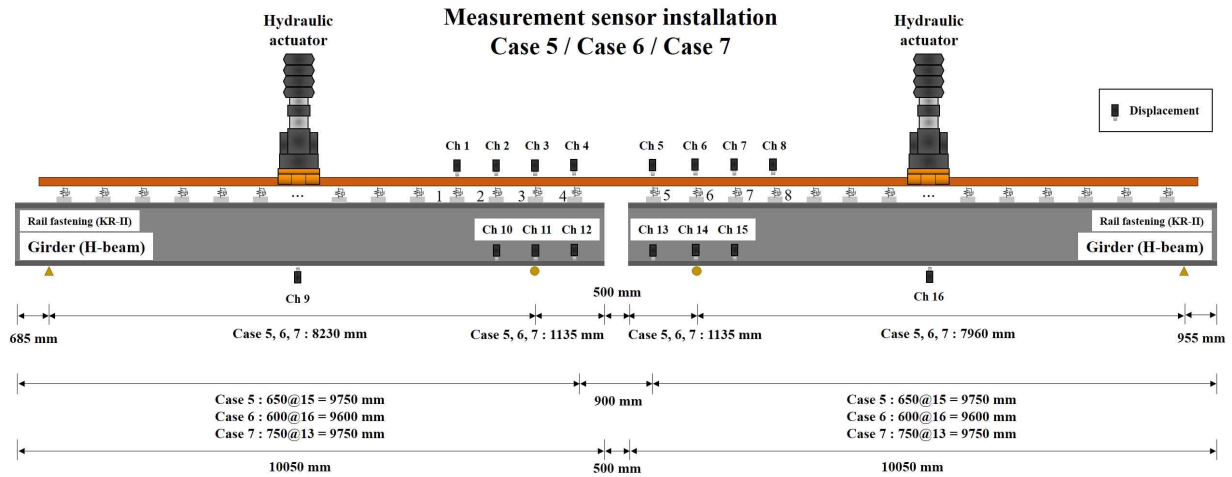


그림 127 실내 모형시험 조건 (교각부)

아래 그림은 상기 교각부 실내 모형시험 조건을 고려한 교각부 해석모델을 나타내며, 유한요소해석 프로그램인 SAP2000을 사용하여 모델링하였다. 교대부와 마찬가지로 레일 및 거더는 Beam 요소로 모델링하였으며, 레일체결장치는 선형해석 시 Linear link를 사용하였고, 비선형해석 시 Multi linear link를 사용하여 모델링하였다. 교각부 지점조건은 실내시험결과 비교분석을 통해 실내시험결과와 가장 유사한 결과가 도출 될 수 있도록 설정하였다.

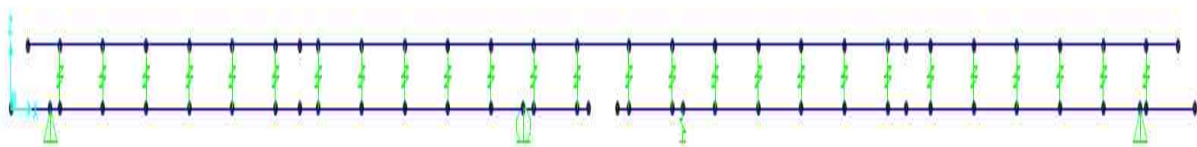


그림 128 교각부 해석모델(SAP2000)

③ 해석 단면

레일 및 거더의 단면은 아래 그림과 같으며, 실내 모형시험 모델 교대부와 교각부의 단면을 나타낸다.

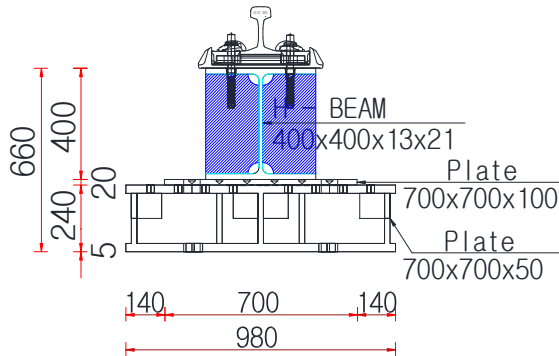


그림 129 교대부 단면

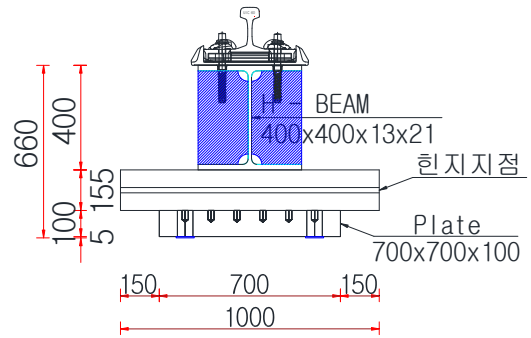


그림 130 교각부 단면

④ 해석모델 제원

아래 표는 실내 모형시험에 사용된 레일 및 레일체결장치, 거더의 제원과 수치해석모델의 입력값을 나타낸다. 수치해석과 실내시험의 동기화를 위하여 거더의 탄성계수를 일반 강재의 탄성계수보다 작게 수정하였다.

표 19 수치해석 모델 제원

구분		단면적 (m ²)	단면2차모멘트 (m ⁴)	탄성계수 (N/m ²)	강성 (kN/mm)	비고
① 레일	KR60	0.0774	3.083e-5	1.860e+11	-	Beam
② 레일체결장치	KR-II	-	-	-	30	Linear link
		-	-	-	그림 131 참조	Multi linear link
③ H-Beam(mm)	400x400x13x21	0.0215	6.536e-4	1.860e+11	-	Beam

선형해석에서의 레일체결장치의 강성은 30kN/mm를 사용하였으며, 비선형해석에서는 다음그림과 같은 하중 변위곡선을 이용하여 레일체결장치의 비선형을 고려하였다.

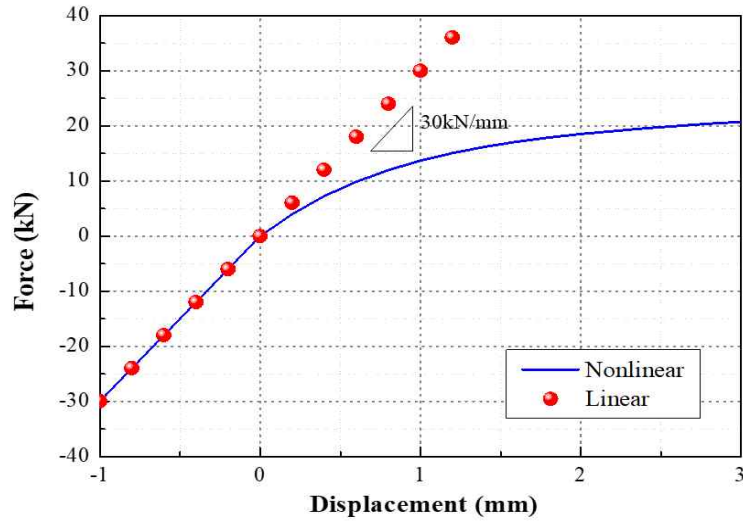


그림 131 선형 및 비선형 레일체결장치 강성
(하중 vs 변위 곡선)

(나) 수치해석 Case

실내시험 모델의 수치해석 Case는 다음 표와 같다.

표 20 수치해석 Case

구 분	체결구간격 (mm)	교량받침 위치	모 델	하중조건		
Case 1	750	1번 지지점	교대부	Statics	0~350kN, 50kN단위 STEP	
Case 2	750	2번 지지점		Statics	0~350kN, 50kN단위 STEP	
Case 3	600	2번 지지점		Statics	0~350kN, 50kN단위 STEP	
Case 4	650	2번 지지점		Statics	0~350kN, 50kN단위 STEP	
Case 5-1	650	2번 지지점	교각부	Statics	0~400kN, 100kN단위	좌측거더 재하 (편측재하)
Case 5-2						좌,우측 거더 재하 (양측재하)
Case 6-1	600	2번 지지점		Statics	0~400kN, 100kN단위	좌측거더 재하 (편측재하)
Case 6-2						좌,우측 거더 재하 (양측재하)
Case 7-1	750	2번 지지점		Statics	0~400kN, 100kN단위	좌측거더 재하 (편측재하)
Case 7-2						좌,우측 거더 재하 (양측재하)
Case 8-2	750	1번 지지점		Statics	0~400kN, 100kN단위	좌,우측 거더 재하 (양측재하)

(2) 실내 모형시험에 대한 수치해석 결과 및 분석

(가) 레일체결장치의 강성을 선형 거동으로 고려한 경우

① 교대부

그림 132 거더 변위: Case 1

그림 133 레일 변위: Case 1

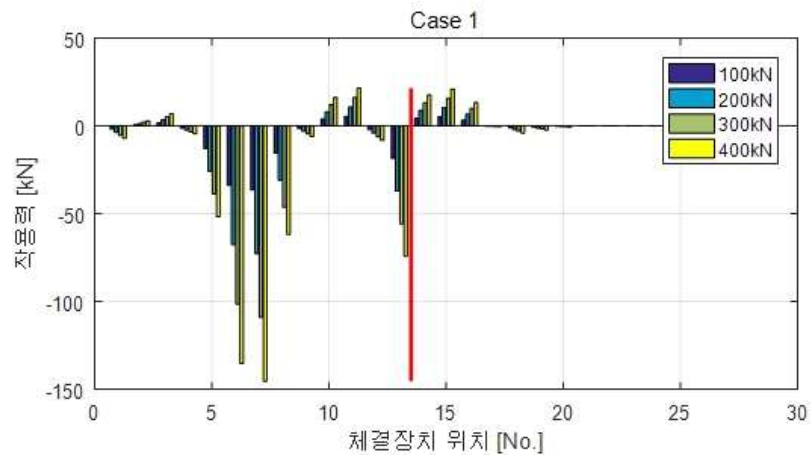


그림 134 레일체결장치에 발생하는 작용력: Case 1

그림 135 거더 변위: Case 2

그림 136 레일 변위: Case 2

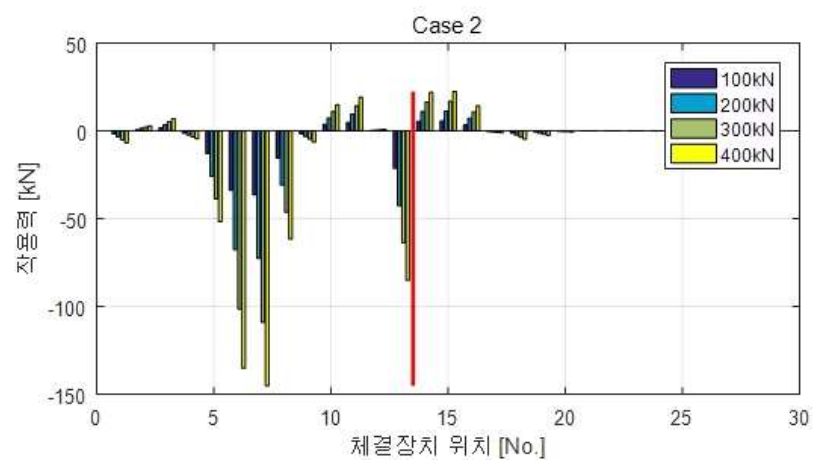


그림 137 레일체결장치에 발생하는 작용력: Case 2

그림 138 거더 변위: Case 3

그림 139 레일 변위: Case 3

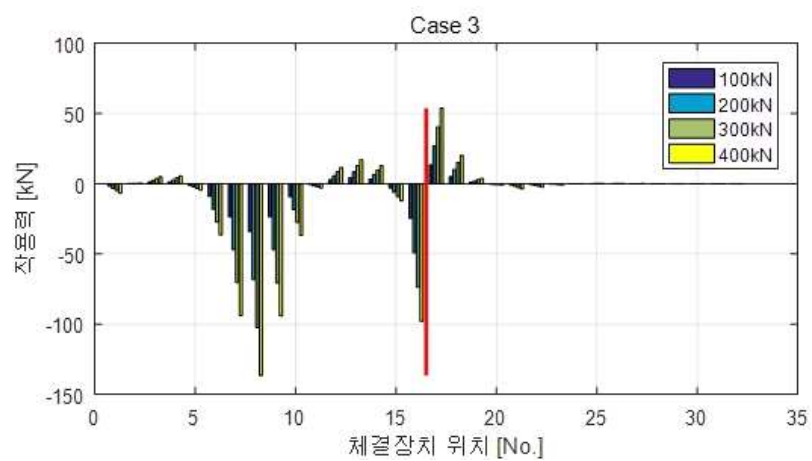


그림 140 레일체결장치에 발생하는 작용력: Case 3

그림 141 거더 변위: Case 4

그림 142 레일 변위: Case 4

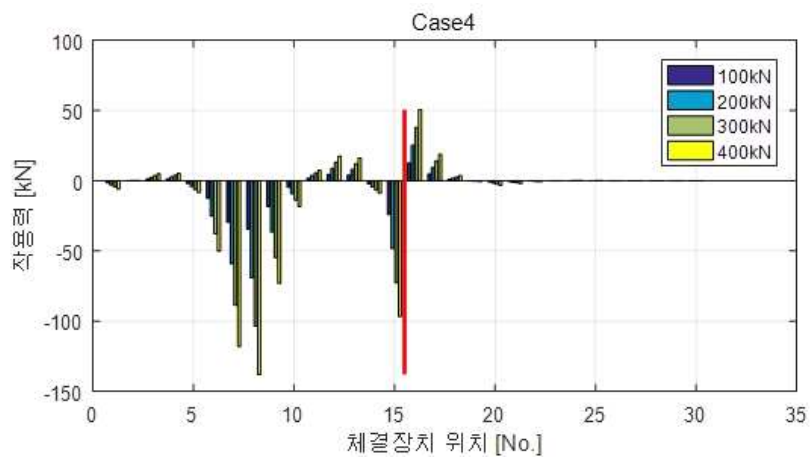


그림 143 레일체결장치에 발생하는 작용력: Case 4

상기 그림들은 교대부를 모형화한 Case 1~4에서 좌측거더 중앙에 100~400kN의 하중을 재하 할 때 거더, 레일의 변위와 레일체결장치에서 발생하는 작용력을 나타낸 결과이다. 레일체결장치에 발생하는 작용력 그래프에서 빨강색 선은 단부를 구분하기 위한 선을

나타낸다.

아래 그림은 교량받침 위치에 따른 레일체결장치 작용력과 레일체결장치 간격에 따른 레일체결장치 작용력을 비교하여 나타낸 결과이다.

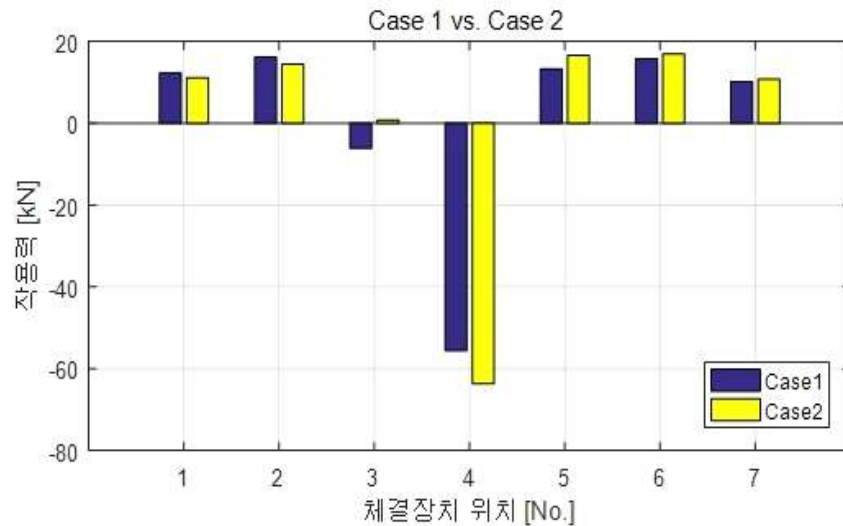


그림 144 교대부 교량받침 위치에 따른 작용력 비교
(Case 1 vs Case 2)

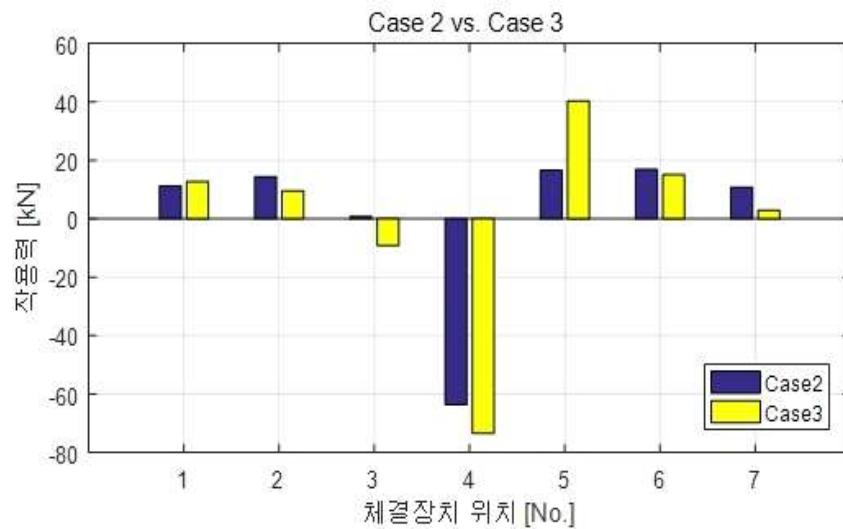


그림 145 교대부 레일체결장치 간격에 따른 작용력 비교
(Case 2 vs Case 3)

교대부에서 교량받침 위치에 따른 레일체결장치 작용력을 비교한 결과(Case 1 vs Case 2), 교량받침 위치 변화에 따른 거더 단부 길이의 증가는 교대부 좌측 거더의 마지막 레일체결장치의 압축력을 증가시키고, 교대부 레일체결장치의 상향력을 증가시키는 것으로 분석되었다.

교대부에서 레일체결장치 간격에 따른 레일체결장치 작용력을 비교한 결과(Case 2 vs Case 3), 레일체결장치 간격의 감소는 교대부 좌측 거더의 마지막 레일체결장치의 압축력을 증가시키고, 교대부 레일체결장치의 상향력을 증가시키는 것으로 분석되었다. 이것은 동일한 교량받침 위치 조건에서 레일체결장치 설치간격이 좁을수록 교대부(우측거더) 레일체결장치와 더 근접해짐에 따라 교대부(우측거더) 첫 번째 레일체결장치에 더 큰 변위가 발생하기 때문이다.

② 교각부

그림 146 거더 변위: Case 5

그림 147 레일 변위: Case 5

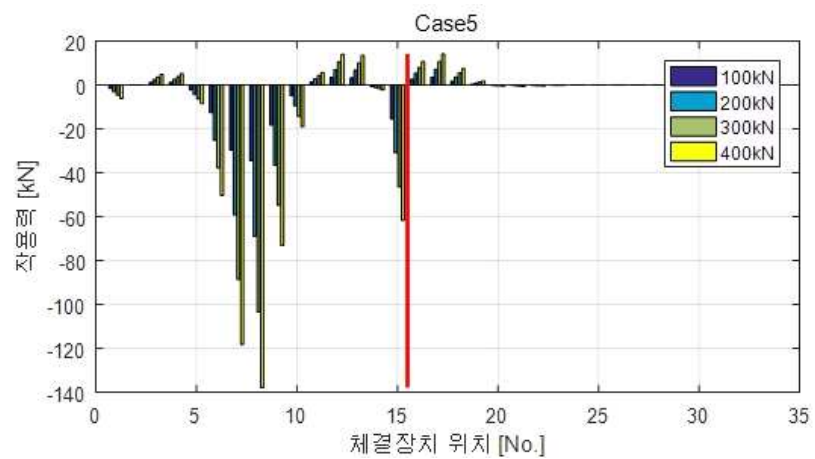


그림 148 레일체결장치에 발생하는 작용력: Case 5

그림 149 거더 변위: Case 5-2

그림 150 레일 변위: Case 5-2

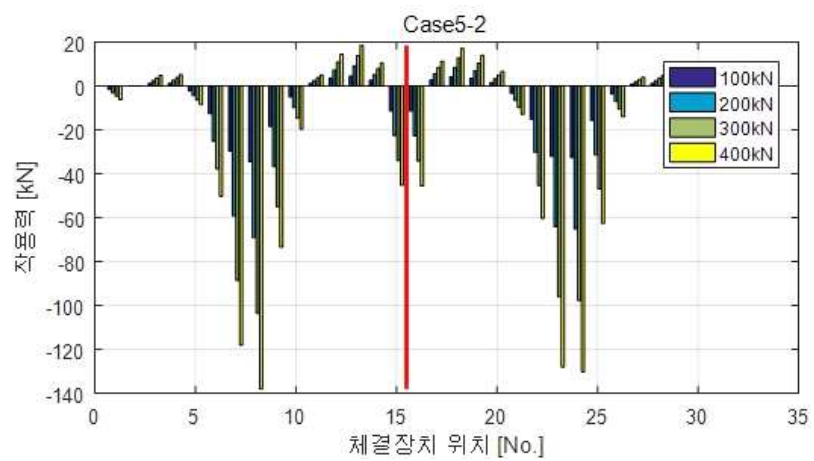


그림 151 레일체결장치에 발생하는 작용력: Case 5-2

그림 152 거더 변위: Case 6

그림 153 레일 변위: Case 6

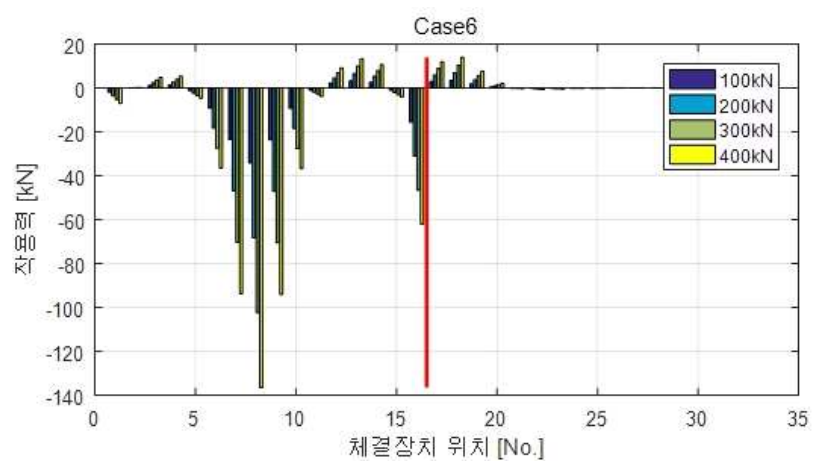


그림 154 레일체결장치에 발생하는 작용력: Case 6

그림 155 거더 변위: Case 6-2

그림 156 레일 변위: Case 6-2

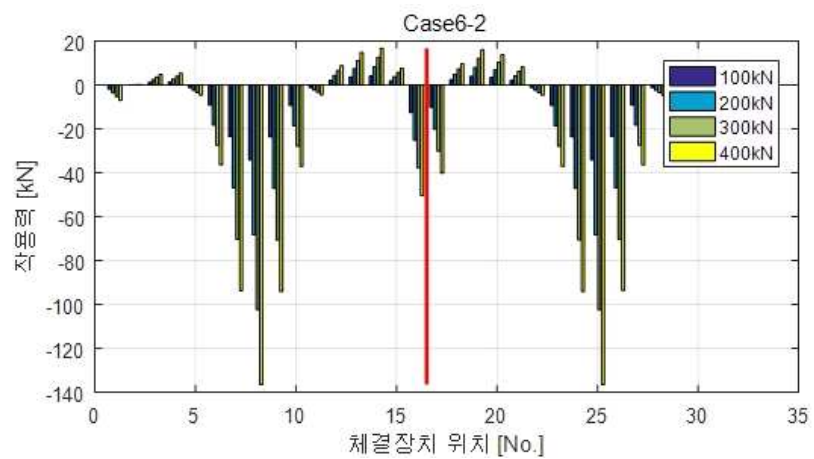


그림 157 레일체결장치에 발생하는 작용력: Case 6-2

그림 158 거더 변위: Case 7-1

그림 159 레일 변위: Case 7-1

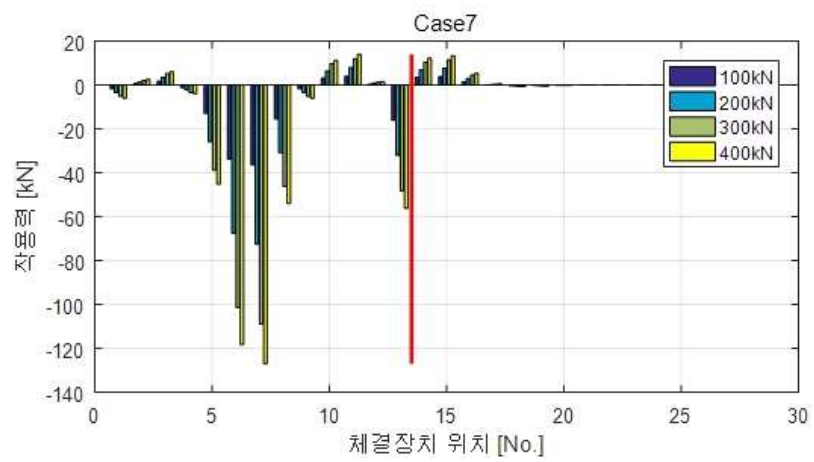


그림 160 레일체결장치에 발생하는 작용력: Case 7-1

그림 161 거더 변위: Case 7-2

그림 162 레일 변위: Case 7-2

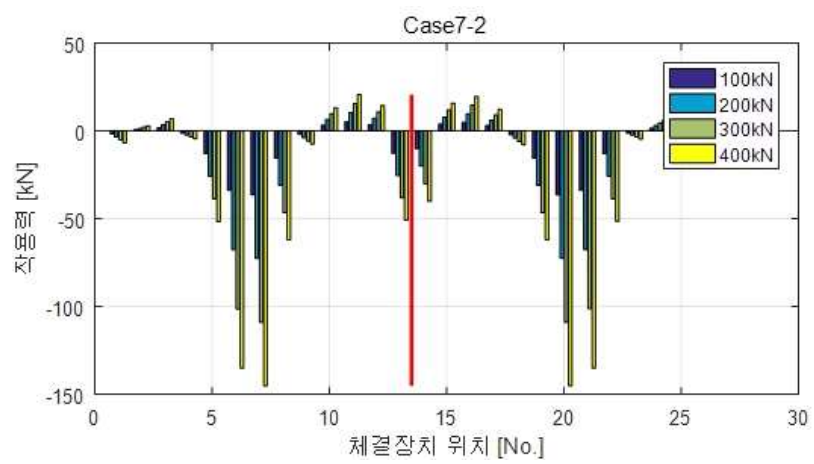


그림 163 레일체결장치에 발생하는 작용력: Case 7-2

그림 164 거더 변위: Case 8-2

그림 165 레일 변위: Case 8-2

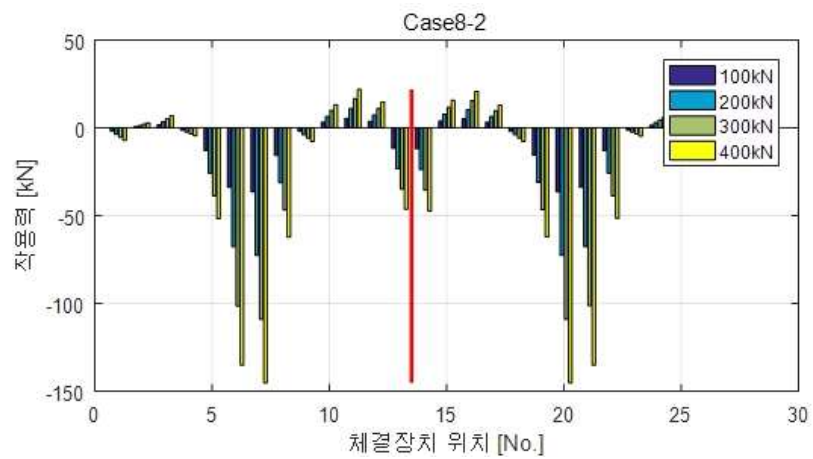


그림 166 레일체결장치에 발생하는 작용력: Case 8-2

상기 그림들은 교각부를 모형화한 Case 5~8에서 좌측거더 중앙에 100~400kN의 하중을 편측재하한 경우와 좌, 우측 거더 중앙에 하중을 양측재하한 경우에 거더, 레일의 변위와 레일체결장치에서 발생하는 작용력을 나타낸 결과이다. 레일체결장치에 발생하는 작

용력 그래프에서 빨강색 선은 단부를 구분하기 위한 선을 나타낸다.

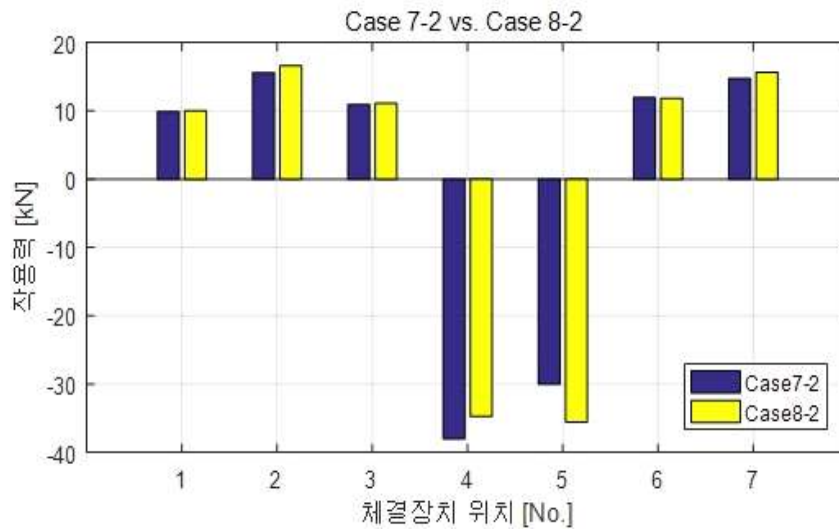


그림 167 교각부 교량받침 위치에 따른 작용력 비교 - 양측재하
(Case 7-2 vs Case 8-2)

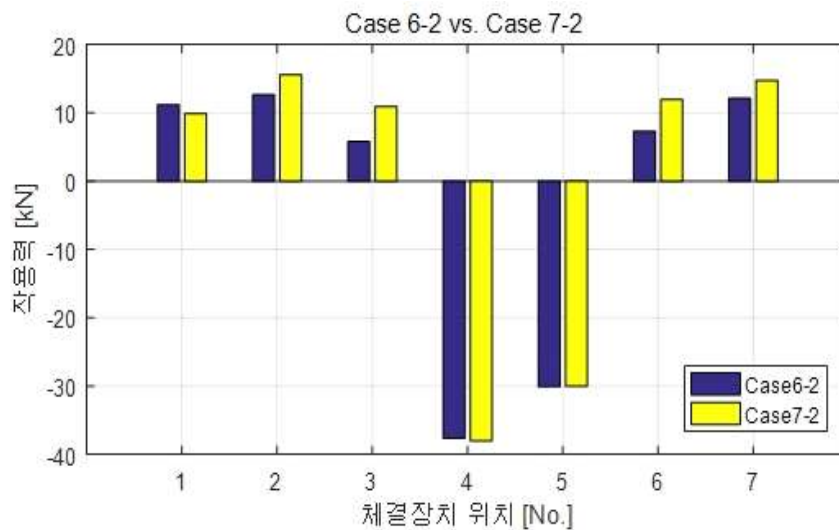


그림 168 교각부 레일체결장치 설치간격에 따른 작용력 비교 - 양측재하
(Case 6-2 vs Case 7-2)

상기 그림으로부터 양측재하로 인해 거더 단부 마지막 레일체결장치에서는 압축력이 발생하고, 양측 거더 단부의 두번째~네번째 레일체결장치에서는 상향력이 발생하였다. 교각부에서 양측거더에 하중이 재하될 때 교량받침 위치에 따른 레일체결장치 작용력을 비교한 결과(Case 7-2 vs Case 8-2), 교량받침 위치 변화에 따른 거더 단부 길이의 증가

는 교각부 좌측 거더의 마지막 레일체결장치의 압축력을 증가시키고, 교각부 우측 거더 첫번째 레일체결장치의 압축력은 감소시키는 것으로 나타났으며, 상향력의 차이는 크지 않은 것으로 나타났다. 즉, 상기 Bar 그래프는 교각부의 지지점 위치조건에 따른 거더 단부 레일체결장치에서의 작용력을 확인하기 위한 비교결과이며, 교대부와는 달리 지지점 위치조건에 따라 크게 영향을 주지 않는 것으로 나타났다.

교각부에서 양측재하 시 레일체결장치 간격에 따른 레일체결장치 작용력을 비교한 결과(Case 6-2 vs Case 7-2), 양측 거더 마지막 레일체결장치에서 발생하는 압축력의 차이는 미소하였으며, 단부 두 번째~네 번째 레일체결장치의 상향력에는 차이가 발생하였다. 레일체결장치 간격의 감소는 교각부 좌, 우측 레일체결장치의 상향력을 감소시키는 것으로 분석되었다. 이 결과는 교대부에서의 결과와 다른 경향을 보이고 있다. 즉, 교각부 거더 단부에서 레일체결장치에 작용하는 작용력은 지지점 위치조건 및 레일체결장치 설치 간격에 따라 레일체결장치 작용력에 미치는 영향이 교대부 만큼 크지 않은 것으로 나타났다.

(나) 레일체결장치의 강성(선형 또는 비선형 거동) 고려방법에 따른 비교 분석

본 절에서는 레일체결장치의 강성을 선형 또는 비선형 거동으로 고려하여 해석한 결과와 실내 모형시험 결과를 비교 분석하였다. 비선형 해석에서는 레일체결장치의 강성을 레일 레일체결장치의 체결력 시험 결과를 사용하였다. 비선형 해석결과의 타당성을 검토하기 위하여 선형해석결과와 실내시험 결과를 비교하였다.

아래 그림은 교대부 레일체결장치 위치를 번호로 나타내고 있으며, 실내시험 및 수치 해석에서의 레일 및 레일체결장치의 위치는 아래 그림에서의 위치로 통일하여 비교 분석하였다.

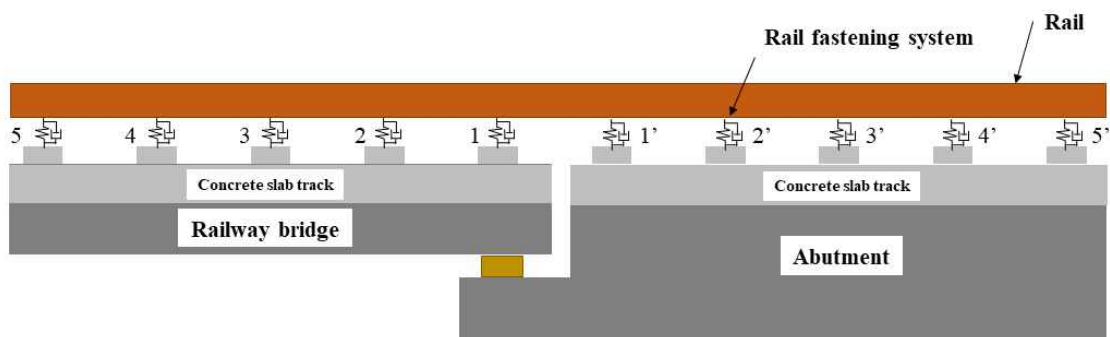


그림 169 교대부 레일체결장치 위치

① 실내 모형시험 결과 vs. 선형 해석결과

㉓ Case 2

아래 그림에서는 Case 2 모델(교대부, 레일체결장치 간격 750mm, 거더 단부로부터 교량받침까지의 거리 1,135mm)의 실내 모형시험 결과와 선형 해석결과를 비교하여 나타내었다. 압축을 받는 좌측거더 레일의 경우 실내시험과 선형해석에서 비슷한 경향을 보이고 있지만, 좌측거더 레일체결장치 변위(상향력)와 우측거더(교대부) 레일 변위 및 레일체결장치 변위(상향력)에서는 실내 모형시험 결과와 큰 차이를 보이고 있다.

그림 170 실내시험 vs. 선형해석: 좌측거더 레일 변위

그림 171 실내시험 vs. 선형해석: 좌측거더 레일체결장치 변위

그림 172 실내시험 vs. 선형해석: 우측거더 레일 변위

그림 173 실내시험 vs. 선형해석: 우측거더 레일체결장치 변위

㉞ Case 3

아래 그림은 Case 3 모델(교대부, 레일체결장치 간격 600mm, 거더 단부로부터 교량받침까지의 거리 1,135mm)의 실내 모형시험 결과와 선형 해석결과를 나타내고 있다. 우측 거더 레일 및 레일체결장치에서는 작은 하중에 대해서 실내시험 결과와 비슷한 경향을 보이지만, 하중이 증가할수록 큰 차이를 보이고 있다.

그림 174 실내시험 vs. 선형해석: 좌측거더 레일 변위

그림 175 실내시험 vs. 선형해석: 좌측거더 레일체결장치 변위

그림 176 실내시험 vs. 선형해석: 우측거더 레일 변위

그림 177 실내시험 vs. 선형해석: 우측거더 레일체결장치 변위

② 실내 모형시험 결과 vs. 비선형해석결과

㉓ Case 2

아래 그림은 Case 2 모델(교대부, 레일체결장치 간격 750mm, 거더 단부로부터 교량받침까지의 거리 1,135mm)의 실내 모형시험 결과와 비선형 해석결과를 나타내고 있다. 좌측 및 우측 거더의 레일 및 레일체결장치 변위 해석결과가 실내 모형시험 결과와 유사한 결과를 보이고 있다.

그림 178 실내시험 vs. 비선형해석: 좌측거더 레일 변위

그림 179 실내시험 vs. 비선형해석: 좌측거더 체결장치 변위

그림 180 실내시험 vs. 비선형해석: 우측거더 레일 변위

그림 181 실내시험 vs. 비선형해석: 우측거더 체결장치 변위

㉡ Case 3

아래 그림은 Case 3 모델(교대부, 레일체결장치 간격 600mm, 거더 단부로부터 교량받침까지의 거리 1,135mm)의 실내 모형시험 결과와 비선형 해석결과를 나타내고 있다. 좌측 및 우측 거더의 레일 및 레일체결장치 변위 해석결과가 실내 모형시험 결과와 유사한 결과를 보이고 있다.

그림 182 실내시험 vs. 비선형해석: 좌측거더 레일 변위

그림 183 실내시험 vs. 비선형해석: 좌측거더 체결장치 변위

그림 184 실내시험 vs. 비선형해석: 우측거더 레일 변위

그림 185 실내시험 vs. 비선형해석: 우측거더 체결장치 변위

(2) 소결론

실내 모형시험에 대한 수치해석에서는 유한요소해석 소프트웨어인 SAP2000을 이용하여 지지점 위치조건 및 레일체결장치 설치간격에 따른 Case별로 선형 및 비선형 해석을 수행하였다.

- 레일체결장치의 강성을 선형 거동으로 모사한 선형해석의 경우, 교대부 거더 단부에서는 지지점의 위치 변화 및 침묵간격에 따라 레일체결장치 작용력이 큰 차이를 보였으나, 교각부 거더 단부에서는 그 차이가 크게 나타나지 않았다.
- 실내 모형시험 결과와 선형해석결과 및 비선형 해석결과를 비교하였으며, 선형해석의 경우 작은 하중 또는 변위에서는 실내 모형시험과 비슷한 경향을 보이고 있으나, 큰 하중 및 큰 변위에서는 실내 모형시험 결과와 큰 차이를 보이는 것으로 분석되었다.
- 레일체결장치의 강성을 비선형 거동으로 모사한 비선형 해석결과의 경우, 실내시험 결과와 유사한 경향을 보임을 확인하였다.

바. 철도교량 단부 콘크리트궤도 사용성 검토 영향인자 보정

철도교량 단부 콘크리트궤도 사용성 검토는 교량단부의 거동에 의해 레일에서 발생하는 상향력과 압축력에 대한 레일체결장치의 사용성을 검토하는 것이 목적이다. 현재 국내 기준(KR C-08090)에서는 레일체결장치의 정/동적 수직강성값을 적용하고 있다. 레일체결장치의 정/동적 수직강성 시험방법에 의해 도출된다. KRS TR 0014-15R에서 제시하고 있는 정/동적 수직강성 시험방법은 수직하방향(↓)에 대한 결과값이다. 즉, 단부 사용성 검토 시 압축력에 대해서는 레일체결장치의 정/동적 수직강성값을 사용하는 것이 적절하지만, 상향력에 대해서는 레일체결장치의 수직상방향(↑)에 대한 저항값을 적용하는 것이 적절하다.

실내시험 결과, 레일체결장치의 종류에 따라 레일체결장치 비선형 거동에 대한 이상화 결과값이 상이한 것으로 분석되었다. 또한, 철도교량 단부 모형 실내시험과 수치해석을 통해 레일체결장치의 비선형 거동을 모사하는 것이 실제 교량 거동에 따른 레일체결장치의 사용성을 확인할 수 있는 것으로 확인되었다.

따라서 본 연구에서는 철도교량 단부 콘크리트궤도 사용성 검토를 위한 주요 영향인자 중 레일체결장치 정/동적 수직강성 적용방법에 대해 본 연구결과를 바탕으로 다음과 같이 제안하고자 한다.

표 21 단부사용성 검토 시 하중조건에 따른 레일체결장치 수직강성의 적용방법 제안(안)

구분	작용력	부분 안전 계수 γ_F	[KR C-08090] 레일체결장치 수직강성		[제안(안)] 레일체결장치 수직강성	
			상향력 검토	압축력 검토	상향력 검토	압축력 검토
정적	자중 + 잔류 크리프 및 건조수축 (궤도 부설 이후)	1.0	k_{stat}	k_{stat}	$k_{stat}^{1)}$	$k_{stat}^{3)}$
	교량 상부구조 상·하면 온도차	1.0				
	교각 잔류 부등침하	1.0				
	레일-교량 상부구조 온도차에 의한 교각 상부 회전	1.0				
	교각 전·후면 온도차에 의한 교각 상부 회전	1.0				
동적	열차 수직하중	1.3	k_{dyn}		$k_{dyn}^{2)}$	
	시 · 제동하중에 의한 교각 상부 회전	1.0				
	축하중에 의한 직접 작용력	1.3				

1) 압축-레일체결장치 정적수직강성값 적용, 부상-레일체결장치 이상화된 Bi-linear 모델 적용

- 2) 압축-레일체결장치 동적수직강성값 적용, 부상-레일체결장치 이상화된 Bi-linear 모델 적용
- 3) 압축력 검토 시에는 레일체결장치의 정적 수직강성값을 적용

표 22 단부 사용성 검토 시 레일체결장치의 정/동적 수직강성값 적용방법 제안(안)

구 분		Compression	Uplift		
			K ₁	K ₂	K ₃
KR형 레일체결장치	Range (mm)	≤ 0.0	0.0~1.0	1.0~2.5	$2.5 \leq$
	Stiffness (kN/mm)	작용력에 따른 정/동적 수직강성값	12.8	6.7	1.7
System 300-1 (SKL15)	Range (mm)	≤ 0.0	0.0~1.0	1.0~6.3	$6.3 \leq$
	Stiffness (kN/mm)	작용력에 따른 정/동적 수직강성값	17.5	1.4	1.4
System 300-1 (SKL15B)	Range (mm)	≤ 0.0	0.0~0.8	0.8~3.8	$3.8 \leq$
	Stiffness (kN/mm)	작용력에 따른 정/동적 수직강성값	13.4	0.7	0.7
특수레일체결장치 (ERL, SKL12)	Range (mm)	≤ 0.0	0.0~0.4	0.4~1.0	$1.0 \leq$
	Stiffness (kN/mm)	작용력에 따른 정/동적 수직강성값	57.5	3.2	3.2
SFC (SFC1501)	Range (mm)	≤ 0.0	0.0~1.1	1.1~5.7	$5.7 \leq$
	Stiffness (kN/mm)	작용력에 따른 정/동적 수직강성값	15.8	1.5	4.1

사. 철도교량 단부 콘크리트궤도 사용성 검토 설계기법 개발

(1) 철도교량 단부 콘크리트궤도 사용성 검토 설계기법(KR C-08090)

철도교량 단부 콘크리트궤도 사용성 검토를 위한 현재 국내 기준(KR C-08090)에서는 단위하중법을 적용하고 있다. 본 연구에서는 기존의 단위하중법에 의한 복잡한 검토과정을 단순화하고, 선형해석에 의한 과도한 설계단계를 줄이며, 레일체결장치의 비선형 거동특성을 반영할 수 있는 비선형해석방법을 제안하였다.

아래 그림은 기존의 철도교량 단부 콘크리트궤도 사용성 검토 절차를 보여 주고 있으며, 체결장치의 비선형 거동을 반영할 수 없는 단점이 있다.

