보안 과제( ), 일반 과제(○) / 공개(○), 비공개( ) 발간등록번호(11-1613602-000010-01)
철도기술연구사업 최종보고서

R&D / 20RTRP-C146000

도시경관 친화형 경전철 고가구조물 설계기술 개발 최종보고서

2021. 3.

주관연구기관 / 한국철도기술연구원
위탁연구기관 / 가천대학교
부경대학교
지에스건설㈜
㈜우성디앤씨

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통부 장관 귀하

‘도시경관 친화형 경전철 고가구조물 설계기술 개발’(연구개발 기간 : 2018. 04. ~ 2020. 12.) 과제의 최종보고서를 제출합니다.

2021. 3. .

주관연구기관명 : 한국철도기술연구원 나희승
위탁연구기관명 : 가천대학교 산학협력단 황보택근
부경대학교 산학협력단 서용철
지에스건설㈜ 임병용
㈜우성디앤씨 정 훈

주관연구기관책임자: 신정열 책임연구원
위탁연구기관책임자: 백인열 교수
이진호 교수
김도학 책임연구원
박영빈 부사장

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	20RTRP-C146000-03	해당 단계 연구 기간	2018. 04. 01. - 2020. 12. 31.	단계구분	1/1
연구사업명	중사업명	철도기술연구사업			
	세부사업명	-			
연구과제명	대과제명	-			
	세부과제명	도시경관 친화형 경전철 고가구조물 설계기술 개발			
연구책임자	신정열	해당단계 참여연구원 수	총: 82 명 내부: 20 명 외부: 62 명	해당단계 연구비	정부:4,304,000천원 민간: 천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계:4,304,000천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 82 명 내부: 20 명 외부: 62 명	총 연구비	정부:4,304,000천원 민간: 천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계:4,304,000천원
연구기관명 및 소속 부서명	한국철도기술연구원 첨단궤도토목본부			참여기업명	
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위탁연구	연구기관명: 가천대학교, 부경대학교, 지에스건설㈜ , ㈜우성디앤씨			연구책임자: 백인열 교수, 이진호 교수, 김도학 책임, 박영빈 부사장	

※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 갈음

연구개발성과의 보안등급 및 사유	일반

9대 성과 등록·기탁번호

구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설·장비	기술요약 정보	소프트웨어	화합물	생명자원		신품종	
								생명정보	생물자원	정보	실물
등록·기탁번호	Y	Y	Y	N	Y	N	N	N	N	N	N

국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황

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

요약(연구개발성과를 중심으로 개조식으로 작성하되, 500자 이내로 작성합니다) | 보고서 면수: 263면

○ 연구개발목표: 도시경관을 해치는 기존 경전철 고가구조물이 도시미관을 고려하고 보다 효율적으로 건설될 수 있도록, 도시친화적이면서도 경제적이고 안전한 경전철 고가구조물 설계기술 개발
- 한계상태설계법 기반 경전철 고가구조물 설계기준(안) 연구
- 도시친화형 신형식 경전철 고가구조(최장경간 200m) 및 설계기법 개발

○ 한계상태설계법 기반의 경전철 고가구조물 설계기준(안) 연구
- 경전철 차종별 실차주행 계측시험을 통한 고가구조물 주요설계요소(충격계수, 연직처짐, 횡하중, 시제동하중)별 설계하중 기준(안) 연구
- 경전철 고가구조물 신뢰성 분석을 통한 목표신뢰도지수 및 하중저항계수 선정, 설계하중조합 연구를 통한 한계상태설계법 기반의 경전철 고가구조물 설계기준(안) 연구

○ 도시친화형 신형식 경전철 고가구조(최장경간 200m) 및 설계기법 개발
- 세계 최장경간(최대 200m) 신형식 경전철 고가구조물 개발: 백본-아웃리거 신형식 구조 (승객대피, 탈선/폭설/소음 대비 구조)
- 도시친화형 신형식 경전철 고가구조물 설계검증 및 최적설계기법 개발
- 도시친화형 신형식 경전철 고가구조물 동적 및 내풍 안전성 검증
- 도시친화형 신형식 경전철 고가구조물 상·하부구조 모듈화 방안 및 가설시공계획 정립

요약문

연구의 목적 및 내용	○ 기존 철도교 형식의 육중한 고가(高架)구조로 인한 도시단절·미관훼손·교통혼잡·소음·악천후시 열차운행사고 등의 문제를 해소할 수 있는, “도시친화적이면서도 경제적이고 안전한 경전철 고가구조물 설계기술 개발 - 한계상태설계법 기반 경전철 고가구조물 설계기준(안) 연구 - 도시친화형 신형식 경전철 고가구조(최장경간 200m) 및 설계기법 개발
연구개발성과	○ 경전철 고가구조물 설계기준(한계상태설계법)(안) 작성 - 경량전철 차종별(고무차륜형, 모노레일형, 철제차륜형, LIM형, 자기부상형) 실차주행 계측시험 - 경량전철 활하중 특성 통계 분석을 통한 활하중 기준안 제안 - 열차주행안전 및 승차감 확보 위한 경전철 고가구조물 연직처짐 한계 기준(안) 제안 - 경전철 고가구조물 주요 설계하중(충격하중, 횡하중, 시제동하중) 기준(안) 제안 - 경전철 고가구조물 신뢰성 분석을 통한 목표신뢰도지수 제안 및 검증 - 신뢰도 기반 경량전철 하중 · 저항계수 제안 및 검증 - 신뢰도 기반 경량전철 설계하중조합 제안 - 한계상태설계법 기반의 경전철 고가구조물 설계기준(안) 작성 - 국내외 한계상태설계기준에 따른 설계 비교/분석을 통한 기준 검증 및 효율성 분석 ○ 세계 최장경간(200m, 도심지 기준) 도시친화형 신형식 경전철 고가구조물 설계기술 개발 - 국내외 도시 고가구조물 장경간화 사례 및 가설·시공 사례 조사·분석 - 장경간 구현이 가능한 백본-아웃리거형의 신형식 고가구조 개발 - 도시친화형 신형식 고가구조 개발(승객대피/탈선/폭설/소음 대비 구조) - 도시친화형 신형식 고가구조물의 핵심설계요소(백본, 아웃리거) 개발 및 설계 검증 - 도시친화형 신형식 고가구조물 내진 · 내풍 설계 - 도시친화형 신형식 고가구조물 동해석을 통한 동적안전성 검증 - 도시친화형 신형식 고가구조물 최적 설계기법 개발 - 도시친화형 신형식 고가구조물 상·하부 구조 모듈화 방안 및 가설·시공계획 수립 - 도시친화형 신형식 고가구조물 공사비 검토
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	○ 경전철 고가구조물 설계기준(한계상태설계법)은 향후 지자체별 신규 계획 중인 고가건설방식 경전철 사업에 설계기준으로 적용, 보다 효율적이고 경제적인 구조물 설계 기대 ○ 도시친화형 신형식 경전철 고가구조물 도입으로 도시미관 개선, 도로교통혼잡 가중 해소 및 소음, 악천후시 운행사고 등에 따른 시민불편 해소 기대 ○ 現 41개 노선(621.07㎞) 27조원 규모의 경전철 사업이 계획되어 있으며, 고가화의 경우 지하화 대비 약 400-500억원/㎞ 구축비 절감으로, 현 계획노선의 20%를 고가건설방식으로 전환 시 약 5-6조의 사업비 절감 및 국가재정부담 경감 기대 ○ 세계 최장경간(200m)의 도시친화형 신형식 경전철 고가구조물 설계기술은 후속사업으로 추진 중인 “세계 최장경간(200m) 경전철 고가구조물 실증 사업”을 통해 부산 하단-녹산선, 기장선 등 국내 경전철 신규사업에 신형식 고가구조물 도입 기대 ○ 세계 최장경간(200m) 도시친화형 신형식 경전철 고가구조물 기술 확보로 국내 철도기술 수준 향상 및 이 분야 공백기술 선점을 통한 미래기술 선도 및 철도산업 경쟁력 제고 기대 ○ 국내 경전철 사업의 원활한 추진 및 동남아 등 해외 경전철 시장 진출을 통한 관련 철도산업 발전 기대

국문핵심어 (5개 이내)	경전철	고가구조물	도시친화	도시경관	장대
영문핵심어 (5개 이내)	LRT	Elevated guideway	Urban friendly	Urban aesthetics	Long-span

※ 국문으로 작성(영문 핵심어 제외)

〈 목 차 〉

제1장. 연구개발과제의 개요 ····· 1

1절. 연구개발의 목적 ····· 1

2절. 연구개발의 필요성 ····· 1

3절. 연구개발의 범위 ····· 5

4절. 기술개발에 따른 미래상 ····· 7

제2장. 연구 수행 내용 및 성과 ····· 8

1절. 한계상태설계법 기반 경전철 고가구조물 설계기준 ····· 8

1. 경전철 고가구조물 설계하중 기준 연구 ····· 8

가. 경전철 고가구조물 실차량 주행 계측시험 ····· 8

나. 경량전철 활하중 특성 통계 분석 연구 ····· 30

다. 경전철 고가구조물 설계하중 기준 제안 ····· 47

2. 한계상태설계법 기반의 경전철 고가구조물 설계기준(안) 연구 ····· 94

가. 경량전철 고가구조물 목표신뢰도 지수 선정 ····· 94

나. 신뢰도 기반 경량전철 하중계수 및 저항계수 ····· 96

다. 신뢰도 기반 목표신뢰도지수 및 하중·저항계수 검증 ····· 106

라. 신뢰도 기반 경량전철 설계하중 및 하중조합 제안 ····· 110

마. 기존 설계법과의 설계 비교·분석 ····· 113

바. 한계상태설계법 기반 경전철 고가구조물 설계기준(안) ····· 120

2절. 도시친화형 신형식 경전철 고가구조물 설계기술 ····· 122

1. 도시친화형 경전철 고가구조물 개념 ····· 122

가. 기존 경전철 고가구조물의 문제점 분석(As-Is) ····· 122

나. 도시친화형 경전철 고가구조물 개념(To-Be) ····· 122

2. 도시친화형 신형식 경전철 고가구조 개발 ····· 124

가. 신형식 경전철 고가구조물 ····· 124
나. 신형식 고가구조 설계 검증 ····· 128
다. 차량 주행에 의한 동적 안전성 검토 ····· 145
라. 내진・내풍 안전성 검토 ····· 150
마. 경량 신소재를 이용한 상부구조 경량화 검토 ····· 158
3. 도시친화형 신형식 경전철 고가구조물 최적 설계기법 연구 ····· 172
가. 신형식 경전철 고가구조물 설계 주요 고려사항 ····· 172
나. 구조안전성 및 단면 효율화를 위한 설계 최적화 ····· 172
다. 신형식 구조(백본, 아웃리거, 하부구조) 분담율 검토를 통한 최적 조합 ···· 181
라. 도심지 곡선부 및 주요 경간장 설계 기법 ····· 182
마. 시공단계별 구조안전성 검토 ····· 186
4. 도시친화형 신형식 경전철 고가구조물 모듈화 연구 ····· 198
가. 상부구조 모듈화 및 연결부 검토 ····· 198
나. 하부구조 모듈화 및 연결부 검토 ····· 209
5. 도시친화형 신형식 경전철 고가구조물 가설시공 계획 수립 ····· 214
가. 상부구조 가설시공방안 ····· 214
나. 하부구조 가설시공방안 ····· 235
다. 하부기초 시공방안 ····· 237
6. 도시친화형 신형식 경전철 고가구조물 타당성 검토 ····· 243
가. 신형식 경전철 고가구조물의 공사비 검토 ····· 243
나. 기존 형식 고가구조물간 공사비 비교・검토(최장경간 200m 동일조건) ····· 245
다. 기존 형식 고가구조물간 공사비 비교・검토(1km 기준, 일반 경간 조건: 40m) ···· 250

제3장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도 ····· 254

1절. 목표 달성도 ····· 254
2절. 관련 분야 기여도 ····· 261

제4장. 연구개발성과의 활용계획 ····· 262

1절. 연구개발성과의 기대효과 ····· 262

2절. 연구개발성과의 활용방안 ····· 262

3절. 연구개발성과의 실용화 방안 ····· 263

부록 1. 국내외 설계기준에 따른 경전철 고가구조물 비교 설계

2. 경전철 고가구조물 설계기준(한계상태설계법) (안)

제1장. 연구개발과제의 개요

1절. 연구개발의 목적

○ 기존 철도교 형식의 육중한 고가(高架)구조로 인한 도시단절·미관훼손·교통혼잡·소음·악천후시 열차운행사고 등의 문제를 해소할 수 있는, “도시친화적이면서도 경제적이고 안전한 경전철 고가구조물 설계기술 개발

- (설계기준) 한계상태설계법 기반 경전철 고가구조물 설계기준(안) 연구

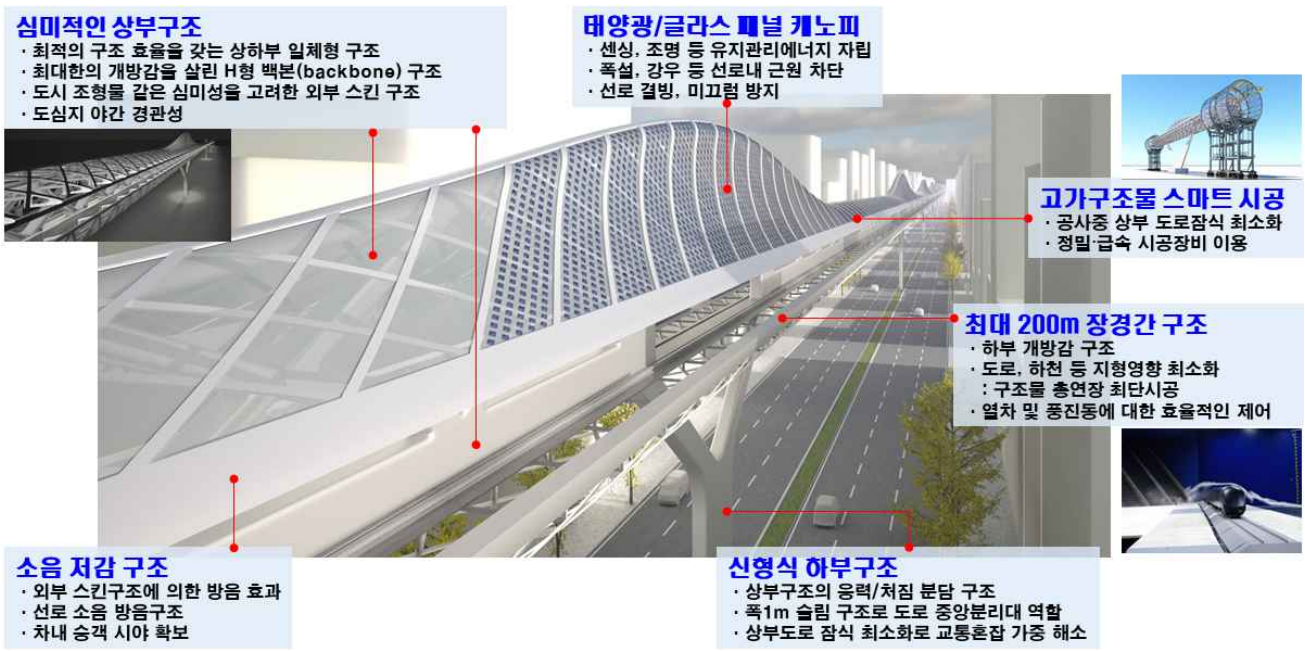
  : 5개 경전철 차종(고무차륜형・철제차륜형・선형유도전동기형・모노레일형・자기부상형) 및 모든 구조형식에 적용하기 위한 국내 경전철 고가구조물 설계기준 제정(안) 마련

  * 본 설계기준은 신형식 경전철 고가구조물 개발과 별도로, 국내에 부재(不在) 중인 경전철 고가구조물 설계기준에 대한 우선적 마련 요구에 대응한 연구임

- (신형식 구조 설계기술) 도시친화형 신형식 경전철 고가구조(최장경간 200m) 및 설계기법 개발

  : 도시조형물과 같은 심미적인 경관성을 갖는, 도심지 세계 최장경간(200m)의 혁신적인 신형식 구조로 기존 고가구조물로 인한 시민불편을 해결하고, 세계 기술을 선도하는 도시친화형 신형식 경전철 고가구조물(sky-guideway) 설계기술 개발

  * 도시친화형 신형식 경전철 고가구조물(sky-guideway): 세계최초 혁신적인 신형식 구조(최장경간: 200m, 슬림한 하부 폭: 1.5m이내), 경제성 향상(건설비 5%이상 절감), 소음·에너지 저감형의 친환경성 향상, 악천후시 열차운행 안전성 향상(강우·폭설로 인한 열차운행사고 근원적 차단) 가능한 신형식 경전철 고가구조물



<도시친화형 신형식 경전철 고가구조물(최장경간: 200m)>

2절. 연구개발의 필요성

1. 국내・외 도시 고가구조물 사례 분석

가. 국내 경전철 고가구조물

2011년 국내 최초로 부산4호선에 경전철시스템이 도입된 이래 부산김해경전철, 용인경전철, 의정부 경전철, 대구3호선 및 인천자기부상철도가 고가건설방식으로 건설되어 운영 중에 있다.

	
부산김해경전철	용인경전철
	
부산4호선	의정부경전철
	
대구3호선	인천자기부상철도

<국내 경전철 고가구조물 사례>

이중, 부산4호선 및 대구3호선은 고무차륜형 경전철이 도입되었고, 부산김해경전철 및 용인경전철은 철제차륜형 경전철이, 인천자기부상철도는 도시형 자기부상 경전철이 도입되었다.

상기 그림은 국내에 고가건설방식으로 건설된 경전철 노선의 고가구조물 전경 사진으로서, 국내 경전철 고가구조물은 설계 당시 경전철 고가구조물에 대한 별도 설계기준이 없었던 관계로, 일반 철도교 형식의 육중한 상·하부 구조물로 구성되어 있고, 하부교각구조가 30~50m 간격으로 촘촘히 도심지에 들어서 있는 구조로 설계·시공되었다.

나. 국외 도시 고가구조물

아래 그림은 국외 도시경전철 고가구조물 및 도시내 시공된 교량 사진으로, 최근 유럽을 중심으로 도심지에 시공되는 토목구조물은 반드시 주변 경관을 고려한 경관설계를 의무적으로 하도록 법제화되어 있고, 해당 도시의 특성을 고려하여 도시 주변 환경과 어우러지도록 설계 및 시공되어 있다.

네덜란드 Beatrixlaan 경전철 고가구조물은 기존 형식의 고가구조물로 설계되었으나, 최대한 경간장을 넓히되 슬림한 구조를 갖도록 설계하였고, 도시 미관을 고려하여 개방형 원형 튜브 구조를 추가 시공하였다. 한편, 싱가폴 Helix Bridge는 수려한 경관을 자랑하는 마리나 베이샌드 호텔에 걸맞춰 첨단 이미지가 돋보이도록 설계되었으며, 호주 시드니 Kurilpa Bridge는 항구도시와 어우

러지는 경관구조를 가지도록 설계되었고, 최대 경간장이 120m의 장경간을 가지고 있다. 또한, 영국 Mille-nnium Bridge와 캐나다 Peace Bridge 역시 주변 도시환경을 고려하여 설계되었고 최장경간이 각각 144m, 126m이다.

이처럼 유럽을 중심으로 국외에서는 국내와 달리 도시에 시공되는 토목구조물은 기존의 육중하고 투박한 구조물 대신 시민들을 최우선적으로 생각하여 제작·시공에 있어 더많은 비용이 소요되더라도 그 도시의 특성을 살려 주변경관을 고려하여 설계 및 시공되는 것이 최신 추세인 것으로 나타났다.

<table>
<tr><td colspan="2">  </td></tr>
<tr><td colspan="2">네덜란드 Beatrixlaan 경전철 고가구조물(총연장400m, 최대경간장50m)</td></tr>
<tr><td>  </td><td>  </td></tr>
<tr><td>싱가폴 Helix Bridge
(총연장280m, 최대 경간장60m)</td><td>호주 KurilpaBridge
(총연장470m, 최대 경간장120m)</td></tr>
<tr><td>  </td><td>  </td></tr>
<tr><td>영국 Millennium Bridge
(총연장 325m, 최대 경간장144m)</td><td>캐나다 Peace bridge
(경간 126m)</td></tr>
</table>

<국외 도시 고가구조물 사례>

2. 연구배경 및 필요성

가. 설계기준의 부재

국내 경전철 고가구조물에 대한 별도 설계기준이 없어 일반 철도교 설계기준에 의한 일반 철도교 형식으로 과다 설계되어 국가 예산이 낭비되고 있다. 또한, 육중한 철도교 형식에 의한 도시미관 저해, 도시단절 조성, 도로교통 혼잡 가중 등의 문제로 시민들로부터 외면받고 있고 시민들의 고가화 반대, 지하화 요구에 따른 지자체 및 국가 재정부담이 가중되고 있는 실정이다. 실제 2019년 개통된 김포경전철의 경우에도 당초 계획 당시 고가건설방식이었지만, 시민들의 반대로 고가건설방식 대비 일반적으로 2배 이상의 사업비가 소요되는 지하건설방식의 경전철이 도입된 바 있다.



<육중한 고가구조물로 인한 시민들 외면>



<운영기관 파산 및 고가경전철 반대 기사>

또한, 계획당시 수송 수요에 비해 낮은 수요가 운영 적자의 주요인이지만, 토목구조물의 과다설계에 따른 초기 건설비 과다 및 이로 인한 운영유지비 가중이 지자체 및 경전철 운영기관에 부담을 가중시키고 있는 실정이다.

이에, 감사원은 '경전철 건설사업 추진실태 감사(2013년)'에서 국내 경전철 고가구조물에 대한 설계기준 미비에 따른 과다설계로 예산 낭비 초래를 지적하고, 경전철 고가구조물 설계기준을 시급히 마련토록 제도 개선을 요구한 바 있다.

한편, 좀더 과학적이고 효율적인 구조물 설계를 위하여 미국 AASHTO LRFD, 유럽 Eurocode LSD 등 철도 선진국에서는 교량 설계 시 신뢰도 기반의 한계상태설계법 설계기준을 도입·적용하고 있으며, 국내에서도 도로교의 경우 2015년부터 한계상태설계법 기반의 설계기준을 적용하고 있다. 철도교의 경우에도 국토교통부 철도기술연구사업 '철도노반 성능 및 건설비 최적화 기반기술 개발(2013-2018)' 연구를 통해 한계상태설계법 기반의 철도교 설계기준을 제정하여 2020년 현재 국토부 중심위 심의를 거쳐 제정을 앞두고 있다. 다만, 본 한계상태설계법 기반의 철도교 설계기준이 대상 구조물이 일반 및 고속철도, 중전철의 기존 철도교인 관계로, 차량이 가볍고 저속으로 운행되는 경전철용 고가구조물에 대한 별도 설계기준 마련이 필요하고, 이 또한 세계적 추세에 맞추어 한계상태설계법 기반의 경전철 고가구조물 설계기준 제정이 필요하다.

나. 기존 고가 구조형식의 한계

한계상태설계법 기반의 경전철 고가구조물 설계기준 제정을 통해 적정 규모로의 설계 및 시공으로 기존 철도교 형식의 경전철 고가구조물을 다소 슬림하게 설계·시공되게 할 수는 있으나, 도시미관·도시단절을 초래하는 기존 철도교 형식 자체의 투박하고 육중한 구조물을 탈피하는 데에는 한계가 있다.

이렇듯 도심지에 건설되는 경전철 고가구조물은 기존 철도교 형식에 의하여서는 도시단절 및 도시미관 문제, 도로교통혼잡 가중, 소음 문제, 폭설시 열차운행 중단 등의 문제가 근본적으로 해결될 수 없으므로, 도시친화적이면서도 경제적이고 안전한 도시친화형의 신형식 경전철 고가구조물 개발이 절실히 필요하다.

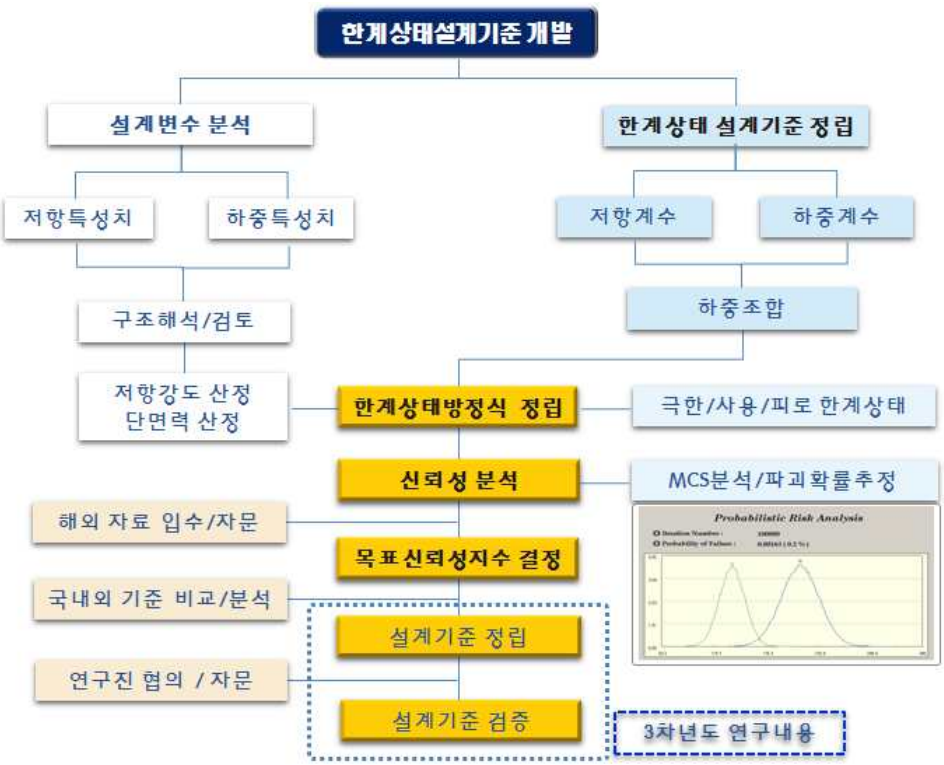
현재 국내 41개 노선 621.07km, 약 27.5조원 규모의 경전철 사업이 계획되어 있고, 해외건설 수주 효자지역인 베트남, 싱가폴, 인도네시아 등 동남아에서만 17개 노선 300여 km 규모의 사업 추진 등 향후 전 세계적으로 지속적인 경전철 확충이 예상되고 있다.

이에, 도시미관·도시단절·교통혼잡 등 국민 민원 해결을 통한 국내 수요에 시급히 대응하고, 나아가 이 분야 공백기술 선점을 통한 기술경쟁력을 기반으로 국외 경전철 시장 선점이 가능하도록, 도시친화형의 경전철 고가구조물의 적시 개발이 필요한 시점이다.

3절. 연구개발의 범위

1. 한계상태설계법 기반 경전철 고가구조물 설계기준

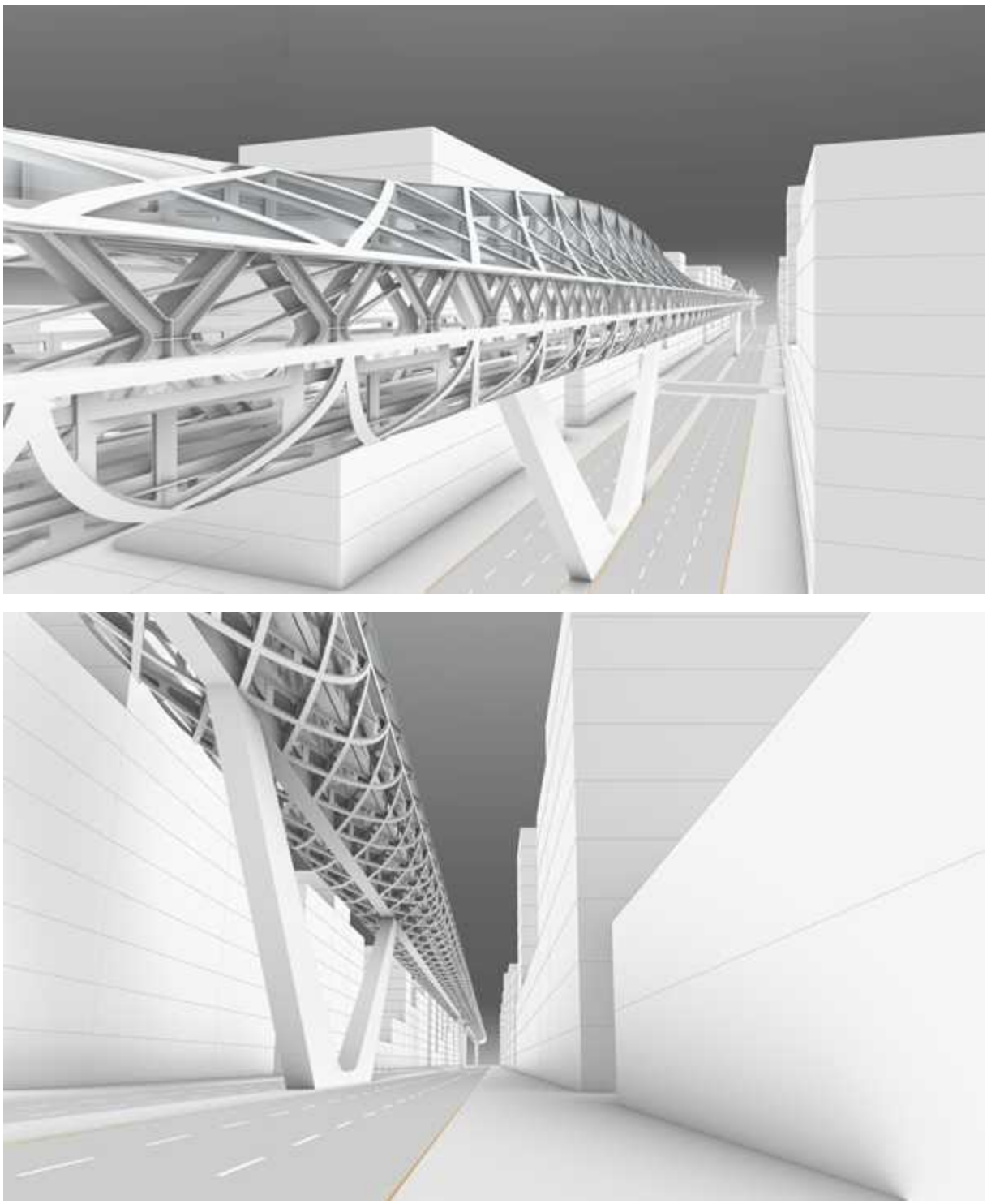
국내 설계기준으로 마련되어 있지 않는 경전철 고가구조물 설계기준에 대한 연구로서, 미국, 유럽 등 세계적 추세에 맞춘 신뢰도 기반의 한계상태설계법 기반 경전철 고가구조물 설계기준으로, 좀 더 과학적이고 효율적인 고가구조물 설계가 가능케 하는 기준이다. 이를 위해, 경량전철 차종별(고무차륜형, 모노레일형, 철제차륜형, 선형유도전동기형, 자기부상형) 경전철 고가구조물에 대한 실차량 주행 정·동적 계측시험 분석 및 실하중 계측 분석을 통한 경량전철 설계하중 기준을 수립하고, 이와 함께 경전철 고가구조물의 목표신뢰도지수 선정 및 하중·저항계수 분석을 통하여 국내 환경에 적합한 신뢰도기반의 경전철 고가구조물 설계하중 및 하중조합을 도출한다.



<한계상태설계법 기반 경전철 고가구조물 설계기준 연구 프로세스>

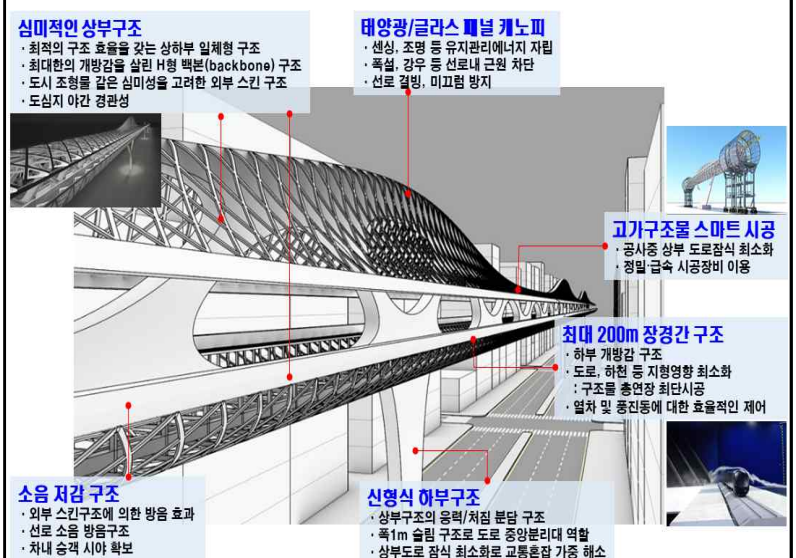
2. 도시친화형 신형식 경전철 고가구조물 설계기술

기존 철도교 형식의 육중한 고가(高架) 구조 형식을 탈피한, 도시조형물과 같은 심미적인 경관성을 가지면서도 도시단절·미관훼손·교통혼잡·소음·악천후시 열차운행사고 등 기존 경전철 고가구조물의 모든 문제점을 해소할 수 있는 도심지 세계 최장경간(200m)의 혁신적인 신형식 경전철 고가구조물 설계기술이다. 신형식 경전철 고가구조물의 전체 구조계의 구조설계 검증과 함께 열차주행 동적안전성 검증 및 내진・내풍 설계검증을 수행한다. 아울러, 신형식 고가구조물의 가설・시공방안을 수립하고 시공단계별 구조안전성을 검토하며, 이와 함께 기존 경전철 고가구조물과의 경제성을 검토한다.



<세계 최장경간(200m) 도시친화형 경전철 고가구조물>

4절. 기술개발에 따른 미래상

구분	As-Is (기존 기술)	TO-Be (개발 기술)
설계 기준	■ 철도교설계기준 준용 ■ 기존 결정론적 설계법	신뢰도 기반의 **한계상태설계법 기반 경전철 고가구조물 설계기준** 신규 제정으로 과학적·효율적 구조설계
도시 미관	■ 밀폐 구조형식 -기존 철도교 형식 (박스·I형 거더 등) -상하부 분리형 밀폐 구조형식 ■ 경간장(도시단절) -20~50m 조밀시공	■ 심미적인 개방 구조형식 **-백본-아웃리거 신형식구조(세계최초)** -도시조형물 같은 심미적인 구조 -상하부 일체형 개방 구조형식 ■ 경간장(도시개방) **-최장경간 200m (도심지 세계최고수준)** -고가하부 개방감 제고
교통 혼잡	■ 하부구조(교각) -폭/직경 2m 이상 -차선 잠식 불가피	■ 하부구조(교각) -폭/직경: 최대 1.5m이내 -중앙분리대 수준으로, **차선잠식 無**
소음	■ 상부 소음 노출	■ 상부 아웃리거 구조에 의한 **소음 저감 및 차단**
안전	■ 상부 강설·강우 노출 구조	■ 상부 아웃리거 구조에 의한 **강설·강우 차단** (캐노피 역할)
에너지	■ 유지관리 위한 별도 외부에너지원 필요	■ 유지관리 **에너지 자립** (태양광 글라스패널 적용) -스마트 상시 감시관리 전원 활용 **-야간 경관 조명** 적용 (심미성 향상)
경제성	■ 공사비 450~500억/km -도로/하천 선형따라 구불구불 교각시공 (총연장 증가)	■ **공사비 5% 이상 절감** -상부구조 강중 20% 이상 감축 -장경간에 따른 하부구조(교각) 및 기초공사 수량 감소 -도로/하천 지형 영향 최소화로, 시종점간 최단시공 (경제성 +α)
그림	  	

제2장. 연구 수행 내용 및 성과

1절. 한계상태설계법 기반 경전철 고가구조물 설계기준

1. 경전철 고가구조물 설계하중 기준 연구

가. 경전철 고가구조물 실차량 주행 계측시험

(1) 시험대상 구간

시험대상 구간은 계측조건, 경간구성, 최고속도 주행 및 곡선반경 등을 고려하여 선정하였으며, 해당 노선의 일반적인 경간구성을 가지며 직선구간 연장이 길어 최고 속도 주행이 가능한 구간, 곡선부 주행시 곡선반경이 작아 차량 횡압의 영향이 크게 발생할 것으로 예상되는 구간, 직선부에서 곡선부로 진입하는 구간으로 횡압의 영향이 크게 전달될 것으로 예상되는 구간 등을 고려하였다.

(가) 일반 고무차륜형 경전철

부산 도시철도 4호선은 부산광역시 동래구 온천동에 있는 미남역에서 기장군 철마면 안평리에 있는 안평역을 잇는 부산교통공사에서 건설·운영 중인 도시철도 노선이다. 부산 4호선은 총 연장 12.0km, 지하역 9개, 지상역 5개로 총 14개 역으로 구성되어 있으며, 지상 고가구간은 석대역에서 안평역까지 총 4.4km 구간이다. 이중 계측시험 대상 구간은 석대역-영산대역 구간의 직선부(교각 P21-P24 구간) 및 곡선부(R600m, 교각 P18-P21) 구간으로 선정하였다.



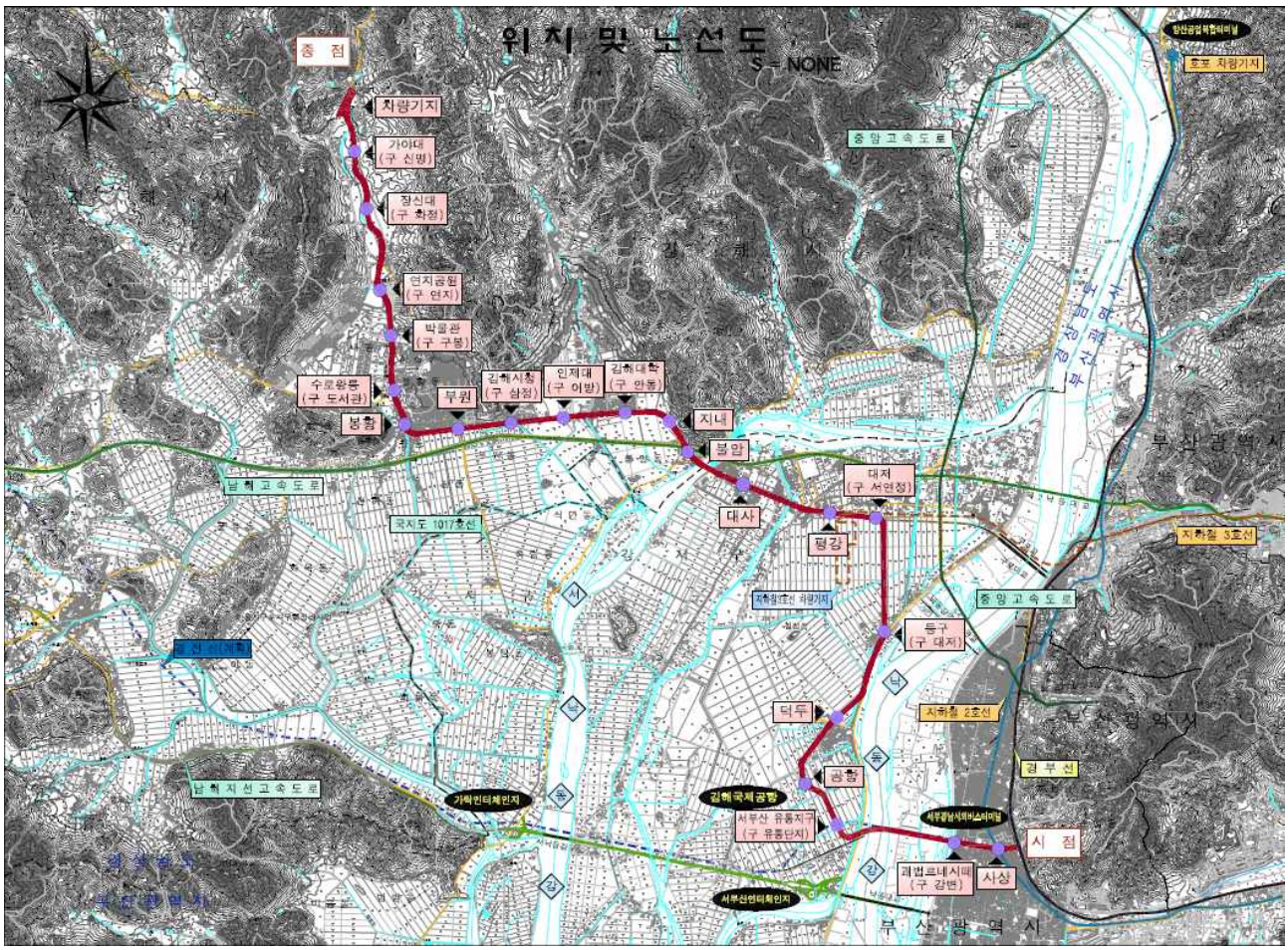
<부산4호선 경전철 노선도>



<부산4호선 고가구조물 및 역사>

(나) 일반 철제차륜형 경전철: 부산-김해경전철

부산-김해 경전철은 부산광역시 사상구 괘법동에 위치한 사상역부터 경상남도 김해시 삼계동에 위치한 가야대역까지 총 21개 역사로 이루어져 있으며, 총 연장 23.455km이다. 이중, 현장계측시험 대상 구간은 등구역~덕두역 구간의 직선부(교각 P3B07-P3B09) 및 곡선부(R200m, 교각 P3B11-P3B14)로 선정하였다.



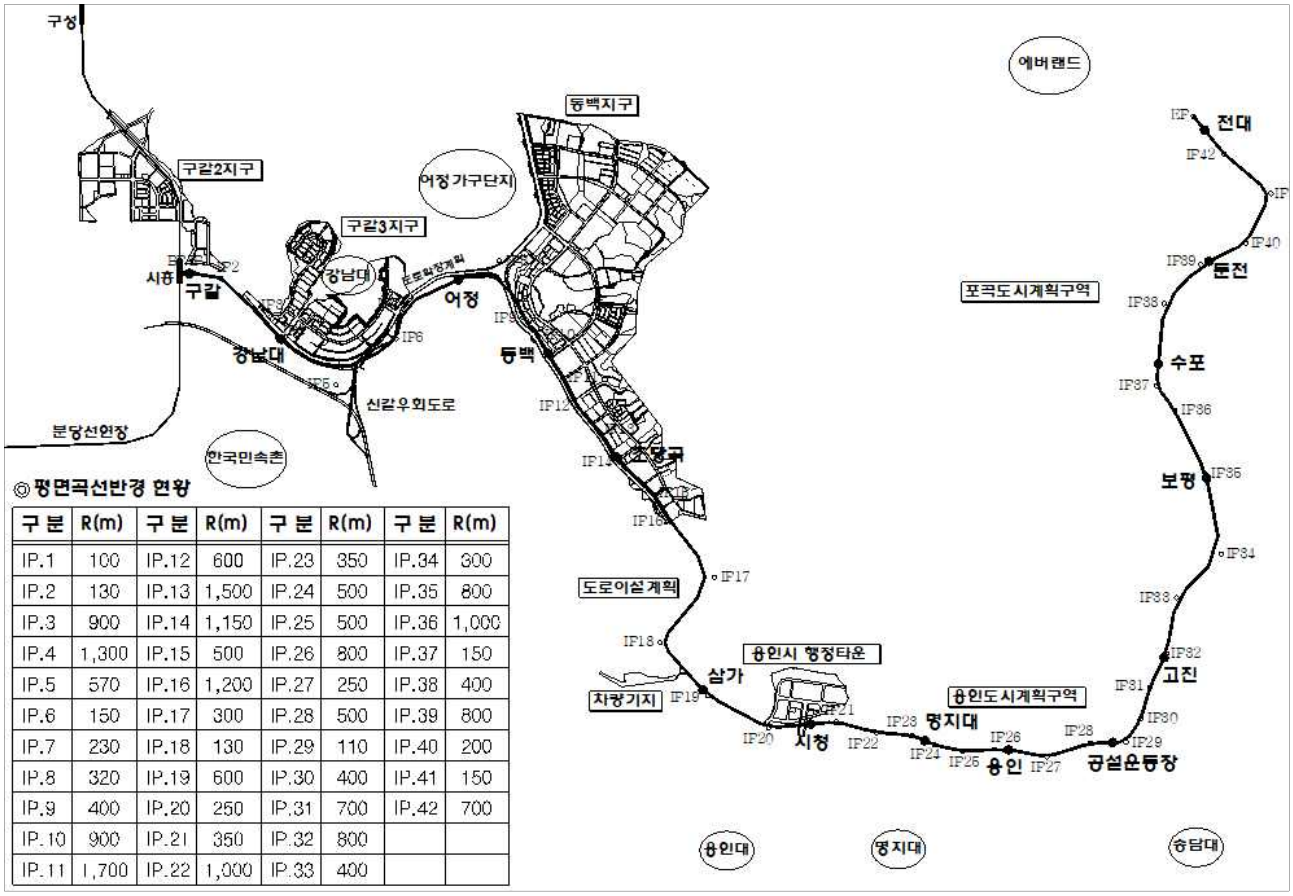
<부산-김해 경전철 노선도>



<부산-김해경전철 등구역-덕두역 구간 고가구조물 및 역사>

(다) 선형유도전동기(LIM)방식 철제차륜형 경전철: 용인 에버라인 경전철

용인 에버라인 경전철은 경기도 용인시 기흥구에 위치한 기흥역부터 경기도 용인시 처인구에 위치한 전대·에버랜드역이며 총 15개 역사와 1개의 차량기지로 이루어져 있다. 용인 에버라인 경전철의 총 연장은 18.404km이며 본선 구간 중 고가구간 15.472km, 지상구간은 2.265km의 연장을 가진다. 이중 계측시험 대상 구간은 고진역-보평역 구간의 직선부(콘크리트교: 교각 P11-42~P11-43, 강교: 교각 P11-43~P11-44) 및 곡선부(R300m, 강교: 교각 P11-34~P11-35)로 선정하였다.



◎ 평면곡선반경 현황

구 분	R(m)	구 분	R(m)	구 분	R(m)	구 분	R(m)
IP.1	100	IP.12	600	IP.23	350	IP.34	300
IP.2	130	IP.13	1,500	IP.24	500	IP.35	800
IP.3	900	IP.14	1,150	IP.25	500	IP.36	1,000
IP.4	1,300	IP.15	500	IP.26	800	IP.37	150
IP.5	570	IP.16	1,200	IP.27	250	IP.38	400
IP.6	150	IP.17	300	IP.28	500	IP.39	800
IP.7	230	IP.18	130	IP.29	110	IP.40	200
IP.8	320	IP.19	600	IP.30	400	IP.41	150
IP.9	400	IP.20	250	IP.31	700	IP.42	700
IP.10	900	IP.21	350	IP.32	800		
IP.11	1,700	IP.22	1,000	IP.33	400		

<용인경전철 노선도>



<용인경전철 고진역-보평역 구간 고가구조물 및 역사>

(라) 모노레일형 경전철: 대구 모노레일 경전철

대구 3호선은 과좌식 고무타이어 모노레일로서 북구 동호동에 위치한 칠곡경대병원역에서 수성구 범물1동의 용지역까지 총 23.95㎞연장의 30개 역사로 이루어져 있고, 본선 궤도는 PSC 및 강궤도빔으로 이루어져 있으며, 대구 3호선의 총 연장은 23.95km이다. 이중 계측시험 대상 구간은 팔거역-동천역 구간의 직선부(14-P20~P21) 및 곡선부(R250m, 14-P17~P18)로 선정하였다.



<대구3호선 경전철 노선도>





<대구3호선 경전철 팔거역-동천역 구간 고가구조물 및 역사>

(마) 자기부상형 경전철

인천공항 자기부상열차 노선의 정거장은 인천국제공항 터미널 역에서 용유역까지 6개의 정거장으로 구성되어 있으며 총 연장 6.493km로서 본선 6.113km와 입출고선 0.380km로 구성되어 있다. 이중 계측시험 대상 구간은 워터파크역-용유역 구간의 직선부(교각 P146~P147) 및 곡선부(R100m, 교각 P150~P151)로 선정하였다.



<인천공항 자기부상 경전철 노선도>



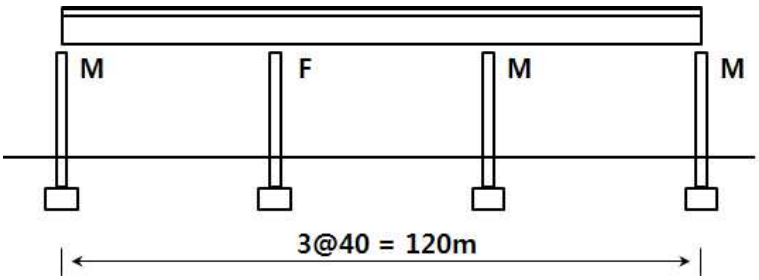
<인천공항 자기부상 경전철 고가구조물>

(2) 고가구조물 및 차량 제원

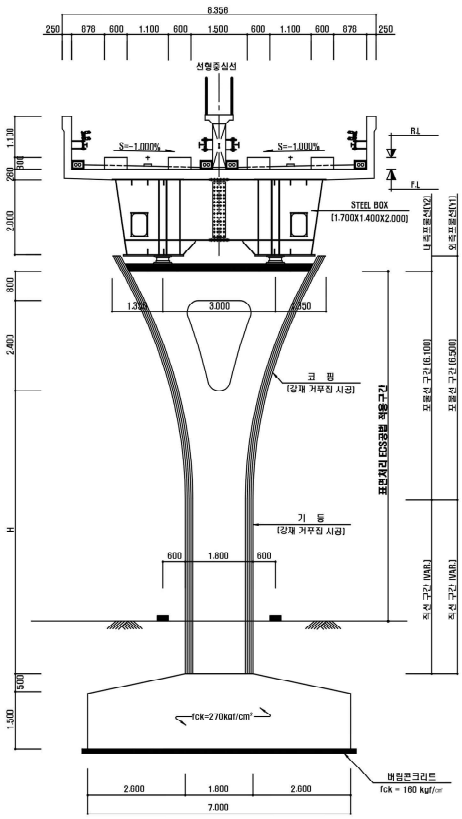
(가) 일반 고무차륜형 경전철: 부산4호선

① 고가구조물

계측대상 고가구조물 형식은 아래 그림과 같이 경간 40m의 3경간 연속 강합성 박스 거더교(제형) 형식이며, 단면 제원은 아래 그림에 나타냈다. 두 번째 교각의 받침은 회전 변위만 가능하고 수평 변위가 불가능한 고정된 힌지이고, 나머지 교각의 받침은 수평 및 회전 변위가 가능한 롤러 형태로 구성되어 있다.



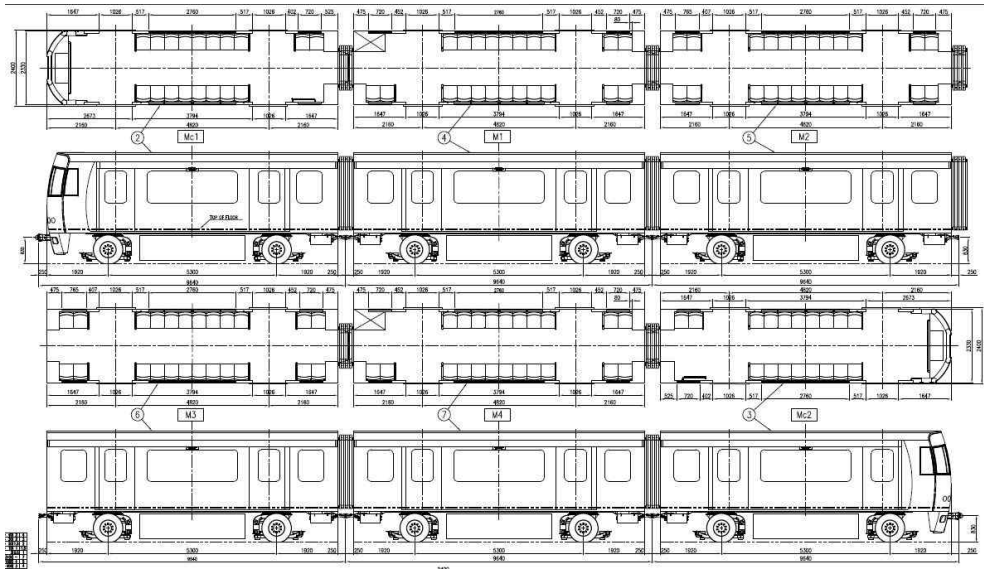
<대상 고가구조물의 경간 구성>



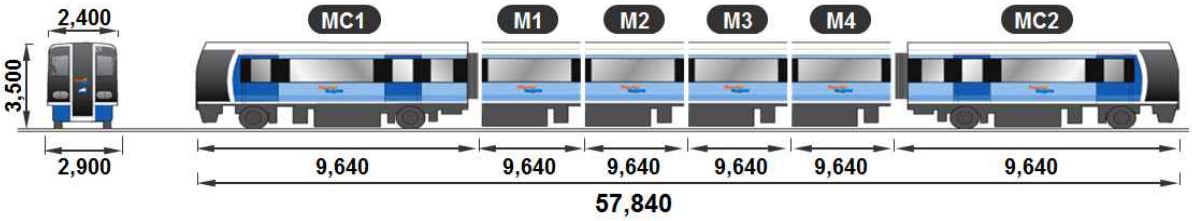
<대상 고가구조물의 제원>

② 차량

아래 그림은 부산4호선 차량 형태 및 제원을 나타낸다. 열차 길이는 6량 1편성 기준으로 57.840 m이며, 1량 기준 9.640m이다. 대차 중심간 거리가 5.3m이며, 첫 번째 차축에서 마지막 차축까지 거리가 53.5m이고 최대 축중은 9.5톤이다. 부산4호선의 고무차륜형 경전철 차량은 수동운전대가 있는 동력차 2량과 운전대가 없는 동력차 4량, 총 6량으로 편성되어 있다. 부산4호선 차량 제원은 아래 표와 같다.



<부산4호선 평면도/횡단면도(6량)>



<부산4호선 차량 제원(6량)>

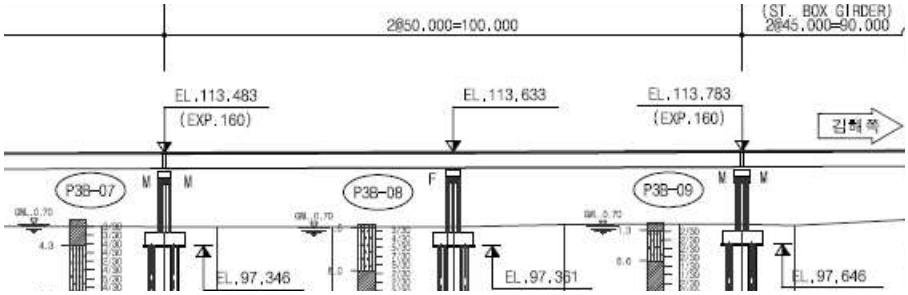
<부산4호선 차량 제원>

구 분	차량 제원	구 분	차량 제원
총 길이	57,840mm(6량)	공차 하중	12tonf
궤간	1,700mm	만차 하중	19tonf
차체 폭	2,400mm	성능 최고 속도	70km/h
차체 길이	9,140mm	최고 운행 속도	60km/h
차체 높이	3,500mm	승차 정원	52명(최대 86명, 1량 기준)
대차간 중심거리	5,300mm	제동방식	전기(회생) 및 공기제동병용
안내륜 간격	2,900mm	안내륜/분기륜	경질 우레탄 타이어

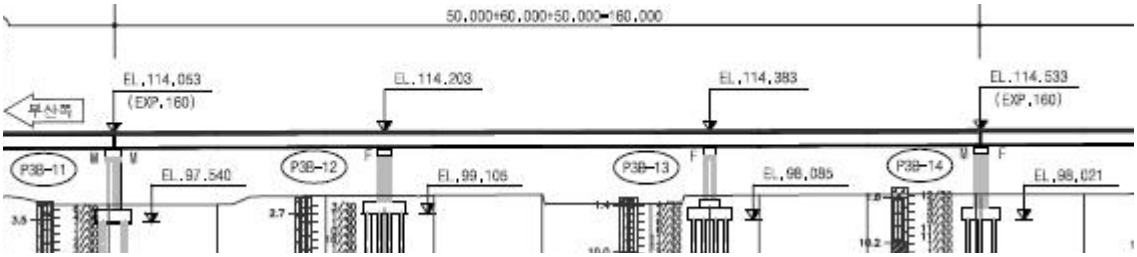
(나) 일반 철제차륜형 경전철: 부산-김해경전철

① 고가구조물

부산-김해경전철 고가구조물은 강재박스 합성 거더교 형식의 2경간 연속교 혹은 3경간 연속교로 구성되어 있으며, 일반적인 제원은 아래 그림과 같다.

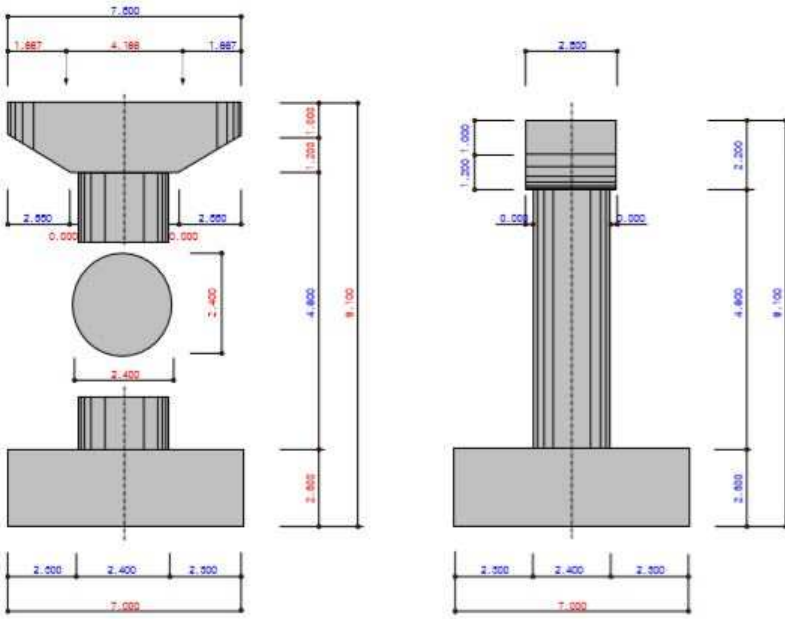


(a) 직선부

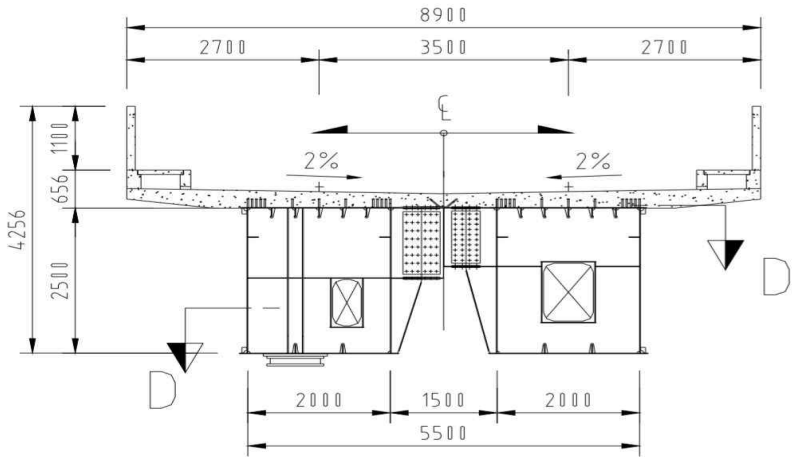


(b) 곡선부

〈대상 고가구조물의 경간 구성〉



(a) 하부 구조물



(b) 상부 구조물

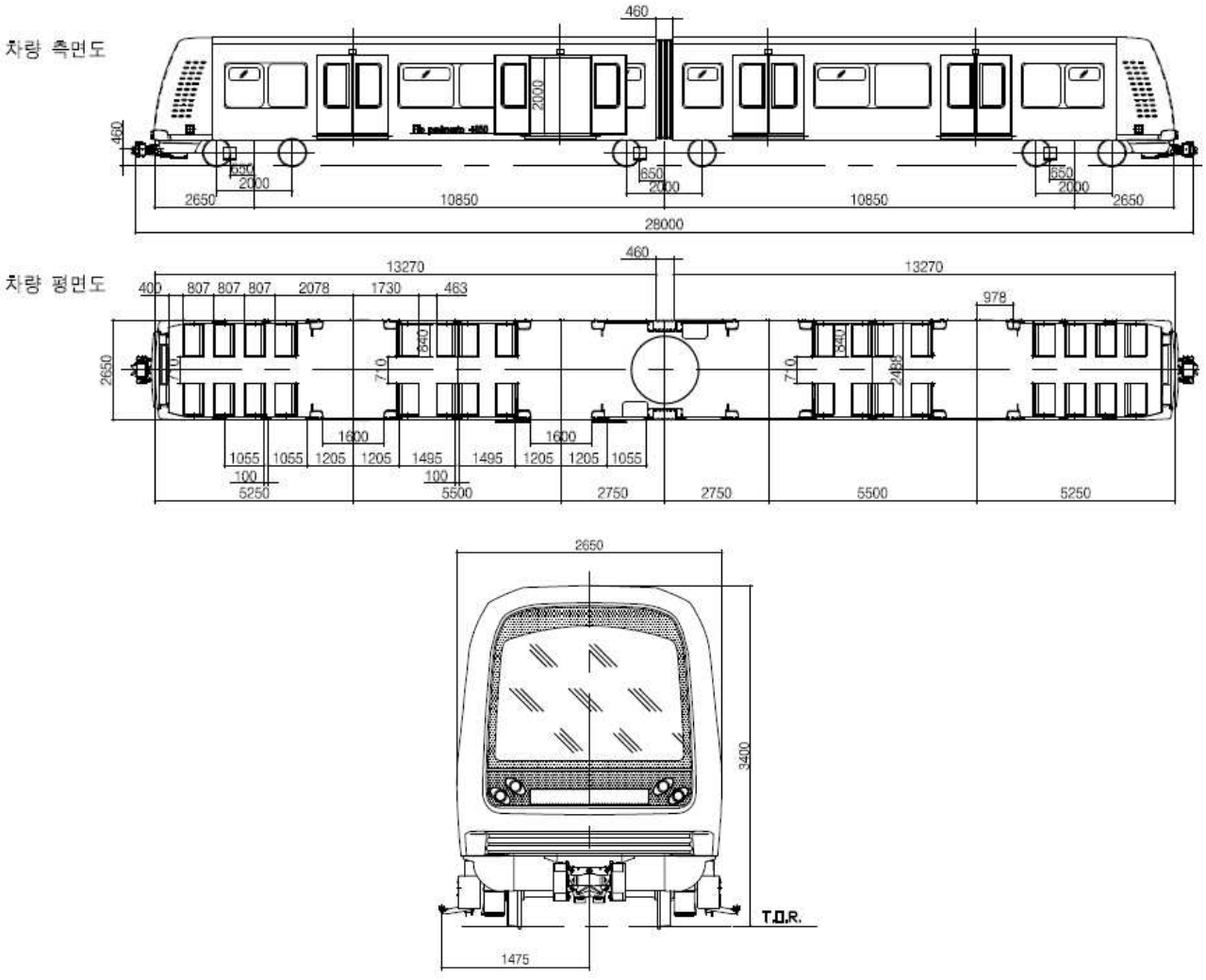
〈교량 상·하부 구조물 제원〉

② 차량

부산-김해 철제차륜 경량전철 차량은 RF-CBTC 시스템을 기반으로 한 완전자동무인운전시스템으로 총 2량 1편성으로 구성되어 있다. 성능 최고속도는 80km/h이며 최고 운행속도는 70km/h이고 가속도 및 감속도는 각각 1.0m/s^2 및 1.2m/s^2이다. 부산-김해 경전철 차량 제원은 아래 표와 같다.

<부산-김해 경전철 차량 제원>

구 분	차량 제원	구 분	차량 제원
총 길이	28,000mm	공차 하중	23.25tonf(1량)
궤간	1,435mm	만차 하중	32.67tonf(1량)
차체 폭	2,650mm	성능 최고 속도	80km/h
차체 길이	13,500mm(1량)	최고 운행 속도	70km/h
차체 높이	3,600mm	승차 정원	152명(최대 32명,1량 기준)
견인전압	750 VDC	운전방식	완전자동무인운전

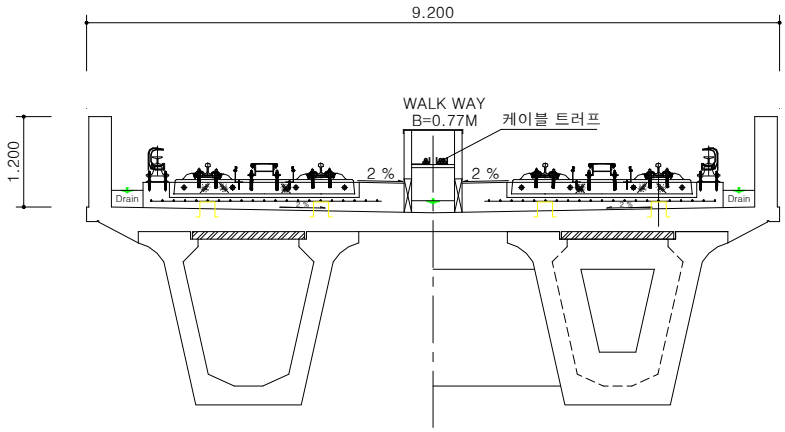


<부산-김해 경전철 차량 제원>

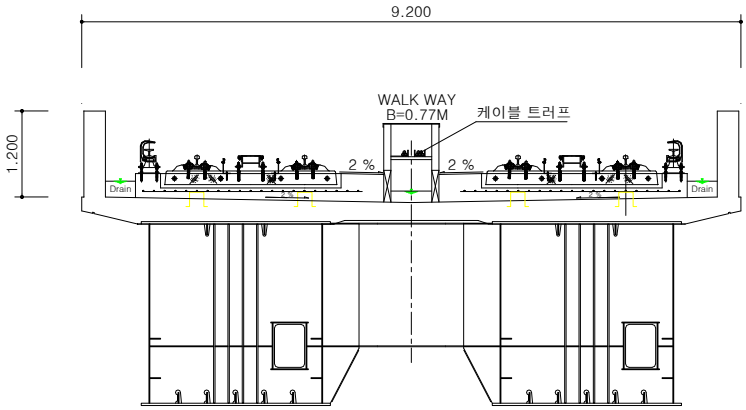
(다) 선형유도전동기(LIM)방식 철제차륜형 경전철: 용인 에버라인 경전철

① 고가구조물

용인 에버라인 경전철 고가구조물은 PSC U 거더교 및 강재박스 합성 거더교 형식의 단순교로 구성되어 있으며, 일반적인 제원은 아래 그림과 같다.

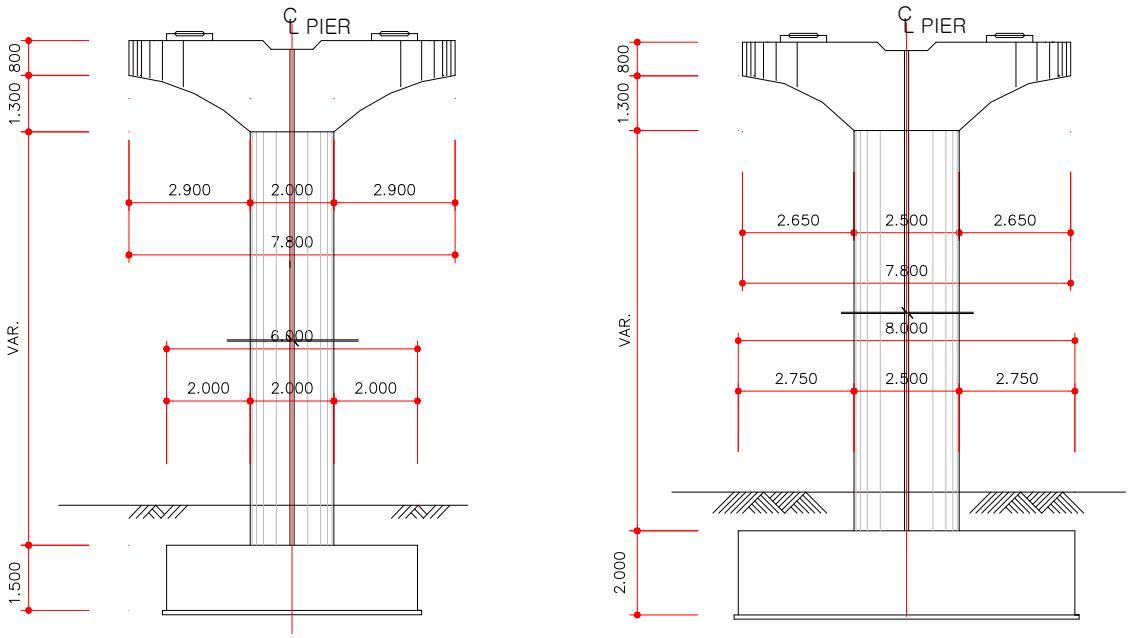


(a) P.S.C U 거더교 : 직선부 및 곡률이 큰 경우(R≥500)적용



(b) 강합성형교 : 급곡선부(R<500), 장지간 및 시가지 구간

<상부 구조물 제원>



(a) 강박스 거더 부분의 교각 (b) PSC-U 거더 부분의 교각

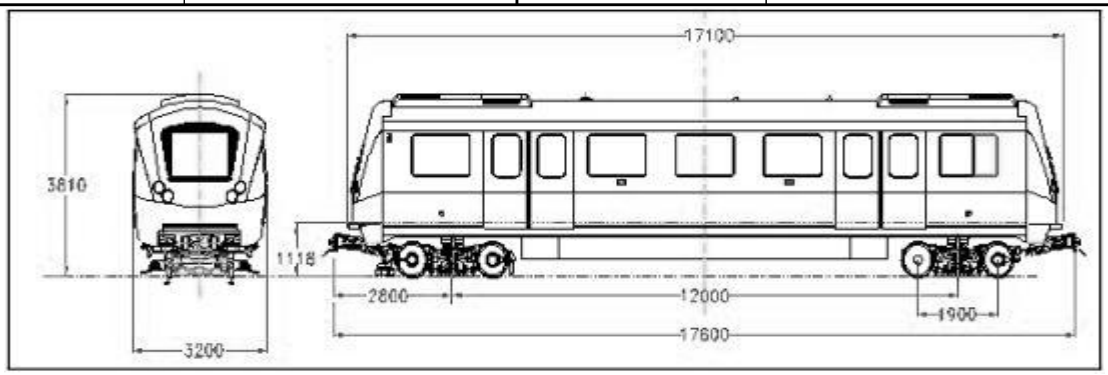
<하부 구조물 제원>

② 차량

용인 에버라인 경량전철 차량은 운전실이 없는 LIM(Linear Induction Motor) 구동방식으로 완전자동 무인운전 시스템으로 1량 1편성으로 구성되어 있다. 용인 에버라인 경전철 차량 제원은 아래와 같다.

<용인 에버라인 경전철 차량 제원>

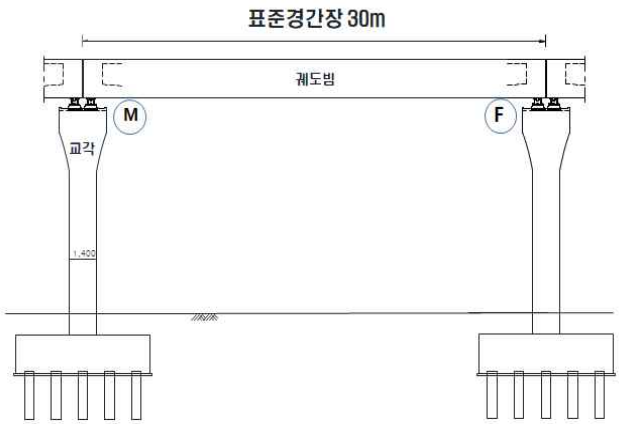
구 분	차량 제원	구 분	차량 제원
총 길이	17,600mm	공차 하중	24tonf
궤간	1,435mm	만차 하중	42tonf
차체 폭	3,200mm	성능 최고 속도	90km/h
차체 길이	17,100mm	최고 운행 속도	80km/h
차체 높이	3,810mm	승차 정원	226명(최대 32명,1량 기준)
견인전압	750 VDC	운전방식	완전자동무인운전



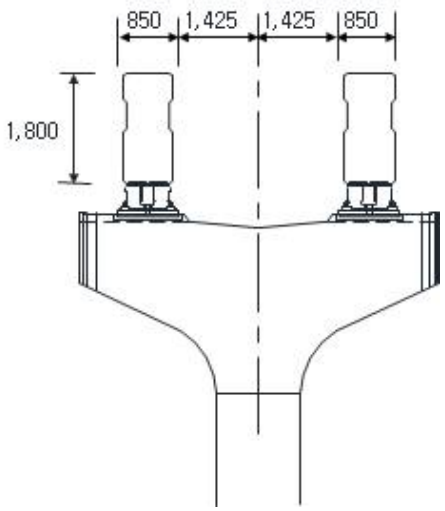
(라) 모노레일형 경전철

① 고가구조물

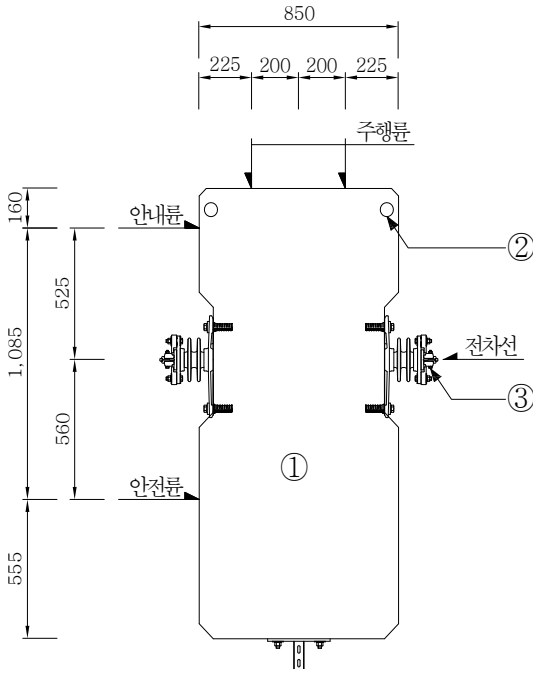
대구 3호선 본선 고가 구조물은 교량(교각, 보-궤도빔)형태이며, 아래 그림에서와 같이 고가구조물은 고정단과 가동단의 단순보 형태로 구성되어 있다. 표준 경간장은 30m로서 표준구간에서의 궤도빔에 대한 형식 및 단면 제원은 아래 그림과 같다.



<대상 고가 구조물의 형식>



<대상고가구조물의 제원: PSC궤도빔-표준구간(R≥200)적용>



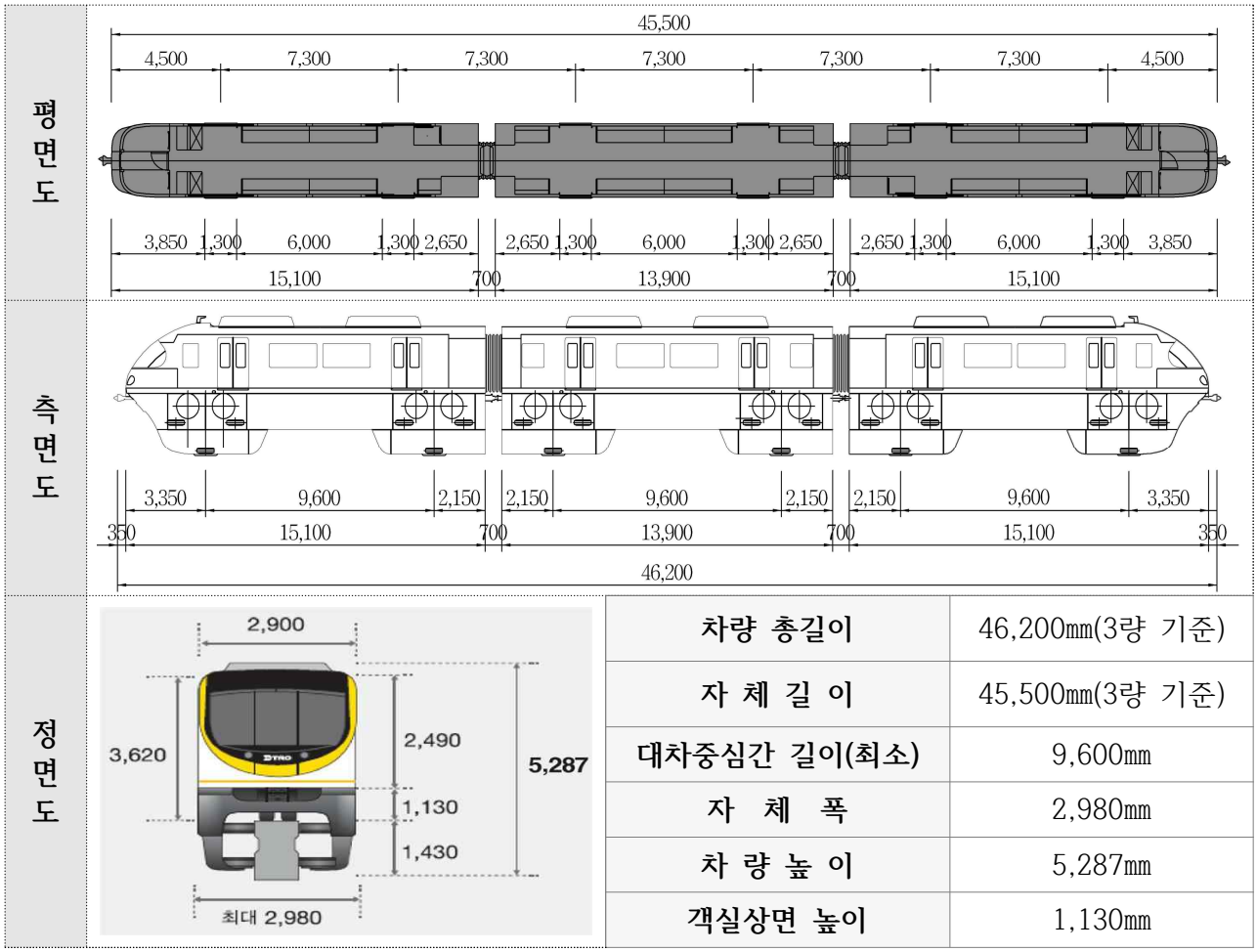
구 분	명 칭	담당분야
①	궤도빔	토목분야
②	ATC/TD	신호분야
③	전차선	전기분야
④	케이블 트레이 ATO용	통신 및 신호분야 전기분야

- ATC : 자동열차제어장치
- TD : 열차검지장치

<궤도빔 단면 치수>

② 차량

대구3호선의 경전철 차량은 모노레일 위를 주행하는 고무차륜 차량으로서 동력 장치 및 운전제어 기능이 구비된 차량 2량과 운전제어 기능이 없는 차량 1량으로, 1편성 3량(MC1-M-MC2)으로 구성되어 있으며, 대구 3호선 차량의 세부 제원은 아래와 같다.



차량 총길이	46,200㎜(3량 기준)
자 체 길 이	45,500㎜(3량 기준)
대차중심간 길이(최소)	9,600㎜
자 체 폭	2,980㎜
차 량 높 이	5,287㎜
객실상면 높이	1,130㎜

<대구 3호선 차량 세부제원>

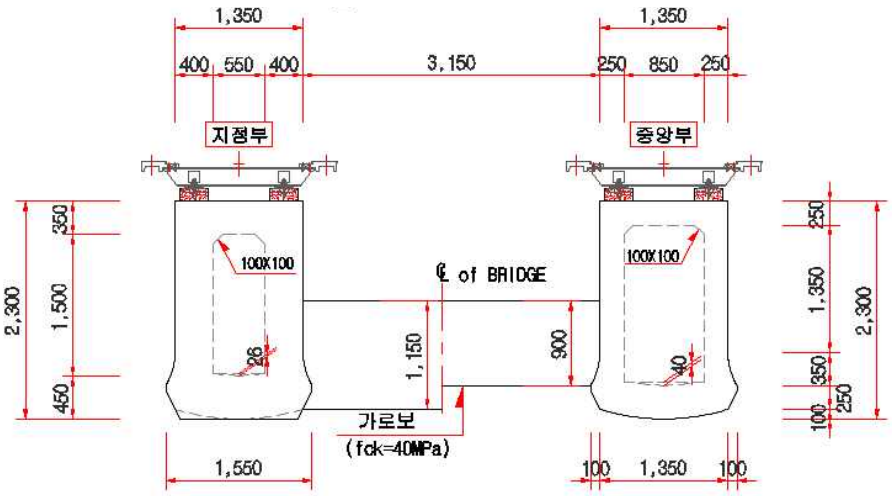
<대구3호선 시스템>

구 분		제 원	구 분		제 원
항 목	세 부 항 목		항 목	세 부 항 목	
차량형식	-	모노레일	성 능	성능최고속도	80km/hr
궤 도	궤도횡폭	850㎜		최고운행속도	70km/hr
	성능 최급 구배	60‰		가속도	3.5km/h/s
	최소 곡선반경	50m		감속도(비상감속도)	4.0(4.5)km/h/s
차량중량 Unit	공차/승객 중량	975kN /345kN	차 량 정 원	선두차	85명(입석55명, 좌석30명)
	만차중량	1320kN		중간차	95명(입석59명, 좌석36명)
최대축중	1축당 중량	110kN		계(3량 1편성)	265명(입석169명, 좌석96명)

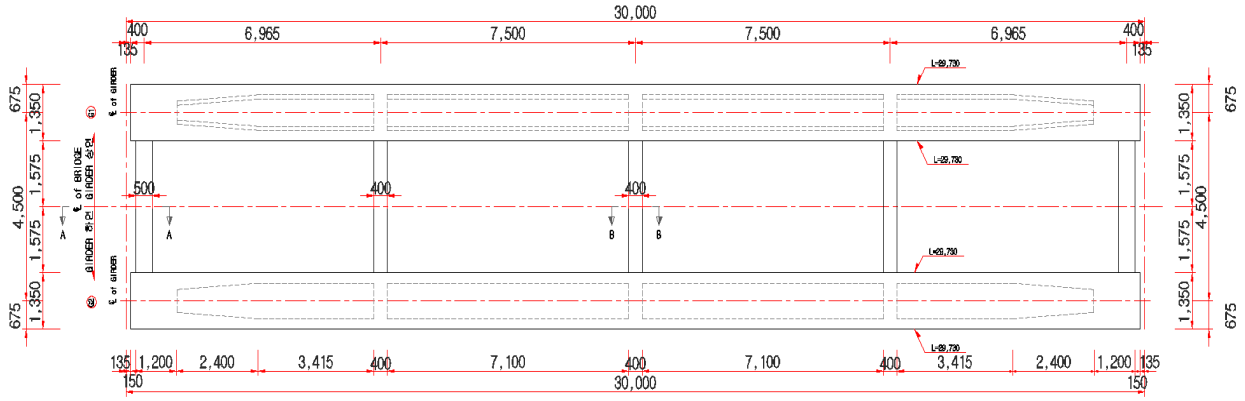
(마) 자기부상형 경전철

① 고가구조물

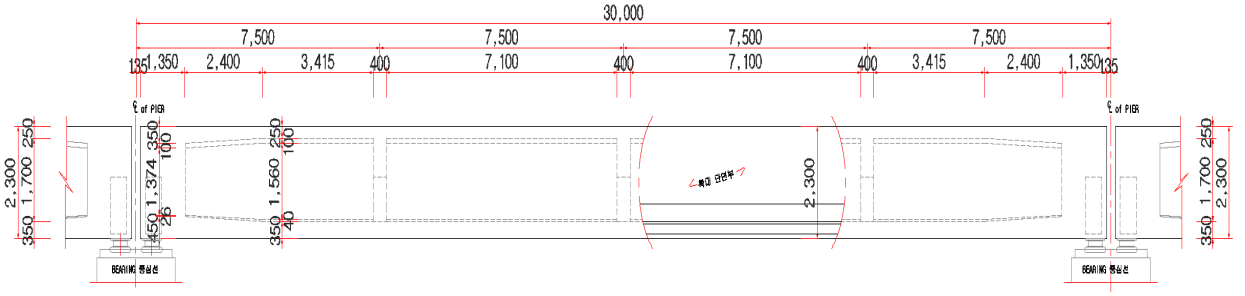
인천자기부상 경전철 고가구조물의 상부 고가구조물 및 차량을 지지하는 하부의 고가구조물은 PSC Box이고, 인천공항 자기부상열차 주행 전 구간에 걸쳐서 20m~35m의 단순교 및 2~3경간 연속교로 배치되어 있으며, 하부구조물은 PHC말뚝 교각으로서 일체식 교각으로 구성되어 있다. 그 형태와 제원은 아래와 같다.



(a) 횡단면도

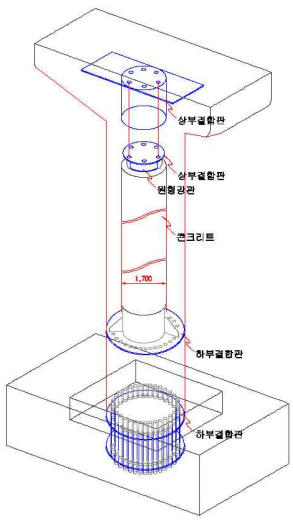


(b) 평면도



(c) 종단면도

<상부 구조물 PSC박스 제원>



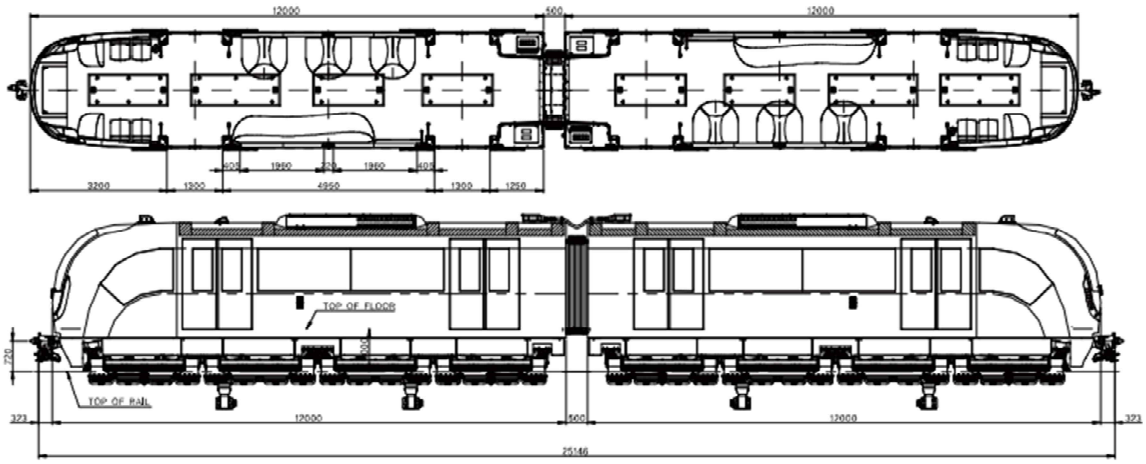
<하부 구조물 PHC말뚝 교각 투시도>

② 차량

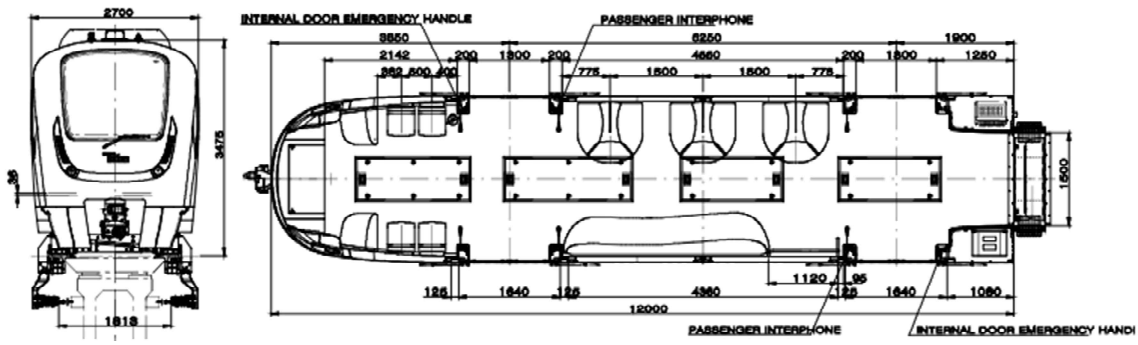
인천공항 자기부상열차는 2량 1편성으로 차량 1량의 공차중량은 19.1ton이며, 만차중량은 26.5ton으로서 주요 제원은 아래와 같다.