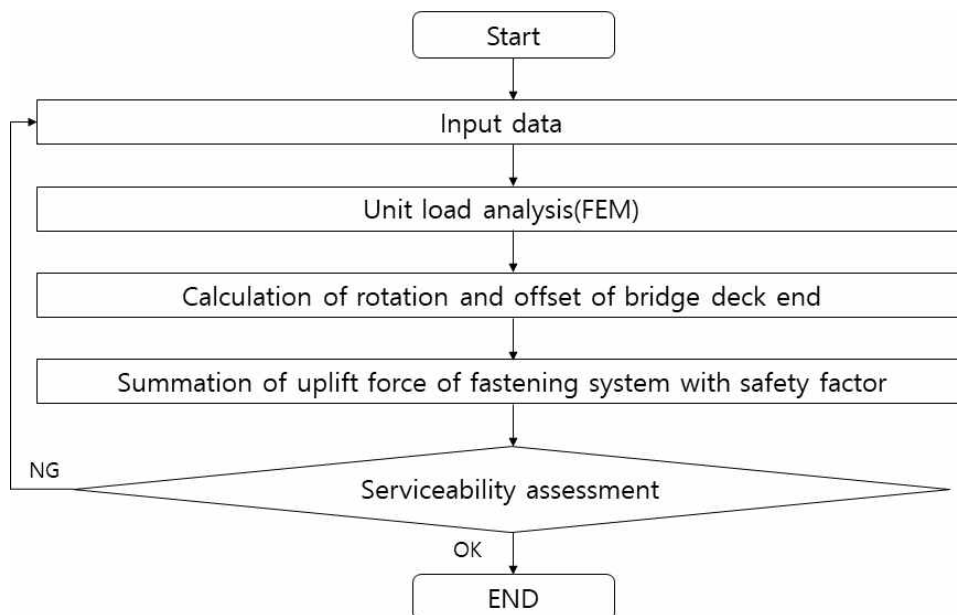


그림 186 기존 단위하중법에 의한 단부 사용성 검토 절차

기존 단위하중법은 각 단위 하중에 대하여 유한요소해석방법으로 먼저 해석을 수행한 후 각 레일체결장치에 작용하는 힘을 계산한다. 그리고 철도교량 단부에서 발생할 수 있는 각 영향인자에 대한 회전각과 단차를 계산한다. 중첩의 원리를 이용하여 단위하중에 의한 계산 결과와 각 영향 인자에 의한 결과를 조합하고, 다음 식을 이용하여 사용성을 검토한다.

① 레일체결장치 상향력

$$\max |F_d| \leq Z_u / \gamma_M \quad (14)$$

$$F_d = \phi_{d,stat} F(LF1; k_{stat}, a, a_1) + \phi_{d,dyn} F(LF1; k_{dyn}, a, a_1) + \delta_{d,stat} F(LF2; k_{stat}, a, a_1) \\ + \delta_{d,dyn} F(LF2; k_{dyn}, a, a_1) + \frac{P_d}{100} \min F(LF3; k_{dyn}, a)$$

$$\phi_{d,stat} = \sum \gamma_F \phi_{stat} \quad \phi_{d,dyn} = \sum \gamma_F \phi_{dyn} \\ \delta_{d,stat} = \sum \gamma_F \delta_{stat} \quad \delta_{d,dyn} = \sum \gamma_F \delta_{dyn} \quad P_d = \gamma_F m P$$

여기서

F_d : 레일체결장치 작용력 설계값

Z_u : 레일 지지점 상향력의 허용값, 즉 레일체결장치 초기 체결력

$F(LF1; k_{stat} \text{ or } k_{dyn}, a, a_1)$: 단위 단부회전($\phi=1\%$)에 의한 레일체결장치 작용력

$F(LF2; k_{stat} \text{ or } k_{dyn}, a, a_1)$: 단위 단차($\delta=1\text{mm}$)에 의한 레일체결장치 작용력

$F(LF3; k_{dyn}, a)$: 단위 축하중(100kN)에 의한 레일체결장치 직접 작용력

k_{stat}, k_{dyn} : 레일 지지점 정적 또는 동적 연직 수직강성

a : 일반 구간의 레일 지지간격 (등간격)

a_1 : 교량 상부구조 연결부의 레일 지지간격

γ_F : 부분안전계수

γ_M : 레일 지지점 저항에 관한 안전계수, 일반적인 경우 $\gamma_M = 1.0$

ϕ_{stat} : 정적 작용에 의한 단부 회전각의 계산값

ϕ_{dyn} : 동적 작용에 의한 단부 회전각의 계산값

δ_{stat} : 정적 작용에 의한 단차의 계산값

δ_{dyn} : 동적 작용에 의한 단차의 계산값

P : 축하중

m : 인접 축하중의 영향을 고려하기 위한 계수

$b \approx$ 축간거리(d)인 경우, $m = 2$

$b \neq$ 축간거리(d)인 경우, $m = 1$

ϕ_d, δ_d, P_d : 단부회전, 단차 및 축하중의 계산값에 부분안전계수를 곱한 설계값

② 레일체결장치 압축력(compression)

$$\frac{\max |F_d|}{k_{stat}} \leq s_D \quad (15)$$

$$F_d = \phi_{d,dyn} F(LF1; k_{stat}, a, a_1) + \delta_{d,dyn} F(LF2; k_{stat}, a, a_1) + \frac{P_d}{100} \max F(LF3; k_{stat}, a)$$

$$\phi_{d,dyn} = \sum \gamma_F \phi_{dyn} \quad \delta_{d,dyn} = \sum \gamma_F \delta_{dyn} \quad P_d = \gamma_F \alpha P$$

여기서,

s_D : 레일체결장치 탄성패드의 연직 변형한계

γ_F : 부분안전계수

α : 열차속도에 관한 계수

$V < 60\text{km/h}$ 인 경우, $\alpha = 1.0$

$V \geq 60\text{km/h}$ 인 경우, $\alpha = 0.8$

k_{stat} : 정적 수직강성(※압축력에 대한 검토에 있어서 동적 수직강성은 안전측의 검토를 위해 정적 수직강성을 적용함)

표 23 부분안전계수와 레일체결장치 수직강성의 적용방법(KR C-08090)

구분	작용력	부분안전계수 γ_F	체결장치 수직강성	
			상향력 검토	압축력 검토
정적	자중 + 잔류 크리프 및 건조수축 (궤도 부설 이후)	1.0	k_{stat}	k_{stat}
	교량 상부구조 상·하면 온도차	1.0		
	교각 잔류 부등침하	1.0		
	레일-교량 상부구조 온도차에 의한 교각 상부 회전	1.0		
	교각 전·후면 온도차에 의한 교각 상부 회전	1.0		
동적	열차 수직하중	1.3	k_{dyn}	
	시·제동하중에 의한 교각 상부 회전	1.0		
	축하중에 의한 직접 작용력	1.3		

(2) 철도교량 단부 콘크리트궤도 사용성 검토 설계기법 제안

반면 아래 그림은 본 연구에서 제안된 레일체결장치의 비선형 거동 특성을 고려할 수 있는 철도교량 단부 콘크리트궤도 사용성 검토 절차를 보여주고 있다.

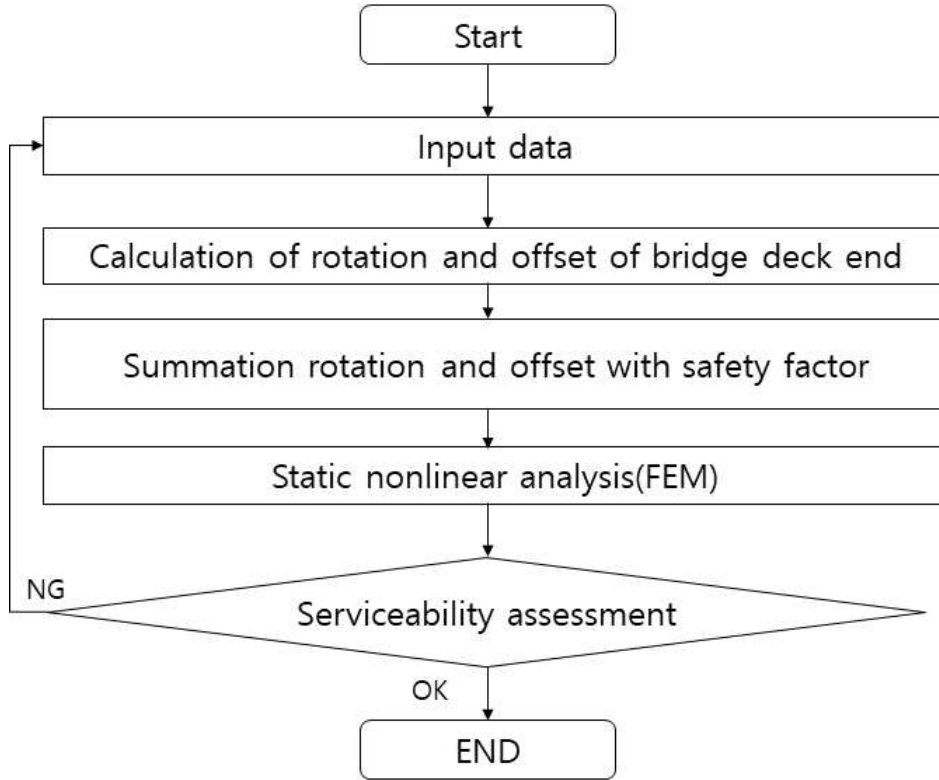


그림 187 제안된 비선형해석방법에 의한 단부 사용성 검토 절차

상기 그림과 같이 제안된 비선형 해석방법에서는 철도교량 단부에서 발생할 수 있는 각 영향인자에 대한 회전각과 단차를 부분안전계수와 곱하여 조합한다. 그리고 아래 식을 이용하여 유한요소해석에 사용될 하중을 계산하여 비선형해석을 수행하고, 각 체결장치에 작용하는 힘을 계산한다.

$$P_{\phi d} = \sum \phi_{stat} \times \gamma_F + \sum \phi_{dyn} \times \gamma_F \quad (16)$$

$$P_{\delta d} = \sum \delta_{stat} \times \gamma_F + \sum \delta_{dyn} \times \gamma_F \quad (17)$$

$$P_{pd} = mP \times \gamma_F \quad (18)$$

여기서 ϕ_{stat} 는 정적 작용에 의한 단부 회전각(크리프와 건조수축에 의한 장기처짐, 교량상판 상하면 온도차, 교량기초의 잔류 부등침하), ϕ_{dyn} 는 동적 작용에 의한 단부 회전

각(열차 수직하중), δ_{stat} 는 정적 작용에 의한 단부 단차(레일-교량 온도차에 의한 교각상부 회전에 의한 단차, 교각 전후면 온도차에 의한 교각 상부 회전에 대한 단차), m 은 인접 축하중의 영향을 고려하기 위한 계수, P 는 축하중, γ_F 는 부분안전계수이다.

두 방법의 가장 큰 차이점은 유한요소해석을 수행하는 시점이다. 기존의 해석 방법(단위하중법)은 첫 단계에서 단위하중에 대한 유한요소해석을 수행하고, 비선형해석방법은 조합된 하중에 대해서 마지막 단계로 유한요소해석을 수행하여 결과를 도출함으로써 검토과정을 단순화할 수 있으며, 레일체결장치의 비선형거동을 고려함으로써 정확한 결과를 도출할 수 있다.

(3) 기존 설계기법과 제안된 설계기법 비교 및 검증

(가) 수치해석 모델

① 해석 모델

본 연구에서 제안된 비선형해석방법과 기존 방법을 비교하기 위하여 아래 그림과 같은 철도 교량 실내 시험체를 대상으로 해석을 수행하였다. 레일, 침목 및 도상에 대한 특성값은 아래 표와 같다.

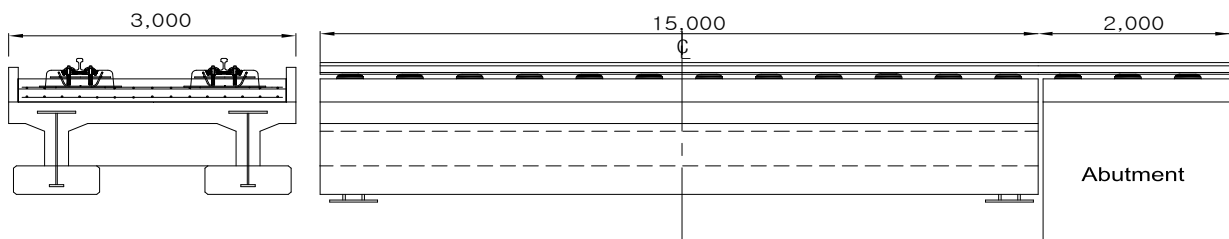


그림 188 Railway bridge model

표 24 Properties of the girder and track system

Item	Index
Girder	Pre-stressed composite girder,
Rail	60 kg/m (KR CODE)
Sleeper	ERS sleeper(RC sleeper), 625mm
Rail resilient pad	Static spring stiffness: 30kN/mm
Rail fastening system	Vossloh System 300 (SKL15B)

유한요소해석 소프트웨어인 SAP2000을 사용하여 철도교량 콘크리트궤도 단부 해석을 수행하였으며, 교량 거더와 레일, 체결장치(multi-linear elastic link)는 2차원으로 모델링하였다.

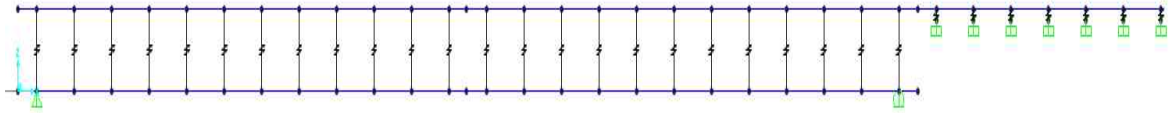


그림 189 FEM model for assessment of the railway bridge system (SAP2000)

레일체결장치는 아래 그림과 같이 선형해석에서는 압축 및 인장 강성에 대하여 30kN/mm를 갖는 스프링요소(linear link)로 모델링하였으며, 비선형해석에서는 압축 강성 30kN/mm를 적용하였고, 인장 강성은 레일체결장치 체결력 시험결과를 바탕으로 한 이상화된 결과(그림 24 (c))를 사용하였다. 레일체결장치의 종방향 강성은 13.5kN/m를 사용하였다 (KR C-08080, 2014; Yun K.M., et al. 2016).

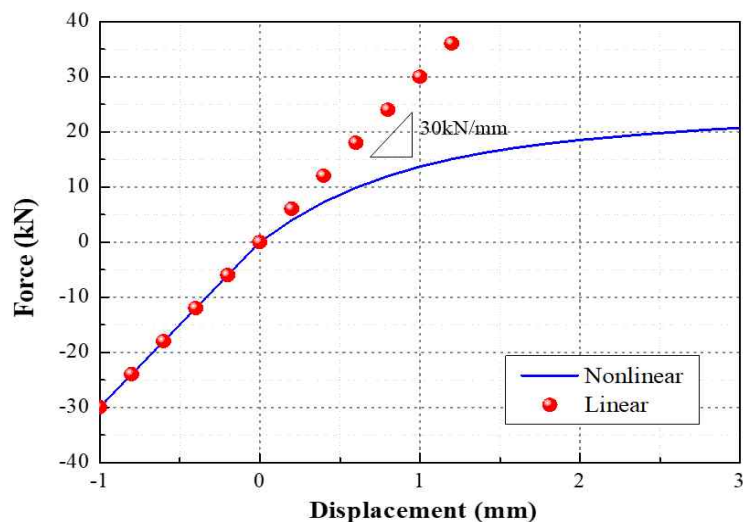


그림 190 선형 및 비선형 레일체결장치 강성
(하중 vs 변위 곡선)

② 해석에 고려된 하중

철도교량 단부 콘크리트궤도 체결장치의 상향력 해석은 교량 상부구조의 변형을 일으키는 작용(크리프 및 건조수축, 교량 상부구조 상하면 온도차, 교각 잔류침하, 레일-교량 온도차, 교각 전후면 온도차, 열차 수직하중, 시/제동하중, 궤도에 작용하는 열차축하중)

에 대하여 고려해야 된다. 하지만, 본 연구의 목적은 비선형 거동특성을 고려한 비선형 해석방법에 의해 레일체결장치의 상향력에 어떤 효과가 나타나는지 확인하는 것으로 교량 상부구조의 변형을 일으키는 작용력 중 일부(크리프 및 건조수축, 교량 상부구조 상하면 온도차, 교각 잔류 침하, 열차 수직 하중)에 대해서만 해석에 고려하였다.

③ 해석 결과

레일체결장치의 비선형 거동 특성을 고려한 철도교량 단부 레일체결장치의 상향력을 기존의 단위하중법과 비교하였다. 레일체결장치의 상향력은 아래 그림과 같이 단부에서의 좌우 5개 지지점에 대해서 확인하였다. 단위하중법과 비선형해석에 의한 체결장치의 상향력은 아래 표에 나타내었다.

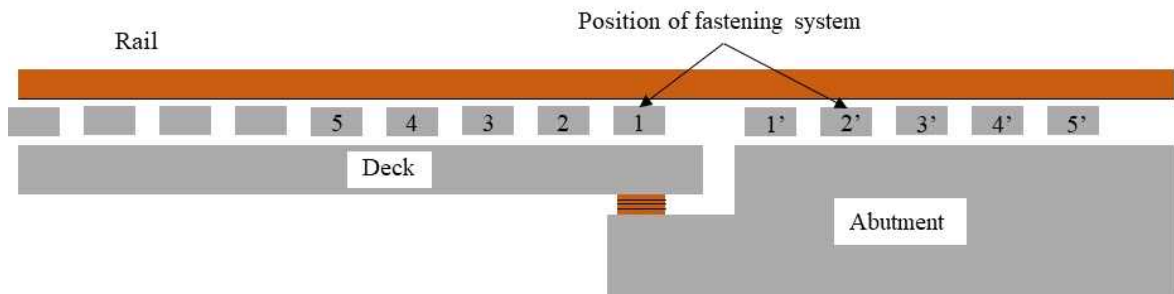


그림 191 Definition of notation corresponding the position of fastening system

아래 표는 SAP2000을 이용하여 단위하중 LF1에 대하여 정적(30kN/mm), 동적(60kN/mm) 강성계수에 대한 해석을 수행하여 각 위치에서의 레일체결장치 상향력을 정리하였다. 그리고 교량 상부구조의 변형에 영향을 주는 인자(Creep and shrinkage, Temp. gradient, settlement and train load)에 대하여 단부에서의 회전각을 계산하였다. 레일체결장치에서 작용하는 최종 상향력은 Summation 열에 나타내었다.

비선형해석방법에서는 단위하중 LF1이 필요없기 때문에 공란으로 나타냈으며, 각 영향인자에 대한 단부에서의 회전각은 단위하중법과 같은 값으로 나타내었다. Multiplication with factor 열에서는 정적인 작용에 대해서는 부분안전계수 1을, 동적인 작용에 대해서는 1.3을 가중하여 나타내었다. 비선형해석 모델에 입력될 최종 단부에서의 회전각은 summation 열에 나타내었고, 각 체결장치 위치에서의 상향력을 Results 열에 나타내었다.

표 25 단위하중법에 의한 상향력

No.	Unit load		Static(‰)			Dynamic(‰)	Multiplication with factor(kN)				Summation (kN)
	LF1		③Creep/ Shrinkage	④Temp./ gradient	⑤Settlement	⑥Train load	①·③	①·④	①·⑤	①·⑥	
	①Static (kN)	②Dynamic (kN)									
5	0.38	0.12	0.37	0.30	0.33	0.92	0.14	0.11	0.13	0.15	0.53
4	1.08	1.07	0.37	0.30	0.33	0.92	0.39	0.32	0.36	1.28	2.36
3	1.68	2.57	0.37	0.30	0.33	0.92	0.62	0.50	0.56	3.08	4.76
2	0.54	1.83	0.37	0.30	0.33	0.92	0.20	0.16	0.18	2.19	2.73
1	-5.62	-9.04	0.37	0.30	0.33	0.92	-2.06	-1.69	-1.87	-10.84	-16.46
1'	-0.19	0.81	0.37	0.30	0.33	0.92	-0.07	-0.06	-0.06	0.97	0.78
2'	1.17	2.02	0.37	0.30	0.33	0.92	0.43	0.35	0.39	2.42	3.59
3'	0.88	0.95	0.37	0.30	0.33	0.92	0.32	0.26	0.29	1.14	2.02
4'	0.36	0.16	0.37	0.30	0.33	0.92	0.13	0.11	0.12	0.19	0.55
5'	0.06	-0.09	0.37	0.30	0.33	0.92	0.02	0.02	0.02	-0.10	-0.05

표 26 제안된 비선형방법에 의한 상향력

No.	Unit load		Static(‰)			Dynamic (‰)	Multiplication with factor(‰)				Summation (‰)	Results (kN)
	LF1		③Creep/ Shrinkage	④Temp./ gradient	⑤Settlemen t	⑥Train load	③’	④’	⑤’	⑥’		
5	-	-	0.37	0.30	0.33	0.92	0.37	0.30	0.33	1.20	2.20	0.97
4	-	-	0.37	0.30	0.33	0.92	0.37	0.30	0.33	1.20	2.20	2.21
3	-	-	0.37	0.30	0.33	0.92	0.37	0.30	0.33	1.20	2.20	3.13
2	-	-	0.37	0.30	0.33	0.92	0.37	0.30	0.33	1.20	2.20	1.26
1	-	-	0.37	0.30	0.33	0.92	0.37	0.30	0.33	1.20	2.20	-11.97
1'	-	-	0.37	0.30	0.33	0.92	0.37	0.30	0.33	1.20	2.20	-0.01
2'	-	-	0.37	0.30	0.33	0.92	0.37	0.30	0.33	1.20	2.20	2.11
3'	-	-	0.37	0.30	0.33	0.92	0.37	0.30	0.33	1.20	2.20	1.72
4'	-	-	0.37	0.30	0.33	0.92	0.37	0.30	0.33	1.20	2.20	0.85
5'	-	-	0.37	0.30	0.33	0.92	0.37	0.30	0.33	1.20	2.20	0.24

단위하중법과 비선형해석방법에서 단부 체결장치의 최대 상향력은 4.76kN과 3.13kN으로 약 34% 비선형해석방법이 작게 나타났으며, 2' 위치에서의 상향력은 3.59kN과 2.11kN으로 비선형해석방법에서 상향력이 약 41% 감소하는 것을 볼 수 있다. 레일체결장치의 압축력 또한 각각 16.46kN과 11.97kN으로 약 27% 감소하는 것으로 나타났다. 각 레일체결장치 위치에서의 작용력을 아래 그림에 나타내었다.

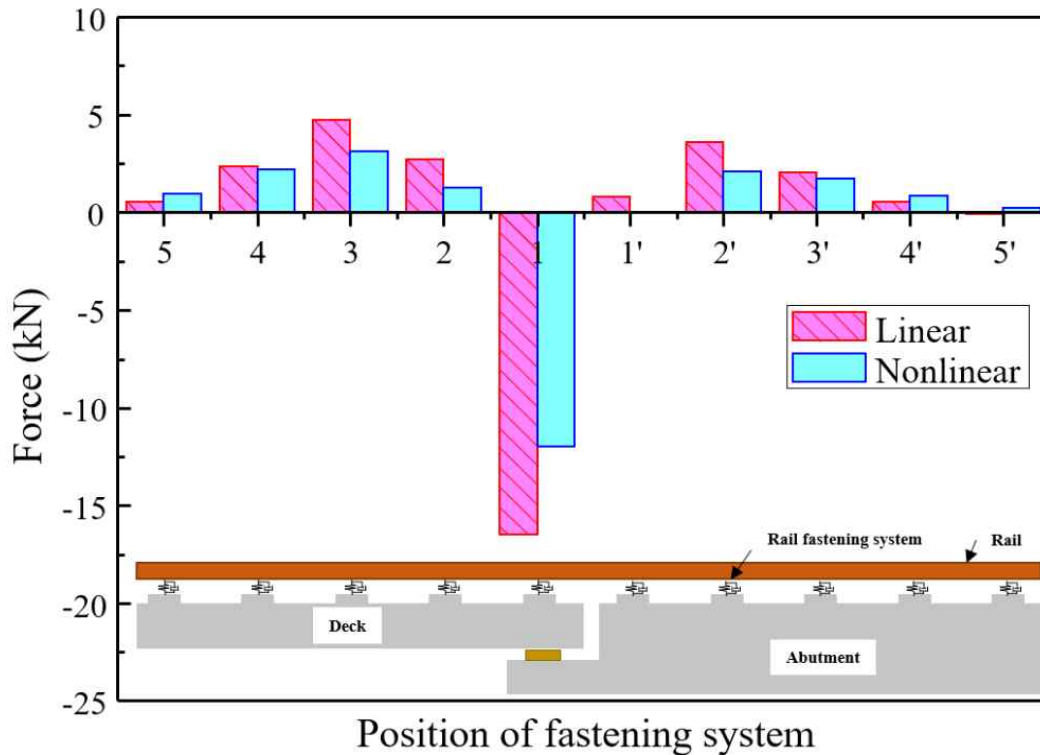


그림 192 Comparison of uplift force and compression force on support points.

단위하중법과 비선형해석법을 이용한 단부 레일체결장치 상향력 해석에서 사용된 영향인자의 수는 적었지만, 상향력의 차이는 크게 나타나고 있음을 알 수 있었다.

교량 상부구조의 변형에 영향을 주는 인자를 모두 고려하는 가정하에 단부에서의 회전각을 증가시켜가며 해석을 수행하였다. 아래 그림은 단부에서의 회전각을 증가시켰을 때, 레일체결장치 2' 위치에서 선형해석과 비선형해석에서의 상향력과 변위관계 그래프를 보여주고 있다. 그래프와 같이 레일체결장치의 변위가 작을 때는 선형해석과 비선형해석 사이의 차이가 크지 않지만, 레일체결장치의 변위가 1mm 일 때 비선형해석에 의한 레일체결장치의 상향력은 약 50%로 감소하는 것을 볼 수 있다.

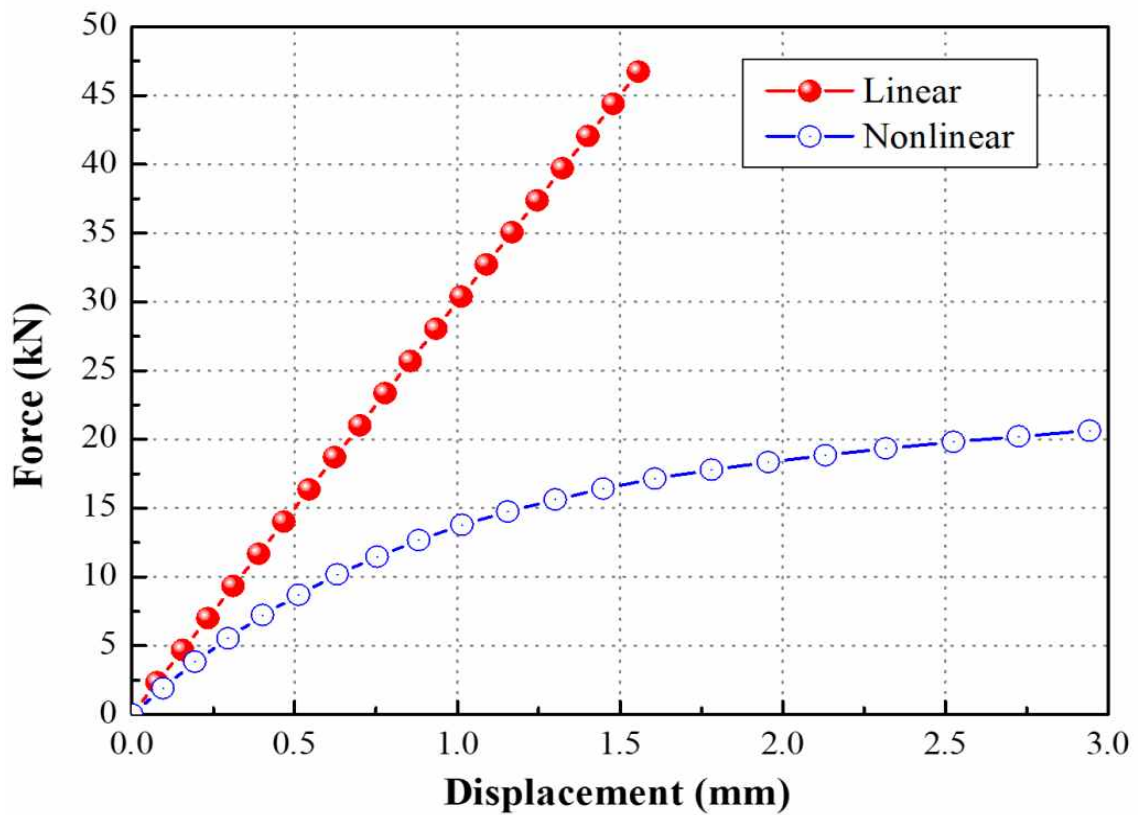


그림 193 Force vs. displacement graph at point 2' under an increasing load.

따라서 본 연구에서 제안하는 철도교량 단부 콘크리트궤도 사용성 검토방법은 기존 단위하중법(KR C-08090)에 비해 설계검토단계를 단순화할 수 있으며, 레일체결장치의 비선형거동을 고려함에 따라 정확한 해석결과를 도출할 수 있는 것으로 분석되었다. 또한, 기존 단위하중법에 의한 검토결과보다 상향력 및 압축력에 대한 결과값이 작게 도출됨에 따라 철도교량 단부 콘크리트궤도 사용성 확보를 위해 사용되는 고가의 특수 레일체결장치(ERL, ZLR) 및 구조시스템(횡단궤도)을 최소화하고, 안전한 철도 궤도설계가 가능할 수 있을 것으로 판단된다.

2.2 철도교량 단부 콘크리트궤도 사용성 검토 알고리즘 개발

철도교량 단부 콘크리트궤도 사용성 검토는 DS 804 (Regulation for bridges and other civil structures, 2000)와 KR C-08090 (교량단부 콘크리트궤도 사용성 검토, 2014)에 정의된 방법에 따라 수행되고 있다. 주요 해석은 범용 또는 전용 유한요소해석 소프트웨어를 사용하여 기준에서 제시하고 있는 하중 조합에 의해 레일체결장치의 상향력과 압축력을 검토하게 된다. 단부 콘크리트궤도 사용성 검토에 대한 국내·외적으로 명확한 기준 및 해설의 부재로 실무 엔지니어에 따라 해석기법 및 판단의 차이가 발생하고, 해석결과에 대한 차이와 해석 절차 및 결과 정리에 많은 시간이 소요되는 것이 사실이다.

본 절에서는 철도교량 단부 콘크리트궤도 사용성 알고리즘 개발 내용과 유한요소해석 소프트웨어인 SAP2000과 개발된 알고리즘을 이용한 단순 교량 모델을 대상으로 개발된 알고리즘을 검증하였다. 또한, 실 철도교량을 대상으로 알고리즘 검증을 수행하였다.

가. 국내·외 문헌 조사

(1) 국외 기준(독일, DS 804)

(가) 교량 단부 개요

DS 804에서는 교량단부에 대한 교량 상부구조물의 사용성 한계상태 확인을 위한 지침을 명시하였으며, 특히 교대부와 교각부에 대한 상부 구조 거동은 아래 그림과 같다.

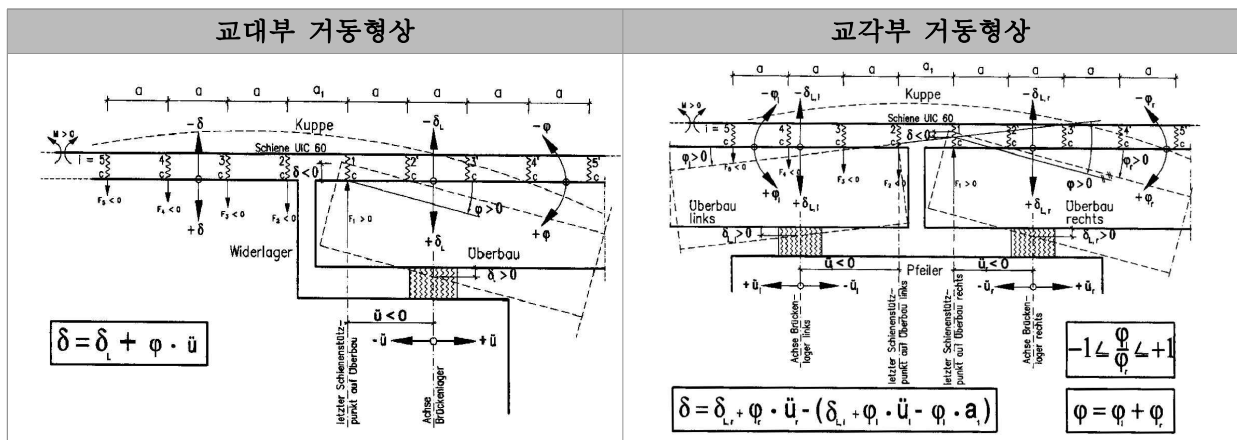


그림 194 교량단부 상부구조 기호 정의 및 명칭

레일체결장치 상향력 및 압축력 산정은 단위회전(LF1), 단위변위(LF2) 및 단위윤중에 대한 작용력(LF3)을 산정한 뒤 각 하중별 실제 회전량, 단차량 및 실윤중을 적용하여 하중조합을 통해 계산을 한다.

- 단위회전에 의한 레일체결장치 작용력(LF1)은 교량상부의 회전량을 1%을 발생시켰을 때 나타난 체결구의 상향력 및 압축력을 적용
- 단위단차에 의한 레일체결장치 작용력(LF2)은 교량상부를 연직방향으로 1mm를 이동시켰을 때 나타난 체결구의 상향력 및 압축력을 적용
- 단위윤중에 의한 직접작용력(LF3)은 단위윤중 100kN을 직접 궤도에 작용시켜 나타난 상향력 및 압축력을 적용

(나) UIC 60레일에 대한 부재력 및 모멘트

DS 804에서는 UIC 60 레일 적용 시 하중조건 LF1, LF2, LF3에 대한 레일 지점 강성에 따라 지지점에서의 반력과 모멘트를 나타내었다. 아래 표에서 하중조건 LF3에서의 결과를 보면, max F는 지점에서의 반력이 되며(체결장치에서의 종축 부재력과 같음), max MS는 레일에서의 Global Y축에 대한 모멘트를 나타내고 있다.

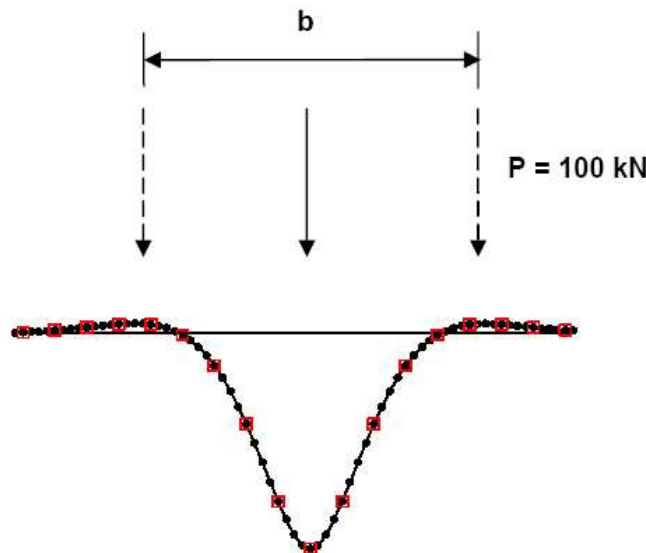


그림 195 축하중에 의한 레일체결장치 연직반력의 영향선

표 27 지지점 간격 $a=600\text{mm}$

하중 조건 ¹⁾	합성 응력 ²⁾	강도 (kN/mm)					
		30	35	40	45	50	55
하중 조건 LF1	F1	5.79	6.44	7.07	7.67	8.24	8.79
	F2	-0.03	-0.20	-0.37	-0.56	-0.74	-0.93
	F3	-1.42	-1.62	-1.79	-1.96	-2.11	-2.25
	F4	-1.06	-1.10	-1.13	-1.15	-1.16	-1.16
	F5	-0.45	-0.41	-0.37	-0.34	-0.30	-0.26
	M1	-4.36	-4.57	-4.77	-4.95	-5.11	-5.27
	M2	-2.62	-2.64	-2.65	-2.65	-2.64	-2.63
	M3	-0.90	-0.82	-0.75	-0.68	-0.61	-0.55
	M4	-0.04	0.02	0.07	0.11	0.15	0.18
	M5	0.19	0.20	0.21	0.21	0.21	0.21
하중 조건 LF2	F1	-9.70	-11.1	-12.4	-13.7	-15.0	-16.2
	F2	9.70	11.1	12.4	13.7	15.0	16.2
	F3	2.33	2.37	2.37	2.34	2.28	2.19
	F4	-0.61	-0.86	-1.10	-1.35	-1.58	-1.81
	F5	-1.02	-1.15	-1.26	-1.36	-1.44	-1.50
	M1	2.89	3.22	3.53	3.83	4.12	4.40
	M2	-2.89	-3.22	-3.54	-3.83	-4.12	-4.40
	M3	-2.87	-3.03	-3.16	-3.28	-3.38	-3.46
	M4	-1.44	-1.41	-1.37	-1.32	-1.27	-1.22
	M5	-0.38	-0.30	-0.23	-0.17	-0.11	-0.06
하중 조건 LF3	max F	35.36	36.74	37.97	39.09	40.11	41.06
	min F	-1.53	-1.55	-1.63	-1.69	-1.73	-1.74
	max MF	22.16	21.40	20.78	20.24	19.78	19.38
	min MF	-4.13	-3.98	-3.90	-3.80	-3.71	-3.61
	max MS	19.30	18.42	17.68	17.04	16.49	15.99
	min MS	-4.74	-4.62	-4.48	-4.35	-4.21	-4.08
	b	5.30	5.15	4.80	4.50	4.40	4.25

- 1) 하중 조건 LF1 : $\ddot{u}=0$ 인 교량상판 끝에서의 끝부분 각(角)회전 $\phi=1\%$
하중 조건 LF2 : 교량상판 끝에서의 수직변위 $\delta=1\text{mm}$
하중 조건 LF3 : 윤중 $P=100\text{ kN}$
- 2) 지지점 $i=1, 2, 3, 4, 5$ 의 반작용 F (kN)
굽힘 모멘트 M (kNm) (MF; 2 지지점들 사이 중심에서의 경간(徑間) 모멘트, Ms: 지지 모멘트)
레일 지지점에서의 반작용 영향 길이 b (m)
상승 반작용은 부(-), 압축 반작용은 정(+)이다.

표 28 지지점 간격 $a=650\text{mm}$

하중 조건 ¹⁾	합성 응력 ²⁾	강도(剛度) (kN/mm)					
		30	35	40	45	50	55
하중 조건 LF1	F1	5.83	6.48	7.10	7.69	8.26	8.81
	F2	-0.26	-0.46	-0.66	-0.87	-1.08	-1.29
	F3	-1.47	-1.65	-1.82	-1.96	-2.10	-2.22
	F4	-0.96	-0.98	-0.99	-0.99	-0.98	-0.96
	F5	-0.33	-0.29	-0.25	-0.21	-0.17	-0.13
	M1	-4.34	-4.55	-4.74	-4.93	-5.09	-5.25
	M2	-2.44	-2.44	-2.44	-2.42	-2.41	-2.39
	M3	-0.72	-0.63	-0.56	-0.49	-0.42	-0.36
	M4	0.05	0.10	0.14	0.17	0.20	0.22
	M5	0.19	0.20	0.20	0.19	0.19	0.18
하중 조건 LF2	F1	-9.37	-10.7	-11.9	-13.2	-14.4	-15.5
	F2	9.37	10.7	11.9	13.2	14.4	15.5
	F3	1.87	1.84	1.78	1.69	1.57	1.43
	F4	-0.80	-1.04	-1.28	-1.50	-1.72	-1.93
	F5	-0.96	-1.06	-1.14	-1.20	-1.25	-1.28
	M1	2.91	3.24	3.55	3.85	4.13	4.40
	M2	-2.91	-3.24	-3.55	-3.85	-4.13	-4.40
	M3	-2.65	-2.78	-2.89	-2.98	-3.05	-3.12
	M4	-1.18	-1.13	-1.07	-1.02	-0.96	-0.90
	M5	-0.22	-0.15	-0.09	-0.03	0.02	0.06
하중 조건 LF3	max F	37.53	38.98	40.28	41.46	42.54	43.54
	min F	-1.59	-1.69	-1.73	-1.74	-1.81	-1.89
	max MF	22.75	21.99	21.32	20.92	20.35	19.95
	min MF	-4.26	-4.13	-4.00	-3.87	-3.75	-3.63
	max MS	19.44	18.53	17.76	17.11	16.53	16.02
	min MS	-4.91	-4.72	-4.54	-4.36	-4.33	-4.31
	b	5.45	5.20	4.90	4.80	4.65	4.60

1) 하중 조건 LF1 : $\ddot{u}=0$ 인 교량상판 끝에서의 끝부분 각(角)회전 $\phi=1\%$

하중 조건 LF2 : 교량상판 끝에서의 수직변위 $\delta=1\text{mm}$

하중 조건 LF3 : 윤중 $P=100\text{ kN}$

2) 지지점 $i=1, 2, 3, 4, 5$ 의 반작용 F (kN)

굽힘 모멘트 $M(\text{kNm})$ (MF; 2 지지점들 사이 중심에서의 경간(徑間) 모멘트, Ms: 지지 모멘트)

레일 지지점에서의 반작용 영향 길이 $b(\text{m})$

상승 반작용은 부(-), 압축 반작용은 정(+)이다.

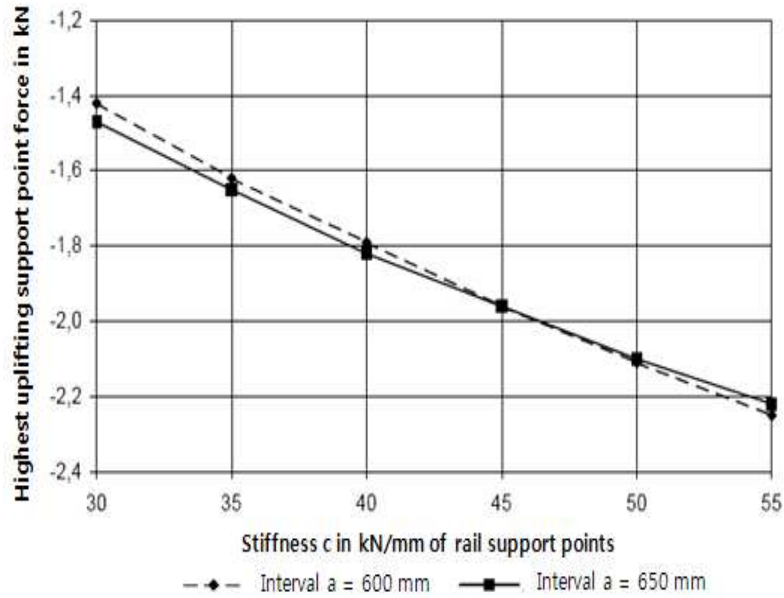


그림 196 단위회전에 따른 최대 상향력 (LF 1, $\phi = 1\%$)

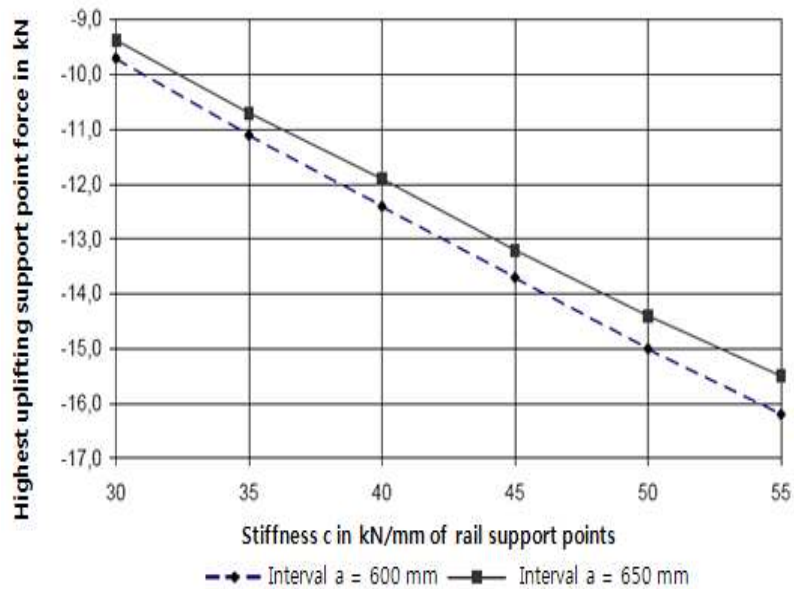


그림 197 단위변위에 따른 최대 상향력 (LF 2, $\delta = 1\text{mm}$)

단위회전에 따른 최대 상향력 검토결과, 레일체결장치의 강성이 증가함에 따라 최대 상향력은 감소하고, 침목간격 600mm와 650mm에 대해서는 상향력에 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 이는 레일체결장치 상향력에 미치는 주요 변수는 레일지지점의 연직수직 강성임을 나타낸다.

반면, 단위변위에 따른 최대 상향력 검토결과, 레일지지점의 간격 증가에 따른 영향이 비교적 뚜렷하게 나타났으며, 레일지지점의 간격증가는 단위변위에 따른 최대 상향력의 증가를 초래할 수 있는 것으로 분석되었다. 또한, 단위회전에 따른 최대 상향력 계산결

과와 마찬가지로 레일지지점의 수직강성은 단위변위에 따른 상향력 증가에도 직접적인 영향을 미치는 것으로 분석되었다.

전술한 바와 같이 콘크리트궤도가 부설된 철도교량 단부 콘크리트궤도 레일체결장치에 발생하는 상호작용력은 교량 상부구조의 단부 회전각(LF1) 외에도 여러 가지 변수들(LF2~LF3 및 크리프, 장기처짐 등)이 있다. 그러나 실제 공용중인 철도교량의 경우 운행 열차하중에 의한 단부회전각이 단부 궤도의 거동에 영향을 미치는 주요 요인이 될 수 있으며, 그 빈도 또한 다른 매개변수 보다 월등하게 클 것으로 판단된다. 뿐만 아니라 설계단계에서는 다양한 여러 요인들에 대해 검토가 가능하더라도 공용중인 교량에서는 이미 공사가 완료된 상태임으로 기초의 침하 및 크리프, 건조수축 등 단부회전 이외의 매개변수에 대한 내용을 검토하고, 이를 해당 기준에 근거하여 평가하기에는 현실적인 무리가 따를 것으로 판단된다.

(2) 국내 기준(KR C-08090)

국내 기준으로는 철도교량 단부 콘크리트궤도 사용성 검토기준(KR C-08090, 2014)이 있으며, 궤도 유지보수 요인을 줄이고 사용성을 향상시키기 위해 교량 상부구조 단부의 단차 및 회전에 대한 검토 기준을 제시하기 위하여 마련되었다.