<인천공항 자기부상열차 차량 제원>

구 분	차량 제원	구 분	차량 제원
총 길이	25,146mm(2량)	공차 하중	19.1tonf/량
궤간	1,850mm	만차 하중	23.6tonf/량
차체 폭	2,700mm	성능 최고 속도	110km/h
차체 길이	12,000mm/1량	최고 운행 속도	80km/h
차체 높이	3,475mm	승차 정원	93명(좌석 22명, 입석 71명, 1량 기준)
최대가속도	4.0km/h/s	하중조건 (최대승객하중)	-성능기준 : 7.4ton/량, - 기계적강도기준 : 10.0ton/량
최대감속도	4.0km/h/s 4.5km/h/s(비상시)		
구배등판능력	70‰	운행방식	2량 1편성



(a) 평면도 / 측면도



(b) 정면도 (c) 차량제원 세부

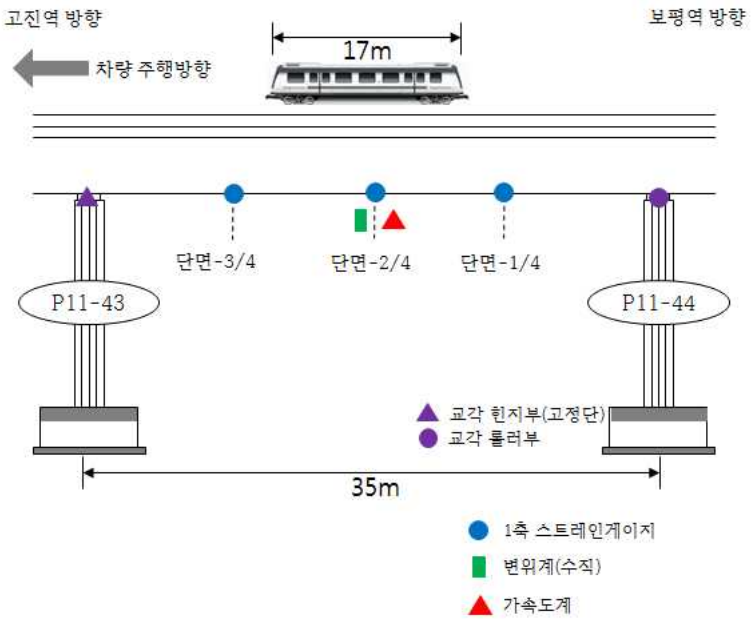
<인천공항 자기부상 경전철 차량>

(3) 시험항목 및 방법

(가) 정・동적재하 시험: 충격계수

정적재하시험은 해당 고가구조물의 정적 응답이 가장 크게 발생할 수 있는 위치를 선정하여 해당 위치에 차량을 정차하여 정적인 차량의 하중을 재하시킨 후 구조물의 응답을 측정한다. 정적재하시험은 동적재하시험의 결과와 비교를 통한 충격계수를 산정하기 위한 시험으로서 5km/h의 속도로 차량이 진입하여 해당 위치에 정차한다.

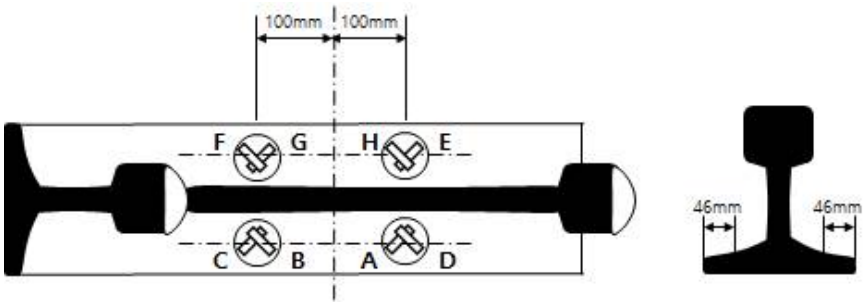
한편, 동적 주행 시험은 차량의 동적 거동에 의한 변형률 및 처짐, 진동 가속도 등의 구조물 응답을 측정한다. 동적 주행 시험은 직선부 · 곡선부 선정구간에서 5km/h 및 10km/h에서 최대운행 속도까지 단계별로 10km/h씩 증속하여 구조물의 응답을 측정한다.



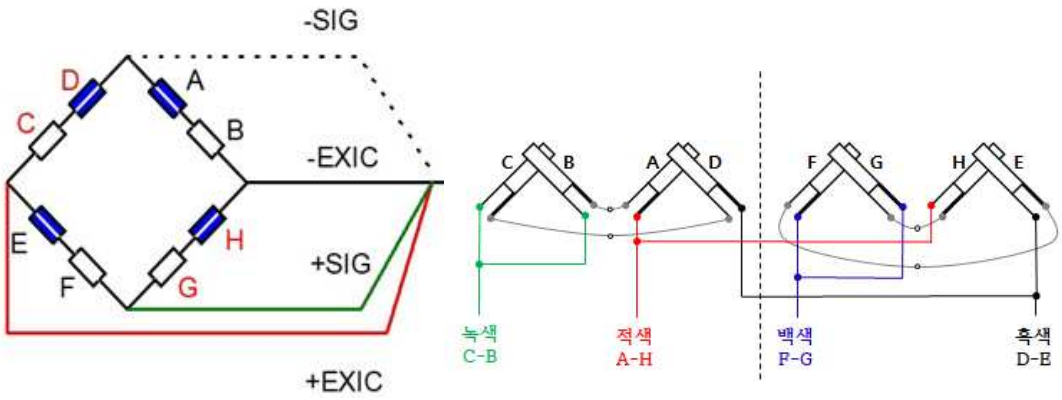
<정・동적 재하시험 예시>

(나) 횡하중 시험

철제차륜형 경전철의 경우, 레일 중립축에 변형율 센서를 부착하고 차량 주행 시 횡하중을 산정한다. 센서에서 발생한 값을 횡압으로 정확히 산정하기 위해 횡압 측정 시험 수행 전에 윤중횡압측정기를 이용하여 센서의 출력값에 대한 사전검증을 수행하는데, 유압계를 이용하여 레일에 0~5tonf 하중을 가하고 이때 발생하는 센서 출력값과 유압계를 통해서 발생한 하중값에 대한 선형회귀분석을 통해 횡하중 측정 시험에 대한 데이터 신뢰성을 확보한다. 미세한 변형률로 인한 저항 변화를 측정해야하기 때문에 검출 회로부분에 Full Bridge회로를 구성하여 정확한 측정이 이루어질 수 있도록 한다. 횡하중 측정에 활용되는 변형율 센서의 회로 구성 방식은 레일 중립축에 횡하중이 발생하였을 경우 발생하는 인장과 압축에 대하여 변형을 측정하고 노이즈를 최소화 하며 신호를 증폭하기 위한 방안으로서 구성은 아래 그림과 같다.



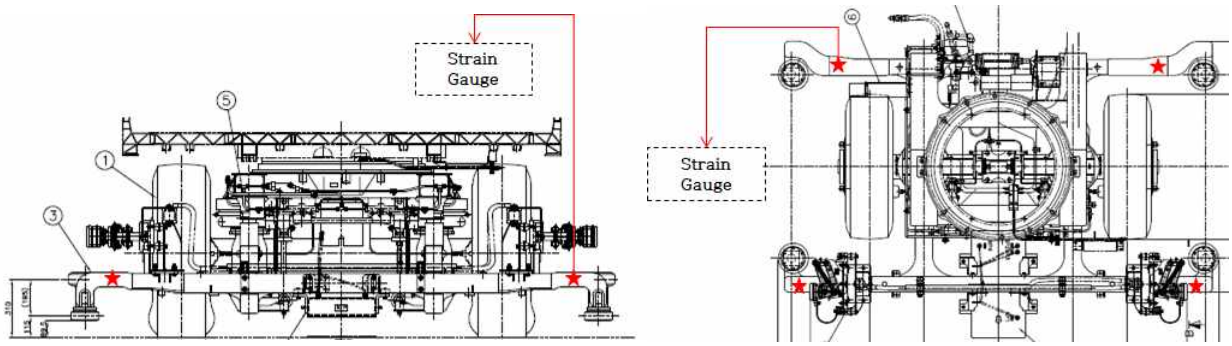
(a) 2축 변형율센서 레일 부착위치



(b) 변형율 센서 회로구성도

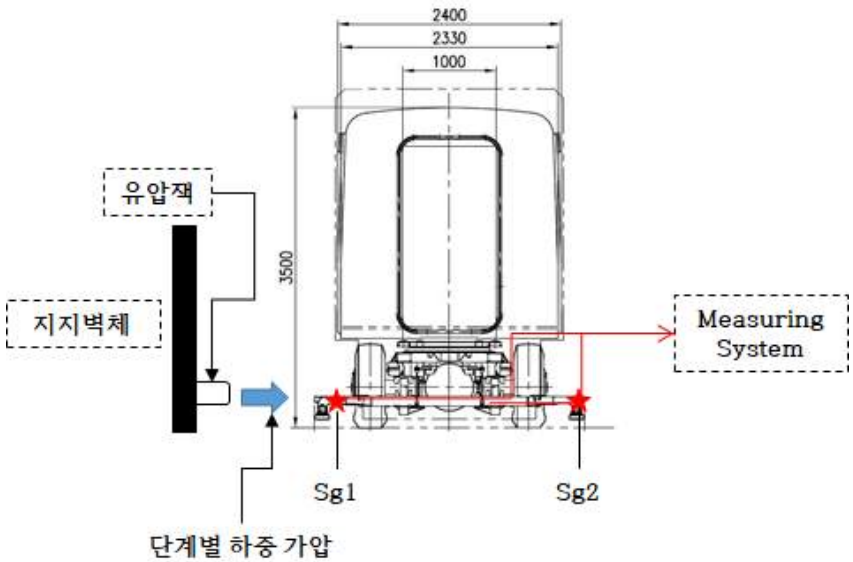
<철제차륜형 경전철 횡하중 시험>

일반 고무차륜형 경전철의 경우, 차량이 주행하는 동안 횡하중의 충격이 안내륜에 전달되므로 차량 안내륜축에 변형율 센서를 부착하고 차량 주행시 횡하중을 산정한다. 변형율 센서값을 횡하중으로 정확히 산정하기 위해 현장시험 및 구조해석을 수행한다. 현장시험의 경우 안내륜축에 유압계를 이용하여 인위적인 단계별 횡하중(0~3tonf, 100kgf 간격)을 가하고 이때 발생하는 변형률 센서 출력값과 유압계를 통해서 발생한 하중값에 대한 선형회귀분석을 수행하였고, 구조해석의 경우 아래 그림과 같이 안내륜에 횡하중(0~3tonf, 100kgf 간격)을 가하여 안내륜축의 센서부착 위치에서의 변형율값을 산출하여 횡하중값에 대한 선형회귀분석을 수행하여 횡하중 측정 시험에 대한 데이터의 신뢰성을 확보한다.

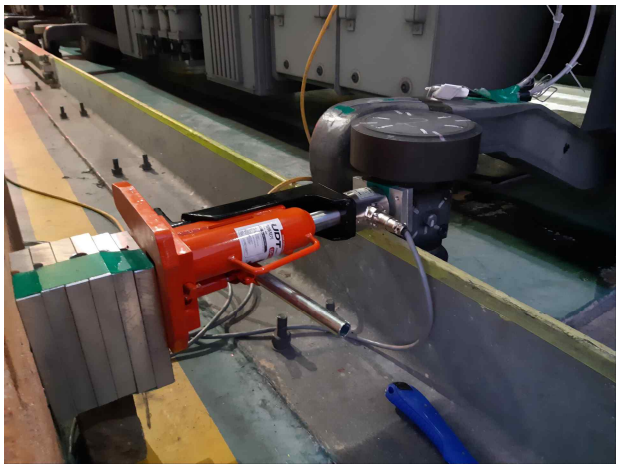


(a) 안내륜 축 게이지 부착위치 (정면도)　　(b) 안내륜 축 게이지 부착위치 (평면도)

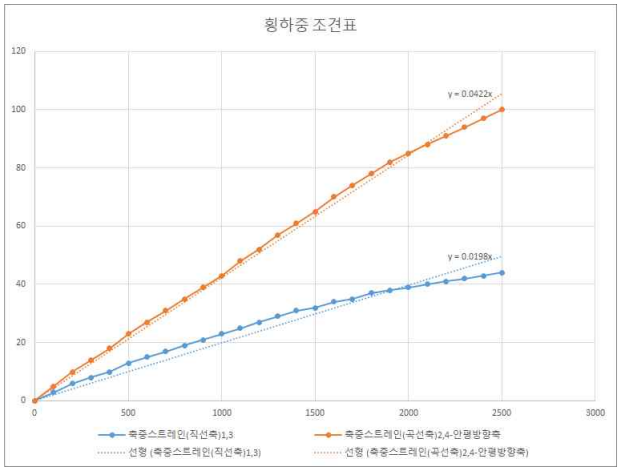
<일반 고무차륜형 경전철 횡하중 측정 시험>



(a) 횡하중/변형율 상관관계 도출시험 구성도

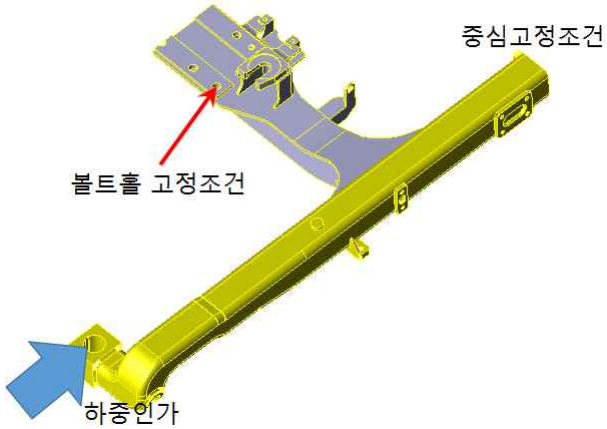


(b) 횡하중/변형율 상관관계 도출 시험

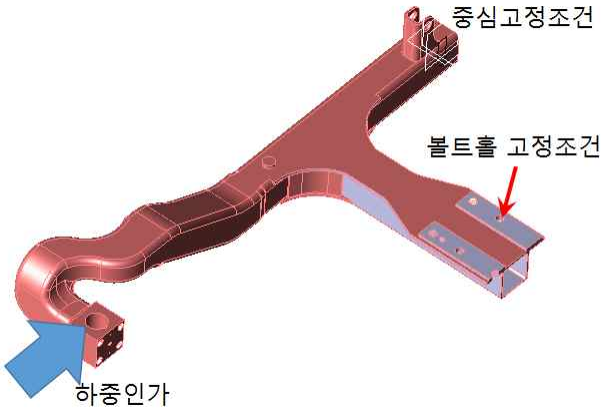


(c) 횡하중/변형율 상관관계 그래프

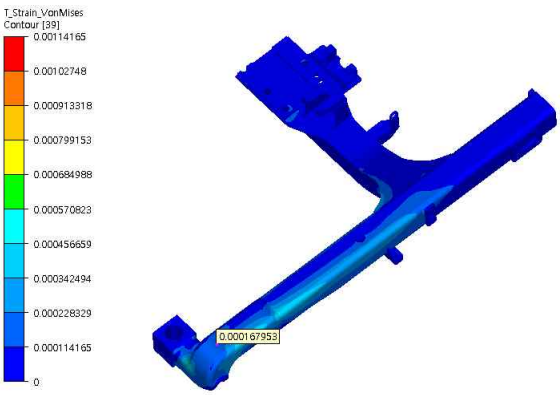
<일반 고무차륜형 경전철 횡하중/응력 상관관계 도출(현장시험)>



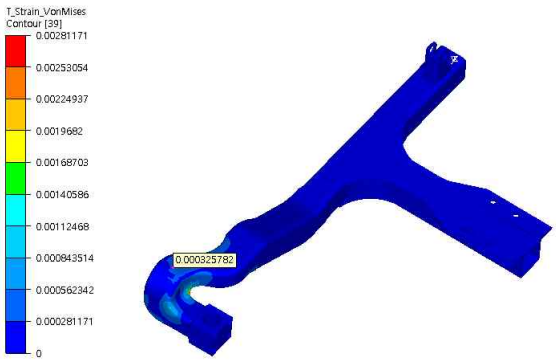
(a) 직선 안내륜축의 구속 및 하중조건



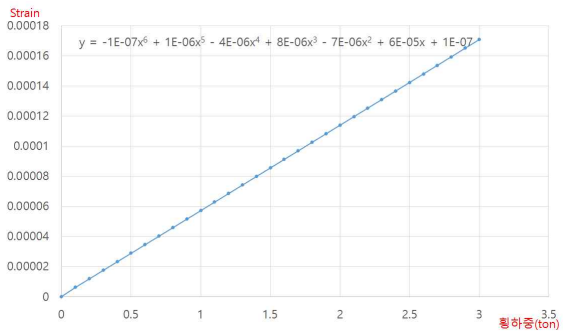
(b) 곡선 안내륜축의 구속 및 하중조건



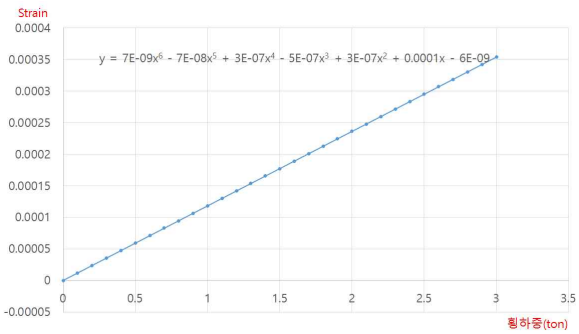
(c) 변형률 해석결과(직선 안내륜축)



(d) 변형률 해석결과(곡선 안내륜축)

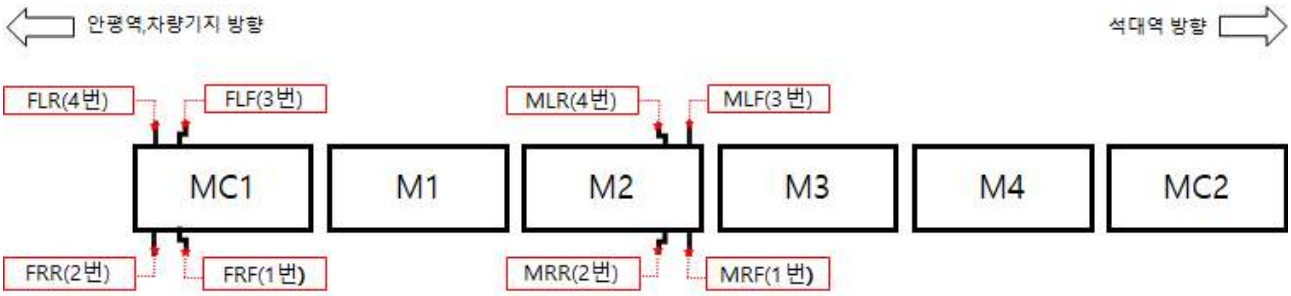


(e) 횡하중/변형율 상관관계 그래프(직선 안내륜축)

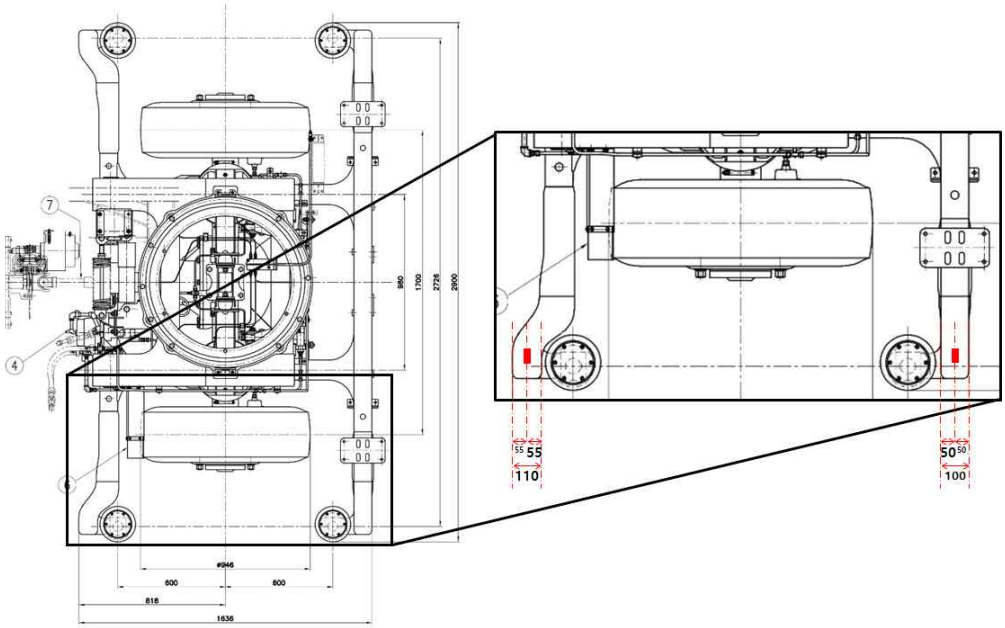


(f) 횡하중/변형율 상관관계 그래프(곡선 안내륜축)

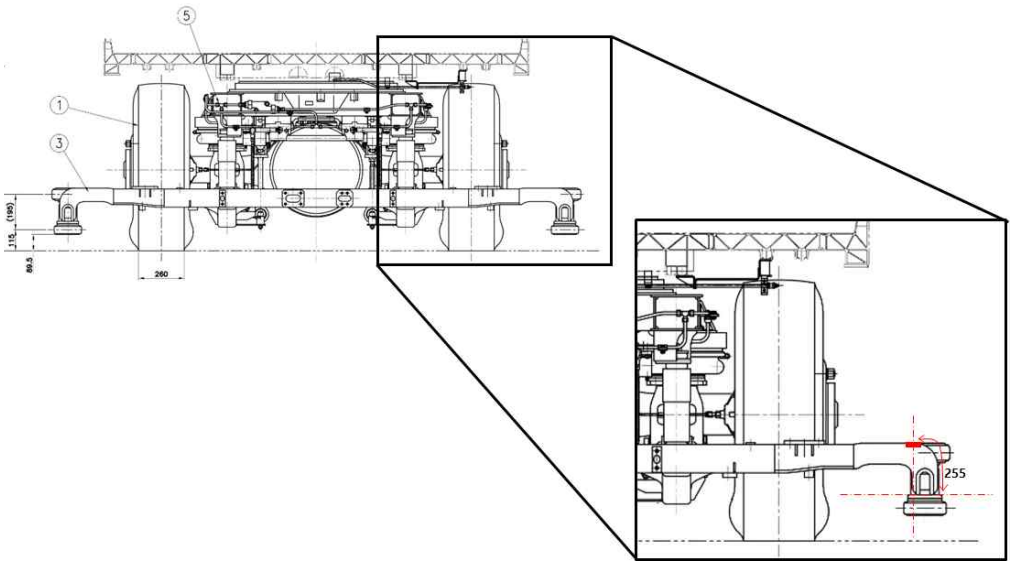
<일반 고무차륜형 경전철 횡하중/응력 상관관계 도출(구조해석)>



<횡하중 센서 부착 열차 위치>



(a) 평면도



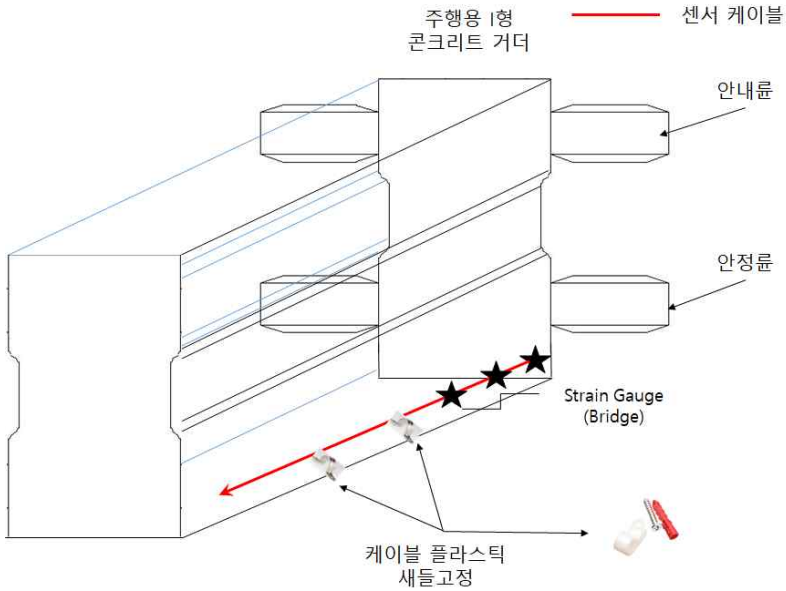
(b) 정면도

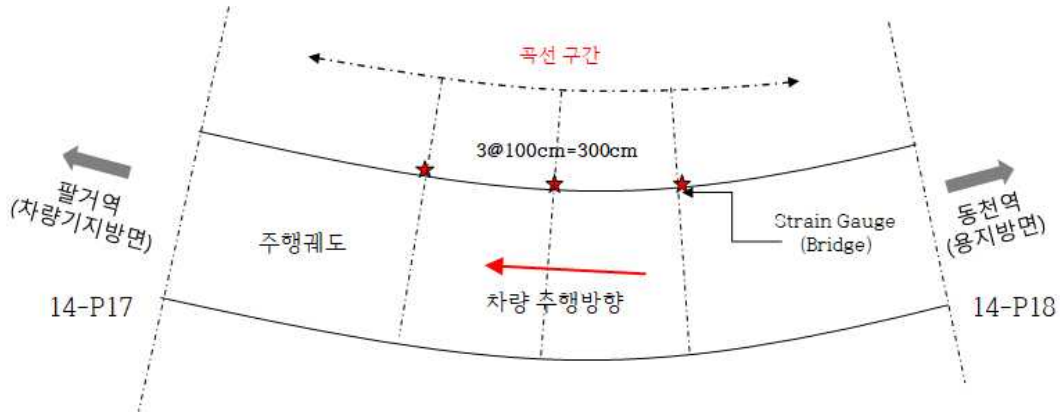
<횡하중 센서 상세 부착 위치>

모노레일형 경전철의 경우, 모노레일에 직접적으로 안내륜과 안전륜이 밀착되므로 거더에 횡하중의 영향이 직접적으로 발생하므로 곡선 궤도빔 거더에 변형율 센서를 부착하여 차량 주행시 횡하중을 산정한다. 구조해석을 통해 단위 횡하중에 의한 궤도빔 거더 변형율값을 산출하여 현장계측된 궤도빔 거더 변형율값으로부터 횡하중을 산정한다.

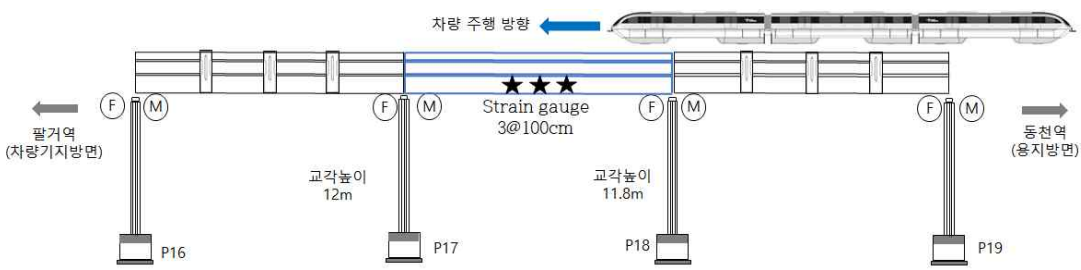


〈모노레일 차량 안내륜 및 고정륜 주행 자욱〉





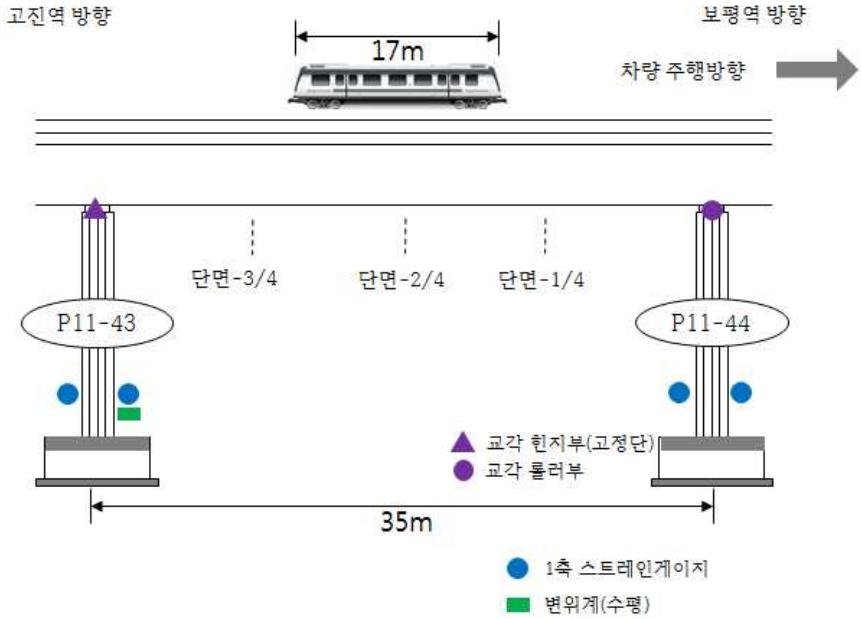
〈횡하중 측정 센서부착위치〉



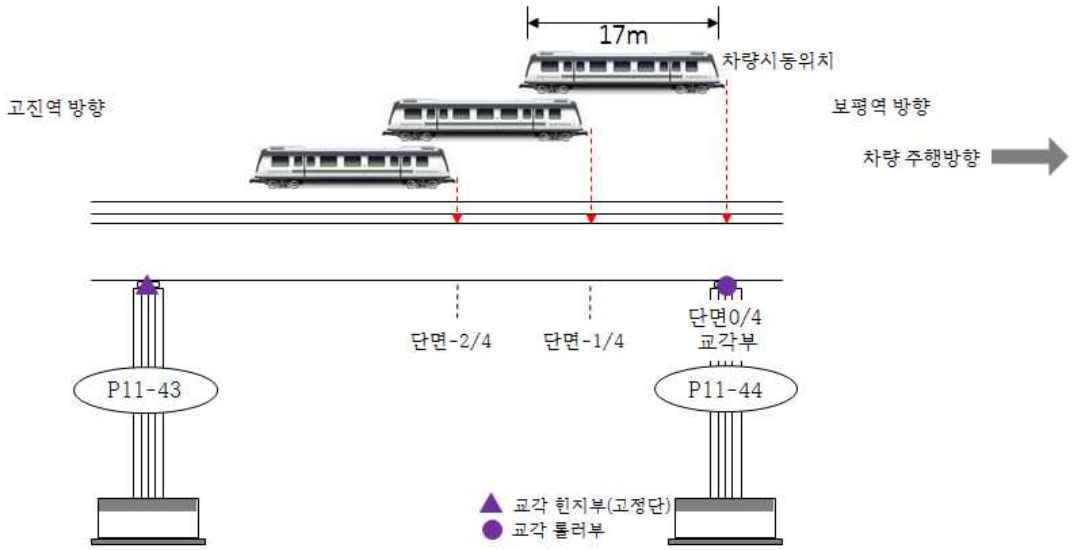
〈모노레일형 경전철 횡하중 측정 시험〉

(다) 시동하중 시험

경량전철 차량 정차 후 구동 시 발생하는 시동하중은 해당 고가구조물에 5km/h의 속도로 차량이 진입하여 해당 위치에 정차하여 고가구조물이 안정된 후 정상적으로 차량이 구동할 때의 고정단 및 가동단 교각에서의 응답을 측정한다. 열차 주행방향은 아래 그림과 같이 열차 정차후 구동시 구동에 의한 차량 종방향 하중이 고정단 교각에 걸리도록 정한다. 경량전철 차량이 해당 고가구조물을 5km/h의 속도로 정상 주행한 경우와 열차 정차후 구동에 의한 교각 응답을 비교하여 구동에 의해 추가 발생한 응답을 구하고, 구조해석을 통해 차량 구동축에 종방향 단위 하중에 의한 교각의 응답값으로부터 시동하중을 산정한다.



(a) 5km/h 속도 차량 정상 주행

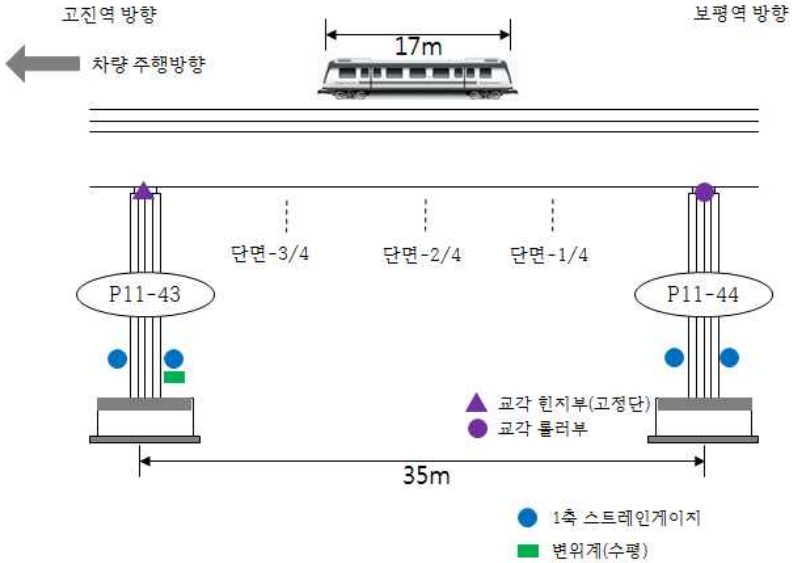


(b) 5km/h 속도로 차량 진입, 해당 시동위치에 차량 정차 후 정상 구동

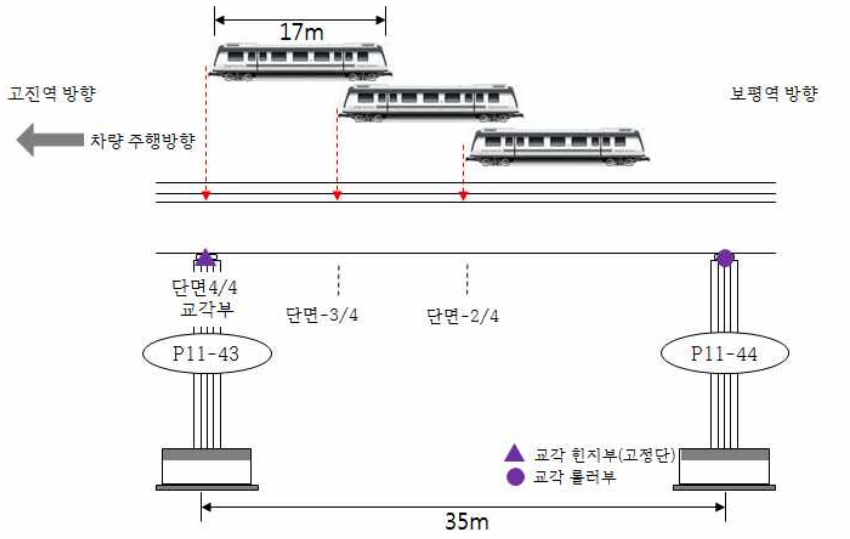
<경량전철 차량 시동하중 시험>

(라) 제동하중 시험

경량전철 차량 주행 중 제동 시 발생하는 제동하중은 해당 고가구조물에 정한 속도 별로 차량이 진입하여 해당 위치에 급제동할 때의 고정단 및 가동단 교각에서의 응답을 측정한다. 열차 주행방향은 아래 그림과 같이 열차 제동에 의한 차량 종방향 하중이 고정단 교각에 걸리도록 정한다. 경량전철 차량이 해당 속도 별로 정상 주행한 경우와 동일한 속도로 진입 후 급제동한 경우의 교각 응답을 비교하여 제동에 의해 추가 발생한 응답을 구하고, 구조해석을 통해 종방향 단위 하중에 대한 교각의 응답값으로부터 제동하중을 산정한다.



(a) 해당 속도별 차량 정상 주행



(b) 해당 속도별 차량 진입, 해당 제동위치에서 차량 급제동

<경량전철 차량 제동하중 시험>

나. 경량전철 활하중 특성 통계 분석 연구

국내 경량전철에 대하여 계측된 데이터로부터 설계수명 100년에 대한 설계 활하중효과를 통계적으로 추정하기 위하여 확률지(Probability paper)를 이용한 추정방법을 적용한다. 이 방법은 Nowak (1999)의 연구에서 AASHTO LRFD의 활하중 모델을 결정하기 위하여 적용되어졌으며, 국내에서는 도로교설계기준(한계상태설계법)(2012)의 KL-510 설계활하중 결정하기 위하여 적용되었다.

확률지란 관측 장소에서 계측된 실험 데이터에 대하여, 그 누적빈도 또는 확률을 도시하기 위한 그래프용지로서, 확률지를 이용한 통계적 추정방법은 통계 문헌(Ang and Tang 1975)에 기술된 이론을 바탕으로 한다. 확률지를 이용하여 계측 기간 동안 통행한 차량에 대한 WIM (Weigh-in-motion) 데이터에 대해 산정한 단면효과를 해당 기간 동안의 데이터를 추출하여 크기순으로 나열하였으며, 확률지를 이용한 통계적 추정방법에 따라 누적확률분포도에 적용하여 설계수명에 대한 추정모멘트를 구하였다. 설계수명 기간 동안 통행한 차량의 대수를 N 이라 하면, 설계수명에 대한 최대 활하중효과의 누적확률 P 는 식 (1)과 같이 구할 수 있다. 이를 통하여 구한 설계수명에 대한 누적확률 P 를 식 (2)에 대입하여 극치분포 누적확률의 역함수 w을 구할 수 있다.

$$P = \frac{N}{N+1} \tag{1}$$

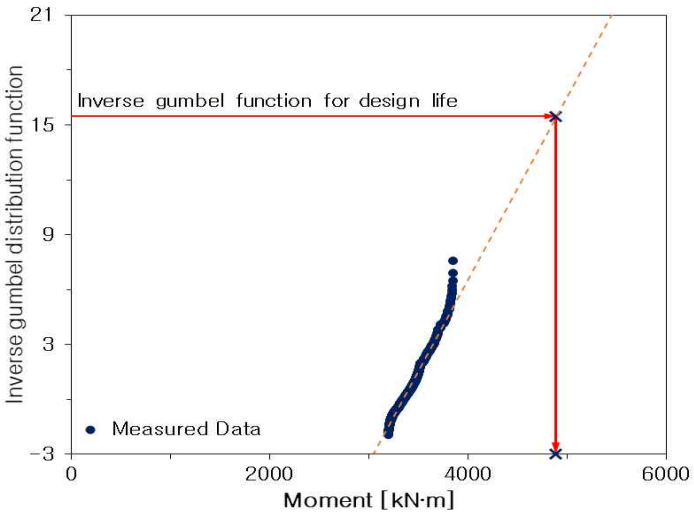
$$w = -\ln(-\ln(P)) \tag{2}$$

다음의 확률변수를 확률지에 나타낸 도식적인 예와 같이, 확률변수의 분포를 극치분포라 가정하여 확률지의 추세선에 외삽(extrapolation)하면 설계수명에 대한 모멘트를 추정할 수 있다.

경량전철 실측 데이터로부터 통계적으로 추정하여 구한 활하중 효과를 대상으로 설계에 적용한 활하중 효과에 대한 비율을 구하여 이를 활하중의 편심계수(bias factor, λ)라고 하며 식으로 표현하면 식 (3)과 같다.

$$\lambda = \frac{\overline{L}}{L_n} \tag{3}$$

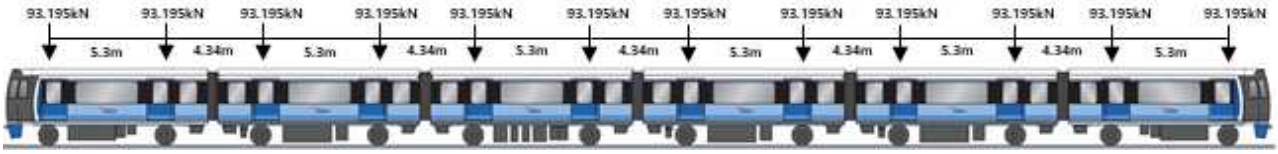
여기서, $\overline{L}$는 설계수명에 대하여 추정된 활하중 효과이며, L_n은 설계에 적용한 활하중 효과를 나타낸다.



<확률지를 이용한 설계수명 대비 활하중 효과 추정>

(1) 일반 고무차륜형 경량전철 하중 WIM데이터 분석

이 연구에서는 설계수명 100년에 대한 경량전철 차량의 최대 활하중효과를 추정하기 위하여 부산 4호선 경량전철 상·하선 차량에 대하여 계측을 수행하였다. 계측된 차량의 축 중량 데이터를 이용하여 영향선을 적용하여 정모멘트, 부모멘트, 전단력에 대한 하중 효과를 확률지를 이용하여 추정하였다.

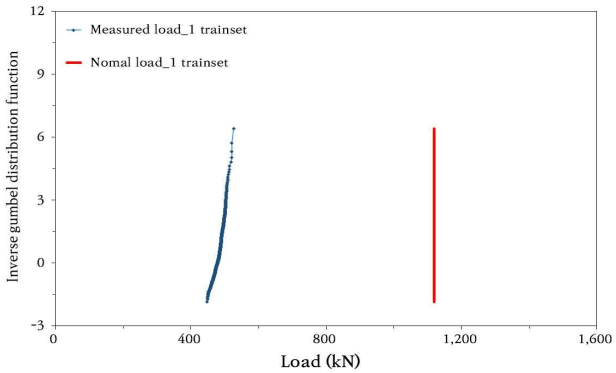


<부산 4호선 경량전철에 대한 축 중량 및 축간 배열>

(가) 계측데이터에 대한 축중 분석

계측데이터에 대한 활하중효과를 분석하기 위하여 부산 4호선 경량전철 차량의 공칭 중량에 대하여 계측되어진 전체 열차차량의 중량에 대하여 분석하였다.

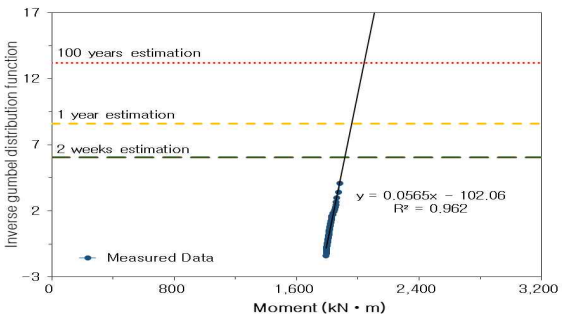
부산 4호선 실측 데이터를 기반으로 분석한 결과로 전체 편성차량(6량) 중량의 편심계수는 계측 최대값에 대하여 상·하선 각 0.471, 0.507로 구해진다. 추가로 데이터의 편차 지표를 나타내는 변동계수(Coefficient of variation, COV)는 계측된 데이터의 편차를 평균값으로 나누어 구할 수 있으며, 상·하선 각 0.028, 0.027로 구해진다.



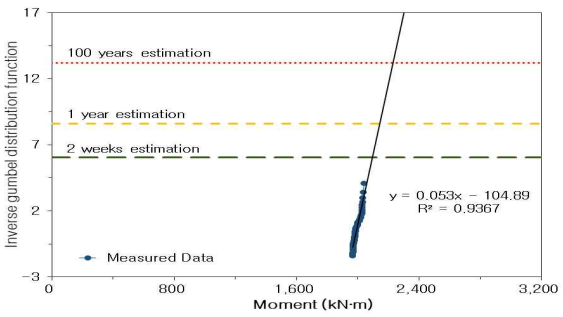
<전체 편성(6량)에 대한 공칭값과 계측값 비교>

(나) 상위 10% 계측데이터에 의한 정모멘트 효과 통계적 추정

부산 4호선 상·하선의 경량전철 차량이 통행하는 교량의 지간은 40m이므로, 이를 적용하여 부산 4호선 상위 10% 계측데이터에 대한 활하중효과를 추정하였다. 아래의 그림은 확률지를 이용하여 구한 부산 4호선 경량전철의 설계수명 100년에 대한 최대 활하중효과를 나타내었다. 이와 동일하게 정모멘트 및 부모멘트, 전단력에 대하여 구하여, 공칭 하중효과에 대한 편심계수를 구한다.



<확률지를 이용한 정모멘트효과(상선)>



<확률지를 이용한 정모멘트효과(하선)>

<상위 데이터를 이용한 최대 모멘트 추정 - 40m 지간 예>

추정 기간	차량수 (대)	PI	w	최대 모멘트 (kN·m)	
				상선	하선
4일	60	0.983607	4.1026	1,879	2,056
2주	210	0.995261	5.3495	1,901	2,080
1년	5,475	0.999817	8.6080	1,959	2,141
100년	547,500	0.999998	13.2131	2,040	2,228

(다) 공칭 활하중 효과와 비교

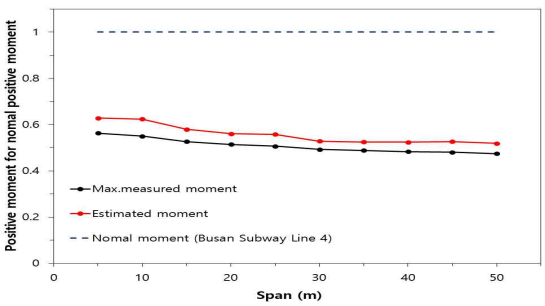
경량전철 차량의 하중효과에 대한 통계특성을 분석하기 위하여, 계측된 데이터의 최대값 및 설계수명 대비 추정값에 대한 편심계수를 구하여 지간별로 비교분석을 수행하였다.

① 정모멘트

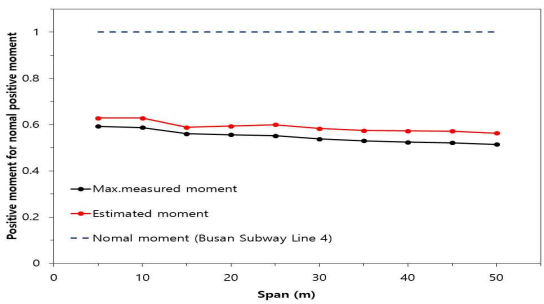
부산 4호선 상·하선 경량전철의 정모멘트 효과의 편심계수는 지간 40m에서 계측 최대값에 대하여 각 0.483, 0.524이며, 추정 정모멘트 효과에 대하여 각 0.523, 0.572로 산출된다.

<상위 데이터를 이용한 활하중 효과 비교 - 정모멘트(kN·m)>

	지간 (m)									
	5 (상/하)	10 (상/하)	15 (상/하)	20 (상/하)	25 (상/하)	30 (상/하)	35 (상/하)	40 (상/하)	45 (상/하)	50 (상/하)
계측 최대값	66/69	145 /155	315 /336	505 /546	793 /863	1,082 /1,182	1,470 /1,596	1,882 /2,040	2,376 /2,578	2,884 /3,126
추정값	75/73	164 /166	347 /352	550 /583	872 /938	1,162 /1,281	1,581 /1,730	2,040 /2,228	2,601 /2,827	3,150 /3,420
공칭값	117	264	599	982	1,565	2,198	3,013	3,896	4,944	6,077



<공칭값에 대한 정모멘트효과 비교 - 상선>



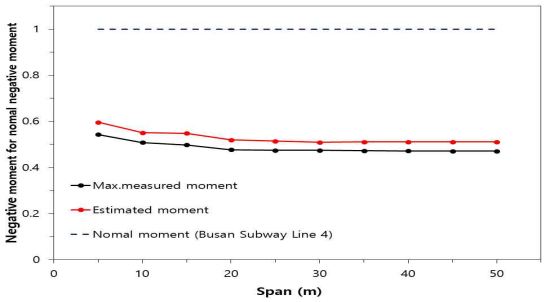
<공칭값에 대한 정모멘트효과 비교 - 하선>

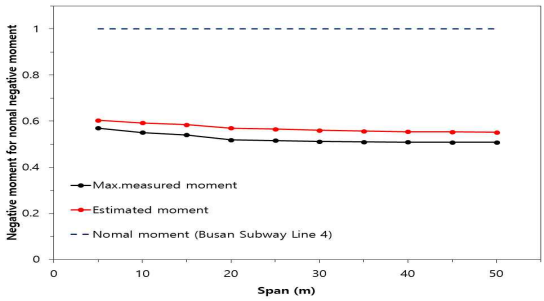
② 부모멘트

부산 4호선 상·하선 경량전철의 부모멘트 효과의 편심계수는 지간 40m에서 계측 최대값에 대하여 각 0.472, 0.509이며, 추정 부모멘트 효과에 대하여 각 0.511, 0.570로 산출된다.

<상위 데이터를 이용한 활하중 효과 비교 - 부모멘트(kN・m)>

	지간 (m)									
	5 (상/하)	10 (상/하)	15 (상/하)	20 (상/하)	25 (상/하)	30 (상/하)	35 (상/하)	40 (상/하)	45 (상/하)	50 (상/하)
계측 최대값	-49 /-51	-145 /-157	-286 /-310	-481 /-523	-730 /-794	-1,033 /-1,115	-1,320 /-1,424	-1,559 /-1,682	-1,758 /-1,898	-1,926 /-2,080
추정값	-53 /-54	-157 /-169	-315 /-336	-523 /-575	-791 /-871	-1,109 /-1,222	-1,426 /-1,557	-1,688 /-1,883	-1,907/ -2,065	-2,089/ -2,259
공칭값	-90	-285	-574	-1,008	-1,539	-2,180	-2,795	-3,306	-3,733	-4,094





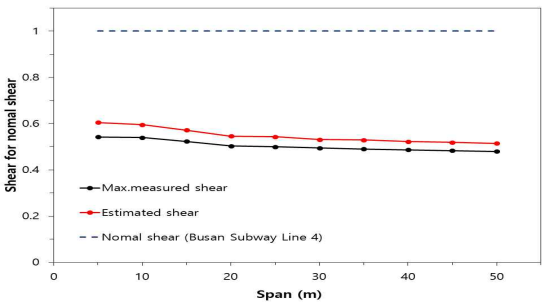
<공칭값에 대한 부모멘트효과 비교 - 상선> <공칭값에 대한 부모멘트효과 비교 - 하선>

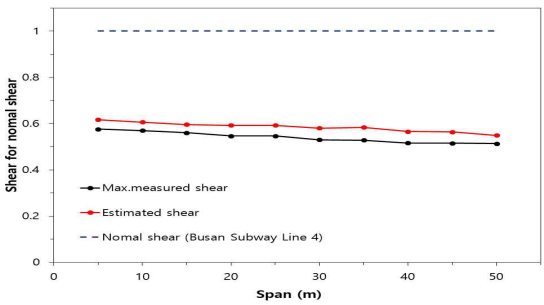
③ 전단력

부산 4호선 상·하선 경량전철의 전단력 효과의 편심계수는 지간 40m에서 계측 최대값에 대하여 각 0.487, 0.515이며, 추정 전단력 효과에 대하여 각 0.523, 0.565로 산출된다.

<상위 데이터를 이용한 활하중 효과 비교 - 전단력(kN)>

	지간 (m)									
	5 (상/하)	10 (상/하)	15 (상/하)	20 (상/하)	25 (상/하)	30 (상/하)	35 (상/하)	40 (상/하)	45 (상/하)	50 (상/하)
계측 최대값	48/50	71/75	91/98	108/117	131/143	149/160	171/185	194/205	215/230	237/254
추정값	54/54	78/79	100/104	117/127	142/155	160/175	185/204	208/225	231/252	255/272
공칭값	87	131	174	215	262	302	349	398	446	495





<공칭값에 대한 전단력 비교 - 상선> <공칭값에 대한 전단력 비교 - 하선>

부산 4호선 경량전철의 WIM데이터 기반으로 40m지간에 대한 하중효과의 통계특성을 다음의 표와 같이 정리하였다. 표와 같이 계측 최대값 경우의 편심계수는 정모멘트 효과, 부모멘트 효과, 전단력 효과에 대하여 각 최대 0.524, 0.509, 0.515이며, 추정값 경우의 편심계수는 각 최대 0.572, 0.57

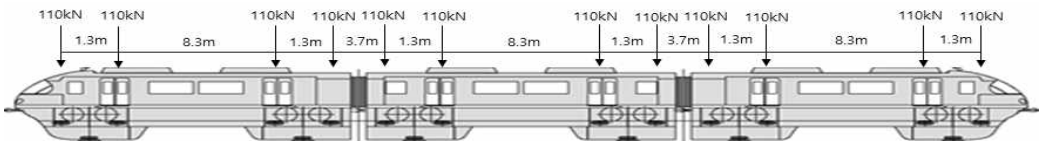
0, 0.565로 구해진다. 이에 고무차륜 형태의 경량전철의 경우에 공칭하중 효과가 설계수명 100년 대비 추정하중 효과보다 43%의 안전율을 가지는 것으로 확인된다. 추가로 변동계수는 정모멘트 효과, 부모멘트 효과, 전단력 효과에 대하여 0.010~0.012로 산정된다.

<부산 4호선 경량전철 WIM 데이터기반 하중 통계특성>

		편심계수				변동계수	
		계측 최대값		추정값			
		상선	하선	상선	하선	상선	하선
중량	편성차량	0.471	0.507	-	-	0.028	0.027
하중효과	정모멘트	0.483	0.524	0.523	0.572	0.011	0.011
	부모멘트	0.472	0.509	0.511	0.570	0.011	0.010
	전단력	0.487	0.515	0.523	0.565	0.010	0.012

(2) 모노레일형 경량전철 하중 WIM데이터 분석

본 연구에서는 설계수명 100년에 대한 경량전철 차량의 최대 활하중효과를 추정하기 위하여, 2018.12.13.~2018.12.20.(8일) 동안에 모노레일형 경량전철(대구 3호선 경량전철)에 대하여 계측을 수행한다. 계측된 차량의 축 중량 데이터를 이용하여 영향선을 적용하여 정모멘트, 부모멘트, 전단력에 대한 하중 효과를 확률지를 이용하여 추정한다.

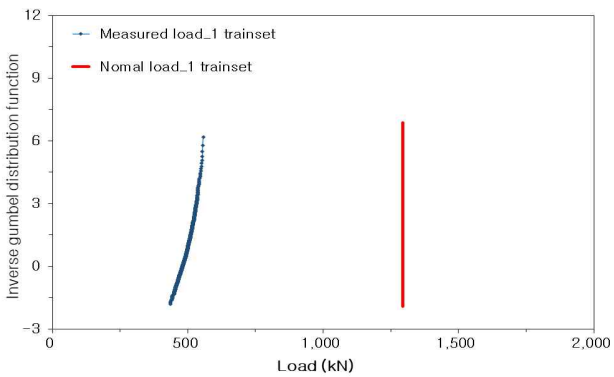


<대구 3호선 경량전철에 대한 축 중량>

(가) 계측데이터에 대한 축중 분석

계측데이터의 활하중효과를 분석하기 위하여 대구 3호선 경량전철 차량의 공칭 중량에 대하여 계측되어진 전체 열차차량의 중량에 대하여 분석하였다.

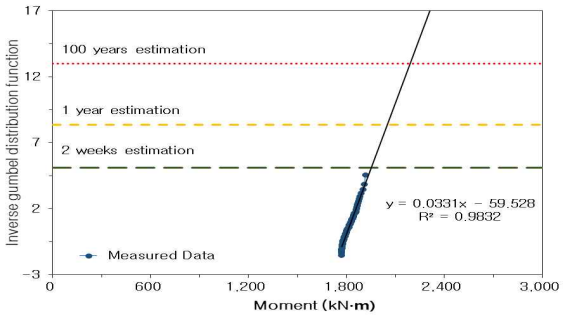
대구 3호선 경량전철 실측 데이터를 기반으로 분석한 결과로 계측 최대값에 대하여 전체 편성차량(3량) 중량의 편심계수는 0.431로 구해진다. 추가로 변동계수는 전체 편성차량 중량에 대하여 0.048로 구해진다.



<전체 편성(3량)에 대한 공칭값과 계측값 비교>

(나) 상위 10% 계측데이터에 의한 정모멘트 효과 통계적 추정

대구 3호선 경량전철 구간에서 차량이 통행하는 교량의 지간은 30m이므로, 이에 대하여 상위 10% 계측데이터에 대한 활하중효과를 추정한다.



<확률지를 이용한 정모멘트효과>

<상위 데이터를 이용한 최대 모멘트 추정 - 30m 지간 예>

추정기간	차량수 (대)	PI	w	최대 모멘트 (kN・m)
8일	95	0.989583	4.5591	1,936
2주	166	0.994012	5.1150	1,953
1년	4,334	0.999769	8.3744	2,051
100년	433,400	0.999998	12.9794	2,191

(다) 공칭 활하중 효과와 비교

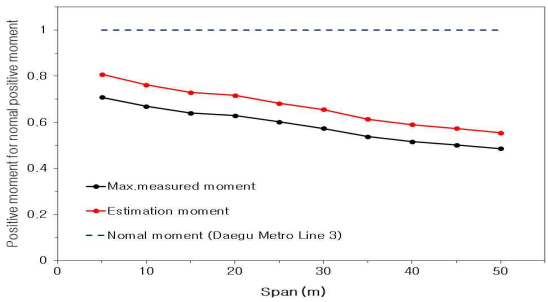
경량전철 차량의 하중효과에 대한 통계특성을 분석하기 위하여, 계측된 데이터의 최대값 및 설계수명 대비 추정값에 대한 편심계수를 구하여 지간별로 비교분석을 수행하였다.

① 정모멘트

대구 3호선 경량전철의 정모멘트 효과의 편심계수는 지간 30m에서 계측 최대값에 대하여 0.573이며, 추정 정모멘트 효과에 대하여 0.655로 산출된다.

<상위 데이터를 이용한 활하중 효과 비교 - 정모멘트(kN・m)>

	지간 (m)									
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
계측 최대값	141	361	690	1,032	1,443	1,916	2,495	3,088	3,682	4,294
추정값	161	411	787	1,175	1,636	2,191	2,848	3,536	4,211	4,898
공칭값	200	540	1,079	1,640	2,401	3,345	4,646	5,994	7,343	8,849



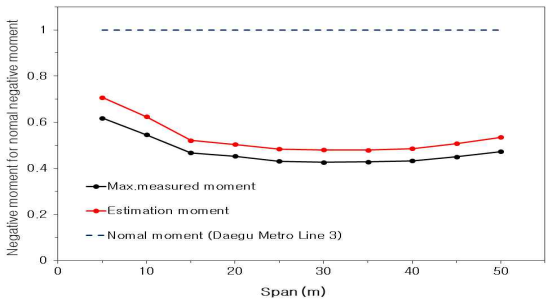
<공칭값에 대한 정모멘트 효과 비교>

② 부모멘트

대구 3호선 경량전철의 부모멘트 효과의 편심계수는 지간 30m에서 계측 최대값에 대하여 0.426이며, 추정 부모멘트 효과에 대하여 0.480으로 산출된다.

<상위 데이터를 이용한 활하중 효과 비교 - 부모멘트(kN・m)>

	지간 (m)									
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
계측 최대값	-117	-247	-502	-711	-1,015	-1,271	-1,490	-1,680	-1,894	-2,121
추정값	-133	-282	-561	-792	-1,139	-1,431	-1,669	-1,886	-2,137	-2,397
공칭값	-189	-452	-1,076	-1,573	-2,356	-2,985	-3,483	-3,884	-4,212	-4,484



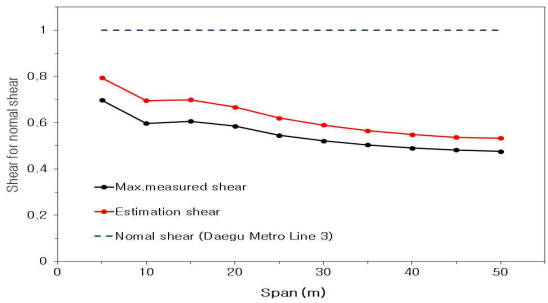
<공칭값에 대한 부모멘트 효과 비교>

③ 전단력

대구 3호선 경량전철의 전단력 효과의 편심계수는 지간 30m에서 계측 최대값에 대하여 0.522이며, 추정 전단력 효과에 대하여 0.590으로 산출된다.

<상위 데이터를 이용한 활하중 효과 비교 - 전단력(kN)>

	지간 (m)									
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
계측 최대값	116	156	189	214	245	263	290	313	331	346
추정값	132	181	218	244	279	298	325	350	369	387
공칭값	166	261	312	366	450	505	575	638	687	726



<공칭값에 대한 전단력 효과 비교>

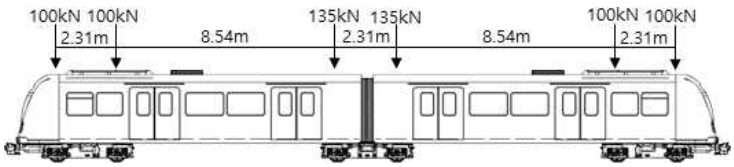
대구 3호선 경량전철의 WIM데이터 기반으로 30m지간에 대한 하중효과의 통계특성을 다음의 표와 같이 정리하였다. 표와 같이 계측 최대값 경우의 편심계수는 정모멘트 효과, 부모멘트 효과, 전단력 효과에 대하여 각 0.573, 0.426, 0.522이며, 추정값 경우의 편심계수는 각 0.655, 0.480, 0.590으로 구해진다. 이에 모노레일 형태의 경량전철의 경우에 공칭하중 효과가 설계수명 100년 대비 추정하중 효과보다 34%의 안전율을 가지는 것으로 확인된다. 추가로 변동계수는 정모멘트 효과, 부모멘트 효과, 전단력 효과에 대하여 0.017~0.020으로 산정된다.

<대구 3호선 경량전철 WIM 데이터기반 하중 통계특성>

		편심계수		변동계수
		계측 최대값	추정값	
중량	편성차량	0.431	-	0.048
하중효과	정모멘트	0.573	0.655	0.020
	부모멘트	0.426	0.480	0.017
	전단력	0.522	0.590	0.019

(3) 일반 철제차륜형 경량전철 하중 WIM데이터 분석

본 연구에서는 설계수명 100년에 대한 경량전철 차량의 최대 활하중효과를 추정하기 위하여, 2019.10.08.~2019.10.15.(8일) 동안에 일반 철제차륜형 경량전철(부산-김해 경량전철)에 대하여 계측을 수행한다. 계측된 차량의 축 중량 데이터를 이용하여 영향선을 적용하여 정모멘트, 부모멘트, 전단력에 대한 하중효과를 확률지를 이용하여 추정한다.

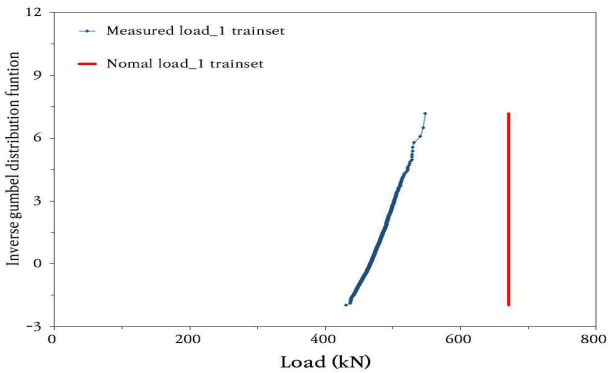


<부산-김해 경량전철에 대한 축 중량>

(가) 계측데이터에 대한 축중 분석

계측데이터의 활하중효과를 분석하기 위하여 부산-김해 경량전철 차량의 공칭 중량에 대하여, 전체 열차 차량인 2량에 대한 중량 분석을 수행한다.

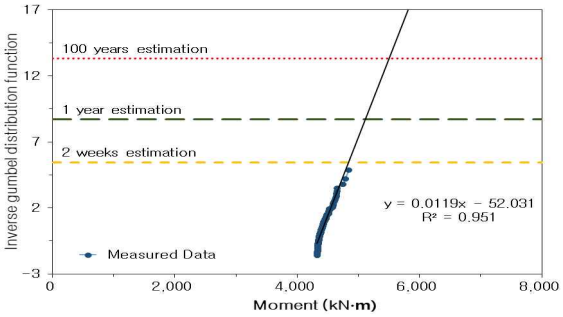
부산-김해 경량전철 실측 데이터를 기반으로 분석한 결과로 계측 최대값에 대하여 전체 편성차량(2량) 중량의 편심계수는 0.817로 구해진다. 추가로 변동계수는 전체 편성차량 중량에 대하여 0.035로 구해진다.



<전체 편성(2량)에 대한 공칭값과 계측값 비교>

(나) 상위 10% 계측데이터에 의한 정모멘트 효과 통계적 추정

부산-김해 경량전철 구간에서 차량이 통행하는 교량의 지간은 50m이므로, 이에 대하여 상위 10% 계측데이터에 대한 활하중효과를 추정한다.



<확률지를 이용한 정모멘트효과>

<상위 데이터를 이용한 최대 모멘트 추정 - 50m 지간 예>

추정기간	차량수 (대)	PI	w	최대 모멘트 (kN・m)
8일	131	0.9924242	4.87900	4,782
2주	230	0.9956710	5.44025	4,830
1년	5,977	0.9998327	8.69576	5,103
100년	597,700	0.9999983	13.30085	5,490

(다) 공칭 활하중 효과와 비교

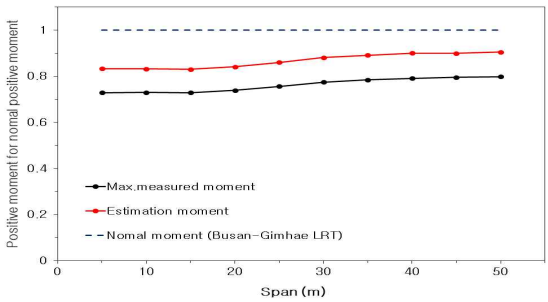
경량전철 차량의 하중효과에 대한 통계특성을 분석하기 위하여, 계측된 데이터의 최대값 및 설계수명 대비 추정값에 대한 편심계수를 구하여 지간별로 비교분석을 수행하였다.

① 정모멘트

부산-김해 경량전철의 정모멘트 효과의 편심계수는 지간 50m에서 계측 최대값에 대하여 0.798이며, 추정 정모멘트 효과에 대하여 0.904로 산출된다.

<상위 데이터를 이용한 활하중 효과 비교 - 정모멘트(kN・m)>

	지간 (m)									
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
계측 최대값	148	394	640	940	1,437	2,105	2,790	3,475	4,160	4,844
추정값	169	449	729	1,070	1,635	2,396	3,171	3,956	4,708	5,490
공칭값	203	540	878	1,273	1,900	2,720	3,558	4,395	5,233	6,070



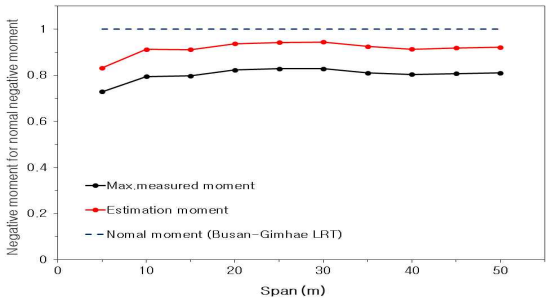
<공칭값에 대한 정모멘트 효과 비교>

② 부모멘트

부산-김해 경량전철의 부모멘트 효과의 편심계수는 지간 50m에서 계측 최대값에 대하여 0.810이며, 추정 부모멘트 효과에 대하여 0.922로 산출된다.

<상위 데이터를 이용한 활하중 효과 비교 - 부모멘트(kN・m)>

	지간 (m)									
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
계측 최대값	-78	-325	-520	-814	-1,048	-1,227	-1,370	-1,672	-1,981	-2,282
추정값	-89	-373	-594	-926	-1,192	-1,398	-1,565	-1,899	-2,254	-2,598
공칭값	-107	-409	-652	-989	-1,265	-1,481	-1,692	-2,080	-2,454	-2,819



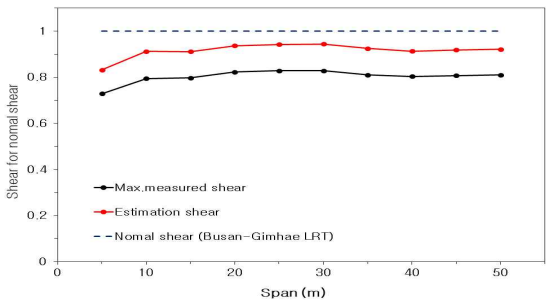
<공칭값에 대한 부모멘트 효과 비교>

③ 전단력

부산-김해 경량전철의 전단력 효과의 편심계수는 지간 50m에서 계측 최대값에 대하여 0.820이며, 추정 전단력 효과에 대하여 0.938로 산출된다.

<상위 데이터를 이용한 활하중 효과 비교 - 전단력(kN)>

	지간 (m)									
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
계측 최대값	137	161	196	231	259	296	332	359	380	397
추정값	157	183	223	264	298	340	381	411	435	454
공칭값	189	221	262	303	336	361	405	438	464	484



<공칭값에 대한 전단력 효과 비교>

부산-김해 경량전철의 WIM데이터 기반으로 50m지간에 대한 하중효과의 통계특성을 다음의 표와 같이 정리하였다. 표와 같이 계측 최대값 경우의 편심계수는 정모멘트 효과, 부모멘트 효과, 전단력 효과에 대하여 각 0.798, 0.810, 0.820이며, 추정값 경우의 편심계수는 각 0.904, 0.922, 0.938로 구해진다. 이에 일반 철제차륜 형태의 경량전철의 경우에 공칭하중 효과가 설계수명 100년 대비 추정하

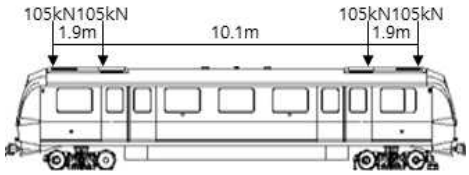
중 효과보다 6%의 안전율을 가지는 것으로 확인된다. 추가로 변동계수는 정모멘트 효과, 부모멘트 효과, 전단력 효과에 대하여 0.021~0.024로 산정된다.

<부산-김해 경량전철 WIM 데이터기반 하중 통계특성>

		편심계수		변동계수
		계측 최대값	추정값	
중량	편성차량	0.817	-	0.035
하중효과	정모멘트	0.798	0.904	0.022
	부모멘트	0.810	0.922	0.022
	전단력	0.820	0.938	0.024

(4) 선형유도전동기(LIM)방식 철제차륜형 경량전철 하중 WIM데이터 분석

본 연구에서는 설계수명 100년에 대한 경량전철 차량의 최대 활하중효과를 추정하기 위하여 2019. 09.28.~2019.10.05.(8일) 동안에 용인 차량에 대하여 계측을 수행한다.

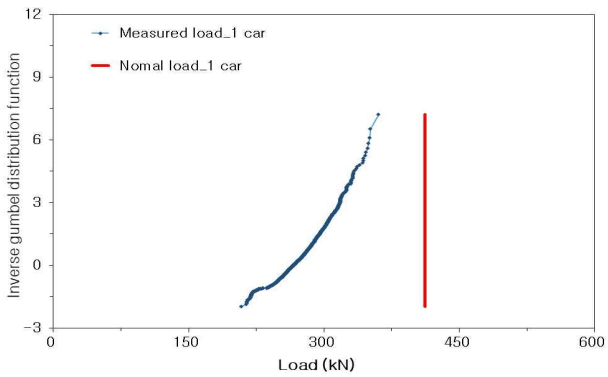


<용인 경량전철에 대한 축 중량>

계측데이터의 활하중효과를 분석하기 위하여 용인 경량전철 차량의 공칭 중량에 대하여 계측된 전체 열차 차량인 1량에 대한 중량 분석을 수행한다.

계측데이터의 활하중효과를 분석하기 위하여 용인 경량전철 차량의 공칭 중량에 대하여, 전체 열차 차량인 1량에 대한 중량 분석을 수행한다.

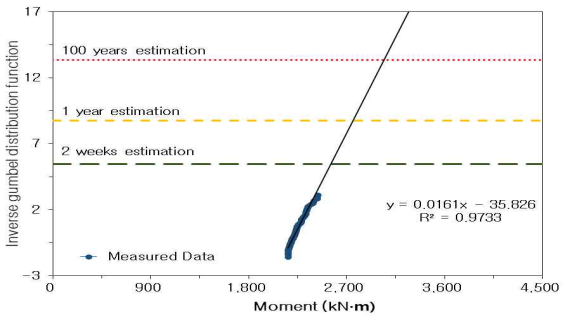
용인 경량전철 실측 데이터를 기반으로 분석한 결과로 계측 최대값에 대하여 설계 편성차량(1량) 중량의 편심계수는 0.875로 구해진다. 추가로 변동계수는 전체 편성차량 중량에 대하여 0.089로 구해진다.



<전체 편성(1량)에 대한 공칭값과 계측값 비교>

(나) 상위 10% 계측데이터에 의한 정모멘트 효과 통계적 추정

용인 경량전철 구간에서 차량이 통행하는 교량의 지간은 40m이므로, 이에 대하여 상위 10% 계측데이터에 대한 활하중효과를 추정한다.



<확률지를 이용한 정모멘트효과>

<상위 데이터를 이용한 최대 모멘트 추정 - 40m 지간 예>

추정기간	차량수 (대)	PI	w	최대 모멘트 (kN・m)
8일	136	0.9927007	4.91632	2,531
2주	238	0.9958159	5.47437	2,565
1년	6,205	0.9998389	8.73319	2,768
100년	620,500	0.9999984	13.33828	3,054

(다) 공칭 활하중 효과와 비교

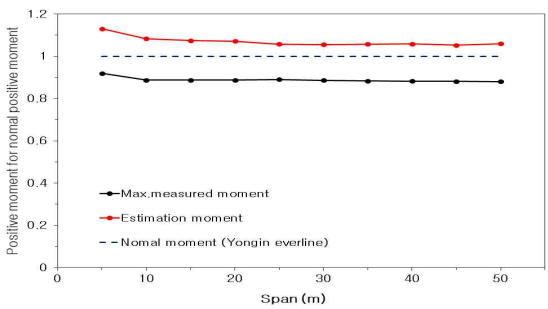
경량전철 차량의 하중효과에 대한 통계특성을 분석하기 위하여, 계측된 데이터의 최대값 및 설계수명 대비 추정값에 대한 편심계수를 구하여 지간별로 비교분석을 수행하였다.

① 정모멘트

용인 경량전철의 정모멘트 효과의 편심계수는 지간 40m에서 계측 최대값에 대하여 0.882이며, 추정 정모멘트 효과에 대하여 1.059로 산출된다.

<상위 데이터를 이용한 활하중 효과 비교 - 정모멘트(kN・m)>

	지간 (m)									
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
계측 최대값	147	370	599	827	1,193	1,644	2,094	2,545	2,996	3,446
추정값	180	452	725	999	1,416	1,956	2,506	3,054	3,579	4,146
공칭값	160	417	675	932	1,339	1,854	2,369	2,884	3,399	3,914



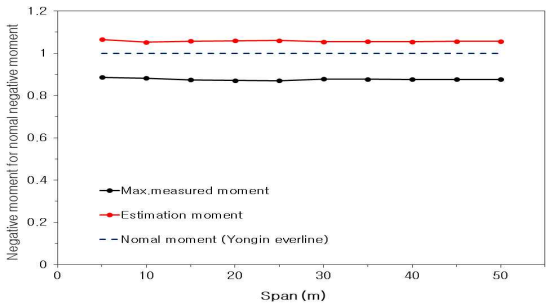
<공칭값에 대한 정모멘트효과 비교>

② 부모멘트

용인 경량전철의 부모멘트 효과의 편심계수는 지간 40m에서 계측 최대값에 대하여 0.877이며, 추정 부모멘트 효과에 대하여 1.055로 산출된다.

<상위 데이터를 이용한 활하중 효과 비교 - 부모멘트(kN・m)>

	지간 (m)									
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
계측 최대값	-74	-295	-509	-633	-713	-858	-1,056	-1,249	-1,437	-1,623
추정값	-89	-353	-616	-769	-868	-1,030	-1,271	-1,502	-1,733	-1,957
공칭값	-83	-335	-582	-726	-818	-977	-1,204	-1,424	-1,640	-1,852



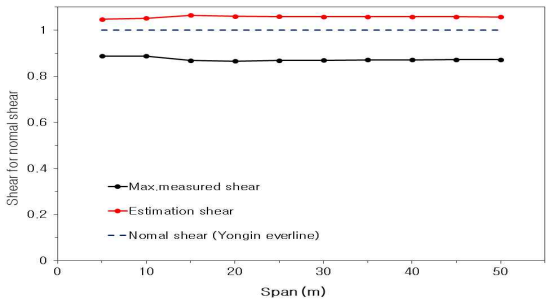
<공칭값에 대한 부모멘트 효과 비교>

③ 전단력

용인 경량전철의 전단력 효과의 편심계수는 지간 40m에서 계측 최대값에 대하여 0.871이며, 추정 전단력 효과에 대하여 1.058로 산출된다.

<상위 데이터를 이용한 활하중 효과 비교 - 전단력(kN)>

	지간 (m)									
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
계측 최대값	130	151	168	206	237	251	267	279	288	295
추정값	153	179	206	252	289	306	324	338	349	358
공칭값	146	170	194	238	273	289	307	320	330	338



<공칭값에 대한 전단력 효과 비교>

용인 경량전철의 WIM데이터 기반으로 40m지간에 대한 하중효과의 통계특성을 다음의 표와 같이 정리하였다. 표와 같이 계측 최대값 경우의 편심계수는 정모멘트 효과, 부모멘트 효과, 전단력 효과에 대하여 각 0.882, 0.877, 0.871이며, 추정값 경우의 편심계수는 각 1.059, 1.055, 1.058로 구해진다. 이에 선형유도전동기(LIM형식) 철제차륜 형태의 경량전철의 경우에 설계수명 100년 대비 추정하중 효과의 편심계수가 1.059로 공칭하중 효과보다 큰 값이 산정되나, 경량전철 차량은 화물차가 아닌 인원수송차량으로 만차 인원의 한계로 공칭 하중보다 실제 하중이 클 가능성이 희박하다. 그러나 용인 경량전철 구조물에 대하여는 활하중 편심계수를 1.05로 하여 신뢰도분석을 통하여 제안하는 국내 경량전철 목표신뢰도지수를 만족하는 지 여부를 검토한다. 추가로 변동계수는 정모멘트 효과,

부모멘트 효과, 전단력 효과에 대하여 0.034~0.035로 산정된다.

<용인 경량전철 WIM 데이터기반 하중 통계특성>

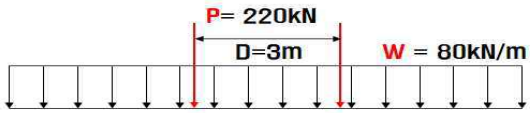
		편심계수		변동계수
		계측 최대값	추정값	
중량	편성차량	0.875	-	0.089
하중효과	정모멘트	0.882	1.059	0.034
	부모멘트	0.877	1.055	0.035
	전단력	0.871	1.058	0.035

(5) 소결: 경량전철 설계하중 제안

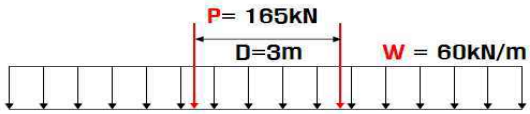
(가) 국내외 열차관련 표준 설계하중

① 국내 철도교설계기준(2013)

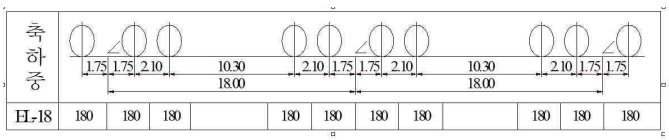
여객선과 도시철도를 제외한 철도노선인 여객화물혼용구간의 철도교량은 KRL-2012 표준열차하중을 적용하고, 관계장관이 지정, 고시한 여객 전용선인 경우 표준열차하중의 75%를 적용한 KRL-2012 여객전용표준열차하중을 적용한다. 또한 도시철도 운행이 주목적인 전동차 전용선인 경우에는 EL-18 표준열차 하중을 적용한다.



<KRL-2012 표준열차하중도 (여객, 화물 혼용선)>



<KRL-2012 여객전용 표준열차하중도>

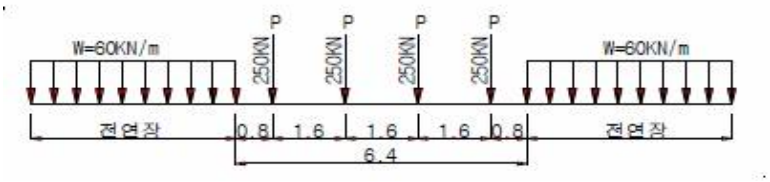


<EL표준열차하중(단위:kN/m)>

② 철도교설계기준(한계상태설계법)(2018)

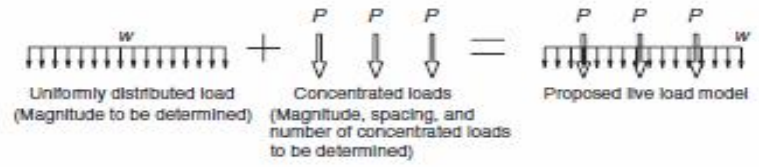
철도교 설계기준의 열차 하중과 동일하다.

③ 호남고속철도설계치짐



<호남고속철설계지침 표준활하중>

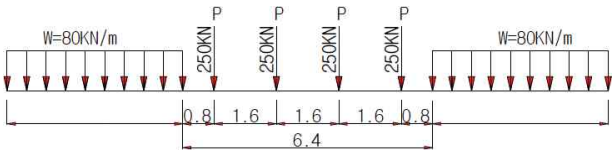
④ NCHRP(National Cooperative Highway Research Program Research report 851, 2017)



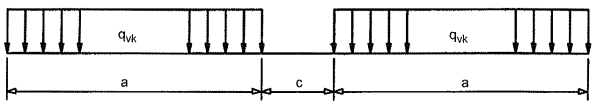
P	151.3 kN
w	14.01 kN/m
spacing	4.3 m

<NCHRP Report851에서 개발한 경량철도용 표준활하중 모형>

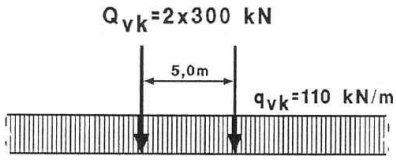
⑤ UIC CODE 702 (2003)



<LM71하중>



<SW/0 와 SW/2>



<LM2000 하중>

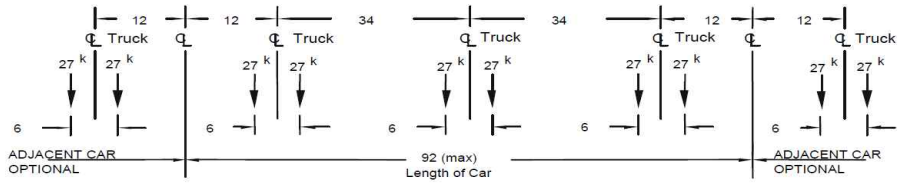
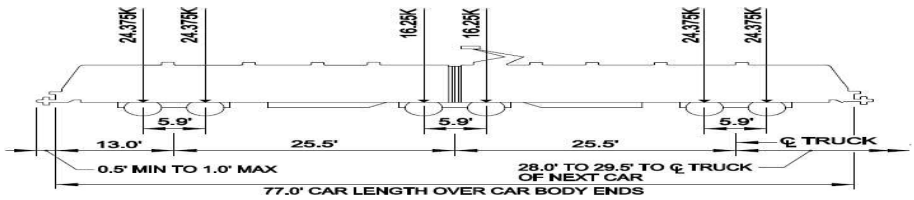
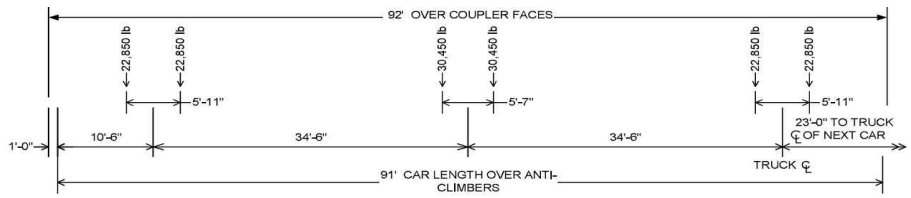
<SW/0 와 SW/2 제원>

	$q_{vk}(kN/m)$	a(m)	c(m)
SW/0	133	15.0	5.3
SW/2	150	25.0	7.0

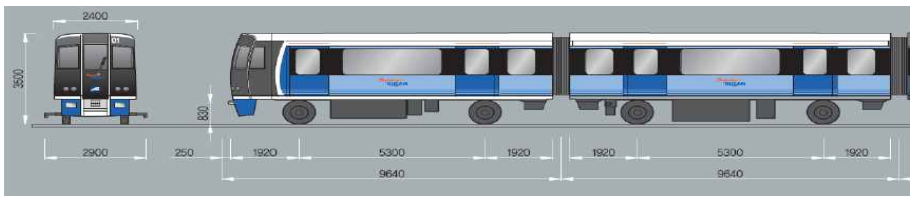
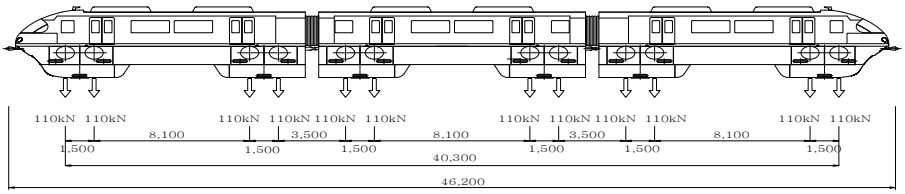
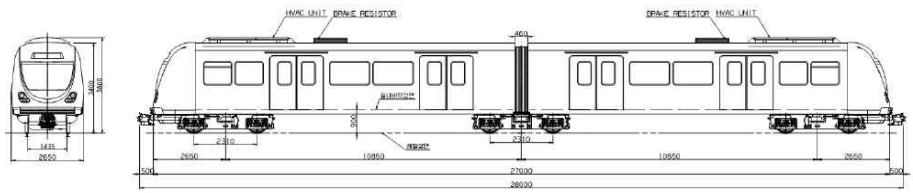
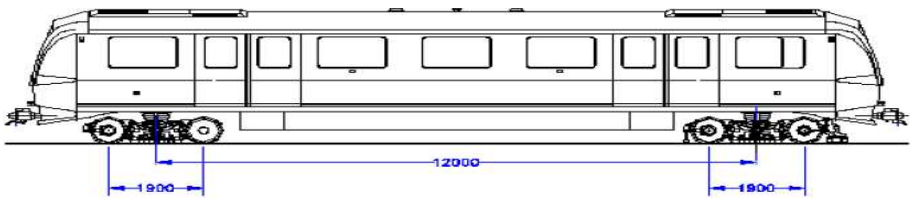
⑥ 경량전철 고가구조물 설계에 적용된 국내외 표준열차하중

국내 경량전철은 경량전철 차량 특성상 해당 노선에 대하여 설계된 1개 차종만 통행하며, 현 설계된 경량전철 구조물은 해당 차종에 탑승객이 만원일 경우인 만차 하중을 적용하여 설계를 진행하였다. 이와 같이 국내 경량전철 설계하중은 관련 설계기준과 달리 표준설계하중모델을 결정하지 않고 해당하는 노선에 대한 경량전철 차종의 만차 하중을 적용하여 설계 및 검토를 진행하였다. 따라서 국내 경량전철 고가구조물에 대한 신뢰도기반 설계기준 개발에서 경량전철 설계하중은 충분한 안전율을 가지도록 차량 형식별 만차 하중을 기준으로 적용한다.

< 미국 경량전철 구조물 설계에 적용된 표준열차하중 및 하중조합 >

설립	Utah, 미국 (1970)	Denver, 미국 (2006)	Minnesota, 미국 (2008)
표준 열차 하중	Utah Transit Authority Light Rail	RTD Light Rail System	Central Corridor LRT Alignment
하중 모델			
	Utah Transit Authority Light Rail		
			
	Denver's Union Station - RTD LRT		
			
	Central Corridor LRT		
축중	12.3 tonf	7.4 ~ 11.1 tonf	10.4 ~ 13.8 tonf
하중 조합	1.30(D+1.87L+CF+B+SF)	AASHTO 하중조합	1.3(D+1.67L+EV+1.3EH+SV+1.3SH +H+B+DR)

< 국내 경량전철 구조물 설계에 적용된 표준열차하중 및 하중조합 >

종류	부산도시철도 4호선 반송선	대구 도시철도 3호선	김해 경량전철	용인 경량전철
차륜형태	고무차륜	모노레일	일반 철제차륜	선형유도전동기(LIM)
제원 [m] (높이*폭*길이)	3.5 * 2.4 * 57.84	5.24 * 2.98 * 46.20	3.6 * 2.65 * 28.00	3.94 * 3.2 * 17.60
편성	6량 1편성	3량 1편성	2량 1편성	1량 1편성
설계하중모형				
	부산도시철도 4호선 반송선 (우진산전)			
				
	대구 도시철도 3호선 (우진산전)			
				
	김해 경량전철 (현대로템)			
				
	용인 경량전철 (봄바르디어 ART MK II)			
축중	9.5 tonf	11 tonf	10 ~ 13.5 tonf	10.5 tonf
하중조합	철도설계기준	철도설계기준	철도설계기준	철도설계기준

다. 경전철 고가구조물 설계하중 기준 제안

(1) 연직처짐 한계

(가) 고무차륜 및 철제차륜용 경전철 고가구조물의 연직처짐 한계

① 고무차륜 및 철제차륜용 경전철 차량-고가구조물 상호작용 해석기법 개발

간략화된 경전철과 고가구조물의 차량-구조물 상호작용 해석기법을 개발하여 이를 고가구조물 연직변위 기준 개발에 활용하였다. 차량은 속도 V로 이동하고, 시간 t에서 $x_c(t)$의 위치에 존재한다. 경전철의 차체와 대차는 각각 M_c와 M_b의 강체 질량으로 근사한다. 1차 현가장치와 2차 현가장치의 강성 계수는 각각 k_1과 k_2이고, 감쇠 계수는 각각 c_1과 c_2이다. 시간 t에서 차체와 대차의 연직 방향 위치는 각각 $z_c(t)$와 $z_b(t)$이다. 단순보로 근사한 고가구조물의 휨강성은 EI, 단위 길이당 질량은 m, 경간장은 L이다. 고가구조물의 동적 거동은 모드 중첩법을 사용하여 모사하는데, 이때 구조물의 n번째 고유 모드는 $\phi_n(x)$, 모드 좌표는 $q_n(t)$이고, 모드 질량, 감쇠, 강성은 각각 M_n, C_n, K_n이다.

시간 t에서 차체, 대차, 고가구조물의 동적 평형방정식은 다음과 같다.

$$M_c\ddot{z}_c + F_{s2} = M_c g \tag{1a}$$

$$M_b\ddot{z}_b + F_{s1} - F_{s2} = M_b g \tag{1b}$$

$$M_n\ddot{q}_n + C_n\dot{q}_n + K_n q_n = \phi_n(x_c)F_{s1} + \int_0^L \phi_n(x)mgdx \tag{1c}$$

여기서 $F_{s1}(t) = c_1\left(\dot{z}_b - \dot{w}\right) + k_1\left(z_b - w\right)$와 $F_{s2}(t) = c_2\left(\dot{z}_c - \dot{z}_b\right) + k_2\left(z_c - z_b\right)$는 각각 1차 현가장치와 2차 현가장치에서 발생하는 내력이고, g는 중력가속도이다. $F_{s1}(t)$에서 $w(t) = \sum_{n=1}^{N}\phi_n(x_c)q_n$, N은 고가구조물의 모드 중첩 시 고려하는 모드의 수이다. 한편, 운행을 시작하기 전, $t=0$에서 차체, 대차, 고가구조물의 정적 평형방정식은 다음과 같다.

$$F_{s2}^0 = M_c g \tag{2a}$$

$$F_{s1}^0 - F_{s2}^0 = M_b g \tag{2b}$$

$$K_n q_n^0 = \phi_n(x_c^0)F_{s1}^0 + \int_0^L \phi_n(x)mgdx \tag{2c}$$

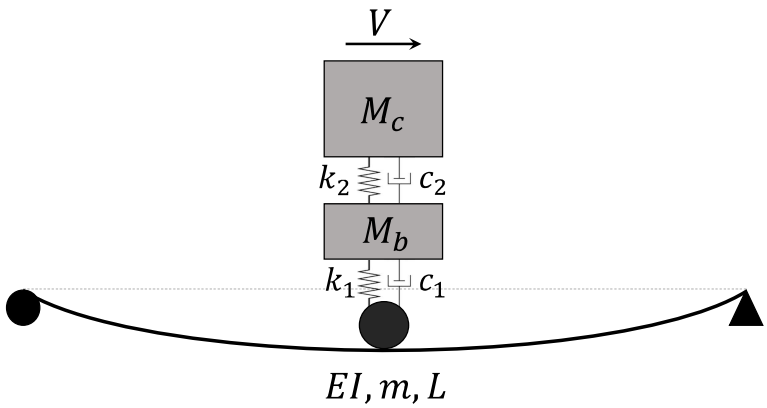
여기서 위첨자 0은 운행을 시작하기 전 정지상태에서의 값을 의미한다. 식 (1)과 식 (2)의 차이로부터 다음과 같은 운동방정식을 얻을 수 있다.

$$M_c\Delta\ddot{z}_c + c_2\Delta\dot{z}_c - c_2\Delta\dot{z}_b + k_2\Delta z_c - k_2\Delta z_b = 0 \tag{3a}$$

$$M_b\Delta\ddot{z}_b + (c_1+c_2)\Delta\dot{z}_b + (k_1+k_2)\Delta z_b - c_2\Delta\dot{z}_c - k_2\Delta z_c - c_1\sum_{n=1}^{N}\phi_n(x_c)\Delta\dot{q}_n - c_1V\sum_{n=1}^{N}\left.\frac{d\phi_n}{dx}\right|_{x=x_c}\Delta q_n - k_1\sum_{n=1}^{N}\phi_n(x_c)\Delta q_n$$
$$= c_1V\sum_{n=1}^{N}\left.\frac{d\phi_n}{dx}\right|_{x=x_c} q_n^0 + k_1\sum_{n=1}^{N}\left(\phi_n(x_c)-\phi_n^0\right)q_n^0 \tag{3b}$$

$$M_n\Delta\ddot{q}_n + C_n\Delta\dot{q}_n + \phi_n(x_c)c_1\sum_{m=1}^{N}\phi_m(x_c)\Delta\dot{q}_m + K_n\Delta q_n + \phi_n(x_c)c_1V\sum_{m=1}^{N}\left.\frac{d\phi_m}{dx}\right|_{x=x_c}\Delta q_m + \phi_n(x_c)k_1\sum_{m=1}^{N}\phi_m(x_c)\Delta q_m - \phi_n(x_c)c_1\Delta\dot{z}_b - \phi_n(x_c)k_1\Delta z_b$$
$$= \left(\phi_n(x_c)-\phi_n^0\right)F_{s1}^0 - \phi_n(x_c)c_1V\sum_{m=1}^{N}\left.\frac{d\phi_m}{dx}\right|_{x=x_c} q_m^0 - \phi_n(x_c)k_1\sum_{m=1}^{N}\left(\phi_m(x_c)-\phi_m^0\right)q_m^0 \tag{3c}$$

이상의 운동방정식을 연계하여 풀면 경전철과 고가구조물 상호작용계의 동적 해석을 수행할 수 있다.



<바퀴식 경전철 차량-고가구조물 상호작용 시스템>

② 고무차륜 및 철제차륜용 경전철 고가구조물 연직변위 기준 설정 위한 정량적 프로세스

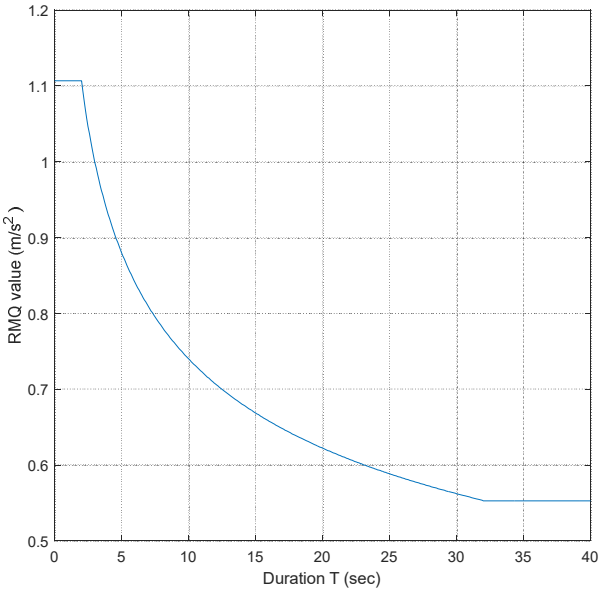
전술한 경전철-고가구조물 상호작용을 고려한 해석기법을 사용하여 경전철 고가구조물의 진동사용성을 고려한 처짐한계를 산정하는 방법에 대해 서술하고자 한다. 이 연구에서는 진동사용성을 확보하기 위해 만족시켜야 하는 기준으로 차체의 연직가속도에 관한 기준을 고려한다. 충격 성분을 포함한 일시적이거나 비정상(nonstationary) 운동 $a(t)$의 진동 크기를 측정하기 위해서는 진동의 root-mean-quad(RMQ) 값 $a_{RMQ} = \sqrt[4]{\frac{1}{T}\int\{a(t)\}^4dt}$ 또는 vibration dose value(VDV) $a_{VDV} = \sqrt[4]{\int\{a(t)\}^4dt} = \sqrt[4]{T}a_{RMQ}$가 적절하다. 여기서 T는 진동의 지속시간이다. 진동의 편안함은 인체가 진동에 노출되는 시간에 따라 달라지는데, VDV는 지속 시간을 고려할 수 있다. 또한, VDV는 진동의 편안함과 가장 높은 상관 관계가 있는 것으로 나타났다. 하지만, VDV는 짧거나 긴 지속시간을 가지는 진동에는 사용할 수 없다. 그러므로, 이 연구에서는 식 (3)의 지배방정식으로부터 얻은 차체의 연직가속도의 진동 크기가 식 (4)와 같이 허용치 이하가 되도록 하고자 한다.

$$\ddot{z}_{c,RMQ} = \sqrt[4]{\frac{1}{T}\int \{\ddot{z}_c(t)\}^4 dt} \le \ddot{z}_{c,allow} \quad \text{for} \quad T < T_S \tag{4a}$$

$$\ddot{z}_{c,VDV} = \sqrt[4]{\int \{\ddot{z}_c(t)\}^4 dt} = \sqrt[4]{T}\,\ddot{z}_{c,RMQ} \le \ddot{z}_{c,allow} \quad \text{for} \quad T_S \le T < T_S \tag{4b}$$

$$\ddot{z}_{c,RMQ} = \sqrt[4]{\frac{1}{T}\int \{\ddot{z}_c(t)\}^4 dt} \le \ddot{z}_{c,allow} \quad \text{for} \quad T > T_L \tag{4c}$$

이 연구에서는 $T_S = 2$ sec와 $T_L = 32$ sec로 설정한다. 식 (4)의 허용치 $\ddot{z}_{c,allow}$는 차량이 하나의 경간을 통과하는데 걸리는 시간인 진동지속시간을 고려하여 결정하여야 한다. 이 연구에서 $\ddot{z}_{c,allow}$는 BS 6841:1987와 ISO 2631-1에서 제시하고 있는 연직 가속도 평가 기준 중 'fairly uncomfortable'에 해당하는 RMS 값 0.5 m/s^2 와 1.0 m/s^2 를 기준으로 하여 허용기준을 설정한다. RMS 값 0.5 m/s^2 와 1.0 m/s^2 에 대응하는 RMQ 값은 각각 0.553 m/s^2 와 1.107 m/s^2 이므로, 이를 기준으로 아래 그림과 같이 차체 연직가속도 진동크기의 허용 기준을 제시한다. EN 1990:2002+A1에서는 철도교량 진동사용성 연직가속도 허용기준으로 'very good'에 해당하는 연직 가속도 수준으로 1.0 m/s^2 를 제안하고 있고, 우리나라 호남고속철도 설계지침도 EN 1990:2002+A1의 'very good' 수준에 근거하여 진동사용성 허용처짐기준을 제시하고 있다.



<차체의 허용 연직가속도>

③ 고무차륜 및 철제차륜용 경전철 고가구조물 연직변위 기준(안)

앞에서 서술한 방법을 이용하여 경전철의 운행속도와 고가구조물의 경간장에 따른 고가구조물의 처짐한계를 산정한다. 다양한 경전철 시스템의 특성을 고려하기 위하여 아래 표에 수록된 바와 같이 철제차륜 경전철 노선 뿐만이 아니라 고무차륜 경전철, 선형유도모터 구동 경전철, 모노레일 노선들도 고려한다.

<대상 경전철 노선>

형 식	Automated guideway transit (AGT)					모노레일
	고무 차륜			철제 차륜	선형유도모터 구동	
노 선	부산 도시철도 4호선	인천국제공항 경전철	의정부 경전철	부산-김해 경전철	용인 경전철	대구 도시철도 3호선
최대 승객수	100	122	110	152	226	140
공차 질량 (ton)	11.5	17.5	15.65	23.25	24	30.9
만차 질량 (ton)	18	25.06	22.47	32.67	38.012	34.8

경전철의 운행속도를 고려하여 다음과 같이 다양한 차량의 운행속도 V를 고려한다.

운행속도 V : 50 km/h, 60 km/h, 70 km/h, …, 100 km/h

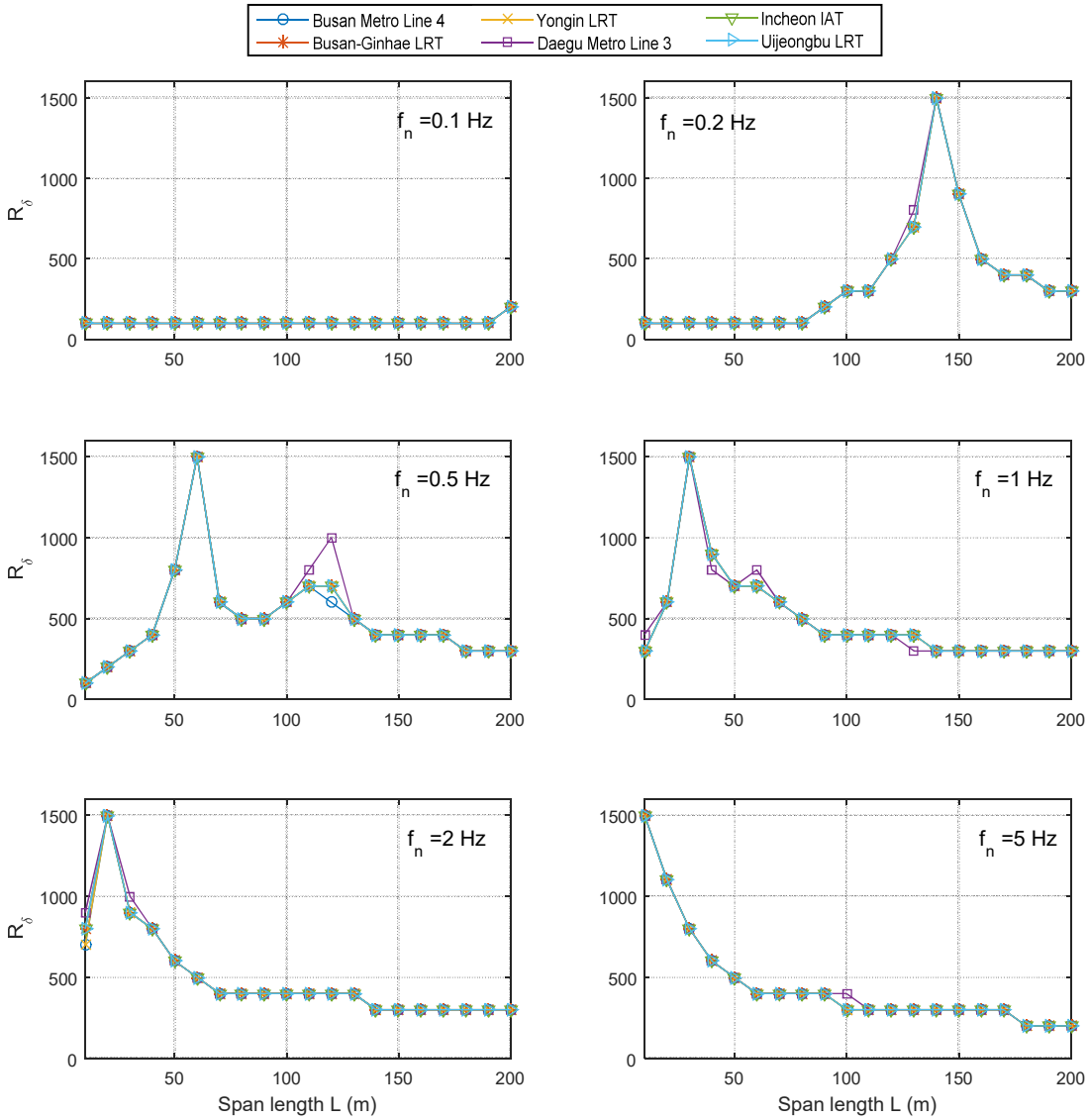
각 노선을 운행하는 다양한 차량의 영향을 고려하기 위해 다음과 같이 2차 현가장치의 고유진동수 $\omega_n = 2\pi f_n = \sqrt{k_2/M_c}$와 감쇠비 $\xi = c_2/2M_c\omega_n$를 변화시켜 가며, 2차 현가장치의 강성과 감쇠계수를 조정한다.

2차 현가장치 고유진동수 f_n : 0.1 Hz, 0.2 Hz , 0.5 Hz , 1 Hz , 2 Hz , 5 Hz
2차 현가장치 감쇠비 ξ : 1 %, 2 %, 5 %, 10 %, 20 %, 50 %

고가구조물의 단위 길이 당 질량 m은 경간장이 25 m일 때 차량과 고가구조물의 질량비가 0.4가 되도록 결정한다. 고가구조물의 감쇠비의 값은 0.01로 적용한다. 차량에 의하여 발생하는 정적 처짐은 $\delta = (M_c + M_b)gL^3/48EI$이고 정적 처짐 δ에 대한 경간장 L의 비는 $R_\delta = L/\delta = 48EI/(M_c + M_b)gL^2$ 로 주어진다. 즉, 경간장/처짐비 R_δ는 고가구조물의 휨강성 EI와 연관되어 있다. 이 연구에서는 다음과 같이 고가구조물의 경간장 L과 경간장/처짐비 R_δ를 고려하여, 위에 보인 차량 연직가속도 진동크기의 허용치를 만족시키는 고가구조물의 처짐한계를 산정한다.

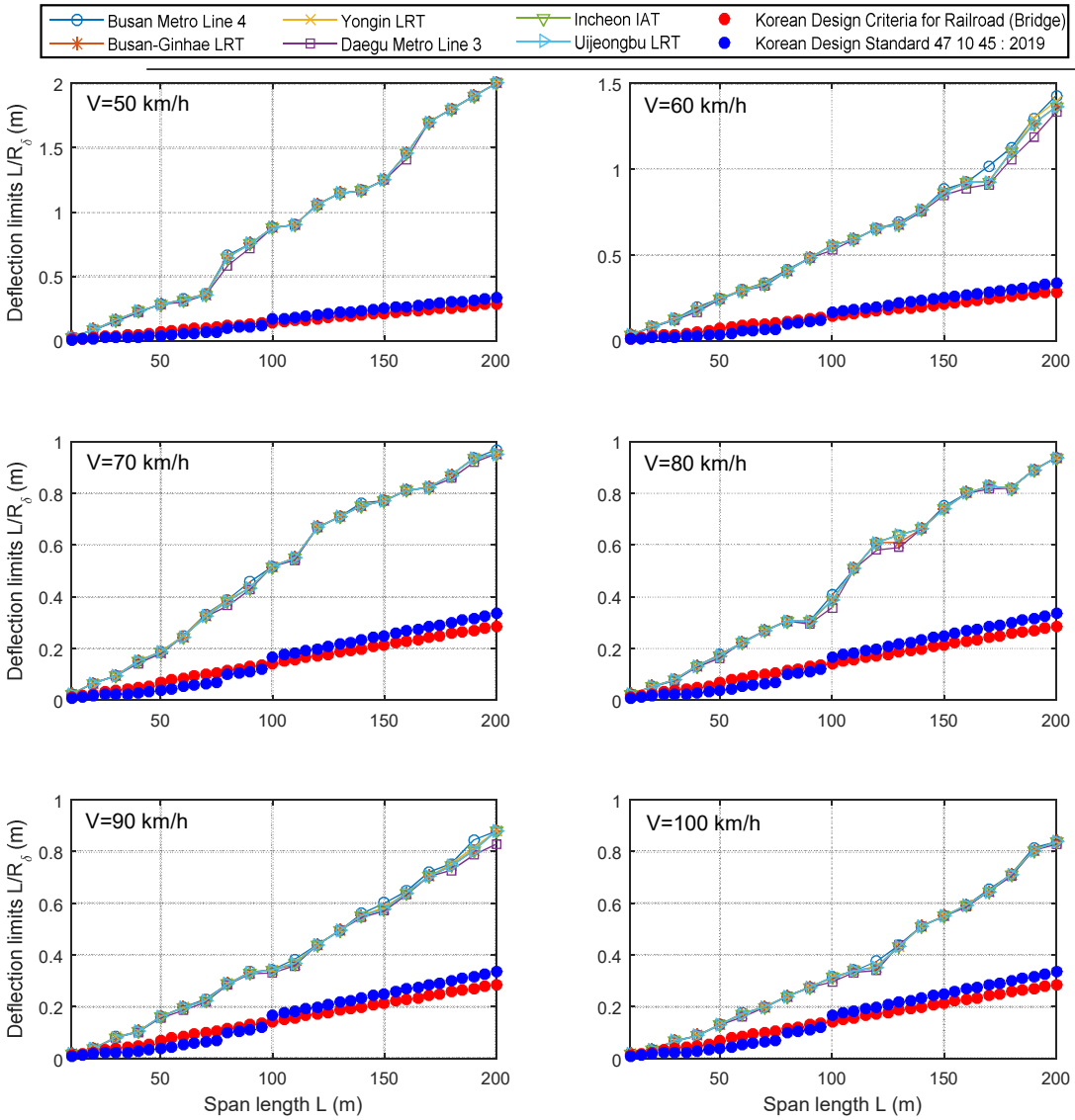
경간장 L : 10 m, 20 m, 30 m, …, 100 m
경간장/처짐비 R_δ : 500, 600, 700, …, 1500

상기의 운행속도, 차량 특성, 고가구조물 경간장에 대하여 식 (4)의 조건을 만족시키는 최소의 경간장/처짐비 R_δ를 결정한다. 아래 그림은 위의 표에 수록한 다양한 경전철 노선에 대하여 얻은 R_δ의 최솟값의 변화의 한 예이다.



<$V = 100\ km/h$, $\xi = 2\%$일 때 R_δ의 최솟값>

이 결과를 다양한 차량 특성 f_n과 ξ에 대하여 평균하여 차량의 운행속도와 고가구조물의 경간장에 따른 경간장/처짐비 R_δ를 얻을 수 있다. 단, 차량이 고가구조물을 운행할 때 공진이 발생하지 않도록 설계하여야 한다. 즉, $V/f_n = L$이 되지 않도록 하여야 하기 때문에, $0.8L < V/f_n < 1.2L$인 경우는 고려하지 않고 R_δ를 산정한다. 아래 그림은 차량의 운행속도와 고가구조물의 경간장에 따라 산정된 처짐한계이고, 이를 모든 노선에 대하여 평균하여 아래 표와 같이 경전철 고가구조물의 처짐한계를 제안하고자 한다.


Busan Metro Line 4
Busan-Ginhae LRT
Yongin LRT
Daegu Metro Line 3
Incheon IAT
Uijeongbu LRT
Korean Design Criteria for Railroad (Bridge)
Korean Design Standard 47 10 45 : 2019
V=50 km/h
V=60 km/h
V=70 km/h
V=80 km/h
V=90 km/h
V=100 km/h
Deflection limits L/R$_\delta$ (m)
Span length L (m)

<경전철 고가구조물의 처짐한계 제안>

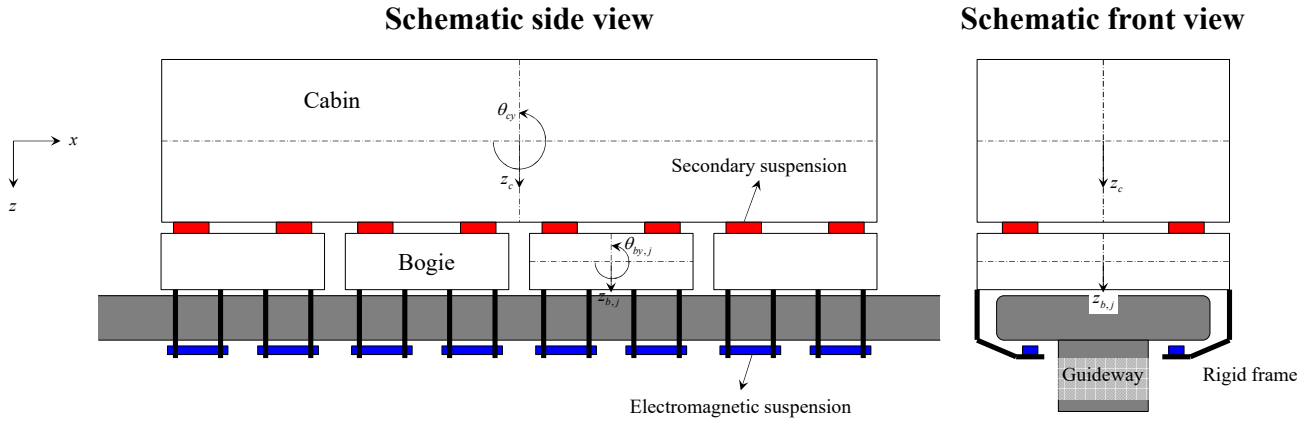
L (m)	V (km/h)						철도설계기준(철도교편)	철도설계기준 교량일반사항 KDS 47 10 45: 2019
	50	60	70	80	90	100		
10	L/500	L/500	L/500	L/500	L/500	L/500	L/800	L/1100
20	L/500	L/500	L/500	L/500	L/500	L/600	L/800	L/1100
30	L/500	L/500	L/500	L/500	L/500	L/500	L/800	L/1300
40	L/500	L/500	L/500	L/500	L/500	L/500	L/800	L/1500
50	L/500	L/500	L/500	L/500	L/500	L/500	L/700	L/1300
60	L/500	L/500	L/500	L/500	L/500	L/500	L/700	L/1100
70	L/500	L/500	L/500	L/500	L/500	L/500	L/700	L/1100
80	L/500	L/500	L/500	L/500	L/500	L/500	L/700	L/800
90	L/500	L/500	L/500	L/500	L/500	L/500	L/700	L/800
100	L/500	L/500	L/500	L/500	L/500	L/500	L/700	L/600

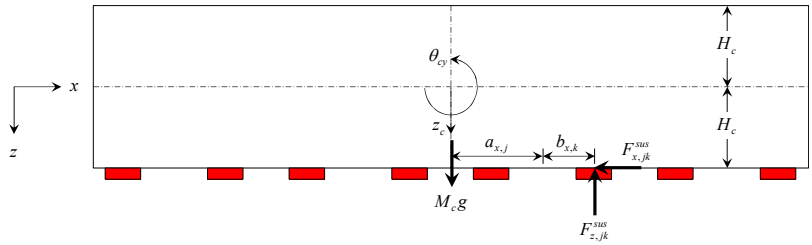
일반 철도교의 설계에 활용되는 철도설계기준(철도교편)과 철도설계기준 교량일반사항 KDS 47 10 45: 2019의 처짐한계도 위의 그림과 표에 함께 비교하였다. 이 연구에서 제안한 처짐한계는 기존의 일반 철도교 설계기준보다는 완화된 것을 확인할 수 있다. 특히, 최신의 철도설계기준 교량일반사항 KDS 47 10 45: 2019과 비교하였을 때, 처짐한계가 최대 66.67%까지 완화된 것($L/1500$에서 $L/500$으로)을 확인할 수 있다. 이 연구에서 제안한 처짐한계를 적용하면 일반 철도교 설계기준을 적용한 경우보다 단면의 크기가 줄어 든 고가구조물의 설계가 가능해져 경제적인 구조물의 설계 및 시공이 가능해질 것이다. 또한, 단면 크기의 감소로 주변 도시환경과 조화를 이룰 수 있는 심미적인 구조물의 설계가 가능할 것으로 판단된다.

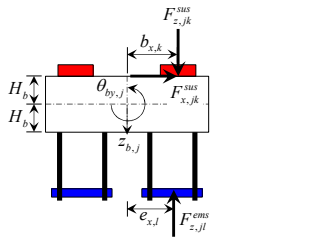
(나) 자기부상 경전철 고가구조물의 연직처짐 한계

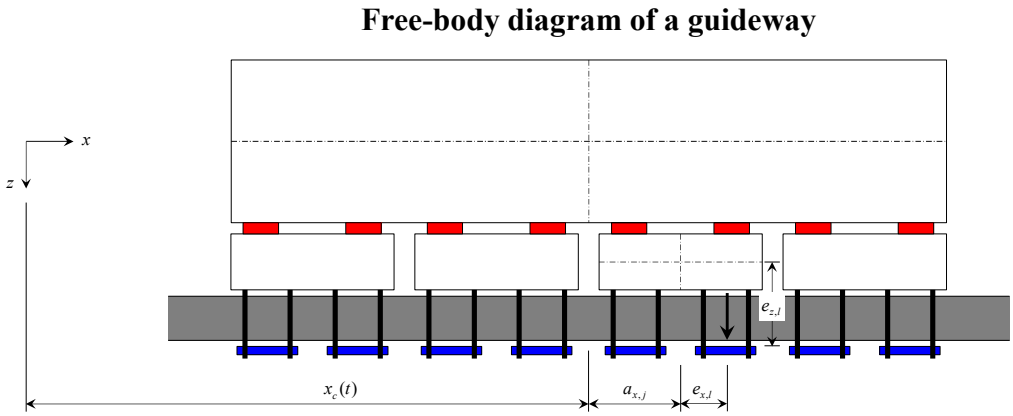
① 자기부상 경전철 차량-고가구조물 상호작용 해석기법 개발

가속도 되먹임 부상공극제어기법을 이용한 자기부상열차와 고가구조물 상호작용계의 동적 해석기법에 대해 설명하고자 한다. 그림은 이 연구에서 고려하는 2차원 자기부상열차 시스템의 개념도이다. 자기부상열차의 차체와 대차는 강체질량으로 근사하고, 2차원 병진 운동(heave)과 회전 운동(pitch)만 고려한다. 고려하는 자기부상철도 시스템의 주요 변수를 표에 정리하였다. 이 변수들의 정지 부상상태에서의 값은 변수에 위첨자 0를 붙여서 나타내고, 정지 부상상태에 대한 변동량은 변수 앞에 Δ를 붙여 나타낸다.









〈자기부상 차량-고가구조물 상호작용 시스템〉

〈자기부상 차량-고가구조물 시스템의 변수〉

변 수	설 명	변 수	설 명
V	차량 속도	$i_{jl}^{ems}(t)$, $v_{jl}^{ems}(t)$	대차 j의 전자석 l의 전류와 전압
N_b	차체 당 대차의 수	$u_{jl}^{ems}(t)$, $\dot{z}_{jl}^{ems}(t)$, $\ddot{z}_{jl}^{ems}(t)$	대차 j의 전자석 l의 부상 공극, 속도, 가속도
M_c, I_c	차체의 질량과 회전관성모멘트	$F_{z,jl}^{ems}(t)$	대차 j의 전자석 l의 전자기력
M_b, I_b	대차의 질량과 회전관성모멘트	EI, m	고가구조물의 휨강성, 단위길이당 질량
$z_c(t)$, $\theta_c(t)$	차체의 변위와 회전량	L	고가구조물의 경간길이
$z_{b,j}(t)$, $\theta_{b,j}(t)$	대차 j의 변위와 회전량	N_{gw}^{w}	고가구조물의 고려하는 고유모드의 수
N_s	현가장치의 수	$\phi_n^w(x)$	고가구조물의 n번째 고유모드
k_x, k_z, c_x, c_z	현가장치의 스프링과 감쇠계수	$q_n^w(t)$	고가구조물의 n번째 모드좌표

$F_{x,jk}^{sus}(t),\ F_{z,jk}^{sus}(t)$	대차 j의 현가장치 k의 내력	$M_n^w,\ C_n^w,\ K_n^w$	고가구조물의 n번째 모드 질량, 감쇠, 강성
N_{ems}	자기부상 전자석의 수	$w(x,t)$	고가구조물의 처짐
μ_0	진공의 투자율	$K_p,\ K_v,\ K_a$	되먹임 이득 상수
n_{ems}, A_{ems}, R_{ems}	코일의 감은 수, 자극의 유효면적, 자기부상 전자석의 자기저항		

가속도 되먹임 기반 부상공극제어기법을 적용하여 자기부상열차 시스템의 동적 지배방정식을 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$
\begin{aligned}
&\begin{bmatrix} M_c & \\ & I_c \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} \Delta\ddot{z}_c \\ \Delta\ddot{\theta}_c \end{Bmatrix}+\sum_{j=1}^{N_b}\sum_{k=1}^{N_s}\begin{bmatrix} c_z & -(a_{x,j}+b_{x,k})c_z \\ -(a_{x,j}+b_{x,k})c_z & (a_{x,j}+b_{x,k})^2c_z+H_c^2c_x \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} \Delta\dot{z}_c \\ \Delta\dot{\theta}_c \end{Bmatrix}\\
&+\sum_{j=1}^{N_b}\sum_{k=1}^{N_s}\begin{bmatrix} -c_z & b_{x,k}c_z \\ (a_{x,j}+b_{x,k})c_z & -b_{x,k}(a_{x,j}+b_{x,k})c_z+H_bH_cc_x \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} \Delta\dot{z}_{b,j} \\ \Delta\dot{\theta}_{b,j} \end{Bmatrix}\\
&+\sum_{j=1}^{N_b}\sum_{k=1}^{N_s}\begin{bmatrix} k_z & -(a_{x,j}+b_{x,k})k_z \\ -(a_{x,j}+b_{x,k})k_z & (a_{x,j}+b_{x,k})^2k_z+H_c^2k_x \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} \Delta z_c \\ \Delta\theta_c \end{Bmatrix}\\
&+\sum_{j=1}^{N_b}\sum_{k=1}^{N_s}\begin{bmatrix} -k_z & b_{x,k}k_z \\ (a_{x,j}+b_{x,k})k_z & -b_{x,k}(a_{x,j}+b_{x,k})k_z+H_bH_ck_x \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} \Delta z_{b,j} \\ \Delta\theta_{b,j} \end{Bmatrix}=\begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix}
\end{aligned}
\tag{5}
$$

$$
\begin{aligned}
&\begin{bmatrix} M_b & \\ & I_b \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} \Delta\ddot{z}_{b,j} \\ \Delta\ddot{\theta}_{b,j} \end{Bmatrix}+\sum_{k=1}^{N_s}\begin{bmatrix} -c_z & (a_{x,j}+b_{x,k})c_z \\ b_{x,k}c_z & -b_{x,k}(a_{x,j}+b_{x,k})c_z+H_bH_cc_x \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} \Delta\dot{z}_c \\ \Delta\dot{\theta}_c \end{Bmatrix}\\
&+\sum_{k=1}^{N_s}\begin{bmatrix} c_z & -b_{x,k}c_z \\ -b_{x,k}c_z & b_{x,k}^2c_z+H_b^2c_x \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} \Delta\dot{z}_{b,j} \\ \Delta\dot{\theta}_{b,j} \end{Bmatrix}+\sum_{k=1}^{N_s}\begin{bmatrix} -k_z & (a_{x,j}+b_{x,k})k_z \\ b_{x,k}k_z & -b_{x,k}(a_{x,j}+b_{x,k})k_z+H_bH_ck_x \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} \Delta z_c \\ \Delta\theta_c \end{Bmatrix}\\
&+\left(\sum_{k=1}^{N_s}\begin{bmatrix} k_z & -b_{x,k}k_z \\ -b_{x,k}k_z & b_{x,k}^2k_z+H_b^2k_x \end{bmatrix}+\sum_{l=1}^{N_{ems}}\begin{bmatrix} -k_{u,jl}^{ems} & e_{x,l}k_{u,jl}^{ems} \\ e_{x,l}k_{u,jl}^{ems} & -e_{x,l}^2k_{u,jl}^{ems} \end{bmatrix}\right)\begin{Bmatrix} \Delta z_{b,j} \\ \Delta\theta_{b,j} \end{Bmatrix}+\sum_{l=1}^{N_{ems}}\begin{Bmatrix} k_{i,jl}^{ems} \\ -e_{x,l}k_{i,jl}^{ems} \end{Bmatrix}\Delta i_{jl}^{ems}\\
&=\sum_{l=1}^{N_{ems}}\begin{Bmatrix} -k_{u,jl}^{ems}\sum_{n=1}^{N_{gw}^w}\left(\phi_{n,jl}^w q_n^w-\phi_{n,jl}^{w0}q_n^{w0}\right) \\ e_{x,l}k_{u,jl}^{ems}\sum_{n=1}^{N_{gw}^w}\left(\phi_{n,jl}^w q_n^w-\phi_{n,jl}^{w0}q_n^{w0}\right) \end{Bmatrix}
\end{aligned}
\tag{6}
$$

$$
\begin{aligned}
&\Delta\dot{i}_{jl}^{ems}+\frac{R_{ems}}{L_{jl}^{ems0}}\Delta i_{jl}^{ems}-\frac{K_a}{L_{jl}^{ems0}}\Delta\ddot{z}_{b,j}-\left(\frac{k_{u,jl}^{ems}}{k_{i,jl}^{ems}}+\frac{K_v}{L_{jl}^{ems0}}\right)\Delta\dot{z}_{b,j}-\frac{K_p}{L_{jl}^{ems0}}\Delta z_{b,j}\\
&\quad+\frac{K_a}{L_{jl}^{ems0}}e_{x,l}\Delta\ddot{\theta}_{b,j}+\left(\frac{k_{u,jl}^{ems}}{k_{i,jl}^{ems}}+\frac{K_v}{L_{jl}^{ems0}}\right)e_{x,l}\Delta\dot{\theta}_{b,j}+\frac{K_p}{L_{jl}^{ems0}}e_{x,l}\Delta\theta_{b,j}\\
&=-\frac{k_{u,jl}^{ems}}{k_{i,jl}^{ems}}\sum_{n=1}^{N_{gw}^w}V\left(\frac{d\phi_{n,jl}^w}{dx}q_n^w-\frac{d\phi_{n,jl}^{w0}}{dx}q_n^{w0}\right)-\frac{k_{u,jl}^{ems}}{k_{i,jl}^{ems}}\sum_{n=1}^{N_{gw}^w}\left(\phi_{n,jl}^w\dot{q}_n^w-\phi_{n,jl}^{w0}\dot{q}_n^{w0}\right)-\frac{K_p}{L_{jl}^{ems0}}\sum_{n=1}^{N_{gw}^w}\left(\phi_{n,jl}^w q_n^w-\phi_{n,jl}^{w0}q_n^{w0}\right)
\end{aligned}
\tag{7}
$$

$$
M_n^w\Delta\ddot{q}_n^w+C_n^w\Delta\dot{q}_n^w+K_n^w\Delta q_n^w=\sum_{j=1}^{N_b}\sum_{l=1}^{N_{ems}}\phi_{n,jl}^w F_{z,jl}^{ems}-\sum_{j=1}^{N_b}\sum_{l=1}^{N_{ems}}\phi_{n,jl}^{w0}F_{z,jl}^{ems0} \tag{8}
$$

여기서 $k_{i,jl}^{ems}=\dfrac{\mu_0 n_{ems}^2A_{ems}i_{jl}^{ems0}}{2\left(u_{jl}^{ems0}\right)^2}$, $k_{u,jl}^{ems}=\dfrac{\mu_0 n_{ems}^2A_{ems}\left(i_{jl}^{ems0}\right)^2}{2\left(u_{jl}^{ems0}\right)^3}$, $L_{jl}^{ems0}=\dfrac{\mu_0 n_{ems}^2A_{ems}}{2u_{jl}^{ems0}}$, $\left(\dfrac{d\phi_n^w}{dx}\right)_{jl}=\left.\dfrac{d\phi_n^w}{dx}\right|_{x=x_c+a_{x,j}+\tilde{e}_{x,jl}}$,

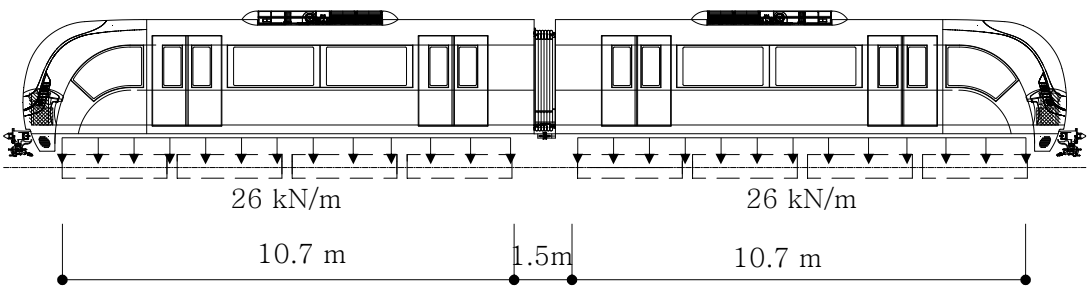
$\tilde{e}_{x,jl}(t) = e_{x,l} + e_{z,l}\theta_{b,j}(t)$, $\phi^w_{n,jl} = \phi^w_n(x_c + a_{x,j} + \tilde{e}_{x,jl})$이다. 강체 대차의 회전 운동에 의해 부상 전자기력이 작용하는 위치가 변하게 되는 비선형 특성을 고려하기 위해, 자기부상열차와 전자석의 지배방정식과 고가구조물의 운동방정식을 교대로 만족시키도록 다음의 반복계산 과정을 거쳐 전체 시스템의 해를 얻는다.

(1) 시간 $t-\Delta t$에서 얻은 자기부상열차-고가구조물 상호작용계의 수렴해를 다음 시간 t에서의 초기 예측치로 사용한다.
(2) 시간 t에서 식 (5) ~ (7)을 반복계산하여 차체의 변위 Δz_c, $\Delta\theta_c$, 대차의 변위 $\Delta z_{b,j}$, $\Delta\theta_{b,j}$, 부상전자석 전류 Δi^{ems}_{jl}를 얻는다. 단, 고가구조물의 모드좌표 Δq^w_n는 시간 $t-\Delta t$에서 구한 값으로 가정한다.
(3) 단계 (2)에서 수렴해를 얻으면, 부상전자기력 $F^{ems}_{z,jl}$을 계산한다.
(4) 단계 (3)에서 계산한 부상전자기력을 이용하여 식 (8)을 풀어서, 모드좌표 Δq^w_n을 갱신한다.
(5) 갱신된 모드좌표를 사용하여 단계 (2)~(4)의 계산을 다시 수행한다. 전체 자기부상열차-고가구조물 상호작용계가 평형을 만족할 때까지 이 과정을 반복한다.
(6) 전체 시스템에 대하여 수렴해를 얻으면, 다음 시간 $t+\Delta t$로 진행한다.

② 자기부상 경전철 고가구조물 연직변위 기준(안)

매개변수 해석을 통하여 자기부상 경전철 고가구조물의 처짐한계를 산정하고자 한다. 고가구조물의 처짐비를 변화시켜 가며 앞에서 서술한 동적 해석기법으로부터 자기부상열차 차체의 연직가속도를 결정하고, 이 연직가속도가 편안한 승차감을 제공하는 기준을 만족시키는지 검토한다. 승차감에 대한 기준으로는 바퀴식 경전철에 사용하였던 기준을 동일하게 적용한다.

우선 차체 1개와 대차 1개로 구성된 간략한 차량에 대해 처짐한계를 산정하고, 이를 그림의 인천공항 자기부상열차 시스템에 적용하고자 한다. 인천공항 자기부상차량은 2량 1편성으로 구성되어 있고, 1량 당 4개의 대차가 있다. 각 대차에는 8개의 부상전자석이 설치되어 있다. 차량의 만차 중량은 556.4 kN 이다. 고가구조물은 단위길이당 질량이 5671.8 kg/m인 단순교로 가정한다. 이 2차원 차량에는 총 32개의 부상전자석이 설치되어 있어, M_c=1272 kg, M_b=500 kg인 간략한 차량이 m=177.2 kg/m인 고가구조물을 운행하는 경우에 대해 처짐한계를 산정한다.



<자기부상 차량>

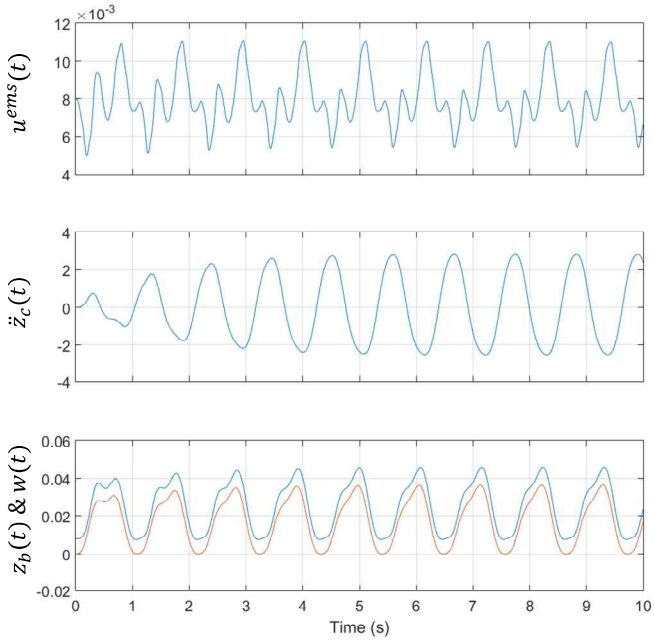
고려하는 간략한 차량-고가구조물 시스템의 동적 해석을 위해서는 부상공극제어기법의 되먹임 이득 K_p, K_v, K_a를 결정하여야 한다. 이를 위해 차량 현가장치의 고유진동수 $f_n = 1/2\pi\sqrt{k_z/M_c}$=1 Hz와 감쇠비 $\xi = c_z/4\pi M_c f_n$=10 %, 차량의 자중에 의한 고가구조물의 정적 처짐 $\delta = (M_c + M_b)gL^3/48EI = L/1000$, 운행속도 V=100 km/h로 가정한 후, 다양한 경간길이 L에 대해 되먹임 이득을 결정한다. 인천공항 자기부상철도 설계기준에서는 부상공극을 8±3 mm로 제한하므로, 부상공극의 변동량 $\Delta u^{ems}(t)$의 절대값이 Δu^{ems}_{allow}=3 mm 이내가 되도록 최적화를 수

행하여 되먹임 이득을 결정한다. 유전 알고리즘을 이용하여 결정한 되먹임 이득과 $\Delta u^{ems}(t)$의 상대오차 $\epsilon_{\Delta u^{ems}} = \left(\max_t |\Delta u^{ems}(t)| - \Delta u^{ems}_{allow}\right)/\Delta u^{ems}_{allow}$가 표에 주어져 있다. 그림은 L=30 m일 때 간략한 차량-고가구조물 시스템의 부상전자석의 부상공극 $u^{ems}(t)$, 차체의 연직가속도 $\ddot{z}_c(t)$, 대차의 변위 $z_b(t)$와 차량이 위치한 곳에서의 고가구조물의 처짐 $w(t)$의 시간이력을 보여준다.

그림의 응답에 대하여 차량의 운행속도 V=100 km/h=27.78 m/s, 고가구조물의 경간길이 L=30 m이므로, 진동지속시간 T=1.808 s이고 허용 RMQ 값 $\ddot{z}^{allow}_{c,RMQ}$ 은 0.885 m/s^{2}이다. 한편, 그림의 $\ddot{z}_c(t)$로부터 계산한 RMQ 값 $\ddot{z}_{c,RMQ}$은 2.151 m/s^{2}으로 허용치에 대한 비 $\ddot{z}_{c,RMQ}/\ddot{z}^{allow}_{c,RMQ}$는 2.430이다. 즉, 이 경우에는 차량의 승차감 기준을 만족시키지 못하게 되는 것이다. 이와 같은 경우에는 고가구조물의 휨강성 EI를 증가시켜, 고가구조물의 변형과 함께 차체의 가속도와 RMQ 값을 감소시키고 승차감 기준을 만족하도록 한다.

<되먹임 이득 상수>

L (m)	K_p (V/m)	K_v (V・sec/m)	K_a (V・sec2/m)	$\epsilon_{\Delta u^{ems}}$
10	2.794E+06	2.086E+03	1.463E+03	3.024E-06
20	3.752E+05	5.238E+03	2.807E+02	6.640E-03
30	1.598E+06	1.991E+04	1.981E+03	4.519E-03
40	9.266E+05	8.908E+03	1.758E+03	1.753E-08
50	6.622E+05	1.357E+04	3.619E+02	1.255E-03
60	7.637E+05	1.580E+04	1.063E+02	1.375E-03
70	9.213E+05	1.819E+04	3.329E+02	3.142E-07
80	1.798E+07	2.259E+03	1.609E+03	2.012E-04
90	7.648E+05	9.657E+03	1.964E+03	8.352E-03
100	8.197E+05	1.673E+04	7.428E+02	5.286E-03

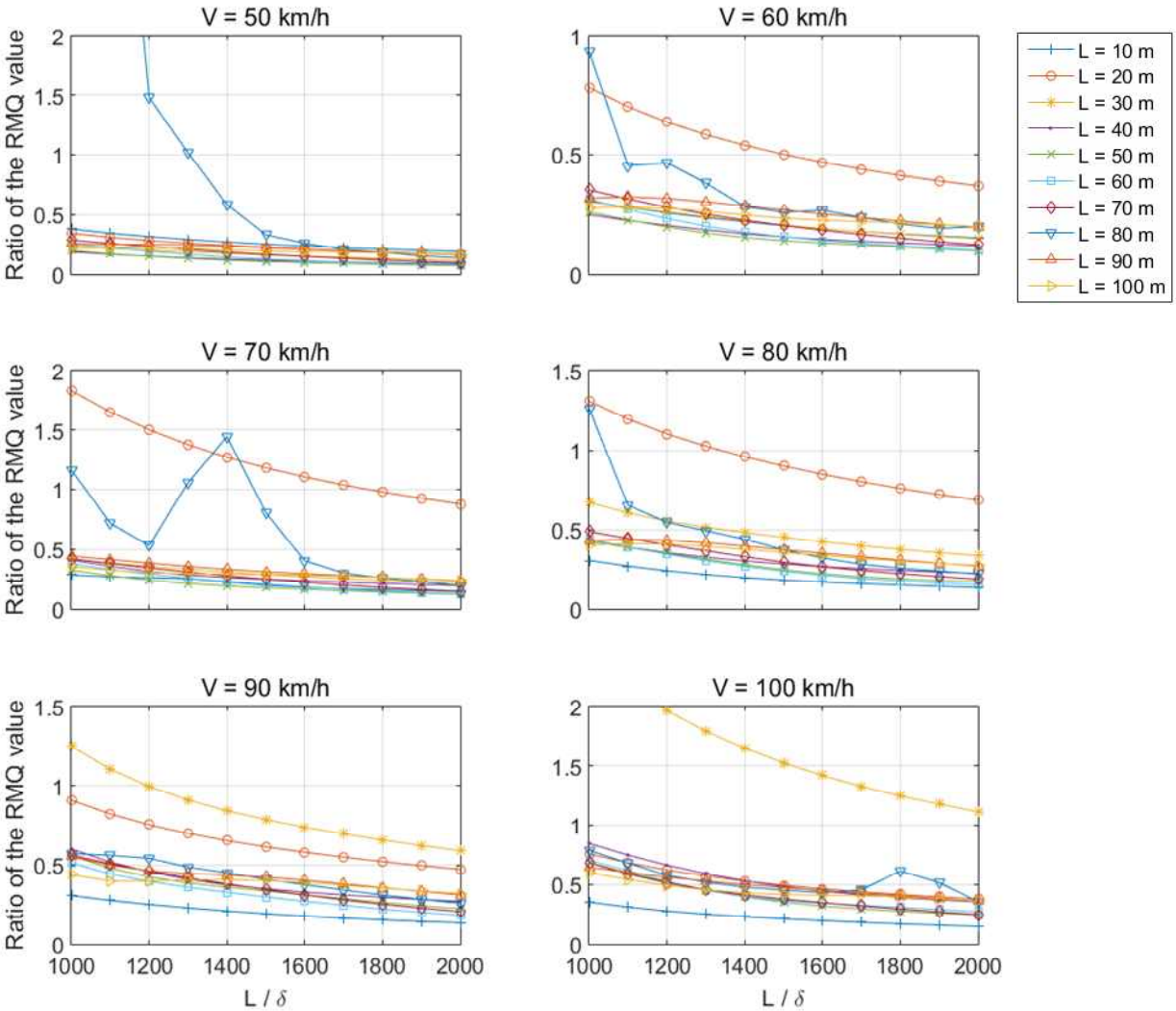


<간략화된 자기부상 시스템의 동적 응답>

고려하는 간략한 차량-고가구조물 시스템에서 차량 자중에 의한 고가구조물의 정적 처짐 δ를 변화시켜 가며 차체의 연직가속도 $\ddot{z}_c(t)$의 RMQ 값을 조사하고 이를 허용치와 비교한다. 이를 위해 차량의 운행속도 V, 차량 현가장치의 고유진동수 f_n과 감쇠비 ξ, 고가구조물의 경간길이 L을 다음과 같이 변화시킨다.

운행속도 V: 50 km/h, 60 km/h, ⋯, 1000 km/h
고유진동수 f_n: 0.1 Hz, 0.2 Hz, 0.5 Hz, 1 Hz, 2 Hz, 3 Hz
감쇠비 ξ: 1%, 2%, 5%, 10%, 20 %, 50%
경간길이 L: 10 m, 20 m, ⋯, 100 m

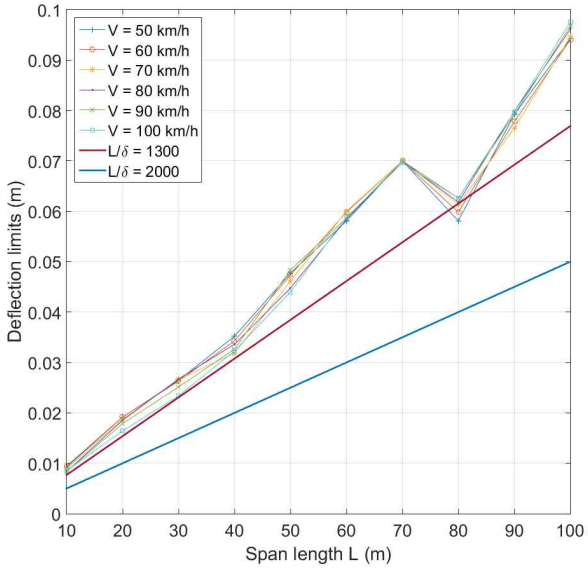
그림은 f_n=1 Hz, ξ=10%일 때, $\ddot{z}_{c,RMQ}/\ddot{z}_{c,RMQ}^{allow}$의 변화를 보여준다. $\ddot{z}_{c,RMQ}/\ddot{z}_{c,RMQ}^{allow} \leq 1$일 때 승차감 기준을 만족하는 것이므로, 이 그림으로부터 승차감 기준을 만족하는 정적 처짐 δ를 결정할 수 있다. 이와 같은 과정을 상기의 차량 현가장치 고유진동수와 감쇠비에 대하여 수행한 후 이를 평균하여, 승차감을 만족하는 고가구조물의 처짐한계를 결정할 수 있다. 단, 차량은 고가구조물을 운행할 때 공진이 발생하지 않도록 설계하여야 하므로, $0.8L < V/f_n < 1.2L$인 경우는 고려하지 않고 처짐한계를 산정한다.



<차체 연직가속도의 RMQ 값의 비율>

이상과 같은 과정을 거쳐 결정한 처짐한계를 차량의 운행속도와 고가구조물의 경간길이에 대하여 그림에 도시하였다. 그림에는 비교를 위해 $L/1300$과 $L/2000$의 처짐한계도 같이 도시하였다. 현재 우리나라에서 운행 중인 인천공항 자기부상철도의 고가구조물 설계기준은 단순교의 최대 처짐이 $L/2000$이 되도록 규정하고 있다. 그림에서 확인할 수 있듯이, $L/1300$의 처짐한계에 대해서도 승차감 기준을 대부분의 차량 운행속도와 고가구조물 경간길이에 대해 만족할 수 있음을 확인할 수 있다. 즉, 기존 설계기준에서 규정한 $L/2000$의 처짐한계보다 완화된 $L/1300$의

처짐한계에 대하여 고가구조물을 설계하여도 차량 승차감의 관점에서 만족할 수 있는 자기부상철도 시스템을 설계할 수 있고, 완화된 설계기준으로 인해 좀 더 경제적인 고가구조물의 설계와 시공이 가능해 질 것이다.

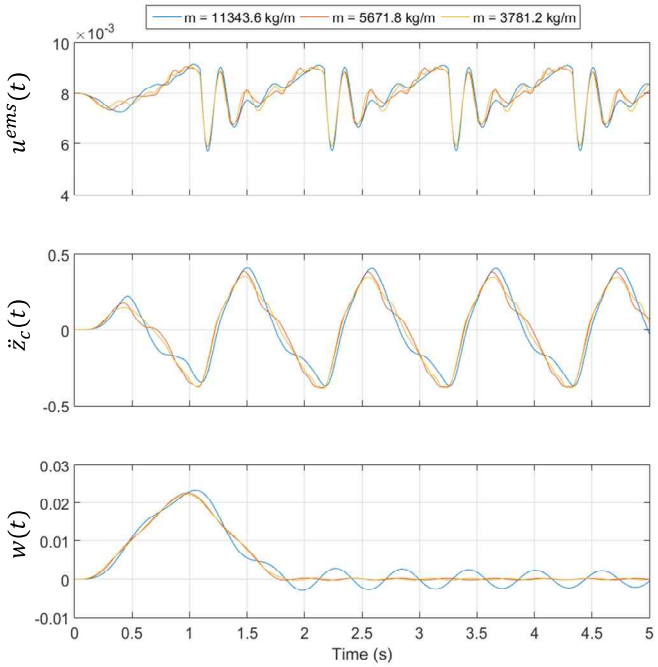


<자기부상형 경전철 고가구조물의 처짐한계>

앞에서 제안한 $L/1300$의 고가구조물 처짐한계는 차체 1개와 대차 1개로 구성된 간략한 차량에 대하여 산정된 것이다. 여기서는 인천공항 자기부상열차 시스템의 동적 해석을 통하여 제안된 처짐한계가 실제 자기부상철도 시스템에 대해서도 적절한지 검토하고자 한다.

다양한 고가구조물을 고려하기 위해 단위길이당 질량 m이 11343.6 kg/m, 5671.8 kg/m, 3781.2 kg/m이고 경간길이 L이 30 m인 단순교를 차량이 100 km/h로 운행하는 경우에 대하여 해석을 수행한다. 분포하는 자기부상차량의 자중에 대해 처짐한계를 만족하는 고가구조물의 휨강성은 $EI = 11.092 \times 10^9\ N \cdot m^2$로 산정된다.

앞에서 설명한 해석기법을 사용하여 대상 시스템의 동적 해석을 수행한다. 그림은 자기부상열차의 첫 번째 대차 첫 번째 부상전자석이 설치된 곳에서의 부상공극의 크기 $u^{ems}(t)$, 첫 번째 차체의 연직가속도 $\ddot{z}_c(t)$, 고가구조물의 첫 번째 경간에서의 중앙부 처짐 $w(t)$을 보여주고 있다. 부상공극의 최대 변동량은 고려하는 고가구조물 각각에 대하여 2.287 mm, 2.110 mm, 2.098 mm이므로 인천공항 자기부상철도 설계기준을 만족함을 확인할 수 있다. 또한, 차체의 가속도로부터 계산된 RMQ 값은 각각 0.2761 m/s^2, 0.2762 m/s^2, 0.2683 m/s^{2}이고 차량이 고가구조물을 통과하는 진동지속시간 1.08 s이므로, 이는 승차감 기준을 만족하고 있음을 확인할 수 있다. 이상의 해석결과로부터 이 연구에서 제안한 $L/1300$의 자기부상철도 고가구조물 처짐한계를 적용하더라도, 기존 자기부상철도 설계기준에서 규정하고 있는 자기부상공극 변동량의 제한 기준을 충분히 만족할 수 있을 뿐만 아니라 승차감과 관련된 진동 기준도 만족할 수 있음을 확인할 수 있다. 기존의 자기부상철도 고가구조물의 설계 기준은 단순교의 최대 처짐이 $L/2000$이 되도록 규정하고 있음을 고려할 때, 이 연구에서 제안한 $L/1300$의 처짐한계를 적용하면 경제적인 고가구조물의 설계가 가능할 것이다.



<자기부상 차량-고가구조물 시스템의 동적응답>

(다) 소결: 연직처짐 한계 제안

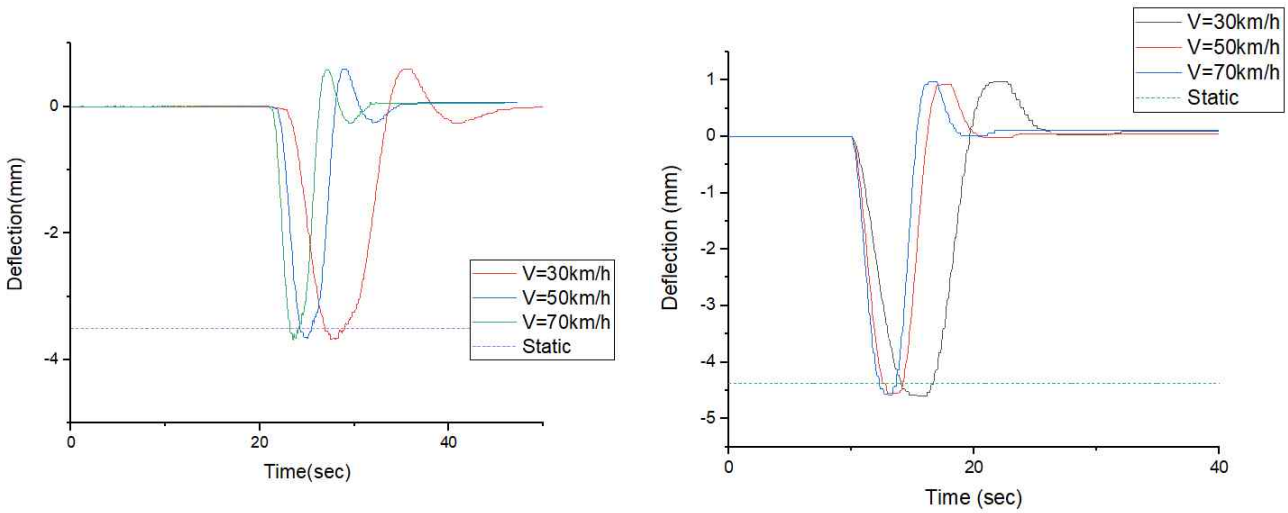
이 연구에서는 승객에게 편안한 승차감을 제공할 수 있도록 경전철 차체 연직가속도의 진동 크기에 대한 기준을 제시하고 이를 만족하는 고가구조물의 처짐한계를 제안하였다. 경전철 시스템의 동적 거동은 차량-구조물 상호작용에 의해 영향을 받으므로, 이를 고려한 해석기법을 사용하여 경전철 차량과 고가구조물 시스템의 동적해석을 수행하였다. 고가구조물의 경간길이와 차량 자중에 의한 정적처짐의 비에 따른 경전철 시스템의 동적 거동 변화를 검토하여 차체 연직가속도에 대한 기준을 만족할 수 있는 고가구조물의 처짐한계를 고무차륜 및 철제차륜용 경전철에 대해서는 $L/500$로, 자기부상 경전철에 대해서는 $L/1300$로 제안하고자 한다. 기존의 철도설계기준 교량일반사항 KDS 47 10 45: 2019의 처짐한계 및 인천공항 자기부상철도 설계기준의 처짐한계와 비교하여 새로이 제안한 처짐한계는 완화된 기준이다. 하지만, 이 기준을 사용하여 경전철 시스템의 고가구조물을 설계하여도 차량 승차감의 관점에서 만족할 수 있는 시스템을 설계할 수 있고, 완화된 설계기준으로 인해 좀 더 경제적인 고가구조물의 설계와 시공이 가능해질 것이다.

(2) 충격계수

(가) 일반 고무차륜형 경전철

① 현장계측결과 분석

아래 그림은 부산4호선 석대역~영산대역 고가구조물 직선부(ω=3.03Hz) 및 곡선부(R600m, ω=2.64 Hz)에서의 최대 정적 처짐 응답 및 일반 고무차륜형 경전철 차량 주행시 속도별(V=30, 50, 70km/h) 최대 동적 처짐 응답 이력 그래프이다. 아래 표에 고가구조물의 최대 정적 응답치에 대한 속도별 최대 동적 응답치를 나타내었고, 이를 통해 일반 고무차륜형 경전철 차량 주행속도별 충격계수를 도출하였다. 분석결과, 주행속도 70km/h에서 최대 동적응답을 보였으며, 최대 충격계수는 5.09%로 산정되었다.



(a) 직선부(3@40m, ω=3.03Hz)　　(b) 곡선부(3@40m, ω=2.64Hz)

<일반 고무차륜형 경전철 고가구조물의 주행속도별 최대 정·동적 응답 이력>

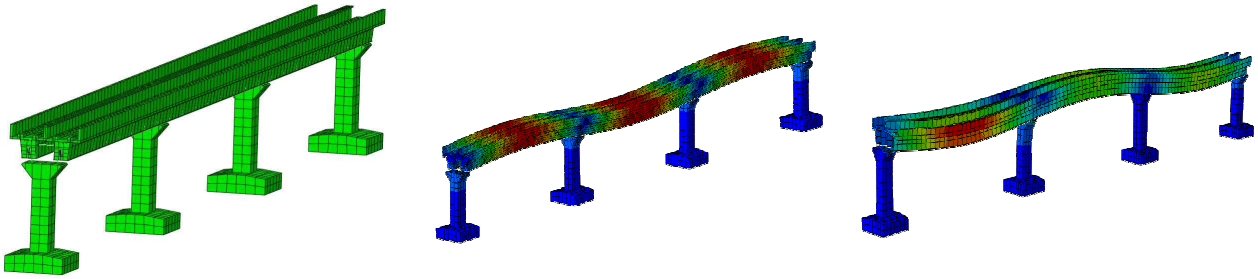
<일반 고무차륜형 경전철 고가구조물의 열차 주행속도별 충격계수>

구 분			V=30km/h	V=50km/h	V=70km/h
직선부 (ω=3.03Hz)	최대 처짐 응답 (mm)	정적	3.499		
		동적	3.668	3.673	3.677
	충격계수(%)		4.83	4.97	**5.09**
곡선부 (ω=2.64Hz)	최대 처짐 응답 (mm)	정적	4.370		
		동적	4.556	4.558	4.568
	충격계수(%)		4.26	4.30	**4.53**

② 수치해석 결과 분석

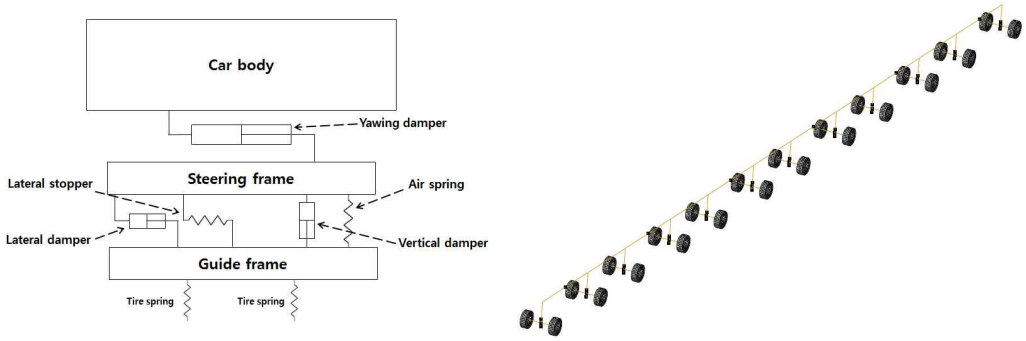
고가구조물의 수치해석 모델은 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 아래 그림과 같이 모델링하였으며, 철근콘크리트 바닥판 및 교각은 Solid요소, 주거더와 내부 보강재는 Shell요소, 가로보는 Beam요소, 고정 받침 및 가동 받침은 Connector요소를 이용하여 구현하였다. 현장계측 대상 고가구조물에 대한 자유진동해석 결과 고유진동수(ω)는 각각 직선부 3.03Hz,곡선부 2.64Hz로 나타났으며, 동일한 고유진동수를 갖도록 수치해석 모델링하였으며, 감쇠비는 1%를 적용하였다.

또한, 고무차륜형 AGT 차량에 대한 수치해석 모델 역시 ABAQUS를 이용하여 아래 그림과 같이 모델링하였으며, 차체, 선회 프레임, 안내 프레임, 차축, 고무타이어는 강체, 현가장치는 Connector 옵션을 이용하여 구현하였다.



(a) 유한요소모델 (b) 1st mode shape (직선부, ω=3.03Hz) (b) 1st mode shape (곡선부, ω=2.64Hz)

<일반 고무차륜형 경전철 고가구조물 유한요소모델 및 모드형상>



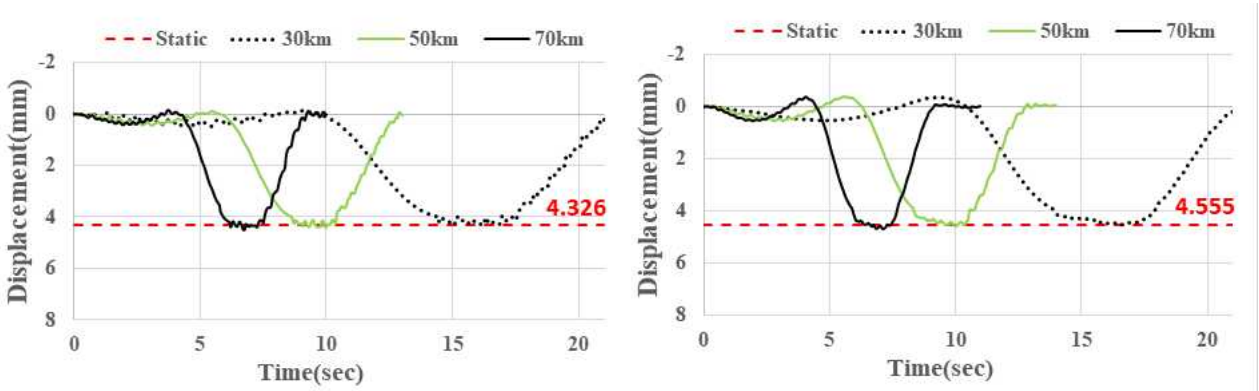
(a) 차량 모델 도식도 (b) 강체 모델

<일반 고무차륜형 AGT 차량 모델>

아래 그림은 고무차륜형 AGT 차량 주행시 고가구조물 직선부 및 곡선부에서의 최대 정적 처짐 응답 및 속도별(V=30, 50, 70km/h) 최대 동적 처짐 응답에 대한 시간 이력 그래프를 나타내었다. 또한, 아래 표에 각각 고가구조물 직선부 및 곡선부에서의 최대 정적 응답치에 대한 속도별 최대 동적 응답치를 나타내었고, 이를 통해 차량 주행속도별 충격계수를 산정하였다. 분석결과, 속도가 증가할수록 동적 응답치도 증가하여 주행속도 70km/h에서 최대 동적 응답이 발생하였으며, 최대 충격계수는 3.51%로 산정되었다.

일반적으로 고유진동수가 클수록 구조물의 충격계수도 증가하므로, 직선부에서 곡선부 대비 더 큰 충격계수를 갖는 것으로 나타났다. 타 차종 고가구조물의 충격계수 분석시에는 직선부에 대하여 수치해석 검토를 수행하였다.

또한, 현장계측에 의한 충격계수가 수치해석치에 비해 더 크게 나타났는데, 이는 해석 모델링시 주행로, 제3궤조 등 고정구조물의 비고려에 따른 질량 및 강성 차이가 있고, 현장에서의 콘크리트 주행궤도(주행로)의 마모상태(요철, 거칠기 등)와 교량 신축부 주행궤도간 이음부에서의 충격이 고려된 데에 기인한 것으로 판단된다.



(a) 3@40m(ω=3.03Hz, 직선부) (b) 3@40m(ω=2.64Hz, 곡선부 R600m)

<일반 고무차륜형 경전철 고가구조물의 주행속도별 최대 정·동적 응답 이력>

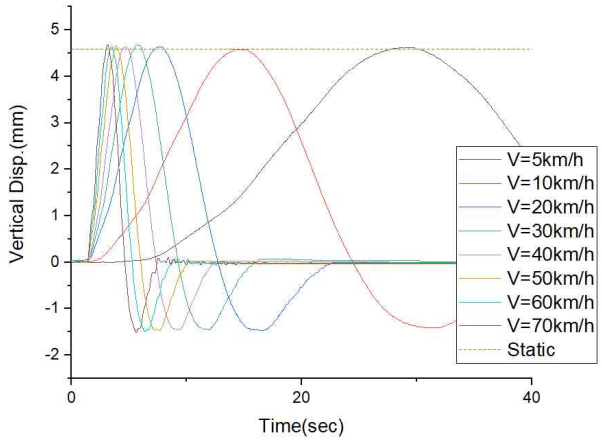
<일반 고무차륜형 경전철 고가구조물의 열차 주행속도별 충격계수>

구 분			V=30km/h	V=50km/h	V=70km/h
직선부 (ω=3.03Hz)	최대 처짐 응답 (mm)	정적	4.326		
		동적	4.349	4.411	4.478
	충격계수(%)		0.53	1.96	**3.51**
곡선부 (ω=2.64Hz)	최대 처짐 응답 (mm)	정적	4.555		
		동적	4.562	4.617	4.681
	충격계수(%)		0.15	1.36	**2.77**

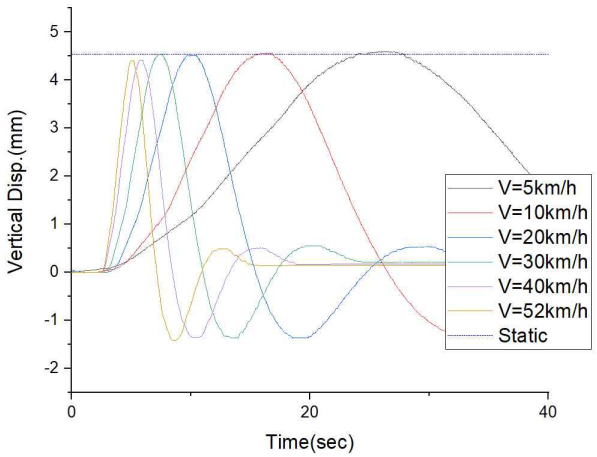
(나) 일반 철제차륜형 경전철

① 현장계측결과 분석

아래 그림은 부산김해경전철 덕두역~등구역 고가구조물 직선부(ω=2.27Hz) 및 곡선부(R220m, ω=2.54Hz)에서의 최대 정적 처짐 응답 및 일반 철제차륜형 경전철 차량 주행시 속도별(V=5km/h~최대운행속도) 최대 동적 처짐 응답 이력 그래프이다. 아래 표에 고가구조물의 최대 정적 응답치에 대한 속도별 최대 동적 응답치를 나타내었고, 이를 통해 일반 철제차륜형 경전철 차량 주행속도별 충격계수를 도출하였다. 분석결과, 주행속도 70km/h에서 최대 동적응답을 보였으며, 최대 충격계수는 2.2%로 도출되었다. 시험대상 곡선부는 R220m(최대통과속도 52km/h) 급곡선부로서, 차량 속도가 증가할수록 차량 하중이 원심력 방향으로 전이되면서 상대적으로 경간 중앙부에서의 연직처짐이 정적 처짐에 비해 작게 나타났다.



(a) 직선부(2@50m, ω=2.27Hz)



(b) 곡선부(50m+60m+50m, ω=2.54Hz)

<일반 철제차륜형 경전철 고가구조물의 주행속도별 최대 정·동적 응답 이력>

<일반 철체차륜형 고가구조물의 열차 주행속도별 충격계수(직선부)>

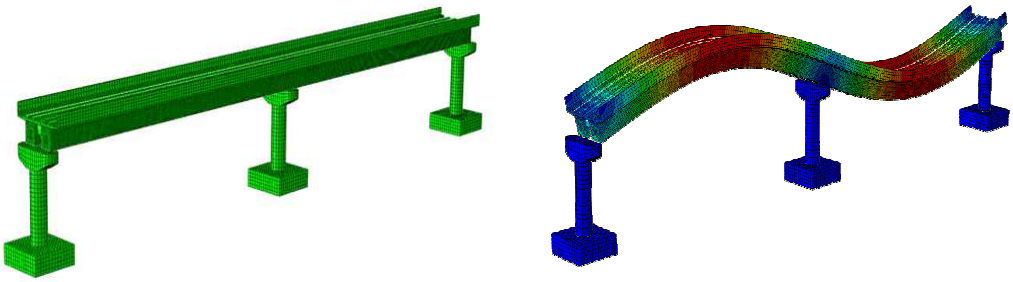
구분		속도, V (km/h)							
		5	10	20	30	40	50	60	70
최대 처짐 응답 (mm)	정적	4.590							
	동적	4.617	4.581	4.636	4.674	4.636	4.664	4.645	4.691
충격계수(%)		0.59	-0.20	1.00	1.83	1.00	1.61	1.20	**2.20**

<일반 철체차륜형 고가구조물의 열차 주행속도별 충격계수(곡선부)>

구분		속도, V (km/h)					
		5	10	20	30	40	52
최대 처짐 응답 (mm)	정적	4.541					
	동적	4.587	4.562	4.518	4.547	4.422	4.404
충격계수(%)		**1.01**	0.46	-0.51	0.13	-2.62	-3.02

② 수치해석 결과 분석

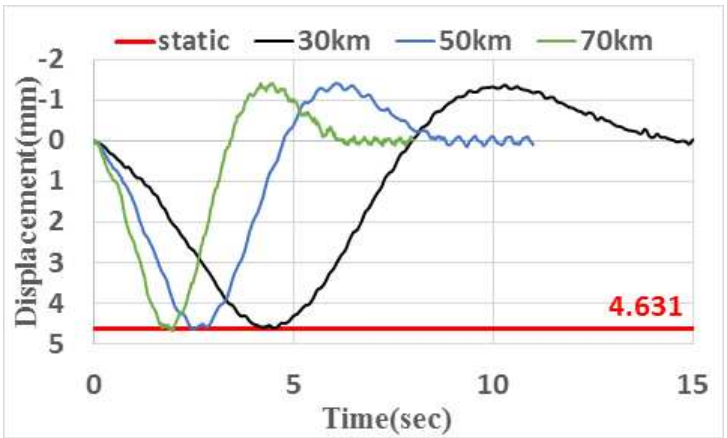
고가구조물의 수치해석 모델은 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 아래 그림과 같이 모델링하였으며, 교량 상판 및 교각은 Solid요소, 박스 거더는 Shell요소, 레일은 Beam요소를 이용하여 구현하였다. 현장계측 대상 고가구조물에 대한 자유진동해석 결과 고유진동수(ω)는 2.27Hz로 수치해석 모델(ω=2.36Hz)과 3.96% 차이가 있으며, 감쇠비는 1%를 적용하였다. 또한, 철제차륜형 AGT 차량 하중에 대해서는 차량의 차축 위치를 고려하여 이동 축중하중으로 재하하였다.



(a) 유한요소모델 (b) 1st mode shape (ω=2.36Hz)

<일반 철제차륜형 경전철 고가구조물 유한요소모델 및 모드형상>

아래 그림은 철제차륜형 AGT 차량 주행시 고가구조물 직선부에서의 최대 정적 처짐 응답 및 속도별(V=30, 50, 70km/h) 최대 동적 처짐 응답에 대한 시간 이력 그래프를 나타내었다. 또한, 아래 표에 각각 고가구조물 직선부에서의 최대 정적 응답치에 대한 속도별 최대 동적 응답치를 나타내었고, 이를 통해 차량 주행속도별 충격계수를 산정하였다. 분석결과, 속도가 증가할수록 동적 응답치도 증가하여 주행속도 70km/h에서 최대 동적 응답이 발생하였으며, 최대 충격계수는 0.69%로 산정되었다. 이 역시, 현장계측에 의한 충격계수가 수치해석치에 비해 더 크게 나타났는데, 해석 모델링시 궤도시스템, 제3궤조 등 고정구조물의 비고려에 따른 질량 및 강성 차이가 있고, 현장에서의 레일 마모상태와 교량 신축부 이음부에서의 충격이 고려된 데에 기인한 것으로 판단된다.



<일반 철제차륜형 경전철 고가구조물의 주행속도별 최대 정·동적 응답 이력>

<일반 철제차륜형 경전철 고가구조물의 열차 주행속도별 충격계수>

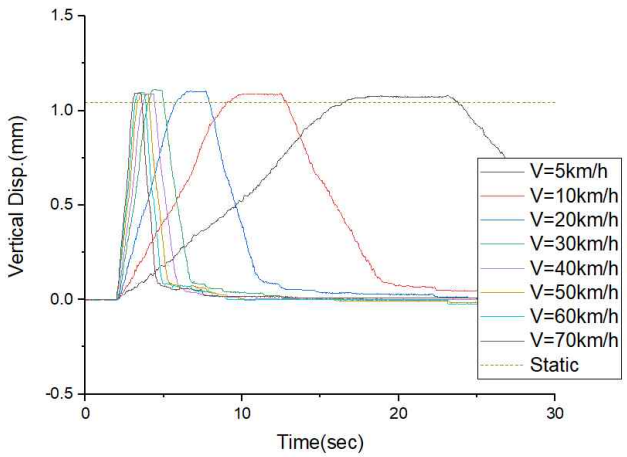
구 분			V=30km/h	V=50km/h	V=70km/h
직선부 (ω=2.36Hz)	최대 처짐 응답 (mm)	정적	4.631		
		동적	4.637	4.651	4.663
	충격계수(%)		0.13	0.43	**0.69**

(다) 선형유도전동기(LIM)방식 철제차륜형 경전철

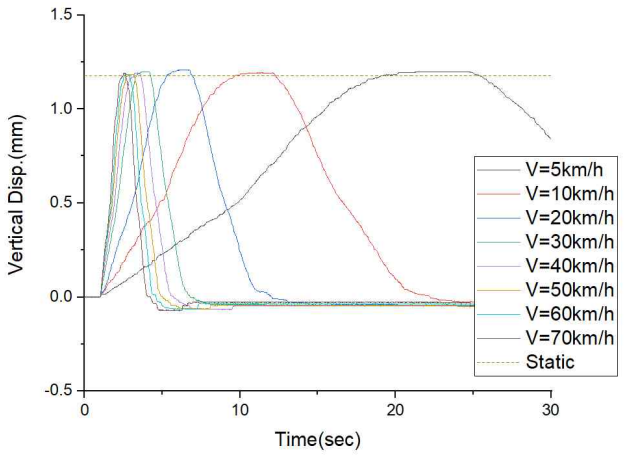
① 직선부

㉮ 현장계측결과 분석

아래 그림은 용인경전철 고진역~보평역 고가구조물 직선부(ω=7.28Hz) 및 곡선부(R600m, ω=6.06 Hz)에에서의 최대 정적 처짐 응답 및 LIM방식 철제차륜형 경전철 차량 주행시 속도별(V=5~70km/h) 최대 동적 처짐 응답 이력 그래프이다. 아래 표에 고가구조물의 최대 정적 응답치에 대한 속도별 최대 동적 응답치를 나타내었고, 이를 통해 LIM방식 철제차륜형 경전철 차량 주행속도별 충격계수를 도출하였다. 분석결과, 속도별 측정값 중 가장 최대치를 적용한 관계로 주행속도 30km/h에서 최대 동적응답을 보였으며, 최대 충격계수는 6.42%로 도출되었다.



(a) 직선부(1@35m, ω=7.28Hz)



(b) 곡선부(1@44m, ω=6.06Hz)

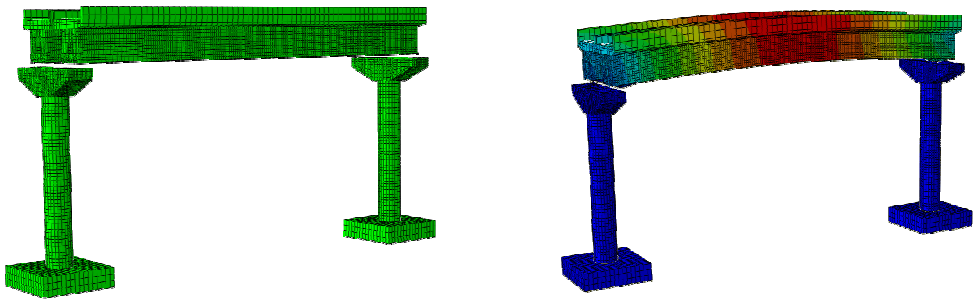
<LIM방식 철제차륜형 경전철 고가구조물의 주행속도별 최대 정·동적 응답 이력>

<LIM방식 철제차륜형 경전철 고가구조물의 열차 주행속도별 충격계수>

구분			속도, V (km/h)							
			5	10	20	30	40	50	60	70
직선부 (ω=7.28Hz)	최대 처짐 응답 (mm)	정적	1.044							
		동적	1.082	1.090	1.104	1.111	1.091	1.090	1.098	1.094
	충격계수(%)		3.64	4.41	5.75	**6.42**	4.50	4.41	5.17	4.79
곡선부 (ω=6.06Hz)	최대 처짐 응답 (mm)	정적	1.177							
		동적	1.200	1.184	1.208	1.199	1.193	1.185	1.184	1.191
	충격계수(%)		1.95	0.59	**2.63**	1.87	1.36	0.68	0.59	1.19

② 수치해석 결과 분석

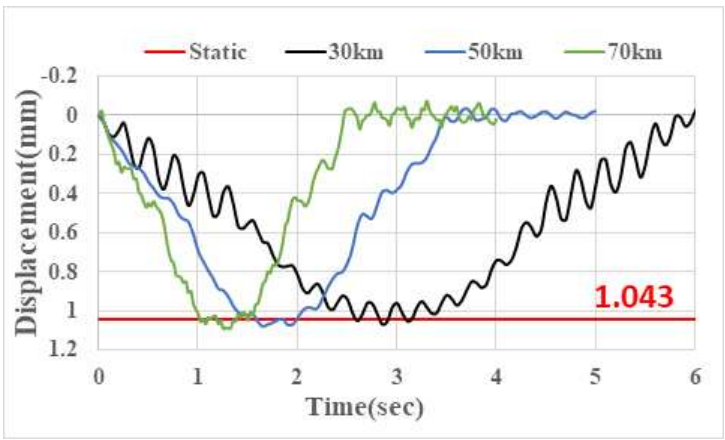
고가구조물의 수치해석 모델은 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 아래 그림과 같이 모델링하였으며, 교량 상판 및 교각은 Solid요소, 박스 거더는 Shell요소, 레일은 Beam요소를 이용하여 구현하였다. 현장계측 대상 고가구조물에 대한 자유진동해석 결과 고유진동수(ω)는 7.28Hz로 수치해석 모델(ω=7.05Hz)과 3.16% 차이가 있으며, 감쇠비는 1%를 적용하였다. 또한, 선형유도전동기형 경전철 차량 하중에 대해서는 차량의 차축 위치를 고려하여 이동 축중하중으로 재하하였다.



(a) 유한요소모델 (b) 1st mode shape (ω=7.05Hz)

<LIM방식 철제차륜형 경전철 고가구조물 유한요소모델 및 모드형상: 강박스 거더교>

아래 그림은 선형유도전동기(LIM)방식 철제차륜형 차량 주행시 고가구조물 직선부에서의 최대 정적 처짐 응답 및 속도별(V=30, 50, 70km/h) 최대 동적 처짐 응답에 대한 시간 이력 그래프를 나타내었다. 또한, 아래 표에 각각 고가구조물 직선부에서의 최대 정적 응답치에 대한 속도별 최대 동적 응답치를 나타내었고, 이를 통해 차량 주행속도별 충격계수를 산정하였다. 분석결과, 주행속도 70km/h에서 최대 동적 응답이 발생하였으며, 최대 충격계수는 4.2%로 산정되었다. 이 역시, 현장계측에 의한 충격계수가 수치해석치에 비해 더 크게 나타났는데, 해석 모델링시 궤도시스템, 제3궤조 등 고정구조물의 비고려에 따른 질량 및 강성 차이가 있고, 현장에서의 레일 마모상태와 교량 신축부 이음부에서의 충격이 고려된 데에 기인한 것으로 판단된다.



<LIM방식 철제차륜형 경전철 고가구조물의 주행속도별 최대 정·동적 응답 이력>

<LIM방식 철제차륜형 경전철 고가구조물의 열차 주행속도별 충격계수>

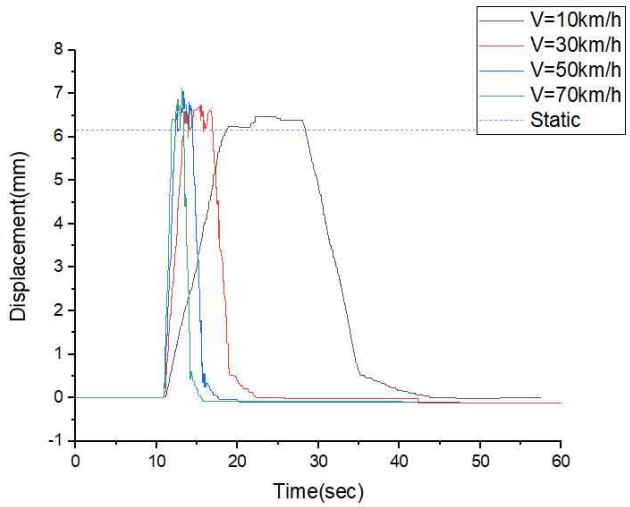
구 분			V=30km/h	V=50km/h	V=70km/h
직선부 (ω=7.05Hz)	최대 처짐 응답 (mm)	정적	1.043		
		동적	1.067	1.080	1.087
	충격계수(%)		1.1	3.5	**4.2**

(라) 모노레일형 경전철

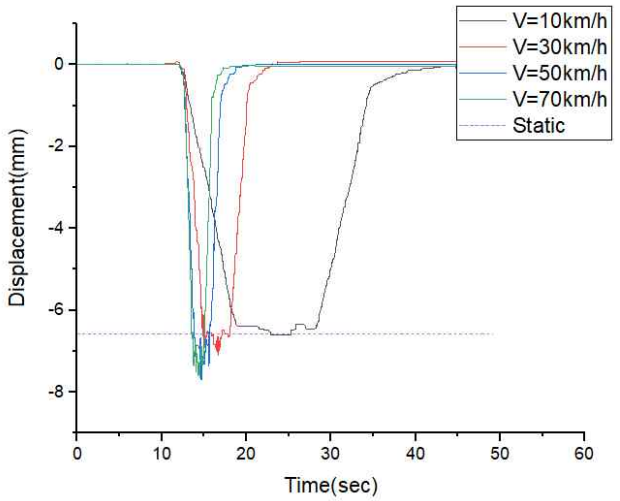
① 직선부

㉮ 현장계측결과 분석

아래 그림은 대구3호선 팔거역~동천역 고가구조물 직선부(ω=6.25Hz) 및 곡선부(R250m, ω=6.25Hz)에서의 최대 정적 처짐 응답 및 모노레일 차량 주행시 속도별(V=10~70km/h) 최대 동적 처짐 응답 이력 그래프이다. 아래 표에 고가구조물의 최대 정적 응답치에 대한 속도별 최대 동적 응답치를 나타내었고, 이를 통해 모노레일 차량 주행속도별 충격계수를 도출하였다. 분석결과, 주행속도 50km/h에서 최대 동적응답을 보였으며, 최대 충격계수는 17.2%로 도출되었다. 측정값 중 가장 큰 응답치를 적용한 관계로, 주행속도 70km/h보다 50km/h에서 더 큰 충격계수를 가진 것으로 판단된다.