KR C-08090에서도 교량 상부구조의 변형거동에 따른 레일 지지점 작용력 발생현상과 부호규약을 아래 그림과 같이 나타내었다. 철도교량 단부 콘크리트궤도 사용성 검토를 위한 하중조건 및 검토방법은 다음과 같다.

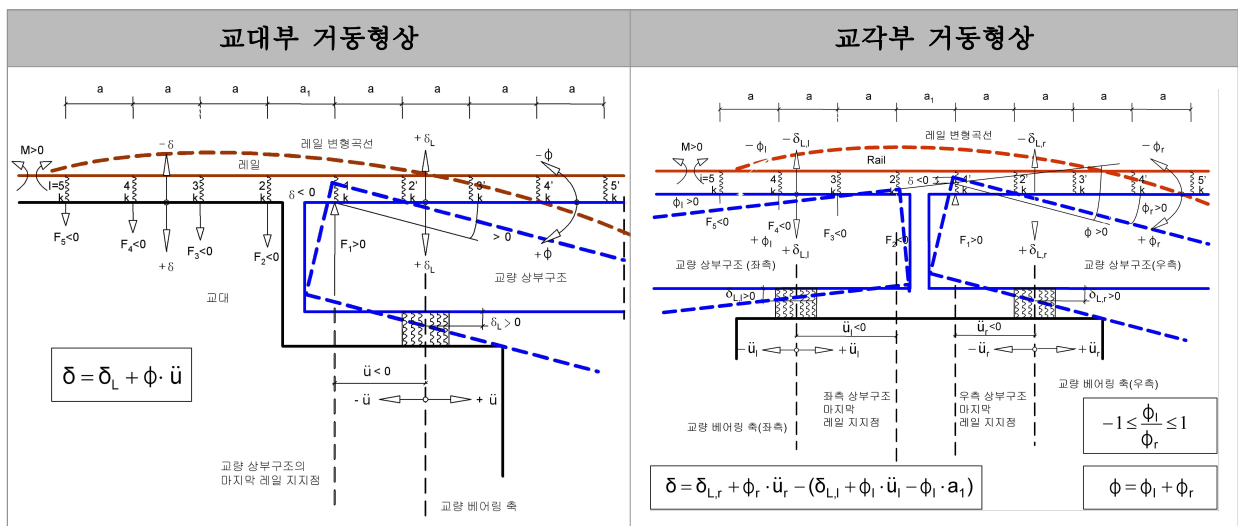


그림 198 교량 상부구조와 레일의 변형

(가) 정적 작용력

① 단부 회전

- 궤도 부설 후 크리프와 건조수축에 의해 발생하는 장기 처짐
- 교량 상부구조의 상하면 온도차
- 교각 기초의 잔류 부등침하

② 단차

- 레일과 교량 상부구조의 온도차에 의한 교각 상부 회전
- 교각 전후면 온도차에 의한 교각 상부 회전

(나) 동적 작용력

① 단부 회전

- 열차 수직하중

② 단차

- 시제동하중에 의한 교각 상부 회전
- 열차 수직하중에 의한 탄성받침에서의 연직 변형

③ 축하중에 의한 직접 작용력

(다) 검토기준

① 레일체결장치 상향력

$$\max |F_d| \leq Z_u / \gamma_M \quad (19)$$

$$F_d = \phi_{d,stat} F(LF1; k_{stat}, a, a_1) + \phi_{d,dyn} F(LF1; k_{dyn}, a, a_1) + \delta_{d,stat} F(LF2; k_{stat}, a, a_1) \\ + \delta_{d,dyn} F(LF2; k_{dyn}, a, a_1) + \frac{P_d}{100} \min F(LF3; k_{dyn}, a)$$

$$\phi_{d,stat} = \sum \gamma_F \phi_{stat} \quad \phi_{d,dyn} = \sum \gamma_F \phi_{dyn} \\ \delta_{d,stat} = \sum \gamma_F \delta_{stat} \quad \delta_{d,dyn} = \sum \gamma_F \delta_{dyn} \quad P_d = \gamma_F m P$$

여기서

F_d : 레일체결장치 작용력 설계값

Z_u : 레일 지지점 상향력의 허용값, 즉 레일체결장치 초기 체결력

$F(LF1; k_{stat} \text{ or } k_{dyn}, a, a_1)$: 단위 단부회전($\phi=1\%$)에 의한 레일체결장치 작용력

$F(LF2; k_{stat} \text{ or } k_{dyn}, a, a_1)$: 단위 단차($\delta=1\text{mm}$)에 의한 레일체결장치 작용력

$F(LF3; k_{dyn}, a)$: 단위 축하중(100kN)에 의한 레일체결장치 직접 작용력

k_{stat}, k_{dyn} : 레일 지지점 정적 또는 동적 연직 수직강성

a : 일반 구간의 레일 지지간격 (등간격)

a_1 : 교량 상부구조 연결부의 레일 지지간격

γ_F : 부분안전계수

γ_M : 레일 지지점 저항에 관한 안전계수, 일반적인 경우 $\gamma_M = 1.0$

ϕ_{stat} : 정적 작용에 의한 단부 회전각의 계산값

ϕ_{dyn} : 동적 작용에 의한 단부 회전각의 계산값

δ_{stat} : 정적 작용에 의한 단차의 계산값

δ_{dyn} : 동적 작용에 의한 단차의 계산값

P : 축하중

m : 인접 축하중의 영향을 고려하기 위한 계수

$b \approx$ 축간거리(d)인 경우, $m = 2$

$b \neq$ 축간거리(d)인 경우, $m = 1$

ϕ_d, δ_d, P_d : 단부회전, 단차 및 축하중의 계산값에 부분안전계수를 곱한 설계값

② 레일체결장치 압축력(compression)

$$\frac{\max |F_d|}{k_{stat}} \leq s_D \quad (20)$$

$$F_d = \phi_{d,dyn} F(LF1; k_{stat}, a, a_1) + \delta_{d,dyn} F(LF2; k_{stat}, a, a_1) + \frac{P_d}{100} \max F(LF3; k_{stat}, a)$$

$$\phi_{d,dyn} = \sum \gamma_F \phi_{dyn} \quad \delta_{d,dyn} = \sum \gamma_F \delta_{dyn} \quad P_d = \gamma_F \alpha P$$

여기서,

s_D : 레일체결장치 탄성패드의 연직 변형한계

γ_F : 부분안전계수

α : 열차속도에 관한 계수

$V < 60\text{km/h}$ 인 경우, $\alpha = 1.0$

$V \geq 60\text{km/h}$ 인 경우, $\alpha = 0.8$

k_{stat} : 정적 수직강성(※압축력에 대한 검토에 있어서 동적 수직강성은 안전측의 검토를 위해 정적 수직강성을 적용함)

표 29 부분안전계수와 레일체결장치 수직강성의 적용방법(KR C-08090)

구분	작용력	부분안전계수 γ_F	체결장치 수직강성	
			상향력 검토	압축력 검토
정적	자중 + 잔류 크리프 및 건조수축 (궤도 부설 이후)	1.0	k_{stat}	k_{stat}
	교량 상부구조 상하면 온도차	1.0		
	교각 잔류 부등침하	1.0		
	레일-교량 상부구조 온도차에 의한 교각 상부 회전	1.0		
	교각 전·후면 온도차에 의한 교각 상부 회전	1.0		
동적	열차 수직하중	1.3	k_{dyn}	k_{stat}
	시·제동하중에 의한 교각 상부 회전	1.0		
	축하중에 의한 직접 작용력	1.3		

③ 상향력에 의한 슬래브의 들림(lift-off)

상향력에 의해 슬래브와 보호층 콘크리트 간의 분리가 발생할 가능성에 대하여 검토해야 한다. 슬래브와 보호층 콘크리트 간 분리 방지를 위해 특정 하중조합에 의해 발생하는 상향력의 합력은 아래의 기준을 만족해야 한다.

$$e = \frac{\sum M}{\sum V} \leq \frac{L_s}{6} \quad (21)$$

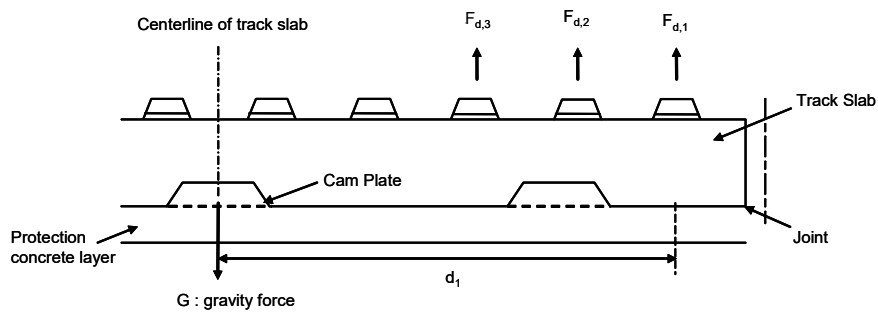
$$\sum M = 2 \sum F_{d,i} d_i \quad \sum V = w L_s - 2 \sum F_{d,i} \geq 0$$

여기서,

w : 궤도 단위 길이당 자중, L_s : 슬래브의 길이

$F_{d,i}$: 각 레일 지지점에서의 상향력 ($i = 1, 2, \dots, n$)

d_i : 슬래브 중심선에서 각 레일 지지점까지의 거리



$$\left. \begin{aligned} \sum M &= (F_{d,1} \times d_1 + F_{d,2} \times (d_1 - a) + F_{d,3} \times (d_1 - 2a)) \times 2 \\ \sum V &= w \cdot L_s - (F_{d,1} + F_{d,2} + F_{d,3}) \times 2 \geq 0 \end{aligned} \right\} e = \frac{\sum M}{\sum V} \leq \frac{L_s}{6} ?$$

그림 199 슬래브의 들림에 대한 안정성 검토

(3) 연구 논문

철도교량 단부 콘크리트궤도 사용성 검토와 관련된 다수의 국내 논문들이 있으며, 주로 레일체결장치 상향력 및 압축력에 영향을 주는 인자들에 대한 연구가 주를 이루고 있다.

- 장승엽 외 2인 (2007) 궤도-교량 상호작용을 고려한 콘크리트 슬래브궤도 부설 교량의 단부 사용성 검토, 2007 한국철도학회 춘계학술대회 논문집, pp.126-132
- 성덕룡 외 3인 (2008) 콘크리트궤도 부설 교량의 단부 사용성 검토를 위한 매개변수 연구, 2008 한국철도학회 추계학술대회 논문집, pp.117-124
- 박흥기 외 3인 (2009) 철도교 콘크리트 슬래브궤도의 사용성에 관한 매개변수 영향 연구, 한국철도학회논문집, 제12권 제1호, pp.95-103
- 이국환 외 3인 (2012) 철도교량 단부 궤도의 성능개선을 위한 횡단궤도시스템의 적용에 대한 연구, 2012 한국철도학회 추계학술대회 논문집, pp.1342-1352

- 이상승 (2013) 반복하중 재하실험을 통한 모듈러 슬래브 교량의 횡방향 연결부 사용성 검토, 성균관대학교 석사학위논문
- 임종일 외 3인 (2013) 철도교량 단부 회전 에 따른 콘크리트 궤도의 변형특성에 관한 실험적 연구, 한국철도학회논문집 제16권 제3호, pp.217-225
- 조가영 외 4인 (2013) 철도교량 단부 전환부궤도의 피로거동에 관한 연구, 2013 한국철도학회 춘계학술대회 논문집, pp.1424-1429
- 최준혁 (2013) 콘크리트 슬래브 궤도 교량의 사용성 검토를 위한 레일 지지점에서의 작용력 해석, 대한토목학회논문집 제33권 제4호, pp.1303-1313
- 임종일 외 3인 (2013) 철도교량 단부 궤도의 사용성 향상을 위한 횡단궤도시스템 적용에 관한 실험적 연구, 한국철도학회논문집 제16권 제3호, pp.207-213
- 김광우 외 4인 (2013) 전환부궤도시스템의 거동특성에 관한 연구, 2013 한국철도학회 춘계학술대회 논문집, pp.1430-1435
- 최준혁 (2014) 교량-궤도 작용력에 대한 교량 단부에서의 레일지지점간격의 영향, 한국철도학회논문집 제17권 제4호, pp.245-250
- 이광도 외 3인 (2014) 철도교량 단부 전환부 궤도시스템의 구조적 거동특성 및 장기 내구성능 분석, 한국철도학회논문집 제17권 제4호, pp.260-269
- 윤경민 외 5인 (2015) 교량 단부 콘크리트 궤도 사용성 검토용 해석법에 대한 소고, 2015 한국철도학회 춘계학술대회 논문집, pp.1175-1181
- KR C-08090 (2014) 교량단부 콘크리트궤도 사용성 검토, 한국철도시설공단, 2014
- DS 804 (2009) Bridge deck ends, check for serviceability limit state of superstructure, Regulation for Railway Bridges and Other Civil Constructions, Deutch Bahn
- 양신추 외 2인 (2017) 레일체결장치 비선형 거동을 고려한 교량 단부에서의 레일체결장치 상향력 평가, 한국철도학회논문집 제20권 제4호, pp.521-528
- 성덕룡 (2018), Nonlinear Analysis Method for Serviceability Investigation of Bridge Deck Ends with a Concrete Slab Track, Advances in Civil Engineering, Vol.2018, pp.1-9.

나. 철도교량 단부 콘크리트궤도 사용성 검토 알고리즘 설계

콘크리트궤도가 부설된 철도교량 단부 사용성 검토를 위한 기준(DS 804, KR C-08090)이 제시되어 있으며, 기준을 만족하지 못하는 개소에 대해서는 고가의 중방향활동체결구 또는 횡단궤도시스템을 적용함으로써 추가 건설비가 발생하게 된다. 주요 해석은 범용 또는 전용 유한요소해석 소프트웨어를 사용하여 기준에서 제시하고 있는 하중 조합에 의해 레일체결장치의 상향력과 압축력을 검토하게 된다. 단부 콘크리트궤도 사용성 검토에 대한 국내·외적으로 명확한 기준 및 해설의 부재로 실무 엔지니어에 따라 해석기법 및 검토결과에 차이가 발생하고, 해석 절차 및 결과 정리에 많은 시간이 소요되는 것이 사실이다.

따라서 본 절에서는 철도교량 단부 콘크리트궤도 사용성 검토를 위해 독립적으로 이루어지는 검토 과정을 일괄적으로 설계 및 검토할 수 있는 알고리즘을 개발하고자 하였다. 철도교량 단부 콘크리트궤도 사용성 검토 알고리즘 설계를 위하여 알고리즘 검증 및 디버깅이 쉬운 공학용 Matlab 프로그램을 사용하였다. 알고리즘 설계는 유한요소해석법에 근간으로 작성하였다. 아래 그림은 교량 단부 콘크리트궤도 사용성 검토 알고리즘의 전체적인 흐름도를 보여주고 있다.

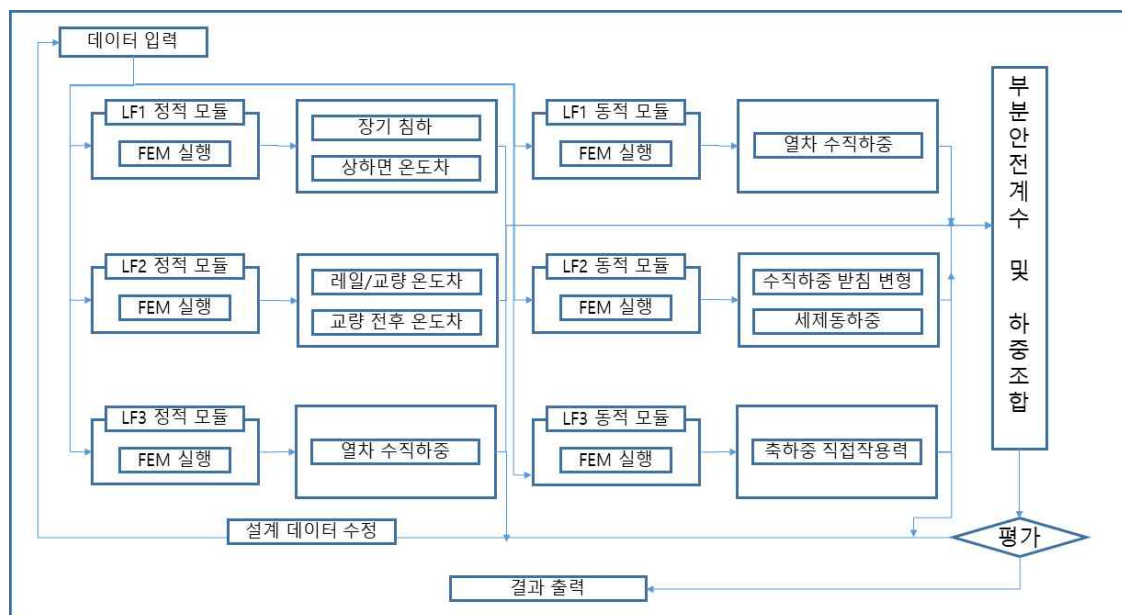


그림 200 철도교량 단부 콘크리트궤도 사용성 검토 흐름도(기존 단위하중법)

철도교량 단부 콘크리트궤도 사용성 검토 알고리즘의 설계에 있어 가장 핵심이라 할

수 있는 FEM(유한요소해석법) 모듈 실행에 있으며, FEM 내부 알고리즘 절차에 대한 흐름도를 아래에 제시하였다.

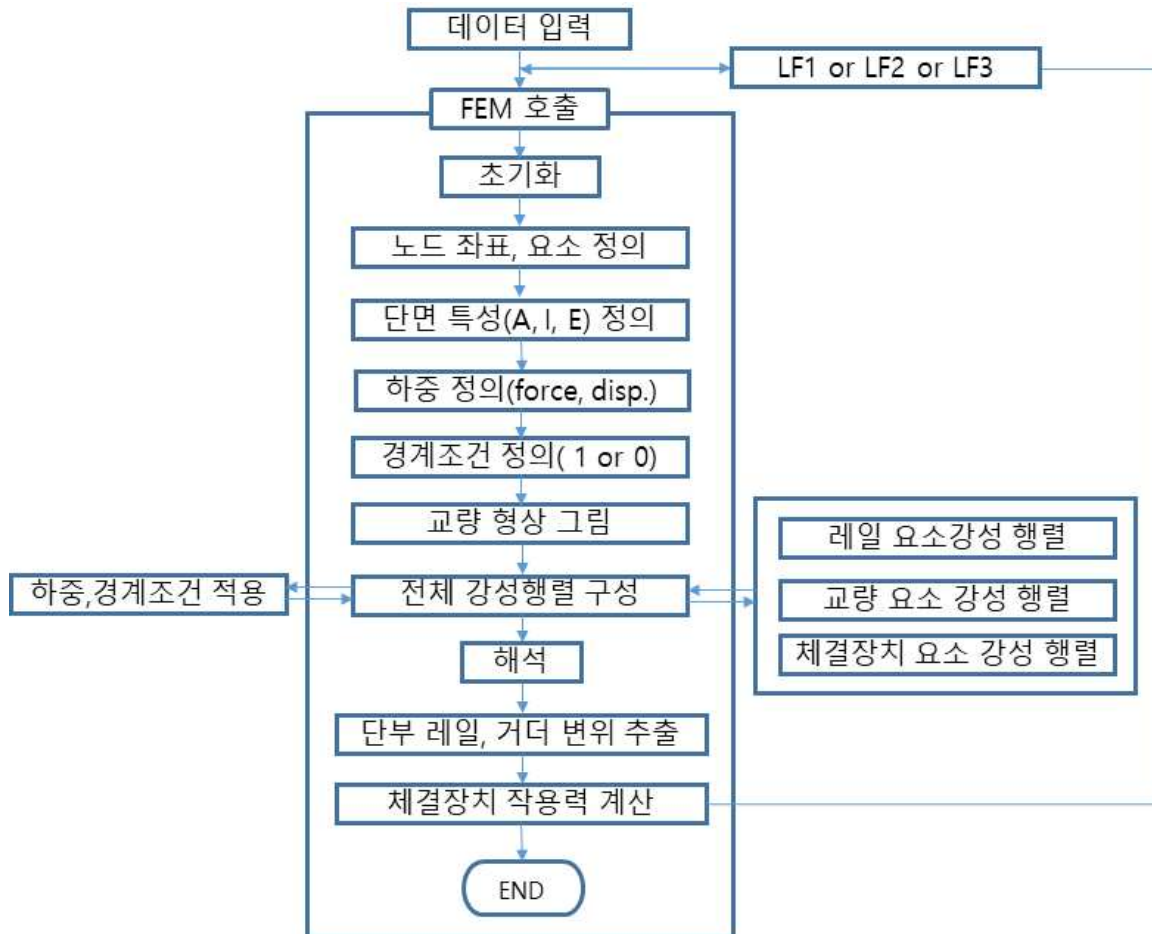


그림 201 유한요소해석 흐름도

(1) 유한요소 프로그래밍

(가) 개요

유한요소법의 주요 절차는 다음과 같다.

- ① 입력데이터를 불러오고, 각 변수들의 크기를 할당한다.
- ② 모든 요소의 벡터와 행렬을 계산한다.
- ③ 하중 및 경계조건 정의 및 적용한다.
- ④ 요소 강성 행렬을 전체 강성행렬로 구성한다.
- ⑤ 행렬식을 푼다.
- ⑥ 결과를 출력한다.

(나) 입력데이터

유한요소 프로그래밍을 위한 주요 입력데이터는 다음과 같다.

- ① 전체 노드의 수
- ② 전체 요소의 수
- ③ 전체 좌표에서 각 노드의 좌표
- ④ 각 요소의 타입(spring, truss, beam, frame 등)
- ⑤ 경계조건 및 하중에 대한 정보

입력데이터에서 요소 1개당 노드의 수를 지정하고, 각 노드에 대한 자유도를 지정해준다. 철도교량 단부 콘크리트궤도 사용성 검토를 위한 알고리즘 설계에서는 2차원 해석으로 가능하다. 따라서 x방향, y방향 병진 자유도와 z방향 회전자유도를 가지며, 1개의 요소는 6개의 자유도를 갖는다. 전체 노드의 좌표는 다음과 같이 정의할 수 있다.

NODE = [#1:노드번호, #2: X좌표, #3, Y좌표]

```
NODE = [  
  1 0 0.1  
  2 1 0.1  
  3 2 0.1  
  4 3 0.1  
  5 4 0.1  
  6 0 0
```

각 요소를 다음과 같이 정의할 수 있다.

ELEM = [#1:요소번호, #2: 요소종류, #3, 시작노드, #4:끝노드]

```
ELEM = [  
  1 1 1 2  
  2 1 2 3  
  3 1 3 4  
  4 1 4 5  
  5 2 6 7
```

경계 조건에 대한 정의는 다음과 같다.

BC

```
% BC=[#1 #2 #3 #4]
% #1: node number, #2: x-constraint, #3: y-constraint, #4: z-rotation (0:free, 1:fixed)
BC=zeros(nnode,4);
for i=1:nnode
    BC(i,1)=i;
end
BC(6,2)=1;    BC(6,3)=1;    BC(6,4)=1;
BC(7,2)=1;    BC(7,3)=1;    BC(7,4)=1;
BC(8,2)=1;    BC(8,3)=1;    BC(8,4)=1;
BC(10,2)=1;   BC(10,3)=1;   BC(10,4)=1;
```

하중 조건에 대한 정의는 다음과 같다.

Load

```
% F=[#1 #2 #3 #4]
% #1: node number, #2: x-directional load, #3: y-directional load, #4: z-rotation, moment
%
F=zeros(nnode,4);
for i=1:nnode
    F(i,1)=i;
end
F(1,3) = -500;    % N
```

(다) 강성행렬 구성

① 스프링 요소

아래 그림과 같은 선형 스프링 요소에 대하여 직접 강성법을 이용한다. 전체 강성행렬은 각 요소 강성행렬을 적절하게 중첩시켜서 구할 수 있다.

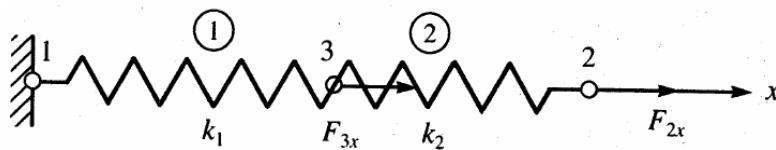


그림 202 2개의 선형 스프링 조합

상기 그림에서와 같은 2개의 스프링 요소의 강성행렬은 다음과 같다.

$$\underline{k}^{(1)} = \begin{bmatrix} d_{1x} & d_{3x} \\ k_1 & -k_1 \\ -k_1 & k_1 \end{bmatrix} \quad \underline{k}^{(2)} = \begin{bmatrix} d_{3x} & d_{2x} \\ k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \quad (22)$$

상기 식에서 요소 1은 절점 1과 3의 축 방향 변위들과 관련되고, 요소 2는 절점 2와 3의 축 방향 변위들과 관련되므로, 전체 구조물의 강성행렬 크기와 일치하도록 전체 자유도에 맞게 확장하고 행렬을 더한다.

요소 1에 대한 강성행렬을 확장행렬에 대입한 행렬은 아래 식과 같다.

$$k_1 \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_{1x}^{(1)} \\ d_{2x}^{(1)} \\ d_{3x}^{(1)} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_{1x}^{(1)} \\ f_{2x}^{(1)} \\ f_{3x}^{(1)} \end{Bmatrix} \quad (23)$$

요소 2에 대한 강성행렬을 확장행렬에 대입한 행렬은 아래 식과 같다.

$$k_2 \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_{1x}^{(2)} \\ d_{2x}^{(2)} \\ d_{3x}^{(2)} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_{1x}^{(2)} \\ f_{2x}^{(2)} \\ f_{3x}^{(2)} \end{Bmatrix} \quad (24)$$

또한 각 절점에서의 힘의 평형식은 아래 식과 같다.

$$\begin{Bmatrix} f_{1x}^{(1)} \\ 0 \\ f_{3x}^{(1)} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0 \\ f_{2x}^{(2)} \\ f_{3x}^{(2)} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_{1x} \\ F_{2x} \\ F_{3x} \end{Bmatrix} \quad (25)$$

식 23와 식 24을 식 25에 대입하면 아래 식과 같다.

$$\begin{bmatrix} k_1 & 0 & -k_1 \\ 0 & k_2 & -k_2 \\ -k_1 & -k_2 & k_1 + k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_{1x} \\ d_{2x} \\ d_{3x} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_{1x} \\ F_{2x} \\ F_{3x} \end{Bmatrix} \quad (26)$$

② 프레임 요소

본 유한요소해석에서 교량을 모델링하기 위해 사용된 요소는 아래 그림과 같이 Bar 요소와 Bernoulli 빔 요소의 조합인 2차원 프레임 요소를 사용한다. 1개의 노드는 전체 좌표계에서 2개의 변위와 1개의 회전을 갖는 3자유도를 갖고 전체 좌표계에서 노드 벡터는 다음과 같다.

$$u^T \equiv [u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6] \quad (27)$$

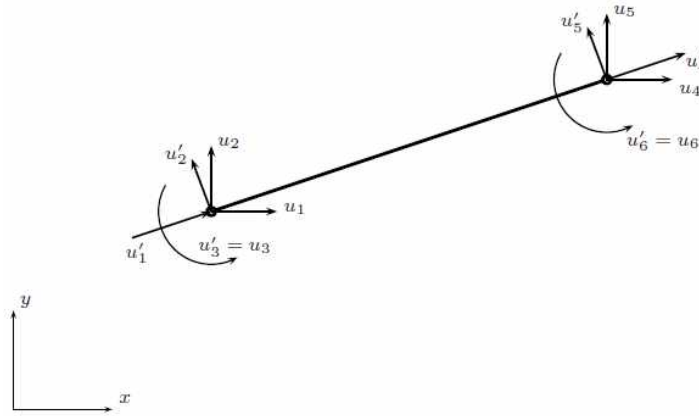


그림 203 2차원 프레임 요소

$$K^{le} = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & -\frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ & \frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} & 0 & \frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} \\ & & \frac{4EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} \\ & & & \frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ & & & & \frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} \\ \text{sim.} & & & & & \frac{4EI}{L} \end{bmatrix} \quad (28)$$

여기에서 K^{le} 는 프레임 요소 강성행렬을 나타내고, E 는 탄성계수, A 는 요소의 단면적, L 은 요소의 길이를 나타내고, I 는 요소의 단면2차 모멘트를 나타낸다.

상기 식은 전체 좌표에서의 요소를 국부 좌표로 변환하기 위한 행렬이다. l 은 cosine, m 은 sine을 나타낸다.

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} l & m & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -m & l & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & l & m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -m & l & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (29)$$

전체 좌표계에서 변형에너지는 다음과 같다.

$$U_e = \frac{1}{2} u'^T K' u' = \frac{1}{2} u^T L^T K' L u = u^T K u \quad (30)$$

여기서

$$K = L^T K' L \quad (31)$$

(라) 경계조건

① 경계조건에 따른 강성행렬의 분할

d_1 은 모르는 변위이고, d_2 는 주어진 변위인 경우 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{bmatrix} K_{11} & \vdots & K_{12} \\ \dots & \dots & \dots \\ K_{21} & \vdots & K_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_1 \\ \dots \\ d_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_1 \\ \dots \\ F_2 \end{Bmatrix} \quad (32)$$

$$K_{11}d_1 = F_1 - K_{12}d_2 \quad (33)$$

$$F_2 = K_{21}d_1 - K_{22}d_2 \quad (34)$$

K_{11} 은 일반적으로 가역 행렬이므로 d_1 을 구할 수 있다.

절점 1이 고정되어 있으므로 $d_{1x} = 0$ 이므로(homogeneous 경계조건),

$$\begin{bmatrix} k_1 & 0 & -k_1 \\ 0 & k_2 & -k_2 \\ -k_1 & -k_2 & k_1 + k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 0 \\ d_{2x} \\ d_{3x} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_{1x} \\ F_{2x} \\ F_{3x} \end{Bmatrix} \quad (35)$$

즉

$$\begin{aligned} k_1(0) + (0)d_{2x} - k_1d_{3x} &= F_{1x} \\ 0(0) + k_2d_{2x} - k_2d_{3x} &= F_{2x} \\ -k_1(0) - k_2d_{2x} + (k_1 + k_2)d_{3x} &= F_{3x} \end{aligned} \quad (36)$$

두 번째와 세 번째 식을 행렬 형태로 나타내면

$$\begin{bmatrix} k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_1 + k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_{2x} \\ d_{3x} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_{2x} \\ F_{3x} \end{Bmatrix} \quad (37)$$

즉 자유도의 변위가 0인 행과 열만 찾아서 지워주면 된다.

d_{2x} 와 d_{3x} 에 관하여 풀고

$$\begin{Bmatrix} d_{2x} \\ d_{3x} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_1 + k_2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} F_{2x} \\ F_{3x} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_1} & \frac{1}{k_1} \\ \frac{1}{k_1} & \frac{1}{k_1} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_{2x} \\ F_{3x} \end{Bmatrix} \quad (38)$$

반력 F_{1x} 를 구하면

$$F_{1x} = -k_x d_{3x} \quad (39)$$

과 같이 계산할 수 있다.

상기 식에서 d_{3x} 를 식 38에 대입해 주면, 절점 1에서의 힘(반력)을 F_{2x} 와 F_{3x} 로 표시할 수 있다.

$$F_{1x} = -F_{2x} - F_{3x} \quad (40)$$

따라서 모든 homogeneous 경계조건에서는 전체 행렬에서 변위가 0으로 주어진 행과 열의 값을 뺀 행렬을 재구성하여, 그 연립방정식을 풀면 변위를 구할 수 있다.

② 절점의 변위가 0이 아닌 경우(nonhomogeneous 경계조건)

주어진 변위의 값이 $d_{x1} = \delta$ 라고 할 때, 시스템 행렬식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} k_1 & 0 & -k_1 \\ 0 & k_2 & -k_2 \\ -k_1 & -k_2 & k_1 + k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta \\ d_{2x} \\ d_{3x} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_{1x} \\ F_{2x} \\ F_{3x} \end{Bmatrix} \quad (41)$$

연립방적으로 나타내면,

$$\begin{aligned} k_1 \delta + 0 d_{2x} - k_1 d_{3x} &= F_{1x} \\ 0 \delta + k_2 d_{2x} - k_2 d_{3x} &= F_{2x} \\ -k_1 \delta - k_2 d_{2x} + (k_1 + k_2) d_{3x} &= F_{3x} \end{aligned} \quad (42)$$

여기서 F_{2x} 와 F_{3x} 의 값을 알고 있으므로 두 번째와 세 번째 방정식을 정리하여, 행렬식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_1 + k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_{2x} \\ d_{3x} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_{2x} \\ k_1 \delta + F_{3x} \end{Bmatrix} \quad (43)$$

여기서 주의할 점은 $k_1 \delta$ 항이 우변의 하중 항으로 이항된 다는 것이다.

Algorithm:

$$F_i = F_i - K_{im} d, \quad i = 1 \dots N, i \neq m$$

$$F_m = d$$

$$K_{mj} = 0, \quad j = 1 \dots N$$

$$K_{im} = 0, \quad i = 1 \dots N$$

$$K_{mm} = 1$$

(마) 해석 결과

① Force 하중

Matlab을 이용하여 철도교량 단부 콘크리트케도를 아래 그림과 같이 모델링하였고, 1번 절점에 하중 -500N을 주었을 때의 결과를 유한요소해석프로그램인 SAP2000을 통해 비교·검증하였다.

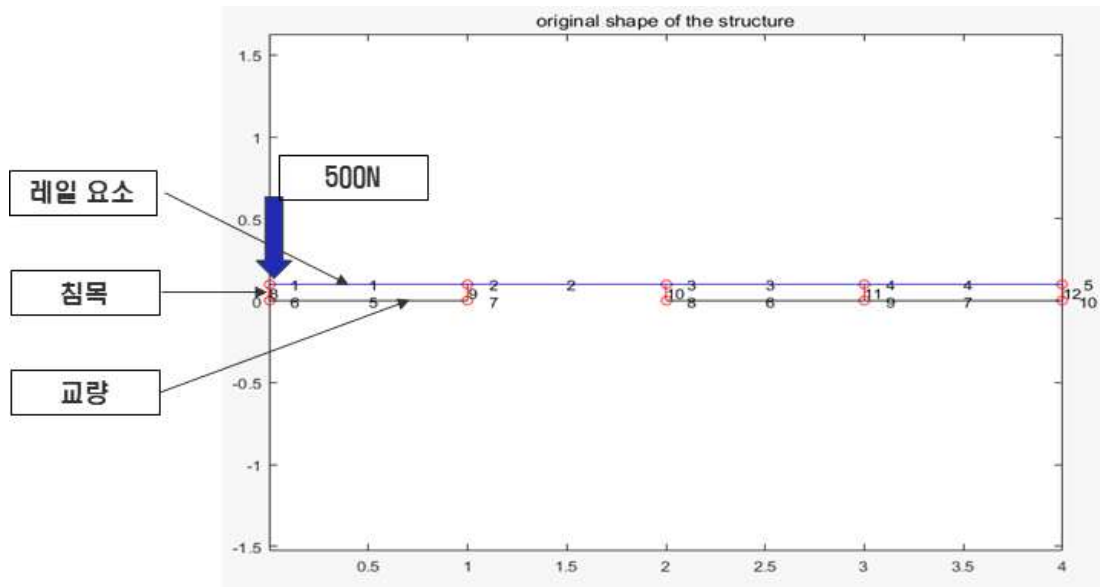


그림 204 Matlab을 이용한 철도교량 단부 콘크리트케도 모델링

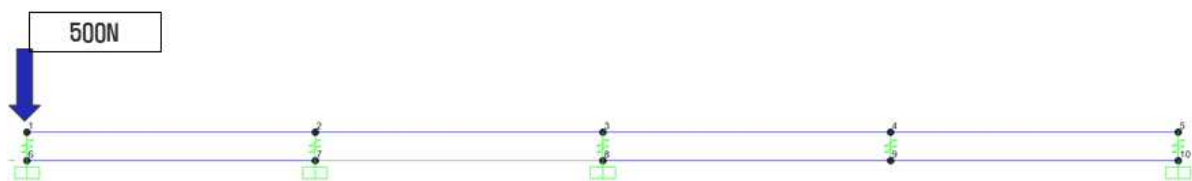


그림 205 SAP2000을 이용한 철도교량 단부 콘크리트케도 모델링

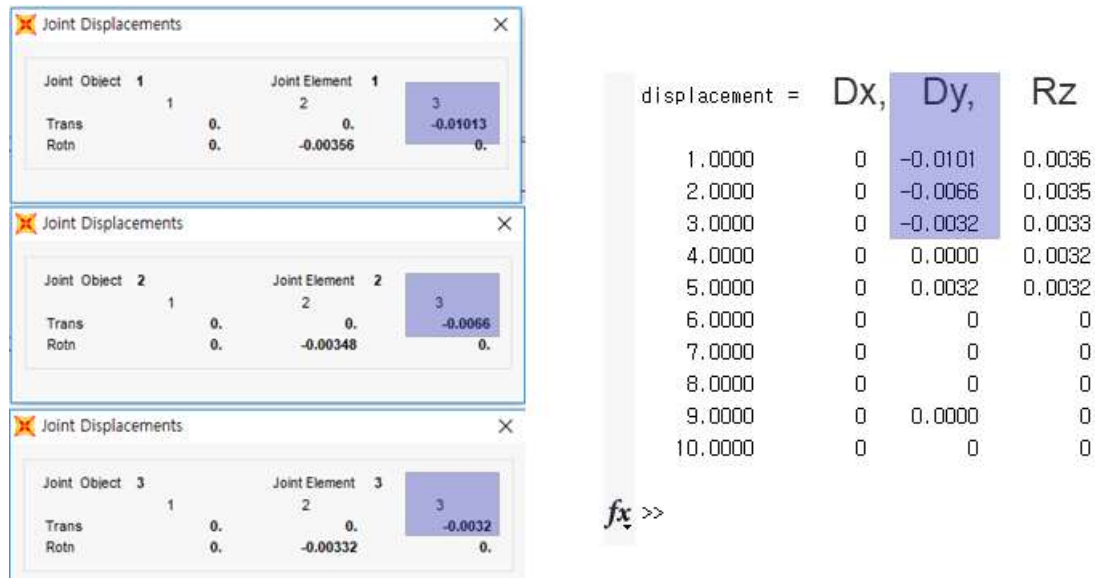


그림 206 수직하중에 의한 해석결과 비교 (SAP2000 vs. 본 연구결과)

상기 그림에서 절점 1, 2, 3에서의 수직변위와 회전변위를 나타냈으며, SAP2000을 이용한 해석결과와 본 연구에서 작성한 유한요소 알고리즘에서의 수직 및 회전 변위가 일치하고 있음을 확인하였다. 여기서 SAP2000과 작성된 알고리즘에서의 회전변위에 대한 방향 정의가 반대이므로 결과에서도 방향이 반대로 나타나고 있음을 알 수 있다. 작성된 알고리즘에서 양의 회전변위 방향을 반대로 설정하도록 하였다.

아래 그림은 하중에 의한 변형형상을 보여주고 있다.

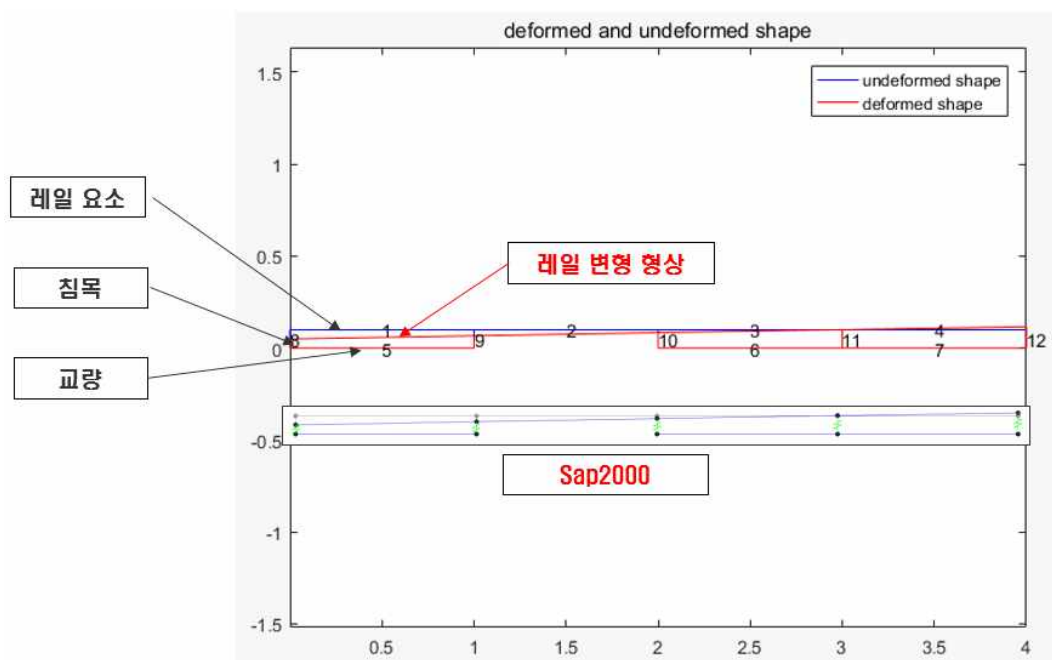


그림 207 수직하중에 의한 변형 형상 비교 (SAP2000 vs. 본 연구결과)

② Displacement 하중 모델 검증

철도교량 단부 콘크리트궤도 사용성 평가를 위해서는 LF1와 LF2에 대한 단위 회전 및 변위를 하중으로 입력해야 된다. 따라서 본 연구에서의 알고리즘도 수직 및 회전 변위를 입력할 수 있도록 작성하였다.

아래 그림은 본 연구에서 작성된 알고리즘을 검증하기 위한 단순보 모델을 나타낸다. 수직변위를 하중으로 입력하기 위한 유한요소해석 프로그램인 SAP2000과 작성된 알고리즘에서의 교량 모델을 나타낸다.

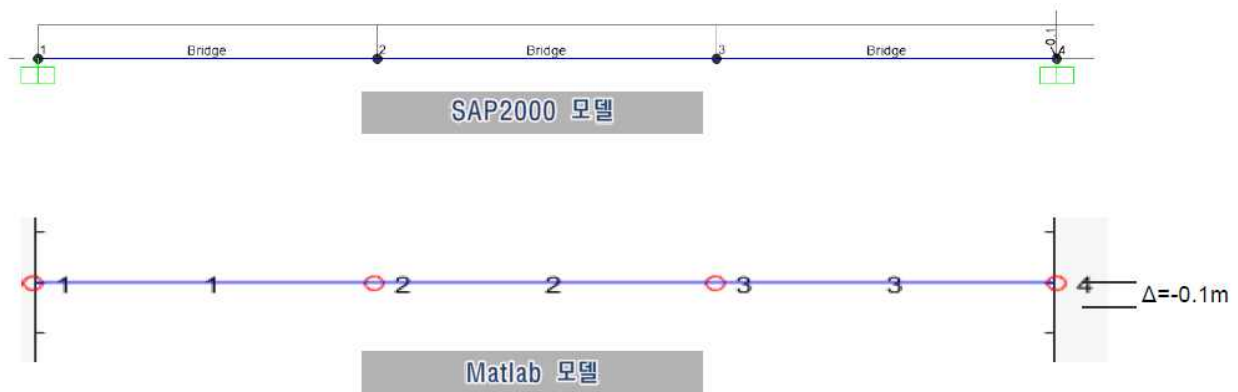


그림 208 수직변위 하중을 입력하기 위한 단순보 모델

해석을 위한 보요소의 단면적은 $15.372e-03\text{m}^2$ 이고, 단면2차 모멘트는 $611.e-08\text{m}^4$, 탄성계수는 $200e+09\text{N/m}^2$ 을 사용하였고, 절점 4에 수직으로 변위 -0.1m 를 주었을 때의 응답을 확인하였다.

아래 그림은 작성된 알고리즘과 SAP2000 해석결과의 변형형상을 보여주고 있다.

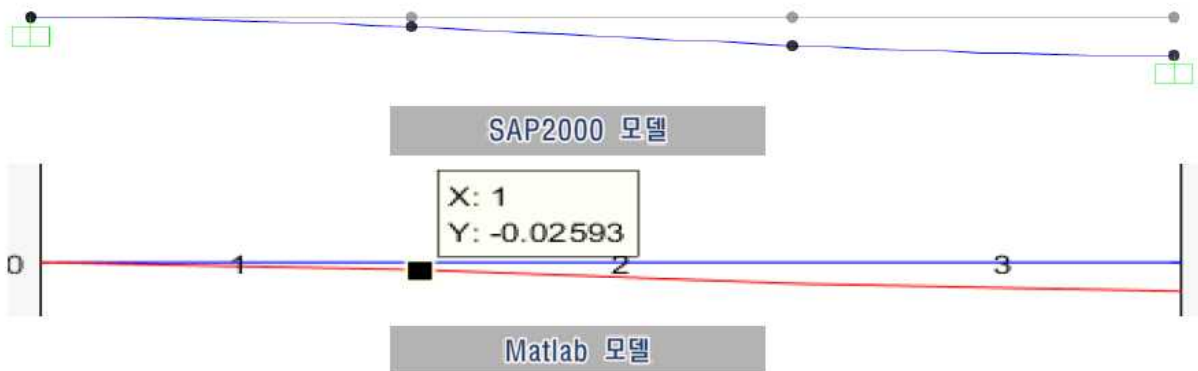


그림 209 수직변위 하중에 의한 변형 형상 비교 (SAP2000 vs. 본 연구결과)

아래 그림은 작성된 알고리즘과 SAP2000과의 해석결과를 보여주고 있다. 비교 결과 같은 응답을 보이고 있음을 확인하였다.