(a) 직선부(1@25m, ω=6.25Hz)



(b) 곡선부(1@25m, ω=6.25Hz)

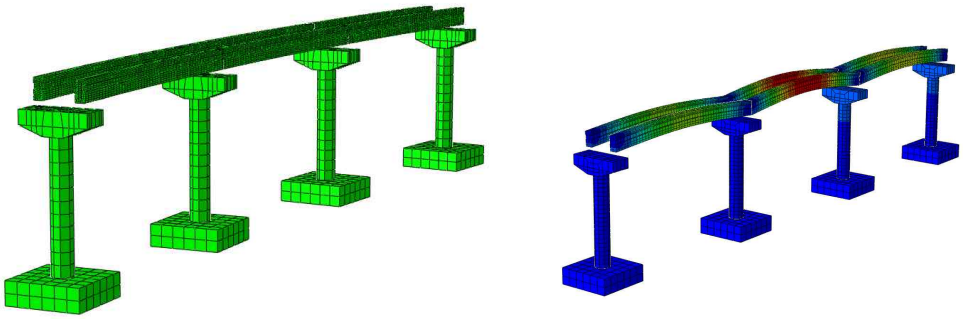
<모노레일형 경전철 고가구조물의 주행속도별 최대 정·동적 응답 이력>

<모노레일형 경전철 고가구조물의 열차 주행속도별 충격계수>

구분			V=10km/h	V=30km/h	V=50km/h	V=70km/h
직선부	최대 처짐 응답 (mm)	정적	6.152			
		동적	6.475	6.737	7.040	7.126
	충격계수(%)		5.3	9.5	14.4	**15.8**
곡선부	최대 처짐 응답 (mm)	정적	6.566			
		동적	6.607	7.102	7.695	7.654
	충격계수(%)		0.6	8.2	**17.2**	16.6

② 수치해석 결과 분석

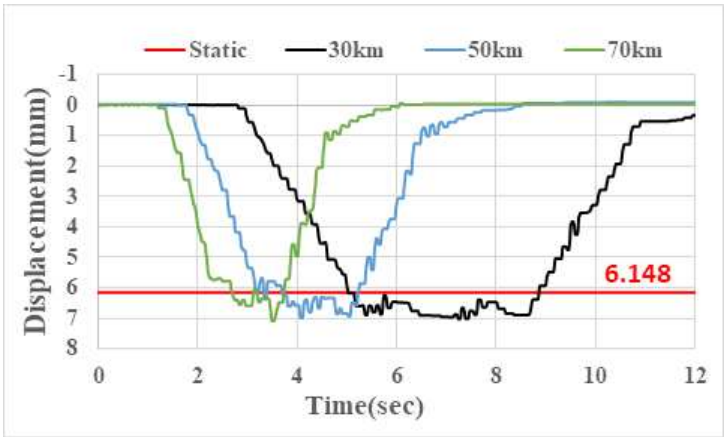
고가구조물의 수치해석 모델은 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 아래 그림과 같이 모델링하였으며, 모노레일 궤도빔과 하부 교각 모두 Solid 요소를 이용하여 모델링하였다. 현장계측 대상 고가구조물에 대한 자유진동해석 결과 고유진동수(ω)는 6.25Hz로 수치해석 모델(ω=5.87Hz)과 6.08% 차이가 있으며, 감쇠비는 1%를 적용하였다. 또한, 모노레일형 경전철 차량 하중에 대해서는 차량의 차축 위치를 고려하여 이동 축중하중으로 재하하였다.



(a) 유한요소모델 (b) 1st mode shape (ω=5.87Hz)

<모노레일형 경전철 고가구조물 유한요소모델 및 모드형상: 모노레일 궤도빔>

아래 그림은 모노레일형 차량 주행시 고가구조물 직선부에서의 최대 정적 처짐 응답 및 속도별(V=30, 50, 70km/h) 최대 동적 처짐 응답에 대한 시간 이력 그래프를 나타내었다. 또한, 아래 표에 각각 고가구조물 직선부에서의 최대 정적 응답치에 대한 속도별 최대 동적 응답치를 나타내었고, 이를 통해 차량 주행속도별 충격계수를 산정하였다. 분석결과, 주행속도 70km/h에서 최대 동적 응답이 발생하였으며, 최대 충격계수는 15.3%로 산정되었다. 이 역시, 현장계측에 의한 충격계수가 수치해석치에 비해 더 크게 나타났는데, 현장에서의 모노레일 궤도빔 이음부에서의 충격이 고려된 데에 기인한 것으로 판단된다.



<모노레일 경전철 고가구조물의 주행속도별 최대 정·동적 응답 이력>

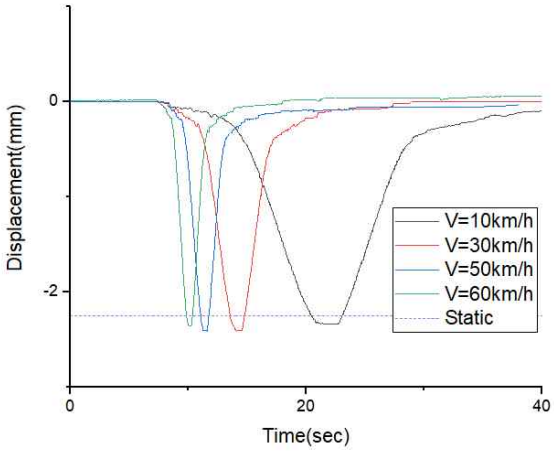
<모노레일형 경전철 고가구조물의 주행속도별 충격계수>

구분		V=10km/h	V=30km/h	V=50km/h	V=70km/h
최대 처짐 응답 (mm)	정적	6.148			
	동적	7.002	7.027	6.984	7.086
충격계수(%)		13.9	14.3	13.6	**15.3**

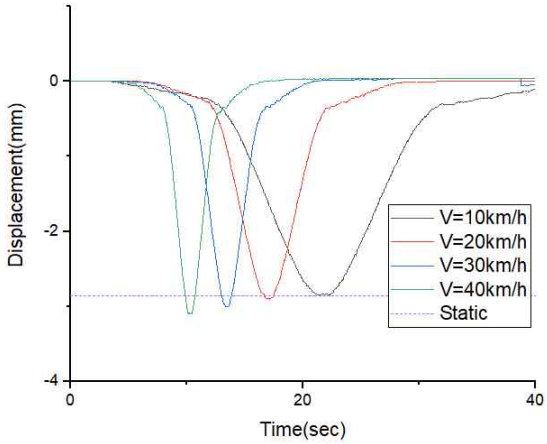
(마) 자기부상형 경전철

① 현장계측결과 분석

아래 그림은 인천공항 자기부상철도 용유역~워터파크역 고가구조물 직선부(ω=5.37Hz) 및 곡선부(R110m, ω=5.52Hz)에서의 최대 정적 처짐 응답 및 자기부상 경전철 차량 주행시 속도별(V=10km/h~최대운행속도) 최대 동적 처짐 응답 이력 그래프이다. 아래 표에 고가구조물의 최대 정적 응답치에 대한 속도별 최대 동적 응답치를 나타내었고, 이를 통해 자기부상 경전철 차량 주행속도별 충격계수를 도출하였다. 분석결과, 주행속도 40km/h에서 최대 동적응답을 보였으며, 최대 충격계수는 8.3%로 도출되었다.



(a) 직선부(1@30m, ω=5.37Hz)



(b) 곡선부(1@30m, ω=5.52Hz)

<자기부상형 경전철 고가구조물의 주행속도별 최대 정·동적 응답 이력>

<자기부상형 경전철 고가구조물의 열차 주행속도별 충격계수(직선부)>

구분		V=10km/h	V=30km/h	V=50km/h	V=60km/h
최대 처짐 응답 (mm)	정적	2.249			
	동적	2.337	2.412	2.417	2.356
충격계수(%)		3.9	7.2	**7.5**	4.8

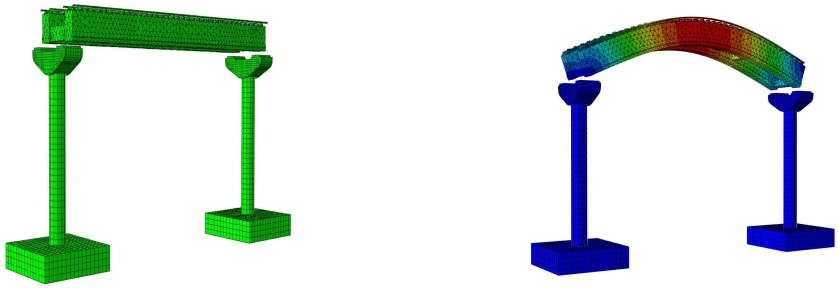
<자기부상형 경전철 고가구조물의 열차 주행속도별 충격계수(곡선부)>

구분		V=10km/h	V=20km/h	V=30km/h	V=40km/h
최대 처짐 응답 (mm)	정적	2.861			
	동적	2.850	2.905	3.013	3.098
충격계수(%)		-0.4	1.5	5.3	**8.3**

② 수치해석 결과 분석

고가구조물의 수치해석 모델은 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 아래 그림과 같이 모델링하였으며, 모노레일 궤도빔과 하부 교각 모두 Solid 요소를 이용하여 모델링하였다. 현장계측 대상 고가구조물에 대한 자유진동해석 결과 고유진동수(ω)는 6.25Hz로 수치해석 모델(ω=7.05Hz)과 3.16% 차이가 있으며, 감쇠비는 1%를 적용하였다. 또한, 모노레일형 경전철 차량 하중에 대해서는 차량의 차축 위치를 고려하여 이동 축중하중으로 재하하였다.

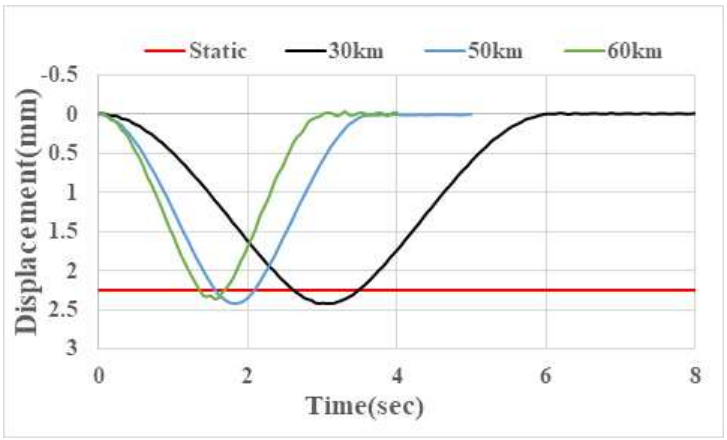
고가구조물의 수치해석 모델은 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 아래 그림과 같이 모델링하였으며, PSC 궤도빔, 교각 및 레일은 Solid요소, 침목은 Shell요소를 이용하여 모델링하였다. 현장계측 대상 고가구조물에 대한 자유진동해석 결과 고유진동수(ω)는 5.37Hz로 수치해석 모델(ω=4.90Hz)과 8.7% 차이가 있으며, 감쇠비는 1%를 적용하였다. 또한, 자기부상형 경전철 차량 하중에 대해서는 이동 분포하중으로 재하하였다.



(a) 유한요소모델 (b) 1st mode shape (ω=4.90Hz)

<자기부상형 고가구조물 유한요소모델 및 모드형상 : PSC 궤도빔>

아래 그림은 자기부상형 차량 주행시 고가구조물 직선부에서의 최대 정적 처짐 응답 및 속도별 (V=30, 50, 70km/h) 최대 동적 처짐 응답에 대한 시간 이력 그래프를 나타내었다. 또한, 아래 표에 각각 고가구조물 직선부에서의 최대 정적 응답치에 대한 속도별 최대 동적 응답치를 나타내었고, 이를 통해 차량 주행속도별 충격계수를 산정하였다. 분석결과, 주행속도 60km/h에서 최대 동적 응답이 발생하였으며, 최대 충격계수는 7.7%로 산정되었다.



<자기부상형 경전철 고가구조물의 주행속도별 최대 정·동적 응답 이력>

<자기부상형 경전철 고가구조물의 주행속도별 충격계수>

구분		V=10km/h	V=30km/h	V=50km/h	V=60km/h
최대 처짐 응답 (mm)	정적	2.249			
	동적	2.345	2.398	2.407	2.422
충격계수(%)		4.3	6.6	7.0	**7.7**

(바) 소결: 충격계수 제안

현재 국내 철도교설계기준(2013) 및 Eurocode에서 제시하는 설계기준은 아래 표와 같다.

<국내·외 교량 충격계수 설계기준 비교>

구분		충격계수
한국	KDS 24 12 21(2016) (도로교)	15% (피로 한계상태) 25% (이외 한계상태)
	철도교설계기준(2013)	$\frac{1.44}{\sqrt{L_e}-0.2}-0.18$
유럽	Eurocode	For carefully maintained track(c.m.t.), $\frac{1.44}{\sqrt{L_e}-0.2}-0.18$ For track with standard maintenance(s.m.t), $\frac{2.16}{\sqrt{L_e}-0.2}-0.27$

5개 경전철 차종별 고가구조물의 현장계측 및 수치해석에 의해 도출된 최대 충격계수는 아래 표와 같이 나타났다. 이 표에 Eurocode 및 이를 준용한 철도교설계기준(2013)에서 제시하는 상기 기준에 의거 산정한 교량 경간장에 따른 충격계수를 함께 나타냈으며, 현장계측 및 수치해석 결과치와 이를 비교하여 충격계수 설계기준을 아래와 같이 제시한다.

경전철 고가구조물 충격계수는 아래 식으로 계산하여 적용한다.

$$\frac{1.44}{\sqrt{L}-0.2}-0.18$$

여기서, L: 경간장

다만, 모노레일형 경전철 차량이 주행하는 궤도빔 거더교에서 궤도빔과 궤도빔 사이에 사선형 이음매판 등 별도의 충격완화 신축이음부를 설치하지 않은 경우에는 아래 식으로 계산하여 적용한다.

$$\frac{2.16}{\sqrt{L}-0.2}-0.27$$

여기서, L: 경간장

실제 고가구조물 상 주행궤도 상태(요철 등), 신축이음부 충격 등에 의해 전체적으로 현장계측치가 수치해석치에 비해 더 큰 충격계수를 갖는 것을 감안하여, 5개 차종별 고가구조물의 현장 계측에 의해 산정된 충격계수를 철도교설계기준(2013) 및 Eurocode의 충격계수(c.m.t) 제안한 충격계수와 비교하였다. 그 결과, LIM형 및 자기부상형 경전철을 제외한 나머지 3개 차종(일반고무차륜형, 일반철제차륜형, 모노레일형) 고가구조물의 경우 실제 현장계측에 의한 충격계수보다 작은 것으로 나타났다. Eurocode의 충격계수(c.m.t) 산정시, 연속교 영향을 고려하여 유효 경간장(L_e)를 적용하여 충격계수를 완화토록 하였는데 이를 고려하지 않고 재산정하면, 아래 표의 제안치와 같고 일반고무차륜형 및 일반철제차륜형 경전철 고가구조물의 현장계측에 의한 충격계수보다 안전측으로 제안될 수 있음을 확인하였다. 한편, 모노레일형 경전철의 경우 단경간을 갖는 데다가 교량 바닥판 슬래브가 별도 없이 모노레일 차량이 직접 교량의 거더역할을 하는 PSC 궤도빔을 주행하는 관계로 경간과 경간 사이 신축이음부에 의한 충격효과가 큰 것으로 나타나, 모노레일형 경전철 고가구조물의 충격계수는 Eurocode의 충격계수(s.m.t)를 준용하되, 궤도빔간 단차에 의한 충격을 제거하기 위한 사선형 이음매판 등 충격완화 이음부를 두는 경우 Eurocode의 충격계수(c.m.t)를 준용하는 것으로 제안하였다.

아래 표에 상기 제안식에 의한 충격계수 산정값(제안치)이 5개 차종별 경전철 고가구조물의 현장계측에 의해 산정한 충격계수에 비해 모두 안전측으로 제안되는 것을 확인할 수 있다.

<경전철 고가구조물의 충격계수 산정값에 대한 국내·외 기준 및 제안 산정값 비교>

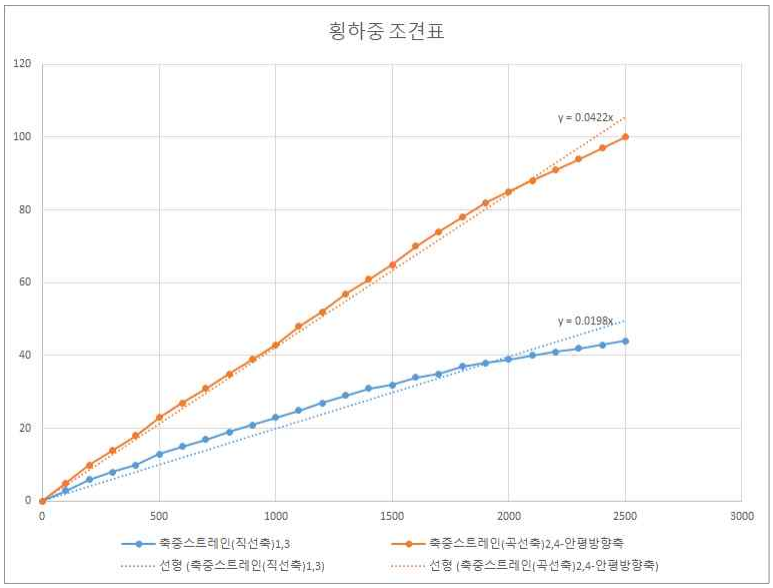
구분	경간장	고유진동수 (현장계측치)	충격계수(%)				
			현장 계측치	수치 해석치	철도교 설계기준 (2013)	Eurocode	제안치
일반고무차륜형 (부산4호선)	3@40m	3.03Hz	**5.09**	3.51	2.54	c.m.t.: 2.54 s.m.t.: 3.81	**5.51**
일반철제차륜형 (부산김해경전철)	2@50m	2.27Hz	**2.20**	0.69	1.08	c.m.t.: 1.08 s.m.t.: 1.62	**2.96**
LIM방식 철제차륜형 (용인경전철)	1@35m	7.28Hz	**6.42**	4.20	7.19	c.m.t.: 7.19 s.m.t.:10.79	**7.19**
모노레일형 (대구3호선)	1@25m	6.25Hz	**17.20**	15.30	12.00	c.m.t.:12.00 s.m.t.:18.00	**18.00**
자기부상형 (인천공항자기부상철도)	1@30m	5.37Hz	**8.30**	7.70	9.29	c.m.t.: 9.29 s.m.t.:13.93	**9.29**

*c.m.t.:carefully maintained track, s.m.t.:standard maintained track

(3) 횡하중

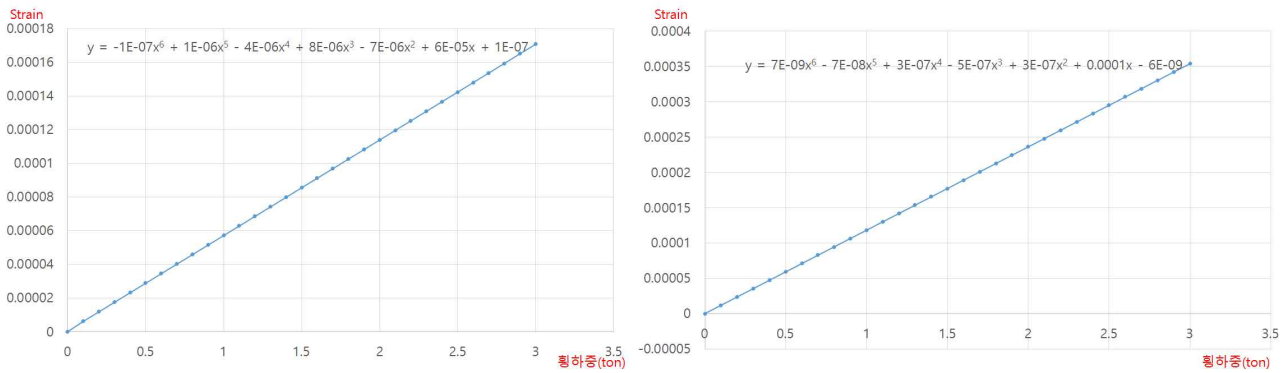
(가) 일반 고무차륜형 경전철

일반 고무차륜형 경량전철 차량 횡하중은 부산4호선 안평역~금사역까지의 시험구간을 상・하행 정상 주행하였을 때 안내륜에 가해지는 직접적인 횡방향 충격이 전달되어 발생하는 안내륜축의 변형율을 측정하여 횡하중을 산정하였다. 현장 계측 특성에 따라 차량 주행 출발 시의 초기치와 주행 중 최대 측정값과의 차이값을 최대 변형율값으로 산정하였다. 일반 고무차륜형 경전철의 횡하중/변형율 상관관계 도출 현장시험 및 구조해석을 통해 산출한 각각의 아래 횡하중/변형율 상관관계식을 이용하여 계측한 변형율값에 의한 횡하중을 산정하였다.



- 차량 횡하중(직선 안내륜축) = 변형율/0.0198
- 차량 횡하중(곡선 안내륜축) = 변형율/0.0422

(a) 횡하중(kgf)/변형율($\mu\epsilon$) 상관관계 그래프(현장 시험)

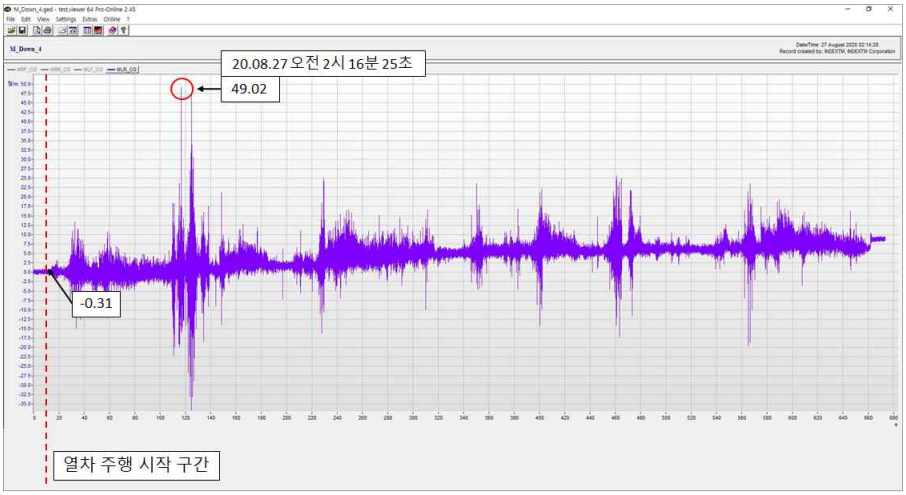


- 차량 횡하중(직선 안내륜축) = 변형율/0.06
- 차량 횡하중(곡선 안내륜축) = 변형율/0.1

(b) 횡하중(kgf)/변형율($\mu\epsilon$) 상관관계 그래프(구조 해석)

<차량 안내륜축의 횡하중(kgf)/변형율($\mu\epsilon$) 상관관계 그래프>

아래 표에 차량주행 시험에 따른 MC1차량 및 M2차량의 직선 안내륜축 및 곡선 안내륜축에 발생한 최대 변형율값을 나타냈다. 곡선 안내률축에 최대 49.33$\mu\epsilon$의 변형율이 발생하였으며, 아래 그림에 이때 그래프를 나타냈다. 이 변형율값을 상기 횡하중-변형율 상관관계식 중 보수적인 관계식을 이용하여 횡하중을 산정하면 1.17ton이고, 차량하중(12ton)의 9.75%, 축중(6ton)의 19.5%이다.



(단위: $\mu\epsilon$, +: 인장, -: 압축)

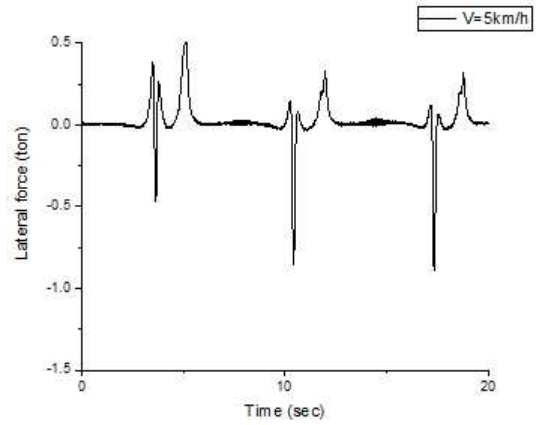
구분		상선(안평역→금사역)	하선(금사역→안평역)
MC1 차량 (No.1)	FRF	17.57	-12.28
	FRR	23.20	-14.47
	FLF	16.60	-18.17
	FLR	11.87	-33.43
M2 차량 (No.3)	MRF	-34.11	-24.43
	MRR	25.20	-19.85
	MLF	21.44	-34.15
	MLR	-20.42	49.33

<안내륜축의 변형율 이력 그래프 및 최대 변형율>

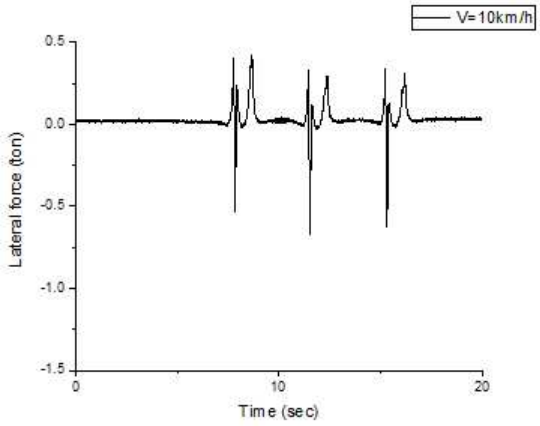
(나) 일반 철제차륜형 경전철

일반 철제차륜형 경전철 차량 주행시 고가구조물에 작용하는 횡하중을 측정하기 위하여, 차량이 곡선부 통과시 레일에서의 변형율 응답을 측정하였으며, 윤중횡압검증기를 이용한 사전 시험에 의해 도출된 횡압-변형율 관계식에 의거 횡하중을 도출하였다.

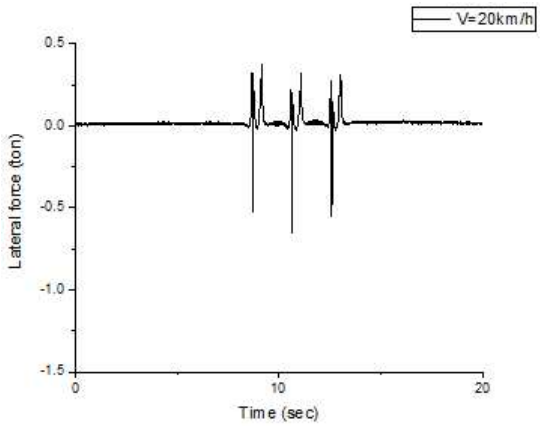
아래 그림은 일반 철제차륜형 차량 주행속도별(5~52km/h) 곡선부 통과시 발생한 횡하중 그래프이다. 차량속도 52km/h는 곡선부 최대 운행속도로서, 시험 시에는 52km/h 속도로 곡선부 진입후 차량을 최대 가속하여 횡하중 측정센서 부착 위치에서 최대 횡하중이 작용되도록 측정하였다. 분석결과, 52km/h 이상의 차량 속도 주행시 횡하중이 가장 크게 작용하였으며, 최대 횡하중은 1.22ton으로 차량하중(23.25ton)의 5.2%, 축중(7.75ton)의 15.8% 수준인 것으로 나타났다.



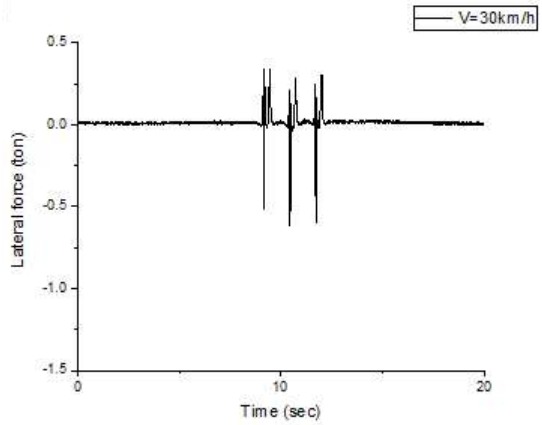
(a) V=5km/h



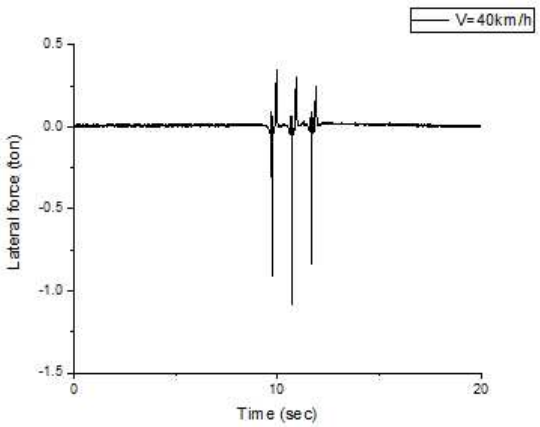
(b) V=10km/h



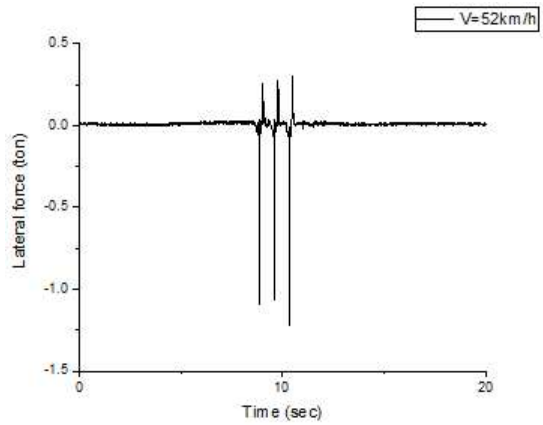
(c) V=20km/h



(d) V=30km/h



(e) V=40km/h



(f) V=52km/h

<일반 철제차륜형 경전철 차량 횡하중 응답>

<일반 철제차륜형 경전철 주행속도별 곡선부 횡하중>

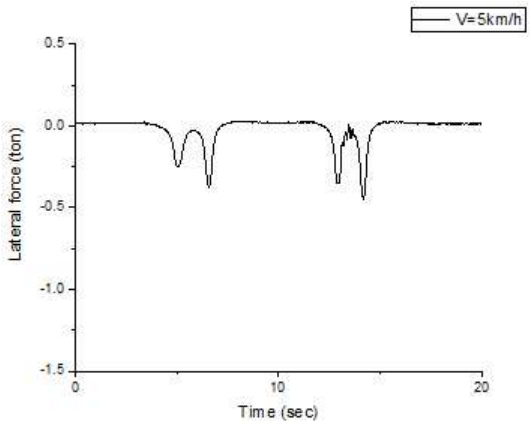
구분	속도, V (km/h)					
	5	10	20	30	40	52
최대 횡하중(ton)	0.89	0.68	0.65	0.62	1.09	**1.22**
축중(7.75ton) 비율 (%)	11.5	8.7	8.4	7.9	14.0	**15.8**

(다) 선형유도전동기(LIM)방식 철제차륜형 경전철

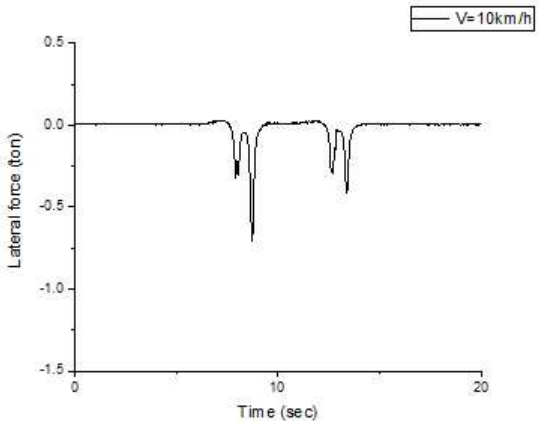
LIM방식 철제차륜형 경전철 차량 주행시 고가구조물에 작용하는 횡하중을 측정하기 위하여, 차량이 곡선부 통과시 레일에서의 변형율 응답을 측정하였으며, 윤중횡압검증기를 이용한 사전 시험

에 의해 도출된 횡압-변형율 관계식에 의거 횡하중을 도출하였다.

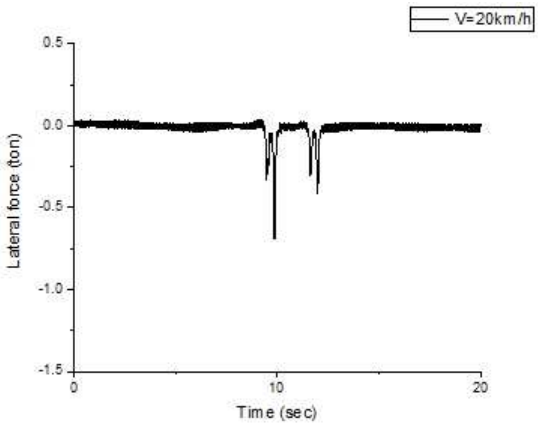
아래 그림은 LIM방식 철제차륜형 차량 주행속도별(5~68km/h) 곡선부 통과시 발생한 횡하중 그래프이다. 분석결과, 차량 속도 10km/h 주행시 횡하중이 가장 크게 작용하였으며, 최대 횡하중은 0.71 ton으로 차량하중(24ton)의 3%, 축중(6.0ton)의 11.8% 수준인 것으로 나타났다.



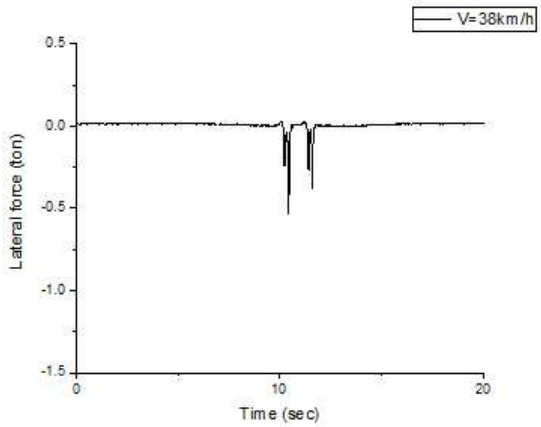
(a) V=5km/h



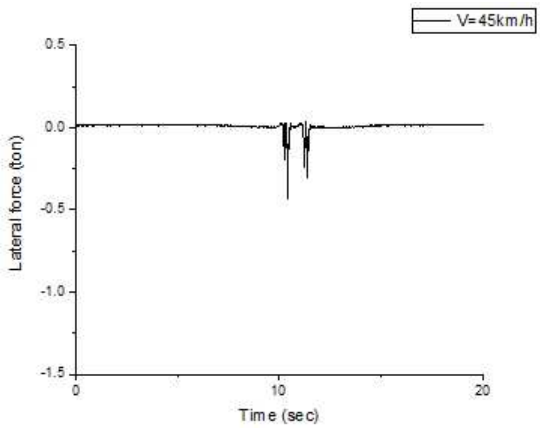
(b) V=10km/h



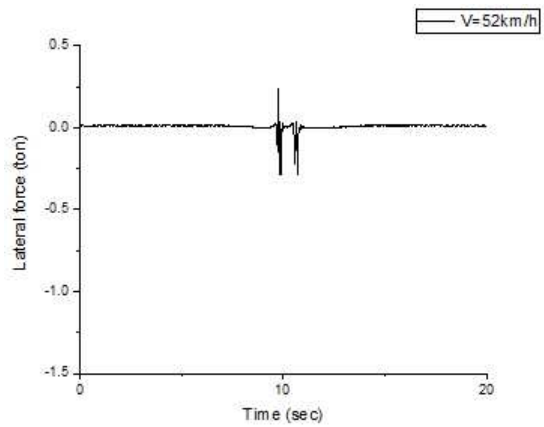
(c) V=20km/h



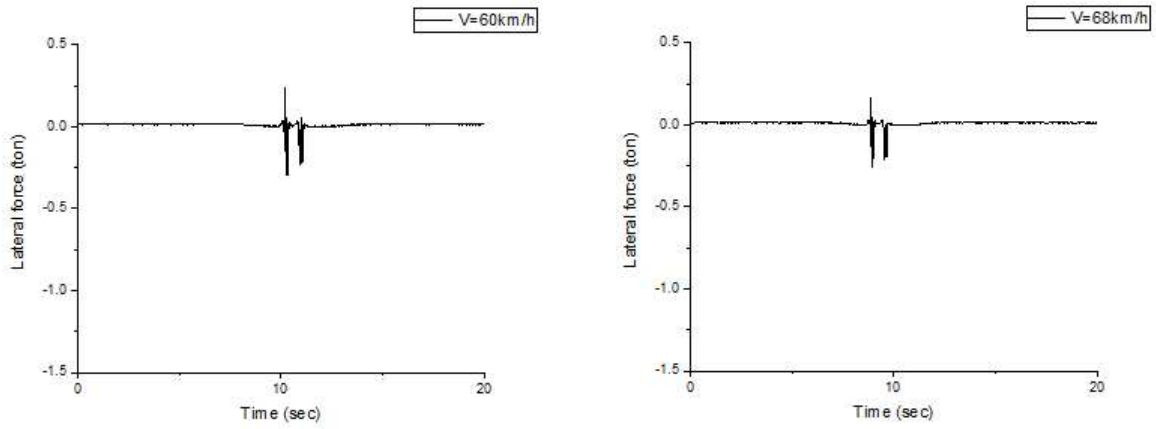
(d) V=38km/h



(e) V=45km/h



(f) V=52km/h



(e) V=60km/h (f) V=68km/h

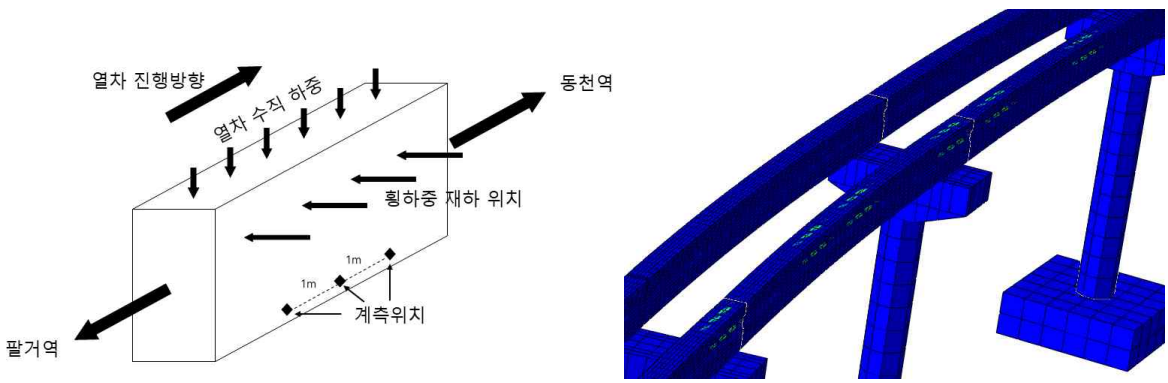
<LIM방식 철제차륜형 경전철 차량 횡하중 응답>

<LIM방식 철제차륜형 경전철 주행속도별 곡선부 횡하중>

구분	속도, V (km/h)							
	5	10	20	38	45	52	60	68
최대 횡하중(ton)	0.45	**0.71**	0.70	0.53	0.43	0.29	0.30	0.26
축중(6.0ton) 비율 (%)	7.5	**11.8**	11.6	8.9	7.2	4.9	4.9	4.4

(라) 모노레일형 경전철

대구 3호선에서 현재 운행 중인 모노레일 차량에는 안내륜이 부착되어 있어 궤도빔의 측면을 바퀴가 주행하므로 안내륜에 의한 횡하중이 발생한다. 대구 도시철도 3호선 고가구조물의 횡하중 해석은 먼저 해석 교량 모델의 궤도빔 상면에 수직 이동하중만을 재하하여 계측 위치에서 발생하는 변형률을 구하고, 그 후 궤도빔 상면에 적용한 수직 이동하중은 유지한 채로 궤도빔 측면에 안내륜 차축 간의 간격만큼 횡방향으로 1kN의 단위 횡하중을 추가로 적용하여 발생하는 계측 위치에서의 변형률을 동적 해석으로 구하였다. 이렇게 추가 적용된 단위 횡하중에 의한 압축변형률을 구하여 현장에서 계측한 변형율 데이터를 이용하여 횡하중을 산출하였다. 아래 그림은 해석모델의 하중 재하 위치와 궤도빔 측면에서의 변형률 계측 위치를 나타냈다.

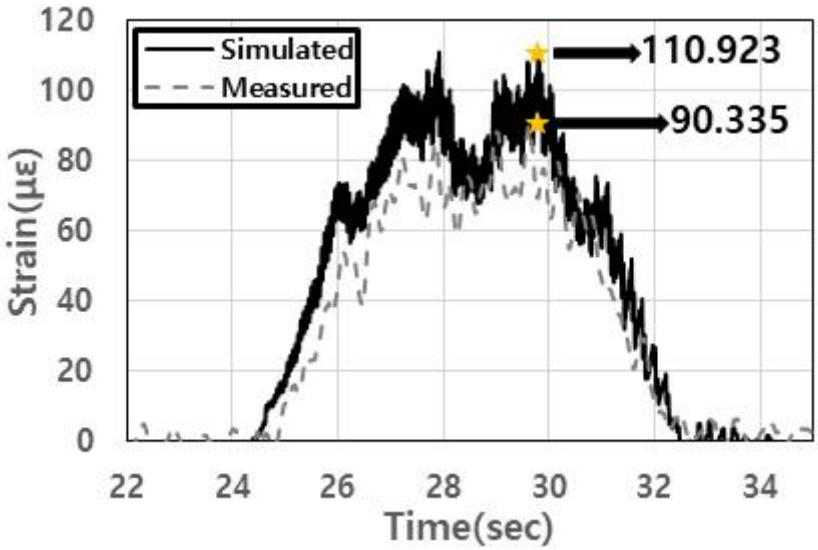


(a) 차량 하중 위치 및 계측 위치 (b) 해석 시 적용한 차량 하중 위치

<모노레일 차량 횡하중 산정 위한 모델링 및 재하 위치>

아래 그림은 현장 차량 주행시 계측한 변형률 데이터와 수직하중만을 재하 하였을 시에 얻은 해석값 간의 비교 그래프를 나타낸다. 아래 표는 곡선부 고가구조물에서의 횡하중 재하에 따른 계측

데이터와 해석결과를 이용하여 산출한 횡하중을 나타낸다. 곡선부 궤도빔의 내측 측면 하단에는 수직하중에 의한 인장 변형과 횡하중에 의한 압축 변형이 동시 작용한다. 이에 수직하중만을 재하 후 해석하여 도출된 인장 변형률과 계측된 인장 변형률 간의 차이를 수직하중 재하와 동시에 안내륜에 단위 횡하중 작용시 발생하는 압축 변형률로 나누어 안내륜에 작용하는 횡하중을 산출하면 9.179kN이며, 축중(81.25kN, 공차기준)의 11.3%로 나타났다.



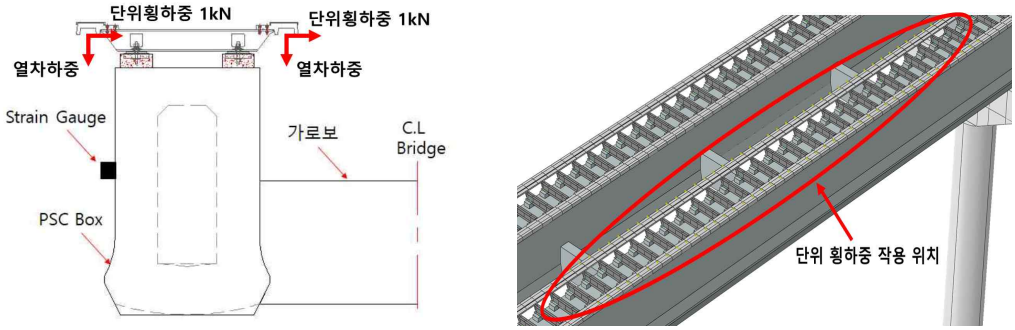
<현장 계측 및 해석(수직하중만 재하)에 의한 변형률 그래프>

<현장 계측 및 해석(수직하중만 재하)에 의한 최대 변형율>

속도	최대 변형률($\mu\varepsilon$)		
	계측치	해석치 (수직하중만 재하)	변형률 차이(A)
70km	90.335	110.923	20.588
단위 횡하중 재하시 압축 변형률(B)	횡하중(kN)= $\frac{\text{변형률차이}(A)}{\text{단위횡하중당압축변형률}(B)}$		$\frac{\text{횡하중}}{\text{축중}}\times 100(\%)$
2.243	9.179		11.3

(마) 자기부상형 경전철

인천자기부상철도에서 운행중인 차량은 별도 횡방향 안내륜이 없고, 곡선부 주행시 PSC 궤도빔 상의 부상 레일면에 횡하중이 발생한다. 인천자기부상철도 고가구조물의 횡하중 해석은 먼저 고가구조물 모델에 열차 하중만을 재하하여 계측 위치에서 발생하는 변형률을 구한다. 그 후 자기부상열차의 특성상 차축이 없어 차체의 길이방향을 따라 등분포하중이 작용한다고 가정하고, 부상 레일면에 단위 횡하중(84kN: 2개 레일×레일당 단위횡하중 1kN/0.5m×10.5m(차량 고정자 길이)×2량)을 추가하여 열차하중과 단위 횡하중을 동시에 작용시켜 변형률을 구하였다.



(a) 차량 하중 위치 및 계측 위치 (b) 해석 시 적용한 횡하중 위치

<자기부상철도 차량 횡하중 산정 위한 모델링 및 재하 위치>

아래 표는 곡선부 고가구조물에서의 횡하중 재하에 따른 계측데이터와 해석결과를 이용하여 산출한 횡하중을 나타낸다. 곡선부 PSC 궤도빔의 외측 상단에는 수직하중에 의한 압축 변형에 횡하중에 의한 추가 압축 변형이 발생한다. 이에 열차하중만을 재하 후 해석하여 도출된 압축 변형률과 계측된 압축 변형률 간의 차이를 단위 횡하중을 작용하였을 때 발생하는 단위 압축 변형률로 나누어 횡하중을 산정하면 24.42kN이며, 차량하중(19.1ton, 공차기준)의 12.79%로 나타났다.

<현장 계측 및 해석에 의한 최대 변형율>

속도	최대 변형률($\mu\varepsilon$)		
	계측치	해석치 (수직하중만 재하)	변형률 차이(A)
50km	-4.763	-2.44	2.323
단위 횡하중 재하시 압축 변형률(B)	횡하중(kN)=$84kN\times\frac{\text{변형률차이}(A)}{\text{단위횡하중당추가압축변형률}(B)}$		$\frac{\text{횡하중}}{\text{차량하중}}\times 100(\%)$
7.99	24.42		12.79

(바) 소결: 횡하중 제안

경전철 차량 횡하중에 대한 현장계측 및 수치해석 분석 결과, 일반 고무차륜형 경전철의 경우 축중의 최대 19.5%, 일반 철제차륜형 경전철의 경우 축중의 최대 15.8%, 선형유도전동기형 경전철의 경우 축중의 최대 11.8%, 모노레일형 경전철의 경우 축중의 최대 11.3%, 자기부상형 경전철의 경우 차량하중의 최대 12.79%로 나타났다. 이에 경전철 차량의 횡하중은 축중의 20%로 제안하며, 경전철 차량 횡하중은 철제차륜형 경전철의 경우 레일면의 높이에서, 고무차륜형 및 모노레일형 경전철의 경우 안내레일의 높이(혹은 안내륜이 지나는 위치)에서 교축에 직각이고 수평으로 작용하는 것으로 한다.

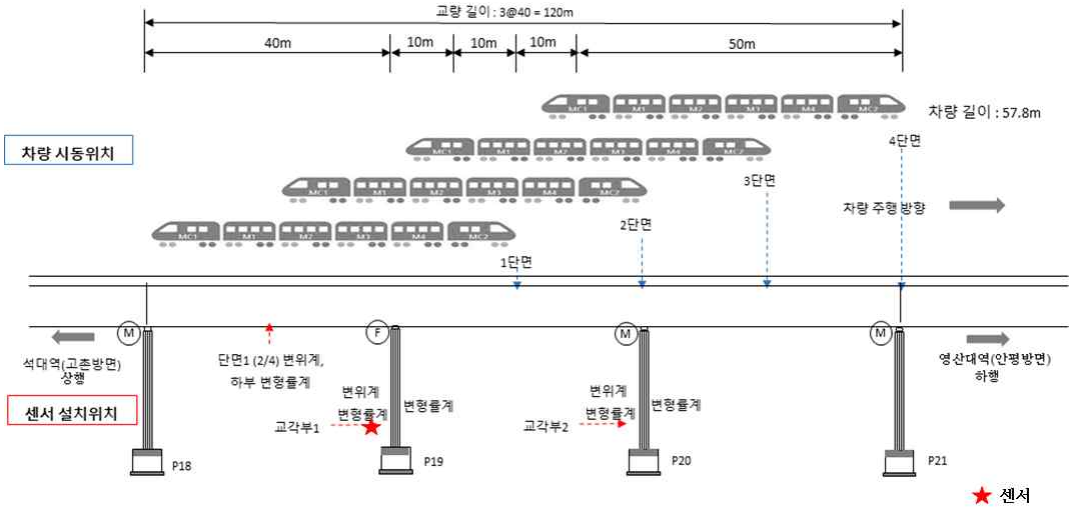
또한, 현장계측 결과 차량의 모든 차축에서 횡하중이 동시에 작용하는 것이 아니므로, 하나의 대차와 연결된 차축에만 작용하는 것으로 한다. 차축간 거리 등은 해당 노선에 운행될 경전철 차량 대차의 차축 구성에 따른다.

(4) 시동하중

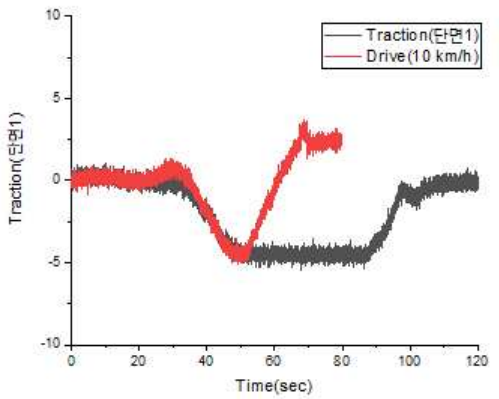
(가) 일반 고무차륜형 경전철

아래 그림은 부산4호선 석대역~영산대역 고가구조물(직선부)에서 경전철 차량 시동시험을 위한 차량 정차후 구동하는 시동위치를 나타내며, 아래 표에 차량 시동위치별 차량 정차후 구동시 고정단 교각(P19)에 발생하는 변형율 응답을 나타내었다. 차량 정상 주행 시 및 차량 정차후 구동 시의 고정단 교각에서의 변형율 응답을 비교하여 시동에 의한 추가 발생 변형율을 산정하였다. 한편, 구조해석을 통해 차륜당 단위 시동하중(1kN) 작용시 고정단 교각에서의 변형율 응답을 이용하여, 시동에 의한 추가 변형율 값으로부터 시동하중을 산정하였다.

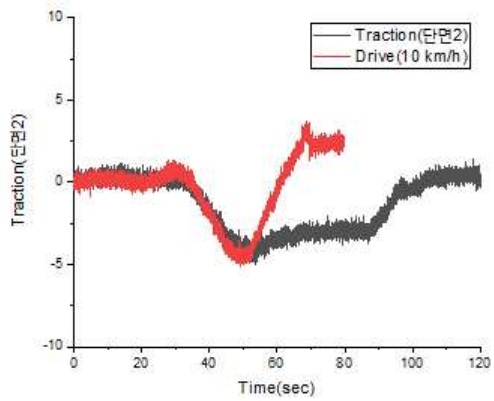
일반 고무차륜형 경전철의 경우, 차량 시동에 의해 발생하는 최대 시동하중은 축당 0.813톤(차륜당 0.406톤)으로 차량 1량당 2축으로 총 1.626톤의 시동하중이 작용하였고, 차량하중(12.0톤, 공차기준)의 13.55%에 해당된다.



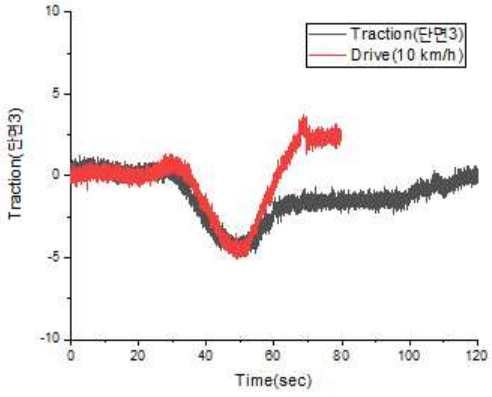
<고무차륜형 경전철 차량 시동시험 및 시동위치(현장계측)>



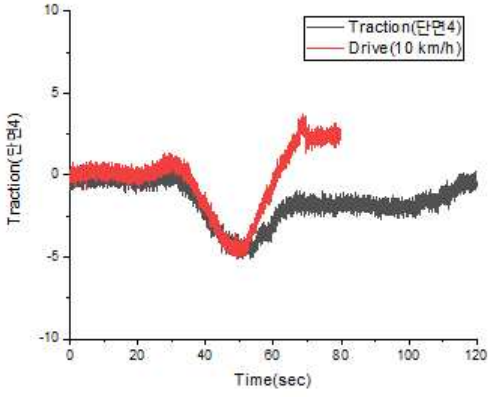
(a) 단면1



(b) 단면2

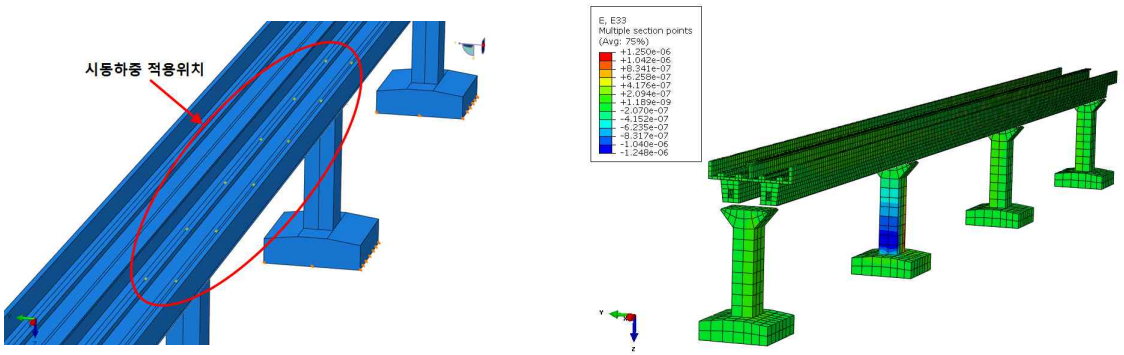


(a) 단면3



(b) 단면4

<정상 주행/시동하중 재하시 고정단 교각에서의 변형율 응답 비교>



(a) 시동하중 재하 (b) 고정단 교각에서의 변형율 응답

<시동하중 재하에 따른 고정단 교각에서의 변형율 응답(구조해석)>

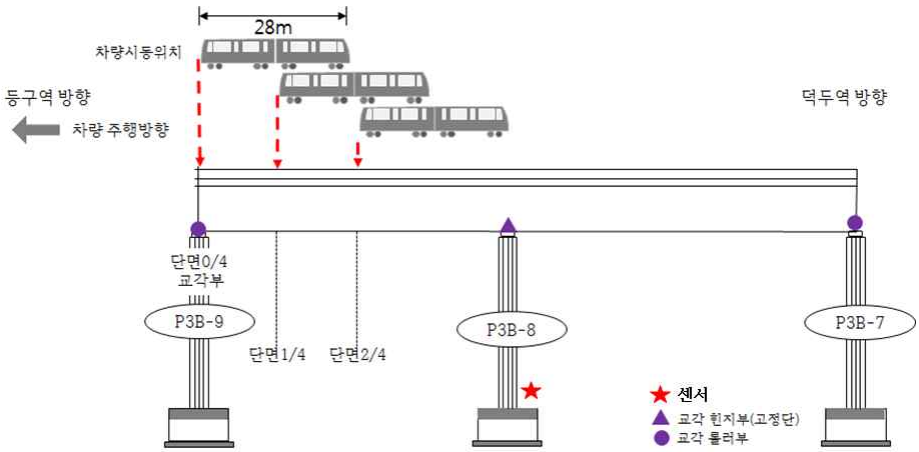
<시동에 의한 추가 변형율 및 시동하중>

구분		주행 (D)	시동 (B)	시동에 의한 추가 변형율 (B-D)	단위 시동하중 재하시 변형율	시동하중 (ton/축)
속도 (km/h)	시동 위치					
5	1단면	3.752	1.053	-2.699	-0.684	0.789
	2단면		1.428	-2.324	-0.685	0.679
	3단면		0.999	-2.753	-0.685	0.804
	4단면		0.969	-2.783	-0.685	0.813

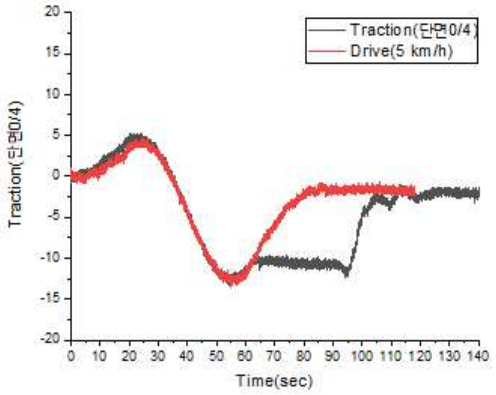
(나) 일반 철제차륜형 경전철

아래 그림은 부산-김해경전철 덕두역~등구역 고가구조물(직선부)에서 경전철 차량 시동시험을 위한 차량 정차후 구동하는 시동위치를 나타내며, 아래 표에 차량 시동위치별 차량 정차후 구동시 고정단 교각(P3B-8)에 발생하는 변형율 응답을 나타내었다. 차량 정상 주행 시 및 차량 정차후 구동 시의 고정단 교각에서의 변형율 응답을 비교하여 시동에 의한 추가 발생 변형율을 산정하였다. 한편, 구조해석을 통해 차륜당 단위 시동하중(1kN) 작용시 고정단 교각에서의 변형율 응답을 이용하여, 시동에 의한 추가 변형율 값으로부터 시동하중을 산정하였다.

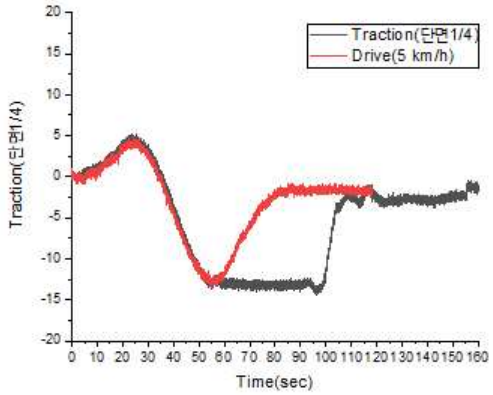
일반 철제차륜형 경전철의 경우, 차량 시동에 의해 발생하는 최대 시동하중은 축당 0.947톤(차륜당 0.473톤)으로 차량 1량당 3축으로 총 2.841톤의 시동하중이 작용하였고, 차량하중(23.25톤, 공차기준)의 12.22%에 해당된다.



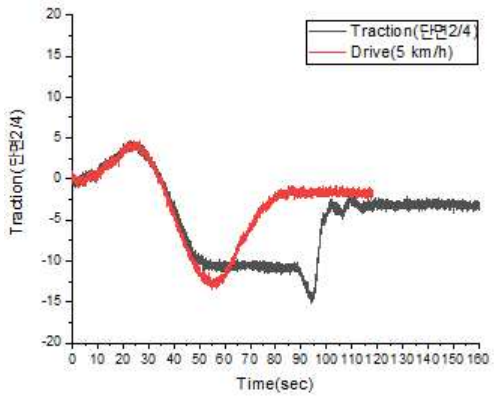
<일반 철제차륜형 경전철 차량 시동시험 및 시동위치(현장계측)>



(a) 단면0/4 (P3B-9)

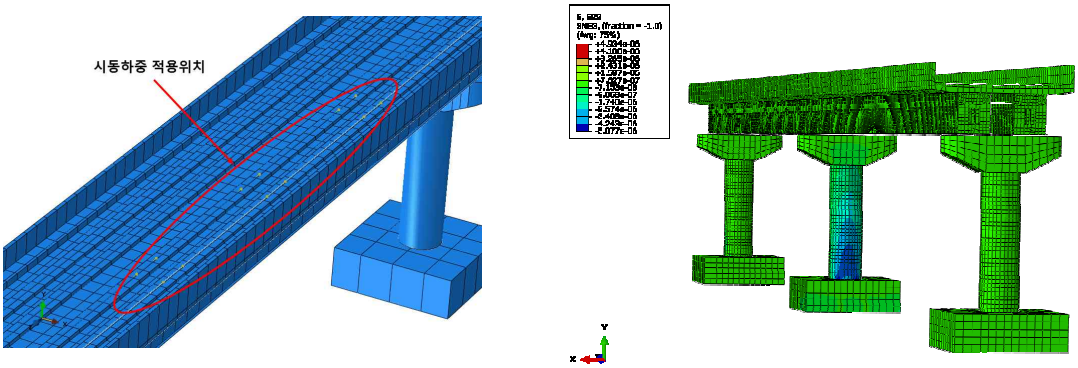


(b) 단면1/4



(c) 단면2/4

<정상 주행/시동하중 재하시 고정단 교각에서의 변형율 응답 비교>



(a) 시동하중 재하

(b) 고정단 교각에서의 변형율 응답

<시동하중 재하에 따른 고정단 교각에서의 변형율 응답(구조해석)>

<시동에 의한 추가 변형율 및 시동하중>

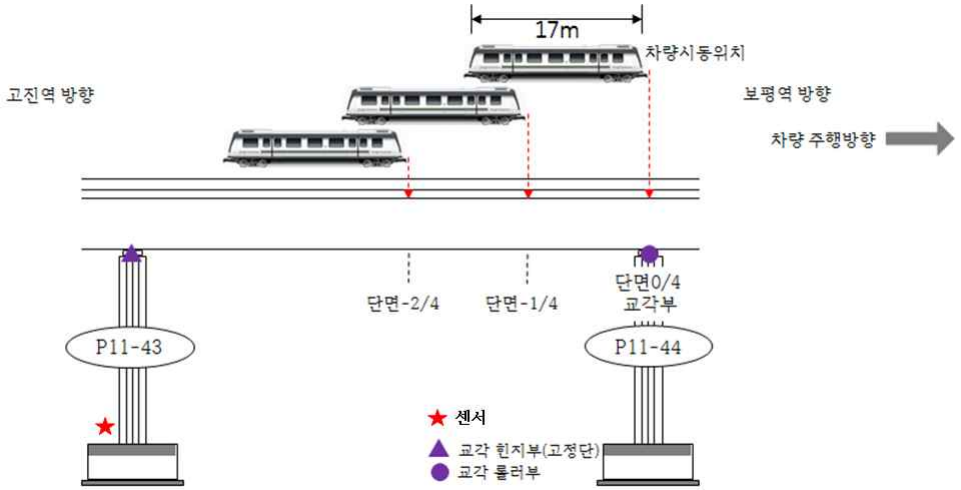
구분		주행 (D)	시동 (B)	시동에 의한 추가 변형율 (B-D)	단위 시동 하중 재하시 변형율	시동하중 (ton/축)
속도 (km/h)	시동 위치					
5	P3B-9	-13.48	-13.286	N/A	-0.326	-
	단면 1/4		-14.542	-1.062	-0.336	0.632
	단면 2/4		-15.127	-1.647	-0.348	0.947

(다) 선형유도전동기(LIM)방식 철제차륜형 경전철

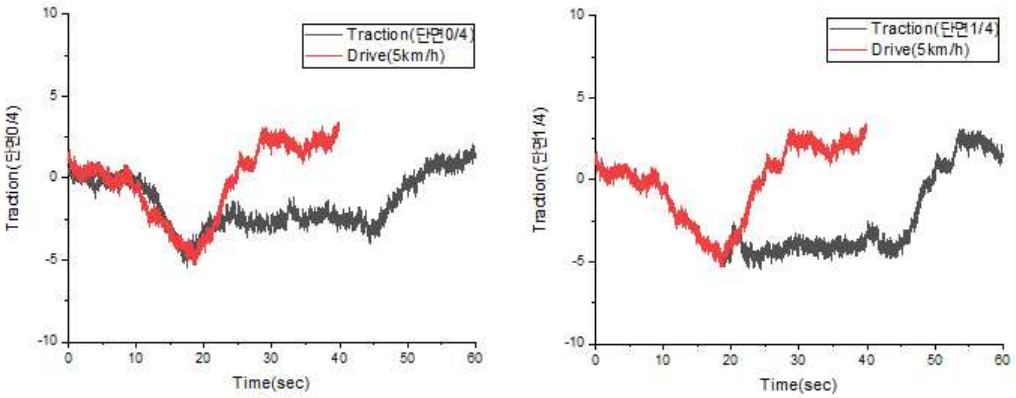
아래 그림은 용인경전철 고진역~보평역 고가구조물(직선부)에서 경전철 차량 시동시험을 위한 차량 정차후 구동하는 시동위치를 나타내며, 아래 표에 차량 시동위치별 차량 정차후 구동시 고정단 교각(P11-43)에 발생하는 변형율 응답을 나타내었다. 차량 정상 주행 시 및 차량 정차후 구동

시의 고정단 교각에서의 변형율 응답을 비교하여 시동에 의한 추가 발생 변형율을 산정하였다. 한편, 구조해석을 통해 차륜당 단위 시동하중(1kN) 작용시 고정단 교각에서의 변형율 응답을 이용하여, 시동에 의한 추가 변형율 값으로부터 시동하중을 산정하였다.

선형유도전동기(LIM)방식 철제차륜형 경전철의 경우, 차량 시동에 의해 발생하는 최대 시동하중은 축당 0.614톤(차륜당 0.307톤)으로 차량 1량당 4축으로 총 2.456톤의 시동하중이 작용하였고, 차량하중(24톤, 공차기준)의 10.23%에 해당된다.

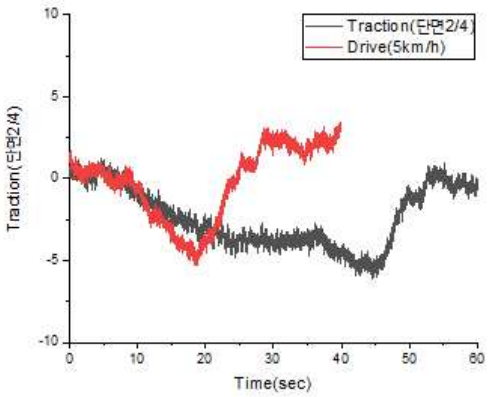


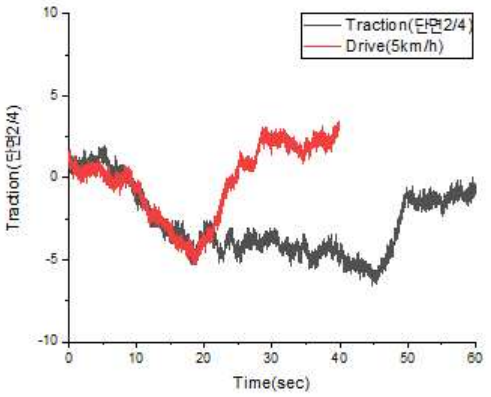
<선형유도전동기(LIM)형 경전철 차량 시동시험 및 시동위치(현장계측)>



(a) 단면0/4 (P11-44)

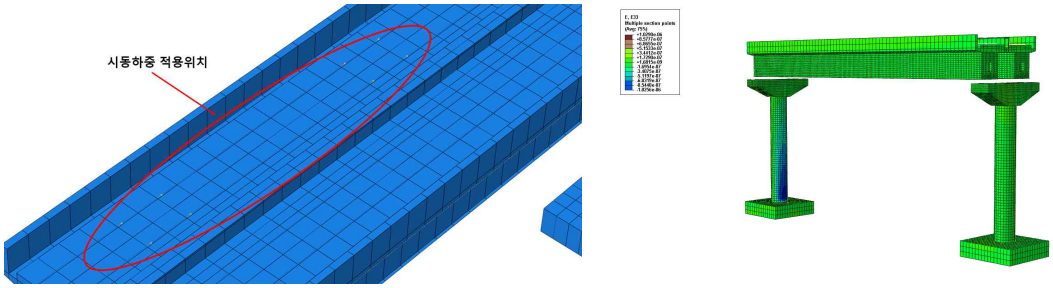
(b) 단면1/4





(c) 단면2/4

<정상 주행/시동하중 재하시 고정단 교각에서의 변형율 응답 비교>



(a) 시동하중 재하 (b) 고정단 교각에서의 변형율 응답

<시동하중 재하에 따른 고정단 교각에서의 변형율 응답(구조해석)>

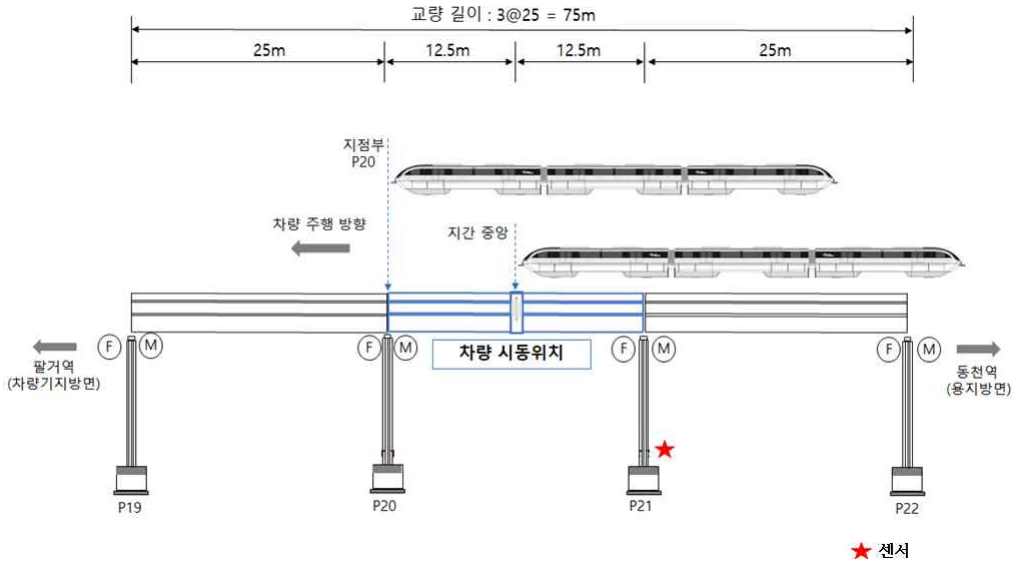
<시동에 의한 추가 변형율 및 시동하중>

구분		주행 (D)	시동 (B)	시동에 의한 추가 변형율 (B-D)	단위 시동 하중 재하시 변형율	시동하중 (ton/축)
속도 (km/h)	시동 위치					
5	P11-44	-5.348	-4.028	N/A	-0.412	-
	단면 1/4		-5.091	N/A	-0.412	-
	단면 2/4		-6.613	-1.265	-0.412	0.614

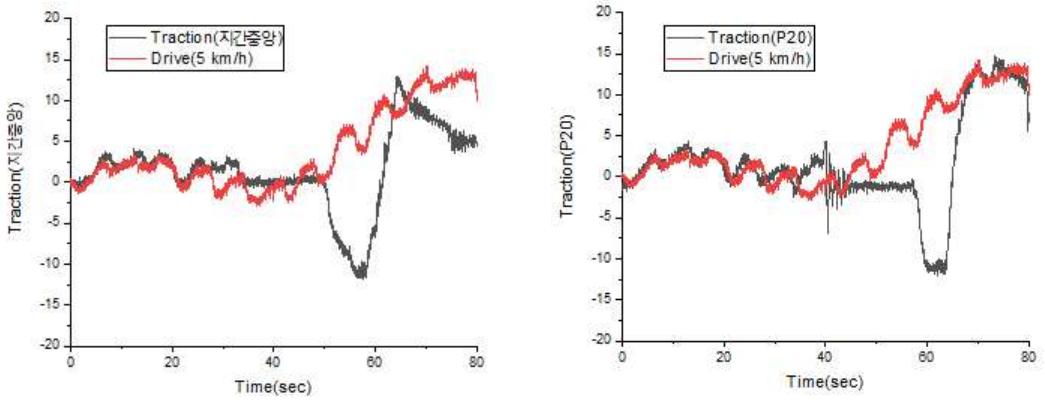
(라) 모노레일형 경전철

아래 그림은 대구3호선 동천역~팔거역 고가구조물(직선부)에서 모노레일 차량 시동시험을 위한 차량 정차후 구동하는 시동위치를 나타내며, 아래 표에 차량 시동위치별 차량 정차후 구동시 고정단 교각(P21)에 발생하는 변형율 응답을 나타내었다. 차량 정상 주행 시 및 차량 정차후 구동 시의 고정단 교각에서의 변형율 응답을 비교하여 시동에 의한 추가 발생 변형율을 산정하였다. 한편, 구조해석을 통해 차륜당 단위 시동하중(1kN) 작용시 고정단 교각에서의 변형율 응답을 이용하여, 시동에 의한 추가 변형율 값으로부터 시동하중을 산정하였다.

모노레일 경전철의 경우, 차량 시동에 의해 발생하는 최대 시동하중은 축당 0.867톤으로 차량 1 unit당 4축으로 총 3.468톤의 시동하중이 작용하였고, 차량하중(32.5톤/unit, 공차기준)의 10.67%에 해당된다.

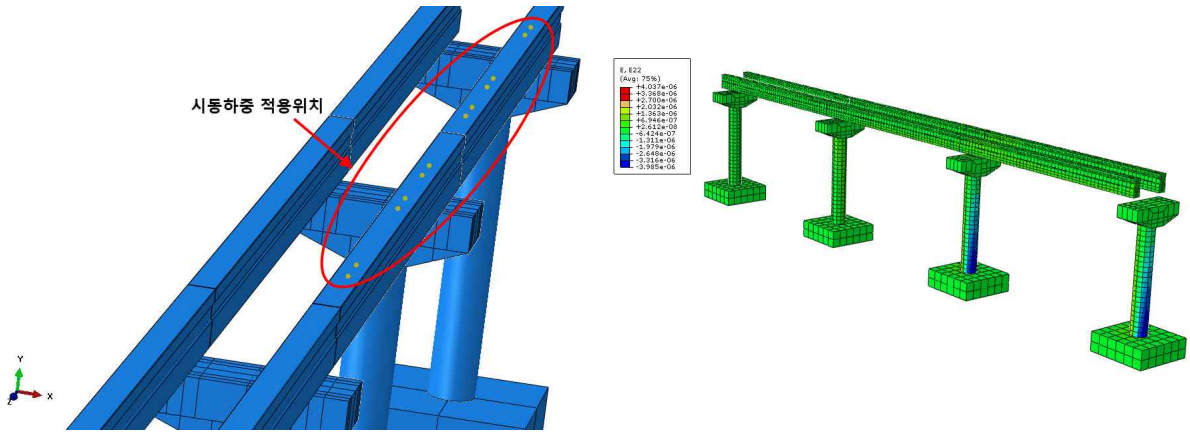


<모노레일 경전철 차량 시동시험 및 시동위치(현장계측)>



(a) 지간 중앙 (b) 지점부 (P20)

<정상 주행/시동하중 재하시 고정단 교각에서의 변형율 응답 비교>



(a) 시동하중 재하 (b) 고정단 교각에서의 변형율 응답

<시동하중 재하에 따른 고정단 교각에서의 변형율 응답(구조해석)>

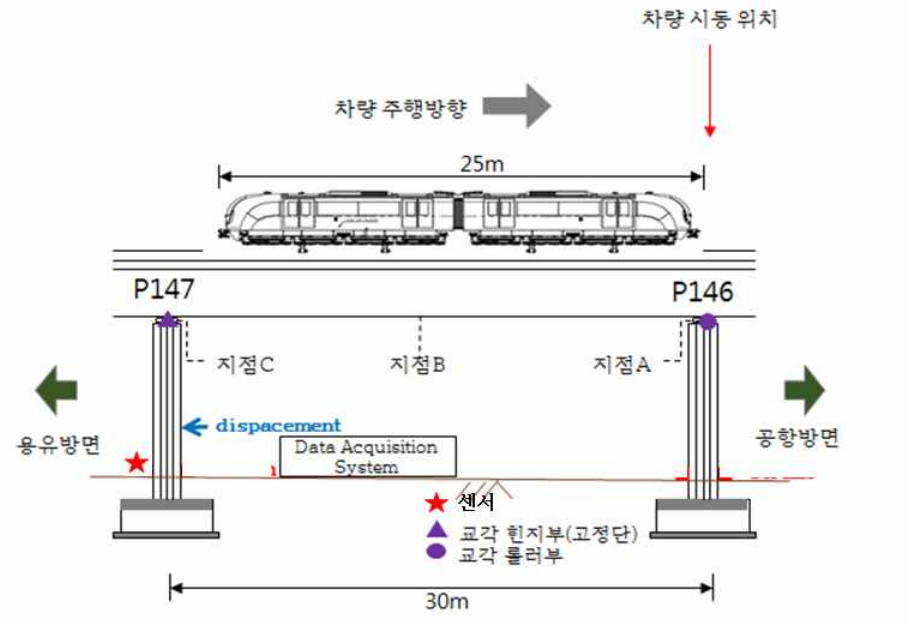
<시동에 의한 추가 변형율 및 시동하중>

구분		주행 (D)	시동 (B)	시동에 의한 추가 변형율 (B-D)	단위 시동하중 재하시 변형율	시동하중 (ton/축)
속도 (km/h)	시동 위치					
5	지간중앙	-2.418	-11.953	-9.535	-1.100	0.867
	P20		-12.062	-9.644	-1.135	0.850

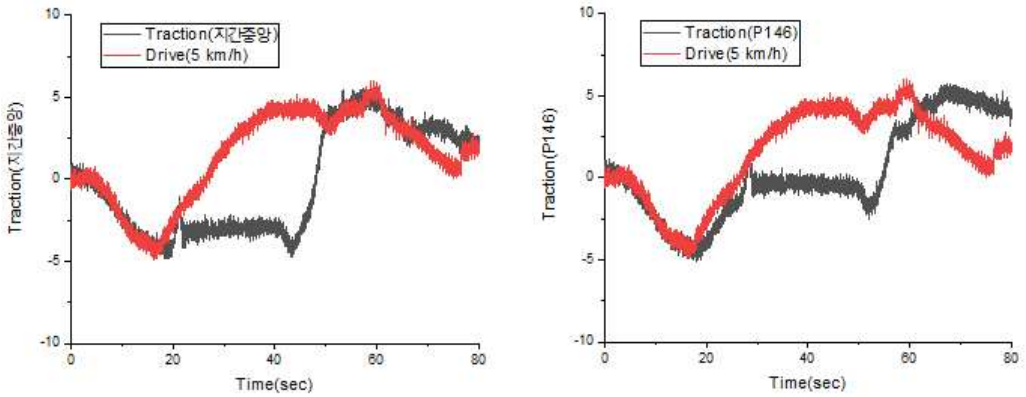
(마) 자기부상형 경전철

아래 그림은 인천공항 자기부상철도 용유역~워터파크역 고가구조물(직선부)에서 자기부상 차량 시동시험을 위한 차량 정차후 구동하는 시동위치를 나타내며, 아래 표에 차량 시동위치별 차량 정차후 구동시 고정단 교각(P147)에 발생하는 변형율 응답을 나타내었다. 차량 정상 주행 시 및 차량 정차후 구동 시의 고정단 교각에서의 변형율 응답을 비교하여 시동에 의한 추가 발생 변형율을 산정하였다. 한편, 구조해석을 통해 시동하중(84kN: 2개 레일×레일당 단위시동하중 1kN/0.5m×10.5 m(차량 고정자 길이)×2량) 작용시 고정단 교각에서의 변형율 응답을 이용하여, 시동에 의한 추가 변형율 값으로부터 시동하중을 산정하였다.

자기부상형 경전철의 경우, 차량 시동에 의해 발생하는 최대 시동하중은 1.97톤이 작용하였고, 차량하중(19.1톤, 공차기준)의 최대 10.31%로 나타났다.

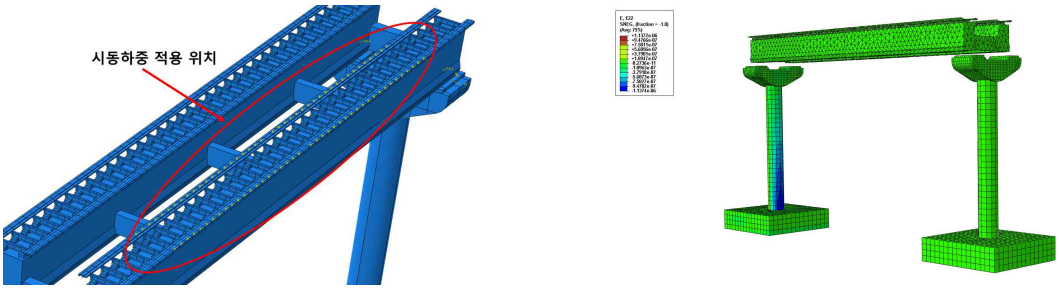


<자기부상 경전철 차량 시동시험 및 시동위치(현장계측)>



(a) 지간 중앙 (b) 지점부 (P20)

<정상 주행/시동하중 재하시 고정단 교각에서의 변형율 응답 비교>



(a) 시동하중 재하 (b) 고정단 교각에서의 변형율 응답

<시동하중 재하에 따른 고정단 교각에서의 변형율 응답(구조해석)>

<시동에 의한 추가 변형율 및 시동하중>

구분		주행 (D)	시동 (B)	시동에 의한 추가 변형율 (B-D)	단위 시동 하중 재하시 변형율	시동하중 (ton)
속도 (km/h)	시동 위치					
5	지점A	-1.024	-2.531	-1.507	-6.428	1.97
	지점B	-3.479	-4.812	-1.333	-6.517	1.72

(바) 소결: 시동하중 제안

경전철 차량 구동 시 고가구조물에 작용하는 시동하중에 대한 현장계측 및 수치해석 분석 결과, 일반 고무차륜형 경전철의 경우 차량하중의 최대 13.55%, 일반 철제차륜형 경전철의 경우 차량하중의 최대 12.22%, 선형유도전동기형 경전철의 경우 차량하중의 최대 10.23%, 모노레일형 경전철의 경우 차량하중(1 unit)의 최대 10.67%, 자기부상형 경전철의 경우 차량하중의 최대 10.31%로 나타났다. 이에, 경전철 차량의 시동하중은 차량하중의 15%로 제안하며, 열차 주행면 혹은 레일면에서 열차진행 반대방향으로 수평되게 작용하는 것으로 한다. 이때, 차량하중은 고가구조물의 경간 구성에 따라 부재에 최대영향을 주는 차량하중 재하길이를 고려하여 산정한다.

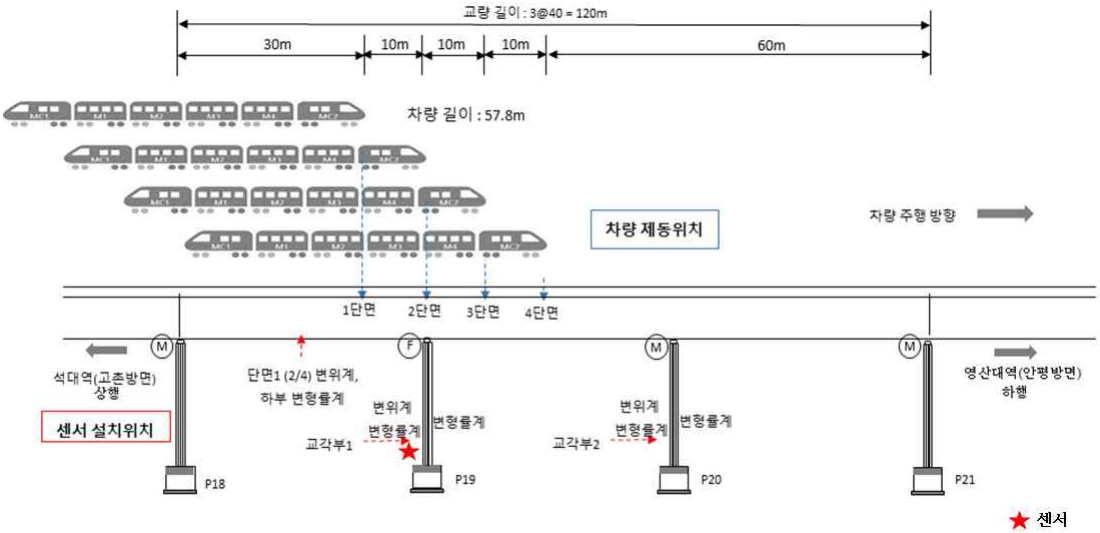
그리고, 경전철은 중앙관제를 통하여 무인 운영되는 특성상 복선 이상의 경우에 차량 구동과 차량 제동이 동시에 작용하는 경우는 없는 관계로, 단선재하 상태에서 검토하며 시동하중 혹은 제동하중 중 큰 쪽의 하중이 작용하는 것으로 한다. 여기에서 충격은 고려하지 않는다.

(5) 제동하중

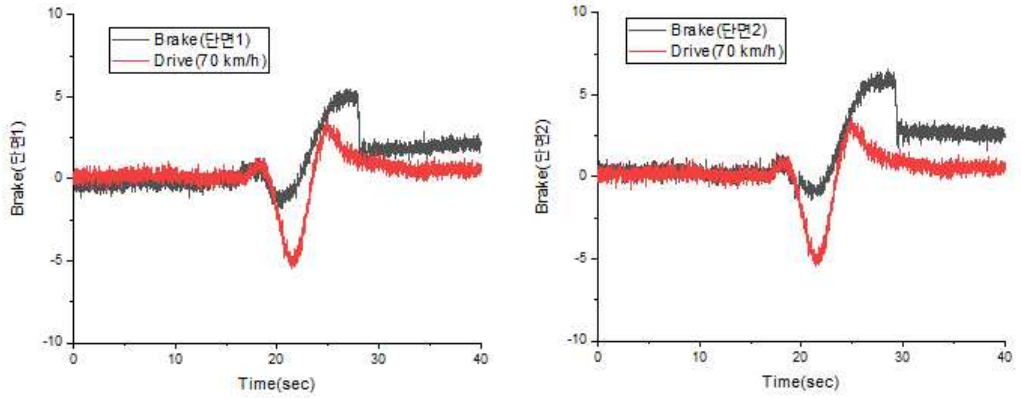
(가) 일반 고무차륜형 경전철

아래 그림은 부산4호선 석대역~영산대역 고가구조물(직선부)에서 경전철 차량 제동시험을 위한 차량 제동위치를 나타내며, 아래 표에 해당 고가구조물에 속도(50, 70km/h) 별로 차량이 진입한 후 제동위치별 차량 제동 시 고정단 교각(P19)에 발생하는 변형율 응답을 나타내었다. 차량 정상 주행 시 및 차량 제동 시의 고정단 교각에서의 변형율 응답을 비교하여 제동에 의한 추가 발생 변형율을 산정하였다. 한편, 구조해석을 통해 차륜당 단위 제동하중(1kN) 작용시 고정단 교각에서의 변형율 응답을 이용하여, 제동에 의한 추가 변형율 값으로부터 제동하중을 산정하였다.

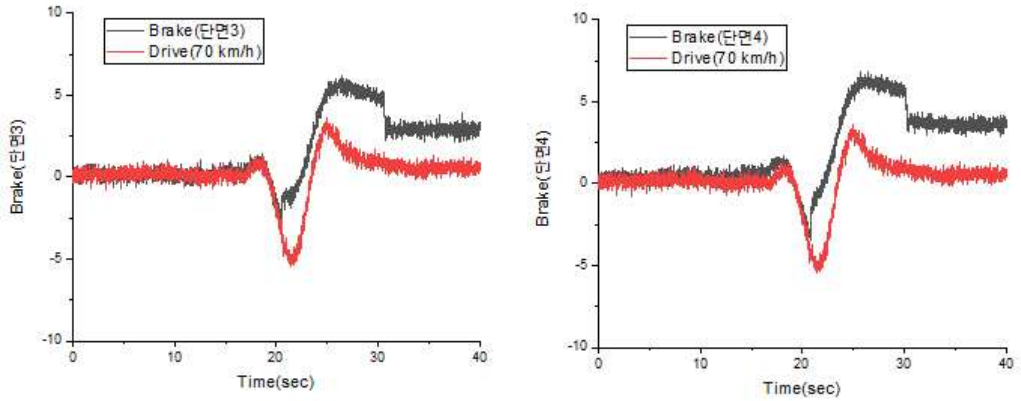
일반 고무차륜형 경전철의 경우, 차량 제동시 발생하는 최대 제동하중은 축당 0.796톤으로 차량 1량당 2축으로 총 1.592톤의 제동하중이 작용하였고, 차량하중(12.0톤, 공차기준)의 13.27%에 해당된다.