Joint Text	OutputCase	CaseType Text	U1 m	U2 m	U3 m	R1 Radians	R2 Radians	R3 Radians
1	static	LinStatic	0	0	0	0	0	0
2	static	LinStatic	0	0	-0.025926	0	0.044444	0
3	static	LinStatic	0	0	-0.074074	0	0.044444	0
4	static	LinStatic	0	0	-0.1	0	0	0

	1	2	X	3	Y	4	R
1		0		0		0	
2		0		-0.0259		-0.0444	
3		0		-0.0741		-0.0444	
4		0		-0.1000		0	

그림 210 수직변위 하중에 의한 해석결과 비교 (SAP2000 vs. 본 연구결과)

③ Displacement 하중 교량 모델

단순보에 대한 변위 하중 모델을 검증 후 철도교량 모델에 적용하였다. 아래 그림은 작성된 알고리즘과 SAP2000에서의 철도교량 모델을 보여주고 있다.

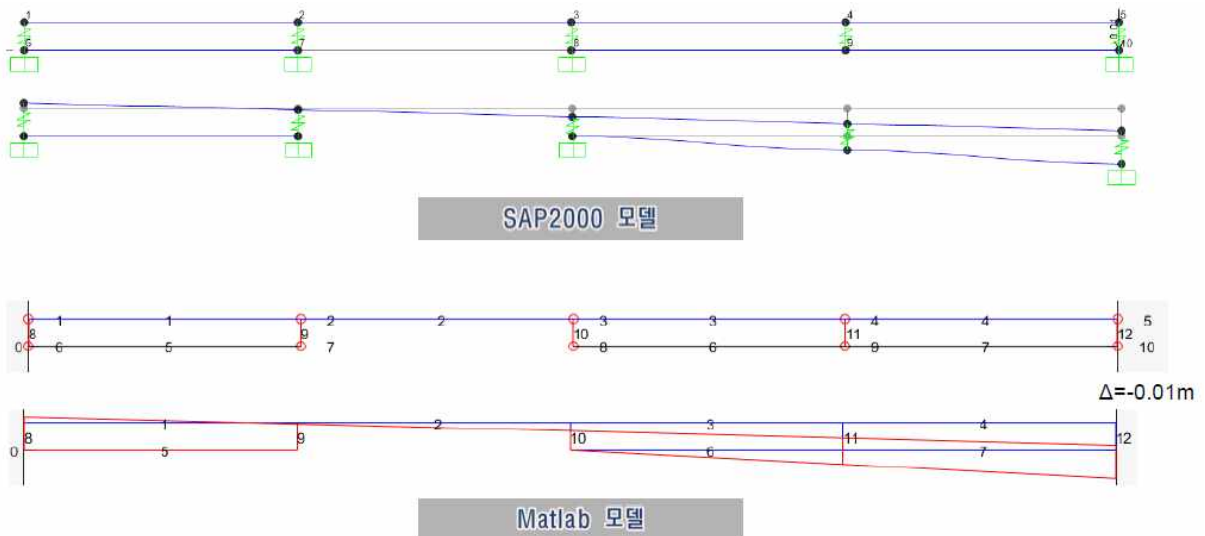


그림 211 철도교량 단부 궤도 모델링 비교 (SAP2000 vs. 본 연구결과)

레일 및 교량 거더에 대한 단면 특성은 다음 표에 나타내었다.

표 30 레일 및 교량 거더의 단면 특성

	단면적(m^2)	단면2차모멘트(m^4)	탄성계수(N/m^2)
레일	1.54E-02	6.11E-06	2.00E+11
거더	12.384	20.3	2.86E+07

해석결과 각 절점에서의 변위를 아래 그림에 나타내었다. 두 결과 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

SAP2000 결과								
Joint Text	OutputCase	CaseType Text	U1 m	U2 m	U3 m	R1 Radians	R2 Radians	R3 Radians
1	static	LinStatic	0	0	0.001944	0	0.00241	0
2	static	LinStatic	0	0	-0.000475	0	0.002434	0
3	static	LinStatic	0	0	-0.002939	0	0.0025	0
4	static	LinStatic	0	0	-0.005475	0	0.002566	0
5	static	LinStatic	0	0	-0.008056	0	0.00259	0
6	static	LinStatic	0	0	0	0	0	0
7	static	LinStatic	0	0	0	0	0	0
8	static	LinStatic	0	0	0	0	0	0
9	static	LinStatic	0	0	-0.005001	0	5.1E-05	0
10	static	LinStatic	0	0	-0.01	0	0	0

Matlab 모델			
1	2	3	4
1	0	0.0019	-0.0024
2	0	-4.7451e-04	-0.0024
3	0	-0.0029	-0.0025
4	0	-0.0055	-0.0026
5	0	-0.0081	-0.0026
6	0	0	0
7	0	0	0
8	0	0	0
9	0	-0.0050	-0.0075
10	0	-0.0100	0

그림 212 철도교량 단부 궤도 해석결과 비교 (SAP2000 vs. 본 연구결과)

다. 철도교량 단부 콘크리트케도 사용성 검토 알고리즘 개발

(1) 영향인자 보정을 고려한 알고리즘 개발

본 절에서는 철도교량 단부 콘크리트케도 사용성 검토를 위해 독립적으로 이루어지는 검토 과정을 일괄적으로 설계 및 검토할 수 있는 알고리즘을 개발하였다. 유한요소해석 알고리즘을 근간으로 유한요소해석의 단위하중 계산 부분과 철도교량 단부에서 발생할 수 있는 응답을 계산하는 부분을 추가하였다. 다음 그림은 전체 알고리즘에서 크게 입력부와 단위하중 해석부를 나타내고 있으며, 단부에서 발생할 수 있는 응답을 계산하는 부분과 조합부 및 결과 출력부를 나타내고 있다.

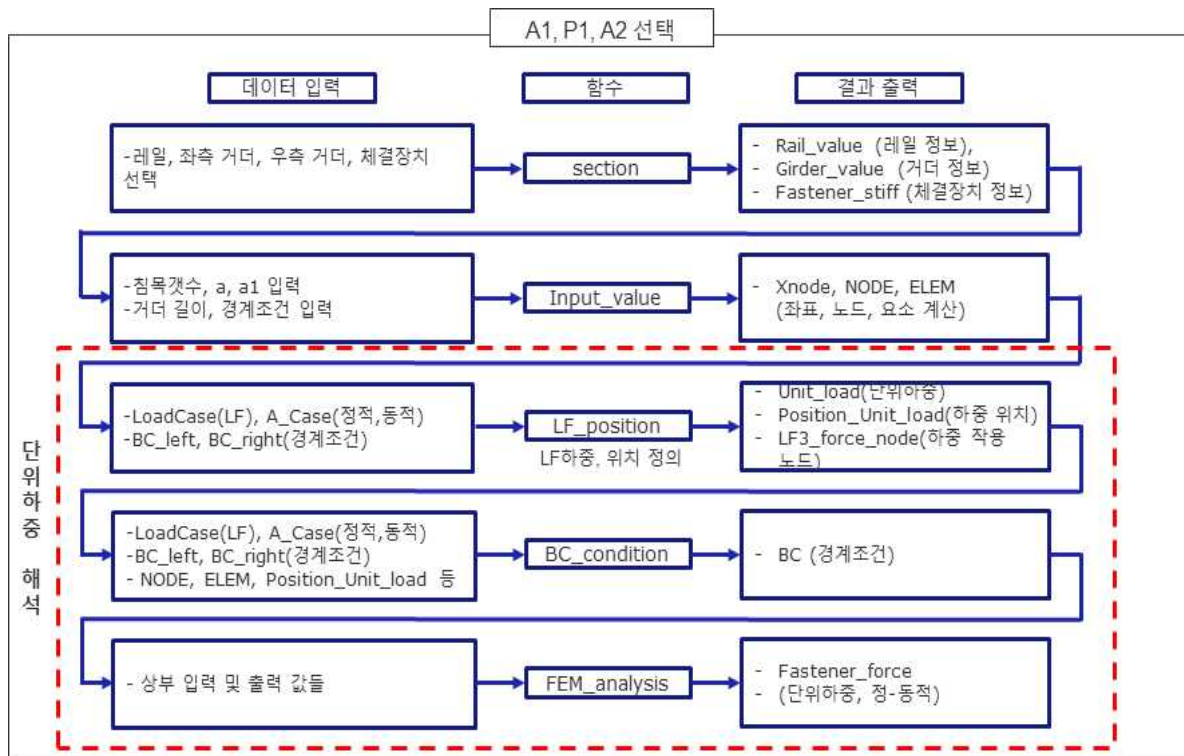


그림 213 알고리즘 흐름도: 입력부 및 단위하중 해석부

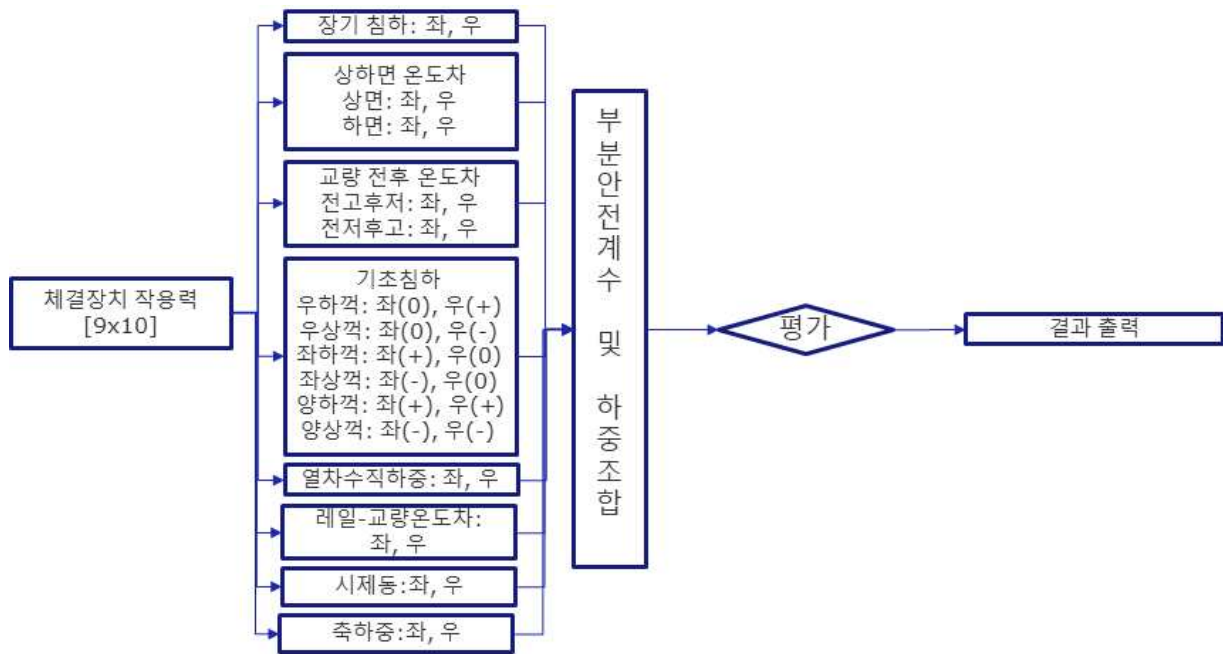


그림 214 알고리즘 흐름도: 단부응답 계산 및 출력부

(가) 입력부 (section 함수)

입력부의 section 함수에서는 해석위치(교대 및 교각), 레일 형식, 레일체결장치 형식, 좌측 거더 형식, 우측 거더 형식을 선택 또는 입력할 수 있다. section 함수는 레일 및 거더, 레일체결장치에 대한 정보를 출력하여 Input_value 함수의 입력으로 사용된다.

```
function [Rail_value, Girder_value, Fastener_stiff] = section(Rail, Girder_left, Girder_right, Fastener)
```

여기서, Rail은 레일의 형식, Girder_left는 좌측 거더 형식, Girder_right는 우측 거더 형식, Fastener는 레일체결장치의 종류를 나타낸다.

(나) 입력부 (Input_value 함수)

Input_value 함수에서는 레일 및 거더, 레일체결장치의 정보와 침목 개수, 침목 간격 (a), 단부 침목 간격(a1), 거더 길이, 경계조건 등을 입력하여, 유한요소 해석에 사용되는 철도교량 거더 및 레일의 좌표 및 절점, 요소를 계산한다.

```
function [ELEM, NODE, nnode, nelem, Psleep, Pgirder, Xnode] = input_value(sleep_left, sleep_right, a, a1, REsleep, BC_left, BC_right, GD1, GD2, GGap,
```

Girder_left, Girder_right)

여기서, sleep_left는 좌측 거더의 침목 개수, sleep_right는 우측 거더의 침목 개수, a는 침목간격, a1은 단부 침목 간격, REsleep은 우측 거더의 가장 왼쪽의 침목번호를 나타내며, BC_left는 좌측 거더의 경계조건, BC_right는 우측 거더의 경계조건, GD1은 좌측 경간 길이, GD2는 우측 경간 길이, GGap은 신축이음부 거리를 나타낸다.

(다) 단위하중 해석부 (LF_position 함수)

LF_position 함수에서는 단위하중 해석시 경계조건 및 하중 위치 등을 계산하며, 기 입력 정보와 단위하중 조건, 정적·동적 해석 조건, 경계조건을 입력받아 단위하중과 하중 위치, 하중 작용 노드를 계산한다.

function [LF3_force_node, Unit_load] = LF_position(Pier, LoadCase, GD1, GD2, GGap, Psleep);

여기서, Pier는 교대 및 교각을 나타내며, LoadCase는 단위하중의 종류, Psleep은 침목의 위치를 나타낸다.

(라) 단위하중 해석부 (BC_condition 함수)

BC_condition 함수에서는 단위하중 해석조건 및 입력된 경계조건, 절점, 요소, 단위하중 정보를 입력받아, 모든 하중에 대한 경계조건을 계산한다.

function [BC, Unit_load, F, Node_BC] = BC_condition(LoadCase, Pier, BC_left, BC_right, Position_Unit_load, Pgirder, nnode, GD1, Psleep, ELEM, NODE, Unit_load, LF3_force_node)

여기서, Position_Unit_load는 단위하중이 작용하는 위치, nnode는 절점 정보, ELEM은 요소정보, LF3_force_node는 단위하중이 작용하는 절점을 나타낸다.

(마) 단위하중 해석부 (FEM_analysis 함수)

FEM_analysis 함수에서는 앞에서의 입력정보를 받아, 단위하중해석(LF1, LF2, LF3)을 수행하고, 열차 수직하중 해석을 수행하여 단부에서의 각 레일체결장치 작용력[9X10]을

출력한다.

function [Rail_Gird_disp, Fastener_force, U] = FEM_analysis(LoadCase, A_Case, Rail_value, Girder_value, Fastener_stiff, NODE, ELEM, BC, BC_left, REsleep, Psleep, Pgirder, Xnode, Unit_load, F)

여기서, A_Case는 정적·동적 해석 설정, Fastener_stiff는 레일체결장치 강성, BC는 경계조건, Pgirder는 거더의 좌표, Xnode는 전체 절점의 정보, F는 전체 하중을 나타낸다.

(바) 단부에서의 응답 산출부

① 장기침하(좌, 우)

시간경과계수, 거더의 단위중량, 단면적, 거더 길이, 탄성계수를 입력하여, 좌·우 단부에서의 회전각 계산한다.

② 상부구조 상하면 온도차

시간경과계수, 상하면 온도차, 거더 형고를 입력받아 상면의 온도가 하면보다 높은 경우, 하면의 온도가 상면보다 높은 경우에 대하여 좌·우 단부에서의 회전각을 계산한다.

③ 교량 전후 온도차

온도차, 교각 높이, 교각직경, 교좌장치 간격을 입력받아 교각의 온도가 전부가 후부보다 높은 경우, 교각의 온도가 후부가 전부보다 높은 경우에 대하여 좌·우 단부에서의 단차를 계산한다.

④ 기초의 부등침하

기초의 부등침하량을 입력받아 6가지 경우의 수에 대하여 좌·우 단부에서의 회전각을 계산한다.

⑤ 레일-교량 상부구조의 온도차에 의한 교각 상부 회전

레일-교량 종방향 상호작용 해석의 결과로 교각 회전각을 입력받아 좌·우 단부에서의 단차를 계산한다.

⑥ 열차 수직하중

열차 표준하중, 충격계수, 열차 주행 속도, 등분포하중 적용 구간을 입력받아 좌·우 단부에서의 회전각을 계산한다.

⑦ 시제동하중에 의한 교각 상부 회전

궤도-교량 종방향 상호작용 해석의 결과로 교각 회전각을 입력받아 좌·우 단부에서의 단차를 계산한다.

⑧ 축하중에 의한 직접 작용력

열차 주행속도 및 윤중 증감계수를 입력받아 하중을 계산한다.

(사) 부분안전계수 및 작용력 조합

단부에서 발생할 수 있는 각 응답에 대하여 아래 표를 이용하여 부분안전계수를 적용한다. 단위하중에서 산출된 각 레일체결장치 작용력과 단부에서의 각 응답을 곱하여 레일체결장치의 사용성을 평가한다.

표 31 단부사용성 검토 시 하중조건에 따른 레일체결장치 수직강성의 적용방법 제안(안)

구분	작용력	부분 안전 계수 γ_F	[KR C-08090] 레일체결장치 수직강성		[제안(안)] 레일체결장치 수직강성	
			상향력 검토	압축력 검토	상향력 검토	압축력 검토
정적	자중 + 잔류 크리프 및 건조수축 (궤도 부설 이후)	1.0	k_{stat}	k_{stat}	$k_{stat}^{1)}$	$k_{stat}^{3)}$
	교량 상부구조 상·하면 온도차	1.0				
	교각 잔류 부등침하	1.0				
	레일-교량 상부구조 온도차에 의한 교각 상부 회전	1.0				
	교각 전·후면 온도차에 의한 교각 상부 회전	1.0				
동적	열차 수직하중	1.3	k_{dyn}		$k_{dyn}^{2)}$	
	시 · 제동하중에 의한 교각 상부 회전	1.0				
	축하중에 의한 직접 작용력	1.3				

1) 압축-레일체결장치 정적수직강성값 적용, 부상-레일체결장치 이상화된 Bi-linear 모델 적용

2) 압축-레일체결장치 동적수직강성값 적용, 부상-레일체결장치 이상화된 Bi-linear 모델 적용

3) 압축력 검토 시에는 레일체결장치의 정적 수직강성값을 적용

(2) 유한요소해석 프로그램을 통한 알고리즘 검증

(가) 해석모델

개발된 철도교량 단부 콘크리트케도 사용성 검토 알고리즘을 검증하기 위하여 임의의 단순 교량 모델을 사용하였다. 본 연구를 통해 개발된 알고리즘은 단위하중법을 적용하기 위한 선형해석 알고리즘으로 실내시험결과(비선형 응답)와 바로 비교를 할 수 없으므로, 상용 유한요소해석 프로그램인 SAP2000을 사용한 선형해석결과와 비교하여 개발된 알고리즘을 검증하였다. 해석에 사용된 단순 교량 모델의 제원은 다음 표와 같고, 거더의 길이는 5.2m로 가정하였다. SAP2000의 해석모델은 아래 그림과 같다.

표 32 단순 교량 모델의 제원

구분		단면적 (m ²)	단면2차모멘트 (m ⁴)	탄성계수 (N/m ²)	강성 (kN/mm)	비고
① 레일	KR60	0.0774	3.083e-5	2.1e+10	-	Beam
② 레일체결장치	KCT-II (Pandrol SFC)	-	-	-	정적 30	Linear link
					동적 60	
③ 거더	L=5.2m	0.0117	1.993e-4	2.1e+10	-	Beam

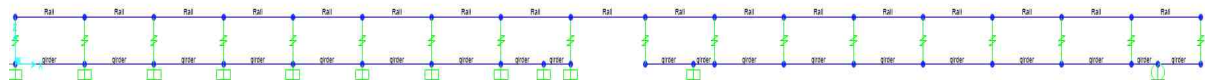


그림 215 좌측 교대 모델(A1)

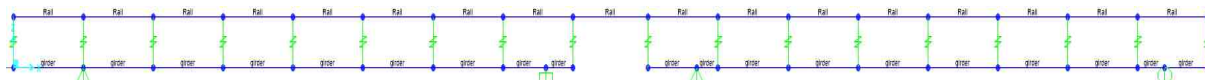


그림 216 교각 모델 (P1)

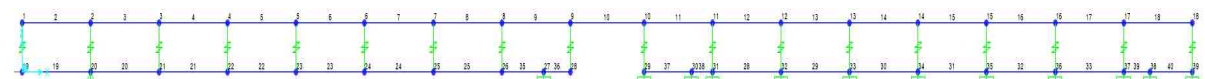


그림 217 우측 교대 모델(A2)

(나) 단위하중 작용에 대한 알고리즘 검증

본 연구를 통해 개발된 알고리즘의 검증단계 중 단위하중 작용에 대한 검증을 위하여 우측 교대(A2)를 대상으로 단위하중 작용시 레일 및 거더 변위에 대한 SAP2000과 개발된 알고리즘을 비교하였다.

① LF1(좌측 경간 회전변위)

아래 그림에서는 단위하중 LF1(회전)에 대한 좌측 경간의 거더 변위, 레일 변위, 거더 회전변위, 레일 회전변위를 레일체결장치의 정적, 동적 강성에 대하여 SAP2000해석결과와 Matlab으로 개발한 알고리즘의 결과를 각각 비교하였다. 파랑색의 실선은 개발된 알고리즘의 해석결과이며, 빨강색 원형 표시는 SAP2000해석결과를 나타낸다. 개발된 알고리즘의 해석결과와 SAP2000 해석결과가 일치하는 것을 확인할 수 있으며, 본 연구를 통해 개발된 알고리즘의 적절성을 확인하였다.



그림 218 좌측 경간 거더 변위(정적 강성)



그림 219 레일 변위(정적 강성)

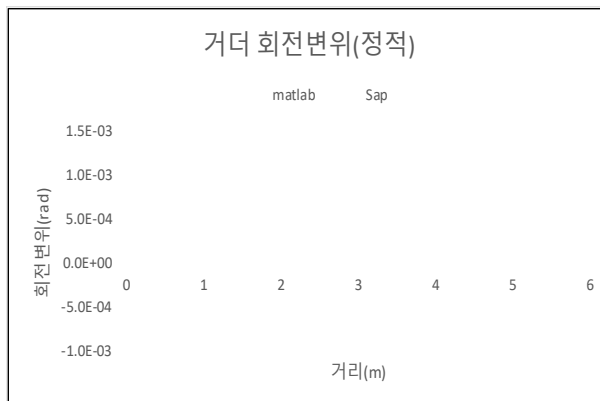


그림 220 좌측 거더 회전각(정적 강성)



그림 221 레일 회전각(정적 강성)

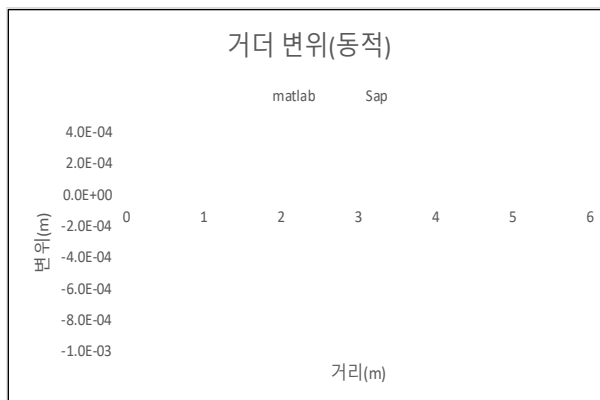


그림 222 좌측 경간 거더 변위(동적 강성)

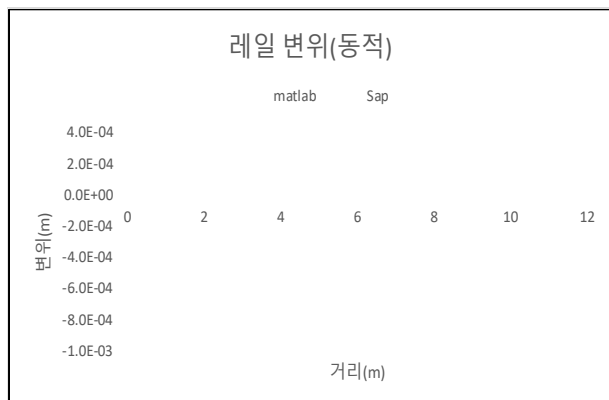


그림 223 레일 변위(동적 강성)

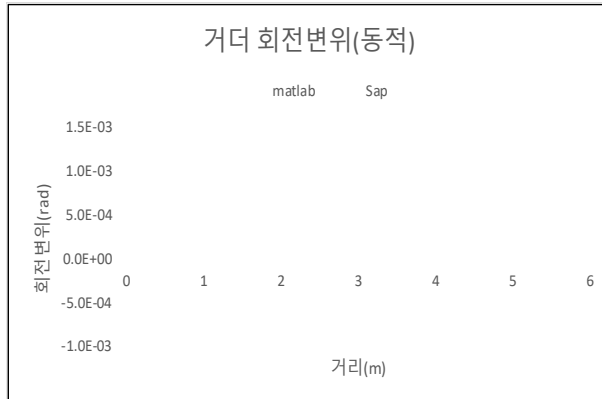


그림 224 좌측 거더 회전각(동적 강성)



그림 225 레일 회전각(동적 강성)

② LF2(좌측 경간 단차)

아래 그림은 단위하중 LF2(단차)에 대한 좌측 경간의 거더 변위, 레일 변위, 거더 회전 변위, 레일 회전변위를 레일체결장치의 정적, 동적 강성에 대하여 SAP2000해석결과와 Matlab으로 개발한 알고리즘의 결과를 각각 비교하였다. LF2하중에 대해서도 개발된 알고리즘의 해석결과와 SAP2000 해석결과가 일치하는 것을 확인할 수 있으며, 본 연구를 통해 개발된 알고리즘의 적절성을 확인하였다.



그림 226 좌측 경간 거더 변위(정적 강성)



그림 227 레일 변위(정적 강성)

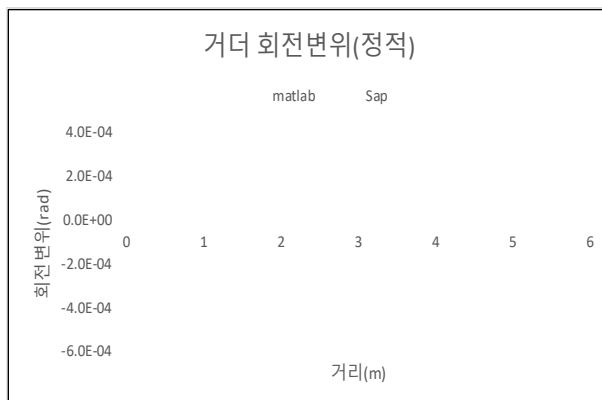


그림 228 좌측 거더 회전각(정적 강성)

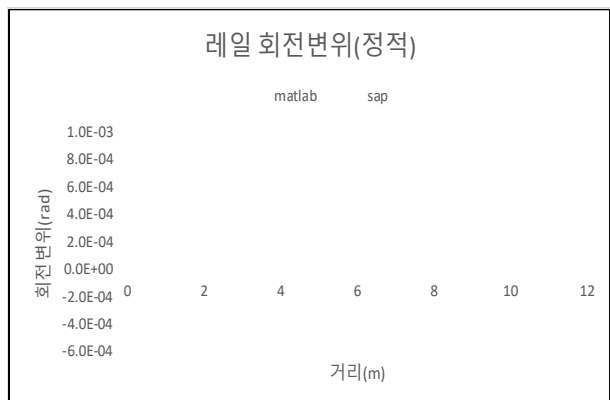


그림 229 레일 회전각(정적 강성)



그림 230 좌측 경간 거더 변위(동적 강성)



그림 231 레일 변위(동적 강성)



그림 232 좌측 거더 회전각(동적 강성)



그림 233 레일 회전각(동적 강성)

③ LF3(좌측 경간 집중하중)

아래 그림은 단위하중 LF3(집중하중)에 대한 좌측 경간의 거더 변위, 레일 변위, 거더 회전변위, 레일 회전변위를 레일체결장치의 동적강성에 대하여 SAP2000해석결과와 Matlab으로 개발한 알고리즘의 결과를 각각 비교하였다. LF3 하중에 대해서도 개발된 알고리즘의 해석결과와 SAP2000 해석결과가 일치하는 것을 확인할 수 있으며, 본 연구를 통해 개발된 알고리즘의 적절성을 확인하였다.

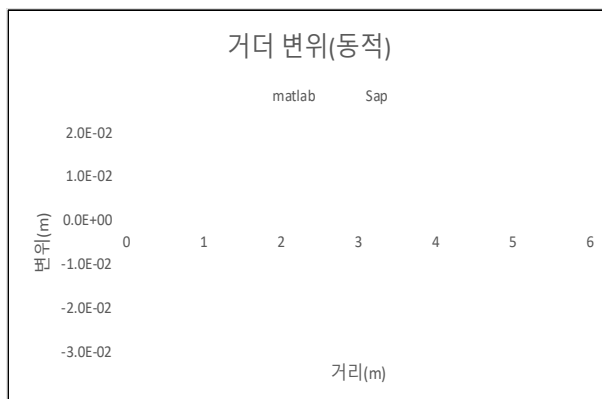


그림 234 좌측 경간 거더 변위(동적 강성)

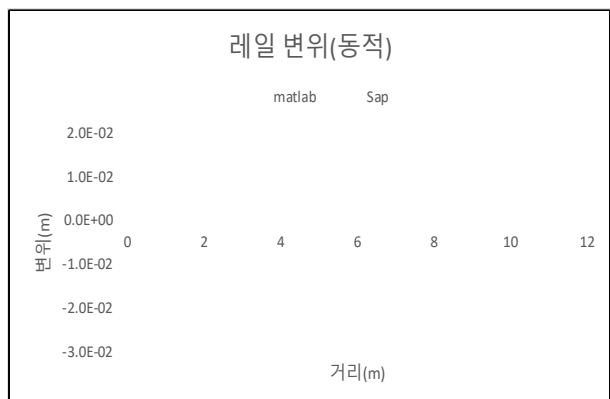


그림 235 레일 변위(동적 강성)

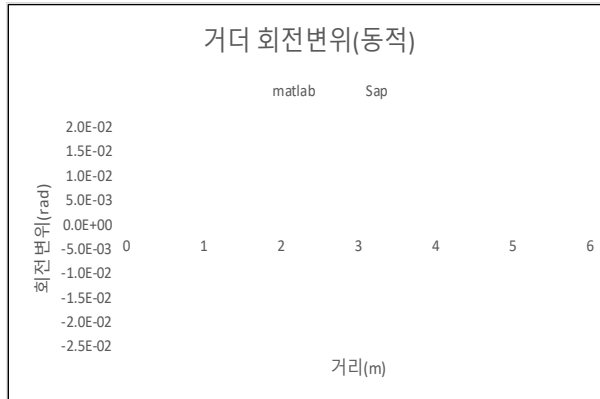


그림 236 좌측 거더 회전각(동적 강성)



그림 237 레일 회전각(동적 강성)

(다) 레일체결장치 작용력을 통한 알고리즘 검증

단순 교량 모델에서 발생하는 레일체결장치 작용력에 대한 검증은 교량의 좌측 교대 (A1)와 교각(P1), 우측 교대(A2)를 대상으로 하였다. 단위하중 LF1, LF2, LF3의 정적 및 동적 하중에 대해 발생한 거더 단부 레일체결장치 작용력은 아래 표와 같다. 아래 표에는 좌측 교대 모델(A1)에 대한 SAP2000해석결과와 Matlab으로 개발한 알고리즘의 결과를 나타내었으며, 해석결과에 대한 오차율을 보여주고 있다. 최대 오차율은 LF1_dynamic에서 2.8%를 보이나, 5 ‘위치에서의 해석결과의 차이는 매우 작았으며, 소수점 두 자리까지 -0.02kN으로 동일한 것으로 확인되었다.

표 33 좌측 교대 모델(A1) 단위하중 해석결과(SAP2000)

Position	Sap2000 (kN)									
	LF1_static		LF1_dynamic		LF2_static		LF2_dynamic		LF3_dynamic	
	Left	Right	Left	Right	Left	Right	Left	Right	Left	Right
5		-0.01		0.04		-0.02		-0.08		-70.26
4		-0.23		-0.18		0.39		0.20		18.91
3		-0.20		-0.83		0.99		1.84		4.29
2		2.91		4.35		-3.83		-4.91		-14.62
1		-4.67		-6.35		3.06		3.74		-65.59
2’		1.66		2.71		-0.32		-0.64		-13.68
3’		0.71		0.50		-0.21		-0.10		2.99
4’		-0.04		-0.12		0.00		0.03		-3.17
5’		-0.05		-0.02		0.01		0.00		-1.99

표 34 좌측 교대 모델(A1) 단위하중 해석결과(개발 알고리즘)

Position	Matlab (kN)									
	LF1_static		LF1_dynamic		LF2_static		LF2_dynamic		LF3_dynamic	
	Left	Right	Left	Right	Left	Right	Left	Right	Left	Right
5		-0.01		0.04		-0.02		-0.08		-70.31
4		-0.23		-0.18		0.39		0.20		18.95
3		-0.20		-0.84		0.99		1.84		4.28
2		2.92		4.35		-3.83		-4.92		-14.63
1		-4.67		-6.36		3.07		3.74		-65.59
2'		1.67		2.72		-0.32		-0.64		-13.68
3'		0.71		0.50		-0.21		-0.10		2.99
4'		-0.04		-0.12		0.00		0.03		-3.17
5'		-0.05		-0.02		0.01		0.00		-2.00

표 35 좌측 교대 모델(A1) 단위하중 해석결과 비교(오차율)

Position	Error rate(%)									
	LF1_static		LF1_dynamic		LF2_static		LF2_dynamic		LF3_dynamic	
	Left	Right	Left	Right	Left	Right	Left	Right	Left	Right
5		-2.7%		-0.8%		-1.7%		-0.1%		-0.1%
4		-0.2%		-0.2%		-0.1%		0.0%		-0.2%
3		-0.1%		-0.2%		0.0%		-0.1%		0.2%
2		-0.1%		-0.1%		0.0%		-0.1%		-0.1%
1		-0.1%		-0.1%		-0.1%		-0.1%		0.0%
2'		-0.1%		-0.2%		-0.1%		-0.3%		0.0%
3'		0.0%		0.2%		-0.2%		0.6%		-0.1%
4'		-2.0%		-0.4%		-11.5%		-1.1%		0.2%
5'		-0.9%		2.8%		1.7%		1.1%		-0.2%

다음 표는 교각 모델(P1)에 대한 SAP2000해석결과와 Matlab으로 개발한 알고리즘의 해석결과와 오차율을 보여주고 있다. 최대 오차율은 LF2_static에서 14.8%로 나타났으나, 4 ' 위치에서의 소수점 둘째자리까지의 두 해석결과는 0.00kN으로 매우 작게 발생하였다.

표 36 교각 모델(P1) 단위하중 해석결과(SAP2000)

Position	Sap2000 (kN)									
	LF1_static		LF1_dynamic		LF2_static		LF2_dynamic		LF3_dynamic	
	Left	Right	Left	Right	Left	Right	Left	Right	Left	Right
5	-0.07	-0.02	-0.11	0.01	0.02	-0.01	0.05	-0.04	-0.65	-64.36
4	0.43	-0.12	0.16	-0.11	-0.24	0.21	-0.09	0.09	-4.75	20.19
3	1.69	0.14	2.55	-0.06	-0.64	0.45	-1.08	0.83	1.99	4.08
2	-3.29	2.13	-4.22	2.85	2.86	-2.70	3.39	-3.20	-13.58	-14.67
1	1.11	-4.27	1.47	-5.51	-2.38	2.67	-2.80	3.14	-65.55	-65.58
2'	0.32	1.67	0.32	2.63	0.22	-0.43	0.49	-0.77	-14.79	-13.67
3'	-0.03	0.68	-0.05	0.46	0.16	-0.20	0.07	-0.07	4.44	2.99
4'	-0.02	-0.04	-0.01	-0.12	0.00	0.01	-0.02	0.03	23.05	-3.23
5'	0.00	-0.05	0.00	-0.01	-0.01	0.01	0.00	0.00	-58.39	-2.02

표 37 교각 모델(P1) 단위하중 해석결과(개발 알고리즘)

Position	Matlab (kN)									
	LF1_static		LF1_dynamic		LF2_static		LF2_dynamic		LF3_dynamic	
	Left	Right	Left	Right	Left	Right	Left	Right	Left	Right
5	-0.07	-0.02	-0.11	0.01	0.02	-0.01	0.05	-0.04	-0.66	-64.40
4	0.43	-0.12	0.16	-0.11	-0.24	0.21	-0.09	0.09	-4.73	20.23
3	1.69	0.14	2.55	-0.06	-0.64	0.45	-1.08	0.84	1.99	4.07
2	-3.29	2.13	-4.22	2.85	2.86	-2.70	3.39	-3.20	-13.58	-14.67
1	1.11	-4.27	1.47	-5.52	-2.38	2.67	-2.80	3.14	-65.55	-65.58
2'	0.32	1.68	0.32	2.63	0.22	-0.43	0.49	-0.77	-14.80	-13.68
3'	-0.03	0.68	-0.05	0.45	0.16	-0.20	0.07	-0.07	4.44	2.99
4'	-0.02	-0.04	-0.01	-0.12	0.00	0.01	-0.02	0.03	23.09	-3.23
5'	0.00	-0.05	0.00	-0.01	-0.01	0.01	0.00	0.00	-58.42	-2.03

표 38 교각 모델(P1) 단위하중 해석결과 비교(오차율)

Position	Error rate(%)									
	LF1_static		LF1_dynamic		LF2_static		LF2_dynamic		LF3_dynamic	
	Left	Right	Left	Right	Left	Right	Left	Right	Left	Right
5	0.2%	-0.7%	0.2%	-1.1%	1.2%	-1.1%	-1.0%	0.5%	-1.0%	-0.1%
4	-0.1%	0.0%	0.5%	-0.3%	-0.1%	0.0%	0.5%	0.6%	0.3%	-0.2%
3	-0.1%	-0.1%	-0.1%	-1.1%	-0.1%	-0.3%	-0.1%	-0.1%	0.0%	0.3%
2	-0.1%	-0.1%	-0.1%	-0.1%	0.0%	-0.1%	-0.1%	-0.1%	0.0%	-0.1%
1	-0.1%	-0.1%	-0.1%	-0.1%	0.0%	0.0%	-0.1%	-0.1%	0.0%	0.0%
2'	0.0%	-0.1%	0.0%	-0.2%	-0.5%	-0.3%	-0.2%	-0.2%	-0.1%	0.0%
3'	1.3%	-0.1%	-0.8%	0.2%	0.2%	0.2%	1.1%	0.1%	0.1%	-0.1%
4'	1.3%	-0.8%	0.9%	-0.5%	14.8%	-1.3%	-2.6%	0.7%	-0.1%	0.2%
5'	5.0%	0.5%	-0.2%	1.2%	-4.0%	1.3%	1.1%	1.8%	-0.1%	-0.2%

다음 표에는 우측 교대 모델(A2)에 대한 SAP2000해석결과와 Matlab으로 개발한 알고리즘의 결과와 오차율을 보여주고 있다. 최대 오차율은 LF1_static에서 2.4%로 나타났으나, 4' 위치에서 소숫점 둘째자리까지의 -0.02kN으로 매우 작게 발생하였다.

표 39 우측 교대 모델(A2) 단위하중 해석결과(SAP2000)

Position	Sap2000 (kN)									
	LF1_static		LF1_dynamic		LF2_static		LF2_dynamic		LF3_dynamic	
	Left	Right	Left	Right	Left	Right	Left	Right	Left	Right
5	-0.07		-0.12		0.01		0.05		-0.64	
4	0.48		0.21		-0.30		-0.15		-4.64	
3	1.73		2.77		-0.58		-1.12		2.01	
2	-3.85		-5.35		3.88		4.99		-13.58	
1	2.01		3.16		-4.43		-5.93		-65.57	
2'	-0.02		-0.46		1.07		2.09		-14.82	
3'	-0.15		-0.13		0.45		0.24		4.89	
4'	-0.02		0.02		-0.02		-0.09		23.39	
5'	0.01		0.01		-0.03		-0.01		-70.67	

표 40 우측 교대 모델(A2) 단위하중 해석결과(개발 알고리즘)

Position	Matlab (kN)									
	LF1_static		LF1_dynamic		LF2_static		LF2_dynamic		LF3_dynamic	
	Left	Right	Left	Right	Left	Right	Left	Right	Left	Right
5	-0.07		-0.12		0.01		0.05		-0.65	
4	0.48		0.21		-0.30		-0.15		-4.63	
3	1.74		2.78		-0.58		-1.13		2.01	
2	-3.85		-5.36		3.88		4.99		-13.58	
1	2.02		3.17		-4.43		-5.94		-65.57	
2'	-0.02		-0.47		1.07		2.09		-14.83	
3'	-0.14		-0.13		0.44		0.24		4.89	
4'	-0.02		0.02		-0.02		-0.09		23.43	
5'	0.01		0.01		-0.03		-0.01		-70.72	

표 41 우측 교대 모델(A2) 단위하중 해석결과 비교(오차율)

Position	Error rate(%)									
	LF1_static		LF1_dynamic		LF2_static		LF2_dynamic		LF3_dynamic	
	Left	Right	Left	Right	Left	Right	Left	Right	Left	Right
5	-1.1%		-0.3%		-1.5%		-0.2%		-1.0%	
4	-0.1%		0.4%		0.1%		0.3%		0.3%	
3	-0.1%		-0.2%		-0.1%		-0.1%		0.0%	
2	-0.1%		-0.1%		0.0%		-0.1%		0.0%	
1	-0.1%		-0.1%		-0.1%		-0.1%		0.0%	
2'	-0.5%		-0.2%		0.0%		-0.1%		0.0%	
3'	0.1%		-0.1%		0.1%		0.1%		0.1%	
4'	-2.4%		-0.4%		-0.8%		-0.7%		-0.2%	
5'	-0.2%		-0.1%		0.5%		0.2%		-0.1%	

(2) 실 철도교량 적용을 통한 알고리즘 검증

앞 절에서는 단순 교량 모델을 대상으로 수치해석을 수행하여 개발된 알고리즘에 대한 검증을 실시였다. 본 절에서는 개발된 철도교량 단부 콘크리트케도 사용성 검토 알고리즘을 사용하여 2경간의 실 철도교량을 대상으로 단부 사용성을 평가하고 알고리즘을 검증하였다.

(가) 해석모델

실 철도교량에 대한 단부 사용성 검토를 위해서 교량의 교각부에 해당하는 경간을 선택하여 해석을 수행하였다. 해석 대상 철도교량의 형상은 다음 그림과 같다. 총 경간은 69.520m이고, 좌측 경간은 38.965m(지지점 사이 거리), 우측 경간은 30.355m(지지점 사이 거리), 신축 이음부는 0.2m이다. 침목 간격은 0.615m이고, 단부의 침목 간격은 0.64m이다. 좌측 경간의 침목은 64개, 우측 경간의 침목은 50개 이다.

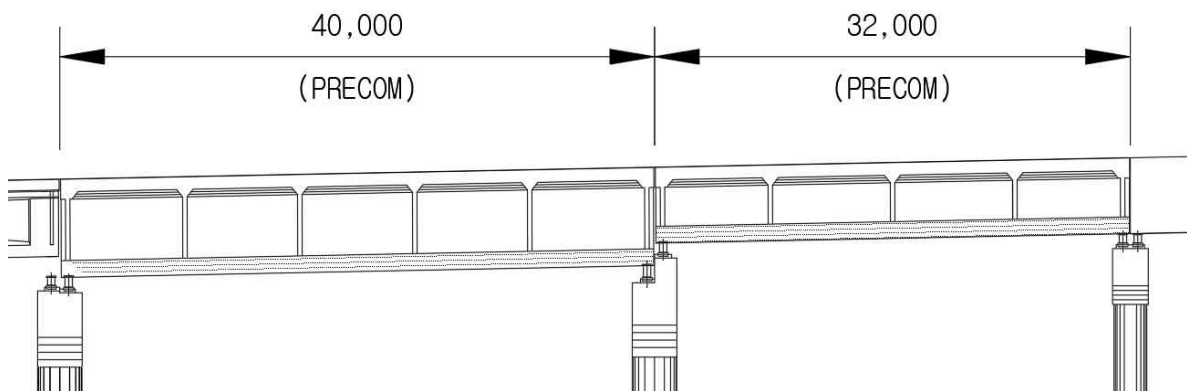


그림 238 2경간 PRECOM 거더 철도교량

2경간 실 철도교량을 대상으로 유한요소해석 프로그램인 SAP2000을 사용하여 다음 그림과 같이 모델링하였다. 거더의 좌측은 힌지 조건, 우측은 롤러 조건을 사용하였다.

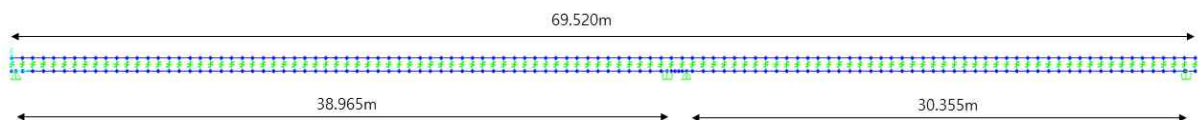


그림 239 SAP2000 모델링

교량 제원은 다음 표와 같다.

표 42 철도교량 모델의 제원

구분		단면적 (m ²)	단면2차모멘트 (m ⁴)	탄성계수 (N/m ²)	강성 (kN/mm)	비고
① 레일	UIC60	0.0768	3.055e-5	2.1e+10	-	Beam
② 레일체결장치	KR-II	-	-	-	정적 26.7	Linear link
					동적 33.0	
③ 거더	Precom	5.92	17.5562	2.98e+10	-	Beam

(나) 해석 절차

해석 절차는 다음과 같다. 입력값을 작성하고, 단위하중 (LF1, LF2, LF3)에 대한 거더 단부 레일체결장치의 상향력 및 압축력을 검토한다. 이후 실제 회전 및 단차량을 산정하여 부분안전계수를 고려하여 상향력 및 압축력을 검토하였다.