<일반 고무차륜형 경전철 차량 제동시험 및 제동위치(현장계측)>

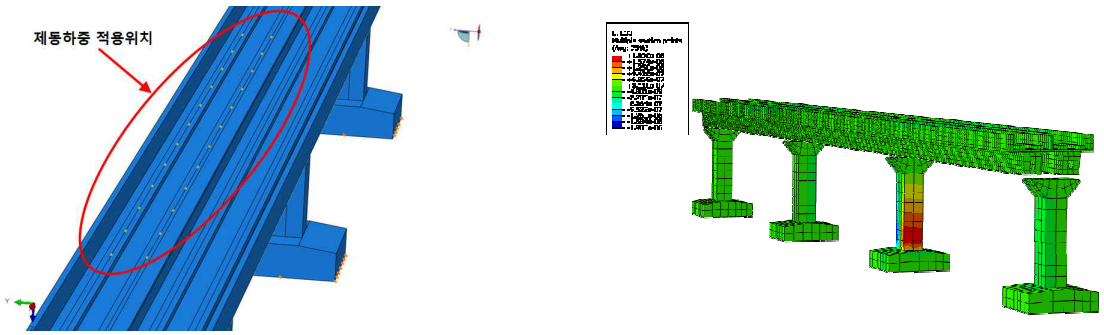


(a) 1단면 (b) 2단면



(c) 3단면 (d) 4단면

<정상 주행/제동하중 재하시 고정단 교각에서의 변형율 응답 비교>



(a) 제동하중 재하 (b) 고정단 교각에서의 변형율 응답

<제동하중 재하에 따른 고정단 교각에서의 변형율 응답(구조해석)>

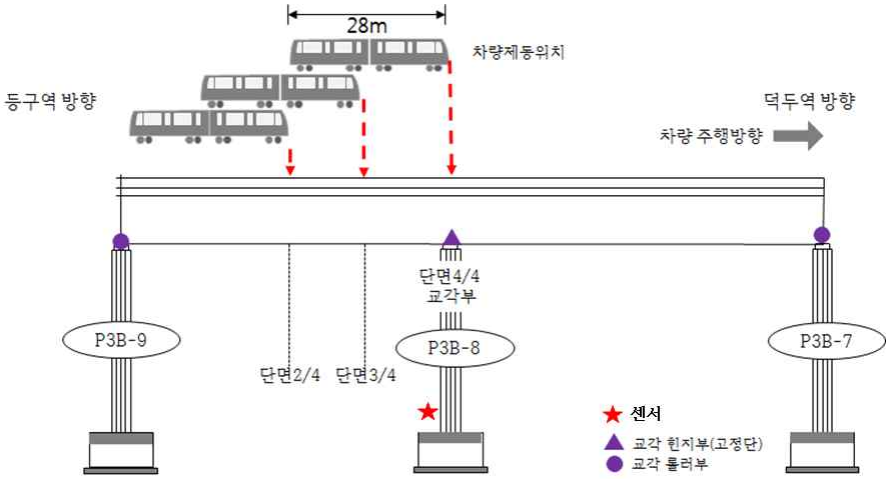
<제동에 의한 추가 변형율 및 제동하중>

구분		주행 (D)	제동 (B)	제동에 의한 추가 변형율 (B-D)	단위 제동하중 재하시 변형율	제동하중 (ton/축)
속도 (km/h)	제동 위치					
50	1단면	3.347	1.507	N/A	0.470	-
	2단면		2.408	N/A	0.605	-
	3단면		5.601	2.254	0.740	0.609
	4단면		6.402	3.055	0.808	0.756
70	1단면	3.651	5.485	1.834	0.470	0.780
	2단면		6.058	2.407	0.605	0.796
	3단면		6.184	2.533	0.740	0.685
	4단면		6.815	3.164	0.808	0.783

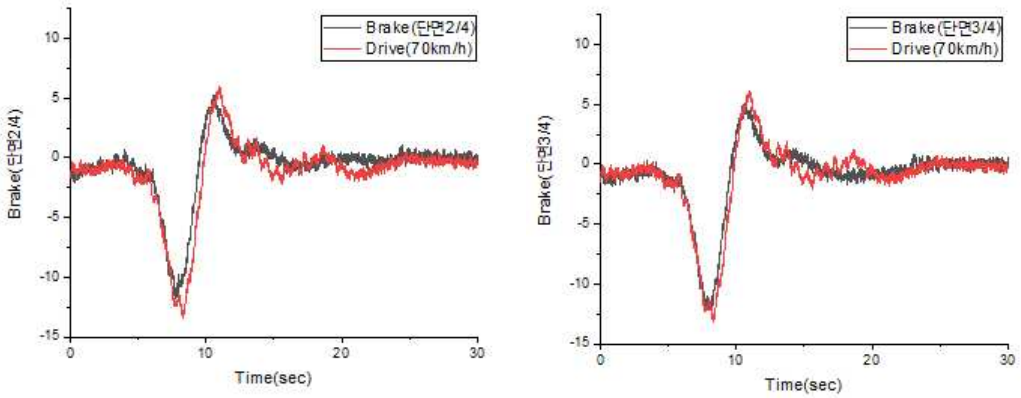
(나) 일반 철제차륜형 경전철

아래 그림은 부산-김해경전철 덕두역~등구역 고가구조물(직선부)에서 경전철 차량 제동시험을 위한 차량 제동위치를 나타내며, 아래 표에 해당 고가구조물에 속도(50, 60, 70km/h) 별로 차량이 진입한 후 제동위치별 차량 제동 시 고정단 교각(P3B-8)에 발생하는 변형율 응답을 나타내었다. 차량 정상 주행 시 및 차량 제동 시의 고정단 교각에서의 변형율 응답을 비교하여 제동에 의한 추가 발생 변형율을 산정하였다. 한편, 구조해석을 통해 차륜당 단위 제동하중(1kN) 작용시 고정단 교각에서의 변형율 응답을 이용하여, 제동에 의한 추가 변형율 값으로부터 제동하중을 산정하였다.

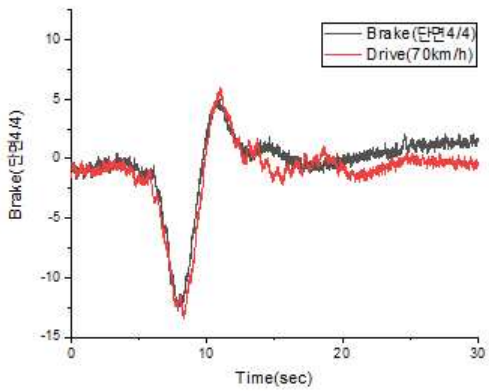
일반 철제차륜형 경전철의 경우, 차량 제동시 발생하는 최대 제동하중은 축당 0.931톤(차륜당 0.466톤)으로 차량 1량당 3축으로 총 2.794톤의 제동하중이 작용하였고, 차량하중(23.25톤, 공차기준)의 12.02%에 해당된다.



<일반 철제차륜형 경전철 차량 제동시험 및 제동위치(현장계측)>

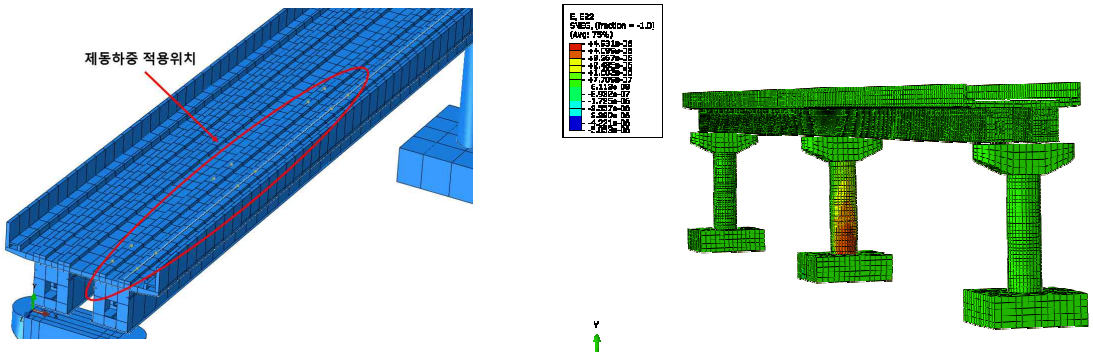


(a) 2/4단면 (b) 3/4단면



(c) 4/4단면

<정상 주행/제동하중 재하시 고정단 교각에서의 변형율 응답 비교>



(a) 제동하중 재하 (b) 고정단 교각에서의 변형율 응답

<제동하중 재하에 따른 고정단 교각에서의 변형율 응답(구조해석)>

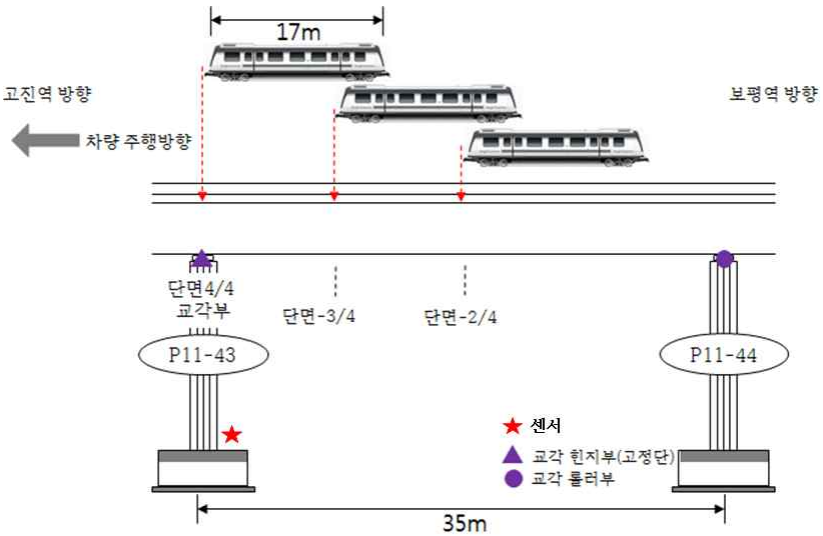
<제동에 의한 추가 변형율 및 제동하중>

구분		주행 (D)	제동 (B)	제동에 의한 추가 변형율 (B-D)	단위 제동하중 재하시 변형율	제동하중 (ton/축)
속도 (km/h)	제동 위치					
70	단면 2/4	-13.458	-12.810	0.648	0.335	0.387
	단면 3/4		-12.234	1.224	0.346	0.708
	단면 4/4		-11.786	1.672	0.359	0.931

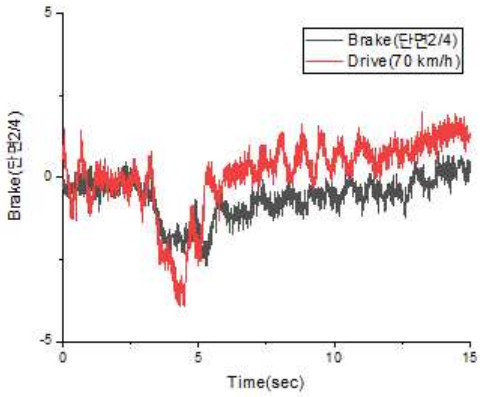
(다) 선형유도전동기(LIM)방식 철제차륜형 경전철

아래 그림은 용인경전철 보평역~고진역 고가구조물(직선부)에서 경전철 차량 제동시험을 위한 차량 제동위치를 나타내며, 아래 표에 해당 고가구조물에 속도(50, 60, 70km/h) 별로 차량이 진입한 후 제동위치별 차량 제동 시 고정단 교각(P11-43)에 발생하는 변형율 응답을 나타내었다. 차량 정상 주행 시 및 차량 제동 시의 고정단 교각에서의 변형율 응답을 비교하여 제동에 의한 추가 발생 변형율을 산정하였다. 한편, 구조해석을 통해 차륜당 단위 제동하중(1kN) 작용시 고정단 교각에서의 변형율 응답을 이용하여, 제동에 의한 추가 변형율 값으로부터 제동하중을 산정하였다.

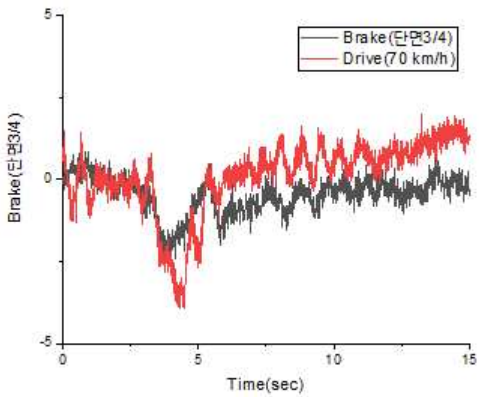
선형유도전동기(LIM)방식 철제차륜형 경전철의 경우, 차량 제동시 발생하는 최대 제동하중은 축당 0.862톤(차륜당 0.431톤)으로 차량 1량당 4축으로 총 3.448톤의 제동하중이 작용하였고, 차량하중(24톤, 공차기준)의 14.37%에 해당된다.



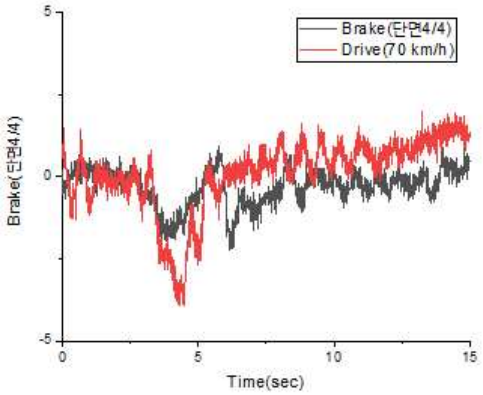
<선형유도전동기(LIM)방식 철제차륜형 경전철 차량 제동시험 및 제동위치(현장계측)>



(a) 2/4단면

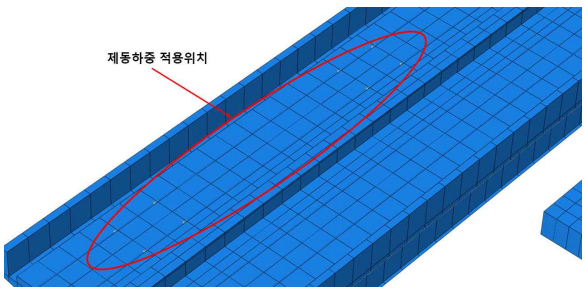


(b) 3/4단면

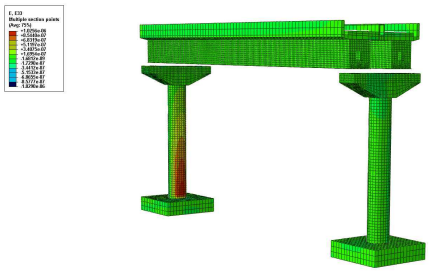


(c) 4/4단면(P3B-8)

<정상 주행/제동하중 재하시 고정단 교각에서의 변형율 응답 비교>



(a) 제동하중 재하



(b) 고정단 교각에서의 변형율 응답

<제동하중 재하에 따른 고정단 교각에서의 변형율 응답(구조해석)>

<제동에 의한 추가 변형율 및 제동하중>

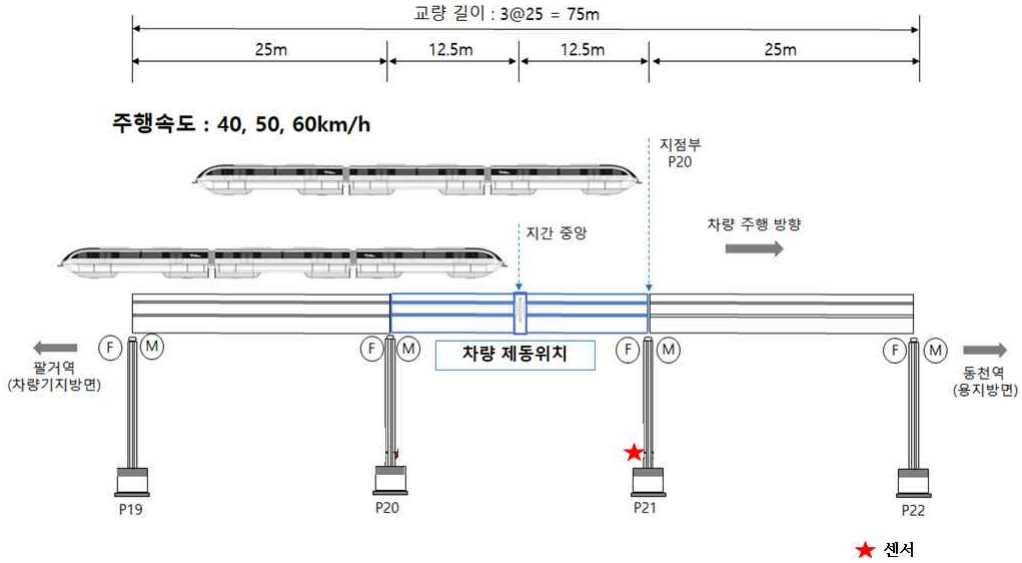
구분		주행 (D)	제동 (B)	제동에 의한 추가 변형율 (B-D)	단위 제동하중 재하시 변형율	제동하중 (ton/축)
속도 (km/h)	제동 위치					
70	단면 2/4	-3.945	-2.707	1.238	0.395	0.627
	단면 3/4		-2.425	1.520	0.395	0.770
	단면 4/4		-2.238	1.707	0.396	0.862

(라) 모노레일형 경전철

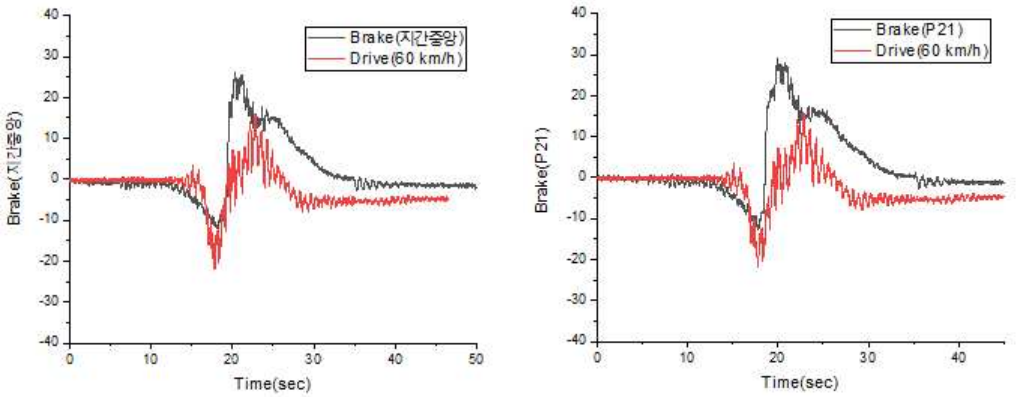
아래 그림은 대구3호선 팔거역~동천역 모노레일 고가구조물(직선부)에서 경전철 차량 제동시험을 위한 차량 제동위치를 나타내며, 아래 표에 해당 고가구조물에 속도(40, 50, 60km/h) 별로 차량이 진입한 후 제동위치별 차량 제동 시 고정단 교각(P21)에 발생하는 변형율 응답을 나타내었다. 차량 정상 주행 시 및 차량 제동 시의 고정단 교각에서의 변형율 응답을 비교하여 제동에 의한 추

가 발생 변형율을 산정하였다. 한편, 구조해석을 통해 차륜당 단위 제동하중(1kN) 작용시 고정단 교각에서의 변형율 응답을 이용하여, 제동에 의한 추가 변형율 값으로부터 제동하중을 산정하였다.

모노레일형 경전철의 경우, 차량 제동시 발생하는 최대 제동하중은 축당 0.879톤으로 차량 1 unit 당 4축으로 총 3.516톤의 제동하중이 작용하였고, 차량하중(32.5톤/unit, 공차기준)의 10.82%에 해당된다.

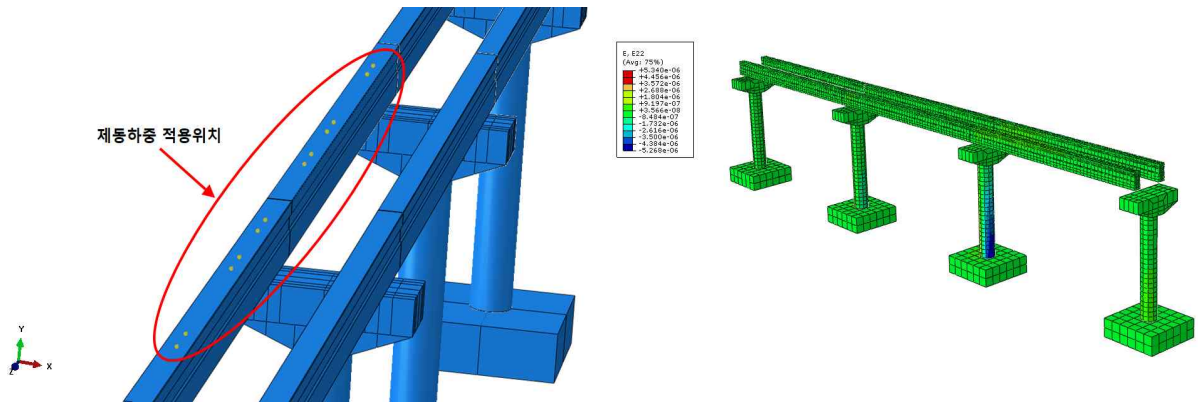


<모노레일 경전철 차량 제동시험 및 제동위치>



(a) 지간중앙 (b) 지점부(P21)

<정상 주행/제동하중 재하시 고정단 교각에서의 변형율 응답 비교>



(a) 제동하중 재하 (b) 고정단 교각에서의 변형율 응답

<제동하중 재하에 따른 고정단 교각에서의 변형율 응답(구조해석)>

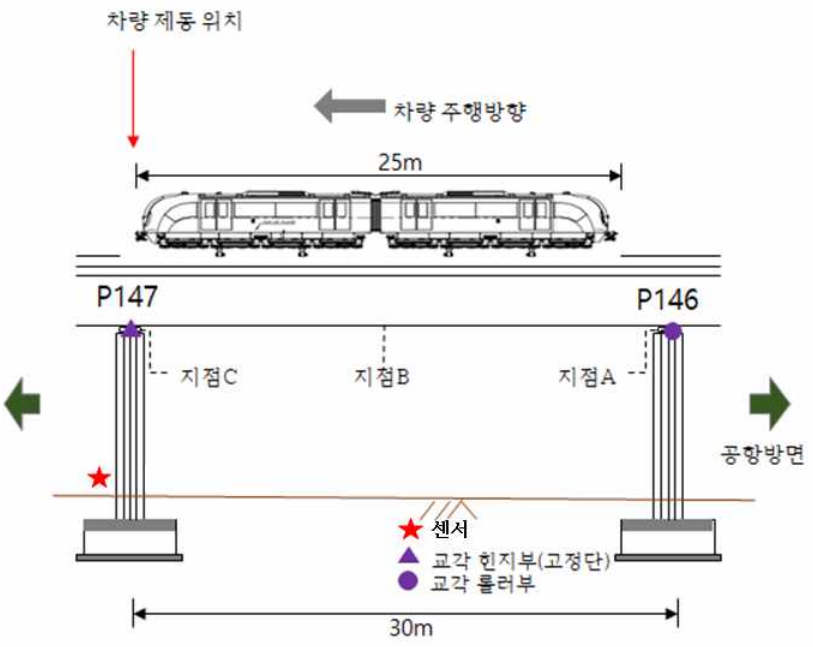
<제동에 의한 추가 변형율 및 제동하중>

구분		주행 (D)	제동 (B)	제동에 의한 추가 변형율 (B-D)	단위 제동하중 재하시 변형율	제동하중 (ton/축)
속도 (km/h)	제동 위치					
40	P21	-21.039	-8.799	12.240	1.393	0.879
	지간중앙		-12.309	8.730	1.266	0.690
50	P21	-21.050	-9.848	11.202	1.393	0.804
	지간중앙		-12.743	8.307	1.266	0.656
60	P21	-21.922	-12.514	9.408	1.393	0.675
	지간중앙		-12.111	9.811	1.266	0.775

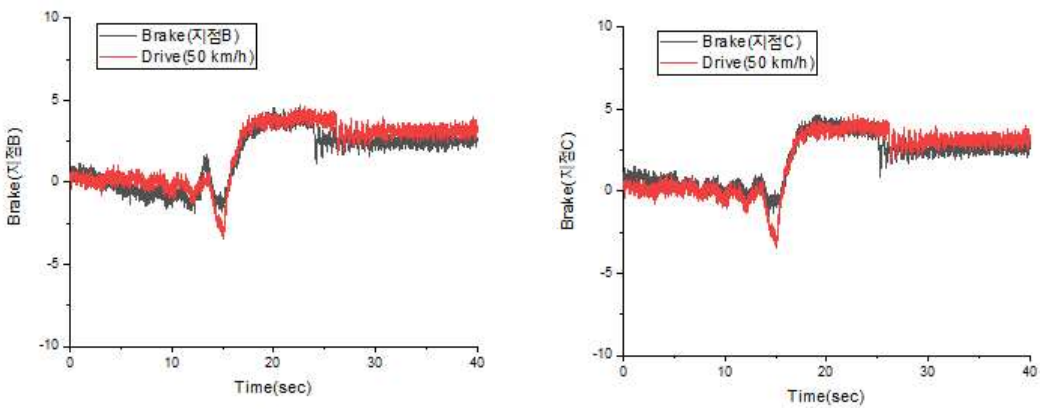
(마) 자기부상형 경전철

아래 그림은 인천공항 자기부상철도 워터파크역~용유역 자기부상 고가구조물(직선부)에서 경전철 차량 제동시험을 위한 차량 제동위치를 나타내며, 아래 표에 해당 고가구조물에 속도(40, 50km/h) 별로 차량이 진입한 후 제동위치별 차량 제동 시 고정단 교각(P147)에 발생하는 변형율 응답을 나타내었다. 차량 정상 주행 시 및 차량 제동 시의 고정단 교각에서의 변형율 응답을 비교하여 제동에 의한 추가 발생 변형율을 산정하였다. 한편, 구조해석을 통해 제동하중(84kN: 2개 레일×레일당 단위제동하중 1kN/0.5m×10.5m(차량 고정자 길이)×2량) 작용시 고정단 교각에서의 변형율 응답을 이용하여, 제동에 의한 추가 변형율 값으로부터 제동하중을 산정하였다.

자기부상형 경전철의 경우, 차량 제동에 의해 발생하는 최대 제동하중은 최대 2.33톤이 발생하였고, 공차하중(19.1톤, 공차기준)의 최대 12.20%로 나타났다.

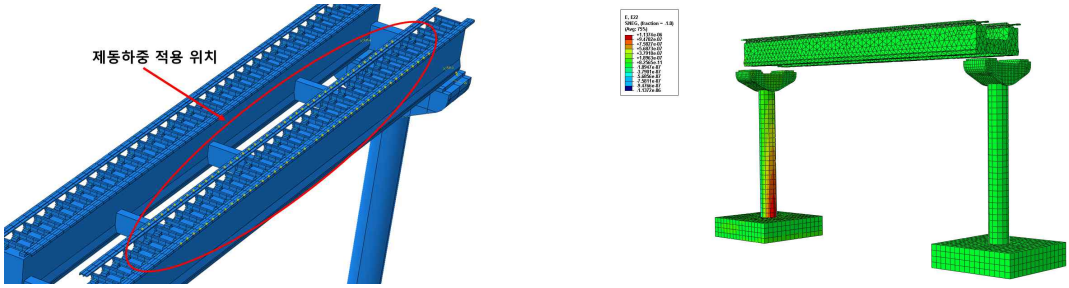


<자기부상 경전철 차량 제동시험 및 제동위치>



(a) 지간중앙(지점B) (b) 지점부(P147)

<정상 주행/제동하중 재하시 고정단 교각에서의 변형율 응답 비교>



(a) 제동하중 재하 (b) 고정단 교각에서의 변형율 응답

<제동하중 재하에 따른 고정단 교각에서의 변형율 응답(구조해석)>

<제동에 의한 추가 변형율 및 제동하중>

구분		주행 (D)	제동 (B)	제동에 의한 추가 변형율 (B-D)	단위 제동하중 재하시 변형율	제동하중 (ton)
속도 (km/h)	제동 위치					
40	지점B	-2.480	-0.454	2.026	7.315	2.33
	지점C		-2.135	0.345	7.522	0.39
50	지점B	-3.489	-1.953	1.536	7.315	1.76
	지점C		-1.446	2.043	7.522	2.28

(바) 소결: 제동하중 제안

경전철 차량 제동 시 고가구조물에 작용하는 제동하중에 대한 현장계측 및 수치해석 분석 결과, 일반 고무차륜형 경전철의 경우 차량하중의 최대 13.27%, 일반 철제차륜형 경전철의 경우 차량하중의 최대 12.02%, 선형유도전동기형 경전철의 경우 차량하중의 최대 14.37%, 모노레일형 경전철의 경우 차량하중(1 unit)의 최대 10.82%, 자기부상형 경전철의 경우 차량하중의 최대 12.20%로 나타났다. 이에, 경전철 차량의 제동하중은 차량하중의 15%로 제안하며, 열차 주행면 혹은 레일면에서 열차진행 방향으로 수평되게 작용하는 것으로 한다. 이때, 차량하중은 고가구조물의 경간 구성에 따라 부재에 최대영향을 주는 차량하중 재하길이를 고려하여 산정한다.

그리고, 경전철은 중앙관제를 통하여 무인 운영되는 특성상 복선 이상의 경우에 차량 구동과 차량 제동이 동시에 작용하는 경우는 없는 관계로, 단선재하 상태에서 검토하며 시동하중 혹은 제동하중 중 큰 쪽의 하중이 작용하는 것으로 한다. 여기에서 충격은 고려하지 않는다.

2. 한계상태설계법 기반의 경전철 고가구조물 설계기준(안) 연구

가. 경량전철 고가구조물 목표신뢰도 지수 선정

(1) 목표신뢰도지수 관련 연구자료 조사

경량전철 고가구조물 목표신뢰도지수를 선정하기 위하여, 경량전철 및 교량 관련 국내외 설계기준의 목표신뢰도지수를 문헌 검색 및 수집을 통하여 검토한다.

(가) ACI 경량전철 구조물 설계 지침

미국 ACI에서는 경량전철 구조물 설계에 적용할 수 있는 철근 및 프리스트레스 콘크리트 지침을 출간하였다(ACI 2012). 이 지침에는 경량전철 구조물에 작용하는 주요 하중에 대하여 정의하고 있으며, 한계상태 하중조합을 제시하고 있다. 특히 신뢰도 분석을 통한 강도한계상태의 저항계수를 제시하고 있다(Nowak and Grouni 1983). Nowak은 미국 및 캐나다의 5개 경량전철 노선을 대상으로 경량전철 구조물에 작용하는 연직방향 하중조합을 대상으로 통계 및 신뢰도 분석을 통하여 하중계수와 저항계수를 제시하였다. 목표신뢰도지수는 강도한계상태는 4.0으로 도로교설계기준의 3.5보다 크게 정하였으며, 사용한계상태는 2.5로 정하고, 콘크리트 구조물을 대상으로 신뢰도 분석을 수행하여 저항계수를 제시하고 있다.

(나) AASHTO LRFD - PEDESTRIAN BRIDGES (2009)

AASHTO LRFD Bridge Design Specification(AASHTO BDS)에서 다루지 않는 보도교 기본 특성과 하중에 대해서 기술하고 있으며, 하중조합 및 하중계수는 AASHTO BDS를 적용하고 있다. AASHTO 보도교 설계기준의 모든 철학은 AASHTO BDS를 기본으로 하며, AASHTO BDS에서의 목표신뢰도지수는 3.5로 규정하고 있다.

(다) AASHTO LRFD LRT

강도한계상태 I에 대한 하중 계수 제안시 적용한 목표신뢰도지수는 AASHTO BDS의 목표신뢰도지수를 따라 3.5를 적용하였다.

(라) EUROCODE

유로코드의 기본이 되는 ISO 2394와 JCSS의 Probabilistic Model Code의 극한한계상태 신뢰도등급 2(RC2)에 대하여 파괴확률 $p_f = 10^{-4}$ 을 제시하고 있다. 이를 신뢰도 지수로 환산하면 $\beta = 3.72$ 와 같다.

일반적인 사용한계상태는 EN 1990 (CEN 2001)에서 비가역적인 경우, 목표신뢰도지수는 설계수명 1년에 대해 2.9, 50년에 대해 1.5로 제시하고 있다. ISO 2394 (ISO 1998)에서는 비가역적인 경우 목표신뢰도지수를 1.5로 제시하고 있다.

(마) 도로교설계기준(한계상태설계법)

국내 최초로 도입된 신뢰도 기반 한계상태설계법인 도로교설계기준(한계상태설계법)에서는 설계수명 100년에 목표신뢰도지수 $\beta = 3.72$ 를 확보할 수 있도록 하중계수와 저항계수를 제시하였다.

(바) 도로교설계기준(한계상태설계법) -케이블교량편(2015)-

도로교설계기준-케이블교량편은 국내 도로교설계기준(한계상태설계법)을 기본으로 하고, 장경간 케이블교량에 대하여 적용하기 위하여 개발된 신뢰도 기반의 설계지침으로 설계수명은 100년 또는 200년으로 정하여 설계할 수 있도록 제시하고 있다. 교량의 목표신뢰도지수를 3.72 또는 4.0으로 정할 수 있도록 제시한다. 일반교량에 대한 도로교설계기준(2012)의 목표신뢰도지수가 3.72이므로, 일반케이블교량의 목표신뢰도지수도 이와 동일하게 정하고, 장경간 케이블교량에 대한 목표신뢰도지

수는 4.0으로 정할 수 있도록 하여, 두 단계의 목표신뢰도지수에 대한 설계가 가능하도록 제시한다. 케이블 교량의 중요도 및 목표 신뢰도 지수와 하중조합별 목표신뢰도 지수는 다음과 같다.

<케이블교량의 중요도 및 목표신뢰도 지수>

중요도 등급	중요도	토목공학 구조물 예시	대표 신뢰도지수	목표 파괴확률	Reference (Eurocode EN 1990)
2등급 (중요)	보통	일반교량 일반 케이블교량	3.72	10^{-4}	CC2
1등급 (매우중요)	높음	장경간 케이블교량	4.00	3.16×10^{-5}	Geometric mean of CC2 &CC3

<케이블교량의 하중조합별 목표신뢰도 지수>

중요도 등급	하중조합	목표 파괴확률	목표 신뢰도지수
2등급 (중요)	극한한계상태 하중조합 Ⅰ,Ⅱ,Ⅳ,Ⅴ,Ⅷ	10^{-4}	3.72
	극한한계상태 하중조합 Ⅲ, Ⅵ	10^{-3}	3.09
	극한한계상태 하중조합 Ⅶ	10^{-2}	2.33
1등급 (매우중요)	극한한계상태 하중조합 Ⅰ,Ⅱ,Ⅳ,Ⅴ,Ⅷ	3.16×10^{-5}	4.00
	극한한계상태 하중조합 Ⅲ, Ⅵ	3.16×10^{-4}	3.41
	극한한계상태 하중조합 Ⅶ	3.16×10^{-3}	2.73

(사) 철도교설계기준(한계상태설계법)(안) (2018)

국내에서 최근에 수행된 일반철도 교량 설계기준에 신뢰도기반 한계상태설계법을 도입하기 위한 연구(한국철도기술연구원 2018)를 통하여, 기존 철도교량 설계의 하중조합 및 도로교설계기준 한계상태설계법의 하중조합을 검토하고 설계 활하중 모델인 KRL2012의 크기와 하중저항계수에 대한 통계 및 신뢰도 분석을 수행하였다(정주승 등 2018). 철도교설계기준(한계상태설계법)(안)(2018)에서는 철도교량의 설계가 도로교량에 비하여 좀 더 보수적임을 감안하여, 도로교량보다 큰 목표신뢰도지수인 4.00을 제시하고 있다.

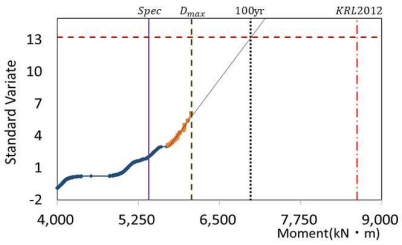
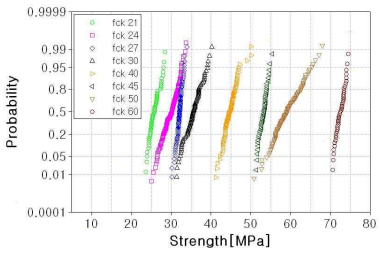
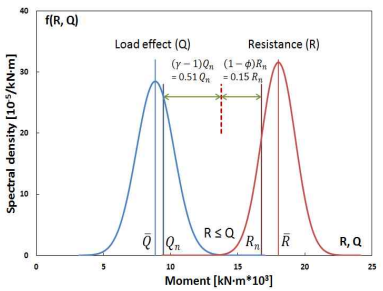
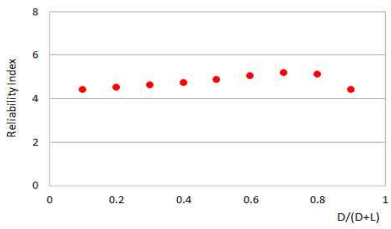
(아) 국내 경량전철설계기준(안) 목표신뢰도지수

국내 경량전철설계기준을 개발하기 위하여 목표신뢰도지수를 관련 국내외 설계기준과 비교를 통하여 제안하였고, 국내 경량전철 고가구조물에 적용하여 목표신뢰도지수의 적합성을 검토하였다. 국내 경량전철설계기준(안)에 대해 목표신뢰도지수를 결정하기 위하여, 국내외 한계상태설계법 기반 설계기준의 목표신뢰도지수를 비교하였으며, 최근 제정된 미국 경량전철 고가구조물설계기준인 AASHTO LRFD LRT는 미국 도로교설계기준인 AASHTO LRFD BDS와 동일하게, 목표파괴확률 10^{-4}을 신뢰도지수로 환산한 $\beta = 3.72$ 와 근사치인 3.5를 목표신뢰도지수로 규정하고 있다. Eurocode의 경우 목표파괴확률 10^{-4} 제시함에 따라, 이를 목표신뢰도지수로 환산하면 3.72와 같다. 국내 설계기준에서는 도로교설계기준(한계상태설계법)은 목표신뢰도지수를 3.72로 규정하고 있으며, 철도교설계기준은 철도교량이 도로교량보다 보수적임에 따라 4.0을 제시하고 있다. 관련 설계기준 분석을 통하여, 국내 경량전철설계기준의 목표신뢰도지수를 선정하였다. 고무차륜형 경량전철은 도로교차량과 오히려 가깝고, 일반 철도교와 달리 국내 경량전철 노선은 특정 1개 차종만 통행하므로, 철도교설계기준과 달리 국내 경량전철 교량에 대한 목표신뢰도지수는 일반 도로교와 동일한 수준인 3.7로 정하였다. 이 연구에서 제안하는 하중계수 및 저항계수를 적용하여 설계한 경량전철 고가구조물이 목표신뢰도지수를 만족하는 것을 검토하여 이후 절에 제시하였다.

나. 신뢰도 기반 경량전철 하중계수 및 저항계수

신뢰도기반 한계상태설계법의 하중저항계수 결정을 위한 프로세스를 아래에 설명한다. 여기에 예시한 그림은 철도교량에 대한 하중저항계수 캘리브레이션의 결과이다.

<철도교설계기준(한계상태설계법)(2018)(안) 하중저항계수 결정을 위한 프로세스>

설계 하중 통계특성	○ 활하중에 대한 실측 데이터를 통계 분석하여 공칭활하중에 대한 크기 비율인 편심계수를 구한다. ○ 일반 철도교량 설계활하중 KRL -2012에 대한 추정 활하중의 편심계수는 0.81로 설계활하중이 보수적임을 알 수 있다. ○ 경량전철 활하중 실측 데이터에 대한 통계분석을 통하여 설계활하중의 편심계수를 결정한다.	 <계측 데이터로부터 설계활하중 추정 후 설계활하중인 KRL2012와 비교>
구조 강도 통계특성	○ 구조재료 강도에 대한 통계자료를 통계 분석하고, 시공치수, 설계수식의 통계특성과 조합하여 시뮬레이션을 통한 부재강도 통계특성을 산정한다. ○ 대표적인 구조형식을 대상으로 시뮬레이션을 통하여 강도 통계특성을 구한다.	 <콘크리트 압축강도 통계특성>
목표신뢰도지수 결정	○ 기존 설계의 안전율을 신뢰도지수로 환산하여 참고하고 국내외 관련 구조물의 목표신뢰도 수준을 근거로 결정한다. ○ 철도교량의 목표신뢰도지수는 대개 β_T=4.0으로 도로교량의 β_T= 3.7보다 크게 정하므로, 경량전철구조물의 목표신뢰도지수도 기존 설계와 관련 기준을 참고하여 정한다.	 <하중저항계수를 적용한 하중효과와 저항강도의 도식적인 분포 예>
하중저항계수 캘리브레이션	○ 대표적인 교량 형식과 지간을 대상으로 목표신뢰도를 확보할 수 있는 하중저항계수를 선택한다. ○ 일반철도교량에 대하여 1.25D + 1.85L을 적용하면 목표신뢰도를 충분히 확보하는 설계가 된다. ○ 이 연구에서 경량전철 구조물의 목표신뢰도를 확보할 수 있는 하중저항계수를 캘리브레이션 한다.	 <하중저항계수를 적용한 설계의 신뢰도지수 예>

(1) 국내외 경량전철 및 교량 관련 설계기준 하중조합 및 하중계수 비교

국내외 설계기준의 하중조합과 하중을 비교하였다. 국외 기준으로 미국 경량전철 구조물 설계지침(ACI)(2012), AASHTO LRFD BDS(2014), AASHTO LRFD LRT(2018), NCHRP Research Report 851 (2017), ASCE의 Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures를 수집하여 하중조합 및 하중계수를 비교분석하였다. 국내의 기준으로 도로교설계기준(2010), 도로교설계기준(한계상태설계법)(2015), 철도교설계기준(2013), 철도교설계기준(한계상태설계법)(안)(2018), 호남고속철도설계지침을 수집하여 하중조합 및 하중계수를 비교분석하였다.

(가) 미국 경량전철 구조물 설계지침(ACI)(2012)

미국 경량전철 구조물 설계지침(ACI)(2012)의 하중조합 및 하중계수에 대해 다음의 표와 같이 정리한다.

<미국 경량전철 구조물 설계지침(ACI)(2012) 강도설계법 하중조합>

한계상태 하중조합	DC DW	LL IM CE HF	SH CR	PS	WL WS	IC TU TG WA EQ	LFQ	BR (FR Fr)	CT	DR CT
U0	1.30*	1.70	1.00	1.00	1.00	-	-	-	-	-
U1	1.30*	1.40	1.00	1.00	1.50	-	-	-	-	-
U3	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	-	-	-
U5	1.30*	1.40↑	1.00	1.00	1.50	-	-	-	-	1.40
U6	1.30*	-	-	1.00	-	-	-	1.20	1.30	-

미국 경량전철 구조물 설계지침(ACI)(2012)의 사용한계상태의 하중조합은 다음의 표와 같다.

<미국 경량전철 구조물 설계지침(ACI)(2012) 사용한계상태 하중조합>

S1 = DC+DW+LL+IM+PS+LFn+(CE or HF)
S2 = S1+[0.3(WL+WS) or IC orWA]
S3 = S2+TU+TG+SH+CR
S4 = PS+DC+DW+WS+TU+TG+SH+CR

(나) AASHTO LRFD BDS(2014) 및 AASHTO LRFD LRT(2018)

AASHTO LRFD LRT(2018)는 AASHTO LRFD BDS(2014)를 기본으로 하여 개발되어 하중조합별 하중구성은 비슷하며, 특이점으로 AASHTO LRT에서 폭파에 의한 하중 BL 및 궤도파단하중 RB, 탈선하중 DE가 추가되었다. 고정하중계수 γ_p는 AASHTO LRFD BDS 및 LRT는 동일한 값을 적용하므로, 같이 정의하였다.

γ_{EQ}, γ_{TG}, γ_{SE}는 설계기준에서 정의되는 값으로 지면 제약상 이 보고서에는 나타내지 않았으며, 하중기호에 대한 설명은 같이 정리하였다.

<AASHTO LRFD BDS(2014)>

한계상태 하중조합	DC DD DW EH EV ES EL PS CR SH	LL IM CE BR PL LS	WA	WS	WL	FR	TU	TG	SE	이 하중들은 한번에 한가지만 고려			
										EQ	IC	CT	CV
극한 I	γ_p	1.75	1.00	-	-	1.00	0.50/1.20	γ_{TG}	γ_{SE}	-	-	-	-
극한II	γ_p	1.35	1.00	-	-	1.00	0.50/1.20	γ_{TG}	γ_{SE}	-	-	-	-
극한III	γ_p	-	1.00	1.40	-	1.00	0.50/1.20	γ_{TG}	γ_{SE}	-	-	-	-
극한IV	γ_p	-	1.00	-	-	1.00	0.50/1.20	-	-	-	-	-	-
극한V	γ_p	1.35	1.00	0.40	1.0	1.00	0.50/1.20	γ_{TG}	γ_{SE}	-	-	-	-
극단상황 I	γ_p	γ_{EQ}	1.00	-	-	1.00	-	-	-	1.00	-	-	-
극단상황II	γ_p	0.50	1.00	-	-	1.00	-	-	-	-	1.00	1.00	1.00
사용 I	1.00	1.00	1.00	0.30	1.0	1.00	0.50/1.20	γ_{TG}	γ_{SE}	-	-	-	-
사용II	1.00	1.30	1.00	-	-	1.00	0.50/1.20	-	-	-	-	-	-
사용III	1.00	0.80	1.00	-	-	1.00	0.50/1.20	γ_{TG}	γ_{SE}	-	-	-	-
사용IV	1.00	-	1.00	0.70	-	1.00	0.50/1.20	-	1.0	-	-	-	-
피로 I - LL, IM & CE만 고려	-	1.50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
피로II - LL, IM & CE만 고려	-	0.75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

<AASHTO LRFD LRT(2018)>

한계상태 하중조합	DC DD DW EH EV ES EL PS CR SH	LL IM CE BR PL LS	WA	WS	WL	FR	TU	TG	SE	이 하중들은 한번에 한가지만 고려					
										EQ	BL	IC	CT	CV	RB
극한 I	γ_p	1.65	1.00	-	-	1.00	0.50/1.20	γ_{TG}	γ_{SE}	-	-	-	-	-	-
극한II	γ_p	-	1.00	-	-	1.00	0.50/1.20	γ_{TG}	γ_{SE}	-	-	-	-	-	-
극한III	γ_p	-	1.00	1.00	-	1.00	0.50/1.20	γ_{TG}	γ_{SE}	-	-	-	-	-	-
극한IV	γ_p	-	1.00	-	-	1.00	0.50/1.20	-	-	-	-	-	-	-	-
극한V	γ_p	1.35	1.00	1.00	1.00	1.00	0.50/1.20	γ_{TG}	γ_{SE}	-	-	-	-	-	-
극단상황 I	γ_p	γ_{EQ}	1.00	-	-	1.00	-	-	-	1.00	-	-	-	-	-
극단상황II	γ_p	0.50	1.00	-	-	1.00	-	-	-	-	1.00	1.00	1.00	1.00	-
극단상황III	γ_p	1.00	1.00	-	-	1.00	0.50/1.20	-	-	-	-	-	-	-	1.00
사용 I	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00/1.20	γ_{TG}	γ_{SE}	-	-	-	-	-	-
사용II	1.00	1.30	1.00	-	-	1.00	1.00/1.20	-	-	-	-	-	-	-	-
사용III	1.00	γ_{LL}	1.00	-	-	1.00	1.00/1.20	γ_{TG}	γ_{SE}	-	-	-	-	-	-
사용IV	1.00	-	1.00	1.00	-	1.00	1.00/1.20	-	1.00	-	-	-	-	-	-
피로 I - LL, IM & CE만 고려	-	1.40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
피로II - LL, IM & CE만 고려	-	0.85	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

<AASHTO LRFD 고정하중 γ_p에 관한 하중계수>

하중의 종류		하중계수	
		최대	최소
DC : 구조부재와 비구조적 부착물		1.25 1.50(극한한계상태조합IV에서만)	0.90
DD : 말뚝부마찰력	말뚝, α Tomlinson 방법 말뚝, λ 방법 현장타설 말뚝, O'Neill and Reese (1999) 방법	1.40 1.05 1.25	0.25 0.30 0.35
DW : 포장과 시설물		1.50	0.65
EH : 수평토압			
• 주동		1.50	0.90
• 정지		1.35	0.90
• 앵커옹벽 토압		1.35	-
EL : 시공중 발생하는 구속응력		1.0	1.0
EV : 연직토압			
• 전체안정		1.00	-
• 옹벽 및 교대		1.35	1.00
• 강성 암거 (예, 콘크리트 박스)		1.30	0.90
• 뼈대형 강성구조물 (예, 라멘형)		1.35	0.90
• 박스형 연성 강재암거		1.50	0.90
• 열가소성 암거		1.30	0.90
• 연성 암거 (예, 파형강관)		1.95	0.90
ES : 상재토하중		1.50	0.75

<AASHTO LRFD 하중기호>

기호	정의	기호	정의
LL	차량활하중	TU	단면평균온도
IM	충격하중	TG	온도 경사
CE	원심하중 (도로교)	SE	경험에 의한 하중
BR	제동하중 (도로교)	EQ	지진하중
PL	보도활하중	BL	폭파에 의한 하중
LS	상재활하중	IC	빙하중
WA	정수압과 유수압	CT	차량 충돌하중
WS	구조물에 작용하는 풍하중	CV	선박 충돌하중
WL	풍하중에 의한 활하중	RB	궤도파단하중
FR	마찰하중 (도로교)	DE	탈선하중

(다) National Cooperative Highway Research Program, NCHRP Reasearch Report 851(2017)

<NCHRP Research Report 851>

한계상태	하중계수	일반도로 활하중과 동시작용시 하중계수
극한 Ⅰ	1.65	-
사용 Ⅰ	1.00	-
피로 Ⅰ	1.40	1.50(일반도로)/1.40(경량전철)
피로 Ⅱ	0.85	-

(라) Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures(2010)

ASCE의 Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures에서는 하중조합을 아래와 같이 정하였다.

1. $1.4D$
2. $1.2D+1.6L+0.5(L_r \text{ or } S \text{ or } R)$
3. $1.2D+1.6(L_r \text{ or } S \text{ or } R)+(L \text{ or } 0.5W)$
4. $1.2D+1.0W+L+0.5(L_r \text{ or } S \text{ or } R)$
5. $1.2D+1.0E+L+0.2S$
6. $0.9D+1.0W$
7. $0.9D+1.0E$

(마) 도로교설계기준(2010)

도로교설계기준의 강도설계법 하중조합은 다음과 같다.

$$U=1.3D+2.15(L+I)+1.35CF+1.7H+1.3Q \quad (2.2.1)$$

$$U=1.3D+1.7H+1.3Q+1.3W \quad (2.2.2)$$

$$U=1.3D+1.3(L+I)+1.3CF+1.7H+1.3Q+1.3(0.5W+WL+BK) \quad (2.2.3)$$

$$U=1.3D+1.3(L+I)+1.3CF+1.7H+1.3Q+1.3G \quad (2.2.4)$$

$$U=1.25D+1.65H+1.25Q+1.25W+1.25G \quad (2.2.5)$$

$$U=1.25D+1.25(L+I)+1.25CF+1.65H+1.25Q+1.25(0.5W+WL+BK)+1.25G \quad (2.2.6)$$

$$U=1.0(D+H+Q+E) \quad (2.2.7)$$

$$U=1.3D+1.3(L+I)+1.3CF+1.7H+1.3Q+1.3CO \quad (2.2.8)$$

$$U=1.2D+1.5H+1.2Q+1.2W+1.2CO \quad (2.2.9)$$

(바) 도로교설계기준(한계상태설계법)(2015) 및 철도교설계기준(한계상태설계법)(안)(2018)

국내 한계상태설계법 관련 설계기준으로 도로교설계기준(한계상태설계법)(2015) 및 철도교설계기준(한계상태설계법)(안)(2018)을 아래의 표와 같이 정리하였다. 국내 설계기준의 하중계수 γ_p는 국내 도로교설계기준 및 철도교설계기준은 동일한 값을 적용하므로, 같이 정의하였다. γ_{TG}, γ_{SD}, γ_{EQ}는 설계기준에서 정의되는 값으로 지면 제약상 이 보고서에는 나타내지 않았으며, 하중기호에 대한 설명은 같이 정리하였다.

<국내 도로교설계기준(한계상태설계법)(2015)>

한계상태 하중조합	DC DD DW EH EV ES EL PS CR SH	LL IM CE BR PL LS CF	WA BP WP	WS	WL	FR	TU	TG	GD SD	이 하중들은 한 번에 한 가지만 고려			
										EQ	IC	CT	CV
극한 I	γ_p	1.80	1.00	-	-	1.00	0.50/1.20	γ_{TG}	γ_{SD}	-	-	-	-
극한 II	γ_p	1.40	1.00	-	-	1.00	0.50/1.20	γ_{TG}	γ_{SD}	-	-	-	-
극한 III	γ_p	-	1.00	1.40	-	1.00	0.50/1.20	γ_{TG}	γ_{SD}	-	-	-	-
극한 IV - EH, EV, ES, DW DC만 고려	γ_p	-	1.00	-	-	1.00	0.50/1.20	-	-	-	-	-	-
극한 V	γ_p	1.40	1.00	0.40	1.00	1.00	0.50/1.20	γ_{TG}	γ_{SD}	-	-	-	-
극단상황 I	γ_p	γ_{EQ}	1.00	-	-	1.00	-	-	-	1.00	-	-	-
극단상황 II	γ_p	0.50	1.00	-	-	1.00	-	-	-	-	1.00	1.00	1.00
사용 I	1.00	1.00	1.00	0.30	1.0	1.00	1.00/1.20	γ_{TG}	γ_{SD}	-	-	-	-
사용 II	1.00	1.30	1.00	-	-	1.00	1.00/1.20	-	-	-	-	-	-
사용 III	1.00	0.80	1.00	-	-	1.00	1.00/1.20	γ_{TG}	γ_{SD}	-	-	-	-
사용 IV	1.00	-	1.00	0.70	-	1.00	1.00/1.20	-	1.00	-	-	-	-
사용 V	1.00	-	-	-	-	-	0.50	-	-	-	-	-	-
피로 - LL, IM & CE만 고려	-	0.75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

<국내 철도교설계기준 한계상태설계법(안)(2018)>

한계상태 하중조합	DC DD DW EH EV ES EL PS CR SH	LL IM PL LS	WA BP WP	WS	WL	TU	TG	GD SD	CF (LF)	SB LR	이 하중들은 한번에 한가지만 고려γ_p				
											EQ	IC	CT	CV	DR
극한 I	γ_p	1.85	1.00	-	-	0.50/1.20	γ_{TG}	γ_{SD}	1.35	-	-	-	-	-	-
극한 II	γ_p	1.40	1.00	-	-	0.50/1.20	γ_{TG}	γ_{SD}	1.35	-	-	-	-	-	-
극한 III	γ_p	-	1.00	1.40	-	0.50/1.20	γ_{TG}	γ_{SD}	-	-	-	-	-	-	-
극한 IV -EH, EV, ES, DW DC만 고려	γ_p	-	1.00	-	-	0.50/1.20	-	-	-	-	-	-	-	-	-
극한 V	γ_p	1.40	1.00	0.40	1.00	0.50/1.20	γ_{TG}	γ_{SD}	1.35	1.40	-	-	-	-	-
극단상황 I	γ_p	γ_{EQ}	1.00	-	-	-	-	-	-	-	1.00	-	-	-	-
극단상황 II	γ_p	0.50	1.00	-	-	-	-	-	-	-	-	1.00	1.00	1.00	-
극단상황 III	1.00	1.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.00
사용 I	1.00	1.00	1.00	0.30	1.00	1.00/1.20	γ_{TG}	γ_{SD}	1.00	1.00	-	-	-	-	-
사용 II	1.00	1.30	1.00	-	-	1.00/1.20	-	-	1.30	-	-	-	-	-	-
사용 III	1.00	1.00	1.00	-	-	1.00/1.20	γ_{TG}	γ_{SD}	1.00	1.00	-	-	-	-	-
사용 IV	1.00	-	1.00	0.70	-	1.00/1.20	-	1.00	-	-	-	-	-	-	-
사용 V	1.00	-	-	-	-	0.50	-	-	-	-	-	-	-	-	-
피로 - LL, IM & CF만 고려	-	1.00	-	-	-	-	-	-	1.00	-	-	-	-	-	-

< γ_p에 관한 하중계수>

하중의 종류	하중계수	
	최대	최소
DC : 구조부재와 비구조적 부착물	1.25 1.50(극한한계상태 조합IV에서만)	0.90
DD : 말뚝부마찰력	1.80	0.45
DW : 포장과 시설물	1.50	0.65
EH : 수평토압		
• 주동	1.50	0.90
• 정지	1.35	0.90
EV : 연직토압		
• 전체안정	1.00	-
• 옹벽 및 교대	1.35	1.00
• 강성 암거 (예, 콘크리트 박스)	1.30	0.90
• 뼈대형 강성구조물 (예, 라멘형)	1.35	0.90
• 연성 암거 (예, 파형강관)	1.95	0.90
• 박스형 연성 강재암거	1.50	0.90
ES : 상재토하중	1.50	0.75
EL : 시공중 발생하는 구속응력	1.0	1.0
PS : 프리스트레스힘		
• 세그멘탈콘크리트교량의 상부,하부구조	1.0	
• 비세그멘탈콘크리트교량 상부구조	1.0	
• 비세그멘탈콘크리트교량 하부구조		
- I_g를 사용하는 경우	1.0	
- $I_{effective}$를 사용하는 경우	0.5	
• 강재 하부구조	1.0	
CR, SH : 크리프, 건조수축		
• 세그멘탈콘크리트교량의 상부,하부구조	DC에 대한 γ_p사용	
• 비세그멘탈콘크리트교량 상부구조	1.0	
• 비세그멘탈콘크리트교량 하부구조		
- I_g를 사용하는 경우	0.5	
- $I_{effective}$를 사용하는 경우	1.0	
• 강재 하부구조	1.0	

<국내 도로교 및 철도교설계기준 하중기호>

기호	정의	기호	정의
LL	차량활하중	TG	온도 경사
IM	충격하중	GD	지반변동의 영향
CE	원심하중 (도로교)	SD	지점이동의 영향
BR	제동하중 (도로교)	CF	원심하중
PL	보도활하중	SB	시제동하중 (철도교)
WA	정수압과 유수압	LR	종하중 (철도교)
BP	부력 또는 양압력	EQ	지진하중
WP	파압	BL	폭파에 의한 하중
WS	구조물에 작용하는 풍하중	IC	빙하중
WL	풍하중에 의한 활하중	CT	차량 충돌하중
FR	마찰하중 (도로교)	CV	선박 충돌하중
TU	단면평균온도	DR	탈선하중

(사) 철도교설계기준(2013)

국내 철도교설계기준(2016)은 강도설계법 기반으로 개발되었으며, 도로교설계기준과 같이 비교분석을 기본으로 철도교설계기준(한계상태설계법)(안)(2018)을 작성하였다. 이에 국내 경량전철 설계기준을 제안하기 위해 참고로 아래와 같이 정리하였다.

<국내 철도교설계기준(2016)>

한계상태 하중조합	DC DD DW EH EV ES EL PS CR SH	LL IM PL LS	WA BP WP	WS	WL	TU	TG	GD SD	CF (LF)	SB LR	이 하중들은 한번에 한가지만 고려γ_p				
											EQ	IC	CT	CV	DR
(8.3.1)	1.35D/1.6H	1.85	1.40	-	-	-	-	-	1.35	-	-	-	-	-	-
(8.3.2)	1.6D/1.6H	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
(8.3.3)	1.35D/1.6H	1.40	1.35	-	-	-	-	-	1.35	-	-	-	-	-	-
(8.3.4)	1.35D/1.6H	-	1.35	1.35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
(8.3.5)	1.35D/1.6H	1.40	1.35	1.35		-	-	-	1.35	1.40	-	-	-	-	-
(8.3.6)	1.0D/1.0H	1.00	1.00	-	-	-	-	-	-	-	1.00	-	-	-	-
(8.3.7)	1.35D/1.6H	1.40	1.35	-	-	-	-	-	-	-	-	1.35	-	-	-
(8.3.8)	1.2D/1.5H	-	1.2	1.2	-	-	-	-	-	-	-	1.2	-	-	-

(아) 호남고속철도설계지침

<상부구조 또는 교량 거더의 설계조합 (강도설계법)>

구분	설계조합
하중조합 I	$1.45\,(D+L+I+CF+N)$
하중조합 II	$1.40\,(D+5/3(L+I)+CF+\triangle T)$
하중조합 III	$1.80\,(D+L+I+CF^{*})$
하중조합 IV	$1.40\,(D+W1)$
하중조합 V	$1.40\,(D+L+I+CF+W2+LF+F+\triangle T)$
하중조합 VI	$1.40\,(D+L+I+CF+OF+\triangle T)$
하중조합 VII	하중조합 III $+\,1.4\,OF$
하중조합 VIII	하중조합 IV $+\,1.4\,OF$
하중조합 IX	$1.0\,(D+L/2(\text{단선})+I+EQ)$

(자) 극한한계상태 I 하중계수 비교

각 설계기준상의 극한한계상태 I 에서의 고정하중과 활하중 계수를 비교하였다. 고정하중 계수의 경우 도로교 한계상태 설계법과 철도교 한계상태 설계법의 값이 AASHTO LRFD의 값과 동일하며 활하중 계수의 경우는 철도교의 값이 1.85, 도로교의 경우 1.8로 철도교의 값이 더 큰 값을 갖는다.

국내외 한계상태설계법 기반 설계기준 극한한계상태 I 하중계수를 다음의 표와 같이 비교하여, 국내 경량전철설계기준 극한한계상태 I 고정하중 및 활하중 계수를 제안한다. 고정하중 계수는 관련

국내외 설계기준과 동일하게 1.25로 제안하며, 활하중계수는 AASHTO LRFD LRT과 동일하게 1.65로 제안한다. 신뢰도 기반 경량전철의 제안 하중계수는 신뢰도분석을 통해 검토한다.

<극한한계상태 I 하중계수 비교>

구분		고정하중	활하중	비고
국외 설계 기준	미국 경량전철 구조물 설계지침(ACI)(2012)	1.30	1.70	
	AASHTO LRFD BDS(2014)	1.25	1.75	
	AASHTO LRFD LRT(2018)	1.25	1.65	
	NCHRP Research Report 851(2017)	-	1.65	
	ASCE - Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures	1.20	1.60	
국내 설계 기준	도로교설계기준(2010)	1.30	2.15	
	도로교설계기준(한계상태설계법)(2015)	1.25	1.80	
	철도교설계기준(2013)	1.35	1.85	
	철도교설계기준(한계상태설계법)(안)(2018)	1.25	1.85	
	호남고속철설계지침	1.40	2.33	
제안 국내 경량전철 설계기준		1.25	1.65	

(2) 국내외 경량전철 및 교량 관련 설계기준 저항계수 비교

저항계수는 콘크리트 구조의 경우 재료에 적용하여 재료계수라 정의하고, 그 이외의 경우에는 부재력에 적용하여 저항계수로 정의하였다. 따라서 재료계수나 저항계수를 적용하여 구하는 구조부재의 설계저항강도는 도로교설계기준(한계상태설계법)(2012)와 동일하게 식(3)과 같이 구한다.

$$R = \phi R_r \tag{3}$$

여기서, R_r은 계수저항값이며 콘크리트 부재에 대하여는 $R_r = R_r(\phi_i \cdot X_i)$,그 이외에는 $R_r = \phi R_n$을 적용한다. 여기서ϕ_i 는 콘크리트구조에서 정의하는 재료계수이며, X_i는 재료의 기준강도이다. 또한, ϕ는 그 저항계수이며, R_n은 단면의 공칭저항이다.

(가) 콘크리트 교량

콘크리트 교량에 대해서 국내외 설계기준에서 정의하고 있는 저항계수를 다음의 표와 같이 정리한다. AASHTO LRFD(2014) 및 철도교설계기준(2016)은 강도설계법으로 저항계수를 사용하며, 국내 도로교설계기준(한계상태설계법)(2015)는 재료 저항계수에 대하여 다음 표와 같이 정의하고 있다. 따라서 국내 경량전철설계기준(안)의 콘크리트 교량의 저항계수는 한계상태 설계법인 도로교 및 철도교설계기준에서 정의하는 저항계수를 준용하여, 이와 동일하게 사용한다.

<국내외 설계기준의 콘크리트교량 저항계수>

AASHTO LRFD BDS AASHTO LRFD LRT		철도교설계기준(2016)		도로교설계기준 (한계상태설계법), 철도교설계기준 (한계상태설계법)(안)	
·인장 철근콘크리트 단면	0.90	·휨	0.90	극한 하중조합	콘크리트 - 0.65 강재 - 0.90
·인장 프리스트레스 콘크리트 단면	1.00	·전단과 비틀림	0.85		
·전단과 비틀림		·축방향 압축부재			
-표준 콘크리트	0.90	-나선철근으로 보강된 부재	0.70	극단상황 하중조합	콘크리트 - 1.00 강재 - 1.00
-경량콘크리트	0.80	-띠철근으로 보강된 부재	0.65		
·축방향 압축부재 (나선 또는 띠철근을 포함한 압축부재)	0.75	·축방향 인장부재		사용 하중조합	콘크리트 - 1.00 강재 - 1.00
·콘크리트의 지압	0.70	·콘크리트의 지압			
		·무근 콘크리트의 휨, 압축, 전단, 지압		피로 하중조합	콘크리트 - 1.00 강재 - 1.00
		·압축부재의 안정	0.65		

(나) 강 교량

국내 경량전철 교량의 강교 단면에 대한 저항계수는 AASHTO LRFD(2014) 및 도로교설계기준(한계상태설계법)(2015)에서 적용하는 저항계수에 대하여 다음의 표와 같이 정의한다. 저항계수는 강교량에 대하여 부재 및 재료강도에 설계요건에 따라 저항계수를 적용하고 있다. 따라서 국내 경량전철설계기준의 저항계수는 국내 한계상태 설계법 기반 설계기준에서 정의하는 저항계수를 준용하여, 이와 동일하게 사용한다.

<AASHTO LRFD(2014) 및 도로교설계기준(한계상태설계법)(2015)의 강교 저항계수>

AASHTO LRFD(2014)		도로교설계기준(한계상태설계법)(2015)	
· 휨	1.00	· 휨	1.00
· 전단	1.00	· 전단	1.00
· 축방향 압축력 (강재)	0.95	· 축방향 압축력 (강재)	0.90
· 축방향 압축력 (합성부재)	0.90	· 축방향 압축력 (합성부재)	0.90
· 인장력 (순단면 적용 시 파단)	0.80	· 인장력 (순단면 적용 시 파단)	0.80
· 인장력 (총단면 적용 시 항복)	0.95	· 인장력 (총단면 적용 시 항복)	0.95
· 핀의 지압력	1.00	· 핀의 지압력	1.00
· 볼트의 지압력	0.80	· 볼트의 지압력	0.80
· 전단연결재	0.85	· 전단연결재	0.85
· 인장력을 받는 A 325, A 490 볼트	0.80	· 인장력을 받는 고장력 볼트	0.80
· 인장력을 받는 A 307 볼트	0.80	· 인장력을 받는 일반볼트	0.80
· 인장력을 받는 F 1554 볼트	0.80	· 전단력을 받는 고장력 볼트	0.80
· 전단력을 받는 A 325, A 490 볼트	0.80	· 전단력을 받는 일반볼트	0.65
· 전단력을 받는 A 307 볼트	0.75	· 블록전단	0.80
· 전단력을 받는 F 1554 볼트	0.75	· 완전용입 그루브용접시의 용접 금속	
· 블록전단	0.80	-유효단면적에 대한 전단력	0.85 ϕ
· 연결재 전단, 파단	0.80	-유효단면적에 대한 수직 인장 또는 압축력	ϕ
		-용접선에 평행한 인장 또는 압축력	
· 트러스 거셋 플레이트 압축력	0.75	· 부분용입 그루브용접시 용접금속	
· 트러스 거셋 플레이트 코드 스플라이스	0.65	-용접선에 평행한 전단력	0.80 ϕ
· 트러스 거셋 플레이트 전단 항복	0.80	-용접선에 평행한 인장 또는 압축력	ϕ
· 복부판 크리플링	0.80	-유효단면적에 수직한 압축력	0.80
· 완전용입 그루브용접시의 용접 금속		-유효단면적에 수직한 인장력	
-유효단면적에 대한 전단력	0.85 ϕ	· 필릿용접시에 용접금속에 대해	
-유효단면적에 대한 수직 인장 또는 압축력	ϕ	-용접선에 평행한 방향의 인장 또는 압축력	ϕ
-용접선에 평행한 인장 또는 압축력		-용접금속의 목에 작용하는 전단력	0.80
· 부분용입 그루브용접시 용접금속		· 불량지반으로 압축력을 받는 말뚝 축방향력	0.80
-용접선에 평행한 전단력	0.80 ϕ	-H형 말뚝	1.00
-용접선에 평행한 인장 또는 압축력	ϕ	-강관 말뚝	1.00
-유효단면적에 수직한 압축력	0.80	· 양호지반으로 압축력을 받는 말뚝 축방향력	
-유효단면적에 수직한 인장력		-H형 말뚝	0.60
· 필릿용접시에 용접금속에 대해	ϕ	-강관 말뚝	0.70
-용접선에 평행한 방향의 인장 또는 압축력		· 비항타말뚝의 축방향력과 휨의 조합	
-용접금속의 목에 작용하는 전단력	0.80	-H형 말뚝의 축방향력	0.70
· 항타시 저항계수	1.00	-강관 파일의 축방향력	0.80
		-휨	1.00
		· 항타시 저항계수	1.00

* ϕ는 구하려는 모재의 강도에 적합한 ϕ를 택한다.

(다) 케이블 교량

케이블 교량의 저항계수 값은 아래의 표와 같으며 케이블교량 및 교량부재의 목표신뢰도지수 산정과정을 통하여 하중계수 및 저항수정계수와 연관된다.

<케이블교량의 재료계수 ϕ_i>

콘크리트	ϕ_c = 0.65
철근 또는 프리스트레스 강재	ϕ_s = 0.90

<케이블교량의 저항계수>

강 부재	휨부재	ϕ_f = 1.00
	전단부재	ϕ_v = 1.00
	압축부재	ϕ_c = 0.90
	⋮	⋮
케이블 부재	현수교 주 케이블	ϕ_{mc} = 0.72
	사장교 케이블	ϕ_{sc} = 0.78

설계검증을 위한 식에서의 저항수정계수는 교량의 설계수명과 중요도, 부재의 설계수명을 고려하여 설정하며, 구조부재 별 목표신뢰도에 따라 다음 표와 같이 주어진다.

<케이블교량의 저항수정계수>

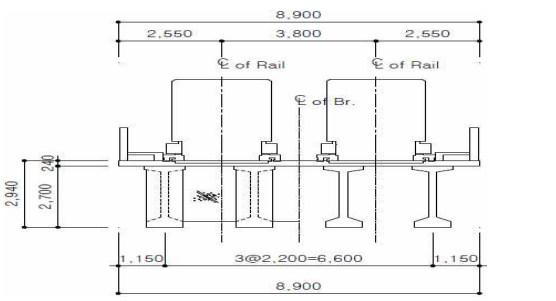
한계상태 (하중조합)	중요도 등급	부재 종류		부재 설계수명	목표신뢰도지수		저항수정계수, ϕrm	
					설계수명 기준	설계수명 100년 기준	설계수명 200년 기준	설계수명 100년 기준	설계수명 200년 기준
극한한계상태 하중조합 Ⅰ,Ⅱ,Ⅳ,Ⅴ,Ⅷ	2등급 (중요)	주 부재 및 부 부재	영구부재	설계수명	3.7	3.7	3.7	1.0	1.0
			보수가능부재 교체가능부재	20년		3.29	3.09	1.07	1.07
				30년		3.40	3.21	1.05	1.05
				50년		3.54	3.35	1.03	1.03
	1등급 (매우중요)	주 부재	영구부재	설계수명	4.0	4.0	4.0	0.95	0.95
			보수가능부재 교체가능부재	20년		3.60	3.42	1.05	1.05
				30년		3.71	3.53	1.03	1.03
				50년		3.83	3.66	1.01	1.01
		부 부재	보수가능부재 교체가능부재	20년	3.7	3.29	3.09	1.07	1.07
				30년		3.40	3.21	1.05	1.05
				50년		3.54	3.35	1.03	1.03

다. 신뢰도 기반 목표신뢰도지수 및 하중·저항계수 검증

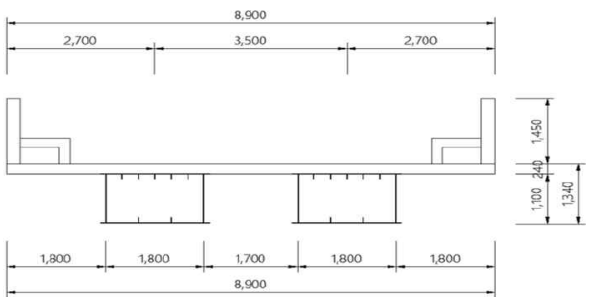
기존 경량전철 고가구조물을 대상으로 신뢰성 분석을 통해, 경량전철 고가구조물 설계기준(안)으로 제안한 목표신뢰도지수 및 하중저항계수를 검증하였다.

(1) 신뢰성 분석을 통한 제안 목표신뢰도지수 검증

국내 경량전철 대표 단면인 PSC 및 강 거더에 대한 예제 단면은 다음의 그림과 같다.



<경량전철 PSC I형 거더 단면 예>



<경량전철 Steel Box형 거더 단면 예>

국내 경량전철 고가구조물에 대한 신뢰성 분석을 수행하기 위하여, 하중 및 저항강도에 대한 통계특성을 분석 및 정리한다. 고정하중(D)에 대한 통계특성은 도로교설계기준 및 AASHTO LRFD에서 제안하고 있는 통계특성을 적용한다. 활하중(L)에 대한 통계특성은 각 설계기준마다 제안하고 있는 값이 다르므로, 해당되는 설계기준에 대한 통계특성을 적용한다. 활하중에 대한 통계특성인 편심계수는 계측 WIM데이터에 대한 통계분석을 수행하고 설계수명 100년에 대한 추정 하중효과와 공칭중량에 의한 하중효과를 비교한 결과 국내 도로교설계기준과 동일하게 1.00을 적용한다. 경량전철 활하중 변동계수는 활하중효과의 편차를 나타내는 지표이며, 경량전철의 경우 도로교의 화물트럭이나 일반 철도의 화물운송열차에 비하여 중량의 변동성이 작으므로, 미국 경량전철 설계기준 AASHTO LRFD LRT의 연구에서 적용한 0.16을 동일하게 적용하였다.

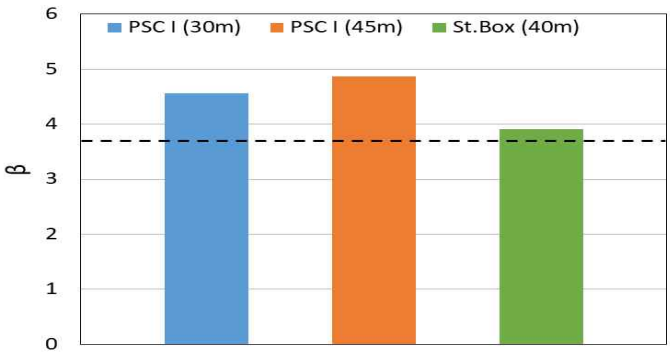
신뢰도 분석을 통하여 목표신뢰도지수 및 하중저항계수를 검토하기 위하여, 국내 경량전철 대표교량 단면에 대한 예제를 통하여 휨 저항강도를 시뮬레이션을 통하여 저항강도의 통계특성을 산출하였다. 대표교량 단면에 대한 예제는 지간이 30m 및 45m인 PSC I형 거더 단면과 지간이 40m인 강 박스형 단면을 적용하여 통계특성을 구한다. 대표 교량 단면에 대한 정모멘트 하중효과 및 시뮬레이션을 통한 휨 저항강도 통계특성은 다음의 표와 같다.

<국내 경량전철 대표 고가구조물에 대한 휨 저항강도 통계특성 및 단면력>

	휨 저항강도			하중				
	Bias	COV	Factor	DC1	DC2	DW	LL	D/(D+L)
PSC I (30m)	1.056	0.077	0.888	2466.50	1471.56	892.01	1229.76	0.80
PSC I (45m)	1.085	0.078	0.871	7120.66	3638.73	1646.69	2310.66	0.84
St. Box (40m)	1.176	0.092	1.000	1402.99	5312.80	1098.14	1688.06	0.82

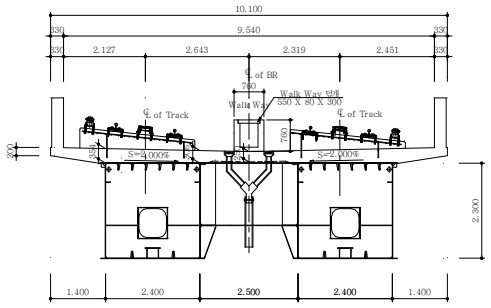
국내 경량전철 대표 교량 단면에 대한 예제 단면의 정모멘트 하중효과 및 제안하는 하중저항계수 통계특성을 적용하여 신뢰도지수를 산정한다. 지간 30m인 PSC I형 예제 단면의 신뢰도는 4.56이며, 지간 45m인 PSC I형 예제 단면의 신뢰도는 4.87, 지간 40m인 강 박스형 예제 단면의 신뢰도는 3.92이다. 예제 단면에 대하여 제안하는 국내 경량전철 설계기준 목표신뢰도지수인 3.7에 모두 만족하는 수준이다.

따라서 목표신뢰도지수를 관련 국내외 설계기준의 비교와 국내 경량전철에 대해 설계된 구조물에 대한 신뢰도분석을 통하여 제안한 목표신뢰도지수 3.7이 적정함을 확인하였다.



<경량전철 대표 단면에 대한 고가구조물 신뢰도 지수>

참고로 용인 경량전철 WIM데이터 하중효과 분석을 통해 설계수명 100년의 추정하중효과가 공칭축중 하중효과에 대해 통계특성인 편심계수가 1.05로, 제안하는 활하중 편심계수를 1.00으로 적용하여도 목표신뢰도지수에 적합한 지 분석한다. 용인 경량전철의 40m 지간에 대한 단면 및 단면력은 다음의 그림 및 표와 같다.

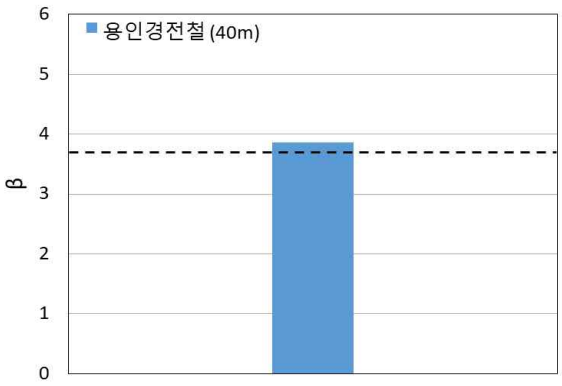


<용인경량전철 구조물 단면>

<용인경량전철 단면력 및 활하중 통계특성>

하중				
D	L	D/(D+L)	Bias	COV
1430.17	1954.20	0.73	1.05	0.160

용인경량전철의 교량형식은 Steel Box형 단면으로, 저항강도에 대한 통계특성은 경량전철 설계 예제단면을 시뮬레이션하여 산출한 통계특성을 적용하여 신뢰도를 구한다. 고정하중 및 저항계수에 대한 통계특성은 제안한 값을 적용하며, 하중조합은 1.25D + 1.65L을 적용한다. 이에 대해 산정된 용인경량전철에 대한 신뢰도는 다음과 같다.



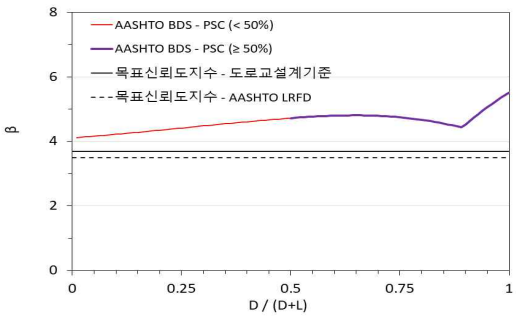
<용인경량전철 40m지간 신뢰도>

용인경량전철의 활하중 편심계수를 1.05를 적용하였을 경우 신뢰도는 3.86으로 국내 경량전철 목표신뢰도지수(안)인 3.70에 대해 만족하는 수준이다. 따라서 용인경량전철의 설계수명 100년 추정 하중효과가 공칭 축중의 하중효과에 대해 105% 수준이나, 제안하는 목표신뢰도지수에 만족하는 수준을 보인다.

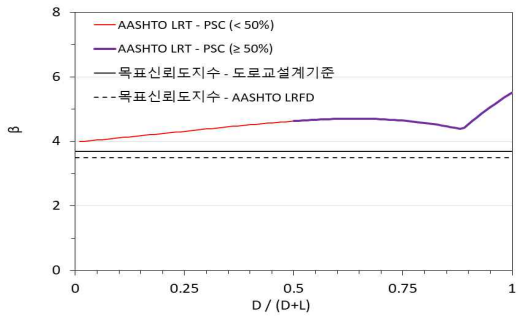
(2) 신뢰성 분석을 통한 제안 하중저항계수 검증

(가) 국내외 신뢰도기반 설계기준 신뢰도분석

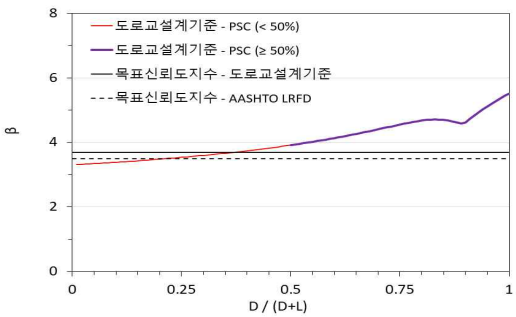
국내외 경량전철 구조물은 주로 PSC 거더 교량 및 강 거더 교량으로 되어있다. 국내 경량전철 설계기준에 제안하는 하중계수 및 통계특성을 검토하기 위하여, 경량전철 주 구조물에 대해 국내외 설계기준의 극한한계상태 I 하중조합에 대해 신뢰도를 비교 및 분석한다. 목표신뢰도지수는 도로교 설계기준은 3.7, AASHTO LRFD는 3.5를 적용하여, 신뢰도를 다음의 그림과 같이 산정한다. 저항강도(R)의 분포는 로그분포를 따르고, 고정하중(D)은 정규분포, 활하중(L)은 국내 설계기준에 대해서 극치분포를 따르며, AASHTO LRFD는 정규분포를 따른다. 또한, 경량전철 구조물은 주로 전체 하중효과에 대한 고정하중의 하중효과(D/D+L)가 50% 이상으로 이를 적용한다.



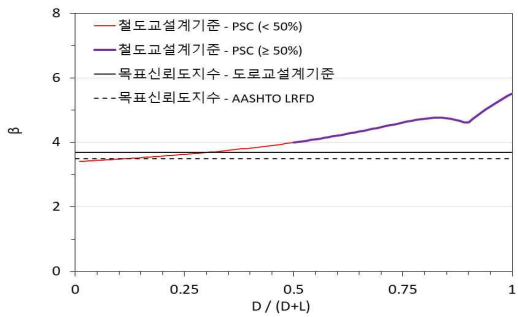
<신뢰도지수(AASHTO LRFD BDS)-PSC>



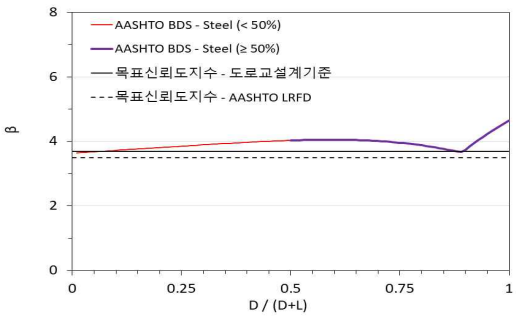
<신뢰도지수(AASHTO LRFD LRT)-PSC>



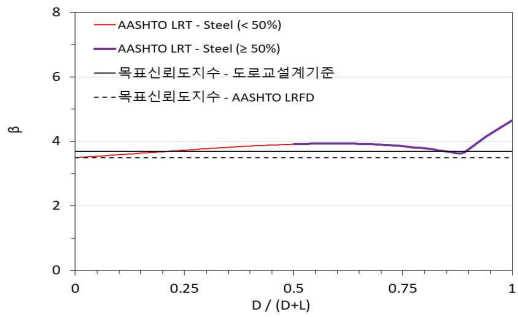
<신뢰도지수(도로교설계기준)-PSC>



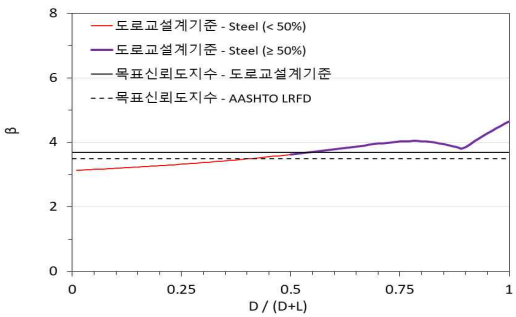
<신뢰도지수(철도교설계기준)-PSC>



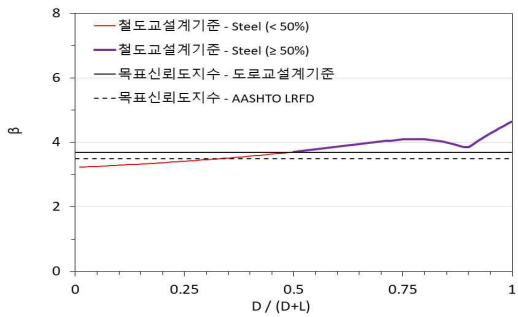
<신뢰도지수(AASHTO LRFD BDS)-Steel>



<신뢰도지수(AASHTO LRFD LRT)-Steel>



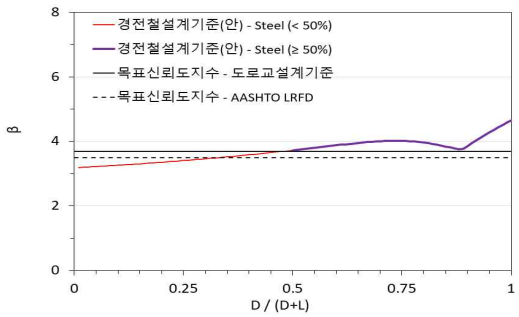
<신뢰도지수(도로교설계기준)-Steel>



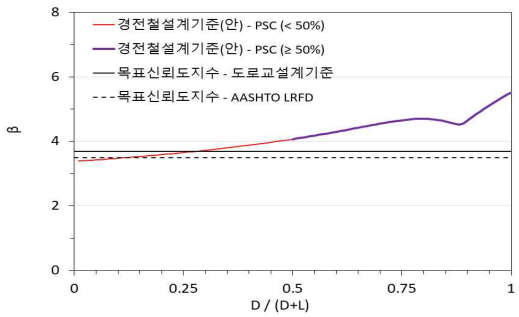
<신뢰도지수(철도교설계기준)-Steel>

국내 경량전철 대표 고가구조물의 예제 단면에 대하여 산출한 PSC교 및 강교의 휨 저항강도에 대한 통계특성을 적용하여, 국내외 설계기준 및 제안하는 경량전철의 하중계수에 대해 비교한다. PSC 교량의 경우에는 국내외 설계기준에 대한 하중조합 및 통계특성에 대한 신뢰도는 모두 설계기준별 목표신뢰도지수를 만족한다. 강교의 경우, 휨저항강도에 대한 저항계수가 1.00으로 저항계수에 대한 안전율이 낮아 신뢰도는 PSC보다 낮으나, 목표신뢰도지수에 만족한다.

(나) 국내 경량전철 한계상태설계법 하중조합(안)에 대한 신뢰도 분석



<신뢰도지수(경전철설계기준(안))-PSC>



<신뢰도지수(경전철설계기준(안))-Steel>

국내 경량전철 설계기준(안)의 극한한계상태 I 하중조합 및 통계특성을 적용하여 구한 신뢰도를 분석하여, 하중조합을 검증하였다. 국내 경량전철 대표 형식인 PSC 및 강 거더 단면에 대하여, 제안한 하중조합 및 통계특성을 적용하여 산정한 신뢰도(β)를 아래 그래프에 나타내었다. 국내 경량전철 대표 형식인 PSC 및 강 거더 단면에 대하여 주로 발생하는 하중비율인 D/(D+L)가 50%이상일 경우에, 최소 신뢰도 지수가 3.73이고, 경량전철의 경우 사하중 지배 구조로서 일반적으로 D/(D+L) 70~80% 수준에서의 최소 신뢰도 지수는 4로서, 목표신뢰도지수 3.7을 충분히 만족하고 있어, 제안한 하중조합 및 하중저항계수가 적정한 것으로 나타났다. 따라서 경량전철 대표 형식에 대해 고정하중 및 활하중 계수가 각각 1.25, 1.65일 경우에 목표신뢰도지수를 만족하므로, 국내 경량전철 설계기준(안)의 극한한계상태 I 하중조합을 1.25D + 1.65L로 결정한다.

라. 신뢰도 기반 경량전철 설계하중 및 하중조합 제안

<국내 경전철 고가구조물 설계하중조합(안)>

한계상태 하중조합	DC DD DW EH EV ES EL PS CR SH	LL IM PL LS	WA BP WP	WS	WL	TU	TG	GD SD	CF (LF)	SB LR	이 하중들은 한번에 한가지만 고려γ_p				
											EQ	IC	CT	CV	DR
극한 I	γ_p	1.65	1.00	-	-	0.50/1.20	γ_{TG}	γ_{SD}	1.35	-	-	-	-	-	-
극한 II	γ_p	1.40	1.00	-	-	0.50/1.20	γ_{TG}	γ_{SD}	1.35	-	-	-	-	-	-
극한III	γ_p	-	1.00	1.40	-	0.50/1.20	γ_{TG}	γ_{SD}	-	-	-	-	-	-	-
극한IV - EH, EV, ES, DW DC만 고려	γ_p	-	1.00	-	-	0.50/1.20	-	-	-	-	-	-	-	-	-
극한 V	γ_p	1.35	1.00	0.40	1.00	0.50/1.20	γ_{TG}	γ_{SD}	1.35	1.40	-	-	-	-	-
극단상황 I	γ_p	γ_{EQ}	1.00	-	-	-	-	-	-	-	1.00	-	-	-	-
극단상황 II	γ_p	0.50	1.00	-	-	-	-	-	-	-	-	1.00	1.00	1.00	-
극단상황III	1.00	1.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.00
사용 I	1.00	1.00	1.00	0.30	1.00	1.00/1.20	γ_{TG}	γ_{SD}	1.00	1.00	-	-	-	-	-
사용 II	1.00	1.30	1.00	-	-	1.00/1.20	-	-	1.30	-	-	-	-	-	-
사용 III	1.00	1.00	1.00	-	-	1.00/1.20	γ_{TG}	γ_{SD}	1.00	1.00	-	-	-	-	-
사용 IV	1.00	-	1.00	0.70	-	1.00/1.20	-	1.00	-	-	-	-	-	-	-
사용 V	1.00	-	-	-	-	0.50	-	-	-	-	-	-	-	-	-
피로 - LL, IM & CF만 고려	-	1.00	-	-	-	-	-	-	1.00	-	-	-	-	-	-

<고정하중 γ_p에 관한 하중계수>

하중의 종류	하중계수	
	최대	최소
DC : 구조부재와 비구조적 부착물	1.25 1.50(극한한계상태조합IV에서만)	0.90
DD : 말뚝부마찰력	1.80	0.45
DW : 보도부와 시설물	1.50	0.65
EH : 수평토압		
• 주동	1.50	0.90
• 정지	1.35	0.90
EV : 연직토압		
• 전체안정	1.00	-
• 옹벽 및 교대	1.35	1.00
• 강성 암거 (예, 콘크리트 박스)	1.30	0.90
• 뼈대형 강성구조물 (예, 라멘형)	1.35	0.90
• 연성 암거 (예, 파형강관)	1.95	0.90
• 박스형 연성 강재암거	1.50	0.90
ES : 상재토하중	1.50	0.75
EL : 시공중 발생하는 구속응력	1.0	1.0
PS : 프리스트레스힘		
• 세그멘탈콘크리트교량의 상부,하부구조	1.0	
• 비세그멘탈콘크리트교량 상부구조	1.0	
• 비세그멘탈콘크리트교량 하부구조		
- I_g를 사용하는 경우	1.0	
- $I_{effective}$를 사용하는 경우	0.5	
• 강재 하부구조	1.0	
CR, SH : 크리프, 건조수축		
• 세그멘탈콘크리트교량의 상부,하부구조	DC에 대한 γ_p사용	
• 비세그멘탈콘크리트교량 상부구조	1.0	
• 비세그멘탈콘크리트교량 하부구조		
- I_g를 사용하는 경우	0.5	
- $I_{effective}$를 사용하는 경우	1.0	
• 강재 하부구조	1.0	

<국내 경전철 고가구조물 설계하중조합(안) 하중기호>

기호	정의	기호	정의
DC	구조부재와 비구조적 부착물	WP	파압
DD	말뚝부마찰력	WS	구조물에 작용하는 풍하중
DW	포장과 설비의 고정하중	WL	풍하중에 의한 활하중
EH	수평토압	TU	단면평균온도
EV	연직토압	TG	온도 경사
ES	상재토하중	GD	지반변동의 영향
EL	시공중 발생하는 구속응력	SD	지점이동의 영향
PS	프리스트레스 힘	CF	원심하중
CR	크리프	SB	시제동하중
SH	건조수축	LR	종하중
LL	차량활하중	EQ	지진하중
IM	충격하중	IC	빙하중
PL	보도활하중	CT	차량 충돌하중
WA	정수압과 유수압	CV	선박 충돌하중
BP	부력 또는 양압력	DR	탈선하중

(1) 하중조합(안) 정의

한계상태설계법 기반 경량전철 고가구조물 설계기준의 한계상태별 하중조합은 아래와 같다.

① 극한한계상태 하중조합Ⅰ: 일반적인 차량통행을 고려한 기본하중조합. 이때 풍하중은 고려하지 않는다.

② 극한한계상태 하중조합Ⅱ: 발주자가 규정하는 특수차량이나 통행허가차량을 고려한 하중조합. 풍하중은 고려하지 않는다.

③ 극한한계상태 하중조합Ⅲ: 거더 높이에서의 풍속 25 m/s를 초과하는 설계. 풍하중을 고려하는 하중조합

④ 극한한계상태 하중조합Ⅳ: 활하중에 비하여 고정하중이 매우 큰 경우 적용하는 하중조합

⑤ 극한한계상태 하중조합Ⅴ: 차량 통행이 가능한 최대 풍속과 일상적인 차량통행에 의한 하중 및 궤도 구조 상호작용과 관련된 하중효과를 고려한 하중조합

⑥ 극단상황한계상태 하중조합Ⅰ: 지진하중을 고려하는 하중조합

⑦ 극단상황한계상태 하중조합Ⅱ: 빙하중, 선박 또는 차량의 충돌하중 및 감소된 활하중을 포함한 수리학적 사건에 관계된 하중조합. 이때 차량충돌하중 CT의 일부분인 활하중은 제외된다.

⑧ 극단상황한계상태 하중조합Ⅲ: 열차 탈선을 고려하는 하중조합

⑨ 사용한계상태 하중조합Ⅰ: 교량의 정상 운용 상태에서 발생 가능한 모든 하중의 표준값과 25 m/s 의 풍하중을 조합한 하중상태이며, 교량의 설계 수명 동안 발생 확률이 매우 적은 하중조합이다. 이 하중조합은 철근콘크리트의 사용성 검증에 사용할 수 있다. 또한 옹벽과 사면의 안정성 검증, 매설된 금속 구조물, 터널라이닝판과 열가소성 파이프에서의 변형제어에도 적용한다.

⑩ 사용한계상태 하중조합Ⅱ: 차량하중에 의한 강구조물의 항복과 마찰이음부의 미끄러짐에 대한 하중조합

⑪ 사용한계상태 하중조합Ⅲ: 교량의 정상 운용 상태에서 설계 수명 동안 종종 발생 가능한 하중조합이다. 이 조합은 부착된 프리스트레스 강재가 배치된 상부구조의 균열폭과 인장응력 크기를 검증하는데 사용한다.

⑫ 사용한계상태 하중조합Ⅳ: 설계수명 동안 종종 발생 가능한 하중조합으로 교량 특성상 하부구조는 연직하중보다 수평하중에 노출될 때 더 위험하기 때문에 연직 활하중 대신에 수평 풍하중을 고려한 하중조합이다. 따라서 이 조합은 부착된 프리스트레스 강재가 배치된 하부구조의 사용성 검증에 사용해야 한다. 물론 하부구조는 사용하중조합Ⅲ에서의 사용성 요구조건도 동시에 만족하도록 설계하여야 한다.

⑬ 사용한계상태 하중조합Ⅴ: 설계수명 동안 작용하는 고정하중과 수명의 약 50 %기간 동안 지속하여 작용하는 하중을 고려한 하중조합

⑭ 피로한계상태 하중조합: 반복적인 차량하중과 동적응답에 의한 피로파괴를 검토하기 위한 하중조합

(2) 하중조합(안)의 주요 특징

제안 국내 경량전철 설계기준 하중조합은 국내 철도교설계기준(한계상태설계법)(안)(2018)의 개발방법을 참고하여, 기본적인 하중구성은 국내 철도교설계기준(한계상태설계법)(안)(2018)과 동일하며, 미국 경량전철 고가구조물 기준인 AASHTO LRFD LRT 기준을 참고하여 하중조합을 제안하였다. 경량전철 고가구조물을 대상으로 제안한 하중조합을 적용하여 실제 설계를 수행하여 설계의 적합성을 검토하였다.

① 고정하중계수는 국내 철도교설계기준(한계상태설계법)(안) 및 도로교설계기준(한계상태설계법)과 동일하게, 고정하중을 종류별로 중량의 편차에 따라 구분하여, 설계도면과 비교할 때 편차의 가능성이 작은 구조부재는 DC로, 편차의 가능성이 큰 보도부 및 시설물은 DW로 나눈다. 국내

철도교설계기준 및 AASHTO LRFD LRT와 동일하게 실제 중량과 설계도면과의 편차에 따라 구조부재(DC)의 하중계수는 1.25, DW는 1.50로 제안한다.

② 활하중계수는 경량전철 노선에 미리 결정된 단일 차종의 차량만 통행하고, 화물이 아닌 승객만을 운송하고, 설계하중을 만차 하중으로 정의하므로, 경량전철차량은 도로교의 트럭이나 일반철도의 화물 운송차량보다 중량 편차가 작다. 따라서 미국 경량전철 기준인 AASHTO LRFD LRT의 활하중계수와 동일하게 1.65로 제안하였으며, 이 연구에서 국내 계측데이터에 대한 신뢰도분석을 통하여 고정하중 및 활하중 계수를 목표신뢰도지수에 대하여 검증하였다.

③ 구조물에 대한 수압 WA 및 부력 BP, 파압 WP와 풍하중 WS 및 풍하중에 의한 활하중 WL의 하중계수는 국내 철도교설계기준(한계상태설계법)(안)과 동일한 하중계수를 적용한다.

④ 활하중 계열인 원심하중 CF 및 시제동하중 SB, 종하중 LR는 국내 철도교설계기준(한계상태설계법)(안)과 동일하게 활하중과 분리하고, 각각 1.35, 1.40를 동일하게 적용한다.

⑤ 극단상황한계상태 하중조합은 기본적으로 국내 철도교설계기준(한계상태설계법)(안)(2018)과 동일하며, 미국 경량전철 기준인 AASHTO LRFD LRT를 참고하여 제안하였다. AASHTO LRFD LRT의 궤도파단하중조합을 도입하여 궤도파단하중 RB을 극단상황한계상태 IV에 추가하였다.

⑥ 사용한계상태와 피로한계상태 하중조합은 국내 철도교설계기준(한계상태설계법)(안)(2018)과 동일하다.

마. 기존 설계법과의 설계 비교・분석 (상세: 부록1 참조)

가. 비교대상 설계기준

기존 설계법과 신규제안 설계법을 적용한 경전철 고가구조물의 설계 비교・분석을 위해 적용한 국내외 기존 설계법은 아래와 같으며, 신규 제안한 동일한 설계하중 조건에서 기존 국내외 한계상태설계법(①~④)과의 설계비교를 수행하여 적정성을 검증하였고, 기존 결정론적 설계법(강도설계법, 허용응력설계법)과의 설계비교를 통해 신규 제안한 설계기준이 단면설계에 미치는 영향 분석을 통해 그 효율성을 검증하였다.

① 국내 도로교 설계기준(한계상태설계법)

② 국내 철도교 설계기준(한계상태설계법)

③ AASHTO LRT 설계기준(미국 LRFD)

④ Eurocode (유럽 LSD)

⑤ 기존 결정론적 설계법(강도설계법, 허용응력설계법)

나. 대상 경전철 차종 및 교량 구조형식

국토부 고시 5개 경전철 차종(일반고무차륜형, 일반철제차륜형, 선형유도전동기형, 모노레일형, 자기부상형)을 대상으로 하였으며, 차종별 적용 차량은 아래와 같다. 비교 설계대상 교량형식은 일반적으로 경전철 고가구조물에 적용되는 PSC 거더교(경간장: 30m) 및 강박스 거더교(경간장: 40m)를 대상으로 하였다. 모노레일형 및 자기부상형 경전철은 일반적으로 궤도빔 거더를 사용하나, 본 연구에서는 상대 비교를 위해 모노레일형 및 자기부상형 경전철의 하중 특성을 고려하되 동일한 PSC 거더교 및 강박스 거더교 형식으로 설계 비교하였다.

구분	대상 차량
일반고무차륜형	부산4호선(K-AGT)
일반철제차륜형	부산김해경전철
선형유도전동기형	용인경전철
모노레일형	대구3호선
자기부상형	인천공항 자기부상철도

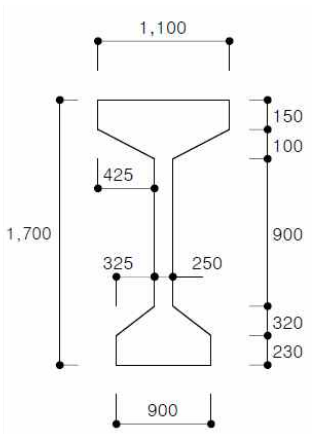
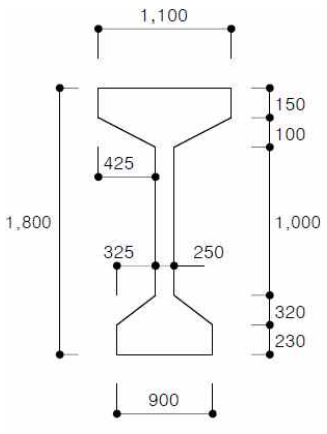
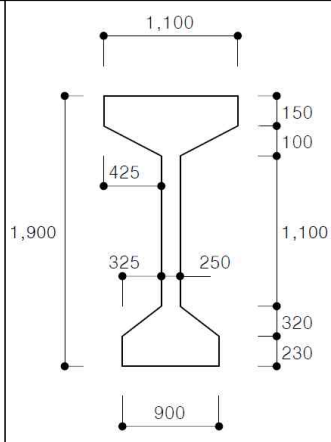
다. 기존 국내외 한계상태설계법과의 설계 비교・분석

동일한 조건에서 국내외 한계상태설계법과의 설계비교를 위하여, 설계하중 기준은 제안한 경전철 고가구조물 설계하중 기준(안)을 동일하게 적용하였다.

(1) PSC 거더교 설계 결과 (경간장: 30m)

① 설계단면 비교

<국내외 한계상태설계기준별 설계단면 비교>

구분	TYPE-1 (H=1.7m)	TYPE-2 (H=1.8m)	TYPE-3 (H=1.9m)
설계단면 Type	 거더 높이 : 1.70m 단면적 : 0.85㎡	 거더 높이 : 1.80m 단면적 : 0.87㎡	 거더 높이 : 1.90m 단면적 : 0.90㎡
경전철 고가구조물 설계기준 (한계상태설계법)	일반 고무차륜형 자기부상형 모노레일형	일반 철제차륜형 선형유도전기형	-
도로교설계기준 (한계상태설계법)	일반 고무차륜형 자기부상형 모노레일형	일반 철제차륜형 선형유도전기형	-
철도교설계기준 (한계상태설계법)	일반 고무차륜형 자기부상형 모노레일형	일반 철제차륜형 선형유도전기형	-
미국 AASHTO LRT (LRFD)	일반 고무차륜형 자기부상형 모노레일형	일반 철제차륜형 선형유도전기형	-
유럽 Eurocode (LSD)	일반 고무차륜형 자기부상형 모노레일형	-	일반 철제차륜형 선형유도전기형

② 강도 검토 비교

<강도 검토에 따른 안전율 비교>

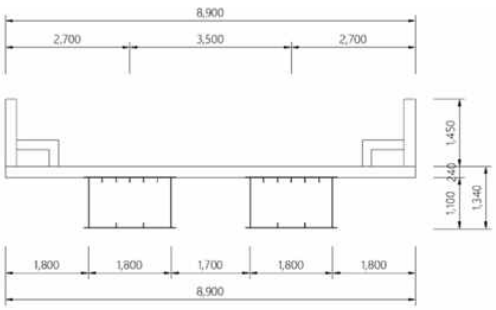
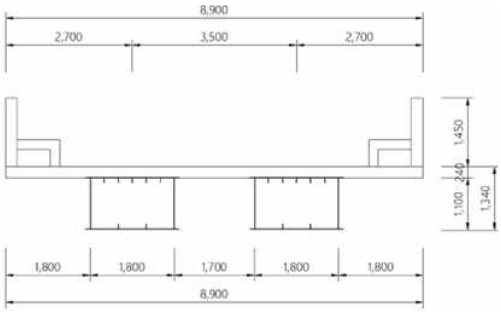
구 분	설계기준	Mu(kN.m)	ΦMn(kN.m)	안전율	단면높이(m)
고무차륜형	국내 도로교	8130.0	9240.6	1.14	H=1.70m
	국내 철도교	8184.0	9240.6	1.13	H=1.70m
	국외 LRFD	7968.0	9240.6	1.16	H=1.70m
	국외 LSD	8060.2	9240.6	1.15	H=1.70m
	신규 제안	7968.0	9240.6	1.16	H=1.70m

선형유도 전동기형	국내 도로교	9362.6	9773.1	1.04	H=1.80m
	국내 철도교	9434.8	9773.1	1.04	H=1.80m
	국외 LRFD	9146.3	9773.1	1.07	H=1.80m
	국외 LSD	9265.8	10305.6	1.11	H=1.90m
	신규 제안	9146.3	9773.1	1.07	H=1.80m
철제차륜형	국내 도로교	9440.0	9773.1	1.04	H=1.80m
	국내 철도교	9514.2	9773.1	1.03	H=1.80m
	국외 LRFD	9217.2	9773.1	1.06	H=1.80m
	국외 LSD	9330.3	10305.6	1.10	H=1.90m
	신규 제안	9217.2	9773.1	1.06	H=1.80m
자기부상형	국내 도로교	8495.4	9240.6	1.09	H=1.70m
	국내 철도교	8559.6	9240.6	1.08	H=1.70m
	국외 LRFD	8303.0	9240.6	1.11	H=1.70m
	국외 LSD	8364.7	9240.6	1.10	H=1.70m
	신규 제안	8303.0	9240.6	1.11	H=1.70m
모노레일형	국내 도로교	8422.4	9240.6	1.10	H=1.70m
	국내 철도교	8484.5	9240.6	1.09	H=1.70m
	국외 LRFD	8236.1	9240.6	1.12	H=1.70m
	국외 LSD	8303.8	9240.6	1.11	H=1.70m
	신규 제안	8236.1	9240.6	1.12	H=1.70m

(2) 강박스 거더교 설계 결과 (경간장: 40m)

① 설계단면 비교

<국내외 한계상태설계기준별 설계단면 비교>

구분	TYPE-1	TYPE-2
설계단면 Type	 거 더 간 격 : 3.500 m 교 량 폭 원 : B = 8.90m 바닥판 두께 : 0.240 m 캔틸레버 길이 : 1.800 m (G1) : 1.800 m (G2) 상하판/웹 두께 : 12.0mm	 거 더 간 격 : 3.500 m 교 량 폭 원 : B = 8.90m 바닥판 두께 : 0.240 m 캔틸레버 길이 : 1.800 m (G1) : 1.800 m (G2) 상하판/웹 두께 : 14.0mm
경전철 고가구조물 설계기준 (한계상태설계법)	일반 고무차륜형 자기부상형 모노레일형	일반 철제차륜형 선형유도전기형
도로교설계기준 (한계상태설계법)	일반 고무차륜형 자기부상형 모노레일형	일반 철제차륜형 선형유도전기형

철도교설계기준 (한계상태설계법)	일반 고무차륜형 자기부상형 모노레일형	일반 철제차륜형 선형유도전기형
미국 AASHTO LRT (LRFD)	일반 고무차륜형 자기부상형 모노레일형	일반 철제차륜형 선형유도전기형
유럽 Eurocode (LSD)	일반 고무차륜형 자기부상형 모노레일형	일반 철제차륜형 선형유도전기형

② 응력 검토 비교

<응력 검토에 따른 안전율 비교>

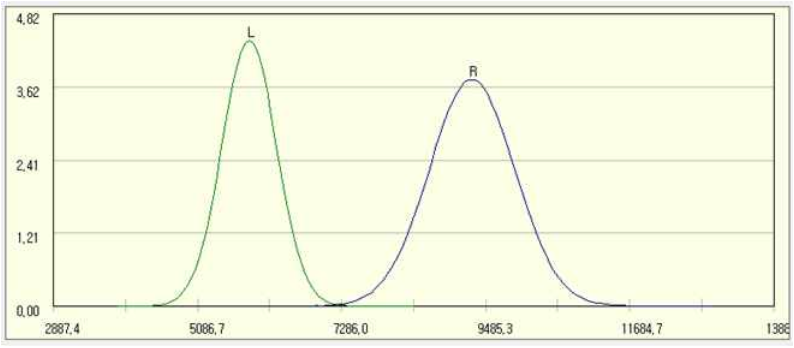
구분	설계기준	작용응력(MPa)	응력한계(MPa)	안전율	비 고
고무차륜형	국내 도로교	350.7	380.0	1.08	하연응력
	국내 철도교	352.3	380.0	1.08	
	국외 LRFD	345.8	380.0	1.10	
	국외 LSD	360.3	380.0	1.05	
	신규 제안	345.8	380.0	1.10	
선형유도 전동기형	국내 도로교	336.6	380.0	1.13	하연응력
	국내 철도교	338.6	380.0	1.12	
	국외 LRFD	330.7	380.0	1.15	
	국외 LSD	346.8	380.0	1.10	
	신규 제안	330.7	380.0	1.15	
철제차륜형	국내 도로교	339.7	380.0	1.12	하연응력
	국내 철도교	341.7	380.0	1.11	
	국외 LRFD	333.5	380.0	1.14	
	국외 LSD	349.2	380.0	1.09	
	신규 제안	333.5	380.0	1.14	
자기부상형	국내 도로교	357.9	380.0	1.06	하연응력
	국내 철도교	359.7	380.0	1.06	
	국외 LRFD	352.5	380.0	1.08	
	국외 LSD	368.1	380.0	1.03	
	신규 제안	352.5	380.0	1.08	
모노레일형	국내 도로교	353.4	380.0	1.08	하연응력
	국내 철도교	355.1	380.0	1.07	
	국외 LRFD	348.4	380.0	1.08	
	국외 LSD	363.1	380.0	1.05	
	신규 제안	348.4	380.0	1.08	

(3) 신뢰도지수 검토

① PSC 거더 (30m)

- 신규제안설계법 적용 설계단면의 파괴확률 및 신뢰도 지수

파괴확률(Pf) = 4.00e-6, 신뢰도지수(β) = 4.47



<K-AGT차량)

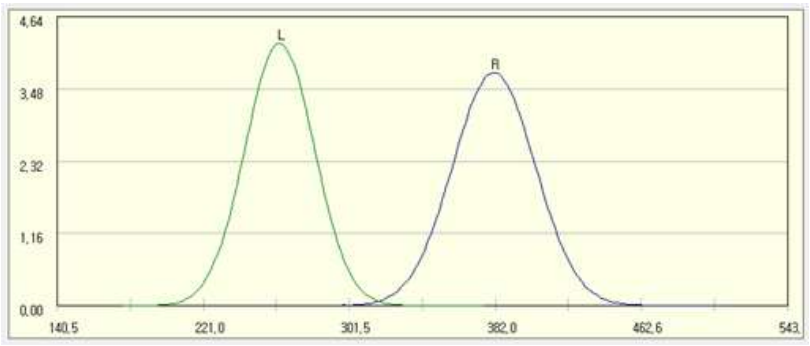
구 분	파괴확률	신뢰도지수
K-AGT(고무차륜형)	4.00e-6	4.47
김해경전철(철제차륜형)	9.10e-5	3.74
용인경전철(철제차륜형)	8.80e-5	3.75
모노레일	1.92e-5	4.12
자기부상열차	2.50e-5	4.05

신규제안 설계법을 적용한 PSC거더(30m) 단면의 설계차종별 신뢰도 지수는 3.74~4.47로 나타났으며, 목표신뢰도 지수 3.7 이상을 만족하는 것으로 검토되었다.

② ST. BOX 거더 (40m)

- 신규제안설계법 적용 설계단면의 파괴확률 및 신뢰도 지수

파괴확률(Pf) = 3.80e-5, 신뢰도지수(β) = 3.96



<K-AGT차량)

구 분	파괴확률	신뢰도지수
K-AGT(고무차륜형)	3.80e-5	3.96
김해경전철(철제차륜형)	6.00e-6	4.38
용인경전철(철제차륜형)	3.00e-6	4.53
모노레일	4.70e-5	3.91
자기부상열차	8.60e-5	3.76

신규제안 설계법을 적용한 ST. BOX거더(40m) 단면의 설계차종별 신뢰도 지수는 3.76~4.53으로 나타났으며, 목표신뢰도 지수 3.7 이상을 만족하는 것으로 검토되었다.

(4) 소결

신규 제안한 경전철 고가구조물 설계기준(한계상태설계법)은 기존 국내외 한계상태설계과 동일한 수준의 파괴확률(10^{-4})을 갖도록 목표신뢰도지수(3.7)를 설정하였고, 기존 국내 한계상태설

계법과의 하중조합 및 하중계수의 가장 큰 차이는 극한한계상태-Ⅰ에서 활하중에 대한 하중계수가 도로교 설계기준 대비 1.80에서 1.65로, 철도교 설계기준 대비 1.85에서 1.65로 감소한 부분인데, 하중계수 변화 크기가 작고 경전철 특성상 전체하중에서 활하중이 차지하는 비율이 작은 관계로, 기존 국내외 한계상태설계법과의 강도 검토(PSC거더교) 및 응력 검토(강박스 거더교) 결과 설계 안전율은 미미하나 신규제안 한계상태설계법이 다소 안전측으로 나타났고, 유럽 Eurocdoe (LSD) 제외한 모든 설계기준별 설계결과 차종별 동일한 단면으로 설계되었다. 유럽 Eurocdoe(LSD) 설계기준 적용시에는 고정하중에 대한 하중계수가 타 설계기준에 비해 크고 전체하중에서 고정하중이 차지하는 부분이 상당이 큰 경전철 교량 특성으로, PSC 거더의 경우 철제차륜형(용인경전철, 김해경전철)에서 단면이 상대적으로 큰 것으로 나타났다.

이상에서와 같이, 설계하중 기준을 동일하게 적용하는 경우 신규 제안 한계상태설계법과 기존 국내외 한계상태설계법에 따른 단면 설계 비교시 유사한 설계결과가 나와, 본 신규 제안한 경전철 고가구조물 설계기준(한계상태설계법)이 적정하고 합리적인 설계기준이라 판단된다.

신규 제안한 경전철 고가구조물 설계기준(한계상태설계법)을 적용한 PSC 거더교(경간장: 30m) 및 강박스 거더교(경간장: 40m)의 신뢰도지수는 차종에 따라 각각 4.05~4.47, 3.76~4.53으로 목표신뢰도 지수 3.7을 모두 만족하는 것으로 나타났다.

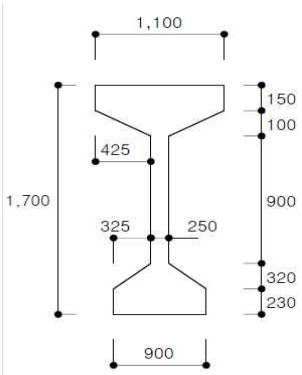
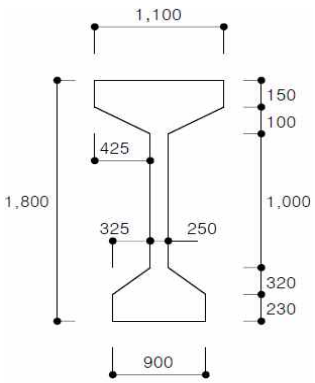
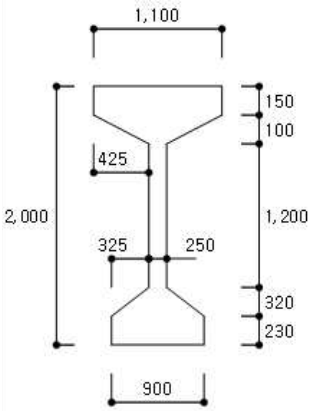
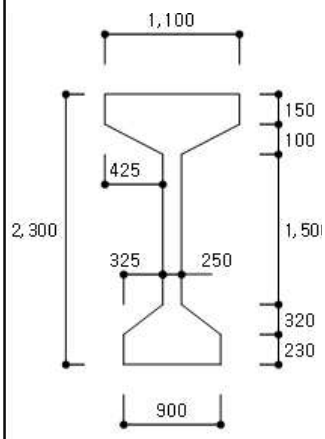
라. 기존 결정론적 설계법과의 설계 비교・분석

기존 결정론적 설계법(강도설계법, 허용응력설계법)과의 설계비교를 통해 신규 제안한 설계하중 기준이 단면 설계에 미치는 영향을 분석하였다.

(1) PSC 거더교 설계 결과 (경간장: 30m)

① 설계단면 비교

<기존 결정론적설계법과의 설계단면 비교>

경전철 고가구조물 설계기준 (한계상태설계법)		기존 결정론적 설계법 (강도설계법)	
TYPE-1 (H=1.7m)	TYPE-2 (H=1.8m)	TYPE-3 (H=2.0m)	TYPE-4 (H=2.3m)
			
거더 높이 : 1.70m 단면적 : 0.85㎡	거더 높이 : 1.80m 단면적 : 0.87㎡	거더 높이 : 2.0m 단면적 : 0.92㎡	거더 높이 : 2.30m 단면적 : 0.99㎡
일반 고무차륜형 자기부상형 모노레일형	일반 철제차륜형 선형유도전기형	일반 고무차륜형 자기부상형 모노레일형	일반 철제차륜형 선형유도전기형

구 분	거더높이(m)		단면적(㎡)		단면적비	
	기존 결정론적 설계법	신규제안 설계법	기존 결정론적 설계법	신규제안 설계법	기존 결정론적 설계법	신규제안 설계법
고무차륜형 모노레일형 자기부상형	2.0	1.7	0.92	0.85	1.00	0.92
선형유도전동기형 철제차륜형	2.3	1.8	0.99	0.87	1.00	0.88

② 강도 검토 비교

신규제안 한계상태설계법과 기존결정론적 설계법(허용응력설계법, 강도설계법)을 적용하여 강도 검토에서 동등한 수준의 안전율을 확보하여 설계한 결과, 기존 결정론적 설계법 대비 신규제안 설계기준이 보다 경제적이고 효율적인 설계가 가능한 것을 알 수 있다.

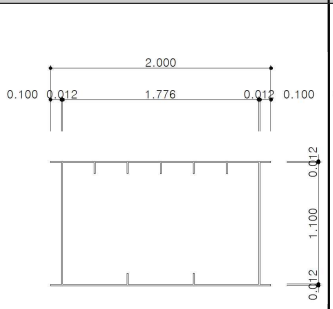
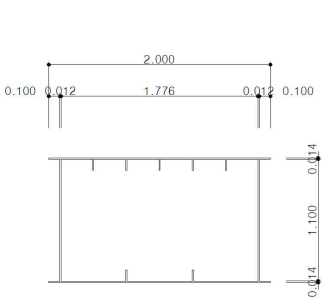
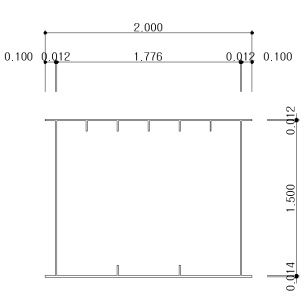
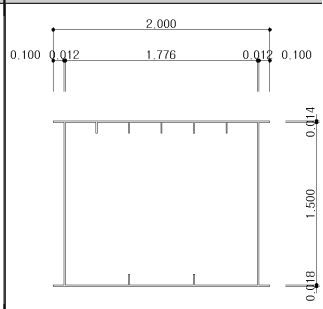
<강도 검토에 따른 안전율 비교>

구 분	신규제안설계법			기존결정론적 설계법		
	Mu (kN.m)	Mr (kN.m)	안전율	Mu (kN.m)	ΦMn (kN.m)	안전율
고무차륜형	7968.0	9240.6	1.16	10,735.00	11,987.87	1.12
선형유도전동기형	9146.3	9773.1	1.07	12,696.00	13,798.62	1.09
철제차륜형	9217.2	9773.1	1.06	12,798.00	13,798.62	1.08
자기부상형	8303.0	9240.6	1.11	10,891.00	11,987.87	1.10
모노레일형	8236.1	9240.6	1.12	11,111.00	11,987.87	1.08

(2) 강박스 거더교 설계 결과 (경간장: 40m)

① 설계단면 비교

<기존 결정론적설계법과의 설계단면 비교>

경전철 고가구조물 설계기준 (한계상태설계법)		기존 결정론적 설계법 (강도설계법)	
TYPE-1	TYPE-2	TYPE-3 (H=2.0m)	TYPE-4 (H=2.3m)
			
박스 형고: 1,100mm 상하판/웹 두께: 12.0mm 단면적 : 0.081㎡	박스 형고: 1,100mm 상하판/웹 두께: 14.0mm 단면적 : 0.094㎡	박스 형고: 1,500mm 상하판/웹 두께: 12.0mm 단면적 : 0.095㎡	박스 형고: 1,500mm 상하판/웹 두께: 14.0mm 단면적 : 0.107㎡
거더 높이 : 1.70m 단면적 : 0.85㎡	거더 높이 : 1.80m 단면적 : 0.87㎡	거더 높이 : 2.0m 단면적 : 0.92㎡	거더 높이 : 2.30m 단면적 : 0.99㎡
일반 고무차륜형 자기부상형 모노레일형	일반 철제차륜형 선형유도전기형	일반 고무차륜형 자기부상형 모노레일형	일반 철제차륜형 선형유도전기형

구 분	거더높이(m)		단면적(㎡)		단면적비	
	기존 결정론적 설계법	신규제안 설계법	기존 결정론적 설계법	신규제안 설계법	기존 결정론적 설계법	신규제안 설계법
고무차륜형 모노레일형 자기부상형	1.5	1.1	0.095	0.081	1.00	0.85
선형유도전동기형 철제차륜형	1.5	1.1	0.107	0.094	1.00	0.88

② 응력 검토 비교

신규제안 한계상태설계법과 기존결정론적 설계법(허용응력설계법, 강도설계법)을 적용하여 응력 검토에서 동등한 수준의 안전율을 확보하여 설계한 결과, 기존 결정론적 설계법 대비 신규제안 설계기준이 보다 경제적이고 효율적인 설계가 가능한 것을 알 수 있다.

<응력 검토에 따른 안전율 비교>

구 분	신규제안설계법			기존결정론적 설계법		
	작용응력 (MPa)	응력한계 (MPa)	안전율	작용응력 (MPa)	허용응력 (MPa)	안전율
고무차륜형	345.8	380.0	1.10	171.4	190.0	1.11
선형유도전동기형	330.7	380.0	1.15	170.5	190.0	1.11
철제차륜형	333.5	380.0	1.14	172.0	190.0	1.10
자기부상형	352.5	380.0	1.08	173.5	190.0	1.09
모노레일형	348.4	380.0	1.08	173.3	190.0	1.10

(3) 소결

PSC 거더교(경간: 30m)와 강박스 거더교(경간: 40m)에 대해 5개 경전철 차종(고무차륜형, 철제차륜형, 선형유도전동기형, 모노레일형, 자기부상형)별 신규 제안한 경전철 고가구조물 설계기준(한계상태설계법) 및 기존 결정론적 설계법(허용응력설계법, 강도설계법)을 적용한 설계 결과를 검토하여 기존 설계법 대비 신규 제안 한계상태설계법의 효율성 및 경제성을 검토하였다.

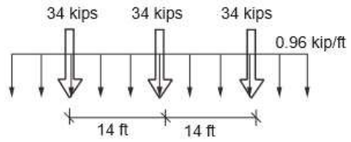
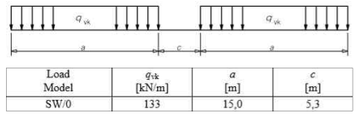
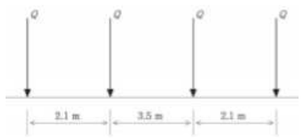
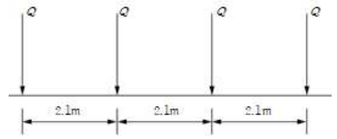
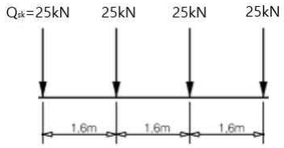
PSC 거더교는 극한모멘트의 설계안전율을 동일 수준으로 하여 최적단면을 선정하였으며, 강박스 거더교는 휨응력의 설계안전율을 동일 수준으로 하여 최적단면을 선정하고 그 결과를 비교 검토하였다.

신규 제안 한계상태설계법을 적용하여 최적 단면을 설계한 결과, PSC거더교의 경우 기존 결정론적 설계법 대비 형고는 0.3~0.5m 감소, 단면적은 8~12% 감소가 가능하였고, 강박스 거더교의 경우 기존 결정론적 설계법 대비 형고는 0.5m 감소, 단면적은 12~15% 감소하는 등 신규 제안한 경전철 고가구조물 설계기준(한계상태설계법)이 보다 경제적이고 효율적인 설계가 가능한 것으로 검토되었다.

바. 한계상태설계법 기반 경전철 고가구조물 설계기준(안): 부록 참조

경전철 고가구조물 설계기준(한계상태설계법)(안)에 대하여 국내・외 주요 교량설계기준(한계상태설계법)과의 비교대비표를 아래 표에 정리하였고, 전체 설계기준(안)은 부록에 수록하였다.

<국내・외 주요 교량설계기준(한계상태설계법) 비교대비표>

구분	경전철 고가구조물 설계기준 (한계상태설계법, 안)	철도교 설계기준 (2013)	철도교 설계기준 (한계상태설계법, 안)	도로교 설계기준 (한계상태설계법)	미국, AASHTO LRT	유럽, Eurocode
고정하중	고정하중 추가: 주행로(콘크리트, 강재), 제3궤조, 안내궤조, 선형유도전동기 장치	-	-	-	-	-
열차활하중	해당 노선 경전철 차량의 만차하중	전동차 전용선: EL-18 표준열차하중	전동차 전용선: EL-18 표준열차하중	표준트럭하중 표준차로하중	LRT-16 표준열차하중 	Load Model SW/0  Load Model / q_{vk} [kN/m] / a [m] / c [m] SW/0 / 133 / 15,0 / 5,3
보도하중 (주 거더)	별도 보도하중 배제	2kN/m^2	2kN/m^2	3.0~3.5kN/m^2	0.075 kips/ft^2	5kN/m^2
횡하중	축중의 20% (하나의 대차와 연결된 차축에만 작용, 레일 혹은 안내레일 높이에 작용)	EL하중 축중의 20% (레일 높이에 작용) 	EL하중 축중의 20% (레일 높이에 작용) 	-	-	Load Model 71 축중의 10% 
충격하중	$I_m = \frac{1.44}{\sqrt{L_e} - 0.2} - 0.18$ (L_e: 연속교 영향 배제) 단, 모노레일형 경전철인 경우 (충격완화 신축이음부를 사용하지 않은 경우), $I_m = \frac{2.16}{\sqrt{L_e} - 0.2} - 0.27$	$I_m = \frac{1.44}{\sqrt{L_e} - 0.2} - 0.18$ (L_e: 연속교 영향 고려)	$I_m = \frac{1.44}{\sqrt{L_e} - 0.2} - 0.18$ (L_e: 연속교 영향 고려)	표준트럭하중의 25% (피로한계상태의 경우 15%)	LRT-16 하중의 30%	For carefully maintained track, $I_m = \frac{1.44}{\sqrt{L_e} - 0.2} - 0.18$ (L_e: 연속교 영향 고려) For track with standard maintance, $I_m = \frac{2.16}{\sqrt{L_e} - 0.2} - 0.27$ (L_e: 연속교 영향 고려)
시제동하중	차량하중의 15% (단선재하)	시동하중 : (0.27+0.95×L/Lv)×T 제동하중 : (0.27+1.00×L/Lv)×T (복선재하: 시동+제동) 여기서, Lv: 1차량길이, L: 부재에 최대영향을 주는 하중재하 길이 T: EL 표준열차하중의 축중	시동하중 : (0.27+0.95×L/Lv)×T 제동하중 : (0.27+1.00×L/Lv)×T (복선재하: 시동+제동) 여기서, Lv: 1차량길이, L: 부재에 최대영향을 주는 하중재하 길이 T: EL 표준열차하중의 축중	제동하중: 표준트럭하중의 10%	제동하중: 경전철 설계 집중하중의 28%	시동하중: 33kN/m(SW0하중의 25%) 제동하중: 20kN/m(SW0하중의 15%)
탈선하중	별도의 안내궤조를 갖는 경전철의 경우 탈선하중 배제	-	-	-	-	-
연직처짐	L/500 (동적처짐) 단, 자기부상 경전철인 경우, L/1300 (동적처짐)	경간장별, 열차속도별, $\frac{L}{600} \sim \frac{L}{2500}$	경간장별, 열차속도별, $\frac{L}{600} \sim \frac{L}{2500}$	경간장별, 열차속도별, $\frac{L}{600} \sim \frac{L}{2500}$	경간장별, 열차속도별, $\frac{L}{600} \sim \frac{L}{3500}$	경간장별, 열차속도별, $\frac{L}{600} \sim \frac{L}{2600}$
활하중계수	1.65	-	1.85	1.80	1.65	1.45

2절. 도시친화형 신형식 경전철 고가구조물 설계기술

1. 도시친화형 경전철 고가구조물 개념

가. 기존 경전철 고가구조물의 문제점 분석(As-Is)

국내 기존 경전철 고가구조물은 철도교 형식의 고가구조물로 시공되어 있으며, 아래 그림에 대표적인 경전철 고가구조물 사진과 함께 기존 경전철 고가구조물이 가지고 있는 문제점을 표현하였다.

먼저, 기존 철도교 형식의 육중하고 밀폐된 상부 및 하부구조물에 의해 시민들에게 답답한 시야를 제공하고 도시미관을 해칠 뿐만 아니라 도시단절의 문제를 야기하고 있다. 또한, 하부교각구조가 30~40m 간격으로 도로 혹은 하천을 따라 빼곡히 도심지에 들어서 있어 도심지 심미성을 해치고, 2차로 이상의 상부도로 차선 잠식으로 인해 도로교통 혼잡이 가중되고 있는 실정이다. 그렇다고, 현재 기존 철도교 형식의 상부구조를 장경간화 하기에는 현재의 상·하부구조가 더 육중해지고 경제성 측면에서도 불리하여 앞서 언급한 문제점이 더욱 악화될 뿐으로 불가한 상황이다. 한편, 기존의 경간이 짧은 철도교 형식의 고가구조물은 하부 교각 위치 문제로 도로 혹은 하천을 따라 시공될 수 밖에 없어 곡선부 시공이 불가피하므로 열차운행 효율이 그만큼 저하될 수밖에 없으며, 결국 시·종점간 총연장의 증가로 경제성 측면에서도 불리하다. 특히, 기존 철도교 형식의 경전철 고가구조물은 상부가 개방된 구조로서, 눈·비·바람에 그대로 노출되어 있어 폭설 시 급전 장애로 인한 잦은 열차운행 정지 문제, 폭설·강우 시 노면의 미끄럼 문제, 인접지역 소음 문제 등에 그대로 노출되어 있다.

이렇듯, 기존의 철도교 형식의 경전철 고가구조물로 인한 도시미관 훼손 및 도시단절 문제, 상부도로교통혼잡 가중 문제, 폭설 시 잦은 열차운행 중단 문제, 인접지역 소음 문제 등으로 인한 피해는 고스란히 시민들에게 전가되고 있다. 이로 인한 시민들의 고가건설 반대에 이은 지하건설 추진으로 인해, 현장 여건상 충분히 고가건설이 가능함에도 고가건설 대비 사업비가 2배 이상 소요되는 지하건설로 인해 국가적으로도 재정적 부담이 가중되고 있는 실정이다.



<기존 경전철 고가구조물의 주요 문제점>

나. 도시친화형 경전철 고가구조물 개념(To-Be)

도시친화형 경전철 고가구조물은 앞서 언급한 기존 경전철 고가구조물이 가지고 있는 문제점을 근복적으로 해결 가능하고, 최대한의 하부구조를 제거하고 심미적인 개방형 구조의 도시조형물 같은 상부구조 형식을 도입하여 도시미관 및 경관성을 극대화하도록 그 기본 개념을 잡았으며, 아래 그림에 도시친화형 신형식 경전철 고가구조물에 대한 개념도와 함께 주요 핵심기술 및 특장점을 나타내었다.

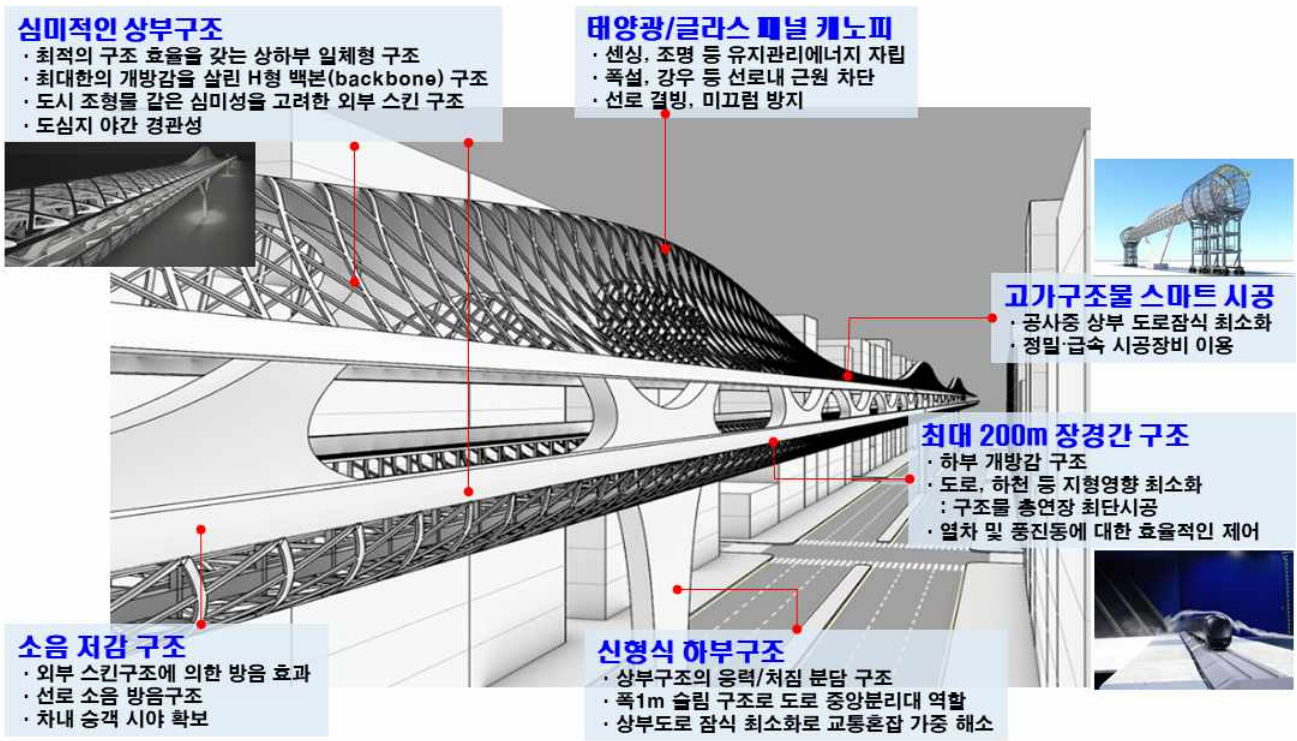
도시친화형 신형식 경전철 고가구조물은 강박스형, PC박스형, 거더교 등 기존 철도교 형식을 탈

피하여 상부 중앙 백본(backbone) 구조를 갖는 상・하부 일체형의 신형식 구조를 메인 구조로 하여 최적의 구조효율을 갖도록 하고, 도시조형물 같은 심미성을 고려하여 메시형(mesh) 혹은 십자형(crisscross) 등의 외부 아웃리거 스킨 구조가 중앙 백본 구조를 미학적으로 감싸면서 구조적으로는 부부재 역할을 하는 세계 최초의 신형식 구조이다. 또한, 고무차륜형 경전철시스템을 기준으로 최장 경간 200m를 갖는 장경간 상부구조를 도입함으로써 고가 하부 개방감을 극대화하고, 하부 교각 위치로 인해 곡선 선형 시공될 수밖에 없었던 도로 혹은 하천 등의 지형 영향을 최소화하여 시・종점간 전체 구조물 연장을 최단 시공이 가능케 하여 열차운행 효율을 높이고 사업비 절감에 따른 경제성 제고가 가능하다.

한편, 도시친화형 신형식 경전철 고가구조물의 핵심기술 중 하나로서, 기존의 하부구조가 상부구조를 떠받치는 구조 역할만 하던 것에서 상부구조물의 응력 및 처짐 분담이 가능하도록, 상・하부 일체형의 신형식 하부구조를 도입하였다. 지점부에서의 하부구조가 일반적인 상부구조의 백본 상면까지 연장되고 주탑 역할을 하도록, 하부구조의 지점부가 일반 중앙부에 비해 높게 돌출되어 있으면서 미학적으로 유선형을 가지도록 설계되며, 중앙부에 비해 높게 돌출된 지점부가 필요에 따라 주탑 역할을 하여 하부구조 상면에 연결된 강선 혹은 케이블이 상부구조물의 응력 및 처짐을 추가적으로 제어케 할 수도 있다. 그러면서도 하부구조의 폭은 최대 1.5m 이내의 슬림한 구조를 채택하여, 도로 중앙분리대 역할을 하면서 기존 상부도로 차선 잠식이 없거나 최소화함으로써 도로교통혼잡 가중 문제 해소를 가능케 한다.

이렇듯, 신형식 경전철 고가구조물은 최대한의 하부구조를 제거하고 심미적인 개방형 구조의 도시조형물 같은 상부구조 형식을 도입하여, 도시미관 및 경관성을 극대화하였다. 아울러, 승객의 안전을 고려하여 비상대피로를 가지며, 강설 등 악천후 시에도 열차운행사고가 발생치 않도록 상부 아웃리거 구조로 되어있다.

기존 철도교 형식의 경전철 고가구조물의 상부가 노출된 구조인 반면, 도시친화형 신형식 경전철 고가구조물은 상부 중앙 백본(backbone) 구조의 상면에 연결된 미학적인 외부 아웃리거 스킨 구조가 캐노피 역할을 하여 눈・비・바람으로터 직접적인 영향을 받지 않도록 하여 기존 폭설시 열차운행 정지 및 선로 미끄럼 문제 등을 근원적으로 해결하였으며, 외부 스킨에 부분적으로 태양광 글라스 패널 적용도 가능하여 유지관리용 센싱전원 및 야간 경관조명 등의 에너지원으로 활용이 가능하다. 또한, 소음 측면에서도 상부 중앙 백본(backbone) 구조의 상・하면에 연결된 외부 스킨 구조로 인해 1차 방음 효과가 있으며, 하면의 외부 스킨 구조에 필요시 별도의 방음 패널 적용도 가능하여 선로에서의 2차 소음 차단 뿐만 아니라 낙하 방지가 가능한 친환경적인 구조이다.



<도시친화형 신형식 경전철 고가구조물 개념도>

상부 중앙 백본(backbone) 구조를 갖는 신형식 경전철 고가구조물의 특징 중 하나로서, 차량 승객의 눈높이에 맞춰 개방된 구조로 되어 있어 차내 승객의 시야를 확보한 점인데, 이는 기존 경전철 고가구조물에서의 승객이 완전히 개방된 시야를 가지기 때문에, 신형식 고가구조물도 동일한 승객의 시야 확보가 가능하다.

세계 최초의 구조형식으로서, 고무차륜형 경전철시스템을 기준으로 최장경간 200m의 신형식 경전철 고가구조물인 만큼, 강선・케이블 등의 주요 핵심 부재에 대한 상시 상태 감시가 가능하도록 핵심 부재내 센서가 내장되어 있으며, 태양광 혹은 열차주행시 차량으로부터의 무선급전 방식의 첨단 센싱 기술을 통해 실시간으로 이상 징후를 체크하여 구조물의 안전성이 확보된다.

특히, 복잡한 도심지내 고가구조물 시공 측면에서도 기존 고가구조물 시공시 몇 개 차로의 교통차단과 함께 수년 간에 걸친 장기 공사로 인해 공사중 상부도로교통 혼잡이 가중되던 문제를 해소 가능하도록, 상부 및 하부구조물을 요소부재 혹은 세그먼트 단위로 사전에 공장 제작하고 현장에서 모듈 단위로 조립한 후, 소형 가설 특수장비를 이용하여 차로 차단을 최소화하여 단기간에 급속・정밀 가설 시공된다.

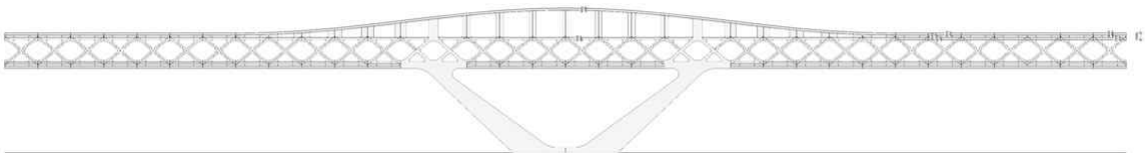
2. 도시친화형 신형식 경전철 고가구조 개발

가. 신형식 경전철 고가구조물

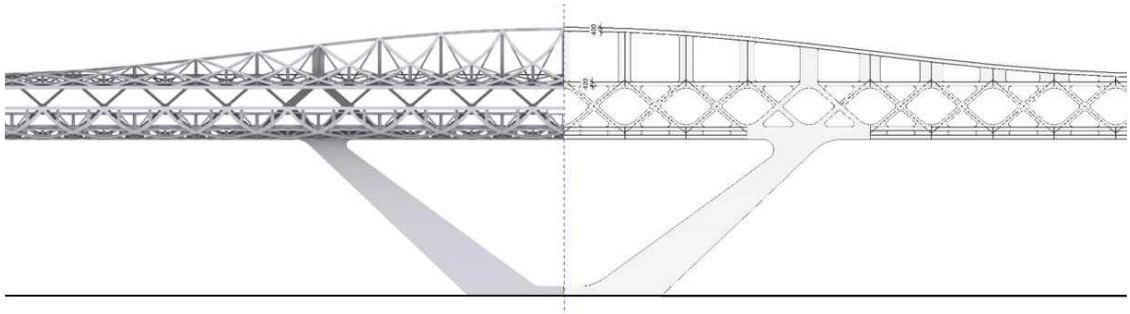
(1) 백본-아웃리거 신형식 구조

도심지 세계 최장경간(200m)의 신형식 구조를 갖는 신형식 경전철 고가구조물을 구현하기 위해, 아래 그림에서와 같은 일종의 거더 역할을 하는 상부 중앙에 백본(backbone) 구조를 갖는 상・하부 일체형의 신형식 구조를 메인 구조로 하여 최적의 구조효율을 갖도록 하였으며, 하부구조와 일체로 연결된 중앙 백본 부재가 전체 구조계의 53~65% 이상을 지지하도록 하였다. 그리고, 도시조형물 같은 심미성을 고려하여 메시형(mesh) 혹은 십자형(crisscross) 등의 외부 아웃리거 스킨 구조가 중앙 백본 구조를 미학적으로 감싸면서 구조적으로는 부부재 역할을 하도록 하였으며, 이 아웃리거 부재가 전체 구조계의 33~35%를 지지하도록 하였다. 또한, 하부구조가 상부 백본 구조의 상면까지 연장되어 주탑 역할도 가능하여 필요시 이 부분에 연결된 강선 혹은 케이블이 상부구조물의 응력 및 처짐을 추가적으로 제어케 하여 전체 구조계의 최대 14%를 지지하여 구조물의 안전성을 극대화하도록 하였다.

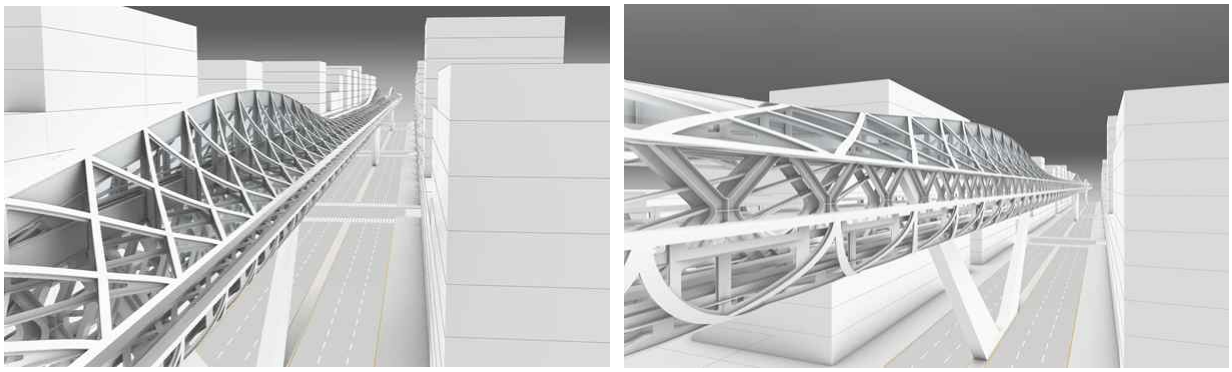
상기와 같이 상・하부 일체형의 구조를 가지며, 백본 및 아웃리거의 신형식 구조 및 내부 케이블(강선) 지지와 함께 기존 강박스형 거더교 대비 강중 20% 이상 경량화를 통해 최대 200m 장경간화 구현이 가능하도록 하였다. 신형식 경전철 고가구조물은 현재 국내 철도교 설계기준을 만족하도록 설계 검증을 수행하였다.



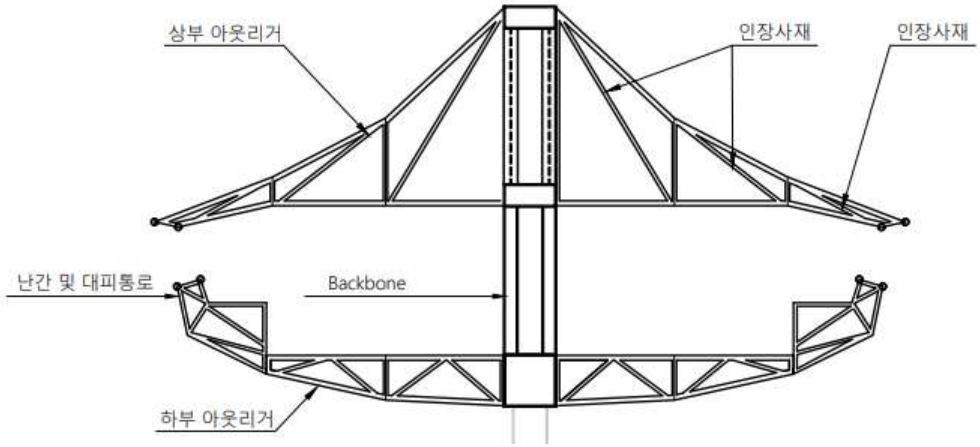
<신형식 고가구조물의 백본 구조>



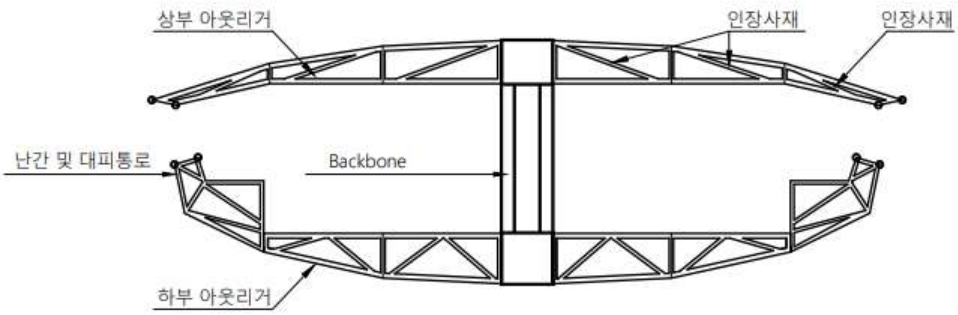
<신형식 고가구조물의 아웃리거 구조>



〈백본-아웃리거 신형식 구조〉



(a) 지점부



(b) 경간 중앙부

〈상하부 아웃리거 부재 구성도〉

상기 그림에서와 같이, 백본 및 아웃리거 구조는 상부 중앙에 위치하는 백본 구조를 중심으로, 좌우 대칭구조를 갖도록 백본 상단 및 하단에 각각 상부 및 하부 아웃리거가 연결되어 있는 구조로 되어 있다.

하부 아웃리거의 경우, 직접적으로 열차하중이 재하되는 부분으로, 열차하중이 직접적으로 재하되는 부분에 절점부를 두고 여러 사재들이 만나도록 배치하여 구조안전성을 도모하였다.

반면, 상부 아웃리거 (상현재)의 경우, 직접적으로 열차하중이 재하되지 않는 부재로, 상부 아웃리거의 자중과 설하중을 받는 하중 특성상 상부 아웃리거 사재는 인장을 받는 것이 압축을 받는 경우보다 유리하므로 그림과 같이 심미성을 함께 고려하여 백본을 중심으로 좌우 대칭으로 상부 아웃리거 경사방향과 트러스 구조의 사재방향을 일치시켰다. 아래 신형식 고가구조 설계검증을 통해 백본 및 아웃리거의 모든 부재 응력이 허용치 이내로 만족함을 확인하였다.

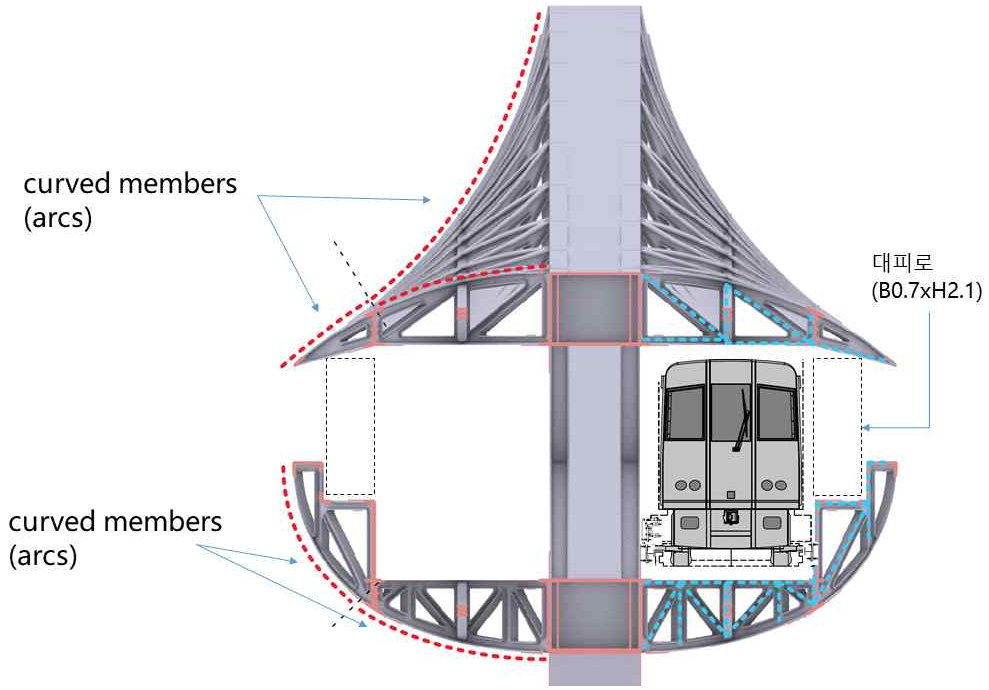
(2) 승객 대피 및 탈선 방호, 소음저감, 강설대비 구조

국토교통부 ‘철도시설의 기술기준(2019)’의 대피시설 및 대피로에 대한 기준(폭원 0.7m, 높이 2.1m)을 만족하고, 탈선 방호를 고려한 신형식 구조 단면을 아래 그림과 같이 설계하였다. 복선 양단에 대피로를 설치 가능한 구조로 설계되었으며, 차량 양쪽에 안내레일 설치 및 탈선 방호 구조로 되어 있다.

아울러, 기존 고가구조물은 상부가 오픈 구조로 완전 노출된 구조인 반면에, 새롭게 개발한 도시친화형 신형식 경전철 고가구조물은 상부 중앙 백본(backbone) 구조의 상면에 연결된 미학적인 외부 아웃리거 스킨 구조가 캐노피 역할을 하여 눈・비・바람으로터 직접적인 영향을 받지 않도록 하여 강우・폭설시의 열차운행 정지 및 선로 미끄럼 등의 문제를 근원적으로 해결하도록 하였다. 이를 위해, 아래 그림과 같이 상부 구조가 경간 중앙부 단면을 기준으로 4개의 원호를 갖도록 분리되어 전체 단면이 구성되어 있으며, 승객 시야가 확보되도록 승객 눈높이에서 양쪽이 개방된 구조를 갖도록 하였다.

아래 그림에서와 같이, 고가구조물 지점부의 경우 상부 중앙부가 봉긋 솟은 볼록한 구조형태에 따라 다양한 부재 절점 회전각을 갖지만 모듈별로는 일치하도록 단순화 설계되었고, 고가구조물 지점부를 제외한 일반구간의 경우 부재 및 모듈은 같은 패턴의 회전각을 갖도록 설계되었다.

또한, 소음 측면에서도 상부 중앙 백본(backbone) 구조의 상・하면에 연결된 외부 아웃리거 스킨 구조에 의해 차량 소음이 외부로 나가지 못하고 선로 내 반사되도록 하여 1차 방음 효과가 있으며, 필요시 상・하면의 외부 아웃리거 스킨 구조에 별도의 방음 패널 적용도 가능하여 선로에서의 2차 소음 차단 뿐만 아니라 하면의 낙하 방지가 가능하다.



<신형식 고가구조물 단면>

이밖에도, 상부의 외부 아웃리거 스킨 구조에 글라스 패널 외에 필요시 부분적으로 태양광 글라스 패널 적용도 가능하여 유지관리용 센싱전원 및 야간 경관조명 등의 에너지원으로도 활용이 가능한 친환경 구조이다.

※ 철도시설의 기술기준(2019.03) 일부 발췌

제15조(선로의 대피시설)

① 선로에는 비상시 주행하는 열차로부터 유지·관리업무 수행자와 승객이 안전하게 대피할 수 있는 공간을 확보하여야 한다.

② 제1항에 따른 대피시설 보행로는 0.7미터 이상으로 하여야 한다.

제44조(대피로)

① 비상시 승객 및 승무원이 도보로 신속히 본선 터널의 양쪽 출입구 또는 대피통로의 입구로 이동할 수 있도록 대피로를 설치하여야 한다.

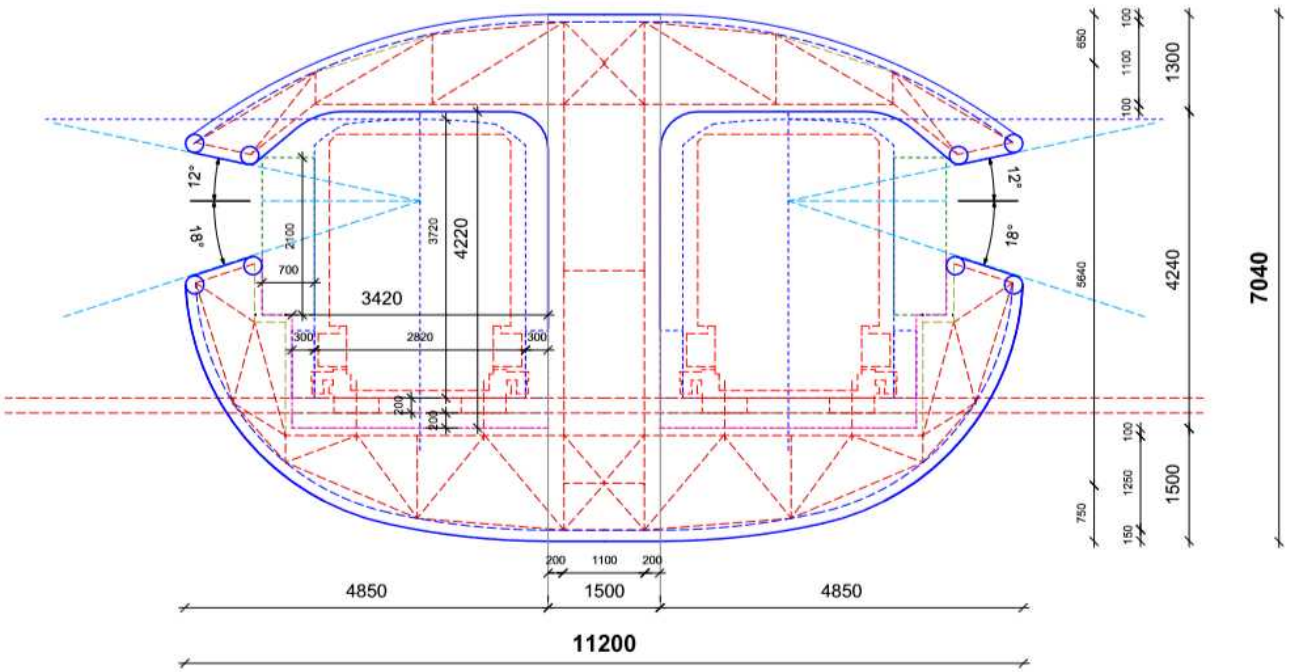
② 대피로는 본선 터널 바닥면의 궤도를 제외한 부분에 설치하되 단선 터널은 한쪽 벽에 설치하여야 하고, 복선 터널은 양쪽 벽에 설치하여야 한다.

③ 대피로의 바닥은 견고한 재질을 사용하여야 하며, 바닥에는 승객이 대피하는 데 지장을 주는 장애물 등은 없어야 한다.

④ 대피로의 폭은 0.7미터 이상, 높이는 2.1미터 이상 확보하여야 하며, 대피로 공간에는 그 밖의 시설물이 침범할 수 없도록 하여야 한다.

(3) 차량 및 건축한계 검토

신형식 고가구조물의 단면 크기는 해당 노선의 경전철 차량 크기에 따라 변화되며, 본 연구에서는 한국형 경량전철인 일반 고무차륜형 경전철, K-AGT에 맞춰 차량한계(B2,420xH3,520) 및 건축한계(B2,820xH3,720)를 만족하도록 단면 설계되었으며, 이외 차량 아래쪽에 교량 바닥판(H200) 및 주행궤도(H200)를 고려하였고, 차량 양단에 안내레일 및 제3궤조 설치를 위한 공간(B300xH900)을 추가 확보되도록 하였다.



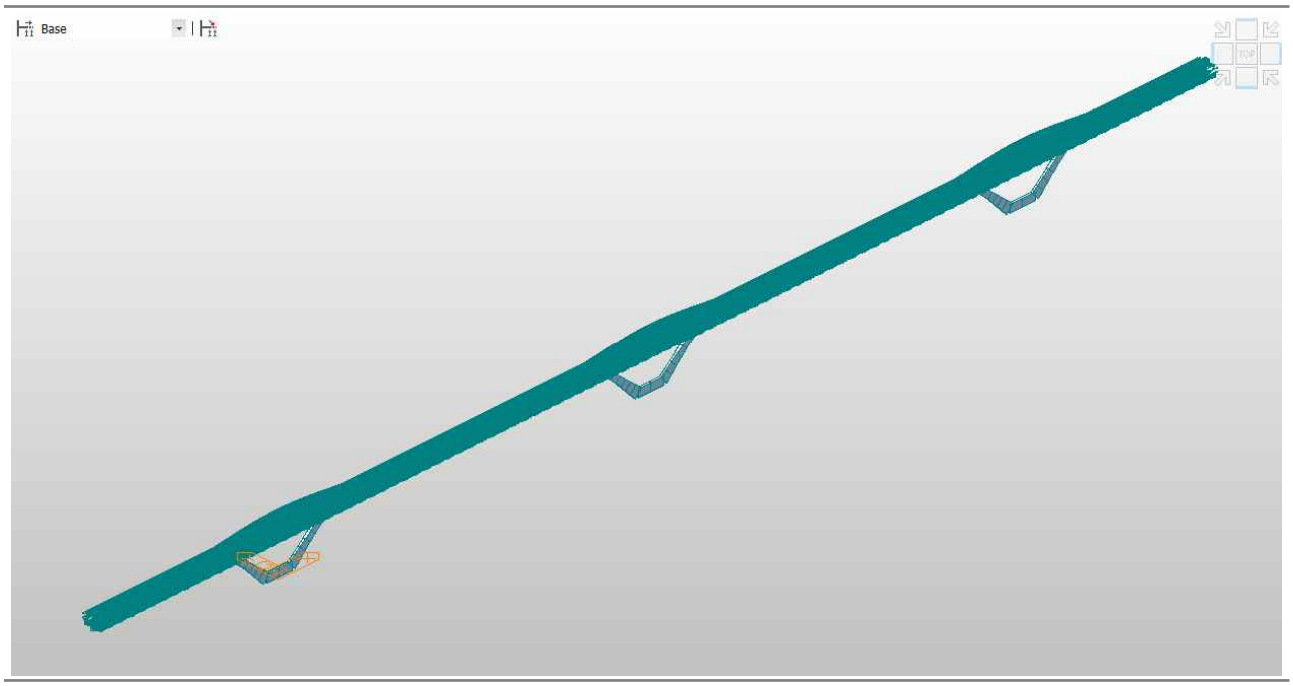
<차량·건축한계를 고려한 신형식 고가구조물 단면>

나. 신형식 고가구조 설계 검증

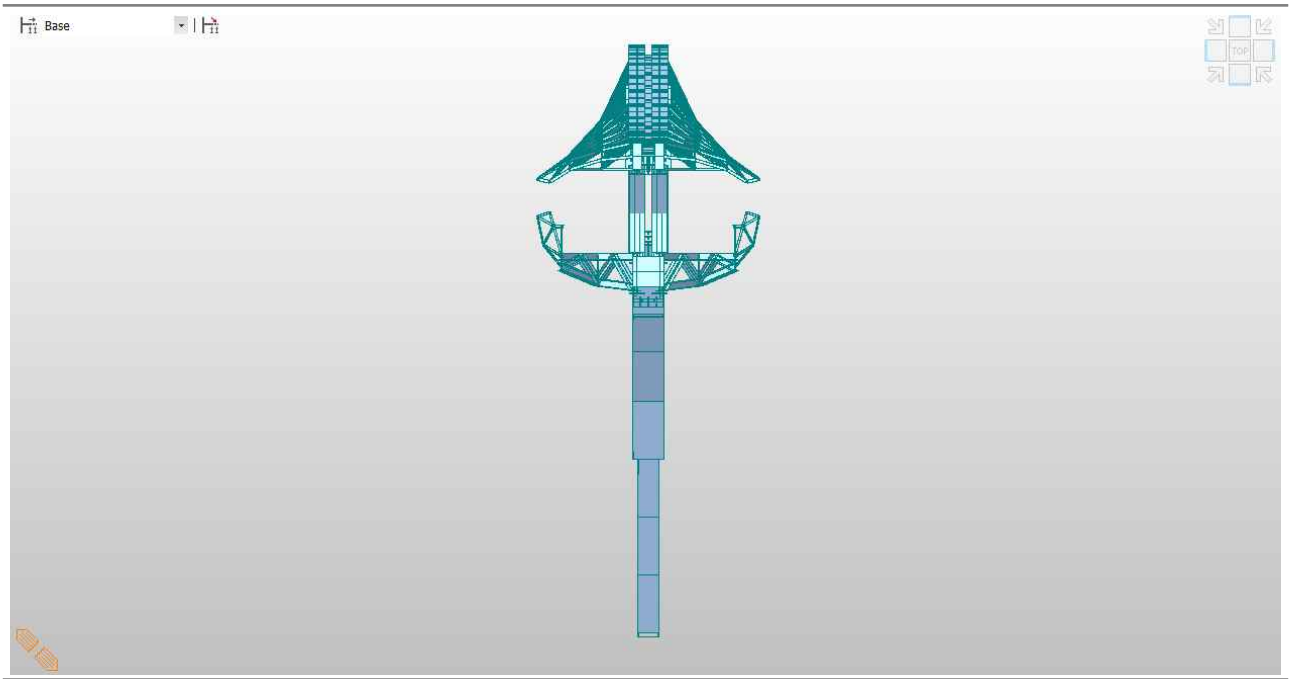
신형식 경전철 고가구조물은 1장에서 신규 제안한 한계상태설계법이 아닌 기존 허용응력설계법으로 구조설계 및 검증을 수행하였다. 이는 제안한 경전철 고가구조물 설계기준(한계상태설계법)은 현재 제정(안)으로 현 구조물 설계에 직접적으로 준용할 수 없으며, 준용한 허용응력설계법의 경우 제안한 한계상태설계법보다 설계하중 등에서 좀더 보수적인 설계기준으로, 오히려 신형식 경전철 고가구조물에 대해 보수적으로 구조설계・검증되었다 할 수 있겠다.

(1) 전체계 구조해석 모델

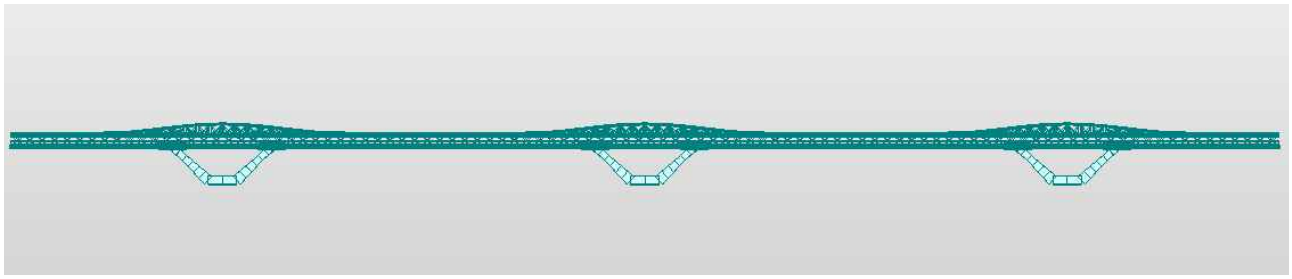
다음에는 신형식 고가구조형식 장경간 교량의 검토 및 설계 검증을 위해 다음과 같이 구조해석 모델링을 하였으며 아래와 같이 정리하였다.