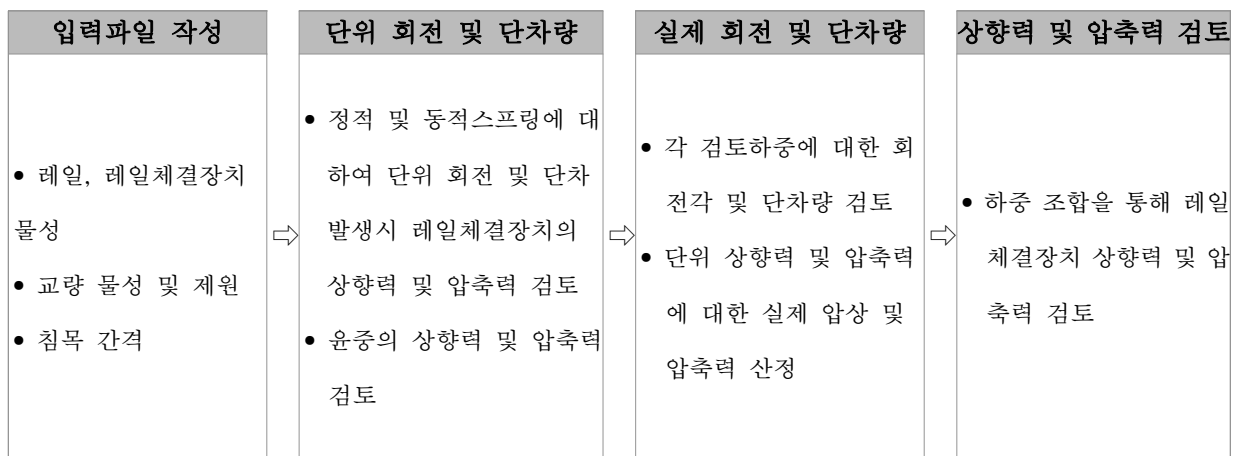


그림 240 실 철도교량 모델에 대한 단부 사용성 검토 해석절차

(다) 단위하중 해석

철도교량 단부에 작용하는 하중에 대한 반력을 계산하기 위하여 단부 지점에서의 단위회전 및 단차, 집중하중을 입력하였으며, 해석결과 거더 단부 레일체결장치에 작용하는 반력은 다음 표와 같다.

표 43 단위하중에 대한 단부 레일체결장치의 반력 (개발된 알고리즘)

위치	LF1				LF2				LF3
	SL	SR	DL	DR	SL	SR	DL	DR	D
5	1.8	0.7	2.0	0.6	-0.9	0.8	-1.2	1.1	1.3
4	1.5	1.4	1.9	1.5	0.1	-0.2	-0.1	0.0	1.3
3	-1.4	1.9	-1.3	2.3	3.3	-3.3	3.6	-3.7	1.3
2	-8.9	1.4	-10.4	1.9	9.5	-9.3	11.5	-11.3	1.3
1	1.4	-8.9	2.0	-10.5	-9.3	9.6	-11.2	11.5	1.3
2 ‘	2.0	-1.4	2.4	-1.3	-3.3	3.3	-3.7	3.6	1.3
3 ‘	1.4	1.5	1.5	1.9	-0.2	0.1	0.1	-0.2	1.3
4 ‘	0.7	1.8	0.6	2.1	0.8	-0.9	1.1	-1.2	1.3
5 ‘	0.2	1.2	0.1	1.2	0.8	-0.9	0.9	-1.0	1.3

표 44 단위하중에 대한 단부 레일체결장치의 반력 (SAP2000)

위치	LF1				LF2				LF3
	SL	SR	DL	DR	SL	SR	DL	DR	D
5	1.8	0.6	2.0	0.6	-0.8	0.9	-1.1	1.1	1.3
4	1.5	1.3	1.9	1.4	0.2	-0.1	-0.1	0.2	1.3
3	-1.4	1.9	-1.3	2.3	3.3	-3.2	3.6	-3.5	1.3
2	-8.9	1.4	-10.4	2.0	9.3	-9.2	11.2	-11.1	1.3
1	1.4	-8.8	2.0	-10.3	-9.3	9.2	-11.2	11.1	1.3
2 ‘	2.0	-1.3	2.4	-1.2	-3.3	3.2	-3.6	3.5	1.3
3 ‘	1.4	1.5	1.5	1.9	-0.2	0.1	0.1	-0.2	1.3
4 ‘	0.7	1.8	0.6	2.0	0.9	-0.9	1.1	-1.1	1.3
5 ‘	0.2	1.2	0.1	1.2	0.8	-0.8	0.9	-0.9	1.3

여기서 LF1, LF2, LF3는 각 단위하중을 나타내며, S와 D는 정적(Static) 및 동적(Dynamic)을 나타낸다. L과 R은 좌측(Left) 하중 위치 및 우측(Right) 하중 위치를 나타낸다.

(라) 크리프 및 건조수축

크리프 및 건조수축에 의한 상부구조의 장기처짐에 의한 회전각은 아래 식과 같이 산정할 수 있다.

$$\phi = \frac{\xi \gamma A_s L_s^3}{24 E_s I_{zz}}$$

여기서,

ξ : 장기처짐 계수

L : 교량 길이

γ : 교량의 단위중량

E : 교량의 탄성계수

A : 교량의 단면적

I_{zz} : 교량 단면의 단면2차모멘트

표 45 크리프 및 장기처짐에 의한 회전각

구분	경간장 (m)	단면적 (m ²)	단면2차모멘트 (m ⁴)	단위중량 (N)	탄성계수 (N/m ²)	처짐계수	회전각 (‰)
좌측 단부	38.965	5.92	17.5562	24.52e+3	2.99e+10	0.6	0.41
우측 단부	30.355	5.92	17.5562	24.52e+3	2.99e+10	0.6	0.19

(마) 교량 상부구조의 상하면 온도차에 의한 단부 회전

교량 상부구조의 상하면 온도차(Δt)에 따른 단부의 회전각(ϕ)은 아래의 식과 같이 산정할 수 있다. 이때 온도차는 상부의 온도가 높은 경우를 (+)로 할 경우, 최대 3° C, 최소 -6° C의 값을 고려한다.

$$\phi_{\Delta t} = \frac{L}{2} \times \frac{\alpha_t \times \Delta t}{h}$$

여기서,

L : 지간 길이

α : 열팽창계수(콘크리트교:1.0e-5, 강교:1.2e-5)

Δt : 3°C, -6°C

h : 형고

표 46 교량 상부구조 온도차에 의한 회전각

구분	경간장 (m)	열팽창계수	형고 (m)	최소 온도	최대 온도	회전각 (‰)
좌 소	38.965	1.0e-5	2.64	-	3°C	-0.22
우 소	30.355	1.0e-5	2.64	-	3°C	-0.17
좌 대	38.965	1.0e-5	2.64	- 6°C	-	0.44
우 대	30.355	1.0e-5	2.64	- 6°C	-	0.34

(바) 교각 기초 부등 침하에 의한 단부 회전

토목구조물 완성 및 궤도 시설물 등의 공사가 완료된 후 발생 가능한 인접 교각사이의 불균등한 수직 침하가 발생할 수 있다. 교각의 최대 처짐량 기준 5mm를 적용하여 부등 지점침하에 의한 단부 회전량을 적용하였다. 기초침하가 발생할 수 있는 경우의 수는 다음 그림과 같다.

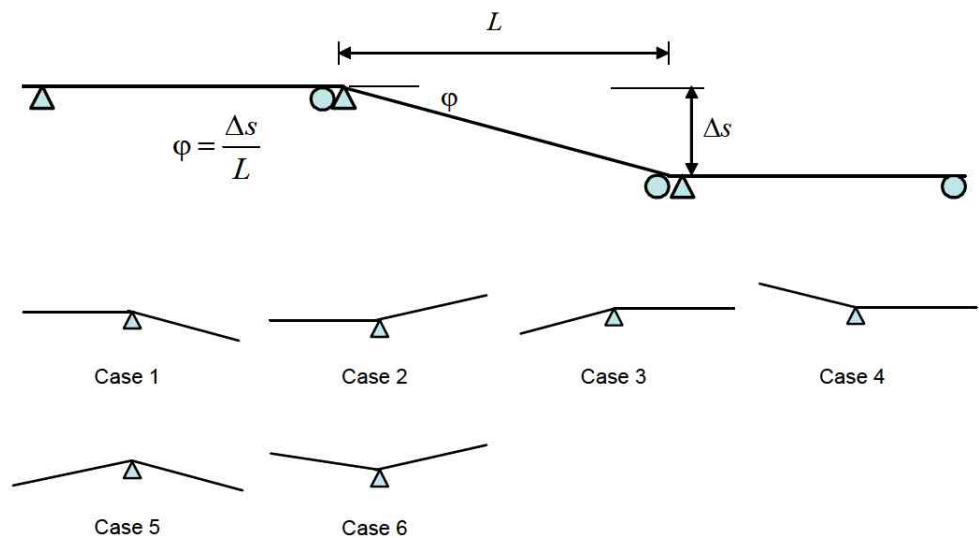


그림 241 교각 기초의 침하가 발생할 수 있는 경우의 수

$$\phi = \frac{\Delta s}{L}$$

여기서,

L : 지간 길이

Δs : 교각의 잔류 부등침하량

표 47 교각 기초 부등 침하에 의한 회전각

구분	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	Case6
좌	0.000	0.000	0.128	-0.128	0.128	-0.128
우	0.165	-0.165	0.000	0.000	0.165	0.128

(사) 교각 전후면 온도차에 의한 교각 상부회전에 의한 단차

교각에 직사광선등에 의해 일부에만 온도하중이 집중되었을 때 교각의 변형에 의해 단차가 발생한다. 교각 전후면 온도차는 최대 5℃이다.

$$\delta = \varphi_p d_{br}$$

$$\varphi_p = \alpha \Delta T_p \frac{H_p}{D_p}$$

여기서, φ_p : 교각 상부 회전각

α : 열팽창계수

T_p : 교각 전·후면 온도차 (최대 5℃)

H_p : 교각 높이

d_{br} : 교량 지점 사이의 간격

표 48 교각 전후면 온도차에 의한 단차

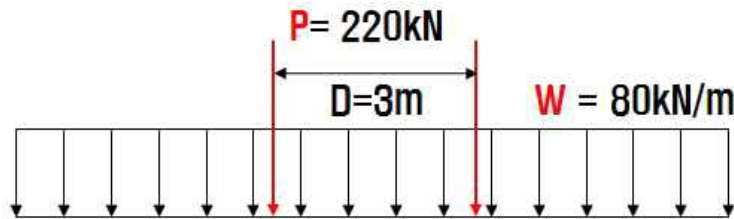
구분	온도차 (℃)	교각높이 (m)	교각직경 (m)	지점간격 (m)	단차 (mm)
전상좌	5	19.7	3	1.12	0
전상우	5	19.7	3	1.12	0.368
후상좌	5	19.7	3	1.12	0.368
후상좌	5	19.7	3	1.12	0

(아) 레일-교량 상부구조 온도차에 의한 교각 상부회전에 의한 단차

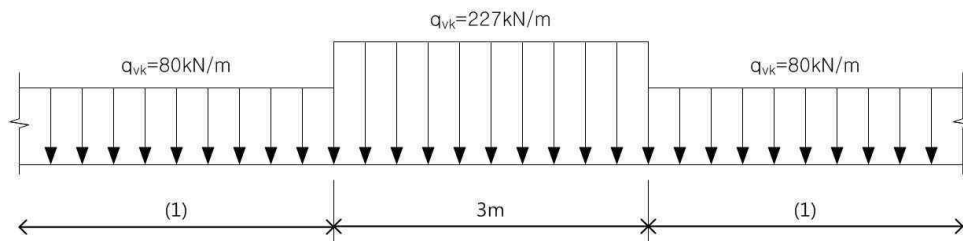
레일과 교량 상부구조와 온도차이가 발생할 경우 레일과 교량사이의 상호작용에 의하여 교각상부에 수평하중이 작용하게 되며, 교각은 휨 변형이 발생하게 된다. 이 경우 교각 상면의 경사에 의하여 일정 거리로 이격된 두 교좌장치 사이에는 단차가 발생하게 된다. 레일과 교량의 온도변화, 해석방법은 「궤도-교량 종방향 상호작용 해석」에 따라 해석가능하기 때문에 본 연구에서는 0.17mm로 가정하여 적용하였다.

(자) 열차수직하중에 의한 단부 회전(동적)

여객화물혼용선의 표준하중(KRL-2012하중)을 적용하여 단부에서의 회전각을 산정하였다. 열차 주행속도는 150km/hr를 적용하였으며, 최대 하중을 고려하기 위하여 각 경간의 지점 안쪽을 대상으로 등분포 하중을 적용하였다. 좌우 경간장이 달라 충격계수는 보수적인 1.09를 선택하였다.



(a) KRL-2012 하중선도



(b) KRL-2012 등가하중선도

그림 242 여객화물혼용선의 표준하중(KRL2012하중)

(차) 열차 시제동하중에 의한 교각 상부 회전에 의한 단차

시·제동하중에 의하여 발생하는 교각상부의 회전이 두 교량 사이에 단차를 발생시키게 된다. 시·제동하중의 크기와 재하방법, 해석방법은 「궤도-교량 종방향 상호작용 해석」에 따라 검토된 결과를 적용하기 때문에 본 연구에서는 0.168mm로 가정하여 적용하였다.

(카) 축하중에 의한 직접 작용력

축하중에 의해 직접 레일 지지점에 가해지는 하중은 다음 그림과 같으며, 윤중 증감계수는 1.2를 선택하였다. 축하중에 의한 직접 작용력은 1.486kN으로 산정되었다.

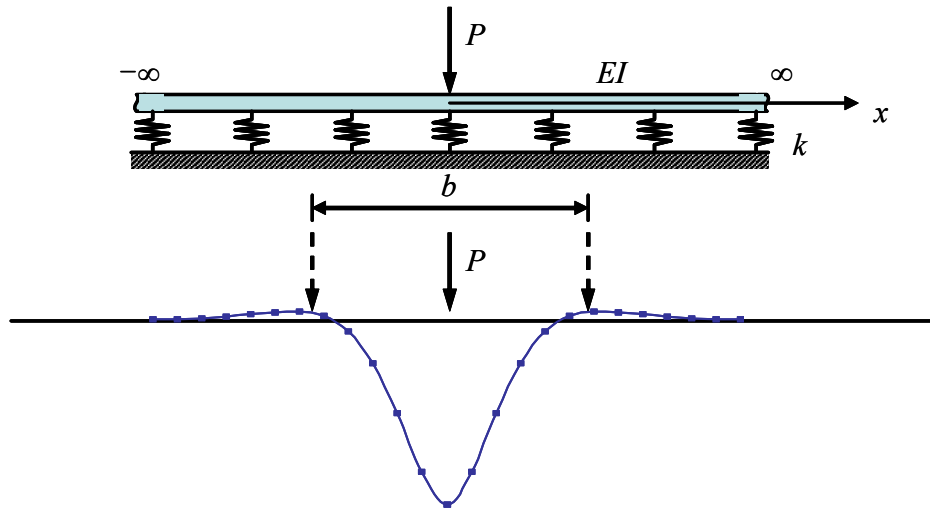


그림 243 축하중에 의한 레일체결장치 연직반력의 영향선

(타) 조합 및 판정

각 단위하중과 단부에서 발생할 수 있는 거더 응답, 그리고 부분안전계수를 조합하였고, 레일체결장치의 허용하중 18.7kN을 기준으로 사용성을 판정하여 다음 표에 나타냈다.

아래 표는 기존 KR C-08090에 제시된 단위하중법에 의한 검토결과를 나타낸다.

표 49 하중 조합 및 판정(단위하중법-기존방법) (단위 : kN)

위치	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	합	판정
5	0.73	0.79	0.23	0.93	0.30	0.15	0.18	2.59	5.89	OK
4	0.60	0.64	0.23	0.86	0.05	0.02	0.01	2.59	5.00	OK
3	0.38	0.67	0.32	0.51	1.22	0.58	0.61	2.59	6.88	OK
2	0.26	1.97	1.14	0.42	3.49	1.67	1.93	2.59	13.47	OK
1	0.58	1.54	1.47	0.92	3.52	1.68	1.94	2.59	14.23	OK
2 ′	0.81	0.88	0.25	1.09	1.22	0.58	0.61	2.59	8.05	OK
3 ′	0.57	0.62	0.25	0.69	0.05	0.02	0.01	2.59	4.80	OK
4 ′	0.35	0.63	0.30	0.45	0.31	0.15	0.19	2.59	4.95	OK
5 ′	0.23	0.42	0.20	0.27	0.31	0.15	0.16	2.59	4.32	OK

(1) 크리프와 건조수축, (2) 교량 상부구조 상하면 온도차, (3) 교각 기초의 잔류 부등침하, (4) 열차 수직하중
 (5) 교각 전후면 온도차에 의한 교각 상부 회전, (6) 레일-교량 온도차에 의한 교각 상부 회전, (7) 시제동하중에 의한 교각 상부 회전, (8) 축하중에 의한 직접 작용력

다음 표는 본 연구에서 제안한 비선형 해석방법에 따른 사용성 검토 결과를 보여주고 있다. 각 단부에서 발생할 수 있는 회전각과 단차를 조합하여 철도교량 모델에 하중으로 입력하고 비선형 해석을 수행하였다. 단부에서의 레일체결장치에 대한 판정은 모두 양호한 것으로 나타났다.

표 50 하중 조합 및 판정 (비선형해석방법-본 연구)

위치	(1) ‰	(2) ‰	(3) ‰	(4) ‰	(5) mm	(6) mm	(7) mm	합(kN)	판정
5	0.41	0.44	0.16	0.46	0.37	0.18	0.17	3.1	OK
4	0.41	0.44	0.16	0.46	0.37	0.18	0.17	2.3	OK
3	0.41	0.44	0.16	0.46	0.37	0.18	0.17	4.2	OK
2	0.41	0.44	0.16	0.46	0.37	0.18	0.17	6.2	OK
1	0.41	0.44	0.16	0.46	0.37	0.18	0.17	6.9	OK
2 ‘	0.41	0.44	0.16	0.46	0.37	0.18	0.17	5.1	OK
3 ‘	0.41	0.44	0.16	0.46	0.37	0.18	0.17	2.7	OK
4 ‘	0.41	0.44	0.16	0.46	0.37	0.18	0.17	2.1	OK
5 ‘	0.41	0.44	0.16	0.46	0.37	0.18	0.17	1.6	OK

(1) 크리프와 건조수축, (2) 교량 상부구조 상하면 온도차, (3) 교각 기초의 잔류 부등침하, (4) 열차 수직하중
(5) 교각 전후면 온도차에 의한 교각 상부 회전, (6) 레일-교량 온도차에 의한 교각 상부 회전, (7) 시제동하중에 의한 교각 상부 회전

단위하중법과 비선형 해석방법으로 철도교량 단부 레일체결장치의 사용성 검토한 결과를 아래 표에 나타내었으며, 비선형 해석방법의 경우 단위하중법과 비교하여 레일체결장치 위치 1에서 상향력이 약 50% 감소하였으며, 비선형 해석방법에서 레일체결장치가 선형거동 또는 비선형거동하는 경에 대한 상향력 값은 비선형거동하는 것으로 고려할 경우 최대 30% 감소하는 효과를 보이는 것으로 나타났다.

표 51 철도교량 콘크리트케도 단부 사용성 검토 방법에 따른 상향력 비교

검토방법 및 상향력 레일 체결 장치 위치	(1) 단위하중법	(2) 비선형 해석법		(3) 비선형 해석법	
	KR C-08090	본 연구		본 연구	
	레일체결장치의 정적, 동적 강성 고려 (선형거동)	레일체결장치의 정적, 동적 강성 고려 (선형거동)		레일체결장치의 정적, 동적 강성 고려 (비선형거동)	
	상향력(kN)	상향력(kN)	감소율(%)	상향력(kN)	감소율(%)
5	5.9	3.5	40.7% ↓	3.1	47.5% ↓
4	5.0	2.5	50.0% ↓	2.3	54.0% ↓
3	6.9	4.5	34.8% ↓	4.2	39.1% ↓
2	13.5	8.9	34.1% ↓	6.2	54.1% ↓
1	14.2	9.9	30.3% ↓	6.9	51.4% ↓
2 ‘	8.1	5.7	29.6% ↓	5.1	37.0% ↓
3 ‘	4.80	2.2	54.2% ↓	2.7	43.8% ↓
4 ‘	4.9	2.5	49.0% ↓	2.1	57.1% ↓
5 ‘	4.3	1.8	58.1% ↓	1.6	62.8% ↓

철도교량 단부 콘크리트케도 사용성 검토 알고리즘 개발에서는 국내외 문헌 조사를 통하여 유한요소해석 알고리즘 개발하였고, KR C-08090을 검토하여 단부 사용성 검토 알고리즘을 설계·개발하였다. 개발된 알고리즘과 유한요소해석 프로그램인 SAP2000을 사용하여 단순교량 모델과 실 철도교량을 대상으로 비교·검증을 수행하였으며, 개발된 알고리즘의 정확도가 SAP2000과 매우 유사한 것으로 나타났다. 또한, 실 철도교량을 대상으로는 기존 KR C-08090에서 제시하고 있는 단위하중법과 본 연구에서 제안하고자 하는 비선형해석방법에 대한 해석결과값을 비교하였으며, 본 연구에서 제안하고자 하는 비선형해석방법을 적용할 경우 기존 해석검토결과에 비해 약 30~65%의 감소된 상향력이 계산되는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결과를 바탕으로 본 연구에서 제안하고자 하는 비선형해석방법은 기존 검토방법을 단순화하고, 검토결과에 대한 과다설계를 최소화할 수 있는 방법이라 판단된다.

2.3 철도교량 단부 콘크리트케도 사용성 검토 프로그램 개발

철도교량 단부 콘크리트케도 사용성 검토 프로그램의 설계를 위해 국내·외 기존 선행 프로그램 개발 사례를 조사하고, 수요자의 요구조건과 사용성 검토 업무 프로세스를 분석하여 알고리즘에 필요한 인자들을 검토하였다. 또한, 철도교량 단부 콘크리트케도 사용성 검토 프로그램 개발을 위한 설계를 완료하였고, GUI기반의 프로그램을 개발하였다.

가. 국내·외 관련 소프트웨어 조사

(1) 국외 프로그램 사용 사례

(가) 프로그램 개요

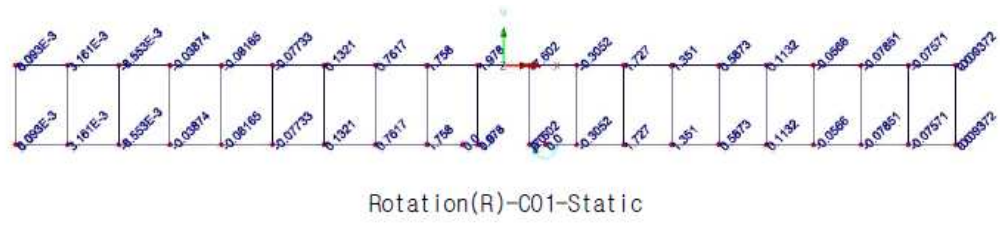
표 52 철도교량 단부 사용성 검토를 위한 국외 프로그램 예

NO	프로그램 명	제조국/제조사	상용여부
1	LUSAS	영국/LUSAS	상용

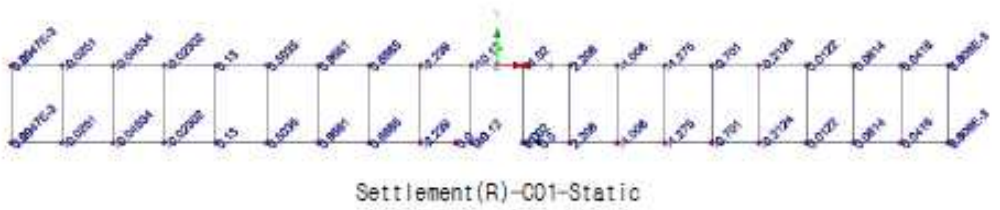
(나) 주요 기능 및 특징

- Load 케이스 별 , 특정 부재 및 단면의 부분 출력
- 다양한 부재 요소의 단면 및 재료 특성 라이브러리
- 다양하고 강력한 하중 재하(구조물 하중-자중, 집중하중, 등분포하중, 표면하중, 온도하중, 분포하중, 일반 하중-점하중, 선하중, 부분재하 하중)
- 비선형 해석(기하학적 비선형, 경제 조건 비선형, 재료 비선형) 적용
- 동해석, 합성해석

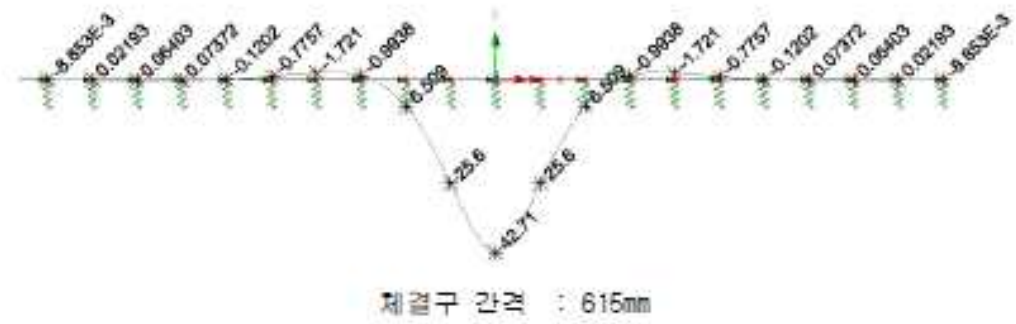
(다) 사용 사례



(a) 단위회전 해석결과 예



(b) 단위변위 해석결과 예



(c) 단위하중 해석결과 예

교량	교각	개소 번호	해석 결과 (kN)	기 준	
				KCT-II 용 체결장치	Rheda2000용 체결장치
				17kN	12kN
만종천교	A1	5	4.384	O.K	O.K
		4	5.417	O.K	O.K
		3	7.696	O.K	O.K
		2	9.140	O.K	O.K
		1	5.759	O.K	O.K
		2'	5.000	O.K	O.K
		3'	8.228	O.K	O.K
		4'	6.930	O.K	O.K

(d) 상향력 판정 결과 예

그림 244 국외 프로그램 사용 사례(00~00 철도건설 제0공구 노반설시설계)

(2) 국내 프로그램 사용 사례

(가) 프로그램 개요

표 53 철도교량 단부 사용성 검토를 위한 국내 프로그램 예

NO	프로그램 명	제조국/제조사	상용여부
1	MIDAS	대한민국/ 마이다스아이티	상용
2	VisualFEA	대한민국/ Intuition Software	상용
3	ZLRLiftUp	대한민국/ 한국철도기술연구원	비상용

(나) 주요 기능 및 특징

① MIDAS/CIVIL, VisualFEA

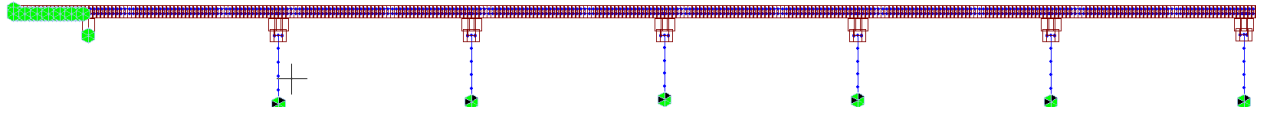
- 그래픽스 기술을 이용한 구조물 형상 재현 및 모델링 기술
- Data의 입력 과정과 해석결과 Data처리 과정의 그래픽화
- 직관적인 사용자 인터페이스 환경을 위한 전후 처리 프로세스 개발 기술
- 다양한 해석 알고리즘 개발, 고급 유한요소 라이브러리
- 해석결과의 효과적인 분석과 평가를 위한 다양한 자동 처리 및 표현기술
- 설계기준별 설계 보 자동 생성 및 설계 데이터베이스 구축 기술
- 구조 재료별 부재 자동 설계 및 최적 설계 자동화 기술

② ZLRUpLift

- 체결구의 부담 하중을 산정하는 전용 프로그램
- 교량 단부 꺾임에 의한 교량상 활동 체결구의 부담 하중 산정
- 주요 인자(침목 개수 및 위치, 레일 물성 등) 입력 환경이 Text 기반임
- 주요 Output(침목 위치별 체결 장치 부담 하중 등)환경이 Text 기반임

(다) 사용 사례

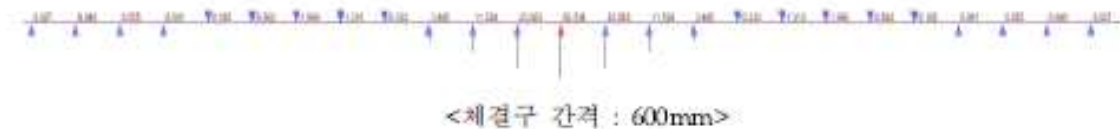
① MIDAS/CIVIL



(a) 해석모델 예

구분		체결구하중(kN) ($\phi_{0.225} \cdot LF1$)									
		좌측상판 체결구					우측상판 체결구				
		5	4	3	2	1	1'	2'	3'	4'	5'
좌측상판 회전	A1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	P1	0.449	1.686	3.506	5.000	3.658	-5.303	-3.813	-1.910	-0.594	0.043
	P2	0.478	1.752	3.610	5.098	3.621	-5.739	-4.001	-1.949	-0.572	0.076
	P3	0.478	1.752	3.610	5.098	3.621	-5.739	-4.001	-1.949	-0.572	0.076
	P4	0.478	1.752	3.610	5.098	3.621	-5.739	-4.001	-1.949	-0.572	0.076
	P5	0.478	1.752	3.610	5.098	3.621	-5.739	-4.001	-1.949	-0.572	0.075
	P6	0.440	1.666	3.474	4.967	3.661	-5.181	-3.910	-2.039	-0.684	-0.002
	P7	0.441	1.667	3.475	4.967	3.660	-5.183	-3.911	-2.039	-0.684	-0.002
	P8	0.441	1.667	3.475	4.967	3.660	-5.183	-3.911	-2.039	-0.684	-0.002
	P9	0.441	1.667	3.475	4.967	3.660	-5.183	-3.911	-2.039	-0.684	-0.002
	P10	0.441	1.667	3.475	4.967	3.660	-5.183	-3.911	-2.039	-0.684	-0.002
	P11	0.441	1.667	3.475	4.967	3.660	-5.183	-3.911	-2.039	-0.684	-0.002
	P12	0.441	1.667	3.475	4.967	3.660	-5.183	-3.911	-2.039	-0.684	-0.002
	P13	0.441	1.667	3.475	4.967	3.660	-5.183	-3.911	-2.039	-0.684	-0.002
	P14	0.441	1.667	3.475	4.967	3.660	-5.183	-3.911	-2.039	-0.684	-0.002
	P15	0.441	1.667	3.475	4.967	3.660	-5.183	-3.911	-2.039	-0.684	-0.002

(b) 단위회전 해석결과 예



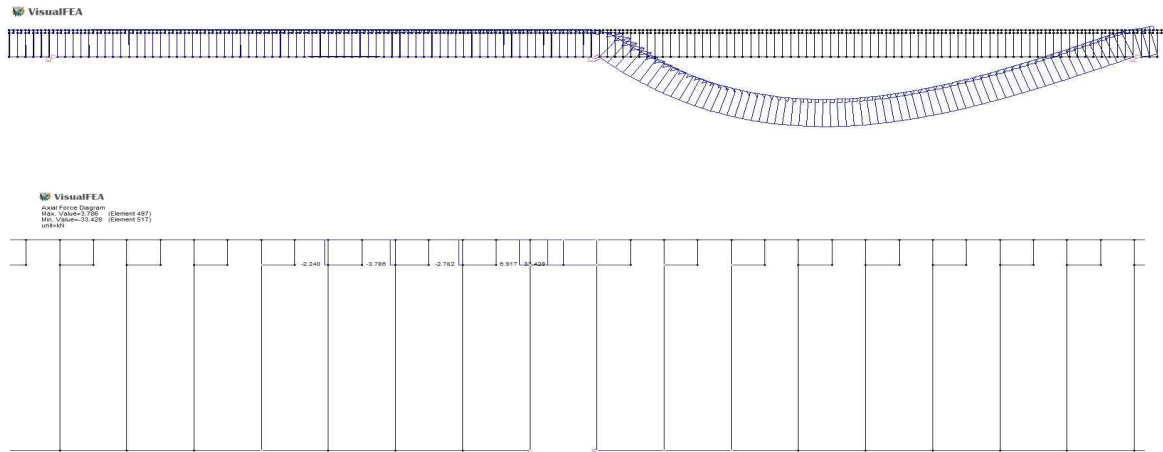
(c) 단위하중 해석결과 예

하중 종류 위치		정적하중작용 (부분안전계수작용) (kN)					동적하중작용 (부분안전계수작용) (kN)			차륜 하중 Pd= 198kN	최종 상향력 (kN)	상향력 판정 KR
		장기 침 하	상판상 하면온 도차	기초 침하	레일/ 교량 온도차	교각 전후면 온도차	수직하중		시/ 제동하 중			
							회전	변위				
A1	5	0.018	-0.051	-0.030	0.000	0.000	-0.014	-0.398	0.000	3.372	2.897	O.K
	4	-0.007	0.021	0.012	0.000	0.000	-0.003	-1.000	0.000	3.372	2.394	O.K
	3	-0.077	0.224	0.131	0.000	0.000	0.037	-1.667	0.000	3.372	2.019	O.K
	2	-0.208	0.603	0.352	0.000	0.000	0.123	-1.636	0.000	3.372	2.605	O.K
	1	-0.375	1.087	0.635	0.000	0.000	0.245	0.725	0.000	3.372	5.688	O.K
	1'	-0.458	1.326	0.775	0.000	0.000	0.322	7.742	0.000	3.372	13.079	O.K
	2'	0.363	-1.050	-0.614	0.000	0.000	-0.251	0.729	0.000	3.372	2.549	O.K
	3'	0.475	-1.376	-0.804	0.000	0.000	-0.313	-1.636	0.000	3.372	-0.281	O.K
	4'	0.328	-0.951	-0.556	0.000	0.000	-0.202	-1.670	0.000	3.372	0.322	O.K
	5'	0.156	-0.451	-0.263	0.000	0.000	-0.085	-1.004	0.000	3.372	1.724	O.K

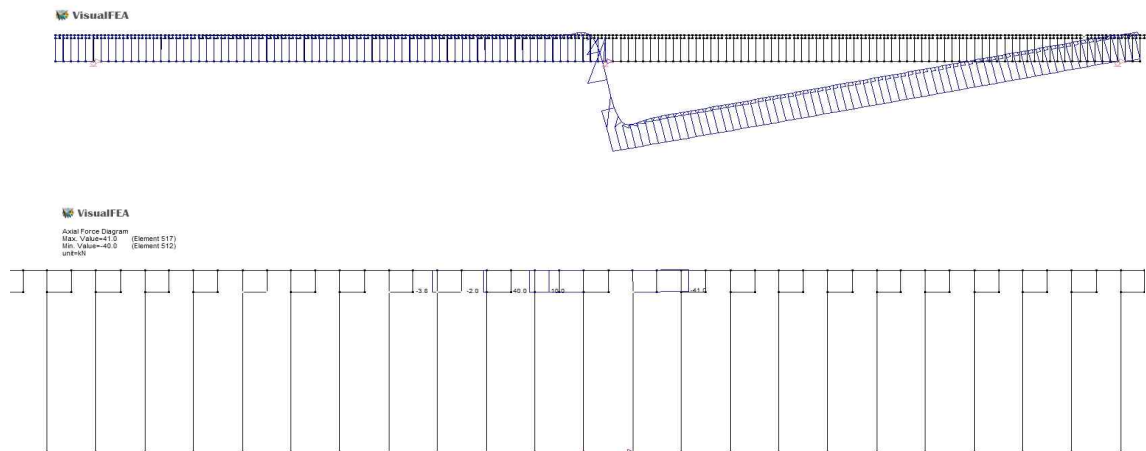
(d) 상향력 판정 결과 예

그림 245 국내 프로그램 사용 사례(00선 00~00 복선전철 제0공구)

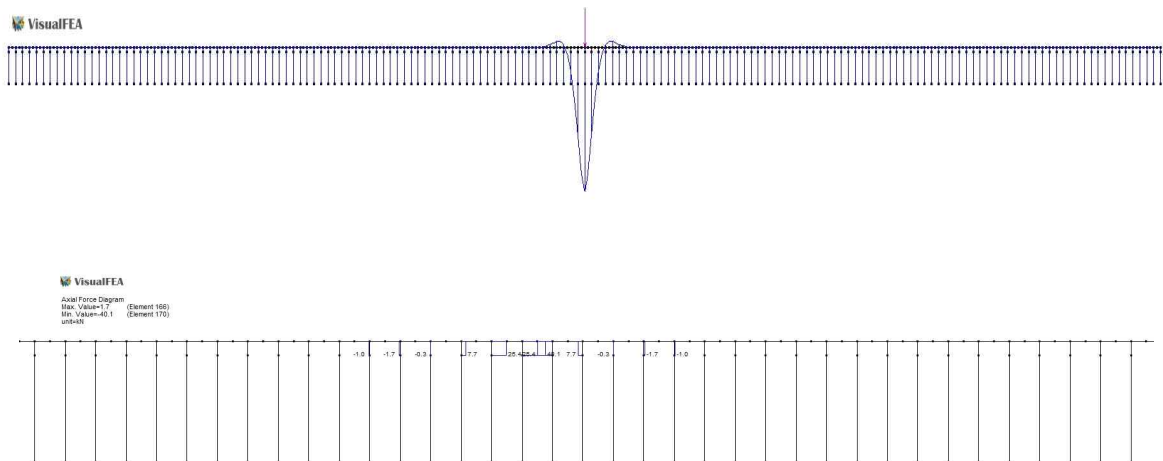
② VisualFEA



(a) 단위회전 해석결과 예



(b) 단위변위 해석결과 예



(c) 단위하중 해석결과 예

그림 246 국내 프로그램 사용 사례(00선 00~00 복선전철 제0공구)

③ ZLRUpLift

○ 제결구번호 : 3

▷ CREEP & SHRINKAGE: FL = 0.00 FR = 3.37 $\gamma(\theta) = 1.0$ $\varphi(L) = 0.00E+00$ $\varphi(R) = 0.35E+00$ Fd = 1.19 Fd/Pt = 9.4

▷ 상판상하면 온도차: FL = 0.00 FR = 3.37 $\gamma(\theta) = 1.0$ $\varphi(L) = 0.00E+00$ $\varphi(R) = 0.29E+00$ Fd = 0.99 Fd/Pt = 7.8

▷ 기초침하 : FL = 0.00 FR = 3.37 $\gamma(\theta) = 1.0$ $\varphi(L) = 0.00E+00$ $\varphi(R) = 0.15E+00$ Fd = 0.50 Fd/Pt = 3.9

▷ 수직하중 : Fd = 5.38 Fd/Pt = 46.4

FL = 0.00 $\varphi(L) = 0.00E+00$ $\gamma(\theta) = 1.3$ FR = 4.33 $\varphi(R) = 0.94E+00$

FVL = 0.00 $\varphi V(L) = 0.00E+00$ $\gamma(\theta) = 1.3$ FVR = 0.00 $\varphi V(R) = 0.00E+00$

(FL* $\varphi(L)$ +FVL* $\varphi V(L)$)* $\gamma(\theta) = 0.00$ (FR* $\varphi(R)$ +FVR* $\varphi V(R)$)* $\gamma(\theta) = 5.93$

▷ 윤강(1축)통과 : FW = 1.54 WW = 1.25 $\gamma(\theta) = 1.3$ $\varphi(D) = 0.15E+01$ $\varphi(C) = 0.11E+01$ Fd = 4.12 Fd/Pt = 32.5

ΣFd = 12.67 Σ(%) = 100.0

○ 제결구번호 : 2

▷ CREEP & SHRINKAGE: FL = 0.00 FR = 5.08 $\gamma(\theta) = 1.0$ $\varphi(L) = 0.00E+00$ $\varphi(R) = 0.35E+00$ Fd = 1.79 Fd/Pt = 9.9

▷ 상판상하면 온도차: FL = 0.00 FR = 5.08 $\gamma(\theta) = 1.0$ $\varphi(L) = 0.00E+00$ $\varphi(R) = 0.29E+00$ Fd = 1.50 Fd/Pt = 8.2

▷ 기초침하 : FL = 0.00 FR = 5.08 $\gamma(\theta) = 1.0$ $\varphi(L) = 0.00E+00$ $\varphi(R) = 0.15E+00$ Fd = 0.75 Fd/Pt = 4.1

▷ 수직하중 : Fd = 10.11 Fd/Pt = 55.5

FL = 0.00 $\varphi(L) = 0.00E+00$ $\gamma(\theta) = 1.3$ FR = 3.30 $\varphi(R) = 0.94E+00$

FVL = 0.00 $\varphi V(L) = 0.00E+00$ $\gamma(\theta) = 1.3$ FVR = 0.00 $\varphi V(R) = 0.00E+00$

(FL* $\varphi(L)$ +FVL* $\varphi V(L)$)* $\gamma(\theta) = 0.00$ (FR* $\varphi(R)$ +FVR* $\varphi V(R)$)* $\gamma(\theta) = 10.11$

▷ 윤강(1축)통과 : FW = 1.52 WW = 1.25 $\gamma(\theta) = 1.3$ $\varphi(D) = 0.15E+01$ $\varphi(C) = 0.11E+01$ Fd = 4.07 Fd/Pt = 22.3

ΣFd = 18.21 Σ(%) = 100.0

○ 제결구번호 : 1

▷ CREEP & SHRINKAGE: FL = 0.00 FR = -8.55 $\gamma(\theta) = 1.0$ $\varphi(L) = 0.00E+00$ $\varphi(R) = 0.35E+00$ Fd = 0.00 Fd/Pt = 0.0

▷ 상판상하면 온도차: FL = 0.00 FR = -8.55 $\gamma(\theta) = 1.0$ $\varphi(L) = 0.00E+00$ $\varphi(R) = -0.15E+00$ Fd = 0.96 Fd/Pt = 16.2

▷ 기초침하 : FL = 0.00 FR = -8.55 $\gamma(\theta) = 1.0$ $\varphi(L) = 0.00E+00$ $\varphi(R) = -0.15E+00$ Fd = 0.96 Fd/Pt = 16.2

▷ 수직하중 : Fd = 0.00 Fd/Pt = 0.0

FL = 0.00 $\varphi(L) = 0.00E+00$ $\gamma(\theta) = 1.3$ FR = -13.93 $\varphi(R) = 0.94E+00$

FVL = 0.00 $\varphi V(L) = 0.00E+00$ $\gamma(\theta) = 1.3$ FVR = 0.00 $\varphi V(R) = 0.00E+00$

(FL* $\varphi(L)$ +FVL* $\varphi V(L)$)* $\gamma(\theta) = 0.00$ (FR* $\varphi(R)$ +FVR* $\varphi V(R)$)* $\gamma(\theta) = -17.03$

▷ 윤강(1축)통과 : FW = 1.50 WW = 1.25 $\gamma(\theta) = 1.3$ $\varphi(D) = 0.15E+01$ $\varphi(C) = 0.11E+01$ Fd = 4.02 Fd/Pt = 87.8

ΣFd = 5.95 Σ(%) = 100.0

(a) 해석결과 예

구분	제결구 위치	제결구 번호	제결구 압상력(kN)								
			총 압상력	장기 처짐	상판 상하면 온도차	기초 침하	레일 교량 온도차	교각 전후면 온도차	수직 하중	시/제동 하중	윤증
A1	좌측	3	12.65	1.19	0.99	0.50	0.00	0.00	5.38	0.00	4.12
		2	18.14	1.79	1.50	0.75	0.00	0.00	10.03	0.00	4.07
	우측	1	5.95	0.00	0.96	0.96	0.00	0.00	0.00	0.00	4.02
		2	4.91	0.00	0.42	0.42	0.00	0.00	0.00	0.00	4.08
P1	좌측	3	22.01	0.92	0.38	0.47	0.81	1.83	11.16	2.23	4.22
		2	31.50	0.61	0.04	0.99	1.52	3.42	16.53	4.16	4.19
	우측	1	21.63	0.00	0.44	0.90	1.48	3.33	8.86	2.49	4.14
		2	15.03	0.00	0.03	0.50	0.81	1.82	6.37	1.36	4.14

(b) 해석결과 종합 예

그림 247 국내 프로그램 사용 사례(00~00 철도건설 제0공구 노반실시설계[레도분야])

나. 목표 성능 설정

(1) 수요자 요구조건 분석

철도교량 콘크리트궤도 단부 사용성 검토를 주로 하는 철도설계(궤도분야) 엔지니어들과의 면담을 통해 다음과 같은 요구사항을 도출하였음

- TCL 간격 자동 배치 기능 필요

사용성 검토 결과 값이 NG 도출 시, 현재 작업 프로세스에서는 다음 그림과 같이 TCL 간격 등을 수작업으로 재배치하여 반복하는 어려움이 있음(경간 배치에 따른 하중 정의를 수작업으로 재입력함). 이를 TCL 물성치에 따라 값을 부여하면 자동으로 재배치해 줄 수 있는 기능(Function)이 필요함.

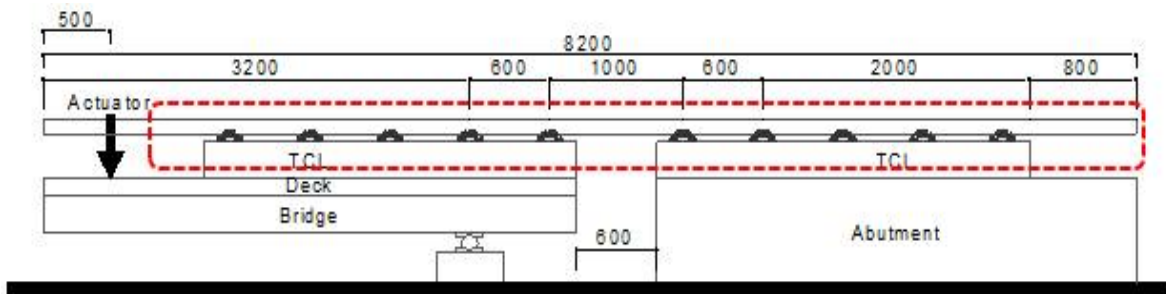


그림 248 TCL 간격 배치도

- 사용성 검토 시 교량받침 거동을 검토 인자에 포함할지 여부 검토 필요

교량 단부 레일체결장치에서 발생하는 작용력에 따라 교량받침 거동이 발생하는데 현재로서는 교량받침의 거동을 사용성 검토 인자에 포함하고 있지 않음. 교량받침 거동을 작용력의 주요 인자에 포함할지 여부를 검토해야 함.

- 기초 정보 Data-Base화 필요

교량형식, 레일종류, 레일체결장치 종류 등에 대한 정보를 데이터베이스화하여 제공할 필요가 있음. 교량형식, 레일, 레일체결장치 종류를 선택할 경우 기본적인 제원 및 물성치가 자동으로 입력될 수 있는 기초 정보의 DB화가 필요함.

(2) 목표 성능 설정

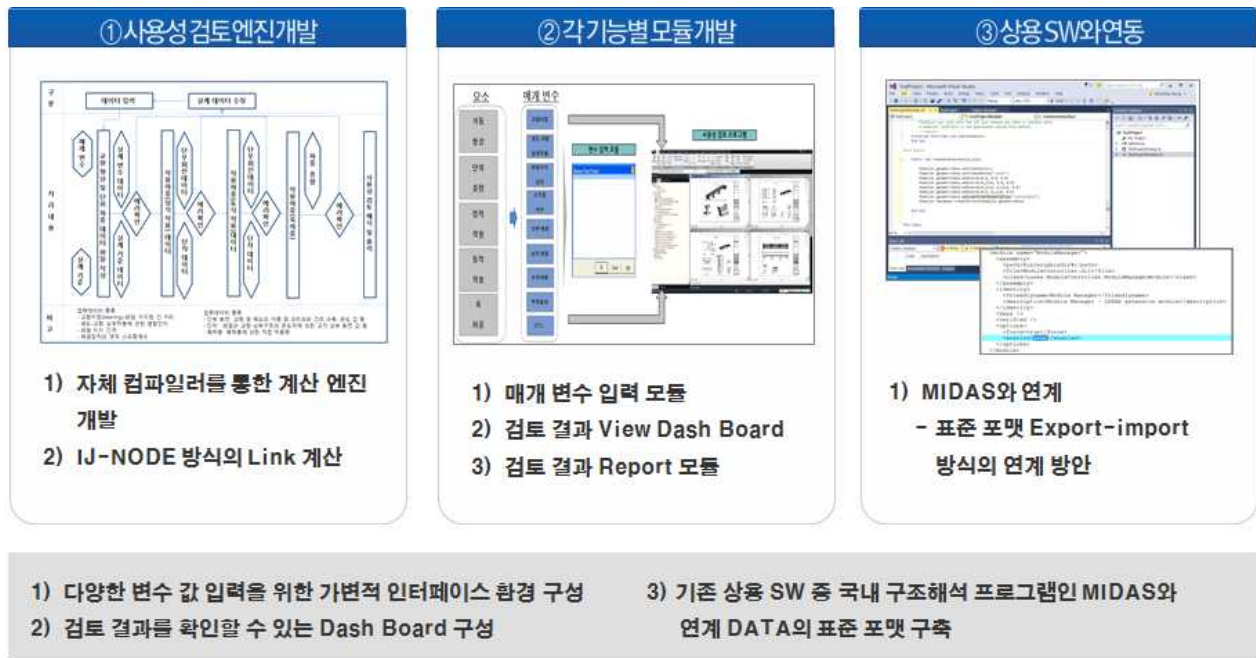


그림 249 프로그램 개발 목표 성능

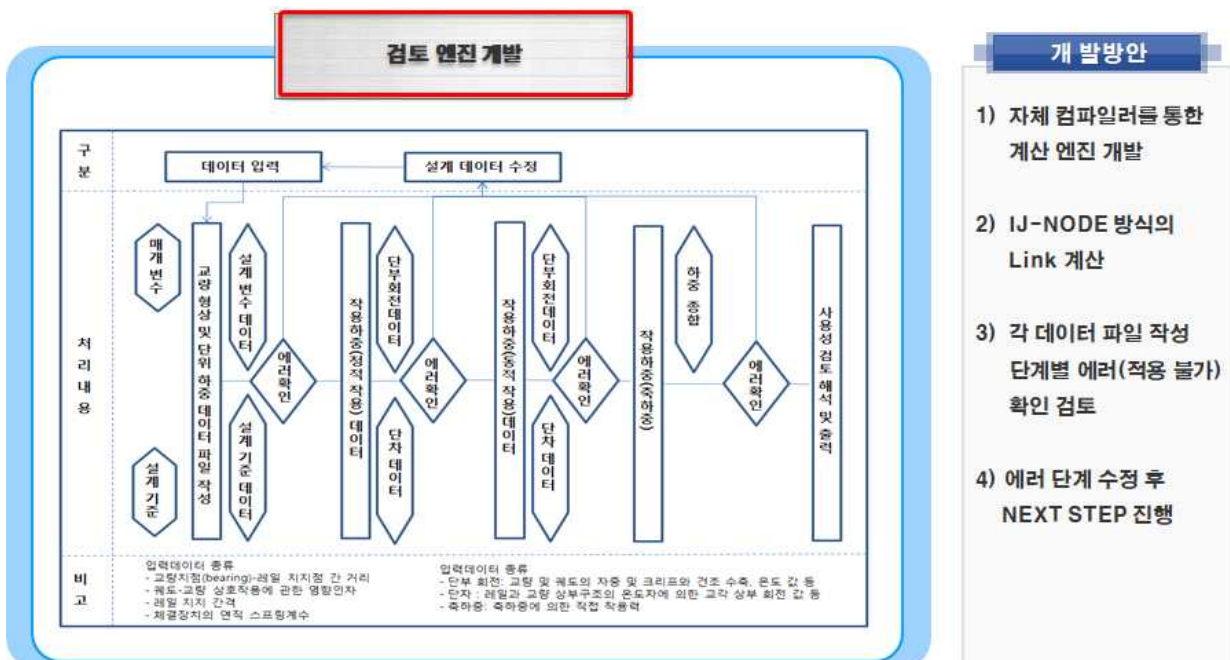


그림 250 프로그램 개발 목표 성능 - 검토엔진

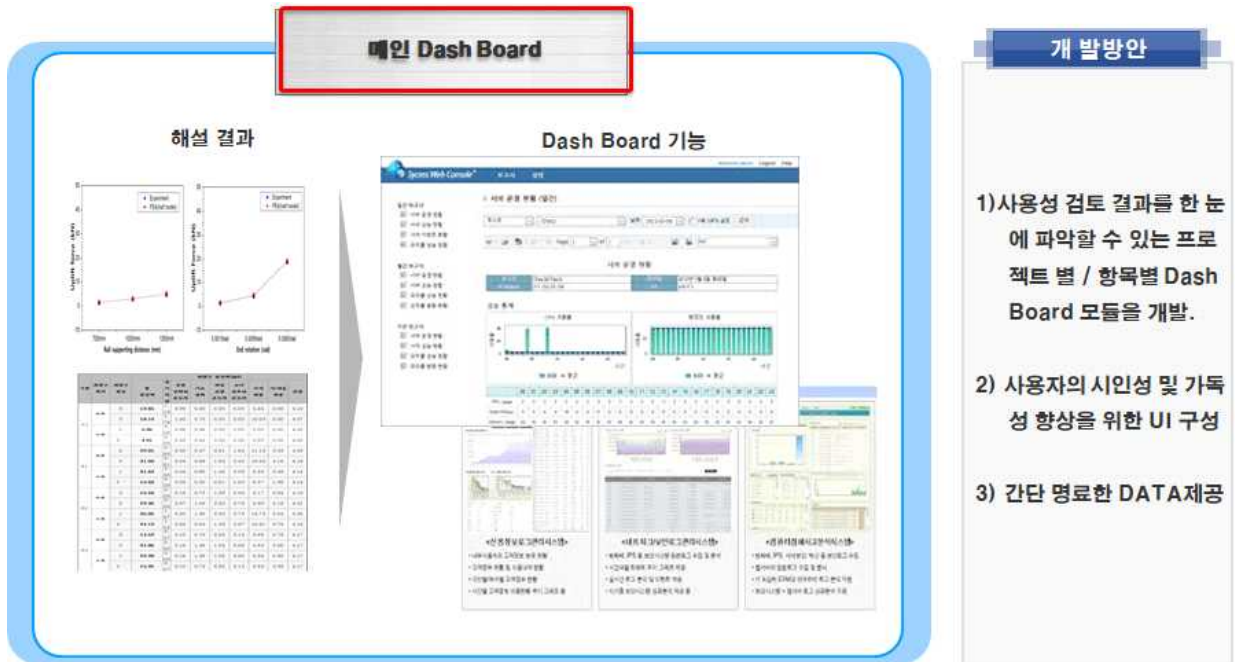


그림 251 프로그램 개발 목표 성능 - 메인 Dash Board

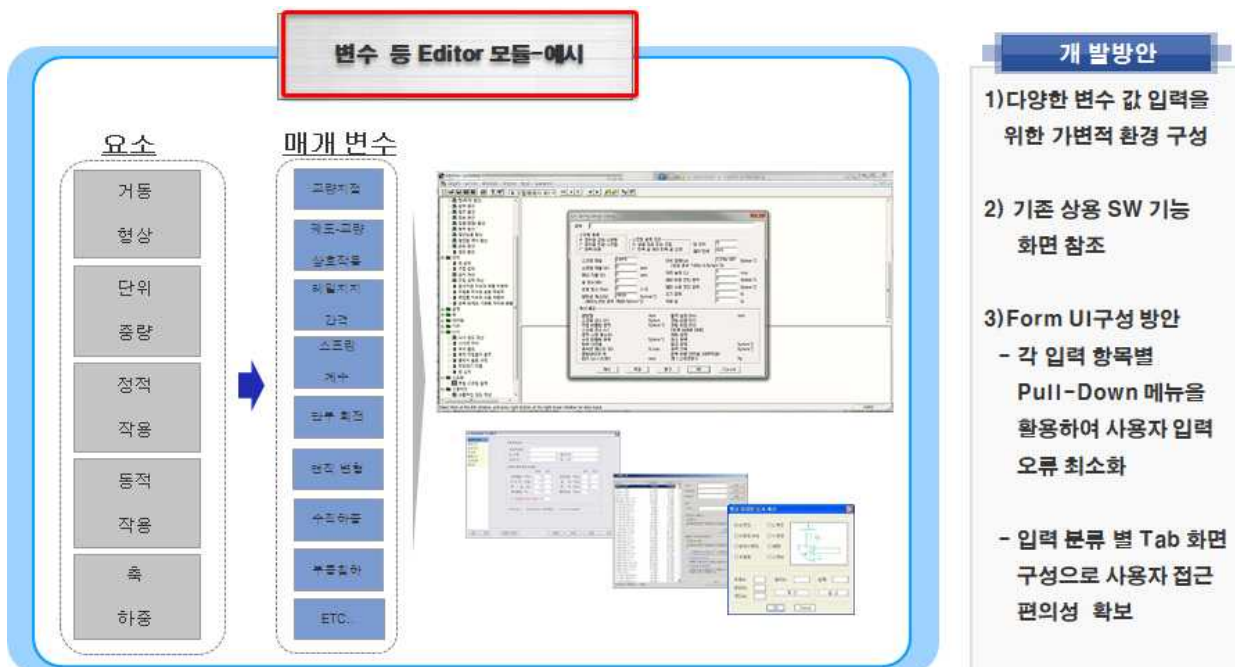


그림 252 프로그램 개발 목표 성능 - 변수 입력 및 편집 모듈

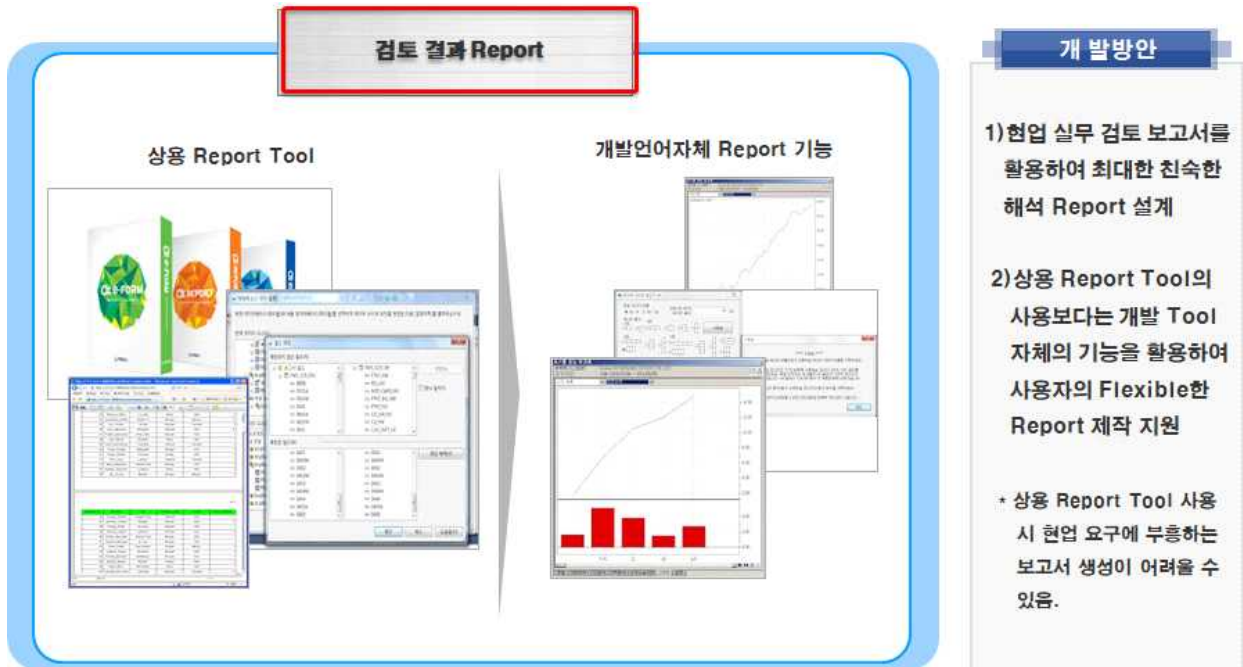


그림 253 프로그램 개발 목표 성능 - 결과도출

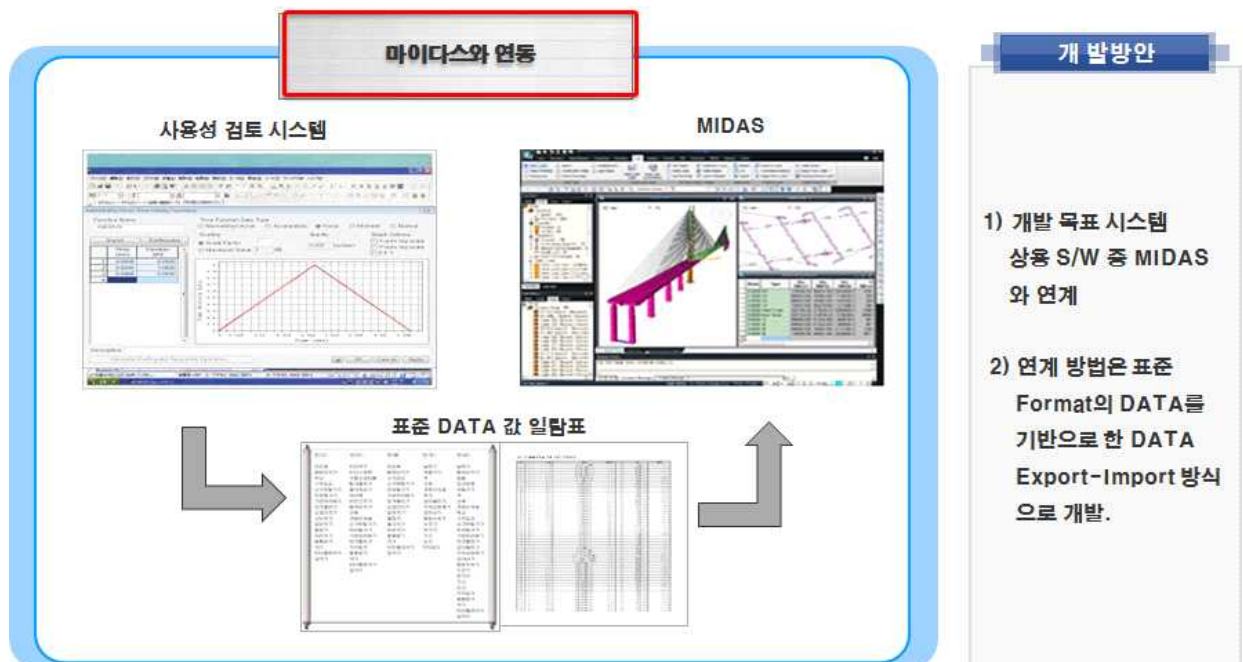


그림 254 프로그램 개발 목표 성능 - 상용프로그램 연동 방향

다. 알고리즘 적용 인자 분석

(1) 주요 영향인자

- 레일 지지간격과 교량 지점-레일지지점간 거리
- 레일지지점의 특성(레일지지점의 연직 스프링 계수, 레일지지점의 허용 상향력, 탄성 패드의 변형한계)
- 궤도교량 상호작용에 관한 영향인자(교량상 장대레일 축력과 관련된 궤도와 교량의 상호작용에 관한 영향 인자를 고려해야 함)

(2) 알고리즘 적용 인자

기존 단부 사용성 검토 업무 프로세스를 분석하여 GUI 기반의 사용성 검토 프로그램에 적용할 알고리즘 적용 인자를 도출함

(3) 기존 업무 프로세스 분석

GUI 기반의 사용성 검토 프로그램에 알고리즘을 적용하기 위해 기존 업무 프로세스를 다음과 같이 분석하였다.

표 54 철도교량 단부 콘크리트케도 사용성 검토 기본 업무절차

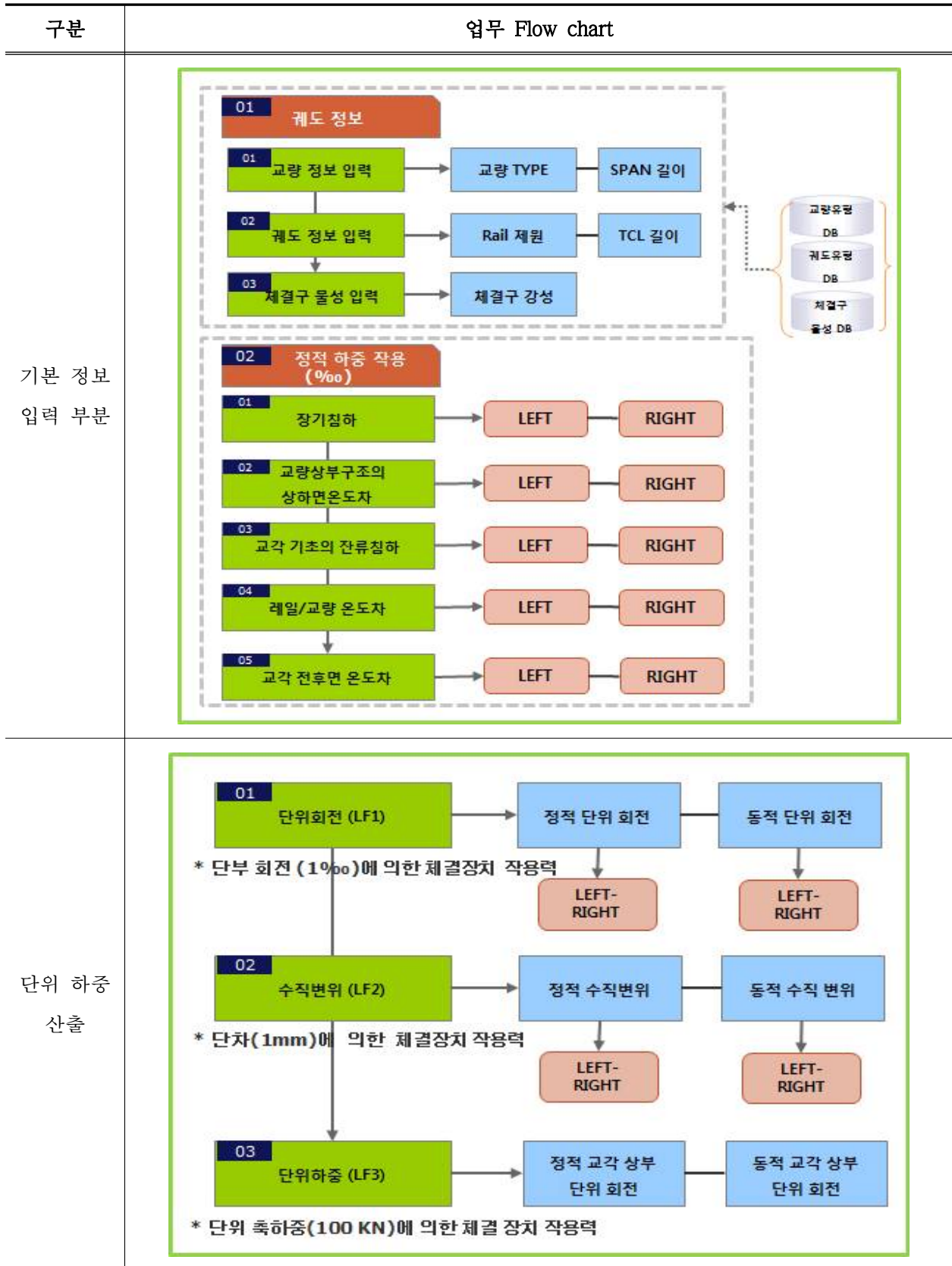
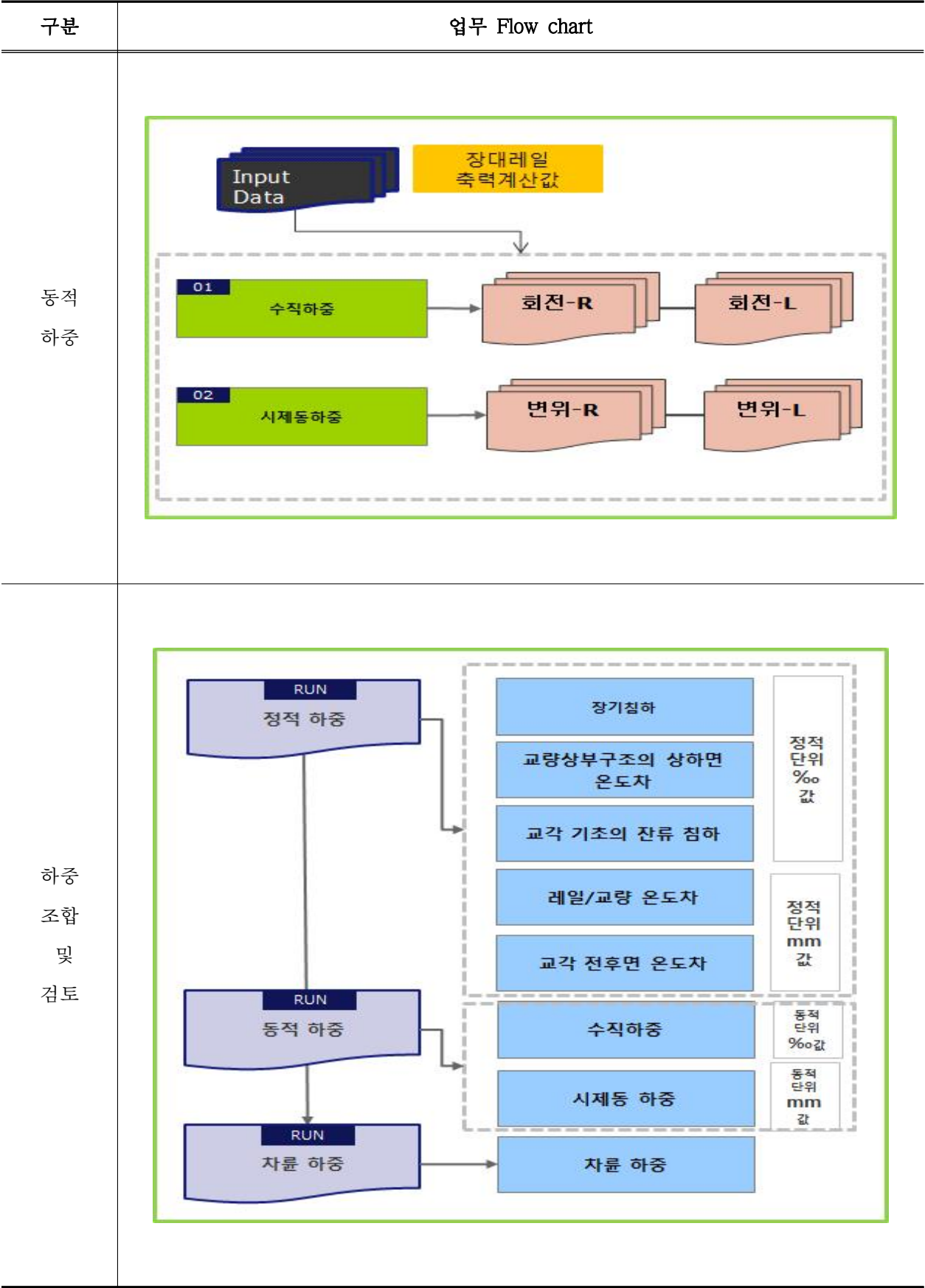


표 55 철도교량 단부 콘크리트케도 사용성 검토 기본 업무절차



라. 프로그램 설계

(1) 프로그램 기능 구성(메뉴도)

분석된 업무 프로세스를 기반으로 목표 시스템의 메뉴 구성도를 다음과 같이 설계하였다.



그림 256 프로그램 기능 구성도

(2) DATA BASE 구조 설계

(가) 기본정보 부분

테이블정의서						
테이블ID		TB_INFO				
테이블설명		기본정보				
No.	컬럼ID	타입	길이	NULL	KEY	비고
1	F_DES	VARCHAR	20	N	PK	
2	F_LOC	VARCHAR	20	N	PK	
3	F_LG_TYPE	VARCHAR	20	N		
4	F_LG_TYPEREMARK	VARCHAR	20	N		
5	F_LG_LENGTH	VARCHAR	20	N		
6	F_LG_UNITLOAD	VARCHAR	20	N		
7	F_LG_CROSSSECTION	VARCHAR	20	N		
8	F_RG_TYPE	VARCHAR	20	N		
9	F_RG_TYPEREMARK	VARCHAR	20	N		
10	F_RG_LENGTH	VARCHAR	20	N		
11	F_RG_UNITLOAD	VARCHAR	20	N		
12	F_RG_CROSSSECTION	VARCHAR	20	N		
13	F_EG_LRSPACE	VARCHAR	20	N		
14	F_RAIL_TYPE	VARCHAR	20	N		
15	F_RAIL_ELASTIC	VARCHAR	20	N		
16	F_RAIL_EXPANSION	VARCHAR	20	N		
17	F_RAIL_MOMENT	VARCHAR	20	N		
18	F_FTN_TYPE	VARCHAR	20	N		
19	F_FTN_UPPER	VARCHAR	20	N		
20	F_FTN_LIMIT	VARCHAR	20	N		
21	F_FTN_DYNAMIC	VARCHAR	20	N		
22	F_FTN_STATIC	VARCHAR	20	N		
23	F_LS_STACE	VARCHAR	20	N		
24	F_LS_ENDSTACE	VARCHAR	20	N		
25	F_LS_LENGTH	VARCHAR	20	N		
26	F_LS_SUPPORT	VARCHAR	20	N		
27	F_RS_STACE	VARCHAR	20	N		
28	F_RS_ENDSTACE	VARCHAR	20	N		
29	F_RS_LENGTH	VARCHAR	20	N		
30	F_RS_SUPPORT	VARCHAR	20	N		
인덱스						

테이블정의서						
테이블ID		TB_Info_Bridge				
테이블설명		Girder 정보				
No.	컬럼ID	타입	길이	NULL	KEY	비고
1	F_CODE	VARCHAR	20		PK	
2	F_SIZE	VARCHAR	40			
3	F_LENGTH	VARCHAR	20			
4	F_UNITWEIGHT	VARCHAR	20			
5	F_SECTIONAREA	VARCHAR	20			
6	F_ELASTIC	VARCHAR	20			
7	F_SECOND_MOMENT	VARCHAR	20			
8	F_TCLAREA	VARCHAR	20			
9	F_EXPANSION	VARCHAR	20			
10	F_X	VARCHAR	20			
11	F_Z	VARCHAR	20			
12	F_M	VARCHAR	20			
인덱스						

테이블정의서						
테이블ID		TB_Info_Junction				
테이블설명		체결구 정보				
No.	컬럼ID	타입	길이	NULL	KEY	비고
1	F_CODE	VARCHAR	20		PK	
2	F_SIZE	VARCHAR	20			
3	F_UPPER	VARCHAR	20			
4	F_LIMIT	VARCHAR	20			
5	F_DYNAMIC	VARCHAR	20			
6	F_STATIC	VARCHAR	20			
7						
8						
9						
10						
11						
12						
인덱스						

테이블정의서						
테이블ID		TB_Info_Rail				
테이블설명		Rail 정보				
No.	컬럼ID	타입	길이	NULL	KEY	비고
1	F_CODE	VARCHAR	20		PK	
2	F_HEIGHT	VARCHAR	20			
3	F_HEADWIDTH	VARCHAR	20			
4	F_FOOTWIDTH	VARCHAR	20			
5	F_AREA	VARCHAR	20			
6	F_MASS	VARCHAR	20			
7	F_MOMENTY	VARCHAR	20			
8	F_MOMENTZ	VARCHAR	20			
9	F_SECTION_H	VARCHAR	20			
10	F_SECTION_F	VARCHAR	20			
11	F_SECTION_Z	VARCHAR	20			
12	F_TENSILE	VARCHAR	20			
13	F_BASE_ELASTIC	VARCHAR	20			
14	F_BASE_POISSON	VARCHAR	20			
15	F_BASE_EXPANSION	VARCHAR	20			
16	F_BASE_DENSITY	VARCHAR	20			
인덱스						

(나) 단위하중 부분

테이블정의서						
테이블ID		TB_LF1				
테이블설명		단위하중_LF1				
No.	컬럼ID	타입	길이	NULL	KEY	비고
1	F_LOC1	VARCHAR	20		PK	
2	F_SEQ	INTEGER				
3	F_LEFT_VALUE	EXTENDED				
4	F_RIGHT_VALUE	EXTENDED				
5	F_LEFT_VALUE1	EXTENDED				
6	F_RIGHT_VALUE1	EXTENDED				
7						
인덱스						

테이블정의서						
테이블ID		TB_LF2				
테이블설명		단위하중_LF2				
No.	컬럼ID	타입	길이	NULL	KEY	비고
1	F_LOC1	VARCHAR	20		PK	
2	F_SEQ	INTEGER				
3	F_LEFT_VALUE	EXTENDED				
4	F_RIGHT_VALUE	EXTENDED				
5	F_LEFT_VALUE1	EXTENDED				
6	F_RIGHT_VALUE1	EXTENDED				
7						
인덱스						

테이블정의서						
테이블ID		TB_LF3				
테이블설명		단위하중_LF3				
No.	컬럼ID	타입	길이	NULL	KEY	비고
1	F_LOC1	VARCHAR	20		PK	
2	F_SEQ	INTEGER				
3	F_UNITWEIGHT	EXTENDED				
4	F_PD	EXTENDED				
5						
인덱스						

(다) 동적하중 부분

테이블정의서						
테이블ID		TB_LOAD1_D1				
테이블설명		동적하중_수직하중				
No.	컬럼ID	타입	길이	NULL	KEY	비고
1	F_LOC1	VARCHAR	20		PK	
2	F_SEQ	INTEGER				
3	F_UNITV_LEFT	EXTENDED				
4	F_UNITV_RIGHT	EXTENDED				
5	F_ROTIV_LEFT	EXTENDED				
6	F_ROTIV_RIGHT	EXTENDED				
7	F_SUM	EXTENDED				
8	F_MAX	EXTENDED				
9						
10						
인덱스						

테이블정의서						
테이블ID		TB_LOAD1_D2				
테이블설명		동적하중_시제동하중				
No.	컬럼ID	타입	길이	NULL	KEY	비고
1	F_LOC1	VARCHAR	20		PK	
2	F_SEQ	INTEGER				
3	F_UNITV_LEFT	EXTENDED				
4	F_UNITV_RIGHT	EXTENDED				
5	F_ROTIV_LEFT	EXTENDED				
6	F_ROTIV_RIGHT	EXTENDED				
7	F_SUM	EXTENDED				
8	F_MAX	EXTENDED				
9						
10						
인덱스						

(라) 정적하중 부분

테이블정의서						
테이블ID		TB_LOAD1_S1				
테이블설명		정적하중_장기침하				
No.	컬럼ID	타입	길이	NULL	KEY	비고
1	F_LOC1	VARCHAR	20		PK	
2	F_SEQ	INTEGER				
3	F_UNITV_LEFT	EXTENDED				
4	F_UNITV_RIGHT	EXTENDED				
5	F_ROTIV_LEFT	EXTENDED				
6	F_ROTIV_RIGHT	EXTENDED				
7	F_SUM	EXTENDED				
8	F_MAX	EXTENDED				
인덱스						

테이블정의서						
테이블ID		TB_LOAD1_S2				
테이블설명		정적하중_교량상판상하면온도차				
No.	컬럼ID	타입	길이	NULL	KEY	비고
1	F_LOC1	VARCHAR	20		PK	
2	F_SEQ	INTEGER				
3	F_UNITV_LEFT	EXTENDED				
4	F_UNITV_RIGHT	EXTENDED				
5	F_ROTIV_LEFT	EXTENDED				
6	F_ROTIV_RIGHT	EXTENDED				
7	F_SUM	EXTENDED				
8	F_MAX	EXTENDED				
인덱스						

테이블정의서						
테이블ID		TB_LOAD1_S3				
테이블설명		정적하중_기초침하				
No.	컬럼ID	타입	길이	NULL	KEY	비고
1	F_LOC1	VARCHAR	20		PK	
2	F_SEQ	INTEGER				
3	F_UNITV_LEFT	EXTENDED				
4	F_UNITV_RIGHT	EXTENDED				
5	F_ROTIV_LEFT	EXTENDED				
6	F_ROTIV_RIGHT	EXTENDED				
7	F_SUM	EXTENDED				
8	F_MAX	EXTENDED				
인덱스						

테이블정의서						
테이블ID		TB_LOAD1_S4				
테이블설명		정적하중_레일과교량의 온도차				
No.	컬럼ID	타입	길이	NULL	KEY	비고
1	F_LOC1	VARCHAR	20		PK	
2	F_SEQ	INTEGER				
3	F_UNITV_LEFT	EXTENDED				
4	F_UNITV_RIGHT	EXTENDED				
5	F_ROTIV_LEFT	EXTENDED				
6	F_ROTIV_RIGHT	EXTENDED				
7	F_SUM	EXTENDED				
8	F_MAX	EXTENDED				
인덱스						

테이블정의서						
테이블ID		TB_LOAD1_S5				
테이블설명		정적하중_교각전후면온도차				
No.	컬럼ID	타입	길이	NULL	KEY	비고
1	F_LOC1	VARCHAR	20		PK	
2	F_SEQ	INTEGER				
3	F_UNITV_LEFT	EXTENDED				
4	F_UNITV_RIGHT	EXTENDED				
5	F_ROTIV_LEFT	EXTENDED				
6	F_ROTIV_RIGHT	EXTENDED				
7	F_SUM	EXTENDED				
8	F_MAX	EXTENDED				
인덱스						

(마) 하중조합 부분

테이블정의서						
테이블ID		TB_RESULT_1				
테이블설명		하중조합				
No.	컬럼ID	타입	길이	NULL	KEY	비고
1	F_LOC1	VARCHAR	20		PK	
2	F_SEQ	INTEGER				
3	F_S_CREEP	EXTENDED				
4	F_S_GIRDER_TEMP	EXTENDED				
5	F_S_SETTLEMENT	EXTENDED				
6	F_S_RAIL_INTERACTI ON	EXTENDED				
7	F_S_PIER_TEMP	EXTENDED				
8	F_D_TRAIN_LOAD	EXTENDED				
9	F_D_TRAIN_SB	EXTENDED				
10	F_D_WHEEL	EXTENDED				
인덱스						

테이블정의서						
테이블ID		TB_RESULT_2				
테이블설명		상향력 판단				
No.	컬럼ID	타입	길이	NULL	KEY	비고
1	F_LOC1	VARCHAR	20		PK	
2	F_SEQ	INTEGER				
3	F_S_CREEP	EXTENDED				
4	F_S_GIRDER_TEMP	EXTENDED				
5	F_S_SETTLEMENT	EXTENDED				
6	F_S_RAIL_INTERACTI ON	EXTENDED				
7	F_S_PIER_TEMP	EXTENDED				
8	F_D_TRAIN_LOAD	EXTENDED				
9	F_D_TRAIN_SB	EXTENDED				
10	F_D_WHEEL	EXTENDED				
11	F_RESULT	EXTENDED				
12	F_OK	VARCHAR				
인덱스						

테이블정의서						
테이블ID		TB_RESULT_3				
테이블설명		압축력 판단				
No.	컬럼ID	타입	길이	NULL	KEY	비고
1	F_LOC1	VARCHAR	20		PK	
2	F_SEQ	INTEGER				
3	F_D_TRAIN_LOAD	EXTENDED				
4	F_D_TRAIN_SB	EXTENDED				
5	F_D_WHEEL	EXTENDED				
6	F_RESULT	EXTENDED				
7	F_OK	VARCHAR				
8						
인덱스						

(3) DATA-BASE 관계도

다음 그림은 사용성 검토 프로그램을 구성하고 있는 DATA BASE의 관계도 이다.

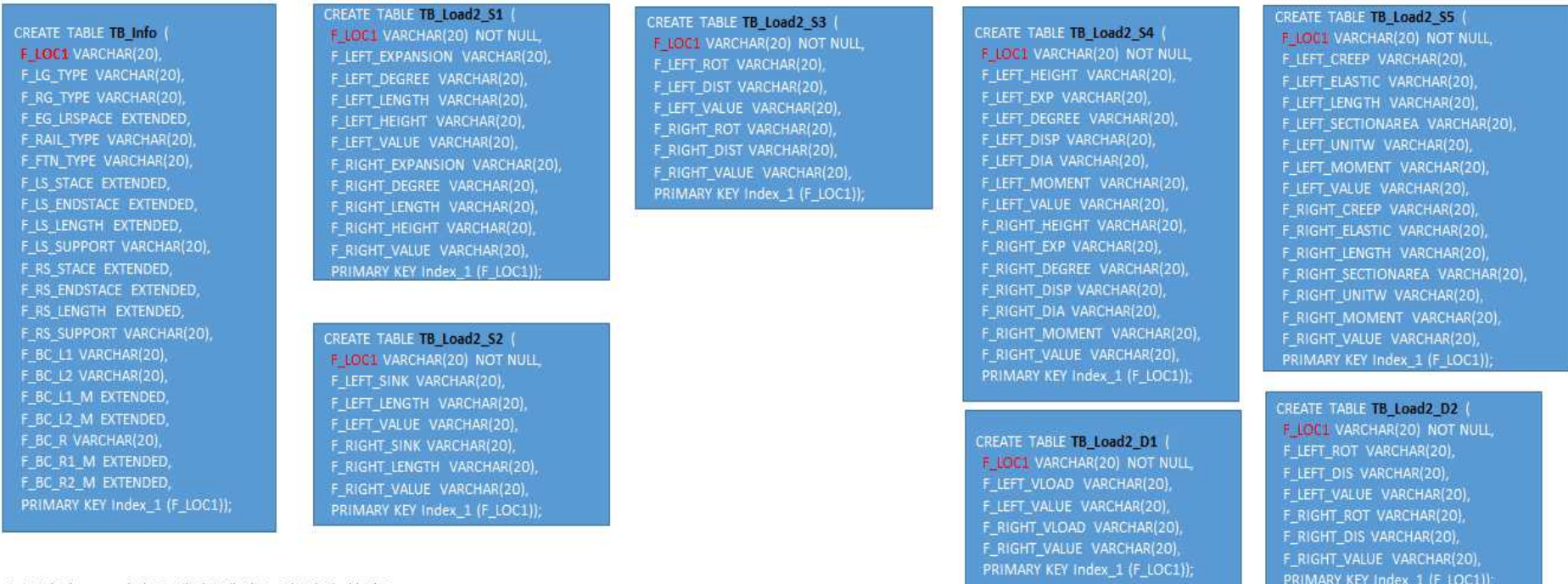


그림 257 DATA BASE 관계도



그림 258 DATA BASE 관계도

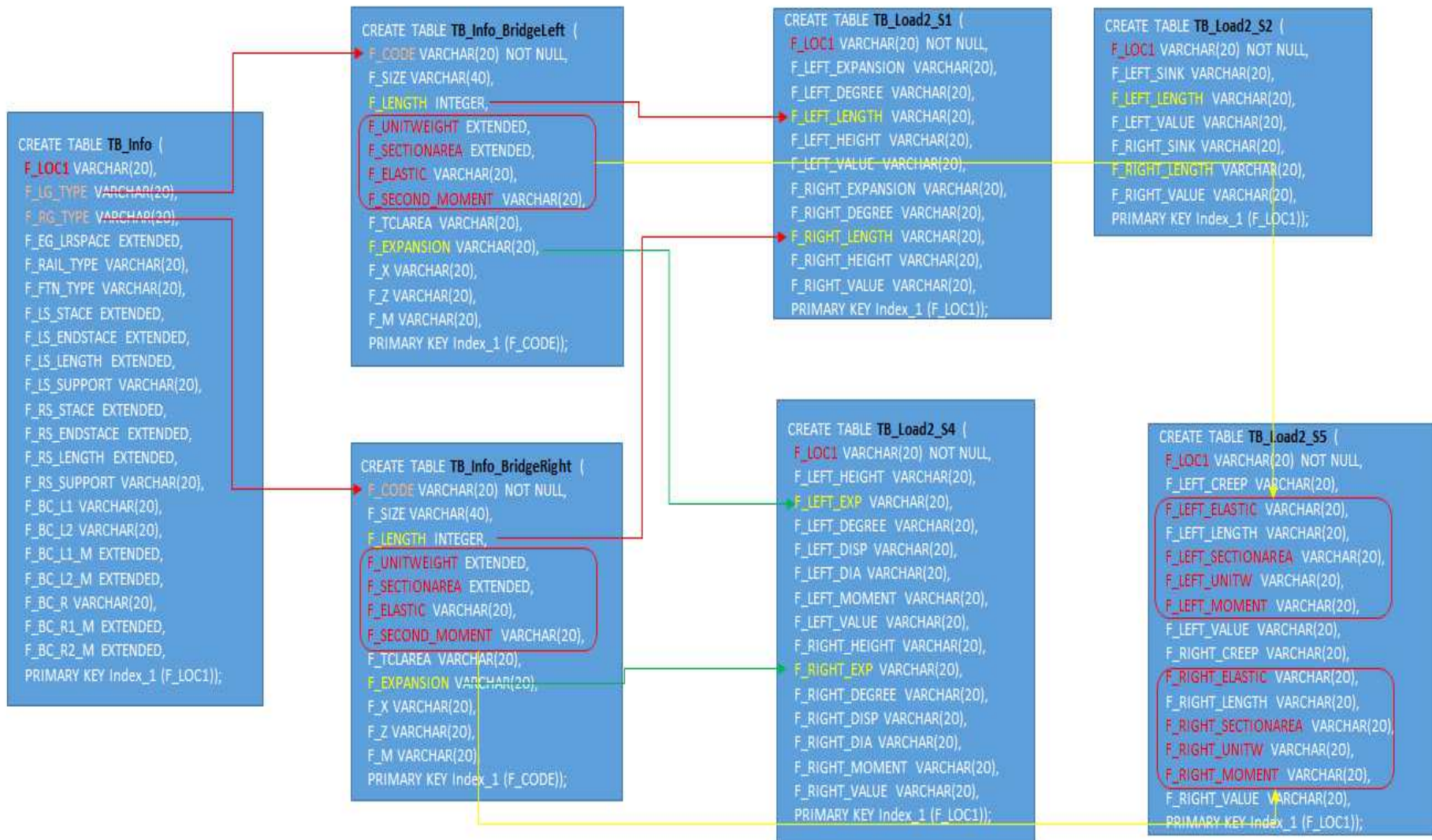
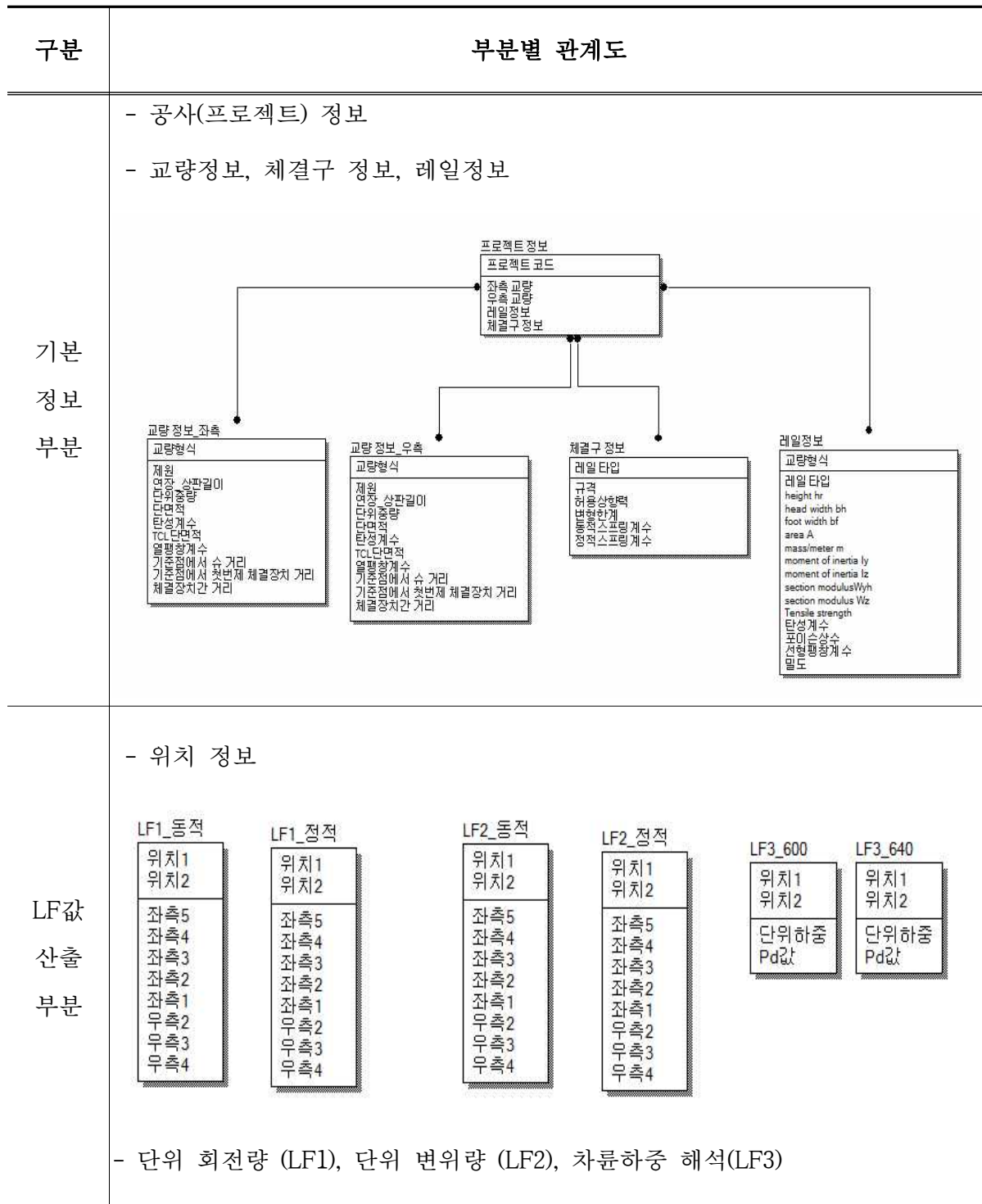


그림 259 DATA BASE 관계도

(4) DATA-BASE 부분별 관계도



마. 프로그램 개발

철도 교량 단부 콘크리트 궤도 사용성 검토 프로그램의 개발을 위해 사용성 검토 업무의 프로세스를 분석하고, 도출된 인자들로 검토 알고리즘을 구성한 후, 이에 적합한 사용자 인터페이스를 설계하여 프로그램을 개발하였다. 본 프로그램은 “사용성 검토 엔진”을 기반으로 하여 “기본정보 입력”, “단위하중 계산”, “정적/동적 하중 계산”, “하중 조합 및 사용성 검토” 부분으로 구성되어 있다.