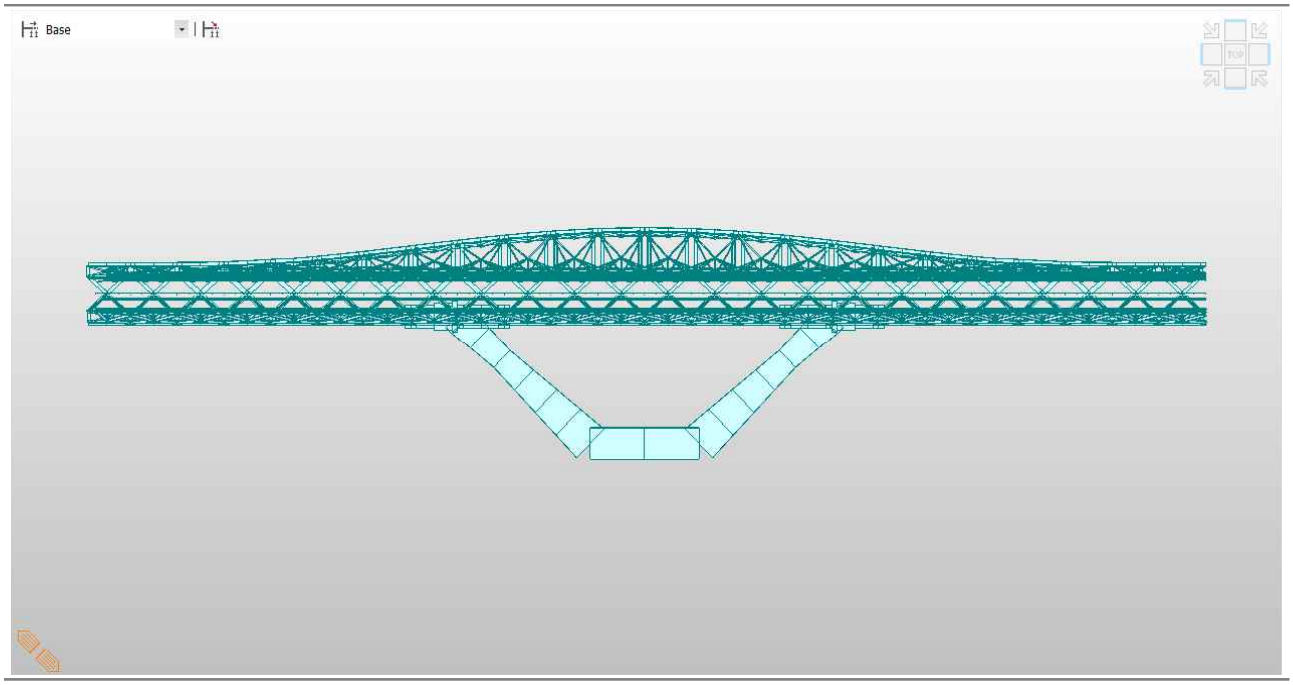
< 최적설계를 통한 장경간 교량의 전체계 해석모델 >



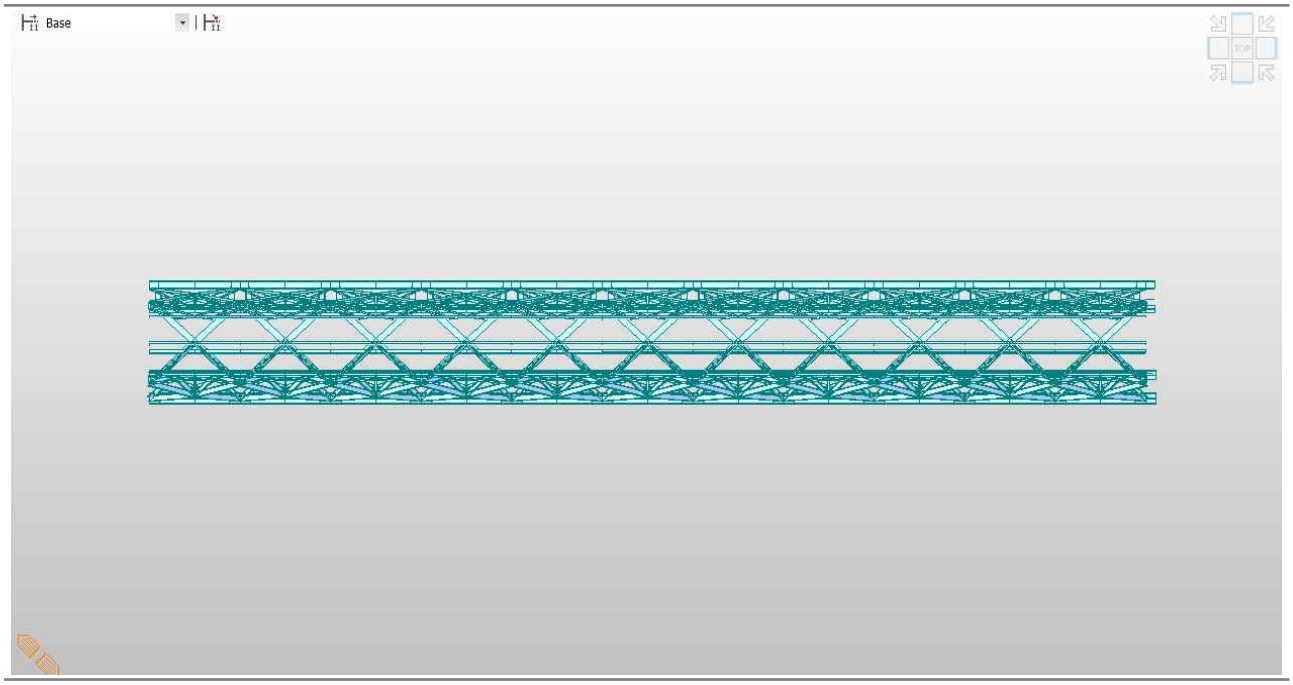
< 해석모델의 횡단면 >



< 해석모델의 종단면 >



< 지점부 단면 >



< 중앙부(일반부) 단면 >

(2) 하중재하

a. 자중 : 프로그램 내에서 자동재하

b. 2차 고정하중

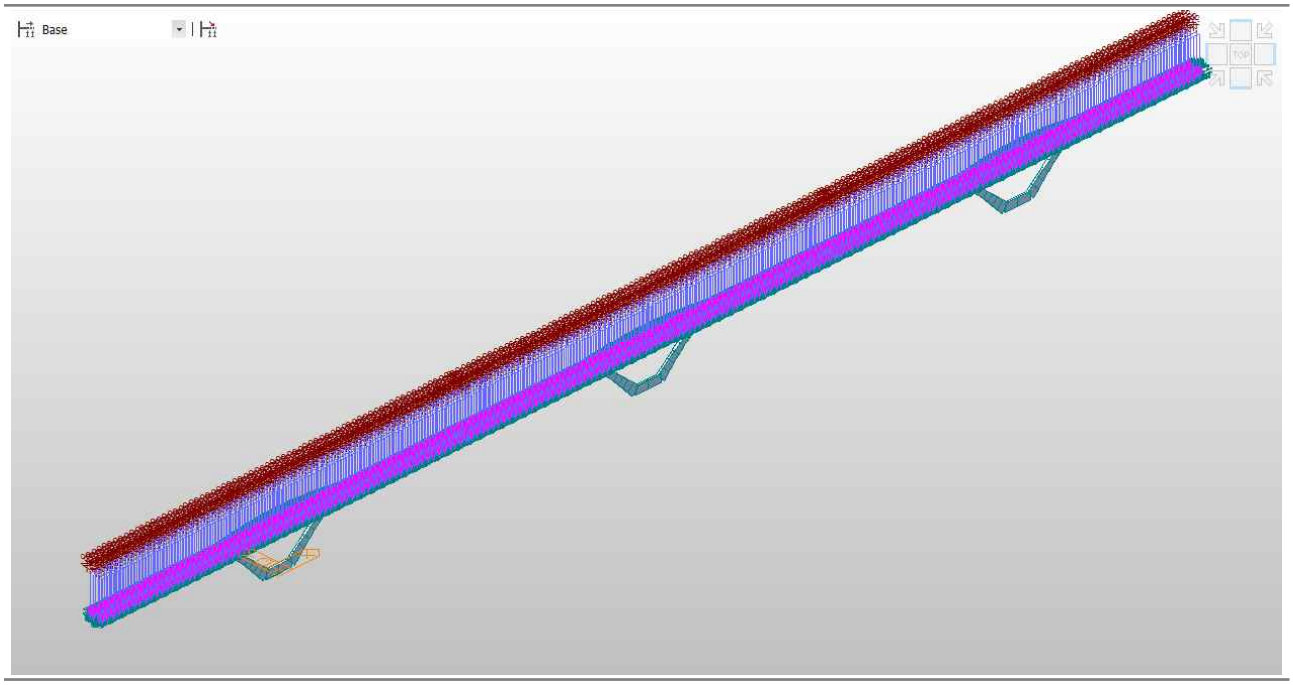
· 제 3궤조 등 : 7.0 kN/m / 2way = 3.50 kN/m / 1way

· 안 내 레 일 : 2.5 kN/m / 2way = 1.25 kN/m / 1way

· 주 행 로 : 단면 정보에 따라 마이다스에서 자동 계산

· FRP 바닥판 단위중량 : 14 - 18 kN/m^3 ⇒ 18 kN/m^3 적용

· FRP 바닥판 하중 : 폭원 3.2m × 두께 0.2m 가정 ⇒ 11.5 kN/m / 1way



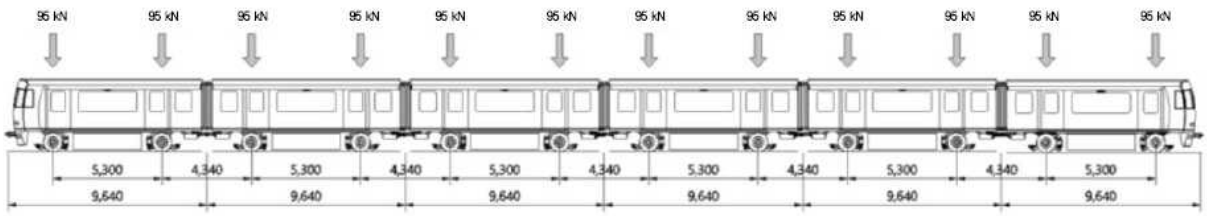
< 2차 고정하중 재하도 >

c. 활하중 : 6량 1편성 기준

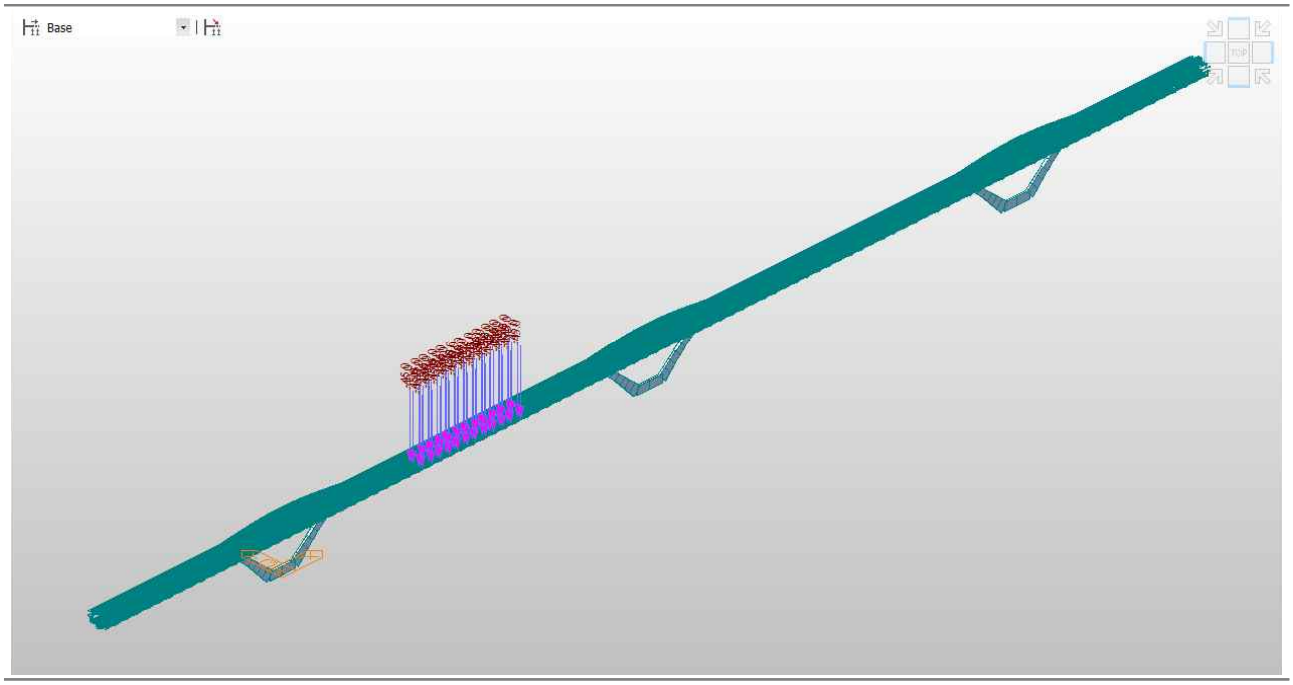
· K-AGT 단선 / 복선 재하

· 공차중량 : 120 kN/량, 만차중량 : 190 kN/량

· 축중 : 95 kN (만차기준)



< K-AGT >



< 활하중 재하도 >

d. 풍하중

· 교량상에 열차가 없을 때 : 3.0 kN/㎡

· 교량상에 열차가 있을 때 : 1.5 kN/㎡

· 차량풍하중 : 1.5 kN/㎡

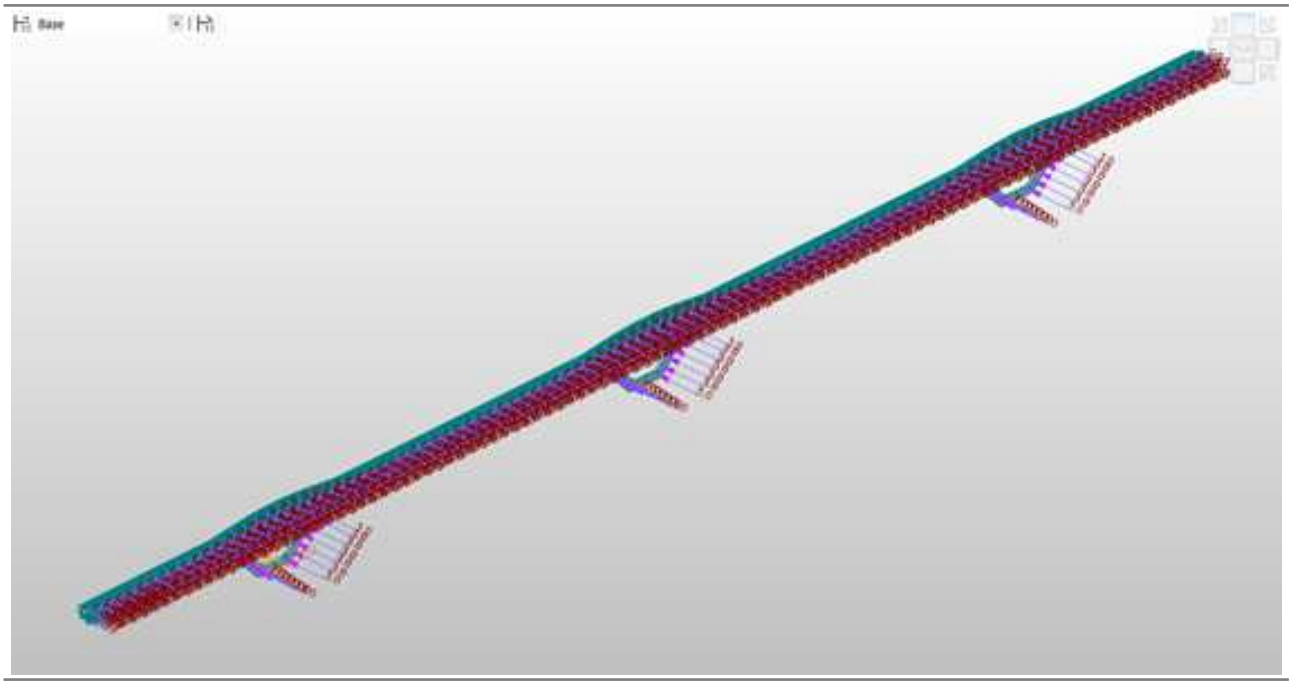
e. 온도하중

· 가설 기준온도 20℃, 온도 승강폭 ±35℃ 적용

· 케이블과 타부재(백본 및 주부재, 주탑)와의 온도차는 '흰색 및 밝은색 케이블' 적용, 8℃ 고려

f. 설하중

· 교량상에 열차가 없을 때 : 3.0 kN/㎡



< 풍하중 재하도 >

g. 지진하중 (내진설계기준 공통적용사항(2017))

· 지진구역 계수 : 0.11(지진구역 Ⅰ)　　· 위험도계수 : 1.4(1000년)

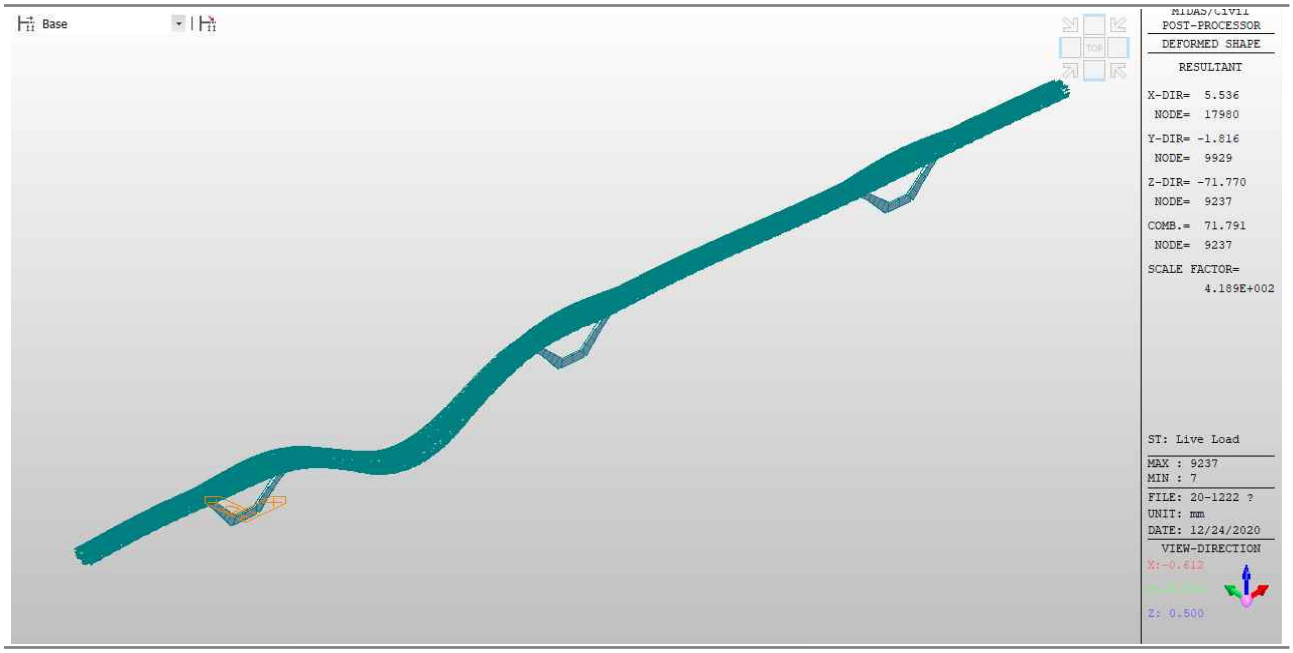
· 지반가속도 : 0.154g　　· 지반종류 : S2

· 표준설계 응답스펙트럼 적용

(3) 해석결과

a. 활하중 처짐 (6량 1편성)

δ = 71.770 mm < L/600 = 333.3 mm　O.K



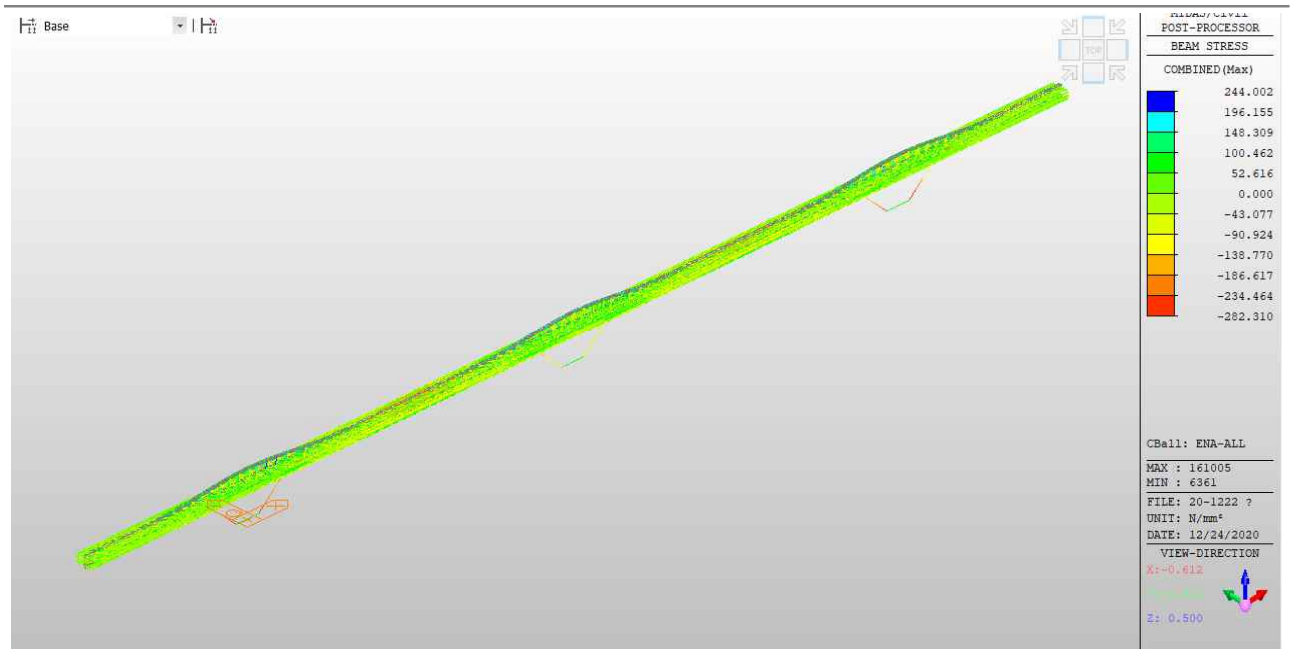
< 활하중 처짐 >

b. 응력

fmax = 282.310 MPa < fa = 290.3(215×1.35=290.3) MPa　O.K

하중조합에 따른 허용응력 할증 계수

: 고정하중 + 활하중 + 설하중 + 지점침하 + 온도하중 + 풍하중 : 1.35



< 최대 발생응력 >

(4) 주요 부재의 하중별 응력 분석

a. 백본 X-Type

- 중앙경간 지점부(강종 : SM 520)

· 적용하중(kN, m)

구 분	P	V_y	V_z	T	M_y	M_z
P_{max}	-3752.9	-141.5	-2.1	4.0	5.3	-272.9
M_{ymax}	-2014.2	-89.2	18.5	5.4	43.8	-162.2
M_{zmax}	-3520.3	-165.1	10.0	4.0	29.4	-313.1

· 응력검토(MPa)

구 분	P_{max}		M_{ymax}		M_{zmax}	
	응력비	응력 검토	응력비	응력 검토	응력비	응력 검토
축압축력과 휨응력에 대한 합성응력 검토	0.588 < 1.0	170.7 < 290.3	0.358 < 1.0	104.0 < 290.3	0.612 < 1.0	177.6 < 290.3
	O.K	O.K	O.K	O.K	O.K	O.K
휨과 전단응력에 대한 합성응력	0.15 < 1.2	2.2 < 148.5	0.06 < 1.2	3.9 < 148.5	0.15 < 1.2	2.7 < 148.5
	O.K	O.K	O.K	O.K	O.K	O.K

- 중앙경간 중앙부(강종 : SM 520)

· 적용하중(kN, m)

구 분	P	V_y	V_z	T	M_y	M_z
P_{max}	-2456.3	7.9	3.1	0.0	8.3	32.7
M_{ymax}	-1729.9	-4.7	-3.8	0.0	-12.0	8.6
M_{zmax}	-2005.2	32.5	0.2	0.0	-0.8	-58.7

· 응력검토(MPa)

구 분	P_{max}		M_{ymax}		M_{zmax}	
	응력비	응력 검토	응력비	응력 검토	응력비	응력 검토
축압축력과 휨응력에 대한 합성응력 검토	0.467 < 1.0	135.5 < 290.3	0.287 < 1.0	83.4 < 290.3	0.479 < 1.0	139.1 < 290.3
	O.K	O.K	O.K	O.K	O.K	O.K
휨과 전단응력에 대한 합성응력	0.13 < 1.2	0.4 < 148.5	0.07 < 1.2	0.5 < 148.5	0.08 < 1.2	0.02 < 148.5
	O.K	O.K	O.K	O.K	O.K	O.K

- 측경간 중앙부(강종 : SM 520)

· 적용하중(kN, m)

구 분	P	V_y	V_z	T	M_y	M_z
P_{max}	1138.9	1.7	2.1	0.0	-4.2	7.0
M_{ymax}	-945.5	12.1	2.9	0.0	8.0	31.4
M_{zmax}	-981.7	12.6	-0.9	0.0	-3.6	32.6

· 응력검토(MPa)

구 분	P_{max}		M_{ymax}		M_{zmax}	
	응력비	응력 검토	응력비	응력 검토	응력비	응력 검토
축압축력과 휨응력에 대한 합성응력 검토	0.190 < 1.0	55.2 < 290.3	0.245 < 1.0	71.1 < 290.3	0.250 < 1.0	72.5 < 290.3
	O.K	O.K	O.K	O.K	O.K	O.K
휨과 전단응력에 대한 합성응력	0.03 < 1.2	0.3 < 148.5	0.02 < 1.2	0.4 < 148.5	0.02 < 1.2	0.1 < 148.5
	O.K	O.K	O.K	O.K	O.K	O.K

- 측경간 단부(강종 : SM 520)

· 적용하중(kN, m)

구 분	P	V_y	V_z	T	M_y	M_z
P_{max}	-2683.5	-55.7	-13.3	-0.1	-44.7	-50.4
M_{ymax}	-1237.6	-26.9	-13.5	-0.1	-47.4	-22.3
M_{zmax}	-2679.7	-51.7	-13.3	-0.1	-3.3	116.8

· 응력검토(MPa)

구 분	P_{max}		M_{ymax}		M_{zmax}	
	응력비	응력 검토	응력비	응력 검토	응력비	응력 검토
축압축력과 휨응력에 대한 합성응력 검토	0.590< 1.0	171.6 < 290.3	0.294 < 1.0	85.4 < 290.3	0.769 < 1.0	223.1 < 290.3
	O.K	O.K	O.K	O.K	O.K	O.K
휨과 전단응력에 대한 합성응력	0.18 < 1.2	1.7 < 148.5	0.05 < 1.2	1.7 < 148.5	0.15 < 1.2	1.7 < 148.5
	O.K	O.K	O.K	O.K	O.K	O.K

b. 백본 상하현재

- 상현 상단(강종 : SM 520)

· 적용하중(kN, m)

구 분	P	V_y	V_z	T	M_y	M_z
P_{max}	-9055.4	17.3	-24.0	0.3	15.1	-4.5
M_{ymax}	24.7	-5.3	-27.4	0.0	-4.6	2.2
M_{zmax}	47.3	4.8	5.0	0.1	-1.5	-6.2

· 응력검토(MPa)

구 분	P_{max}		M_{ymax}		M_{zmax}	
	응력비	응력 검토	응력비	응력 검토	응력비	응력 검토
축압축력과 휨응력에 대한 합성응력 검토	0.776 < 1.0	225.2 < 290.3	0.006 < 1.0	1.8 < 290.3	0.011 < 1.0	3.1 < 290.3
	O.K	O.K	O.K	O.K	O.K	O.K
휨과 전단응력에 대한 합성응력	0.60 < 1.2	5.0 < 148.5	0.0001 < 1.2	5.7 < 148.5	0.0001 < 1.2	1.1 < 148.5
	O.K	O.K	O.K	O.K	O.K	O.K

- 상현 하단(강종 : SM 520)

· 적용하중(kN, m)

구 분	P	V_y	V_z	T	M_y	M_z
P_{max}	-4752.5	-2.9	-40.5	0.1	11.1	-0.2
M_{ymax}	434.3	4.9	-806.1	-0.2	608.8	3.8
M_{zmax}	3403.7	186.0	318.9	-0.4	-44.1	73.3

· 응력검토(MPa)

구 분	P_{max}		M_{ymax}		M_{zmax}	
	응력비	응력 검토	응력비	응력 검토	응력비	응력 검토
축압축력과 휨응력에 대한 합성응력 검토	0.593 < 1.0	172.2 < 290.3	0.496 < 1.0	144.1 < 290.3	0.632 < 1.0	180.8 < 290.3
	O.K	O.K	O.K	O.K	O.K	O.K
휨과 전단응력에 대한 합성응력	0.35 < 1.2	7.3 < 148.5	1.18 < 1.2	143.9 < 148.5	0.35 < 1.2	57.0 < 148.5
	O.K	O.K	O.K	O.K	O.K	O.K

- 하현 측경간(강종 : SM 520)

· 적용하중(kN, m)

구 분	P	V_y	V_z	T	M_y	M_z
P_{max}	-3727.1	-23.4	59.8	0.02	61.8	-17.1
M_{ymax}	-1723.3	49.6	-609.5	-4.8	-408.3	4.3
M_{zmax}	-2034.9	286.6	59.0	-5.3	-19.9	-97.5

· 응력검토(MPa)

구 분	P_{max}		M_{ymax}		M_{zmax}	
	응력비	응력 검토	응력비	응력 검토	응력비	응력 검토
축압축력과 휨응력에 대한 합성응력 검토	0.634 < 1.0	184.0 < 290.3	0.600 < 1.0	174.1 < 290.3	0.575 < 1.0	166.8 < 290.3
	O.K	O.K	O.K	O.K	O.K	O.K
휨과 전단응력에 대한 합성응력	0.35 < 1.2	12.5 < 148.5	1.09 < 1.2	128.4 < 148.5	0.10 < 1.2	13.9 < 148.5
	O.K	O.K	O.K	O.K	O.K	O.K

- 하현 중앙경간(강종 : SM 520)

· 적용하중(kN, m)

구 분	P	V_y	V_z	T	M_y	M_z
P_{max}	-11431.4	-13.0	171.4	-0.1	417.8	-65.6
M_{ymax}	-7952.1	85.7	389.4	-0.04	-1627.1	-121.1
M_{zmax}	-6813.2	465.5	-325.8	11.1	465.7	-187.1

· 응력검토(MPa)

구 분	P_{max}		M_{ymax}		M_{zmax}	
	응력비	응력 검토	응력비	응력 검토	응력비	응력 검토
축압축력과 휨응력에 대한 합성응력 검토	0.840 < 1.0	243.9 < 290.3	0.937 < 1.0	272.1 < 290.3	0.643 < 1.0	186.5 < 290.3
	O.K	O.K	O.K	O.K	O.K	O.K
휨과 전단응력에 대한 합성응력	0.66 < 1.2	20.4 < 148.5	0.84 < 1.2	46.4 < 148.5	0.35 < 1.2	39.6 < 148.5
	O.K	O.K	O.K	O.K	O.K	O.K

c. 아웃리거 버터플라이(Butterfly)부재

- 상현 내측(강종 : SM 520)

· 적용하중(kN, m)

구 분	P	V_y	V_z	T	M_y	M_z
P_{max}	-207.8	0.0	-0.6	0.0	-0.3	0.0
M_{ymax}	-16.8	0.8	-2.7	0.0	-1.7	0.3
M_{zmax}	11.2	0.8	-2.6	0.0	1.5	-0.6

· 응력검토(MPa)

구 분	P_{max}		M_{ymax}		M_{zmax}	
	응력비	응력 검토	응력비	응력 검토	응력비	응력 검토
축압축력과 휨응력에 대한 합성응력 검토	0.626 < 1.0	181.7 < 290.3	0.378 < 1.0	109.6 < 290.3	0.541 < 1.0	157.0 < 290.3
	O.K	O.K	O.K	O.K	O.K	O.K
휨과 전단응력에 대한 합성응력	0.39 < 1.2	1.3 < 148.5	0.01 < 1.2	5.4 < 148.5	0.03 < 1.2	5.2 < 148.5
	O.K	O.K	O.K	O.K	O.K	O.K

- 상현 외측(강종 : SM 520)

· 적용하중(kN, m)

구 분	P	V_y	V_z	T	M_y	M_z
P_{max}	-198.3	0.0	-0.8	0.0	-0.5	0.0
M_{ymax}	-9.8	-1.4	-7.8	0.0	1.9	0.3
M_{zmax}	-5.0	-2.7	3.0	0.0	-0.6	0.7

· 응력검토(MPa)

구 분	P_{max}		M_{ymax}		M_{zmax}	
	응력비	응력 검토	응력비	응력 검토	응력비	응력 검토
축압축력과 휨응력에 대한 합성응력 검토	0.613 < 1.0	178.0 < 290.3	0.374 < 1.0	108.5 < 290.3	0.453 < 1.0	131.5 < 290.3
	O.K	O.K	O.K	O.K	O.K	O.K
휨과 전단응력에 대한 합성응력	0.37 < 1.2	1.5 < 148.5	0.04 < 1.2	15.7 < 148.5	0.01 < 1.2	5.9 < 148.5
	O.K	O.K	O.K	O.K	O.K	O.K

- 하현 내측(강종 : SM 520)

· 적용하중(kN, m)

구 분	P	V_y	V_z	T	M_y	M_z
P_{max}	-177.8	0.0	-0.01	0.0	0.1	0.0
M_{ymax}	-145.8	0.0	-0.4	0.0	-0.6	0.0
M_{zmax}	-39.2	-0.1	-0.3	0.0	-0.2	-0.1

· 응력검토(MPa)

구 분	P_{max}		M_{ymax}		M_{zmax}	
	응력비	응력 검토	응력비	응력 검토	응력비	응력 검토
축압축력과 휨응력에 대한 합성응력 검토	0.515 < 1.0	149.4 < 290.3	0.497 < 1.0	135.5 < 290.3	0.161 < 1.0	46.8 < 290.3
	O.K	O.K	O.K	O.K	O.K	O.K
휨과 전단응력에 대한 합성응력	0.26 < 1.2	0.02 < 148.5	0.22 < 1.2	0.8 < 148.5	0.02 < 1.2	0.5 < 148.5
	O.K	O.K	O.K	O.K	O.K	O.K

- 하현 외측(강종 : SM 520)

· 적용하중(kN, m)

구 분	P	V_y	V_z	T	M_y	M_z
P_{max}	-136.1	0.0	-0.01	0.0	0.03	0.0
M_{ymax}	-28.3	-1.0	-4.0	0.0	1.9	0.4
M_{zmax}	-28.3	-1.0	-4.0	0.0	1.9	0.4

· 응력검토(MPa)

구 분	P_{max}		M_{ymax}		M_{zmax}	
	응력비	응력 검토	응력비	응력 검토	응력비	응력 검토
축압축력과 휨응력에 대한 합성응력 검토	0.393 < 1.0	114.1 < 290.3	0.487 < 1.0	141.3 < 290.3	0.487 < 1.0	141.3 < 290.3
	O.K	O.K	O.K	O.K	O.K	O.K
휨과 전단응력에 대한 합성응력	0.15 < 1.2	0.02 < 148.5	0.06 < 1.2	7.9 < 148.5	0.06 < 1.2	7.9 < 148.5
	O.K	O.K	O.K	O.K	O.K	O.K

d. 아웃리거 상연부재

- 지붕재(강종 : SM 520)

· 적용하중(kN, m)

구 분	P	V_y	V_z	T	M_y	M_z
P_{max}	364.1	-0.3	-0.5	0.0	0.1	-0.3
M_{ymax}	-0.5	0.2	-1.6	0.02	-3.2	-0.01
M_{zmax}	70.3	0.4	-0.8	0.0	-0.6	0.3

· 응력검토(MPa)

구 분	P_{max}		M_{ymax}		M_{zmax}	
	응력비	응력 검토	응력비	응력 검토	응력비	응력 검토
축압축력과 휨응력에 대한 합성응력 검토	0.665 < 1.0	193.1 < 290.3	0.153 < 1.0	44.4 < 290.3	0.379 < 1.0	109.9 < 290.3
	O.K	O.K	O.K	O.K	O.K	O.K
휨과 전단응력에 대한 합성응력	0.55 < 1.2	0.7 < 148.5	0.02 < 1.2	2.6 < 148.5	0.03 < 1.2	1.1 < 148.5
	O.K	O.K	O.K	O.K	O.K	O.K

- 수평사재(강종 : SM 520)

· 적용하중(kN, m)

구 분	P	V_y	V_z	T	M_y	M_z
P_{max}	-384.9	-0.1	-1.3	0.01	0.1	-0.2
M_{ymax}	-106.6	-0.1	-2.1	-0.01	-3.6	-0.1
M_{zmax}	-82.0	-0.4	0.2	0.01	1.9	0.7

· 응력검토(MPa)

구 분	P_{max}		M_{ymax}		M_{zmax}	
	응력비	응력 검토	응력비	응력 검토	응력비	응력 검토
축압축력과 휨응력에 대한 합성응력 검토	0.636 < 1.0	184.7 < 290.3	0.320 < 1.0	93.0 < 290.3	0.297 < 1.0	86.2 < 290.3
	O.K	O.K	O.K	O.K	O.K	O.K
휨과 전단응력에 대한 합성응력	0.37 < 1.2	2.4 < 148.5	0.09 < 1.2	3.6 < 148.5	0.04 < 1.2	0.5 < 148.5
	O.K	O.K	O.K	O.K	O.K	O.K

- 내측 수직사재(강종 : SM 520)

· 적용하중(kN, m)

구 분	P	V_y	V_z	T	M_y	M_z
P_{max}	214.7	-0.03	-0.7	0.0	-0.6	-0.1
M_{ymax}	-0.4	0.1	3.0	-0.01	-5.6	-0.3
M_{zmax}	-0.2	0.1	2.6	-0.01	-5.0	-0.3

· 응력검토(MPa)

구 분	P_{max}		M_{ymax}		M_{zmax}	
	응력비	응력 검토	응력비	응력 검토	응력비	응력 검토
축압축력과 휨응력에 대한 합성응력 검토	0.680 < 1.0	197.2 < 290.3	0.618 < 1.0	179.5 < 290.3	0.586 < 1.0	170.0 < 290.3
	O.K	O.K	O.K	O.K	O.K	O.K
휨과 전단응력에 대한 합성응력	0.44 < 1.2	1.4 < 148.5	0.21 < 1.2	6.4 < 148.5	0.17 < 1.2	5.6 < 148.5
	O.K	O.K	O.K	O.K	O.K	O.K

- 외측 수직사재(강종 : SM 520)

· 적용하중(kN, m)

구 분	P	V_y	V_z	T	M_y	M_z
P_{max}	-51.3	-0.1	0.2	0.0	-0.03	0.1
M_{ymax}	-38.9	0.1	-0.3	0.0	0.3	-0.1
M_{zmax}	-43.7	0.2	-0.3	0.0	0.4	-0.2

· 응력검토(MPa)

구 분	P_{max}		M_{ymax}		M_{zmax}	
	응력비	응력 검토	응력비	응력 검토	응력비	응력 검토
축압축력과 휨응력에 대한 합성응력 검토	0.224 < 1.0	64.9 < 290.3	0.224 < 1.0	65.0 < 290.3	0.365 < 1.0	106.0 < 290.3
	O.K	O.K	O.K	O.K	O.K	O.K
휨과 전단응력에 대한 합성응력	0.02 < 1.2	0.4 < 148.5	0.02 < 1.2	0.5 < 148.5	0.03 < 1.2	0.6 < 148.5
	O.K	O.K	O.K	O.K	O.K	O.K

d. 아웃리거 하연부재

- 바닥틀(강종 : SM 520)

· 적용하중(kN, m)

구 분	P	V_y	V_z	T	M_y	M_z
P_{max}	1191.5	-3.9	-50.0	-0.4	9.7	-3.9
M_{ymax}	1006.0	19.0	-79.3	0.7	159.7	-1.2
M_{zmax}	-259.6	-22.4	-0.1	-0.03	4.8	38.7

· 응력검토(MPa)

구 분	P_{max}		M_{ymax}		M_{zmax}	
	응력비	응력 검토	응력비	응력 검토	응력비	응력 검토
축압축력과 휨응력에 대한 합성응력 검토	0.348 < 1.0	101.1 < 290.3	0.585 < 1.0	169.9 < 290.3	0.336 < 1.0	97.4 < 290.3
	O.K	O.K	O.K	O.K	O.K	O.K
휨과 전단응력에 대한 합성응력	0.11 < 1.2	15.3 < 148.5	0.36 < 1.2	24.4 < 148.5	0.01 < 1.2	0.1 < 148.5
	O.K	O.K	O.K	O.K	O.K	O.K

- 바닥틀 사재(강종 : SM 520)

· 적용하중(kN, m)

구 분	P	V_y	V_z	T	M_y	M_z
P_{max}	-402.0	0.3	19.4	0.01	17.4	-1.5
M_{ymax}	-277.0	3.3	27.2	0.04	-39.4	-6.6
M_{zmax}	145.2	-9.2	14.6	-0.03	22.7	-11.5

· 응력검토(MPa)

구 분	P_{max}		M_{ymax}		M_{zmax}	
	응력비	응력 검토	응력비	응력 검토	응력비	응력 검토
축압축력과 휨응력에 대한 합성응력 검토	0.361 < 1.0	104.9 < 290.3	0.550 < 1.0	159.6 < 290.3	0.474 < 1.0	137.6 < 290.3
	O.K	O.K	O.K	O.K	O.K	O.K
휨과 전단응력에 대한 합성응력	0.12 < 1.2	12.1 < 148.5	0.18 < 1.2	17.2 < 148.5	0.05 < 1.2	9.2 < 148.5
	O.K	O.K	O.K	O.K	O.K	O.K

- 대피통로 지지대(강종 : SM 520)

· 적용하중(kN, m)

구 분	P	V_y	V_z	T	M_y	M_z
P_{max}	-102.1	0.0	-0.01	0.0	0.0	0.0
M_{ymax}	-1.2	-0.1	-2.7	0.0	-2.9	-0.1
M_{zmax}	0.8	0.8	0.5	0.0	0.6	-0.3

· 응력검토(MPa)

구 분	P_{max}		M_{ymax}		M_{zmax}	
	응력비	응력 검토	응력비	응력 검토	응력비	응력 검토
축압축력과 휨응력에 대한 합성응력 검토	0.293 < 1.0	85.1 < 290.3	0.270 < 1.0	78.5 < 290.3	0.208 < 1.0	60.4 < 290.3
	O.K	O.K	O.K	O.K	O.K	O.K
휨과 전단응력에 대한 합성응력	0.09 < 1.2	0.02 < 148.5	0.06 < 1.2	5.5 < 148.5	0.0001 < 1.2	0.9 < 148.5
	O.K	O.K	O.K	O.K	O.K	O.K

- 대피통로 사재(강종 : SM 520)

· 적용하중(kN, m)

구 분	P	V_y	V_z	T	M_y	M_z
P_{max}	14.5	0.1	0.1	0.0	-0.1	-0.1
M_{ymax}	4.5	0.1	-0.6	0.0	-0.8	0.1
M_{zmax}	20.6	-0.2	-0.04	0.0	-0.1	-0.2

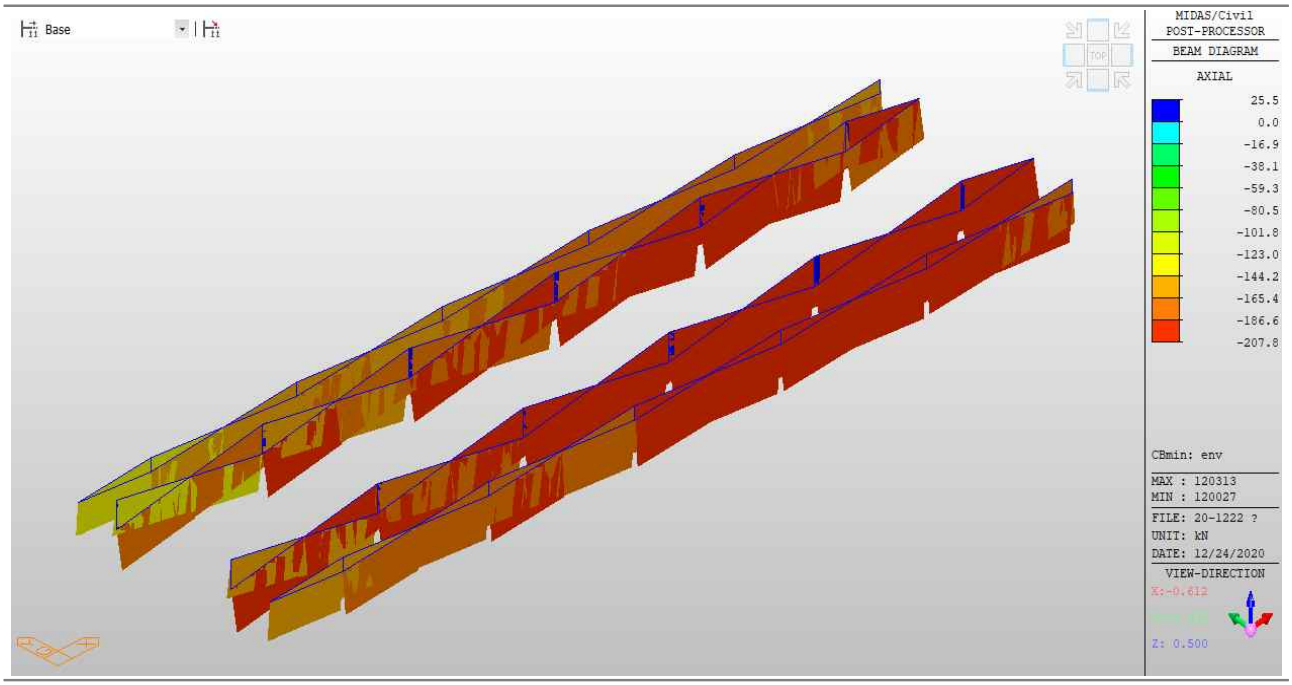
· 응력검토(MPa)

구 분	P_{max}		M_{ymax}		M_{zmax}	
	응력비	응력 검토	응력비	응력 검토	응력비	응력 검토
축압축력과 휨응력에 대한 합성응력 검토	0.095 < 1.0	27.5 < 290.3	0.120 < 1.0	34.8 < 290.3	0.184 < 1.0	53.5 < 290.3
	O.K	O.K	O.K	O.K	O.K	O.K
휨과 전단응력에 대한 합성응력	0.0001 < 1.2	0.2 < 148.5	0.01 < 1.2	1.2 < 148.5	0.0001 < 1.2	0.1 < 148.5
	O.K	O.K	O.K	O.K	O.K	O.K

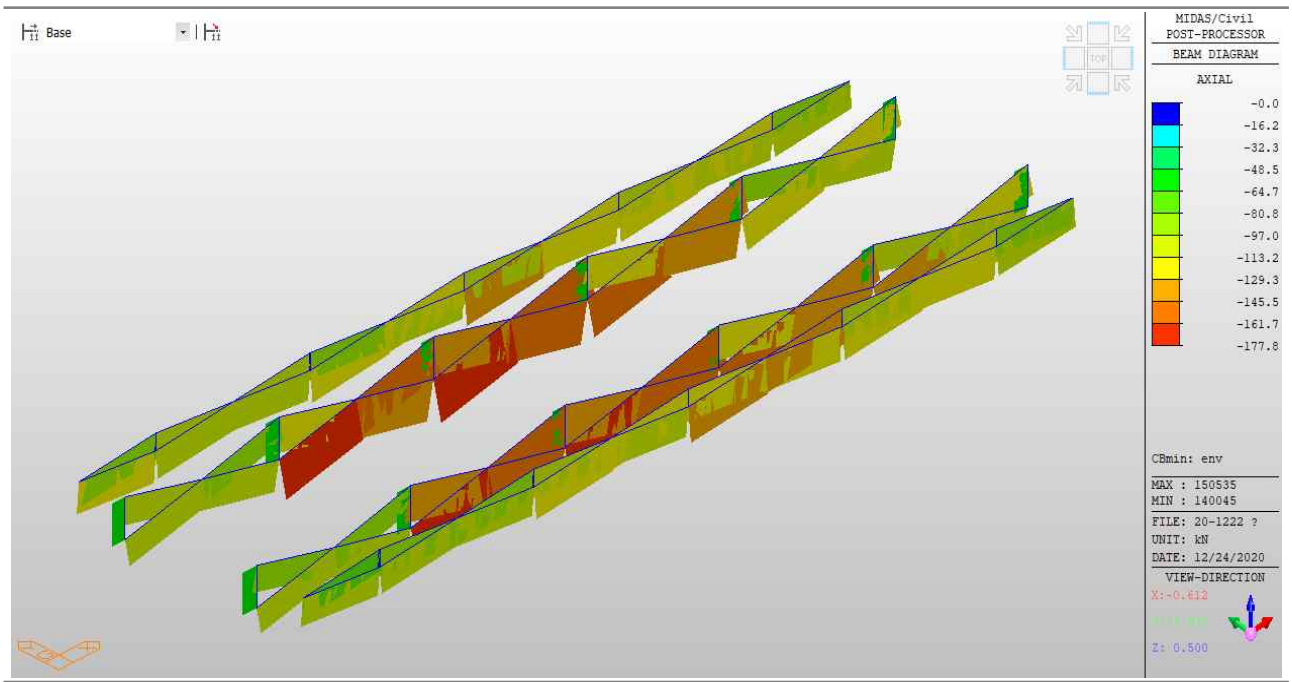
(5) 횡방향 보강 버터플라이(Butterfly)부재 해석 결과

상부 및 하부 아웃리거 구조의 횡방향 보강 부재인 버터플라이(Butterfly) 부재에 대한 응력 검토 결과, 각각 최대 160.5MPa. 186.8MPa의 응력이 발생하였으며 허용응력치 215MPa 이내로 버터플라이(Butterfly) 부재의 안전성을 확인하였다.

a. 상부 아웃리거 구조의 버터플라이(Butterfly)부재 Axial forces : 207.8 kN



b. 하부 아웃리거 구조의 버터플라이(Butterfly)부재 Axial forces : 177.8 kN



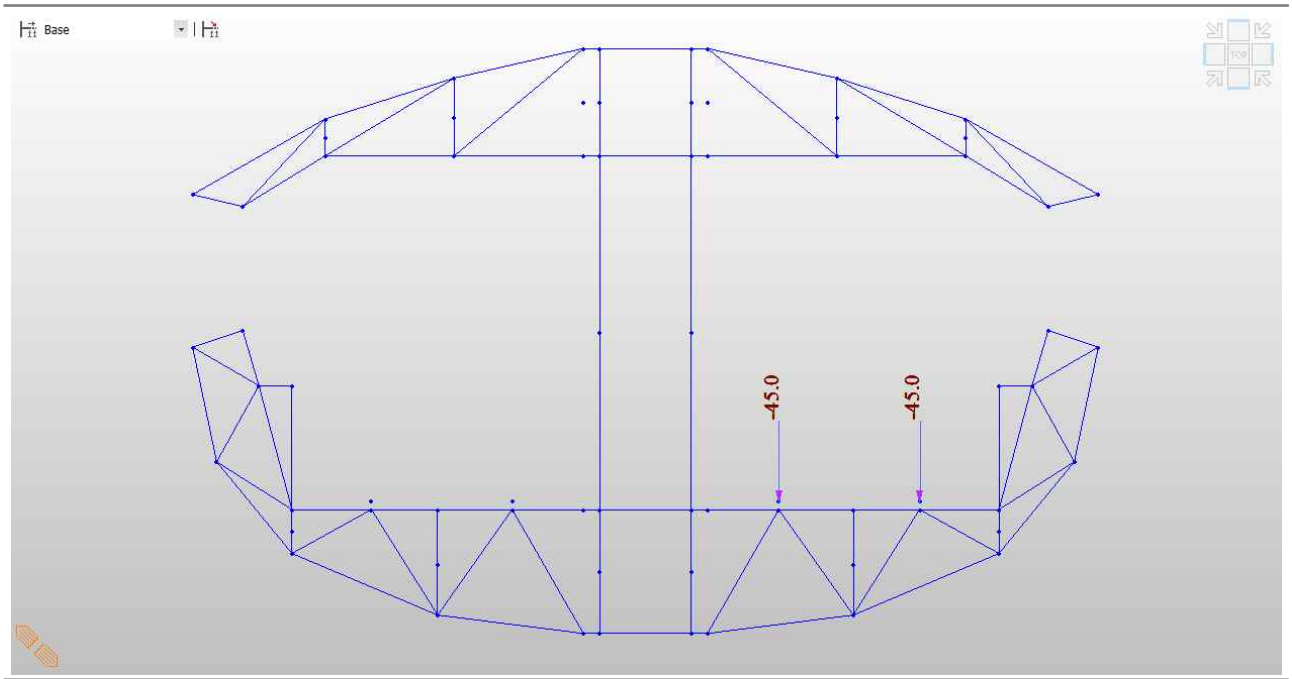
(6) 활하중 편재하에 의한 횡방향 회전각 검토

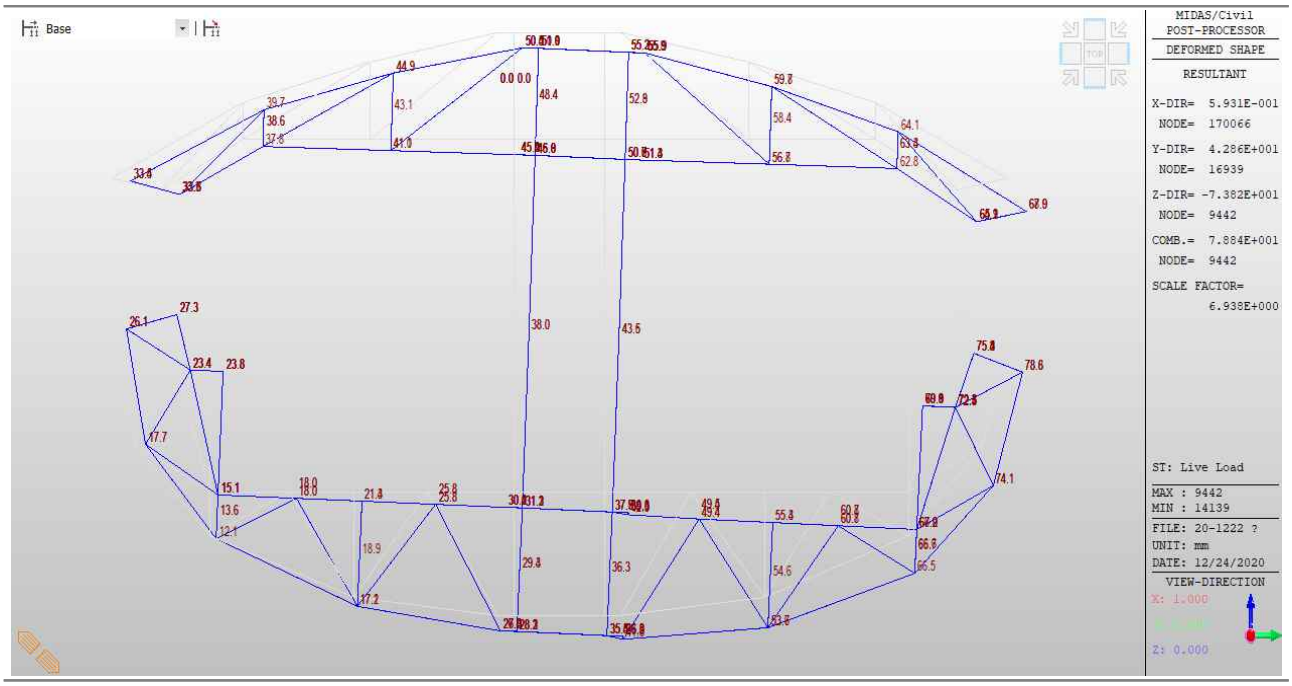
a. 활하중 재하에 의한 차륜재하점의 변위

- 내측차륜점 변위 : 49.4 mm
- 외측차륜점 변위 : 60.8 mm

b. 활하중 편재하에 의한 횡방향 회전각

- 0.38 Degree < 1.0 Degree





다. 차량 주행에 의한 동적 안전성 검토

본 절에서는 신형식 경전철 고가구조물의 최종설계안에 대하여 차량 주행에 의한 동적 안전성 검토를 수행하였다. 동적거동 분석에는 고무차륜형 경전철 차량(K-AGT 6량 1편성)과 철제차륜형 경전철 차량(부산김해경전철 2량 1편성)을 각각 이용하였다.

(1) 검토절차 및 방법

국내 "철도설계기준(노반편, 2013)"에 제시하고 있는 주행열차하중 동적해석 검토절차에 따라 수행하였다. 열차속도는 10km/h~100km/h까지 10km/h씩 증속시키며 수행하였으며, 열차의 유효타격은 고무차륜형 및 철제차륜형 경전철 차량의 차량간 중심간격인 9.3m 및 13.5m를 각각 적용하였고, 감쇠비는 강구조를 감안하여 0.5%를 적용하였다.

a. 철도 교량의 주행열차하중에 대한 동적해석은 시간이력해석 혹은 모드중첩법에 의한 동적해석을 적용한다. 시간간격은 작아야(절점과 절점사이 3회 이상 각 축이 재하될 수 있도록) 하며, 동적해석은 교량 시점부터 출발하여 열차가 교량을 완전히 통과할 때까지 시간간격별로 수행되어야 한다.

b. 동적해석은 설계속도의 1.1배까지 10km/h 간격으로 수행한다. 주행열차하중에 대한 동적해석 전에 자유진동해석을 수행하여 공진을 일으킬 수 있는 임계속도를 미리 산정하고 이 속도에 대한 해석도 반드시 포함하여 수행해야 한다. 임계속도 산정은 아래 식과 같다.

$$V_{cr} = \omega_1 \times S_{eff}$$

여기서, ω_1은 교량의 첫번째 휨 고유진동수이며, S_{eff}는 열차의 지배적타격간격(객차 간 중심간격)

c. 대상열차하중은 해당 노선의 실제 운행열차에 대해 수행하며, 하중크기 및 축간격을 실 운행열차와 동일하게 적용한다.

d. 열차하중의 모델링은 연행이동집중하중으로 적용한다. 정밀해석이 필요한 경우 교량-열차 상호작용 고려가 가능한 다차원 열차 수치모델을 사용할 수 있으며 이 경우 해석 프로그램에 대한 신뢰성이 입증되어야 하며 이동집중하중에 의한 해석과 동시에 수행하여 비교해야 한다.

e. 교량의 모델링은 연속교의 경우 전체 경간 구성을 모델링하며, 단순교가 병행 구성될 경우 단순교 1개에 대해서만 해석을 수행하며 지간이 상이한 단순교에 대해서는 모두 검토를 수행한다.

f. 교량의 모델링은 가속도 제한값을 검토하는 위치에서 직접적인 응답을 얻을 수 있으며 교량 단면내에서 변형이 고려될 수 있도록 공간 뼈대요소 이상의 모델링 요소를 적용하여야 하며, 교량의 모델링에 사용되는 재료 및 단면특성치는 정적설계에서 적용한 값을 사용한다.

g. 탄성받침을 교량받침 장치로 사용할 경우 강성이 무한대인 지점처리를 해서는 안 되며, 스프링요소 등을 사용하여 해당 탄성받침의 강성을 적용하여 해석해야 한다.

h. 동적해석 시 자중 및 궤도구조의 질량 등 2차 고정하중을 포함한 모든 부재의 질량이 고려되어야 한다.

I. 동적해석 시 하중재하는 단선, 복선교량에 관계없이 같이 단선재하로 하되 교량에서의 편심효과가 고려될 수 있도록 재하한다.

j. 도상에 의한 하중의 분포효과를 고려하여 모델링할 수 있다.

k. 교량형식 별 감쇠비 적용은 아래 표를 따른다. 감쇠비는 각 형식별 감쇠비의 상한값이며, 이 이하의 값을 적용해야 한다. 단, 실험 등에 의한 정밀 분석 자료가 있을 경우 조정된 감쇠비를 적용할 수 있다.

〈구조형식별 감쇠비〉

교량형식	감쇠비(%)	
	경간<20m	경간≥20m
강구조(강판형교)	0.5+0.125(20-L)	0.5
강합성구조, PSC 구조	1.0+0.07(20-L)	1.0
철근콘크리트	1.5+0.07(20-L)	1.5

(2) 주행안전성 및 승차감 검토기준

국내 “철도설계기준(노반편, 2013)” 에 제시하고 있는 철도교량의 주행열차 하중에 대한 주행안전성 및 승차감 검토기준은 아래와 같다. 본 연구에서는 신형식 경전철 고가구조물의 연직가속도, 연직처짐 및 면틀림에 대한 검토를 수행하였다.

a. 교량 상판의 연직가속도

자갈궤도 : 0.35g

콘크리트궤도 : 0.5g

b. 교량의 연직처짐

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

c. 면틀림

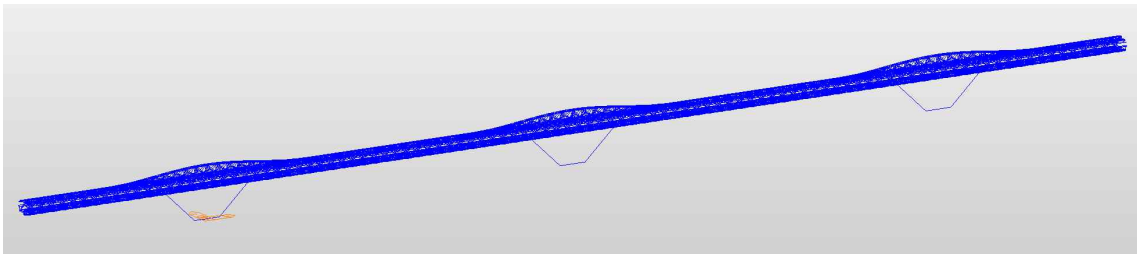
설계속도 (km/h)		면틀림 (mm/m)	3m기준 면틀림 (mm/3m)
표준열차 하중재하	V ≤ 200	1.0	3.0
	200 < V	0.5	1.5
실 운행열차 동적해석		0.4	1.2

(3) 고유진동수 및 임계속도 분석

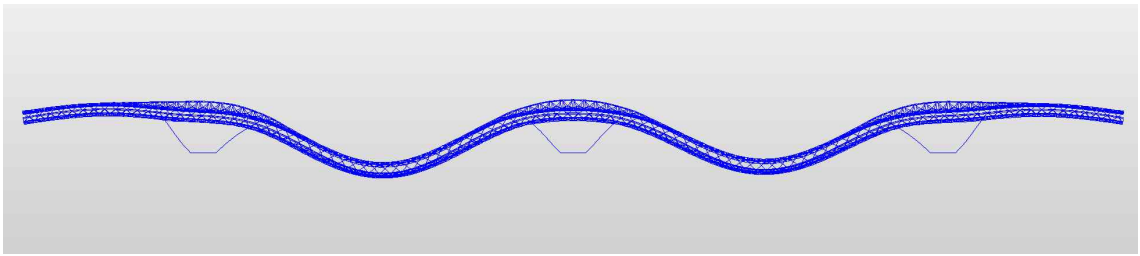
최장경간(200m) 신형식 경전철 고가구조물에 대한 동적해석을 위하여, 고가구조물과 주행궤도(고무차륜용 주행로 및 철체차륜용 궤도)를 공간뼈대요소를 사용하여 3차원 모델링을 수행하였다. 교량의 자유진동해석(free vibration analysis)을 수행하여 지배적인 첫 번째 휨 고유진동수를 구하면 특정 축 간격을 가진 열차하중에 대한 공진(resonance)을 예상할 수 있는 열차 속도를 구할 수

있다. 철도교량의 이동하중 해석 전 자유진동해석을 통해 공진이 발생되는 임계속도를 파악하였고, 임계속도를 해석 범위 내에 포함시켜 해석을 수행하였다.

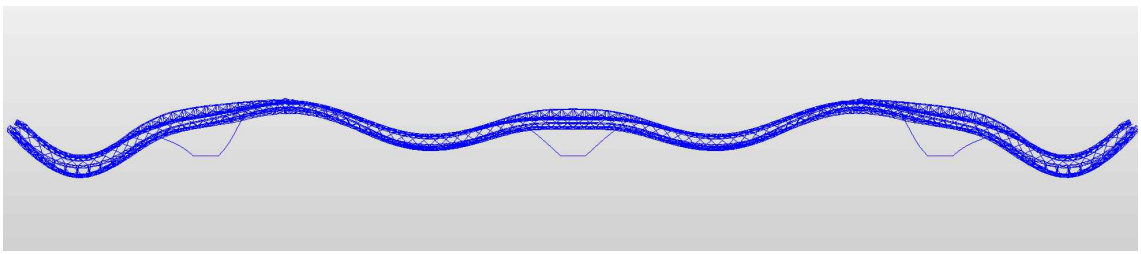
아래 그림에 고무차륜용 및 철제차륜용 신형식 경전철 고가구조물의 자유진동해석을 통해 구한 각각의 진동모드 형상 및 고유진동수를 나타내었다. 가장 지배적인 유효타격간격으로 차량 중심간 거리를 이용하여 임계속도를 구하였다.



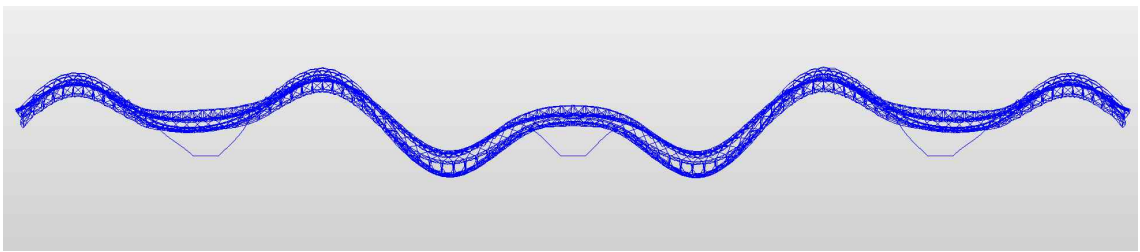
(a) 3차원 모델링



(b) 1차 모드(고무차륜용: ω=0.926Hz, 철제차륜용: ω=0.908Hz)



(b) 2차 모드(고무차륜용: ω=1.722Hz, 철제차륜용: ω=1.691Hz)



(b) 3차 모드(고무차륜용: ω=2.088Hz, 철제차륜용: ω=2.025Hz)

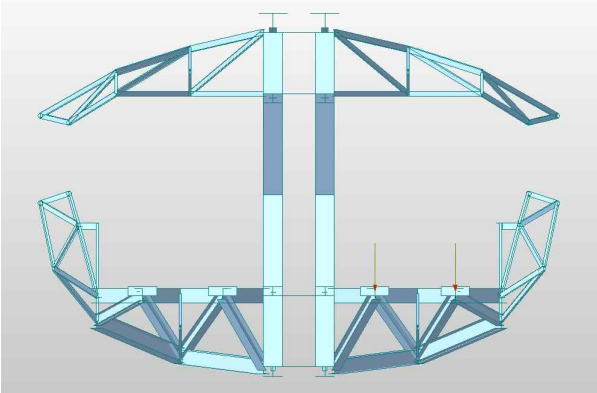
<신형식 고가구조물 모델링 및 고유진동수>

<신형식 고가구조물의 임계속도(고무차륜용)>

구분	1차고유진동수(Hz)	객차중심간거리(m)	임계속도(km/h)
고무차륜용 고가구조물	0.926	9.3	32.1
철제차륜용 고가구조물	0.908	13.5	44.1

(4) 주행열차하중에 의한 동적안전성 검증결과

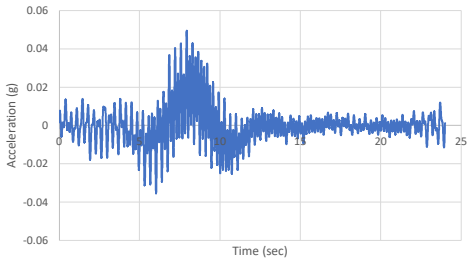
동적하중 재하는 아래 그림과 같이 이동 윤하중으로 단선재하하여 수행하였다. 동적성능을 평가하기 위한 기준으로 거더 중앙부 연직처짐 및 최대 연직가속도, 면틀림에 대한 응답을 분석하여 주행안전성 및 승차감에 대한 평가를 수행하였다.



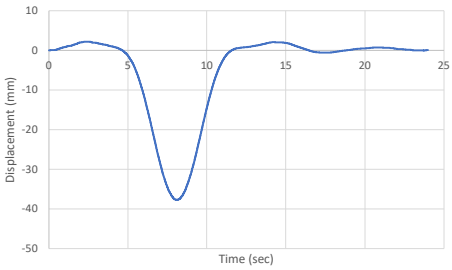
<단선 이동하중 재하>

(가) 고무차륜용 고가구조물의 동적응답 분석결과

최대 가속도는 0.007g, 최대 연직처짐은 약 37mm, 최대 면틀림은 0.34mm로 나타나 각각 상기 허용기준치 이내를 충분히 만족함을 알수 있다. 속도변화에 의한 영향은 크지 않으며 동적하중에 의한 영향이 작아 임계속도 대역에서 공진에 의한 영향도 작게 나타났다.



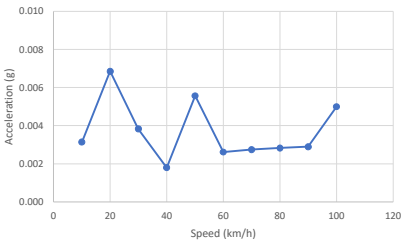
<가속도 이력(V=100km/h)>



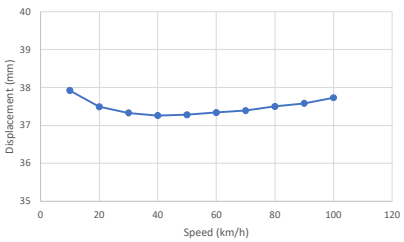
<연직처짐 이력(V=100km/h)>

속도 (km/h)	가속도(g)	연직처짐 (mm)	면틀림 (mm)
10	0.003	37.92	0.33
20	0.007	37.49	0.33
30	0.004	37.33	0.33
40	0.002	37.26	0.34
50	0.006	37.28	0.33
60	0.003	37.34	0.33
70	0.003	37.39	0.33
80	0.003	37.50	0.33
90	0.003	37.58	0.33
100	0.005	37.73	0.33
허용치	0.500 (O.K.)	333.33 (O.K.)	1.20 (O.K.)

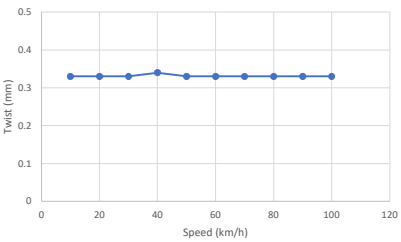
<고무차륜용 신형식 경전철 고가구조물의 열차속도별 최대 동적응답>



(a) 가속도



(b) 연직처짐

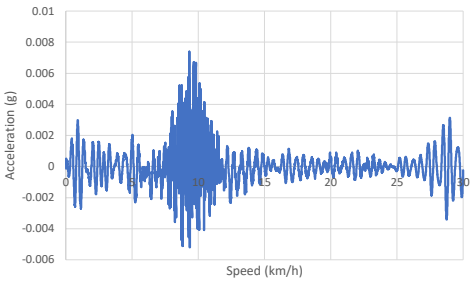


(c) 면틀림

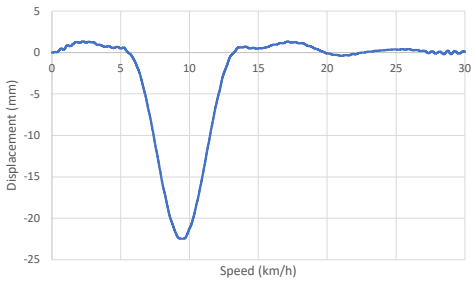
<고무차륜용 신형식 경전철 고가구조물의 열차속도별 동적응답 그래프>

(나) 철제차륜용 고가구조물의 동적응답 분석결과

최대 가속도는 0.008g, 최대 연직처짐은 약 23mm, 최대 면틀림은 0.25mm로 나타나 각각 상기 허용기준치 이내를 충분히 만족함을 알수 있다. 속도변화에 의한 영향은 크지 않으며 동적하중에 의한 영향이 작아 임계속도 대역에서 공진에 의한 영향도 작게 나타났다.



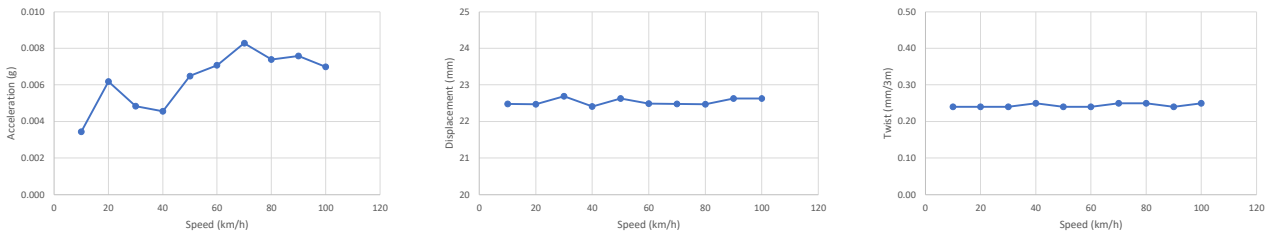
<가속도 이력(V=80km/h)>



<연직처짐 이력(V=80km/h)>

속도 (km/h)	가속도(g)	연직처짐 (mm)	면틀림 (mm)
10	0.003	22.48	0.24
20	0.006	22.47	0.24
30	0.005	22.69	0.24
40	0.005	22.41	0.25
50	0.007	22.63	0.24
60	0.007	22.49	0.24
70	0.008	22.48	0.25
80	0.007	22.47	0.25
90	0.008	22.63	0.24
100	0.007	22.63	0.25
허용치	0.500 (O.K.)	333.33 (O.K.)	1.20 (O.K.)

<철제차륜용 신형식 경전철 고가구조물의 열차속도별 최대 동적응답>



(a) 가속도 (b) 연직처짐 (c) 면틀림

<철제차륜용 신형식 경전철 고가구조물의 열차속도별 동적응답 그래프>

(다) 동적안전성 검증결과

고무차륜형 및 철제차륜형 경전철 차량 주행시 신형식 고가구조물의 동적거동 분석 결과 연직가속도, 연직처짐 및 면틀림 모두 허용치 이내의 충분히 안전측에 있음을 확인하였다. 일반적으로, 교량 공진 현상은 열차의 연행하중이 일정간격을 가지고 주기적으로 재하되는 경우에 있어 교량의 고유진동수와 하중재하 진동수가 일치하는 경우 발생하나, 경전철 특성상 보통 1~2량이 주행하는 관계로, 경전철 고가구조물에서 실제 공진현상이 발생되기 어려우며, 경전철 고가구조물 특성상 사하중 지배 구조로 동적하중에 의한 영향이 작아 임계속도 대역에서의 공진에 의한 영향이 작아 동적안전성 측면에서 전혀 문제되지 않음을 확인하였다.

라. 내진·내풍 안전성 검토

(1) 내진 안전성 검토(내진 설계)

(가) 일반 사항

내진성능 평가는 내진설계기준 공통적용사항(2017)를 근간으로, 기존교량의 내진성능 평가 및 향상요령에 따르며, 설계기준에 규정된 지진구역계수, 지반계수, 설계응답스펙트럼 이상의 성능 기준을 적용한다.

(나) 설계가속도 및 응답스펙트럼

- 지진구역 및 지진구역계수

<지진구역 및 지진구역계수>

지진구역	행정구역		지진구역계수(Z)
Ⅰ	시	서울, 인천, 대전, 부산, 대구, 울산, 광주, 세종	0.11g
		경기, 충북, 충남, 경북, 경남, 전북, 전남, 강원 남부*	
Ⅱ	도	강원 북부**, 제주	0.07g

* 강원 남부 : 영월, 정선, 삼척, 강릉, 동해, 원주, 태백

** 강원 북부 : 홍천, 철원, 화천, 횡성, 평창, 양구, 인제, 고성, 양양, 춘천, 속초

- 위험도계수

재현주기(년)	50년	100년	200년	500년	1,000년	2,400년	4,800년
위험도계수(I)	0.4	0.57	0.73	1.0	1.4	2.0	2.6

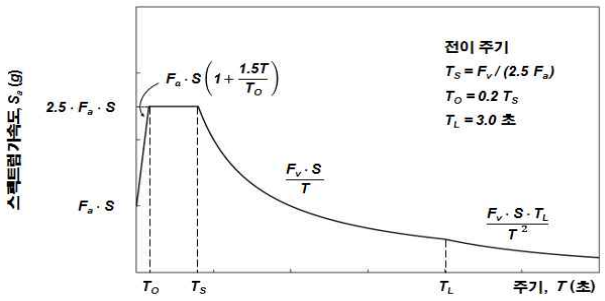
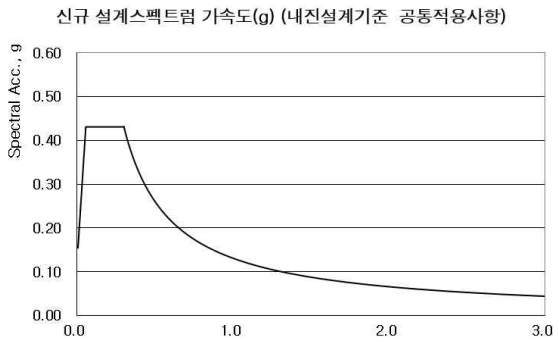
- 지반의 분류

지반종류	지반종류의 호칭	분류기준	
		기반암 깊이, H (m)	토층 평균 전단파속도, VS,Soil (m/s)
S1	암반 지반	1 미만	-
S2	얕고 단단한 지반	1~20 이하	260 이상
S3	얕고 연약한 지반	260 미만	
S4	깊고 단단한 지반	20 초과	180 이상
S5	깊고 연약한 지반	180 미만	
S6	부지 고유의 특성 평가 및 지반응답해석이 요구되는 지반		

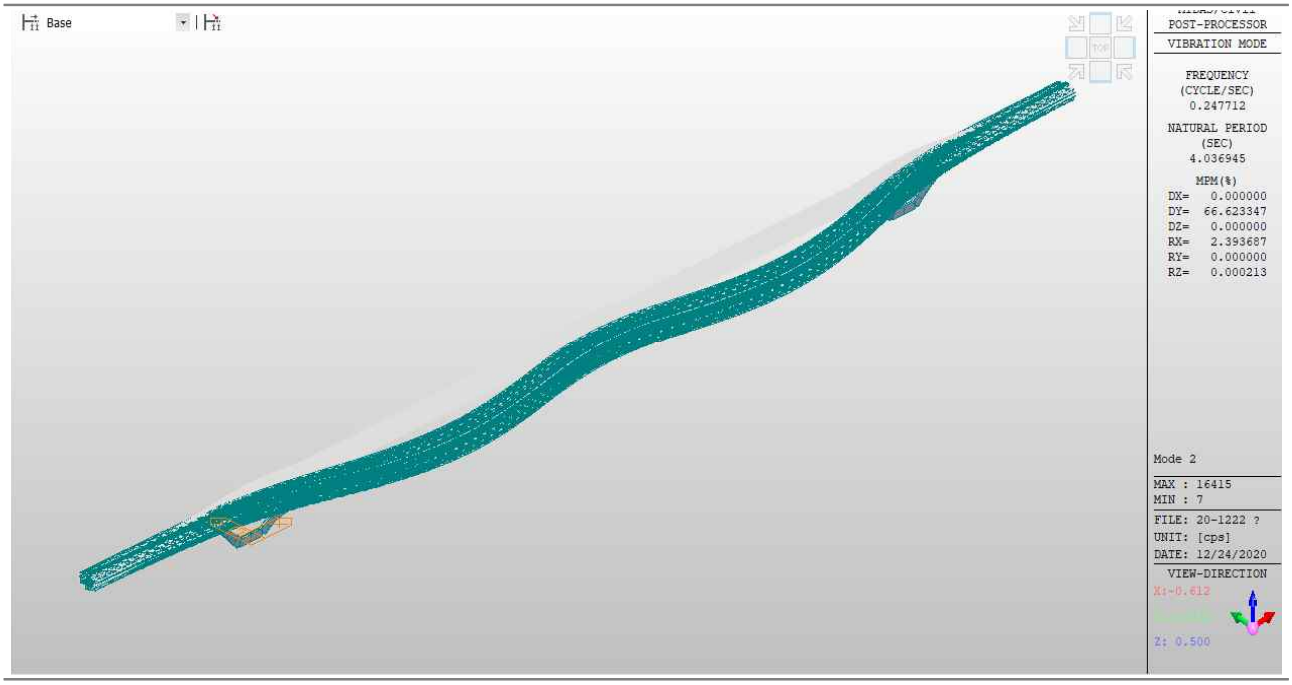
(다) 설계응답스펙트럼(S2) 산정

- 내진성능 평가기준 지진의 가속도계수(S) : S = Z × I
- 지진구역은 Ⅰ 지역
- 지진구역계수(Z)는 0.11
- 지진위험도계수(I)는 1.4(재현주기 1000년)
- 가속도 계수 : S = 0.11×1.4 = 0.154g

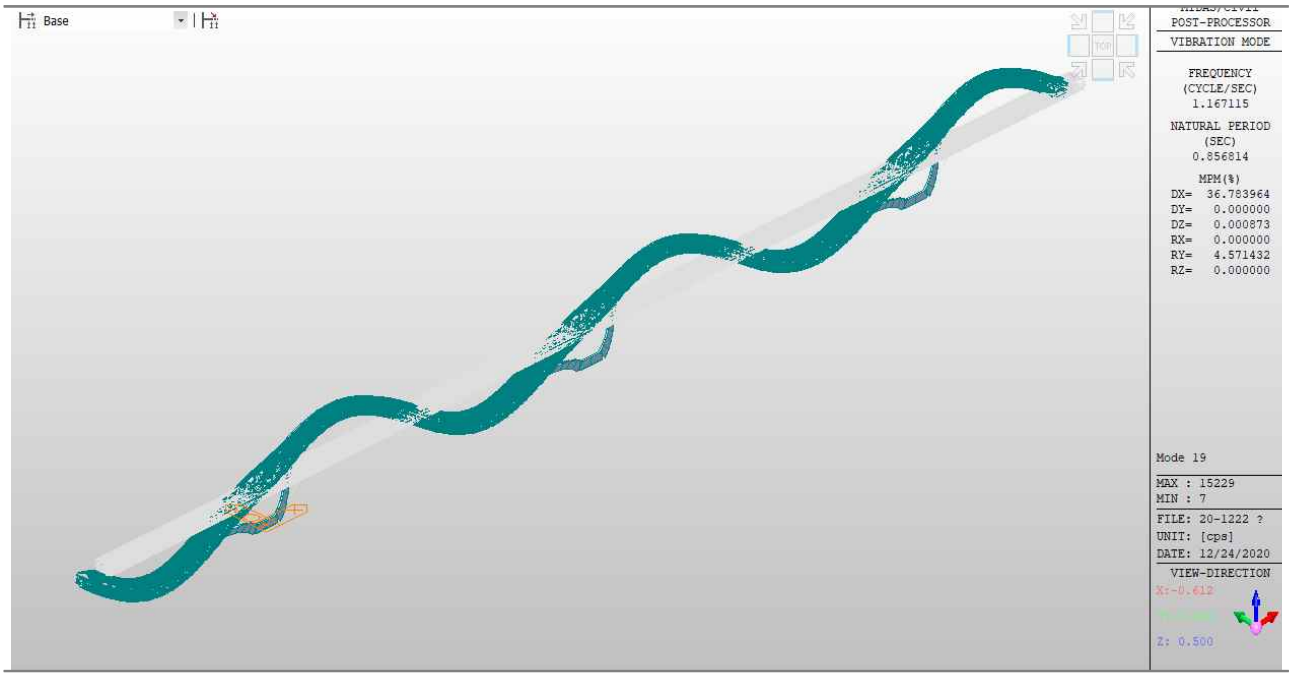
<설계 응답스펙트럼>

표준설계응답스펙트럼(내진설계기준 공통적용사항)	설계응답스펙트럼(S2)
	

(라) 지진시 모드해석



< 2차 모드 : 교축직각방향 >



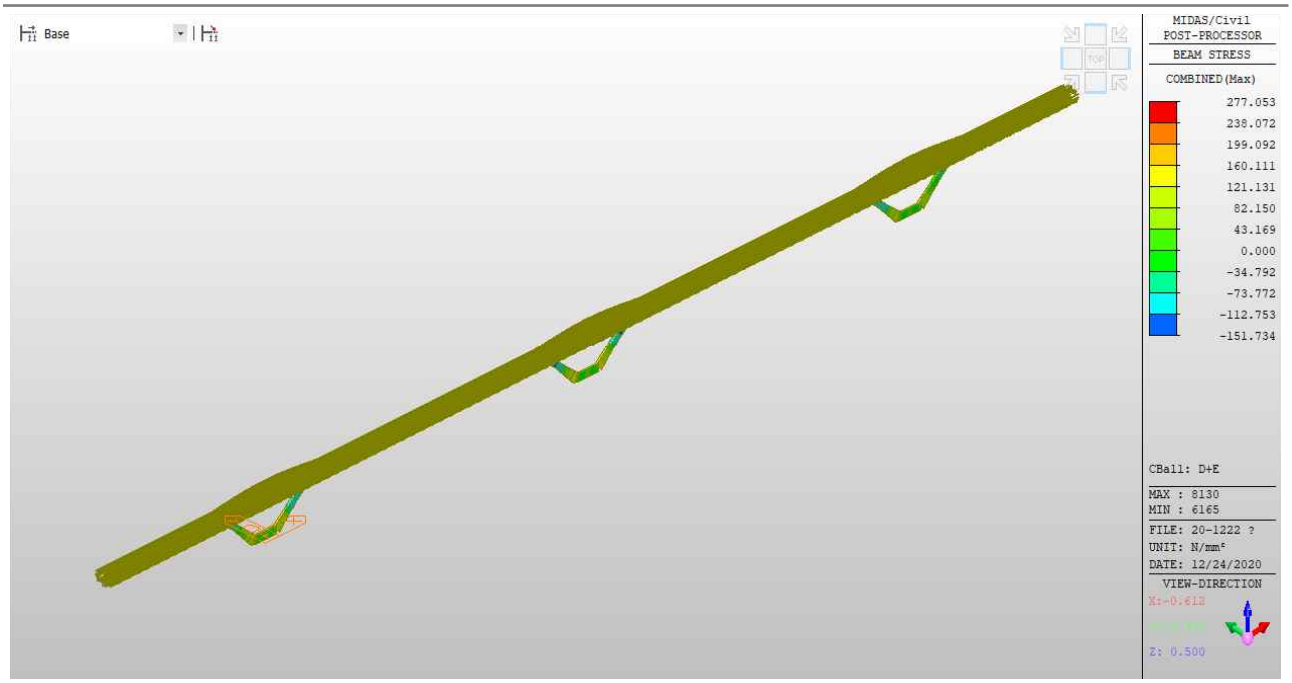
< 19차 모드 : 교축방향 >

(마) 지진시 응력 검토

지진시 발생하는 하중에 의한 교각부의 응력은 전반적으로 허용응력 내에서 문제가 없으며, 백본과 연결되는 부분에서의 응력 집중도 허용응력 상한치(215×1.5=322.5MPa) 이내로 내진 안전성을 확인하였다.

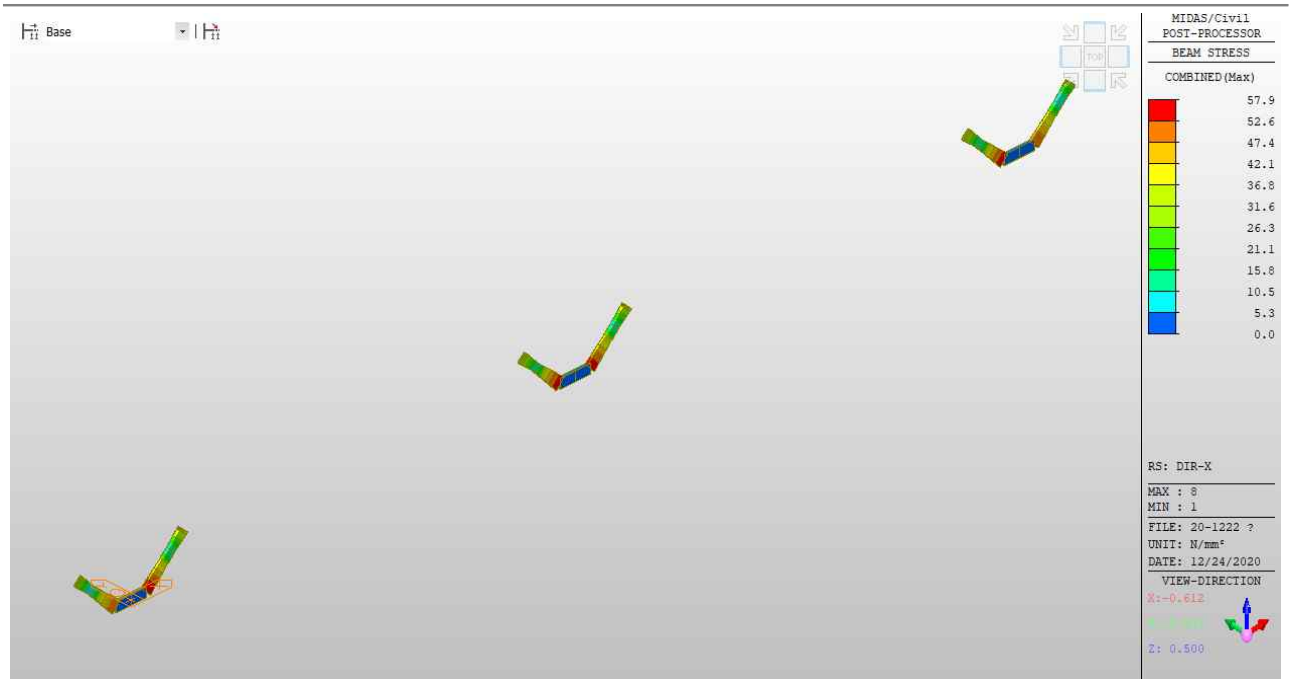
<지진시 응력 검토 결과>

구 분	발생응력
검토하중조합 : 자중 +지진하중	인장 : 277.053 MPa, 압축 : 151.734 MPa
허용응력 : SM520 = 215MPa	지진시 허용응력 할증계수 : 1.5

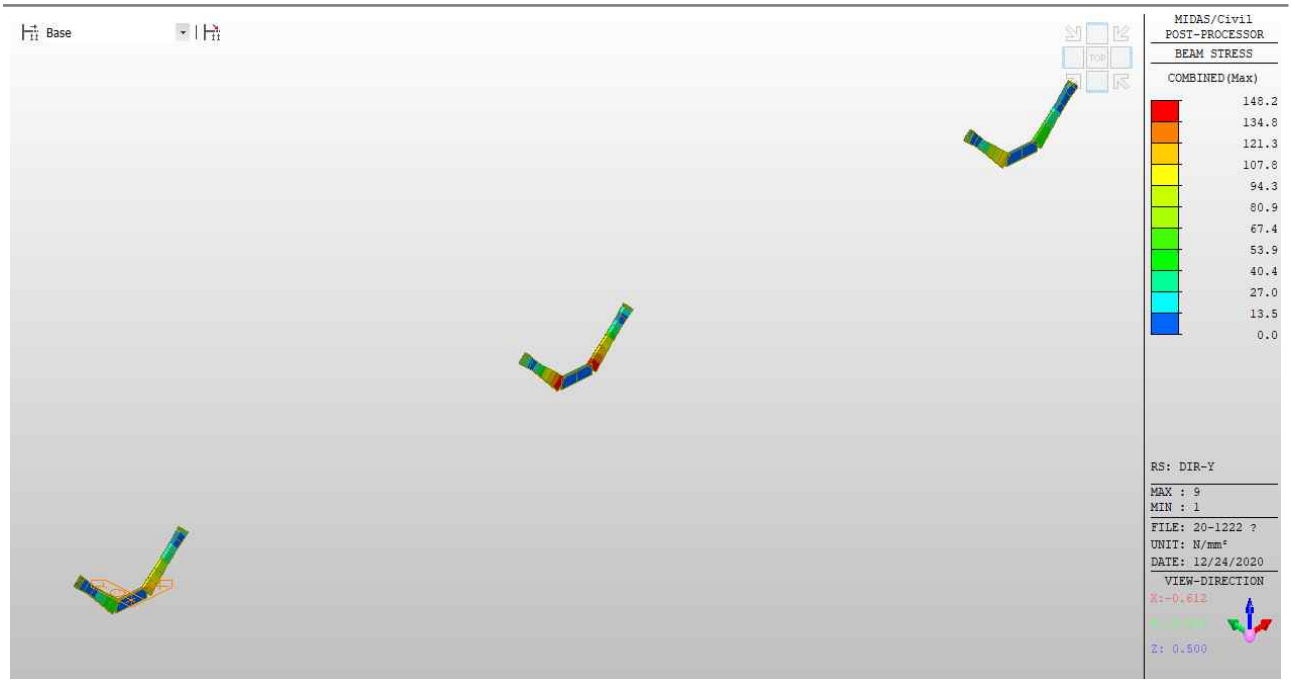


< 최대 발생응력 >

- 종방향(Dir-X) 지진하중에 의한 하부구조 응력 : 57.9 MPa



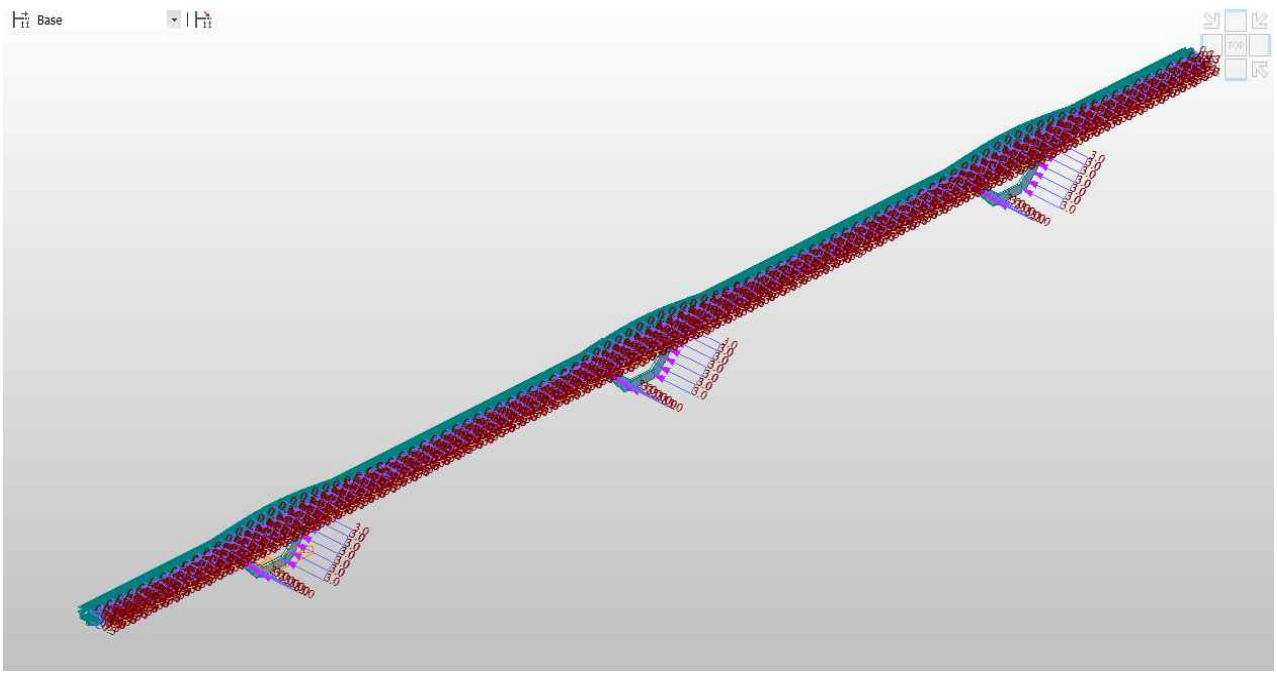
- 횡방향(Dir-Y) 지진하중에 의한 하부구조 응력 : 148.2 MPa



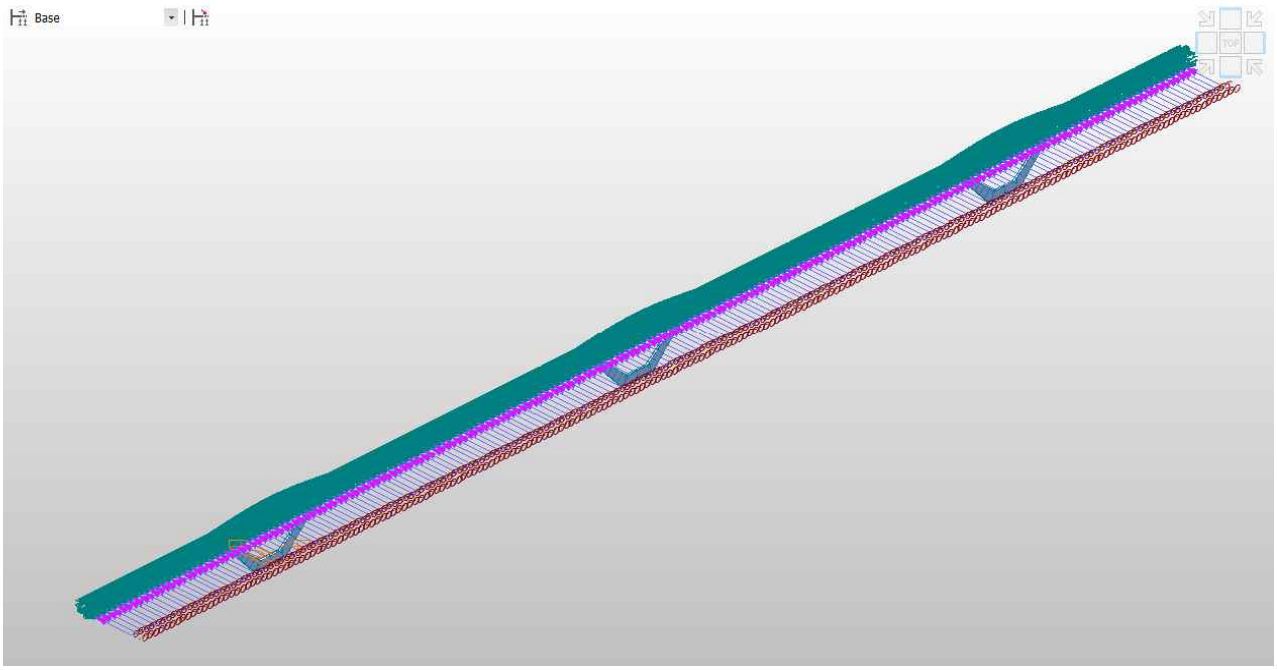
(2) 내풍 안전성 검토(내풍 설계)

(가) 하중재하

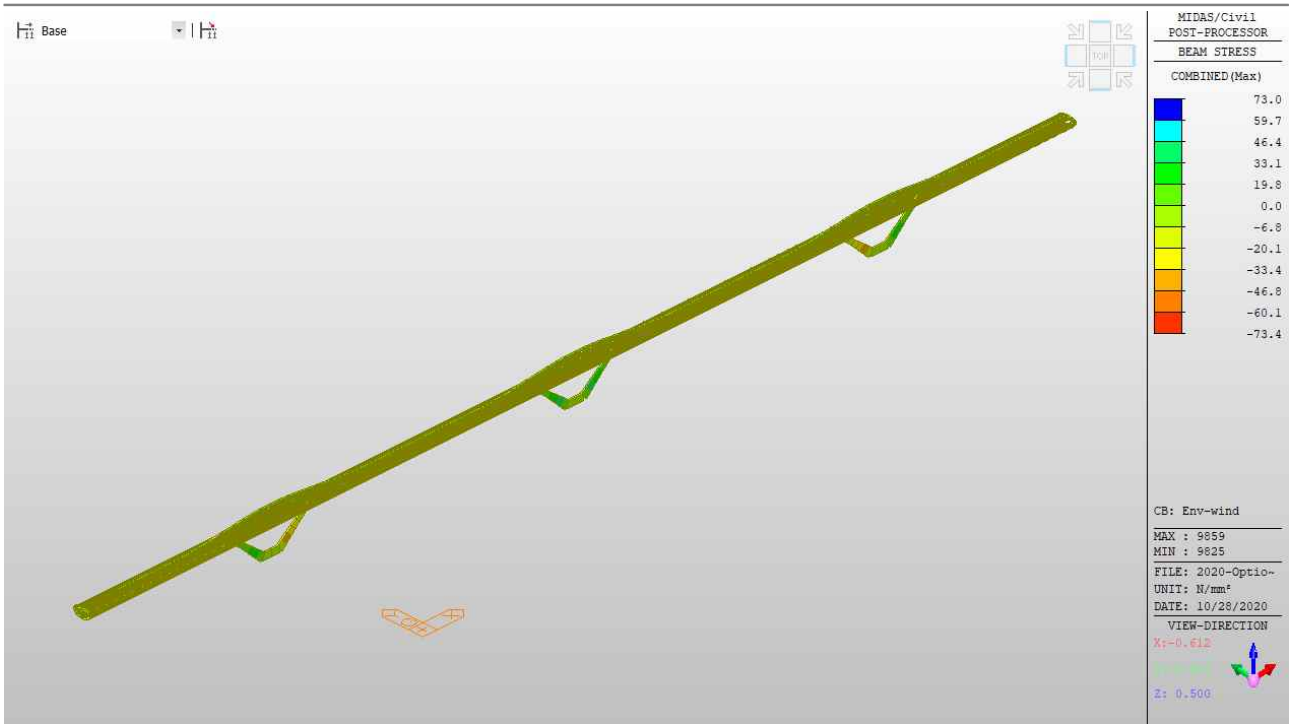
- 풍하중 재하



- 차량 풍하중



(나) 풍하중 작용시 응력검토



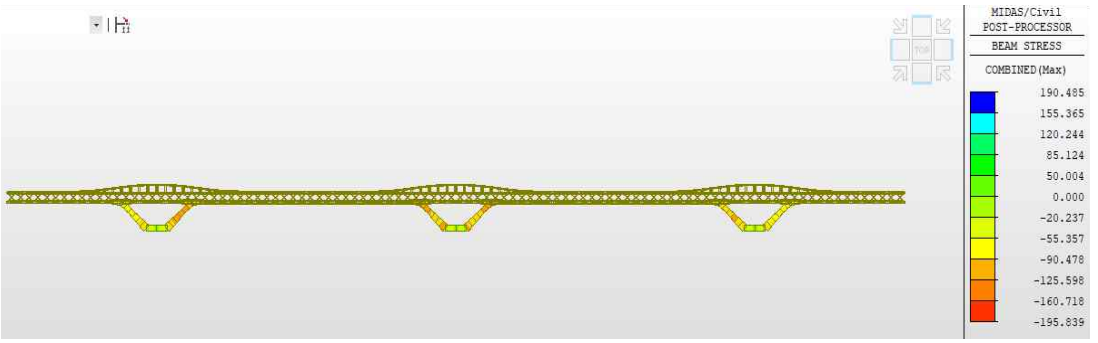
인장 : 86.841 MPa	압축 : -78.836 MPa

(다) 하중 조합에 따른 부재별 풍하중 영향력 검토

다음과 같은 풍하중에 따른 하중조합에 대해 주요 부재별 영향력을 검토하였다.