그림 260 철도교량 단부 콘크리트 궤도 사용성 검토 프로그램 Ver 1.0

(1) 프로그램 개발

(가) 개발 프로그램 사양

표 56 개발 프로그램 적용 사양

구분	개발 내용
프로그램 형태	- Stand Alone형태 . Local PC에서 단독으로 구동되는 프로그램
개발 도구	- Delphi (UI, 계산 엔진 분야) - C++ (알고리즘 컨버팅 분야) - Matlab (알고리즘 분야)
적용 DB	- Absolute Database (Local DB 적용)

(나) 개발 방법

개발 도구는 UI 및 계산 알고리즘 부분을 담당하고 있는 Delphi와 C++ 프로그램 및 Matlab으로 개발하였다. 프로그램 구동 방법은 사용자 인터페이스 화면에서 입력한 각각의 매개변수 값들을 읽어 들여 Local DataBase에 저장을 하면 계산 알고리즘에서 해당되는 변수 값들을 호출하여 각각의 하중 값들을 산출한다. 산출된 계산 값들은 사용성 검토를 위해 하중 조합이나 검토 Logic으로 전송되어 최종 사용성 검토 결과를 출력한다.



그림 261 프로그램 작동 순서(계산절차)

(다) 시스템 기능 구성도

표 57 프로그램 상세 업무별 기능 구성도

대분류	중분류	상세 업무
기본정보 입력	- Girder 정보	- TYPE 별 물성치 입력
	- Rail 정보	- 침목 간격 및 단부 침목간격 입력
	- 체결장치 정보	- FEM 해석을 위한 경계조건 입력
	- 경계 조건	- 하중 값 산출을 위한 교각 정보, 열차하중 정보 입력
단위하중에 의한 작용력 산출	- LF1 값	- 단위 회전에 의한 레일체결장치 작용력 산출
	- LF2 값	- 단위 변위에 의한 레일체결장치 작용력 산출
	- LF3 값	- 단위 운중에 의한 레일체결장치 작용력 산출
정적, 동적 하중 값 산출	- 정적하중 값	- 교량상판 크리프 및 건조 수축에 의한 단부 회전 값(%)
		- 교량상부구조의 상하면 온도차 단부 회전 값(%)
		- 교각 기초의 잔류침하에 의한 단부 회전 값(%)
		- 레일/교량 온도차에 의한 교각 상부 회전 값(%)
	- 동적하중 값	- 교각 전후면 온도차에 의한 교각 상부 단부 회전 값(%)
		- 열차 수직하중에 의한 교량상판 단부회전 및 수직변위 값
		- 시제동 하중작용 시 교각 상부 회전 값
		- 축 하중 값
하중조합 및 검토	- 하중조합	- 부분 안전 계수 적용
	- 상향력 검토	- 상향력, 압축력 검토(OK, NG 판단)
	- 압축력 검토	

(2) 매개변수 입력 모듈 개발

(가) 다양한 변수 값 입력을 위한 가변적 인터페이스 개발

The screenshot shows the 'Data Input' window of a software application. The window has a menu bar with '파일', 'Data Input', and 'Result'. Below the menu bar are several tabs: '기본정보', '단위하중', '변형/변위', '검토결과', and '결과'. The '기본정보' tab is active, showing various input fields for bridge parameters. The 'Girder 정보' section includes fields for '좌측 Girder Type', '좌측 Girder Length', '좌측 Girder Unit Load', '좌측 Girder Cross Section', '좌우측 Girder Length', '우측 Girder Type', '우측 Girder Length', '우측 Girder Unit Load', and '우측 Girder Cross Section'. The 'Rail 정보' section includes 'Rail Type', '단성 계수', and '단면2차 모멘트'. The 'Fastener 정보' section includes ' 체결구 Type', '허용 상향력', '변형 한계', '동적 스프링 계수', and '정적 스프링 계수'. The '상부구조' section includes '열평량 계수', '최대 온도차', '최소 온도차', '최소 거더 형고', and '우측 거더 형고'. The '교각정보' section includes '교각 간격', '교각 간격 부등침하량', '교각 간격 온도차', '교각 높이', '교각 직경', '교차장치사이 간격', and 'Creep 계수'. The '열차하중 정보' section includes '열차 Type', '충격 계수', '주행 속도', and '동중 종감 계수'. The 'Sleeper 정보' section includes '좌측 침목 간격', '좌측 침목 간격', '좌측 침목 간격', '좌측 침목 간격', '우측 침목 간격', '우측 침목 간격', '우측 침목 간격', and '우측 침목 간격'. At the bottom, there is a graphical representation of the bridge structure with a coordinate system from -4 to 5.

그림 262 매개변수 입력 모듈

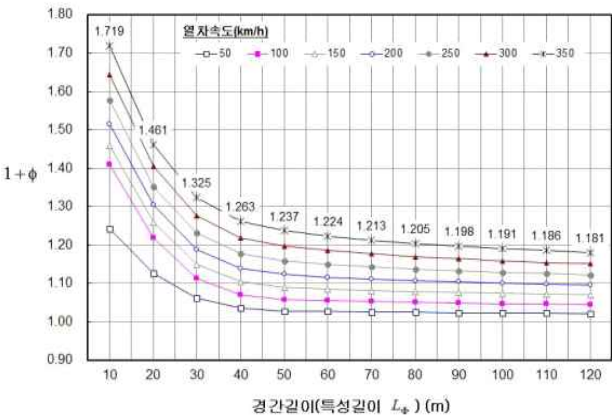
매개변수 입력 Editor는 상향력 검토를 위한 기초 정보(교량 및 레일 그리고 체결구의 기본 제원)를 입력하는 기능을 수행한다. 또한, 각종 정적-동적 하중을 산출하기 위한 영향 인자 값들을 입력한다.

구분	프로그램 화면																																																																								
매개 변수 입력	* 교각 위치 정보 입력 목록경신 <table border="1"> <thead> <tr> <th>순번</th><th>교각명</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td><td>A2</td></tr> <tr> <td>2</td><td>A1</td></tr> <tr> <td>3</td><td>P1</td></tr> </tbody> </table> 위치 정보 교각명(Pier No) A2 - 교대, 교각 위치 정보 설정 - 교대 및 교각의 위치 정보는 모든 값의 기준이 된다. * Girder 정보, Rail 정보, Fastener 매개 변수 입력 Girder 정보 <table border="1"> <tbody> <tr> <td>좌측 Girder Type</td><td>PSC Beam</td></tr> <tr> <td>좌측 Girder Length</td><td>5.4 m</td></tr> <tr> <td>좌측 Girder Unit Load</td><td>24.50</td></tr> <tr> <td>좌측 Girder Cross Section</td><td>8.63</td></tr> <tr> <td>좌우측 Girder Length</td><td>0.3 m</td></tr> <tr> <td>우측 Girder Type</td><td>PF Girder</td></tr> <tr> <td>우측 Girder Length</td><td>5.4 m</td></tr> <tr> <td>우측 Girder Unit Load</td><td>24.50</td></tr> <tr> <td>우측 Girder Cross Section</td><td>8.63</td></tr> </tbody> </table> Rail 정보 <table border="1"> <tbody> <tr> <td>Rail Type</td><td>KS60</td></tr> <tr> <td>탄성 계수</td><td>210,000,000.00000</td></tr> <tr> <td>단면 2차 모멘트</td><td>0.00</td></tr> </tbody> </table> Fastener 정보 <table border="1"> <tbody> <tr> <td>채결구 Type</td><td>KR</td></tr> <tr> <td>허용 상향력</td><td>17.00</td></tr> <tr> <td>변형 한계</td><td>2.50</td></tr> <tr> <td>동적 스프링 계수</td><td>60,000,000.00</td></tr> <tr> <td>정적 스프링 계수</td><td>29,970,000.00</td></tr> </tbody> </table> - 좌, 우측 Girder의 Type 설정 , Girder의 길이, Girder의 단위 중량 - Girder의 단면 2차 모멘트 값 설정 - Rail의 타입, 탄성 계수, 단면 2차 모멘트 값 설정 - Fastener의 Type, 허용 상향력, 변형 한계, 동적-정적 스프링 계수 값 설정 * 상부 구조 정보, 교각 정보, 열차 하중 매개 변수 입력 상부구조 <table border="1"> <tbody> <tr> <td>열팽창 계수</td><td>0.00001</td></tr> <tr> <td>최대 온도차</td><td>6</td></tr> <tr> <td>최소 온도차</td><td>3</td></tr> <tr> <td>좌측 거더 형고</td><td>2.69</td></tr> <tr> <td>우측 거더 형고</td><td>2.69</td></tr> </tbody> </table> 교각정보 <table border="1"> <tbody> <tr> <td>교각 잔류 부등침하량</td><td>0.005</td></tr> <tr> <td>교각 전후 온도차</td><td>5.0</td></tr> <tr> <td>교각 높이</td><td>11.5</td></tr> <tr> <td>교각 직경</td><td>2.3</td></tr> <tr> <td>교각장치사이 간격</td><td>1.00</td></tr> <tr> <td>Creep 계수</td><td>0.6</td></tr> </tbody> </table> 열차 하중 정보 <table border="1"> <tbody> <tr> <td>열차 Type</td><td>화물열차</td></tr> <tr> <td>충격 계수</td><td>1.26</td></tr> <tr> <td>주행 속도</td><td>50</td></tr> <tr> <td>윤증 증감 계수</td><td>1.2</td></tr> </tbody> </table>	순번	교각명	1	A2	2	A1	3	P1	좌측 Girder Type	PSC Beam	좌측 Girder Length	5.4 m	좌측 Girder Unit Load	24.50	좌측 Girder Cross Section	8.63	좌우측 Girder Length	0.3 m	우측 Girder Type	PF Girder	우측 Girder Length	5.4 m	우측 Girder Unit Load	24.50	우측 Girder Cross Section	8.63	Rail Type	KS60	탄성 계수	210,000,000.00000	단면 2차 모멘트	0.00	채결구 Type	KR	허용 상향력	17.00	변형 한계	2.50	동적 스프링 계수	60,000,000.00	정적 스프링 계수	29,970,000.00	열팽창 계수	0.00001	최대 온도차	6	최소 온도차	3	좌측 거더 형고	2.69	우측 거더 형고	2.69	교각 잔류 부등침하량	0.005	교각 전후 온도차	5.0	교각 높이	11.5	교각 직경	2.3	교각장치사이 간격	1.00	Creep 계수	0.6	열차 Type	화물열차	충격 계수	1.26	주행 속도	50	윤증 증감 계수	1.2
순번	교각명																																																																								
1	A2																																																																								
2	A1																																																																								
3	P1																																																																								
좌측 Girder Type	PSC Beam																																																																								
좌측 Girder Length	5.4 m																																																																								
좌측 Girder Unit Load	24.50																																																																								
좌측 Girder Cross Section	8.63																																																																								
좌우측 Girder Length	0.3 m																																																																								
우측 Girder Type	PF Girder																																																																								
우측 Girder Length	5.4 m																																																																								
우측 Girder Unit Load	24.50																																																																								
우측 Girder Cross Section	8.63																																																																								
Rail Type	KS60																																																																								
탄성 계수	210,000,000.00000																																																																								
단면 2차 모멘트	0.00																																																																								
채결구 Type	KR																																																																								
허용 상향력	17.00																																																																								
변형 한계	2.50																																																																								
동적 스프링 계수	60,000,000.00																																																																								
정적 스프링 계수	29,970,000.00																																																																								
열팽창 계수	0.00001																																																																								
최대 온도차	6																																																																								
최소 온도차	3																																																																								
좌측 거더 형고	2.69																																																																								
우측 거더 형고	2.69																																																																								
교각 잔류 부등침하량	0.005																																																																								
교각 전후 온도차	5.0																																																																								
교각 높이	11.5																																																																								
교각 직경	2.3																																																																								
교각장치사이 간격	1.00																																																																								
Creep 계수	0.6																																																																								
열차 Type	화물열차																																																																								
충격 계수	1.26																																																																								
주행 속도	50																																																																								
윤증 증감 계수	1.2																																																																								

구분	프로그램 화면
----	---------

- 정적 하중 값을 산출하기 위한 교량 상부 구조의 열팽창 계수, 최대~최소 온도차, Girder 높이 값 입력
 - 정적 하중 값을 산출하기 위한 교각의 잔류 부동 침하량, 교각 전후면 온도차, 교각 높이 및 직경, 교좌 장치 사이 간격, Creep 계수 값 입력
 - 동적 하중 값을 산출하기 위한 열차 Type, 충격계수, 주행속도, 운중 증감 계수 값을 입력 한다.
- * 운중 증감 계수=경간 길이에 따른 충격 계수를 말한다.
- (출처-KR C-08090 교량 단부 콘크리트궤도 사용성 검토, “한국철도시설공단”)

매개 변수
입력



[교량 경간과 속도에 따른 계수 값의 변화]

* Sleeper 정보



- . 침목 간격, 단부 침목 간격, 침목 위치 정보 입력
- . 우측 교량 좌측 침목 위치 값 입력

(나) 변수 추적 및 입력을 위한 동적 환경 개발

사용성 검토에 필요한 Girder, Rail, 체결구의 기본 제원을 입력/저장하여 사용자가 반복 사용할 수 있는 동적 환경입니다.

구분

프로그램 화면

* 위치별 적용할 수 있는 Girder의 기본 정보 입력 기능

Left Bridge							Right Bridge						
교량형식	제원	연장	단위중량	단면적	탄성계수	단	교량형식	제원	연장	단위중량	단면적	탄성계수	단
ARCH		110					ARCH						
PF Girder	1@35m	32	24.5	8.634	31900000	7.	PF Girder	1@35m	5.4	24.5	8.634	31900000	7.
PRECOM		35					PRECOM		25				
PSC-ED		25					PSC Beam	2@25m	50	24.5	8.634	30900000	7.
PSC Beam	2@25m	5.4	24.5	8.634	30900000	7.	PSC BEAM		35				
PSC BEAM		25		12.37	25978000	1E	TRUSS						
RPF		40											
TRUSS		90											

- 위치별 적용할 수 있는 Girder의 기본 정보 입력 기능

- 좌/우측 Girder의 물성치를 구분하여 입력

* Rail의 기본 정보 DB 지원

Rail type													
RailType	Height	Head Width	Foot Width	Area	mass/m	MOI Y	MOI Z	Wyh	Wyt	Wz	Tensile	탄성계수	포아송상수
60E1(UIC60)													
60K	174	65	145	77.3	60.7	3064		395		880			
KR60	175	65	145	77.3	60.7	3064	33	395		800			
KSSON	153	65	127	64.2	50.4	1960	33	242	274	53	800		
KS60	174	65	145	77.5	60.8		1	321	397	71	800	E=2.1×10 ⁸ V=0.3	a=1.2×10 ⁻⁵ /r=7850 kg/r
KS61	4	666	32	44	55	0	33	333					

- 적용되는 Rail의 Type을 설정하면 자동으로 해당 기본 정보가 설정됨

Junction type						동적스프링계수		정적스프링계수
구분	규격	허용상향력	변형한계	동적스프링계수	정적스프링계수			
ERL				60000000	29970000			
KR	SFC 1501	17	2.5	60000000	29970000			
SFC				60000000	29970000			
SKL15	SFC 1500	16	2.4	60000000	29970000			
SKL15B				60000000	29970000			

* 체결구의 기본 정보 DB 지원

- 적용되는 체결구의 Type을 설정하면 자동으로 해당 기본 정보가 설정됨

동적
변수
입력

(3) 단부 사용성 검토 엔진 개발

(가) 시스템 엔진 계산 논리 구성도

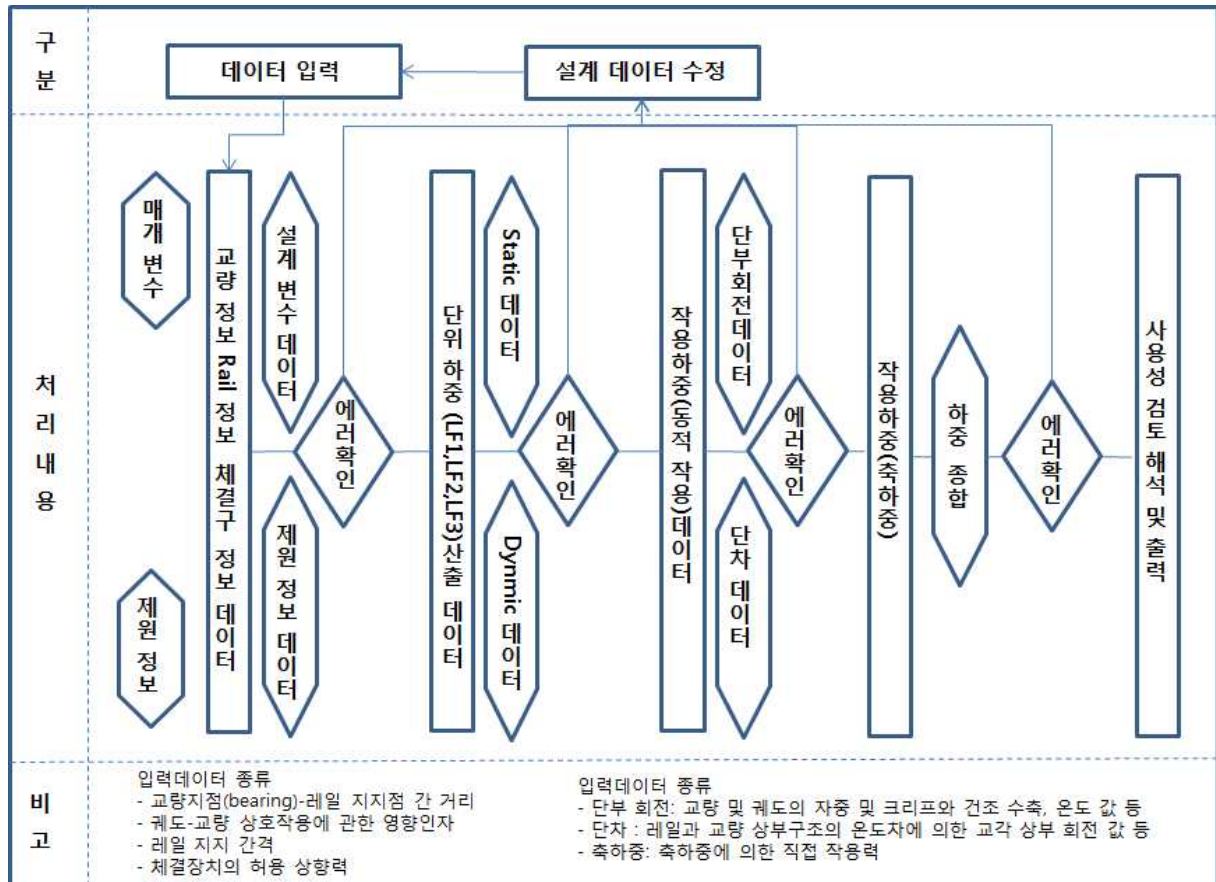


그림 263 반복적 논리 연산 구조도

시스템은 입력된 변수들의 값을 반복적으로 검증 확인하면서 계산과 조합을 반복하는 구조로 논리 연산이 구성되어 있다.

(나) 시스템 엔진 계산 연산 구성도 (프로그램 소스 일부)

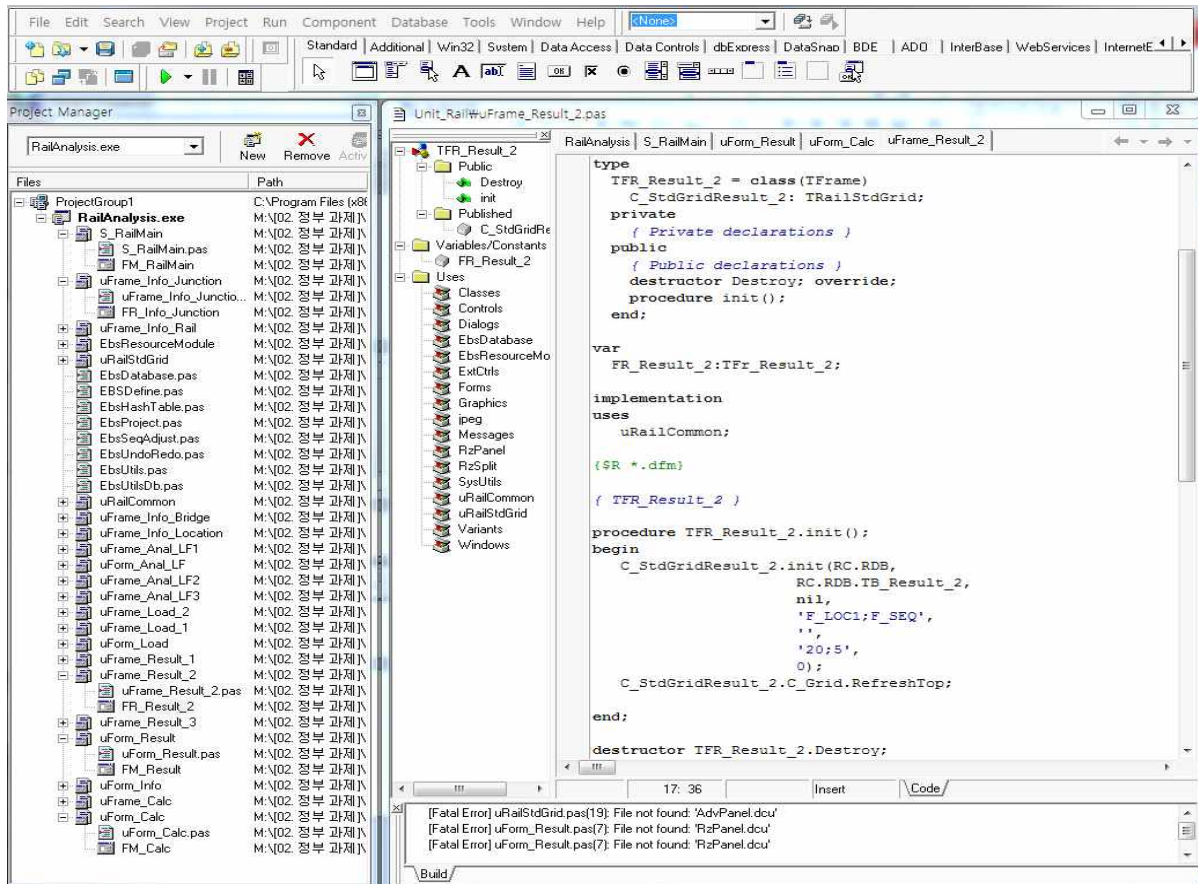


그림 264 프로그램 소스

(다) 반복적인 검증 절차 개발

단계마다 각 변수 데이터의 입력을 통한 결과값을 검증한다.

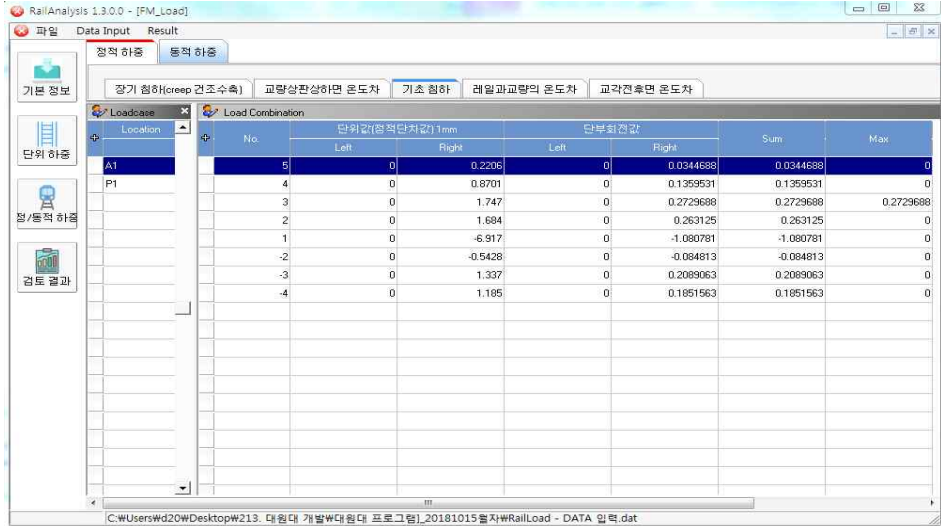
① 단계별 검증 절차



그림 265 반복적 검증 절차도

1차적으로 단위 하중, 동적 하중, 정적 하중이 계산된 결과를 검토하고, 2차로 최종 상향력 검토 전 각 하중의 조합 결과를 검토하는 구조이다.

② 단계별 검증을 위한 각 하중 계산 부분_정적 하중

구분	프로그램 화면
정적 하중	* 크리프 및 건조 수축에 의한 단부 회전 값  - 산출식 : $(\text{creep\&shrinkage계수} (\xi) * \text{단위중량} (\gamma) * \text{단면적} (A_s))$ $* \text{상판길이} (L_s)^3 / (24 * \text{탄성계수} (E_s) * \text{단면2차모멘트} (I_x)) / 1000$ $* \text{단위값-KR(static)}_1\% \text{ 값}$
	*교량상판 상하면 온도 차에 의한 단부 회전 값  - 산출식 : $(\text{열팽창계수} (\alpha) * \text{교각 온도변화} (\Delta T) * \text{상판길이} (L_s))$ $/ (2 * \text{상판형고} (H_t)) * 1000) * \text{단위값-KR(static)}_1\% \text{ 값}$

* 교각 기초의 잔류 침하에 의한 단부 회전 값

RailAnalysis 1.3.0.0 - [FM_Load]

파일 Data Input Result

정적 하중 동적 하중

장기 침하(creep 건조수축) 교량상판상하면 온도차 기초 침하 레일과교량의 온도차 교각전후면 온도차

Loadcase Load Combination

Location	No.	단위값(정적단차값) 1mm		단부회전값		Sum	Max
		Left	Right	Left	Right		
A1	5	0	0.2206	0	0.0344688	0.0344688	0
P1	4	0	0.8701	0	0.1359531	0.1359531	0
	3	0	1.747	0	0.2729688	0.2729688	0.2729688
	2	0	1.684	0	0.263125	0.263125	0
	1	0	-6.917	0	-1.080781	-1.080781	0
	-2	0	-0.5428	0	-0.084813	-0.084813	0
	-3	0	1.337	0	0.2089063	0.2089063	0
	-4	0	1.185	0	0.1851563	0.1851563	0

C:\Users\Wd20\Desktop\W213. 대원대 개발\W대원대 프로그램\20181015\철자\RailLoad - DATA 입력.dat

- 산출식 :

정적
하중
$$\left(\left(\text{기초침하}(ds) / \text{상판길이}(Ls) \right) * 1000 \right) * \text{단위값} - \text{KR}(\text{static})_1\% \text{ 값}$$

*레일과 교량의 온도차에 의한 교각 상부 회전 값

RailAnalysis 1.3.0.0 - [FM_Load]

파일 Data Input Result

정적 하중 동적 하중

장기 침하(creep 건조수축) 교량상판상하면 온도차 기초 침하 레일과교량의 온도차 교각전후면 온도차

Loadcase Load Combination

Location	No.	단위값(정적단차값) 1mm		단부회전값		Sum	Max
		Left	Right	Left	Right		
A1	5	0	0.840977	0	0.1597856	0.1597856	0
P1	4	0	0.398068	0	0.0756329	0.0756329	0
	3	0	-2.36132	0	-0.448651	-0.448651	0
	2	0	-8.99852	0	-1.709719	-1.709719	0
	1	0	9.8384	0	1.869296	1.869296	1.869296
	-2	0	2.34633	0	0.4458027	0.4458027	0
	-3	0	-0.66916	0	-0.12714	-0.12714	0
	-4	0	-1.12143	0	-0.213072	-0.213072	0

C:\Users\Wd20\Desktop\W213. 대원대 개발\W대원대 프로그램\20181015\철자\RailLoad - DATA 입력.dat

- 산출식 :

$$\left((\text{온도차})\text{입력 값} * \text{교좌장치간 거리}(dbr) * 1000 \right) * \text{단위값} - \text{KR}(\text{static})1\text{mm}$$

* 교각 전후면 온도차에 의한 교각 상부 회전 값

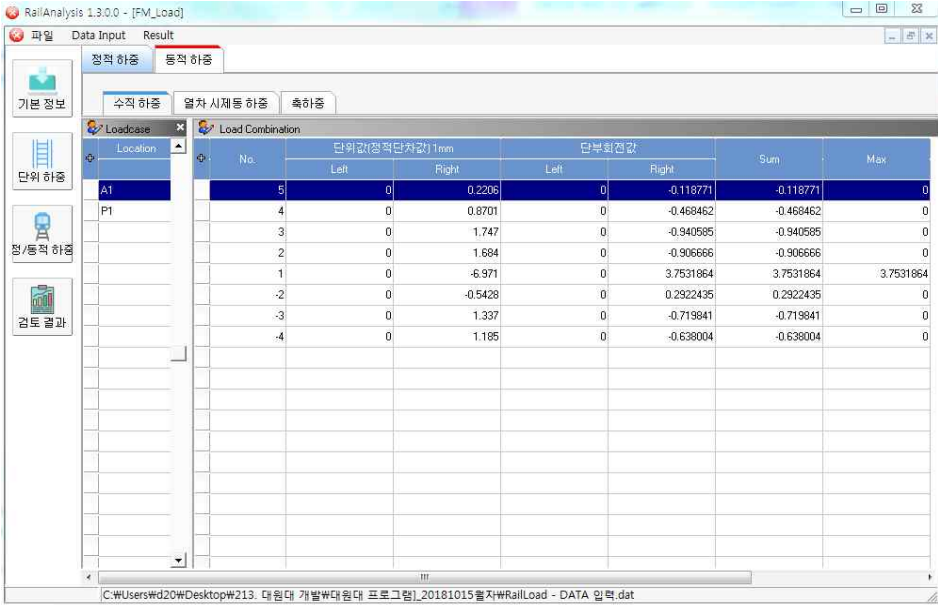
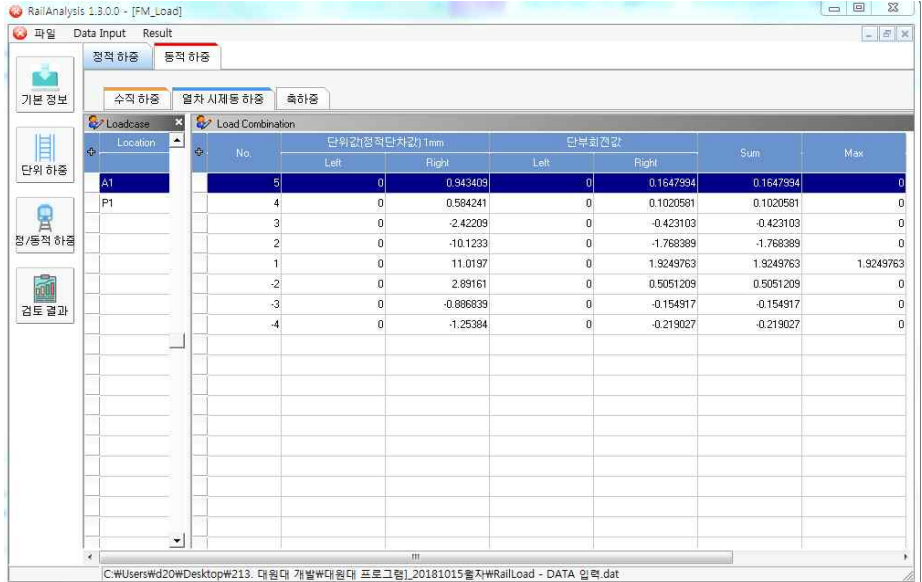
Location	No.	단위값(정적단차값) 1mm		단부회전값		Sum	Max
		Left	Right	Left	Right		
A1	5	0	0.840977	0	0.2198008	0.2198008	0
P1	4	0	0.398068	0	0.1040405	0.1040405	0
	3	0	-2.36132	0	-0.617163	-0.617163	0
	2	0	-8.99852	0	-2.351886	-2.351886	0
	1	0	9.8384	0	2.5714	2.5714	2.5714
	-2	0	2.34633	0	0.6132453	0.6132453	0
	-3	0	-0.66916	0	-0.174894	-0.174894	0
	-4	0	-1.12143	0	-0.293101	-0.293101	0

- 산출식 :

$$\left(\left(\left(\text{교각높이}(H_p) * \text{열팽창계수}(\alpha) * \text{교각 온도변화}(\Delta T) \right) / \text{교각 직경}(D_p) \right) * \text{교좌장치간 거리}(dbr) \right) * 1000$$

* 단위값-KR(static)_1mm

③ 단계별 검증을 위한 각 하중 계산 부분_동적 하중

구분	프로그램 화면
	*열차 수직 하중  - 산출식 : $((\text{수직하중})\text{입력} * 1000) * \text{단위값-KR(dynamic)}_1\%$ 동적 하중 *열차 시제동 하중  - 산출식 : $((\text{회전각})\text{입력} * \text{교좌장치간 거리} * 1000) * \text{단위값-KR(dynamic)}_1\text{mm}$

(라) 사용성 검토 해석 모듈 개발

① 동적/ 정적 하중 해석을 위한 설계

표 58 동적/정적 하중 값 산출 방법

분류	세분류	산출 방법
동적 하중	크리프 및 건조수축에 의한 단부 회전 값	$((\text{creep\&shrinkage계수}(\xi) * \text{단위중량}(\gamma) * \text{단면적}(As) * \text{상판길이}(Ls)^3) / (24 * \text{탄성계수}(Es) * \text{단면2차모멘트}(Ix))) / 1000$
	교량상판 상하면 온도차에 의한 단부회전 값	$((\text{열팽창계수}(\alpha) * \text{교각 온도변화}(\Delta T) * \text{상판길이}(Ls)) / (2 * \text{상판형고}(Ht))) * 1000$
	교각기초의 잔류 침하에 의한 단부 회전 값	$(\text{기초침하}(ds) / \text{상판길이}(Ls)) * 1000$
	레일과 교량의 온도차에 의한 상부 회전 값	$(\text{온도차})\text{입력 값} * \text{교좌장치간 거리}(dbr) * 1000$
	교각전후면 온도차에 의한 교각 상부 단부 회전 값	$((\text{교각높이}(Hp) * \text{열팽창계수}(\alpha) * \text{교각 온도변화}(\Delta T) / \text{교각 직경}(Dp)) * \text{교좌장치간 거리}(dbr)) * 1000$
정적 하중	열차 수직 하중 값	$(\text{수직하중})\text{입력} * 1000$
	열차 시제동 하중 값	$(\text{회전각}) \text{입력} * \text{교좌장치간 거리} * 1000$

② Rail 상향력 검토 계산 Logic

표 59 Rail 상향력 산출 방법

분류	세분류	산출 방법
정적 하중 작용	크리프 및 건조수축에 의한 단부 회전 값	((LF1 정적 좌측 값* 하중 조합값 좌측값)+(LF1 정적 우측값* 하중 조합값 우측값))
	교량상판 상하면 온도차에 의한 단부회전 값	((LF1 정적 좌측 값* 하중 조합값 좌측값)+(LF1 정적 우측값* 하중 조합값 우측값))
	교각기초의 잔류침하에 의한 단부 회전 값	((LF1 정적 좌측 값* 하중 조합값 좌측값)+(LF1 정적 우측값* 하중 조합값 우측값))
	레일과 교량의 온도차에 의한 상부 회전 값	((LF2 정적 단위회전값* 하중 조합값))
	교각전후면 온도차에 의한 교각 상부 단부 회전 값	((LF2 정적 단위회전 값* 하중 조합값))
동적하중 작용	열차 수직 하중 값	((LF1 동적 좌측값*하중 조합값 하중조합 값 중 좌측 회전값)+(LF1 동적 우측값*하중 조합 값 하중조합 값 중 우측 회전값))
	열차 시제동 하중 값	(LF2 동적 단위회전 값 * 하중 조합값)
차륜하중		LF3 * Pd 값/100
상향력 검토		체결구 물성치에 입력한 허용 상향력과 비교해서 < 면 OK, >= 면 NG

③ Rail 압축력 검토 계산 Logic

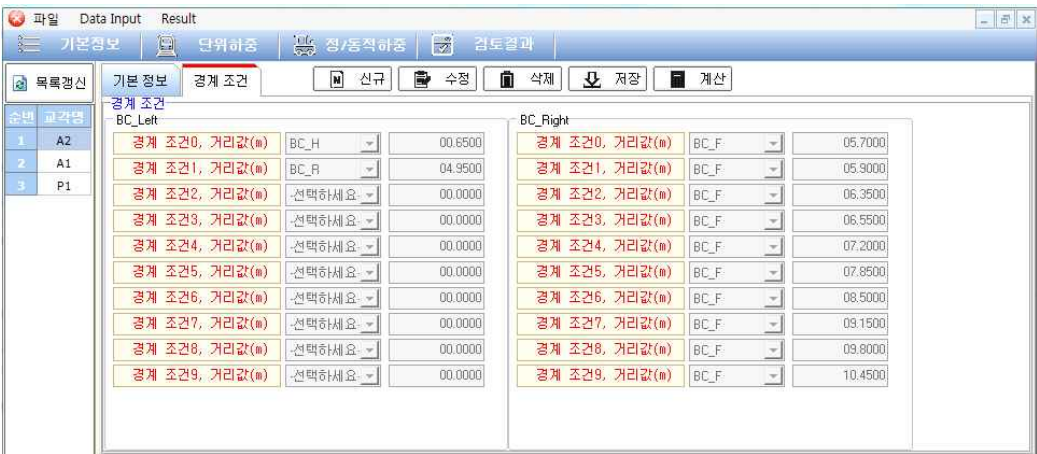
표 60 Rail 압축력 산출 방법

분류	세분류	산출 방법
동적하중 작용	열차 수직 하중 값	((LF1 동적 좌측값*하중 조합값 하중조합 값 중 좌측 회전값)+(LF1 동적 우측값*하중 조합 값 하중조합 값 중 우측 회전값))
	열차 시제동 하중 값	(LF2 동적 단위회전 값 * 하중 조합값)
차륜하중		LF3 * Pd 값/100
상향력 검토		체결구 물성치에 입력한 허용 상향력과 비교해서 < 면 OK, >= 면 NG

(4) 교량 단부 궤도사용성 평가 검토 결과 Report 모듈 개발

구분	프로그램 화면
Report	 * 사용성 검토 부분 · 하중 조합 · 상향력 검토 출력 (체결구 허용 상향력과 비교) · 압축력 검토 출력 (체결구 허용 상향력과 비교) · 체결구 물성치에 입력한 허용 상향력과 비교해서 체결구 물성치 < 면 OK, 체결구 물성치 >= 면 NG · 해당 결과 Excel 보고서로 출력

(5) 범용 유한요소해석 프로그램과 연계 모듈 적용성 검토

구분	프로그램 화면
경계 조건 입력	*경계 조건 입력  · 유한 해석 값을 산출하기 위한 경계 조건 값 입력 · 교좌 장치의 Type (Hinge , Roller , Fixed) 설정 · 각 지점의 침목과 레일의 거리 · 교대부 부분은 좌우 4개 값 설정 가능 · 교각 부분은 최대 10개 값 설정 가능

[부록] 철도 교량 콘크리트 궤도 단부 사용성 검토 프로그램 사용 매뉴얼

제1장 프로그램 화면 설명

프로그램을 실행하면 다음과 같은 화면이 실행됩니다. (프로그램의 실행 화면 크기는 1028*720에 최적화 되어있습니다)



그림 266 철도 교량 단부 사용성 검토 프로그램 메인 화면

1. 주 메뉴

파일-data Input-Result 메뉴로 구성되어 있다.

1) 파일 메뉴

- ① New : 신규로 작업 프로젝트를 생성한다.
- ② Open : 기존에 작성된 작업 프로젝트 파일을 호출해 온다.
- ③ Project 정보 : 해당 작업 프로젝트의 정보 교량 명, 기본 제원 Type을 확인한다.
- ④ Exit : 프로그램을 종료한다.

2) Data Input 메뉴

- ① element : 기본 정보(제원) 입력창을 호출한다.
- ② Unit Load : 단위 하중 산출 창을 호출한다.

③ Load : 동적/정적 하중 결과 창을 호출한다.

3) Result 메뉴

① 하중 조합, 상향력 검토, 압축력 검토 결과 화면을 호출한다.

2. 작업 메뉴

실제 작업이 수행되는 작업 메뉴는 기본 정보- 단위 하중 - 정/동적 하중 - 검토 결과 메뉴로 구성되어 있다.

1) 기본 정보 메뉴

기본 정보 입력 창에서 위치정보- Girder 정보 - Rail 정보 - Fastener 정보 및 교량 기본 정보를 입력한다.



그림 267 기본정보 메뉴

* 아이콘 설명

- 신규 : 위치 정보(교대, 교각) 생성한다.
- 수정 : 기존에 입력된 데이터를 수정한다.
- 삭제 : 기존에 생성된 교대나 교각을 삭제한다.
- 저장 : 입력한 정보를 저장한다.(단, 입력한 정보로 각 하중 정보를 업데이트 하려면 반드시 “계산” 기능을 수행해야 한다.
- 계산 : 입력된 기본 정보들을 계산하여 단위 하중, 정/동적하중, 하중 조합, 상향력 압축력을 계산한다.
- Girder, Rail, Fastener 정보 수정 : 각 제원의 기본 정보들을 사용자가 입력해 놓은 후 호출하여 재사용한다.

작업 순서는 “신규 버튼” 수행하여 위치 정보를 설정한 후 각 제원 정보를 입력한다.

가) 위치 정보 설정



그림 268 위치 정보 설정 화면

- ① 신규 버튼을 실행한다.
- ② 교각명 항목에서 교대(A1, A2) 나 교각 (P1 ~ P99까지)을 설정한다.
- ③ 설정한 위치 정보를 목록 부분에서 확인한다.

나) Girder, Rail, Fastener 정보 설정

각 제원의 Type을 선택하면 나머지 정보는 자동으로 입력된다. 해당 Type은 아이콘 메뉴 중 “ Girder, Rail, Fastener 정보 설정 “ 메뉴를 이용하여 입력-저장해 놓는다.

Girder 정보		Rail 정보		Fastener 정보	
좌측 Girder Type	-선택하세요-	Rail Type	-선택하세요-	체결구 Type	-선택하세요-
좌측 Girder Length	0.0 m	탄성 계수	0.00000	허용 상향력	0.00
좌측 Girder Unit Load	0.00	단면2차 모멘트	0.00	변형 한계	0.00
좌측 Girder Cross Section	0.00			동적 스프링 계수	0.00
좌우측 Girder Length	0.0 m			정적 스프링 계수	0.00
우측 Girder Type	-선택하세요-				
우측 Girder Length	0.0 m				
우측 Girder Unit Load	0.00				
우측 Girder Cross Section	0.00				

그림 269 Girder, Rail, Fastener 정보 설정 화면

- ① 좌측 Girder Type을 선택한다.
- ② 우측 Girder Type을 선택한다.
- ③ Rail Type을 선택한다.
- ② Fastener Type을 선택한다.

다) 교량 및 열차 정보 설정

정적 하중 계산에 필요한 교량 정보와 동적 하중 계산에 필요한 열차 하중 정보를 입력한다.

상부구조		교각정보		열차하중정보	
열평형 계수	0.00000	교각 잔류 부등침하량	0.000	열차 Type	-선택하세요-
최대 온도차	0	교각 전후 온도차	0.0	충격 계수	-선택하세요-
최소 온도차	0	교각 높이	0.0	주행 속도	0
좌측 거더 형고	0.00	교각 직경	0.0	임중 증감 계수	0.0
우측 거더 형고	0.00	교좌장치사이 간격	0.00		
		Creep 계수	0.0		

그림 270 교량 및 열차 정보 설정 화면

- ① 교량 상부 구조 창에는 열팽창 계수, 최대-최소 온도차, Girder 높이를 입력한다.
- ② 교각 정보 창에는 Creep 계수, 잔류 부동침하량, 교각 전후 온도차, 교각 높이, 교각 직경과 교좌 장치 사이 간격을 입력한다.
- ③ 열차 하중 정보 창에는 열차 Type과 충격 계수 값을 선택하고 주행 속도와 윤증 증감 계수를 입력한다.

라) Sleep 정보 설정

기본적인 구조 해석을 위한 침목의 간격 및 위치 값을 입력한다. 좌측 침목 값만 입력하면 우측 침목 값은 좌측의 값을 참조하여 입력된다.

1

Sleeper 정보

좌측 침목 간격	0.00 mm	우측 침목 간격	0.00 mm
좌측 단부 침목 간격	0.0 mm	우측 단부 침목 간격	0.0 mm
좌측 우측 교량 최좌측 침목 위치	0	우측 우측 교량 최좌측 침목 위치	0

그림 271 침목정보 설정 화면

- ① 침목 간격, 단부 침목 간격 및 최 좌측 침목 위치 번호를 입력한다. 최 좌측 침목 위치 번호는 디폴트로 10 이다.

침목 간격 값이 설정되면 아래의 그림과 같이 중앙의 기준점 0을 기준으로 하여 좌/우측 간격 값에 따라 연결 지점 위치 값을 자동으로 디스플레이 해준다.

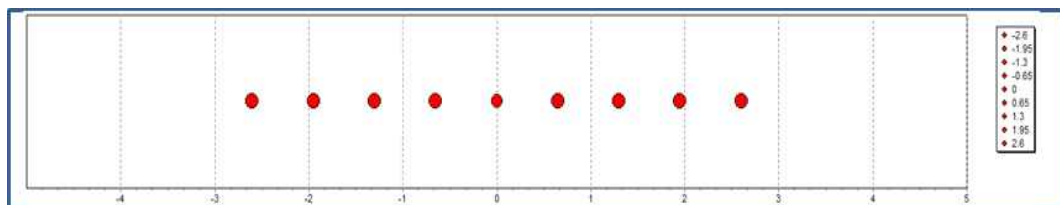


그림 272 단부 침목 간격 디스플레이 화면

마) 경계 조건 정보 설정

경계 조건의 입력 환경은 위치 값에 따라 가변적으로 달라진다. 교대 중 A2일 경우에는 좌측 경계 값 입력 환경은 2개, 우측 경계 값 입력 환경은 10개이고, A1일 경우에는 좌측 경계 값 입력 환경이 10개, 우측 경계 값 입력 환경이 2개이다. 그리고 교각일 경우에는 교각 번호와 상관없이 좌/우측 2개씩 입력 가능하다. 선택 경계 조건은 교좌 장치의 종류에 따라 BC_H(Hinge), BC_R(Roller), BC_F(Fixed) 이다.

그림 273 경계 조건 입력 창

- ① 교각의 위치 정보(교대, 교각 번호)를 선택한다.
- ② 교좌 장치의 종류와 거리 값을 입력한다.

모든 기본 정보 값들의 입력이 완료되면, 반드시 저장 메뉴를 수행해야 한다.
곧바로 하중 계산 값들을 확인하고자 한다면 계산 기능을 수행하면 확인이 가능하다.

바) Girder, Rail, Fastener 기본 정보 입력

제원 기본 정보를 반복적으로 입력하는 비효율적인 작업을 피하고자 사용자가 미리 시스템의 정보에 제원의 기본 정보를 입력해 놓은 후 사용자가 제원의 Type만 선택 하면 기타의 정보가 자동입력 될 수 있게 해놓은 사용자 DB 입력창입니다

그림 274 Girder, Rail, Fastener 기본 정보 입력창

- ① 입력하고자 하는 객체의 종류를 선택한다.
- ② 각 항목에 맞는 제원을 입력한다.

2) 단위 하중 메뉴

단위 하중은 LF1(단위 회전), LF2(수직 변위), LF3(차륜 하중) 값으로 구성되어 있다. 해당

결과 값은 자동으로 계산되어 산출된다.

Static				Dynamic			
Girder 위치	체결구 위치	좌측값	우측값	Girder 위치	체결구 위치	좌측값	우측값
A1	5	0		A1	5	0	0
A1	4	0		A1	4	0	0
A1	3	0		A1	3	0	0
A1	2	0		A1	2	0	0
A1	1	0		A1	1	0	0
A1	-2	0		A1	-2	0	0
A1	-3	0		A1	-3	0	0
A1	-4	0		A1	-4	0	0
A1	-5	0		A1	-5	0	0
A2	5	0		A2	5	0	0
A2	4	0		A2	4	0	0
A2	3	0		A2	3	0	0
A2	2	0		A2	2	0	0
A2	1	0		A2	1	0	0
A2	-2	0		A2	-2	0	0

그림 275 단위 하중 값 확인 창

- ① LF1(단위 회전), LF2(수직 변위), LF3(차륜 하중) 결과 창 선택
- ② 위치별 단위 하중(Static, Dynamic)결과 List

3) 정/동적 하중 메뉴

정/동적 하중은 기본 정보에서 입력한 교량 정보와 열차 하중 정보와 전 단계에서 산출된 단위 하중 조합으로 자동 계산된다.

Location	No.	단위하중(정적단차값) 1mm		단부회전값		Sum	Max
		Left	Right	Left	Right		
A1	5	0.0094	0	1.2308	0	1.2308	1.2308
A2	4	-0.2398	0	1.2308	0	1.2308	1.2308
P	3	-0.5838	0	1.2308	0	1.2308	1.2308
P1	2	3.8819	0	1.2308	0	1.2308	1.2308
	1	-4.4333	0	1.2308	0	1.2308	1.2308
	-2	1.0675	0	1.2308	0	1.2308	1.2308
	-3	0.4447	0	1.2308	0	1.2308	1.2308
	-4	-0.0202	0	1.2308	0	1.2308	1.2308
	-5	-0.0338	0	1.2308	0	1.2308	1.2308

그림 276 정하중-동하중 결과 값 확인 창

- ① 정적-동적 하중 선택
- ② 각 하중 값 선택
- ③ 위치 값 선택
- ④ 위치별 하중 값 List

4) 검토 결과 화면 메뉴

검토 결과에서는 하중 조합-상향력 검토-압축력 검토 결과를 확인할 수 있다.

위치/구분	정적하중[부분인전계수 적용(N)]	동적하중[부분인전계수 적용(N)]	최종상향력	최종상향력결과
A1	0	0	0	OK
A2	0	0.002	0.0618	OK
A2	0.5963	0.0287	0.4411	NG
A2	2.1357	0.1045	1.6067	NG
A2	0	0.1161	3.5687	NG
A2	2.4808	0.1214	1.8664	NG
A2	0	0.0007	0.0205	OK
A2	0	0.0044	0.1341	OK
A2	0	0.0005	0.0152	OK
A2	0.0101	0.0005	0.0076	OK
P	0	0.002	0.0618	OK
P	0.5963	0.0287	0.4411	NG
P	2.1357	0.1045	1.6067	NG
P	0	0.1161	3.5687	NG
P	2.4808	0.1214	1.8664	NG
P	0	0.0007	0.0205	OK
P	0	0.0044	0.1341	OK
P	0	0.0005	0.0152	OK
P	0.0101	0.0005	0.0076	OK
P1	0	0.002	0.0618	OK
P1	0.5963	0.0287	0.4411	NG

그림 277 최종 결과 값 확인 창

- ① 하중 조합-상향력 검토-압축력 검토 선택
- ② 각 결과 값 확인 및 최종 결과 (OK , NG) 값 확인
- ③ 결과 값을 엑셀 보고서로 저장

3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

3-1. 연구개발 최종목표 달성도

구분		핵심성과 (CTE)		단위성과		성과점검기준						양적 성과 건수	
						질적 성과지표	목표치	달성치	측정방법	검증방법	기준치		
주관	1	철도교량 단부 콘크리트케 도 사용성 검토 설계기법 개발	1-1	철도교량 단부 콘크리트케도 사용성 검토 영향인자 보정	①	실내모형시 험을 통한 영향인자 제시	1	1	보정방법 제시	보고서	15	특허: 출원 <u> </u> 건 등록 <u> </u> 건 논문: <u> </u> 건 시제품: <u> </u> 건 SW: <u> </u> 건	
				1-2	철도교량 단부 콘크리트케도 사용성 검토 설계기법 개발	①	설계기법	1	1	설계기법 제시	보고서		15
							②	검증사례	1	1	검증사례 제시		보고서
공동	2	철도교량 단부 콘크리트케 도 사용성 검토 알고리즘 개발	2-1	철도교량 단부 콘크리트케도 사용성 검토 알고리즘 설계	①	실내모형시 험 수치해석	1	1	수치해석 결과값 제시	보고서	5	특허: 출원 <u> </u> 건 등록 <u> </u> 건 논문: <u> </u> 건 시제품: <u> </u> 건 SW: <u> </u> 건	
					②	알고리즘 설계	1	1	알고리즘 제시	보고서	10		
			2-2	철도교량 단부 콘크리트케도 사용성 검토 알고리즘 개발	①	실내시험 수치해석	1	1	수치해석 결과값 제시	보고서	5		
					②	알고리즘 개발	1	1	알고리즘 제시	보고서	12		
공동	3	철도교량 단부 콘크리트케 도 사용성 검토 프로그램 개발	3-1	철도교량 단부 콘크리트케도 사용성 검토 프로그램 설계	①	목표성능 설정	1	1	목표치 제시	보고서	10	특허: 출원 <u> </u> 건 등록 <u> </u> 건 논문: <u> </u> 건 시제품: <u> </u> 건 SW: <u> </u> 건	
					②	프로그램 설계	1	1	특허출원	출원서	10		
			3-2	철도교량 단부 콘크리트케도 사용성 검토 프로그램 개발	①	프로그램 개발	1	1	특허등록	등록증	13		
계											100	특허: 출원 <u> </u> 건 등록 <u> </u> 건 논문: <u> </u> 건 시제품: <u> </u> 건 SW: <u> </u> 건	

성과지표	성과 목표	달성
SCI(E)급 학술지 게재(2점)	1건	2건
일반학술지게재(1점)	1건	-
특허출원(1점)	1건	2건
특허등록(2점)	1건	2건
소프트웨어(1점)	1건	2건
기타(1점)		
소계(점수)	7점	12점

구 분	초 과 달 성 내 용	비고
논문발표	국내학술대회 논문발표 - 목표치: 0건 / 달성치: 3건	
분야별 인력양성	분야별 인력양성 - 목표치: 석사 0명 / 달성치: 석사 1명	

가. 철도교량 단부 콘크리트궤도 사용성 검토 설계기법 개발

- 철도교량 단부 콘크리트궤도 사용성 검토를 주요 영향인자에 대한 보정방법(레일체결장치의 비선형 거동특성 고려)을 제시 함

표 61 단부사용성 검토 시 하중조건에 따른 레일체결장치 수직강성의 적용방법 제안(안)

구분	작용력	부분 안전 계수 γ_F	[KR C-08090] 레일체결장치 수직강성		[제안(안)] 레일체결장치 수직강성	
			상향력 검토	압축력 검토	상향력 검토	압축력 검토
정적	자중 + 잔류 크리프 및 건조수축 (궤도 부설 이후)	1.0	k_{stat}	k_{stat}	$k_{stat}^{1)}$	$k_{stat}^{3)}$
	교량 상부구조 상·하면 온도차	1.0				
	교각 잔류 부등침하	1.0				
	레일-교량 상부구조 온도차에 의한 교각 상부 회전	1.0				
	교각 전·후면 온도차에 의한 교각 상부 회전	1.0				
동적	열차 수직하중	1.3	k_{dyn}		$k_{dyn}^{2)}$	
	시 · 제동하중에 의한 교각 상부 회전	1.0				
	축하중에 의한 직접 작용력	1.3				

- 1) 압축-레일체결장치 정적수직강성값 적용, 부상-레일체결장치 이상화된 Bi-linear 모델 적용
 2) 압축-레일체결장치 동적수직강성값 적용, 부상-레일체결장치 이상화된 Bi-linear 모델 적용
 3) 압축력 검토 시에는 레일체결장치의 정적 수직강성값을 적용

표 62 단부 사용성 검토 시 레일체결장치의 정/동적 수직강성값 적용방법 제안(안)

구 분		Compression	Uplift		
			K ₁	K ₂	K ₃
KR형 레일체결장치	Range (mm)	≤ 0.0	0.0~1.0	1.0~2.5	2.5 ≤
	Stiffness (kN/mm)	작용력에 따른 정/ 동적 수직강성값	12.8	6.7	1.7
System 300-1 (SKL15)	Range (mm)	≤ 0.0	0.0~1.0	1.0~6.3	6.3 ≤
	Stiffness (kN/mm)	작용력에 따른 정/ 동적 수직강성값	17.5	1.4	1.4
System 300-1 (SKL15B)	Range (mm)	≤ 0.0	0.0~0.8	0.8~3.8	3.8 ≤
	Stiffness (kN/mm)	작용력에 따른 정/ 동적 수직강성값	13.4	0.7	0.7
특수레일체결장치 (ERL, SKL12)	Range (mm)	≤ 0.0	0.0~0.4	0.4~1.0	1.0 ≤
	Stiffness (kN/mm)	작용력에 따른 정/ 동적 수직강성값	57.5	3.2	3.2
SFC (SFC1501)	Range (mm)	≤ 0.0	0.0~1.1	1.1~5.7	5.7 ≤
	Stiffness (kN/mm)	작용력에 따른 정/ 동적 수직강성값	15.8	1.5	4.1

- 철도교량 단부 콘크리트케도 사용성 검토를 위한 복잡한 기존 설계기법(KR C-08090)을 대체할 수 있는 비선형해석방법을 제시 함

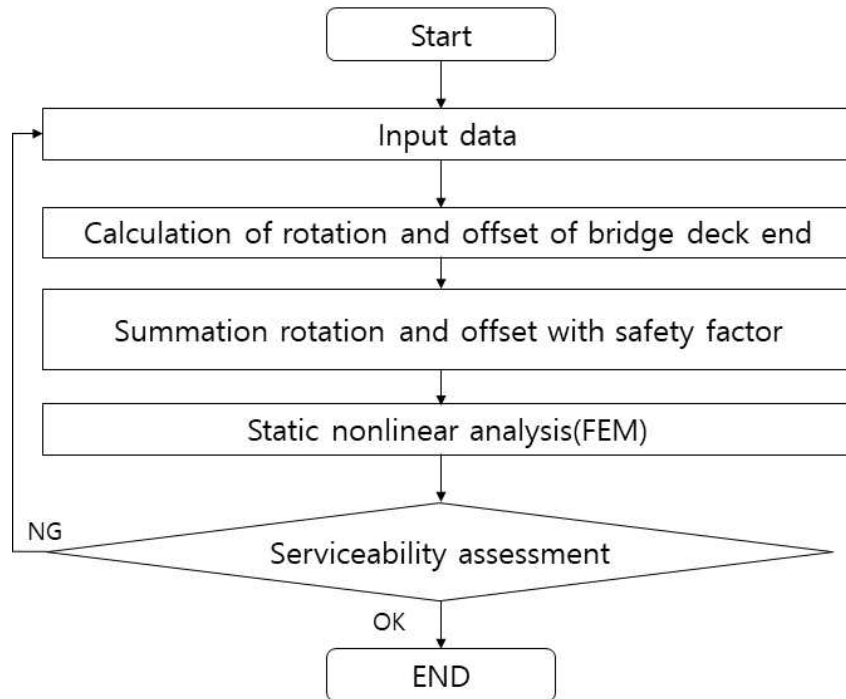


그림 278 제안된 비선형해석방법에 의한 단부 사용성 검토 절차

나. 철도교량 단부 콘크리트케도 사용성 검토 알고리즘 개발

- 유한요소법을 기초로 한 Matlab 기반의 알고리즘 설계 및 검증을 통한 알고리즘 개발 완료

다. 철도교량 단부 콘크리트케도 사용성 검토 프로그램 개발

- 철도교량 단부 콘크리트케도 사용성 검토를 위한 GUI기반의 전용 프로그램 개발 완료

3-2. 관련 분야 기여도

가. 주요연구성과

(1) 학술적 성과

○ 논문게재 성과

게재 년월	논문명	저자			학술지명	Vol.(No.)	국내외 구분	SCI구분
		주저자	교신 저자	공동 저자				
2018. 11.	Nonlinear analysis method for serviceability investigation of bridge deck ends with a concrete slab track	성덕룡			Advances in Civil Engineering	Vol.2018 Article ID 6075686	국외	SCIE (IF:0.827)
2018. 01.	Experimental study of effects of track systems on static and dynamic behavior of railway bridges	성덕룡	한성천		Advances in Structural Engineering	Vol.21 No.2	국외	SCIE (IF:0.968)



Research Paper

Experimental study of effects of track systems on static and dynamic behavior of railway bridges

Deok-Yong Sung and Sung-Cheon Han

Abstract

The characteristic exposure of railway bridges to periodic live loads makes an understanding of their dynamic behavior important to their design and construction. This, together with the fact that the behavior of a railway bridge is affected by its track system, has prompted our study of the static and dynamic properties of such bridges. The deflection and stress due to the bending moment were measured, and the location of the neutral axis of each section, the natural frequency, and the damping ratio were analyzed for three systems: girder only, ballast track, and concrete track with various stiffnesses of resilient pad of rail fastening system. Compared to the ballast track, the concrete track extended the location of the neutral axis of the structure by about 65% in the upward direction. Moreover, the dynamic responses of the structure linearly increased with the maximum load and dramatically increased with the load amplitude during resonance. However, the damping ratio was the same with and without a track system. These results confirm the importance of a track system on the essential behavior of railway bridges, especially when a concrete track system is used.

Keywords

ballast track, concrete track, dynamic behavior, experimental study, railway bridges

Introduction

Unlike a highway bridge, the dynamic load of passing trains on a railway bridge is transmitted through the track, and the dynamic response of the bridge varies with the dynamic behavior properties of the track system. Hence, the economic and reliable construction of a railway bridge requires the precise analysis of its dynamic performance at the design stage. However, considering the difficulty of reasonable modeling for the track, it is considered as second dead load in the design and the evaluation of the dynamic stability of the bridge.

In the case of a ballast track, it is quite difficult to consider the stiffness during the design, as it is dramatically altered by the ballast condition and compaction. In Japan, a 200 kN/mm of ballast stiffness is adopted in the design of ballast tracks, regardless of the ballast thickness. However, it is difficult to maintain the applied stiffness of the ballast track in railway bridge design due to the loss of elasticity that accompanies the plastic deformation of ballast caused by repeated train loading. All these affect the magnitude of the load transmitted to the railway bridge (Korea Rail Network Authority, 2008). It was experimentally proved that a ballast track not only affected the

stiffness of the bridge, but also the mass. They conducted static and dynamic tests on a ballast track to accurately analyze its dynamic behavior (Kim, 2011).

The regulation of the dynamic performance of a railway bridge should be done on the basis of precise analysis (European Committee for Standardization, 2003; Fryba, 1972; International Union of Railway, 2001; Kim et al., 2010; Kwak et al., 2004; Ministerio de Fomento, 2006; SYSTRA, 1995; Yang et al., 1997). In other words, exact representations of the stiffness, mass, and damping ratios of the bridge are imperative. It has been observed that the stiffness of the structure can be increased by 14%–23% by the track system (European Rail Research Institute, 1999). The actual measured natural frequency of railway bridges tends to be higher than the designed one. The rigidity of actual structures does not fall below the designed value and

Department of Civil & Railroad Engineering, Daewon University College, Jecheon, Republic of Korea

Corresponding author:
Sung-Cheon Han, Department of Civil & Railroad Engineering, Daewon University College, 316 Daehak-ro, Jecheon, Chungbuk 27133, Republic of Korea.
Email: scy11@daewon.ac.kr

Manuscript
Advances in Civil Engineering
Volume 2018, Article ID 6075686, 7 pages
https://doi.org/10.1155/2018/6075686



Research Article

Nonlinear Analysis Method for Serviceability Investigation of Bridge Deck Ends with a Concrete Slab Track

Deokyoung Sung

Department of Civil & Railroad Engineering, Daewon University College, 316 Daehak-ro, Jecheon, Chungbuk 27133, Republic of Korea

Correspondence should be addressed to Deokyoung Sung; dsung@daewon.ac.kr

Received 11 April 2018; Revised 30 July 2018; Accepted 2 August 2018; Published 15 November 2018

Academic Editor: Eric Lai

Copyright © 2018 Deokyoung Sung. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

In this study, a nonlinear analysis method was proposed to evaluate the serviceability review of a rail fastening system on concrete slab track at railway bridge ends. The serviceability review of the end deck is time-consuming in that it is necessary to calculate the force of fasteners, also, the design is complex because of the many girders, fasteners, and loads. In addition, there is also a case in which a special, expensive fastening device is installed because the stiffness of the rail fastening device is assumed to be linear, and excessive design results are produced by the linear analysis method. In this study, a clamping force test of the fastening system was performed to confirm the real stiffness and the force versus displacement relationship. The test results were applied in the conventional linear analysis method and the proposed nonlinear analysis method to a railway bridge model specimen with concrete slab track. The results of the nonlinear analysis method considering the nonlinear stiffness of the rail fastening system through the clamping force test confirmed that the uplift force acting on the rail fastener was considerably reduced compared with that in the linear analysis method.

1. Introduction

Use of concrete slab track has been increasing worldwide in attempts to reduce the cost of track maintenance and ensure a stable ride. A railway bridge with a concrete slab track is separated from a protective concrete layer (PCL) and track concrete layer (TCL) by an intermediate layer, but the behaviors of the longitudinal and lateral directions are constrained due to the cam plate. In high-speed lines fitted with slab track, the bridge ends are of special importance because of problems created by displacement and rotation, as well as extreme forces in the rail fastenings that may develop in this area [1, 2]. The rotation of the bridge deck end enforces a curvature of the track in the transition area to the abutment and at the expansion joints on the piers, which additionally stresses the superstructure in these areas [3]. These additional stresses are called uplift force and compression force and can cause breakage of the fastener clip and plastic deformation of the elastic pad in the rail fastening system of the bridge end, thereby increasing the maintenance cost. The

concrete slab track serviceability review of a railway bridge deck end is classified as rotation and vertical displacement to deformation of the superstructure caused by various loading conditions. The force generated at the rail support point and the rail should be within the range of the initial fastening force of the rail fastener and the plastic deformation limit of the elastic pad [3, 4]. Park et al. [5] analyzed the factors influencing the serviceability of the concrete slab track rail fastening system during bridge end rotation and used parameter analysis to determine the influence degrees. Many studies considering track-bridge interaction have been performed to evaluate the serviceability at a railway bridge deck end [6–8]. Choi [9] used a continuous support model and a discrete support model to analyze the influence of rail support point spacing and rail fastener stiffness on the force acting on the rail support [10–12]. Choi [13], using the unequal space discrete supported beam model, performed an analysis of rail support point force according to the deformation of the bridge end rail support points and the distance between the bridge support and the last rail support.

○ 논문발표 성과

발표일	논문명	저자	학술대회명	국내외 구분
2018.10.18.	Nonlinear analysis on rail fastening system in concrete track on railway bridge end	장성규, 성덕룡, 이성우, 류상만	The 2nd Asian Conference on Railway Infrastructure and Transportation	국외
2018.04.19.	철도교량 단부 콘크리트궤도 사용성 검토 비선형 해석법에 대한 소고	장성규, 이창주, 성덕룡, 이성우, 김두기	한국구조물진단유지관리 공학회 2018년 춘계학술대회	국내
2018.04.19.	체결력을 고려한 레일체결장치의 비선형 거동 효과	NguyenVan Dong, 이창주, 백건휘, 장성규, 김두기	한국구조물진단유지관리 공학회 2018년 춘계학술대회	국내



ART 2018

October 17-19, 2018
Ramada Plaza Jeju Hotel, Jeju, Korea

Nonlinear Analysis on Rail Fastening System in Concrete Track on Railway Bridge End

Seongkyu Chang¹, Deokyoung Sung², Sung-Woo Lee³, Sang-Man Ryu⁴

¹ Academic-Industry Cooperation Foundation, Kunsan National University, 558 Daehak-ro, Kunsan, Jeonbuk, 54150, Korea, s9752033@kunsan.ac.kr
² Department of Civil & Railroad Engineering, Daewon University College, 316 Daehak-ro, Jecheon, Chung-Buk, 27153, Korea, deukyoung@naver.com
³ Giotech Co. LTD, 30, Digital-ro 32-gil, Guro-gu, Seoul, Korea, lsw@giotechsoft.com
⁴ Giotech Co. LTD, 30, Digital-ro 32-gil, Guro-gu, Seoul, Korea, rsm@giotechsoft.com

ABSTRACT

In this study, a nonlinear analysis method was proposed to investigate serviceability of rail fastening system in concrete track on railway bridge end. The serviceability investigation method of the fastening system in concrete track is time consuming and is complex for design because of many decks and fastening systems. In addition, there is also a case where an expensive special fastening device is installed due to the stiffness of the rail fastening device assumed to be linear and the excessive design result by the linear analysis method. Therefore, in this study, the clamping force test was performed to confirm the nonlinearity of fastener. The conventional linear analysis method and the proposed nonlinear analysis method were performed for the railway bridge model specimen with concrete tracks, and the uplift forces acting on the fastening systems were compared and analyzed.

제22권 1호 (총권 419)

한국구조물진단유지관리공학회 2018년 봄 학술발표회 논문집

철도교량 단부 콘크리트 궤도 사용성 검토 비선형 해석법에 대한 소고

Some Thoughts on the Nonlinear Analysis Method for the Concrete Track Serviceability Review in Railway Bridge Deck Ends

장성규*, 이창주**, 성덕룡***, 이성우****, 김두기*****
 Chang, Seong Kyu, Lee, Chang Ju, Sung, Deok Yong, Lee, Sung Woo, Kim, Doo Kie

Abstract

In this study, a nonlinear analysis method was proposed to investigate serviceability of rail fastening system in concrete track at the railway bridge end. The serviceability investigation method of the fastening system in concrete track is time consuming and is complex in design because of the many decks and fastening systems. In addition, there is also a case where an expensive special fastening device is installed due to the stiffness of the rail fastening device assumed to be linear and the excessive design result by the linear analysis method. Therefore, in this study, the clamping force test was performed to confirm the nonlinearity of fastener. The conventional linear analysis method and the proposed nonlinear analysis method were performed for the railway bridge model specimen with concrete tracks, and the uplift forces acting on the fastening systems were compared and analyzed.

1. 서 론

철도 교량 단부 콘크리트궤도의 사용성 검토는 다양한 하중 조건에 의해 발생하는 교량 상부구조의 변형을 단차와 회전으로 구분하고, 레일 지지 및 레일에서 발생하는 작용력이 레일체결구 초기체결력 및 탈선회전 소성변형 한계 범위 내에 있도록 하고 있다^[1]. 철도 교량 단부 콘크리트궤도의 사용성 검토는 DS 804 및 교량단부 콘크리트궤도 사용성 검토를 준용하여 설계하고 있으며, 단위하중에 의한 레일 체결장치에서 작용하는 하중과 단부에서 발생하는 하중을 중첩하여 레일 체결장치의 사용성을 검토하고 있다. 최근 체결장치의 수직 하중 시험을 통한 체결장치의 비선형 모델을 제시하고, 교량 단부 체결장치에 작용하는 상향력을 선형모델과 비선형 모델에 대한 비교 연구가 수행되었다^[2]. 본 논문에서는 체결장치의 비선형 거동 특성을 반영한 철도 교량 단부 콘크리트궤도의 사용성 검토 방법을 제안하고자 한다.

2. 해석 방법

본 논문에서는 레일 체결장치의 비선형 거동 특성을 반영한 철도 교량 단부 콘크리트궤도의

* 공산대학교 산업철학원 공학박사
 ** 공산대학교 토목공학과 석사과정
 *** 공산대학교 철도건설과 교수
 **** (주) 공로텍 공동대표
 ***** 공산대학교 공산철학과 교수

체결력을 고려한 레일 체결장치의 비선형 거동 효과

The Effect of Nonlinear Behavior of the Rail Fastening System on the Clamping Forces in the Railway Bridge

구엔 반동*, 이창주**, 백건휘***, 장성규****, 김두기*****
 NguyenVan Dong, Lee Chang Ju, Baek Geon Hwi, Chang Seong Kyu, Kim Doo Kie

Abstract

The mechanical behavior of the fastening system on the clamping forces has not been fully studied because of structural complexity. The goal of this research is studying the effect of nonlinear of the rail fastening system on the clamping forces in the railway bridges. A numerical model is proposed to analyze the problem of fasteners. The model is conducted by using a code in FORTRAN. In this study, fasteners are modelled as springs. The calculated results show a good agreement with values referred from manufacturer. As a result, the numerical simulation is believed to indicate an approximate value of clamping force considering the nonlinear behavior of fastening system.

1. Introduction

Rail fasteners also known as fastening systems are used in railway track structure to fasten the rails to the sleepers and to protect the rail from inadmissible vertical, lateral, and longitudinal movements (Sadeghi, J., and Barati, P. 2010). In addition, the fastening system are used for gauge restraining, wheel load impact attenuation, increasing track elasticity. Rail fastening system fixes rail to sleeper by tensioning rail through spring-actuation as a result of the long elastic spring deflection of the tension clamp (Li, Q. T. et al. 2017). The tension clamps combine exceptional clamping force, superior dynamic fatigue strength and stable creep resistance all in one. Clamping force of rail fastener is an essential parameter relevant to the safety of railway track structure.

In this study, the effect of nonlinear behavior of the rail fastening system on the clamping forces in the railway bridge is considered.

2. Numerical model

The model of fastening system is explained through numerical analysis conducted by a code in FORTRAN. In this code the nonlinear properties of fastener are observed from the relationship between clamping force and the lateral displacement response of track (Fig. 1).

* 공산대학교 토목공학과 박사과정
 ** 공산대학교 토목공학과 석사과정
 *** 공산대학교 토목공학과 석사과정
 **** 공산대학교 산업철학원 공학박사
 ***** 공산대학교 공산철학과 교수

○ 인력양성 성과

지원 총인원	지원 대상 (학위별, 취득자)				성별		지역별		
	박사	석사	학사	기타	남	여	수도권	대전	기타지역
1		1			1				1

제 00122 호

학 위 수 여 증 명 서

성 명 이창주
 생 년 월 일 1979년 12월 10일
 대 학 원 대학원석사 (석사과정)
 학 과 토목환경공학부
 전 공 토목공학
 입 학 년 월 일 2006년 3월 1일
 학위수여년월일 2018년 8월 21일
 학 위 종 별 공학석사
 학위 등록 번호 군산대2017(석)141

위 의 사 실 을 증 명 합 니 다.

2019 년 1 월 9 일

군 산 대 학 교 총



* 본 증명서는 자동발급기에서 발급된 증명



저자 : 이창주

학위명 : 공학석사

대학원 : 군산대학교 토목환경공학부

(토목공학 전공)

학위논문명 : 유한요소법을 사용한 철도교량

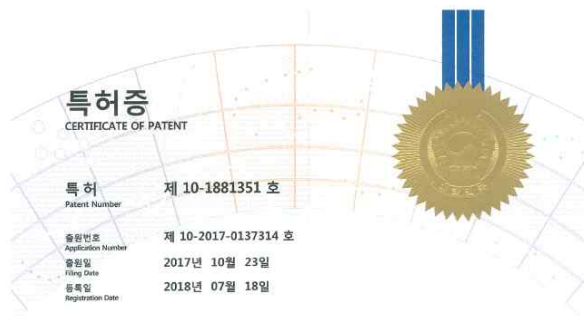
단부 콘크리트궤도의 사용성 평가

학위수여년월일 : 2018년 8월 21일

(2) 기술적 성과

○ 특허 출원 및 등록

	특허번호	출원일	등록일	발명의 명칭	특허권자	발명자	비고
1	제10-1881351호	2017.10.23.	2018.07.18.	철도교량 단부 콘크리트궤도 사용성 연산 시스템 및 방법	(주)글로텍, 대원대학교 산학협력단	황희석, 성덕룡, 장성규, 김두기	
2	제10-1881349호	2018.02.28.	2018.07.18.	레일체결장치의 비선형 거동특성을 고려한 철도교량단부 콘크리트궤도 사용성 연산 시스템 및 방법	(주)글로텍, 대원대학교 산학협력단	황희석, 성덕룡, 장성규, 김두기	

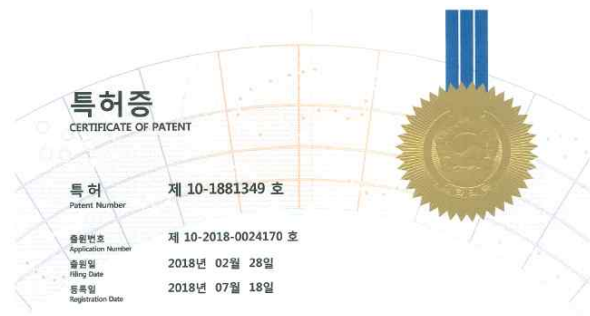
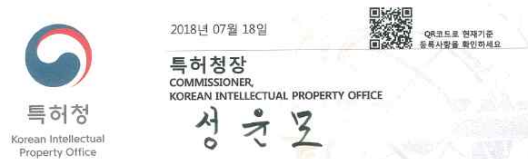


발명의 명칭 Title of the Invention
철도교량 단부 콘크리트궤도 사용성 연산 시스템 및 방법

특허권자 Patentee
등록사항란에 기재

발명자 Inventor
등록사항란에 기재

위의 발명은 「특허법」에 따라 특허등록원부에 등록되었음을 증명합니다.
This is to certify that, in accordance with the Patent Act, a patent for the invention
has been registered at the Korean Intellectual Property Office.

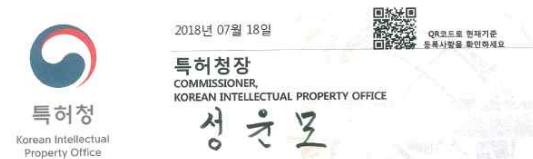


발명의 명칭 Title of the Invention
레일체결장치의 비선형 거동특성을 고려한 철도교량단부 콘크리트궤도 사용성 연산 시스템 및 방법

특허권자 Patentee
등록사항란에 기재

발명자 Inventor
등록사항란에 기재

위의 발명은 「특허법」에 따라 특허등록원부에 등록되었음을 증명합니다.
This is to certify that, in accordance with the Patent Act, a patent for the invention
has been registered at the Korean Intellectual Property Office.



○ 소프트웨어 등록

	등록번호	창작 년월일	등록 연월일	저작물의 명칭	등록권리자	비고
1	제C-2018-028381호	2018.09.17.	2018.10.23.	콘크리트케도가 부설된 철도교량 단부의 사용성 분석 프로그램	군산대학교 산학협력단, 대원대학교 산학협력단	
2	제C-2018-021867호	2018.02.28.	2018.08.23.	철도교량 단부 콘크리트케도 단부 사용성 검토 프로그램 (RailLoad Analysis Program 1.0)	(주)글로벌텍	



(3) 실용적 성과

○ 본 연구를 통한 실용적 성과는 다음과 같음

- 본 연구를 통한 비선형해석방법 도출 및 이에 대한 신뢰성 검증
- 본 연구를 통한 철도교량 단부 콘크리트궤도 사용성 검토에 영향을 미치는 주요 인자 중 레일체결장치의 수직강성(비선형거동특성)에 대한 적용 방안 수립
- 본 연구를 통한 기존 설계기법(KR C-08090)을 적용한 철도교량 단부 콘크리트궤도 사용성 검토 전용 프로그램 개발
- 장대레일 축력검토 프로그램과 연계할 수 있는 기초원천 기술 확보

○ 본 연구에서 개발된 철도교량 단부 콘크리트궤도 사용성 검토를 위한 비선형해석방법은 기존 설계기법(KR C-08090)과 비교하여 다음과 같은 실용적 성과가 있음

- 검토과정의 단순화를 통한 검토시간 단축 및 설계오류 최소화
- 신뢰성 있는 해석결과 값 도출을 통한 과학적이고 합리적인 설계 가능
- 기존 설계기법에 의한 결과 값 대비 약 30%이상 저감된 결과 값 도출로 철도교량 단부 콘크리트궤도에 사용되는 고가의 특수 레일체결장치(ERL, ZLR) 및 궤도구조(횡단궤도시스템) 사용 최소화를 통한 철도교량 건설비 저감 효과

4. 연구개발성과의 활용 계획 등

가. 연구개발성과 활용 계획

- 콘크리트궤도가 부설된 도시철도, 일반철도 및 고속철도 교량상 단부 콘크리트궤도의 사용성 및 안정성 확보방안으로 활용
- 철도교량의 장대화 및 연속화 등과 같은 다양하고 진보적인 철도교량계획 및 설계시 궤도-교량인터페이스 문제에 대한 직접적이고 실용적인 기술적 솔루션으로 활용
- 철도교량 단부 사용성 검토를 위한 용역, 프로그램 판매 및 임차 등을 통한 수익창출
- 장대레일 축력검토 프로그램과 연계할 수 있는 기초원천 기술 확보

나. 추가연구 필요성

- 본 연구에서 개발된 철도교량 단부 콘크리트궤도 사용성 검토 설계기법 및 프로그램에 대하여 최종적인 실 구조물 대상 실내시험 및 현장 검증이 필요함
 - 철도교량 설계에서 검토되는 정적, 동적 작용력들의 적용여부에 검토가 필요
 - 실 철도교량을 대상으로 한 현장 검증이 필요
- 철도교량 설계기준(KR C-08070, 08080, 08090)의 일원화된 통합솔루션 수립 필요
 - 현재 국내 철도설계기준에서는 철도교량 주행안전성 및 승차감 검토(KR C-08070), 궤도/교량 종방향 상호작용해석(KR C-08080), 철도교량 단부 콘크리트궤도 사용성 검토(KR C-08090)가 구분되어 이루어지도록 되어 있으며, 이는 설계 이원화로 인한 건설비 증가, 설계오류 발생률 증가, 별도의 소프트웨어(구조해석프로그램) 필요 등 많은 문제점을 가지고 있음
 - 철도교량 설계 시 동적거동에 대한 검토가 별도로 이루어지고 있으며, 철도교량 단부 콘크리트궤도 사용성 검토 시 별도의 구조해석프로그램을 통한 궤도/교량 상호작용해석 결과값을 입력값으로 활용해야하는 번거로움이 있음
- BIM 기술과의 연계 프로그램 필요
 - 최근 토목설계 및 철도설계에 BIM 기술이 적용되고 있으며, 향후 계속적으로 확대될 것으로 판단됨
 - 철도교량 설계 시 BIM 기술이 적용된다면, 구조물 정보를 포함하는 3차원 모델링 기술을 구조해석과 연계하여 일원화된 설계과정을 통해 설계시간 단축 및 건설비 저감 효과가 기대됨
- 따라서 다음과 같은 추가연구를 제안하고자 함
 - BIM기반 철도교량 설계 통합솔루션 기술 개발

[붙임] 참고문헌

- (1) 장승엽 외 2인 (2007) 궤도-교량 상호작용을 고려한 콘크리트 슬래브궤도 부설 교량의 단부 사용성 검토, 2007 한국철도학회 춘계학술대회 논문집, pp.126-132.
- (2) 성덕룡 외 3인 (2008) 콘크리트궤도 부설 교량의 단부 사용성 검토를 위한 매개변수 연구, 2008 한국철도학회 추계학술대회 논문집, pp.117-124.
- (3) 박흥기 외 3인 (2009) 철도교 콘크리트 슬래브궤도의 사용성에 관한 매개변수 영향 연구, 한국철도학회논문집, 제12권 제1호, pp.95-103.
- (4) 이국환 외 3인 (2012) 철도교량 단부 궤도의 성능개선을 위한 횡단궤도시스템의 적용에 대한 연구, 2012 한국철도학회 추계학술대회 논문집, pp.1342-1352.
- (5) 이상승 (2013) 반복하중 재하실험을 통한 모듈러 슬래브 교량의 횡방향 연결부 사용성 검토, 성균관대학교 석사학위논문.
- (6) 임종일 외 3인 (2013) 철도교량 단부 회전에 따른 콘크리트 궤도의 변형특성에 관한 실험적 연구, 한국철도학회논문집 제16권 제3호, pp.217-225.
- (7) 조가영 외 4인 (2013) 철도교량 단부 전환부궤도의 피로거동에 관한 연구, 2013 한국철도학회 춘계학술대회 논문집, pp.1424-1429.
- (8) 최준혁 (2013) 콘크리트 슬래브 궤도 교량의 사용성 검토를 위한 레일 지지점에서의 작용력 해석, 대한토목학회논문집 제33권 제4호, pp.1303-1313.
- (9) 임종일 외 3인 (2013) 철도교량 단부 궤도의 사용성 향상을 위한 횡단궤도시스템 적용에 관한 실험적 연구, 한국철도학회논문집 제16권 제3호, pp.207-213.
- (10) 김광우 외 4인 (2013) 전환부궤도시스템의 거동특성에 관한 연구, 2013 한국철도학회 추계학술대회 논문집, pp.1430-1435.
- (11) 최준혁 (2014) 교량-궤도 작용력에 대한 교량 단부에서의 레일지지점간격의 영향, 한국철도학회논문집 제17권 제4호, pp.245-250.
- (12) 이광도 외 3인 (2014) 철도교량 단부 전환부 궤도시스템의 구조적 거동특성 및 장기 내구성능 분석, 한국철도학회논문집 제17권 제4호, pp.260-269.
- (13) 윤경민 외 5인 (2015) 교량 단부 콘크리트 궤도 사용성 검토용 해석법에 대한 소고, 2015 한국철도학회 춘계학술대회 논문집, pp.1175-1181.
- (14) KR C-08090 (2014) 교량단부 콘크리트궤도 사용성 검토, 한국철도시설공단.
- (15) KR C-08080 (2014) 궤도-교량 종방향 상호작용 해석, 한국철도시설공단.

- (16) Deutsche Bahn AG, DS804 Appendix 29: Bridge deck ends, check for serviceability limit state of superstructure. Regulation for Railway Bridges and other Civil Constructions. Berlin: Deutsche Bahn AG, 2008.
- (17) 양신추 외 2인 (2017) 레일체결장치 비선형 거동을 고려한 교량 단부에서의 레일체결장치 상향력 평가, 한국철도학회논문집 제20권 제4호, pp.521-528.
- (18) 성덕룡 (2018) Nonlinear Analysis Method for Serviceability Investigation of Bridge Deck Ends with a Concrete Slab Track, Advances in Civil Engineering, Vol.2018, pp.1-9.
- (19) Moelter, T., (2004) Bridges for High-Speed Railways: Closed and open joints for bridges on high speed lines, New York: Taylor & Francis.
- (20) Chen, Z., Andrawes, B., & Edwards J.R. (2015) Finite element modelling and field validation of prestressed concrete sleepers and fastening systems. Structure and Infrastructure Engineering, vol.12, no.5, pp.631-646.
- (21) Ruge, P., and Birk, C. (2007) Longitudinal forces in continuously welded rails on bridge decks due to nonlinear track-bridge interaction. Computers and Structures, vol.85, pp.458-475.
- (22) Schanack, F., Ramos, O.R., Reyes, J.P., and Pantaleon, M.J. (2014) Relative Displacement Method for Track-Structure Interaction. The Scientific World Journal, vol.2014, Article ID 397515.
- (23) Ryjacek, P., Howlader, M., Vokac, M., Stollenwerk, B., and Ondovcak, P. (2016) The rail-bridge interaction - recent advances with ERS fastening system for steel bridges. Transportation Research Procedia, vol.14, pp.3972-3981.
- (24) Esveld, C. (2001) Modern Railway Track,” 2nd ed., MRT Productions, Zaltbommel, ISBN: 90-800324-3-3.
- (25) Kerr A.D. (2003) Fundamentals of Railway Track Engineering. Simmons-Boardman Books, 2003.
- (26) Lichtberger B (2011) Track compendium: Track System, Substructure, Maintenance, Economics. Hamburg: Eurail Press.
- (26) Sung, D.Y., and Han, S.C. (2017) Experimental study of effects of track systems on static and dynamic behavior of railway bridges. Advances in Structural Engineering, vol.21, no.2, pp.214-226.

- (27) Turek, J. (2007) Non-linear Response of the Track,” *Vehicle System Dynamics*, vol.24, no.1, pp.265-279.
- (28) Yang, S.C., and Jang, S.Y. (2016) Track-bridge interaction analysis using interface elements adaptive to various loading cases. *Journal of bridge engineering*, vol.21, no9, pp.131-141.
- (29) Korean Railway Standards (2009) KRS TR 0014-15R. Rail Fastening System. Korea Railroad Research Institute.
- (30) British Standards (2012) BS EN 13146-7. Railway Applications-Track, Test methods for fastening systems, Part 7: Determination of clamping force. British Standards Institution.
- (31) Yun, K.M., Park, B.H., Min, K.H., and Lim, NH. (2016) Experimental Study of Characteristics of Longitudinal Resistance Behavior of Fasteners in Concrete Track on Bridges. *Journal of the Korean Society for Railway*, vol.19, no.5, pp.638-646.

주 의

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