- Comb-01 : 고정하중 + 활하중 + 풍하중
- Comb-02 : 고정하중 + 활하중 + 풍하중 + 차량 풍하중

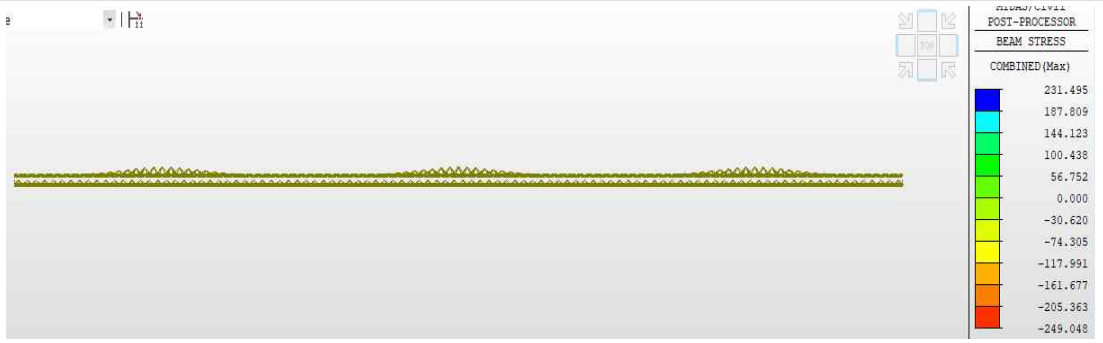
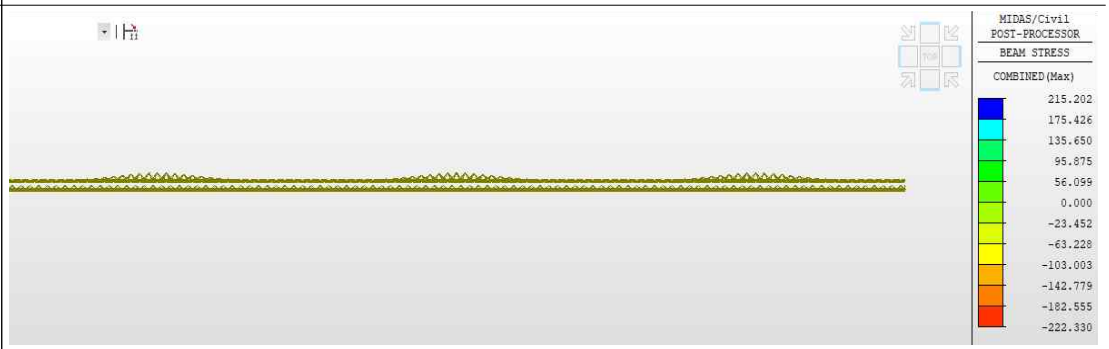
a. 백본

구 분	해 석 결 과
Comb-01	
Comb-02	

<Backbone 풍하중 영향력 검토>

구 분				Comb-01	Comb-02	비 고
백 본	X-Type	중앙경간 지점부	인장	154.904	155.310	
			압축	-182.655	-177.759	
		중앙경간 중앙부	인장	115.728	120.939	
			압축	-129.686	-130.314	
		측경간 중앙부	인장	49.135	49.658	
			압축	-41.925	-49.906	
		측경간 단부	인장	98.194	102.081	
			압축	-159.290	-163.590	
	상하현재	상현 상단	인장	170.845	173.520	
			압축	-195.839	-200.498	
		상현 하단	인장	165.304	165.766	
			압축	-170.045	-174.510	
		하현 측경간	인장	90.990	94.256	
			압축	-162.701	-161.757	
		하현 중앙경간	인장	135.608	137.392	
			압축	-180.348	-181.633	
	허 용 응 력			268.8	290.1	
				O.K	O.K	

b. 아웃리거

구 분	해 석 결 과
Comb-01	
Comb-02	

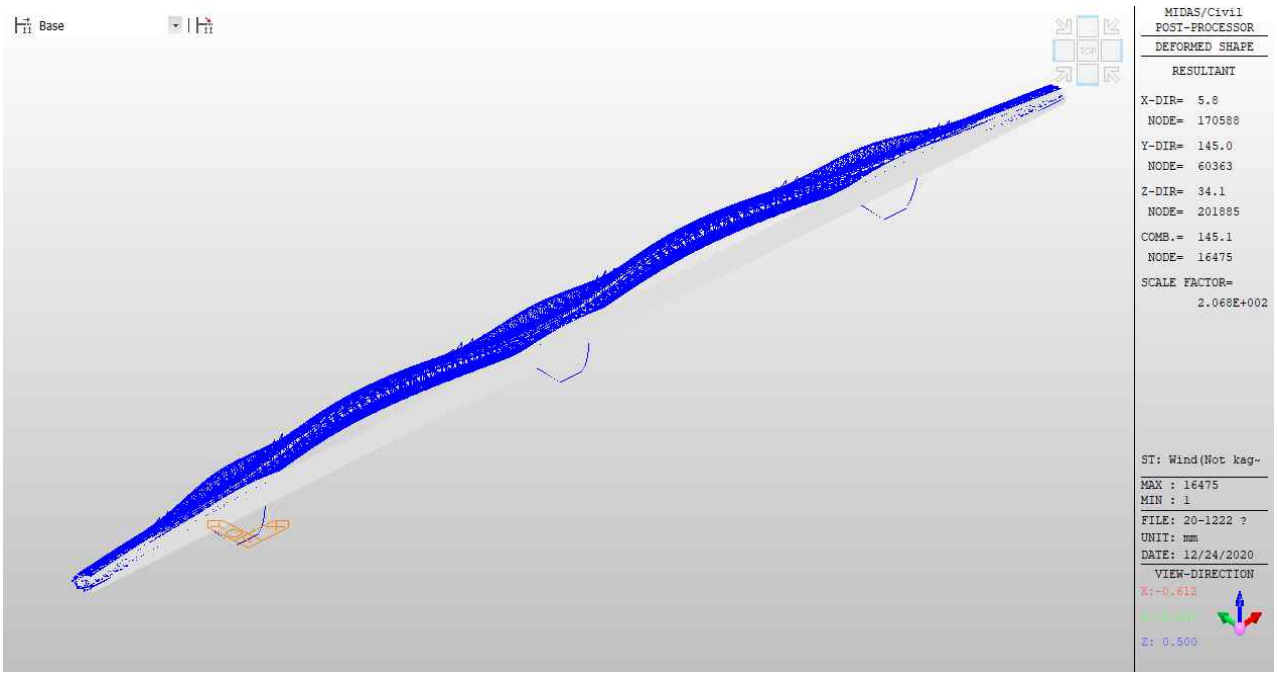
<아웃리거 풍하중 영향력 검토>

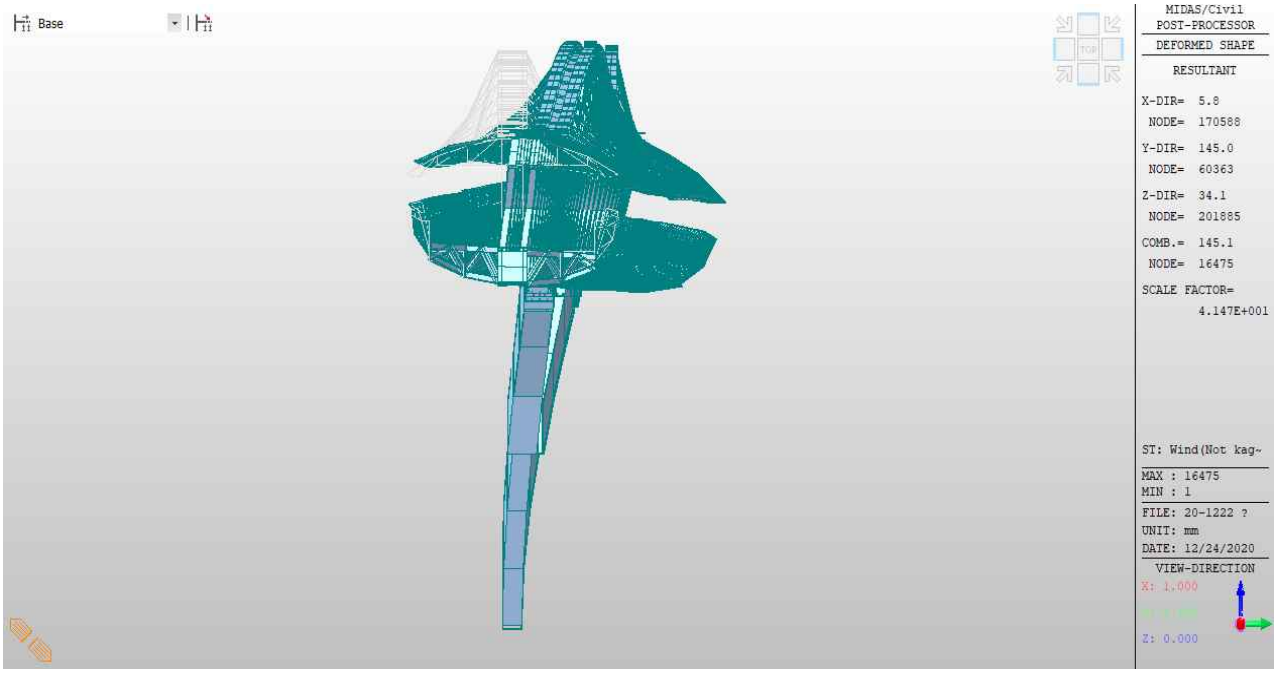
구 분				Comb-01	Comb-02	비 고
아웃리거	버터플라이	상현 내측	인장	121.622	129.459	
			압축	-147.834	-161.622	
		상현 외측	인장	76.874	104.416	
			압축	-141.158	-164.278	
		하현 내측	인장	83.937	99.652	
			압축	-103.813	-131.295	
		하현 외측	인장	72.365	100.121	
			압축	-113.599	-132.780	
	상현부재	지붕재	인장	231.495	215.202	
			압축	-249.048	-222.330	
		수평사재	인장	149.421	153.961	
			압축	-163.207	-161.448	
		내측 수직사재	인장	160.778	164.079	
			압축	-191.874	-184.568	
		외측 수직사재	인장	74.851	72.210	
			압축	-71.804	-87.132	
	하현부재	바닥틀	인장	74.724	180.231	
			압축	-115.713	-119.584	
		바닥틀 사재	인장	195.464	159.025	
			압축	-160.481	-160.491	
		대피통로 지지대	인장	74.598	110.088	
			압축	-97.539	-122.379	
		대피통로 사재	인장	48.703	60.341	
			압축	-38.561	-54.585	
	허 용 응 력			268.8	290.1	
				O.K	O.K	

(라) 풍하중 재하에 의한 횡방향 변위 검토

신형식 경전철 고가구조물의 풍하중 재하시 하부구조의 휨에 의한 횡방향 변위가 지배적적인 것을 알 수 있으며, 상부구조의 최대 횡방향 변위는 145mm로서, 허용치 L/600(=333mm) 이내로 풍하중에 대한 안전성을 확인하였다. 공탄성모형을 이용한 풍동실험에 의한 내풍안전성 검증은 2단계 후속 연구에서 추진될 계획이다.

- 풍하중 재하에 의한 상부구조 횡방향 변위 : 145 mm



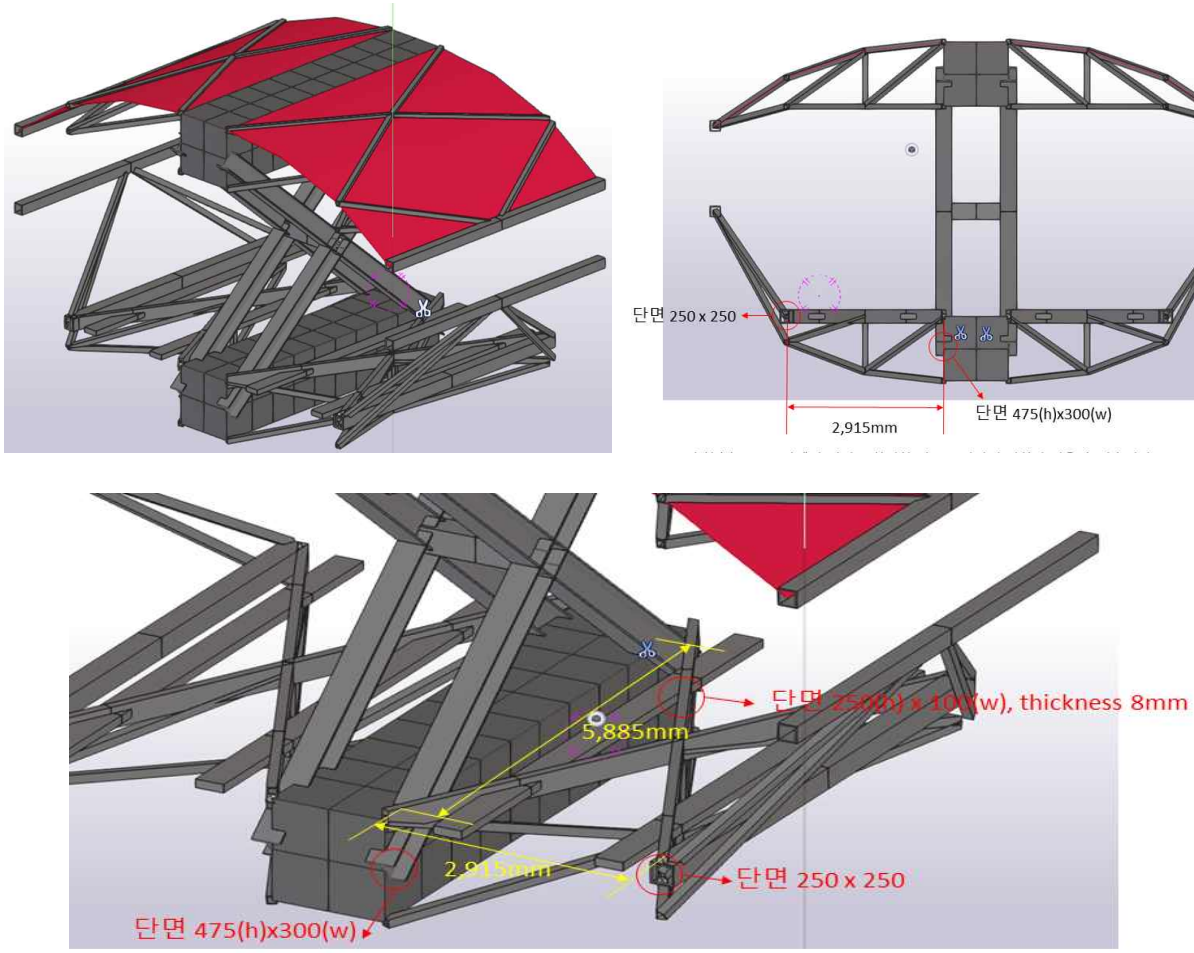


마. 경량 신소재를 이용한 상부구조 경량화 검토

(1) 경전철 신형식 고가구조물의 FRP 바닥판 설계 검토

(가) FRP 바닥판 설계 조건 및 위상최적화 도출

① 신형식 경전철 고가구조 설계(안)



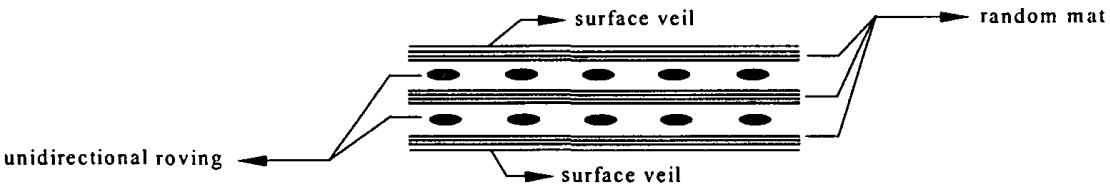
<신형식 경전철 고가구조 바닥판 설치 공간>



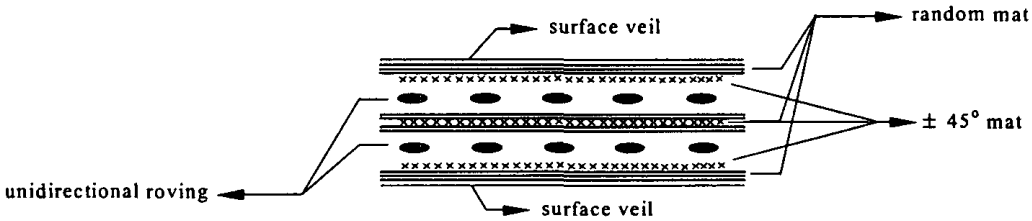
<KAGT 경전철 궤도 구조>

② 적층설계에 따른 이방성 특성치 도출

- 상하부 플랜지 :일방향 섬유 Roving + 무방향성 매트(Random mat)



- 웹 : 일방향 섬유 Roving + 무방향성 매트(Random mat) + ±45° 직조매트 추가
(평면내 전단변형에 저항하기 위하여)



- 물성치

구분		물성치
탄성계수	섬유방향(E1)	30GPa
	섬유직각방향(E2)	7.0GPa
전단탄성계수		3.5GPa

③ 위상최적화를 통한 형상설계

㉮ 위상최적화 개념

구조물의 위상학적 기하형상을 주어진 조건에 가장 적합한 형태로 만든 과정으로 경계면의 치수만 정해진 상태에서 내부의 모양을 최적화함. 공학에서 이용하는 위상최적화 방법은 일반적으로 주어진 영역을 유한개의 요소로 나누고, 각 요소를 채워진 요소과 빈요소로로 결정하는 과정임.

㉯ 위상최적화 알고리즘

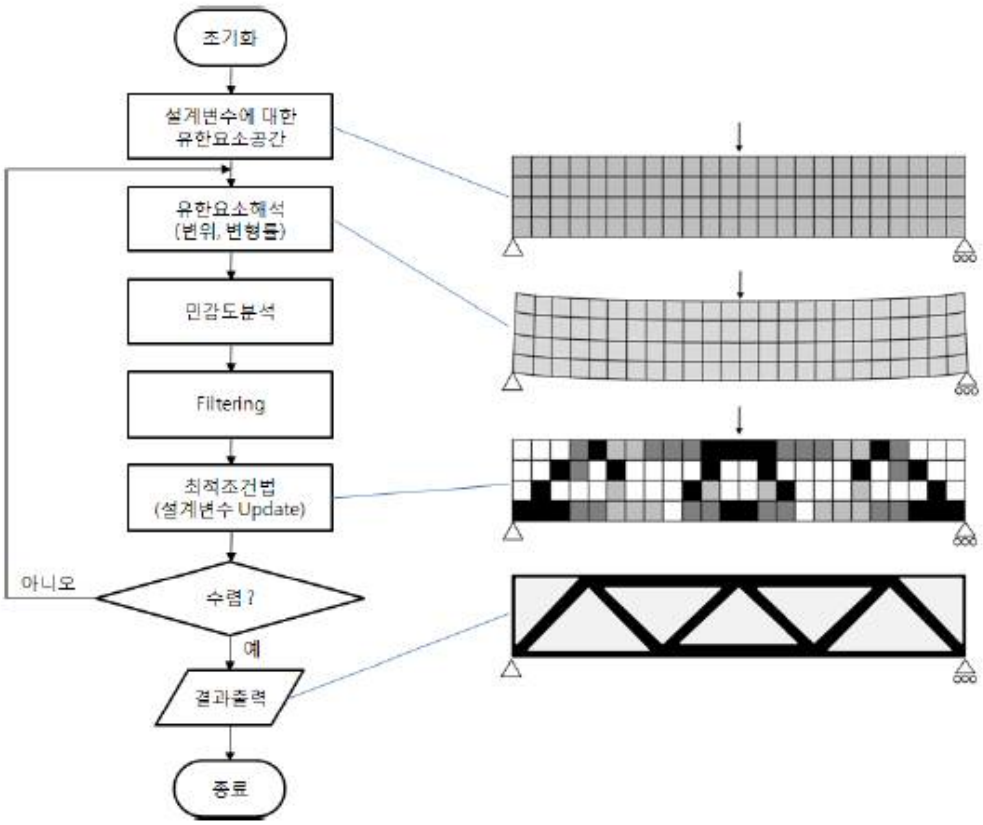
- Step 1 : 기준공간에 균질한 물성으로 이루어진 구조물을 가정함.
- Step 2 : 재료의 밀도와 입력한 계수에 의해 요소의 탄성계수가 확정되도 유한요소해석을 통해 구조물에 대한 변형률과 변위를 계산한다.
- Step 3 : 유한요소해석에서 구한 변위값을 가지고 설계변수에 대한 목적합수의 민감도 해석을 수행한다. 본 해석에서 목적함수(f)는 지간에 대한 바닥판의 단면적(mm2)이며, 다음과 같다.

$$f = n \times ((200 - t_1 - t_2) \times t_3 + (t_4 \times 200 \times t_4 \div \sqrt{(t_5^2 - 200^2)})) + L(t_1 + t_2)$$

- Step 4 : 수치적인 특이성을 제거하기 위하여 필터링방법에 으한 민감도를 재차

구한다.

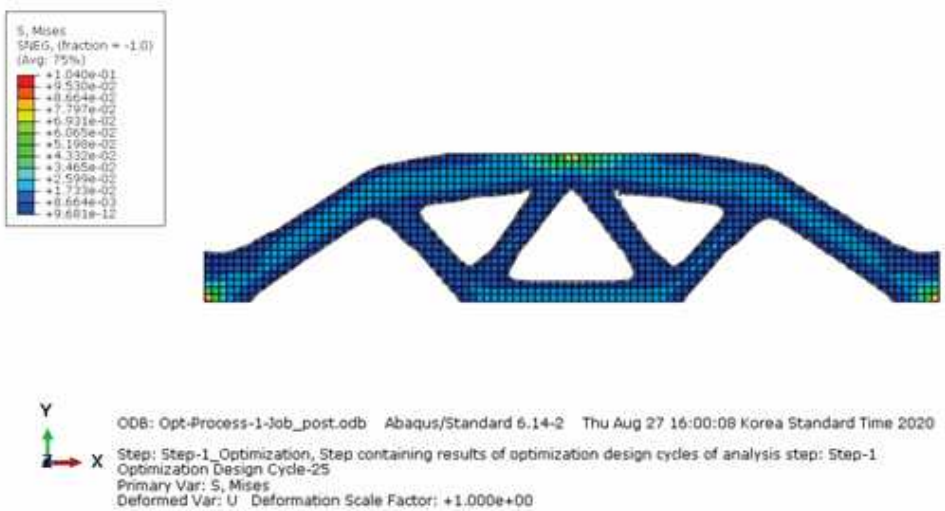
- Step 5 : 요소안에서 균일하게 분포하는 재료밀도 값의 변화에 따른 목적함수의 필터링 민감도를 이용하여 최적조건법에 의해 최적설계변수 랎을 갱신한다.
- Step 6 : 수렴조건에 수렴할 때 까지 Step 2로 회귀한다.

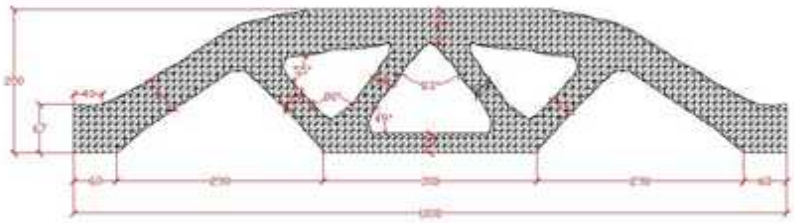


<위상 최적화 순석도>

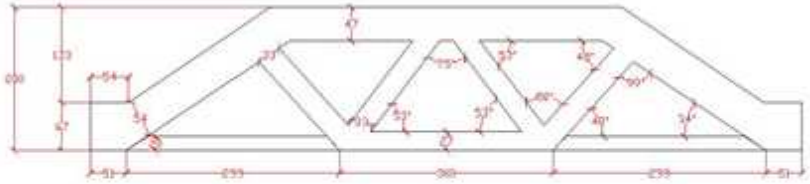
㉮ 사용프로그램 : ABAQUS 14.1 (No of Iteration 15, 50, 100)

- Cycle 15



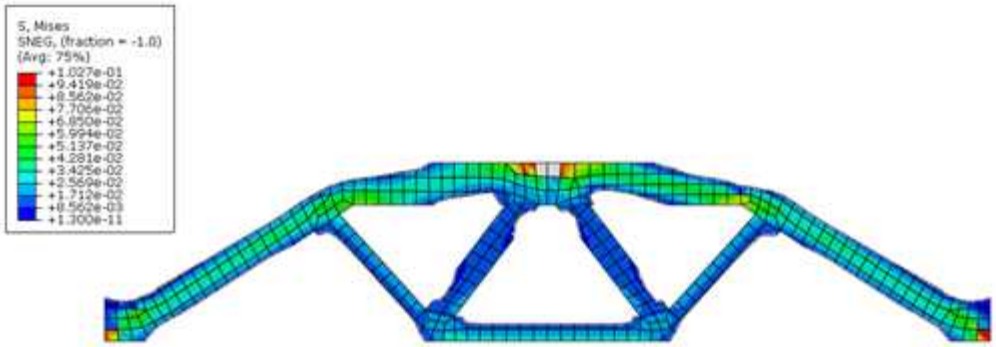


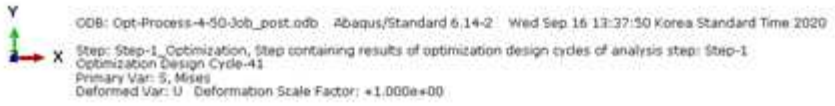
Topology cycle 15

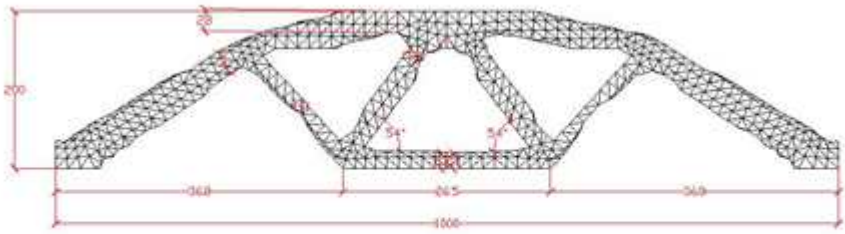


Topology Redesign 15

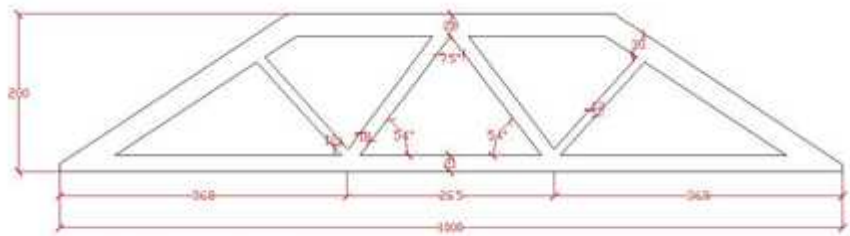
- Cycle 50





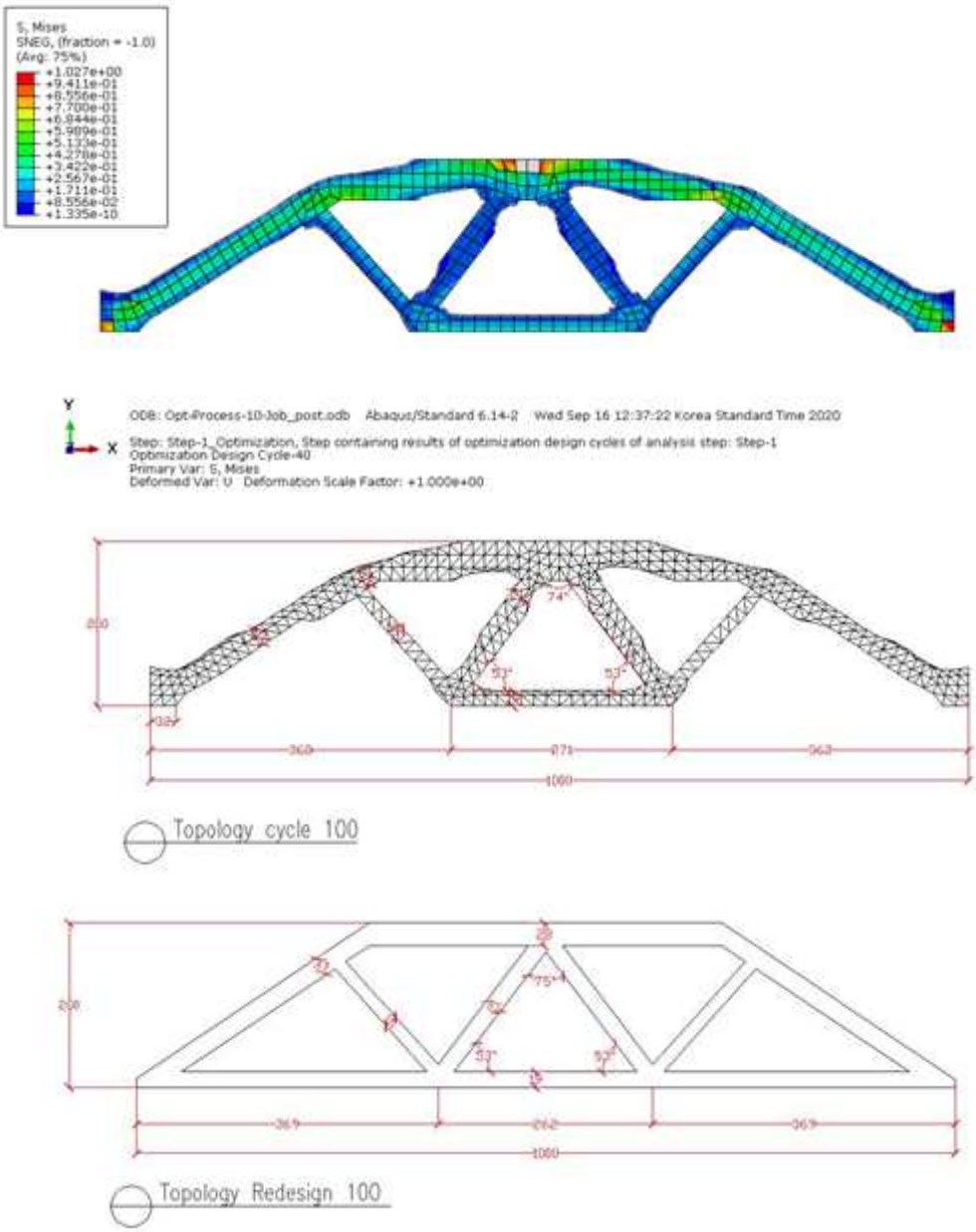


Topology cycle 50

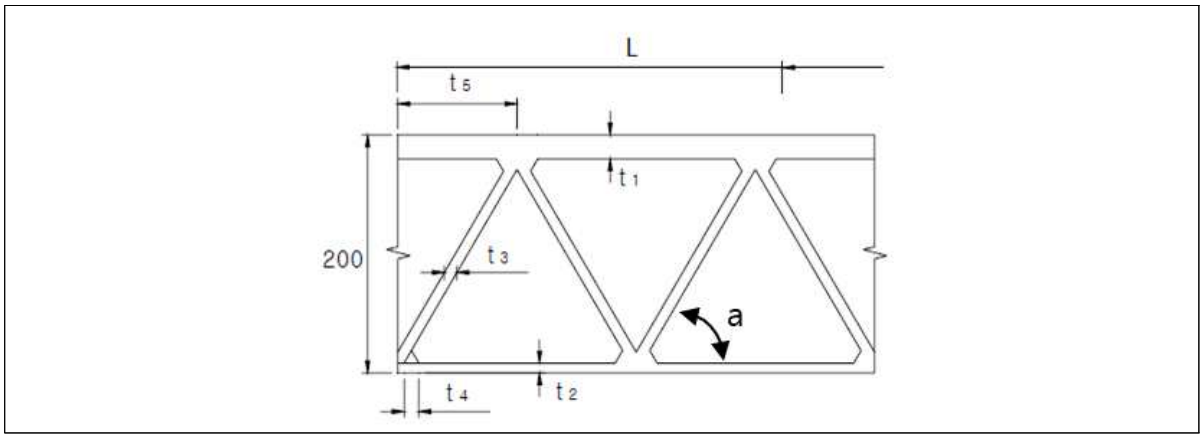


Topology Redesign 50

- Cycle 100



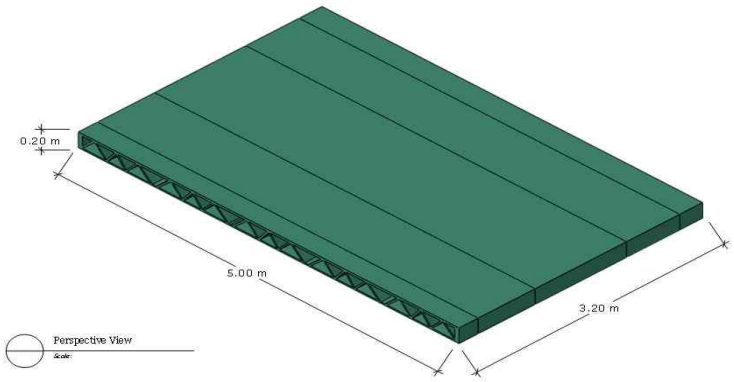
설계변수	표시	Cycle 15	Cycle 50	Cycle 100
상부플랜지 두께	t_1	47mm	28mm	28mm
하부플랜지 두께	t_2	27mm	21mm	19mm
웹(web)두께	t_3	33mm	18mm	21mm
절점두께	t_4	20mm	20mm	20mm
웹간격	t_5	106mm	115mm	111mm
웹의 각도	a	53°	54°	53°



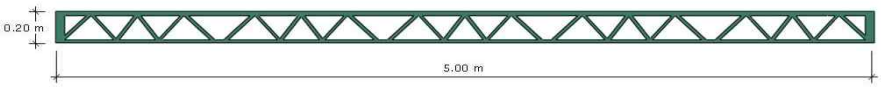
(나) 경전철 신형식 고가구조물의 FRP 바닥판 구조해석 및 기본(안) 설계

① 거동해석을 위한 모델링

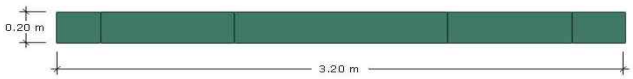
㉮ 모델링



(a) 모델링



(b) 정면도

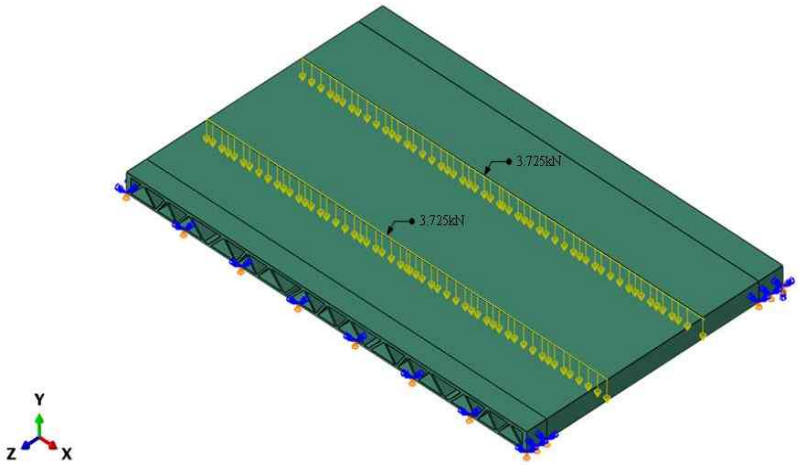


(c) 측면도

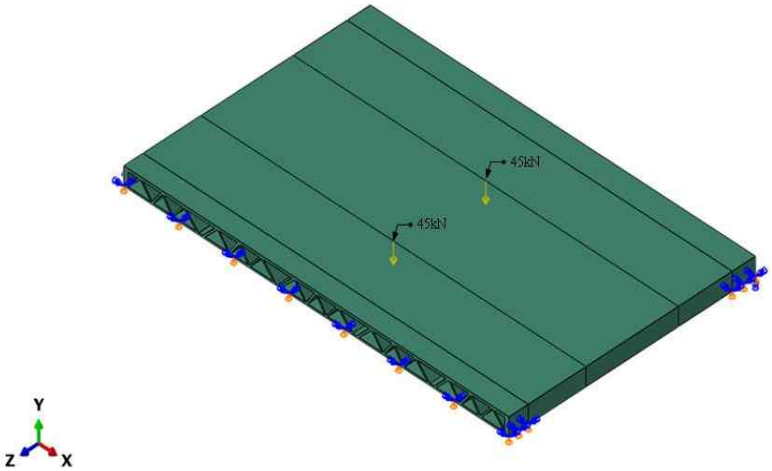
<FRP바닥판 모델링>

㉯ FEM Mesh

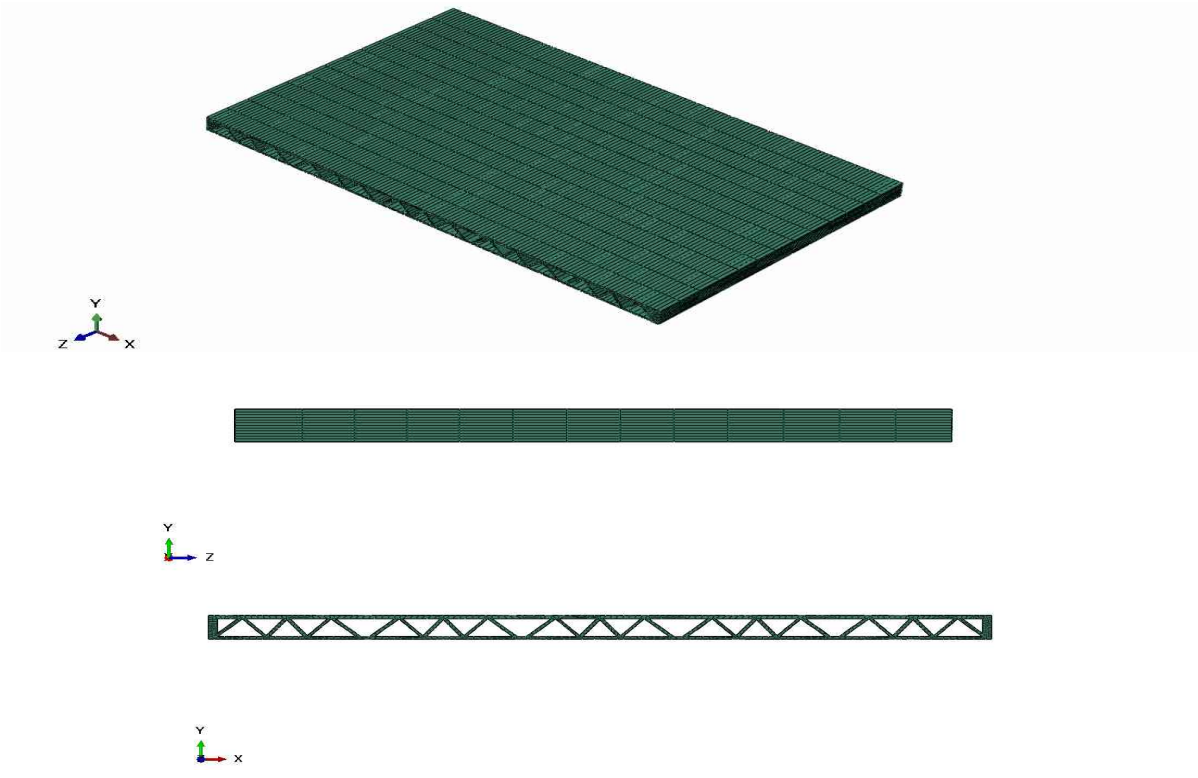
- Boundary condition and loading



<Driving way load>



<Train load>



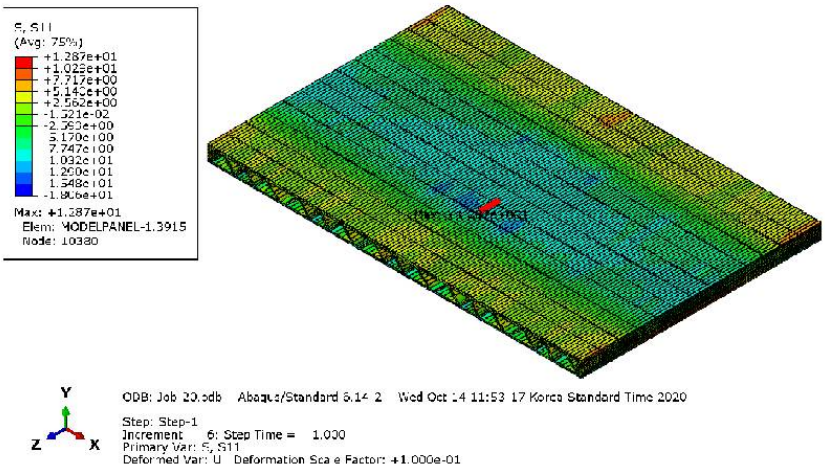
<Fine Element Mesh>

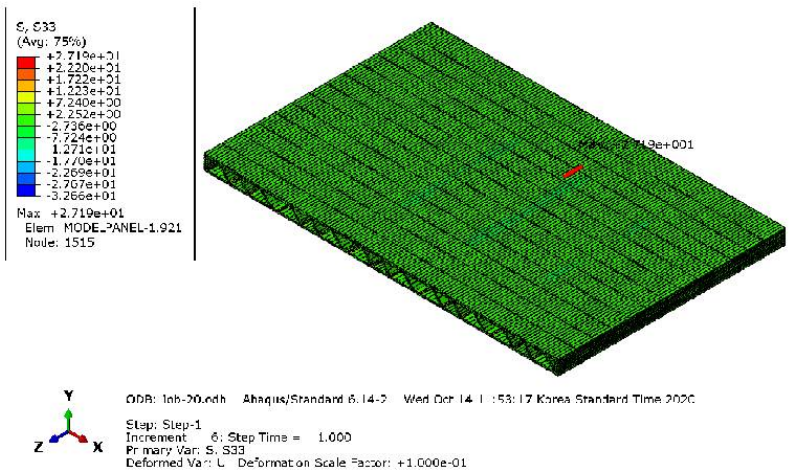
② 하중 재하

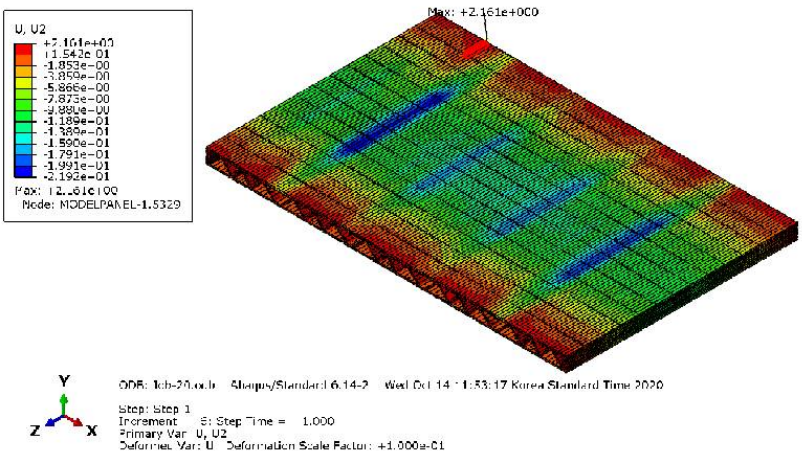
- the third rail for feeding power : 3.50 kN/m/one way
- the guide rail : 1.25 kN/m/one way
- the driving way : 7.45 kN/m/one way
- the deck structures (GFRP) : 11.5 kN/m/one way
- 바닥판에서는 driving way만 재하함.
- 열차하중은 90kN을 고려함.

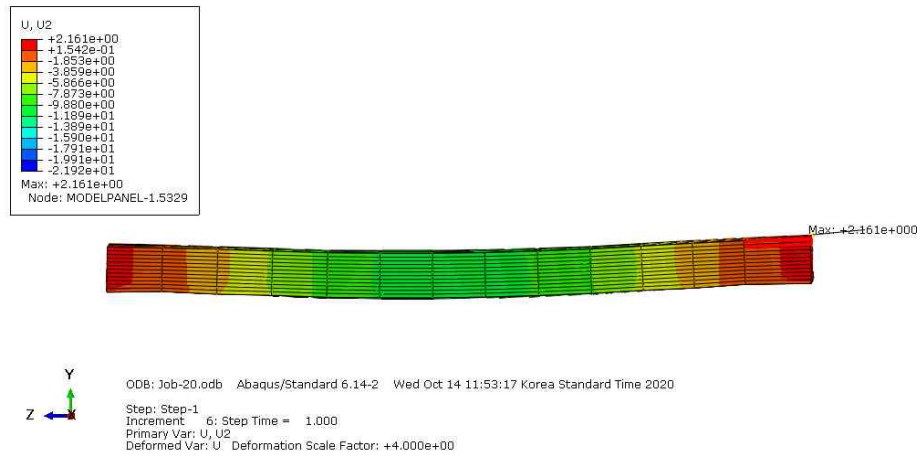
③ 해석 결과

- 섬유직각방향 12.9MPa, 섬유방향 21.2MPa, 처짐은 2.16mm











(다) 결과 분석

① 중량

중량은 콘크리트 바닥판 대비 31.2% 수준으로 크게 감소가 가능하다.

- $3.2m \times 0.2m \times 2.5t/m^3$: $1.6t/m$ (RC의 단위중량 $2.5t/m^3$)
- $0.235m^2$(단면적) $\times 2.13t/m^3$: $0.5t/m$

(교축직각방향 단면의 단면적은 $0.235m^2$, 복합체(유리섬유+폴리에스터 레진)의 단위중량은 $2.13t/m^3$으로 간주함)

② 구조적 성능

- 본 해석 결과, 처짐량은 2.16mm (< 4mm $= 3200mm/800$)로 기준을 만족한다.

*허용처짐의 경우 “장수명 합리화 바닥판 개발(건설기술연구원, 2003)”, “신속시공 · 경량 · 고내구성복합소재 교량바닥판 산업화 연구보고서(국민씨아이, 2004)”의 연구보고서, 이은형과 박재균(한국전산구조공학회 논문집, 2009)의 연구결과에서 처짐 기준을 $L/800$으로 설정

- 응력결과는 아래와 같은 이를 충분히 만족하는 FRP 바닥판을 사용하여야 한다.

구분	발생 응력
섬유 직각방향	12.9MPa
섬유 방향	21.2MPa

(2) FRP 바닥판 구조 연결 방안

(가) FRP-FRP 연결

FRP간의 연결은 대부분 접착연결(Adhesive joint)이 사용된다. 접착 연결은 기계적 연결부에 비해 다음과 같은 장점들이 있다.

① 하중작용 시 접착부에서 응력이 균등하게 전파된다.

② 볼트연결에 비해 다 강결하다.

③ 비정형적 부착부에 대해 적용이 자유롭다.

④ 비용이 저렴하고 가볍고 시공이 빠르다.

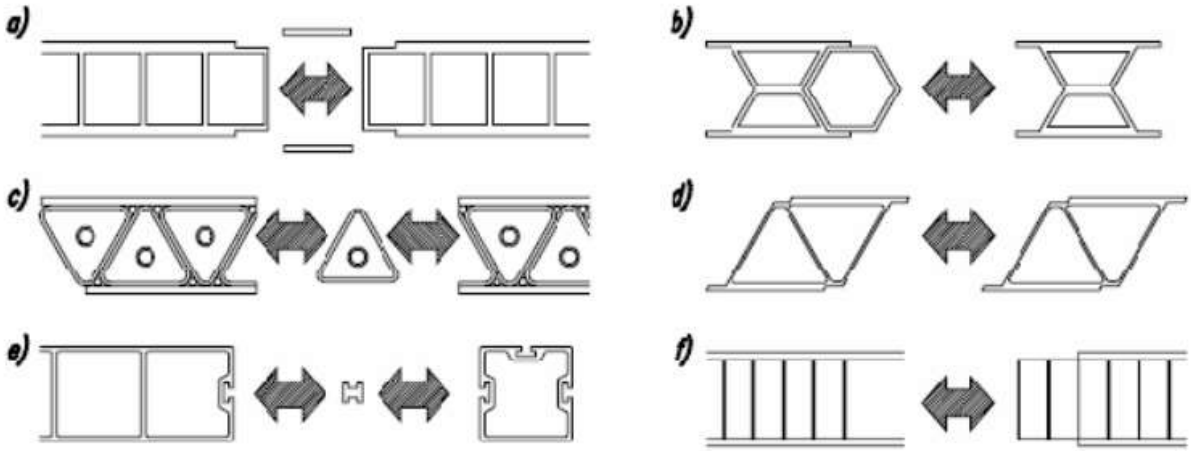
⑤ 경우에 따라서 강력한 접착제의 사용으로 부착부를 강화할 수 있다.

⑥ 미관상 좋다.

⑦ 연결부 재료들의 열팽창 차이에 대해 효과적으로 대처할 수 있다.

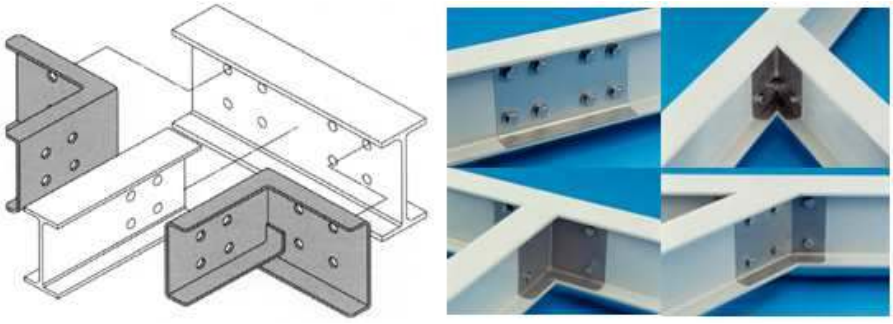
⑧ 인접부들과의 연결 품질이 좋다.

⑨ 접착부는 동적 하중에 대한 저항성이 좋다.

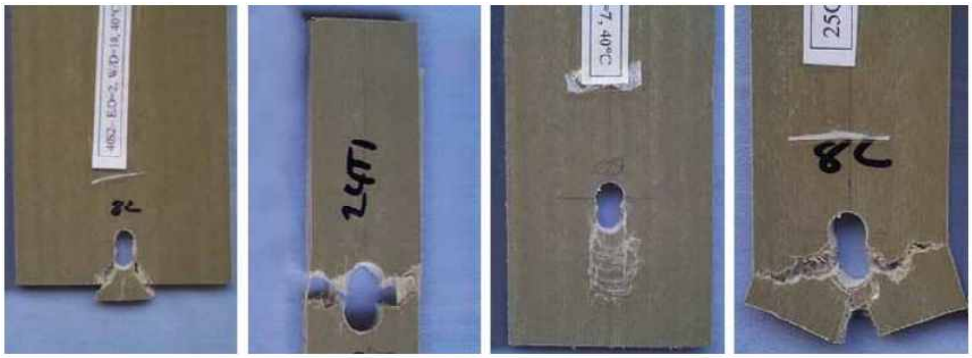


<바닥판 구조의 접착연결 사례>

FRP 부재들의 기계적 연결은 강재와 알루미늄 등의 연결방법을 따른다. 강재는 연속, 재료균일성, 등방성 등인 반면 FRP는 비균일성, 이방성, 취성 등의 특성을 갖는다. 이러한 재료특성은 연결부 강도를 저하시키는 원인이 된다. 기계적 연결의 장점은 기존 기계적 연결 설계방법을 사용할 수 있다는 점이다. 참고로, FRP 제조사들은 독자적인 연결부 성능평가 방법을 개발하여 특허등록 및 자체 사용하고 있다.

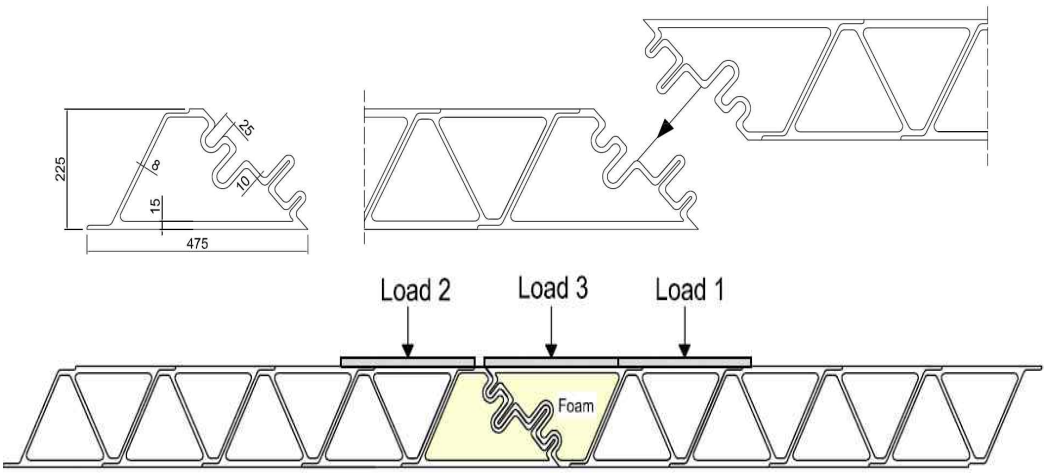


<강재를 이용한 기계적 연결 사례>



<기계적 연결부 파괴 양상>

아래 그림은 기존 접착제를 사용한 접합부의 시공 후 일정기간 동안 안전성을 확보하는 시간적 소요를 해결하고자 FRP 부재 접합단면에 기계적 연결부위를 형성하여 연결한 개념도이다. 이러한 새로운 접근법은 건설분야 사용에 있어 아직 제한이 있지만, 교량 부재들을 위한 FRP 연결부 방법의 확장연구가 가능할 것으로 기대된다.



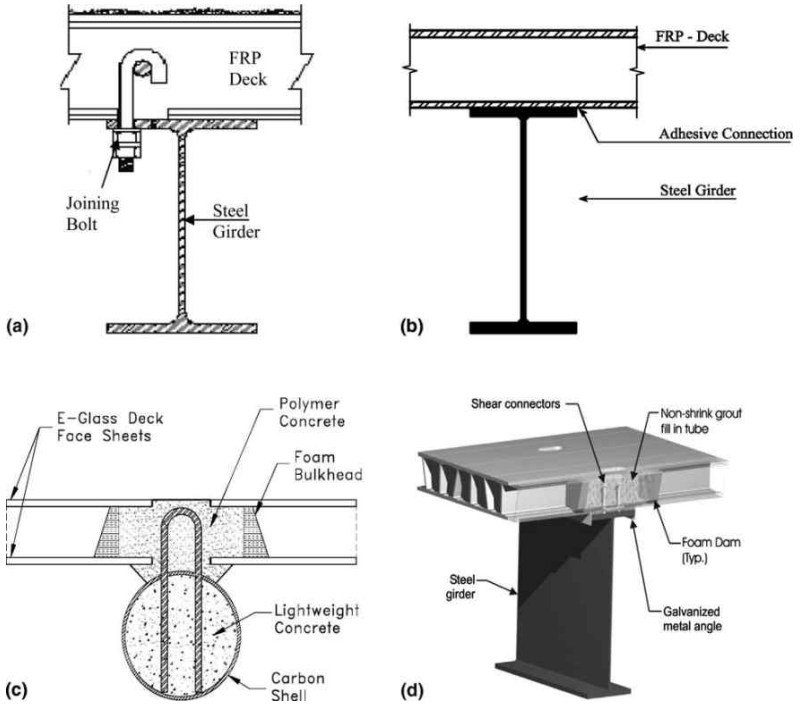
<특수한 접착 연결 방법 사례>

<FRP 부재 연결방법 비교>

기계적 연결	
장점	단점
- 특별한 표면처리가 필요 없음 - 재분리도 가능 - 점검이 쉬움 - 준 연성 파괴	- 응력집중부 강도가 낮음 - 접합에 특별한 준비가 필요 - 수분 및 유체 등에 대해 특별한 gasket 이나 마감재 필요 - 강재의 부식
접착 연결	
- 접합부 강도가 높음 - 수분 및 유체에 저항성 높음 - 부식 없음 - 외관이 좋음 - 강성이 좋음	- 재분리가 불가능 - 특별한 표면처리 필요 - 점검이 어려움 - 온도나 높은 습도에 영향 가능성 - 취성
복합 연결	
- 조립과 양생 중에 볼트가 접합부 지지력 보완	- 구조적 볼트는 하중지지를 못함

(나) FRP-Steel 연결

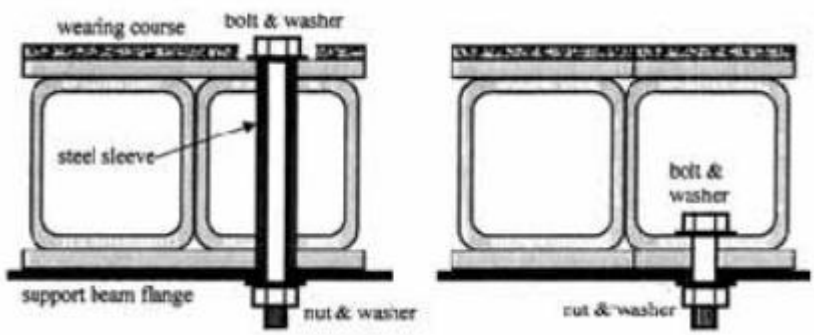
FRP와 강재의 연결방법은 주로 기계적 연결방법이며 몇 가지 방법 상세는 다음 그림과 같다.



<다양한 FRP-강재 연결 사례> (Zhou and Keller 2005)

(a) bolted connection (b) adhesive bonding

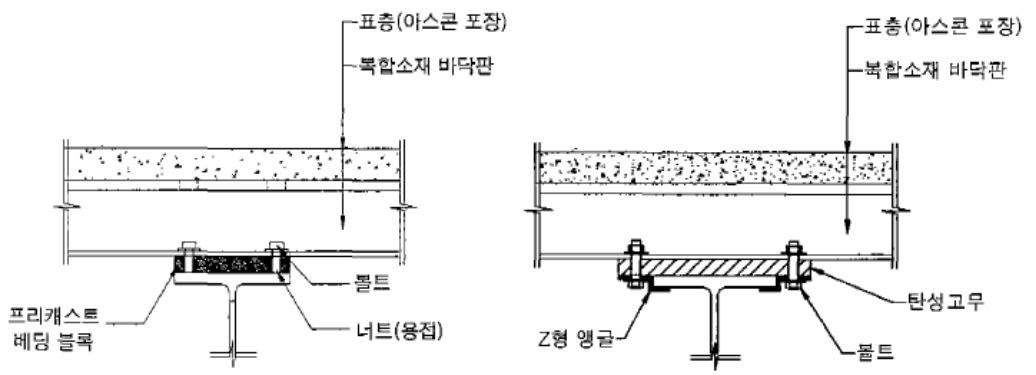
(c) hybrid connection (d) shear stud connection



<FRP 거더 연결 사례> (Gurtler 2004)

(다) 강재 거더-FRP 바닥판 연결

거더상부와 바닥판간 비합성형 연결로 설계 : 거더만으로 설계하중을 모두 지지하는 것으로 간주한다. 비합성형 교량의 거더-바닥판 연결부는 다음과 같은 형태가 일반적으로 설계되어 사용되어진다.



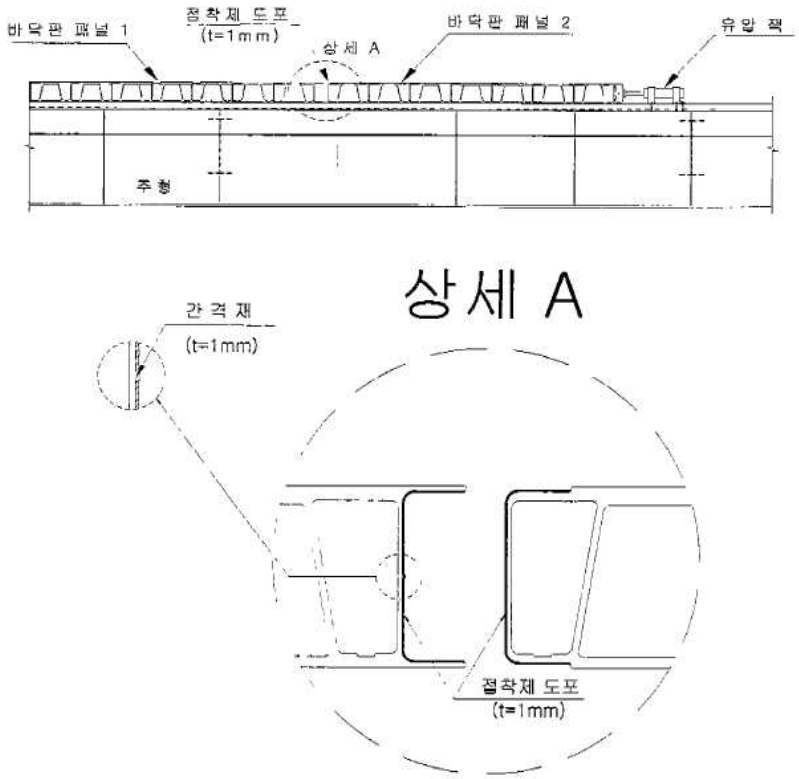
<프리캐스트 베딩블럭과 볼트 연결> <용접연결된 Z형 앵글과 볼트 연결>

(라) FRP 바닥판 패널간 연결

구조실험을 통해 파괴면이 연결부가 아닌 본체에서 발생하는 것을 실험적으로 검증할 필요가 있다. 패널간 연결부는 상호 연결이 가능한 암수부를 가지도록 설계하는 것이 바람직하고, 반드시 시공의 정화성과 구조적 일체성을 확보할 수 있도록 계획하여야 한다.

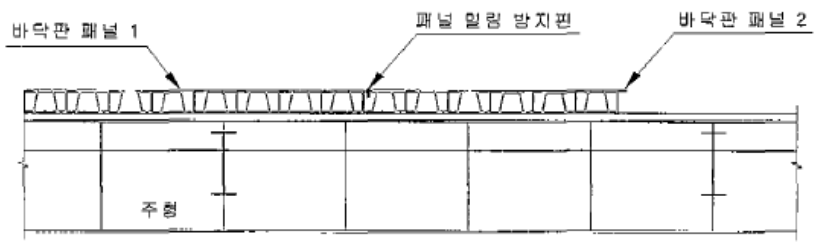
패널간 연결에는 바닥판 패널의 공장제작시와 동일한 에폭시 접착제를 이용한다. 바닥판 패널 연결부의 구조 안전성을 확보하기 위해서는 충분한 강도를 보유하고, 반복적인 차륜하중으로 인한 내피로 성능을 보장하기 위해서 충분한 연성을 보유한 접착제가 필요하다. 국내 K사의 경우 고신율 고강도 에폭시를 사용하였는데, 일반적으로 사용되는 에폭시의 강도는 10MPa, 2~5%의 신율인 반면, 국내 K사에서 사용한 제품은 부착강도 14MPa, 25%~40% 신율의 제품을 사용하였다. (표준온도 25도에서 60분 이상의 가사시간 확보 가능)

에폭시 접착제가 도포된 상태의 패널은 거치되어 거더 상부에 설치된 2대 이상의 유압잭을 이용하여 압착경화 되도록 하였고, 사용하는 유압잭 용량은 5t 이상이며, 잭킹시 압력이 부착면에 균등해야 한다.



<바닥판 패널간 연결구조(국민씨아이, 2004)>

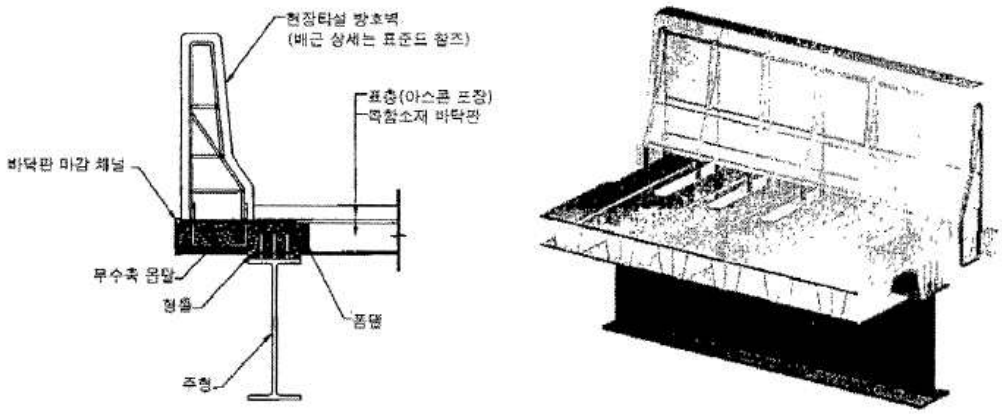
아래 그림과 같이 유압의 해제시에도 충분한 압푹을 유지할 수 있도록 밀림방지핀을 천공, 삽입한 사례이다.



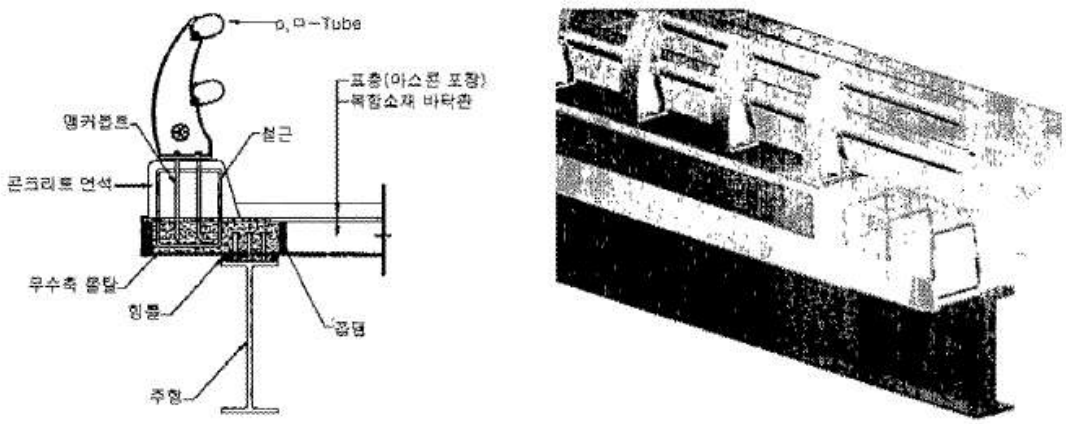
<패널간 연결부의 패널 밀림 방지핀 시공>

(마) 콘크리트 구조물-FRP 바닥판 연결 방안

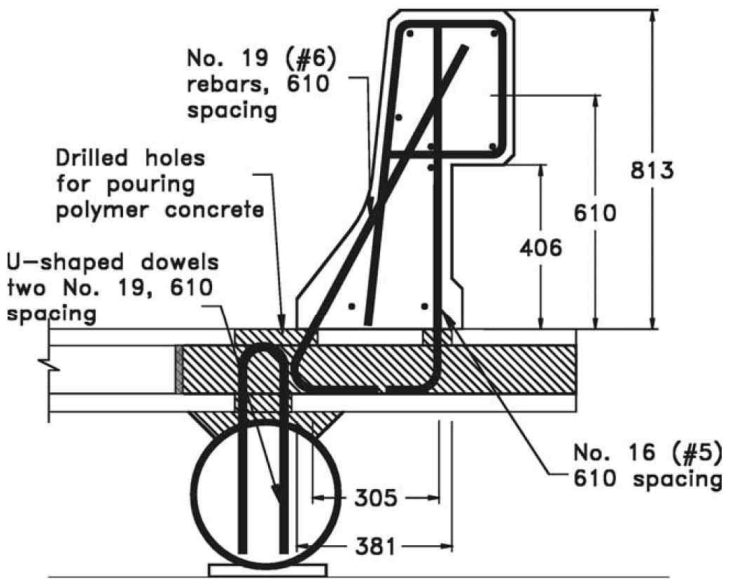
콘크리트와의 연결의 경우, FRP deck에 홀을 형성하고 철근을 삽입한 후 채움재로 시공하는데, 아래 몇가지 사례를 나타냈다.



<콘크리트 방호벽과 FRP deck의 연결, (국민씨아이, 2004)>



<현장타설연석과 FRP deck의 연결, (국민씨아이, 2004)>



All dimensions in mm

<Zhao et al. 2004>

3. 도시친화형 신형식 경전철 고가구조물 최적 설계기법 연구

가. 신형식 경전철 고가구조물 설계 주요 고려사항

신형식 경전철 고가구조물에 대한 설계 주요 고려사항은 아래와 같다.

① 구조물의 하중분담율과 함께 강재자중 비율에 대한 검토를 병행하여 검토하고, 구성부재의 단면설계 효율화를 통한 설계 최적화가 될 수 있도록 한다.

② 백본(Backbone)의 단면계획 및 구성에 따른 설계효율성 및 단면 안전성에 대한 검토를 수행하여, 백본의 종방향 및 횡방향의 배치간격, 단면특성 등에 대한 비교검토를 통해 설계 최적화를 수행한다.

③ 아웃리거(Out-rigger)는 전체 구조계에서 백본에 비해 하중분담율은 작지만 종방향 및 횡방향 부재뿐 만 아니라 사재 등으로 복잡하게 구성되어 있고 강재자중 비율은 가장 크게 구성되므로, 이를 고려한 아웃리거 부재의 구성요소에 대한 분석과 단면설계 최적화를 수행한다.

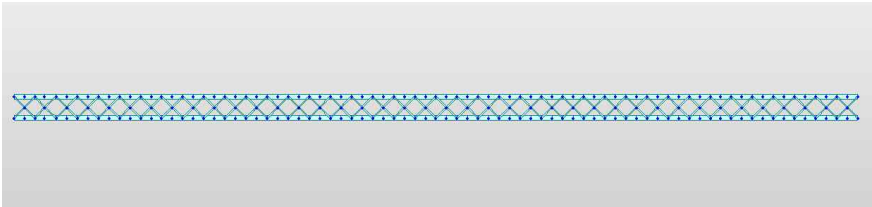
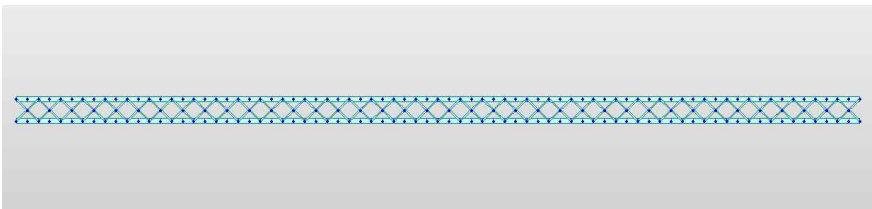
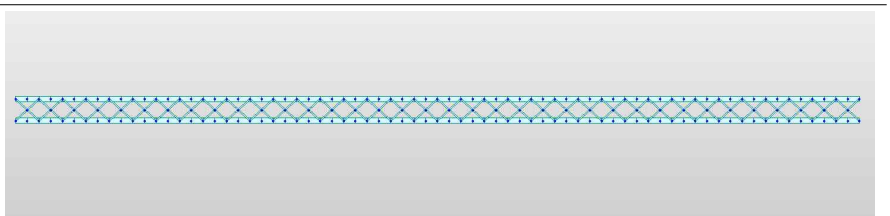
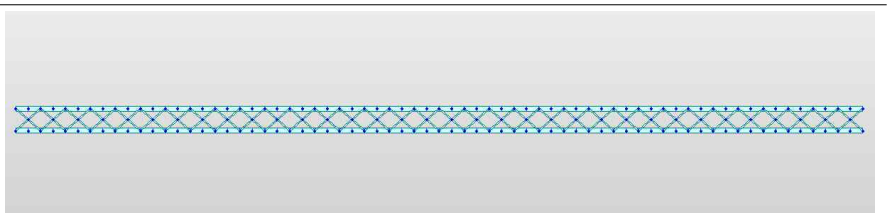
④ 지점부의 교각의 형식/형상설계에 따른 전체구조계의 영향이 적지 않으므로, 지점부 교각형상에 따른 비교검토를 통해 설계 최적화를 수행한다.

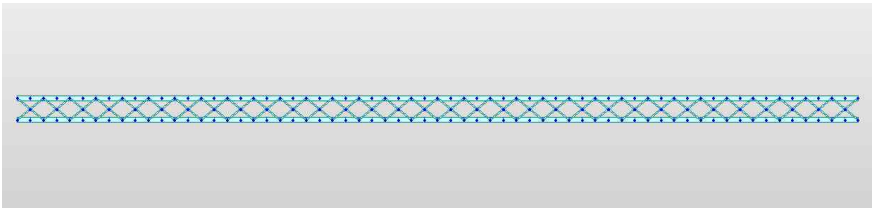
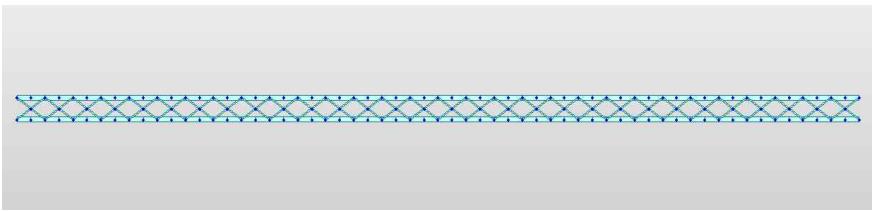
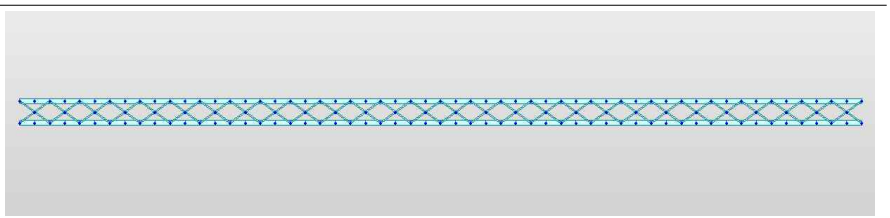
나. 구조안전성 및 단면 효율화를 위한 설계 최적화

(1) 백본의 단면계획 및 구성에 따른 설계효율성 및 단면 안전성에 대한 검토

(가) 검토 대상모델 선정

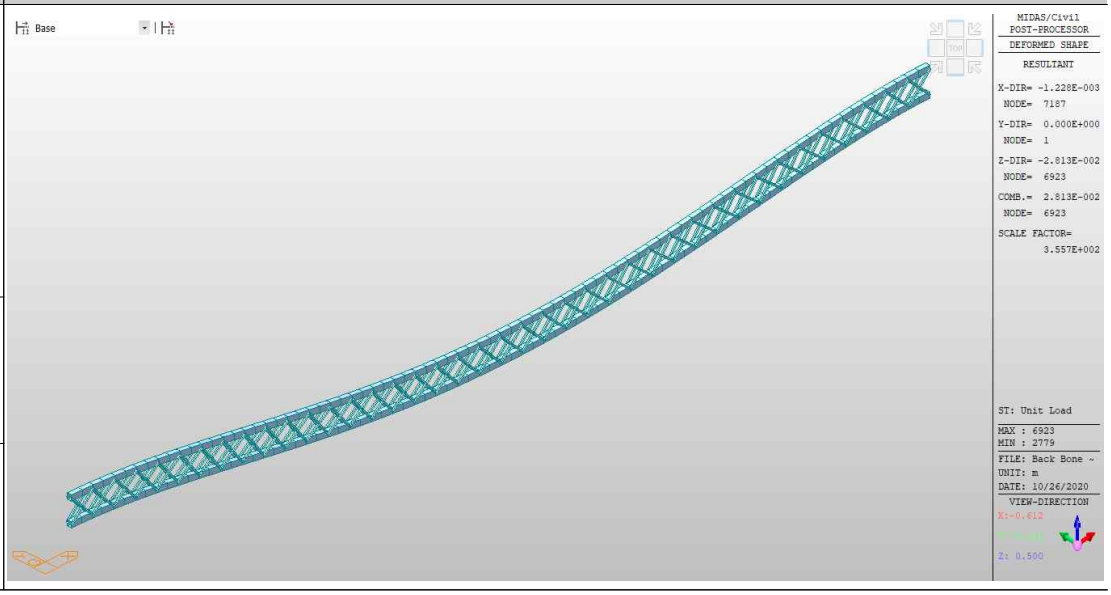
< 검토 대상모델 : 200m 구간 >

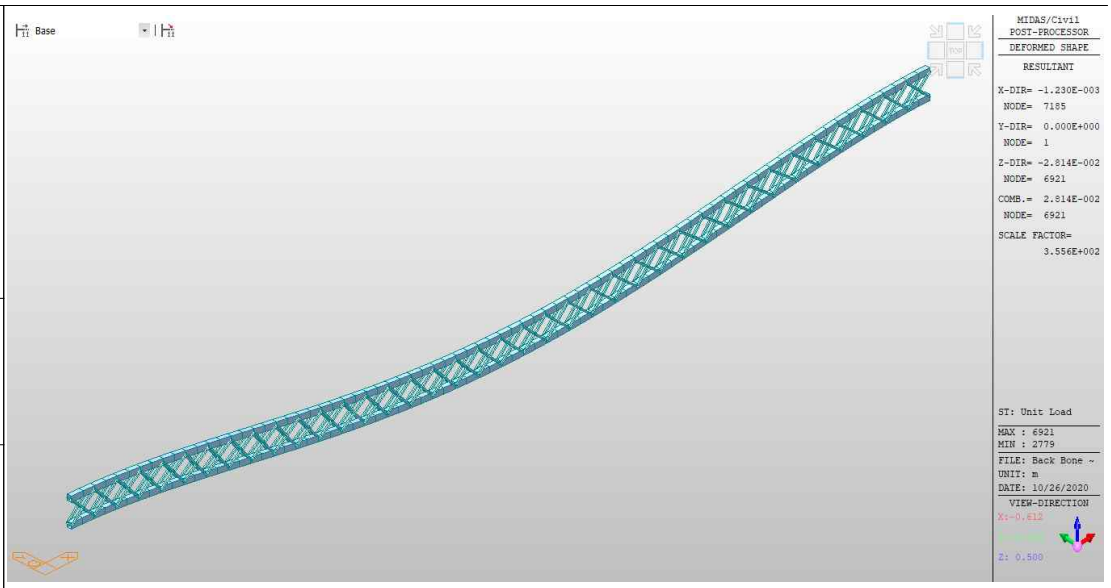
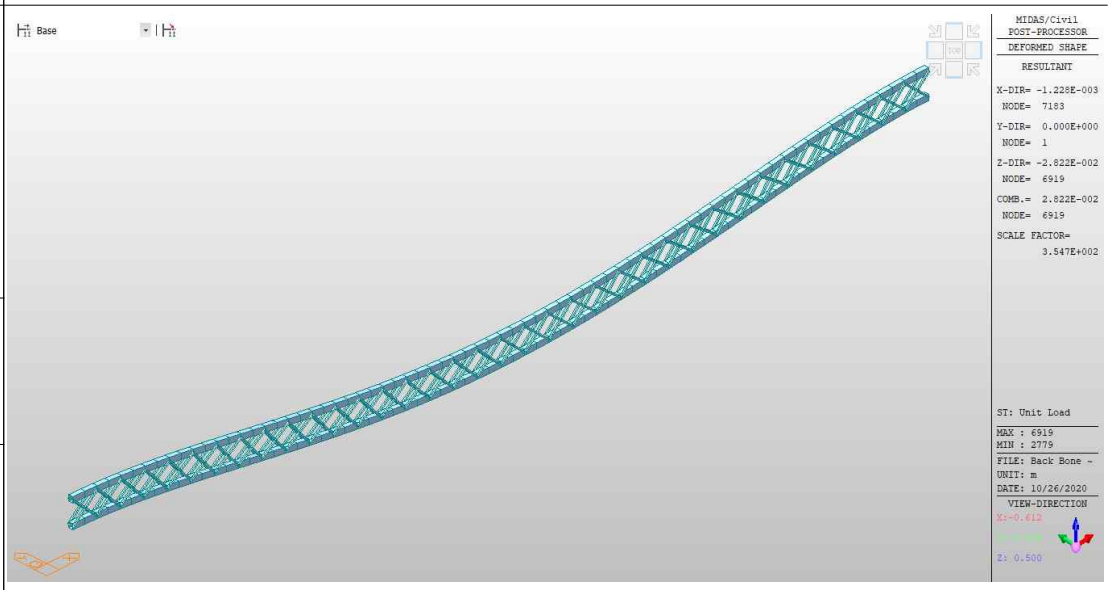
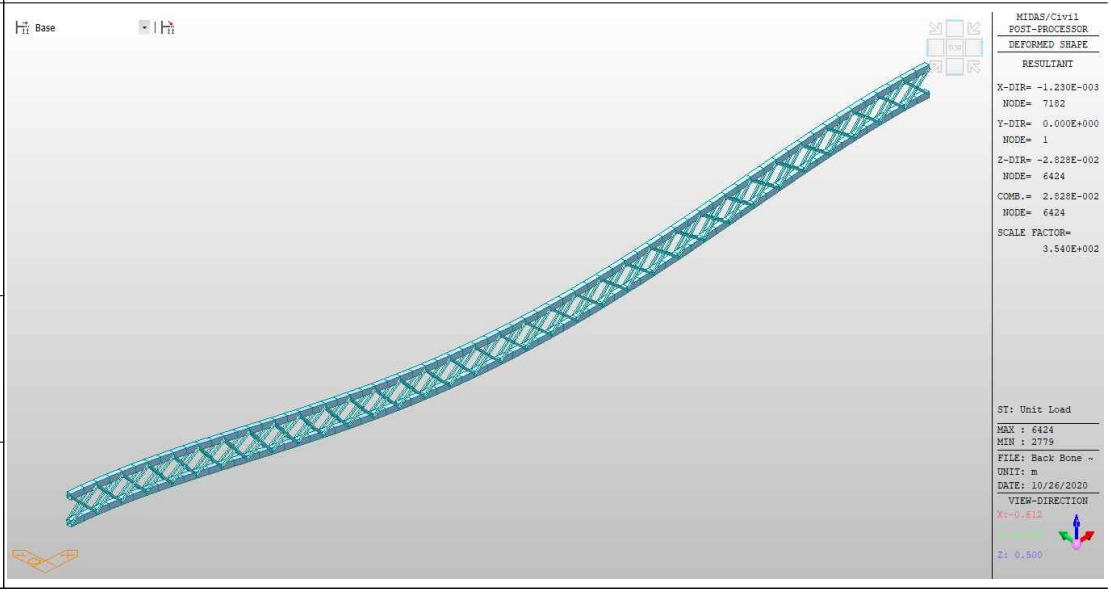
구 분	백본부재 개소/간격	해 석 모 델
Model - A	40 EA C.T.C=5.000m	
Model - B	38 EA C.T.C=5.263m	
Model - C	36 EA C.T.C=5.556m	
Model - D	34 EA C.T.C=5.882m	

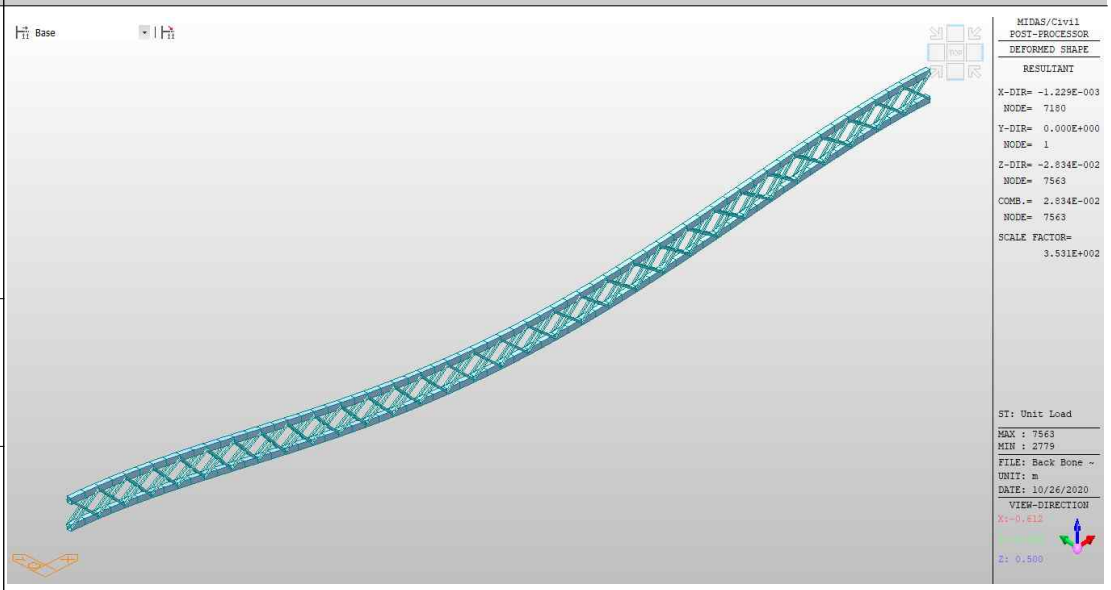
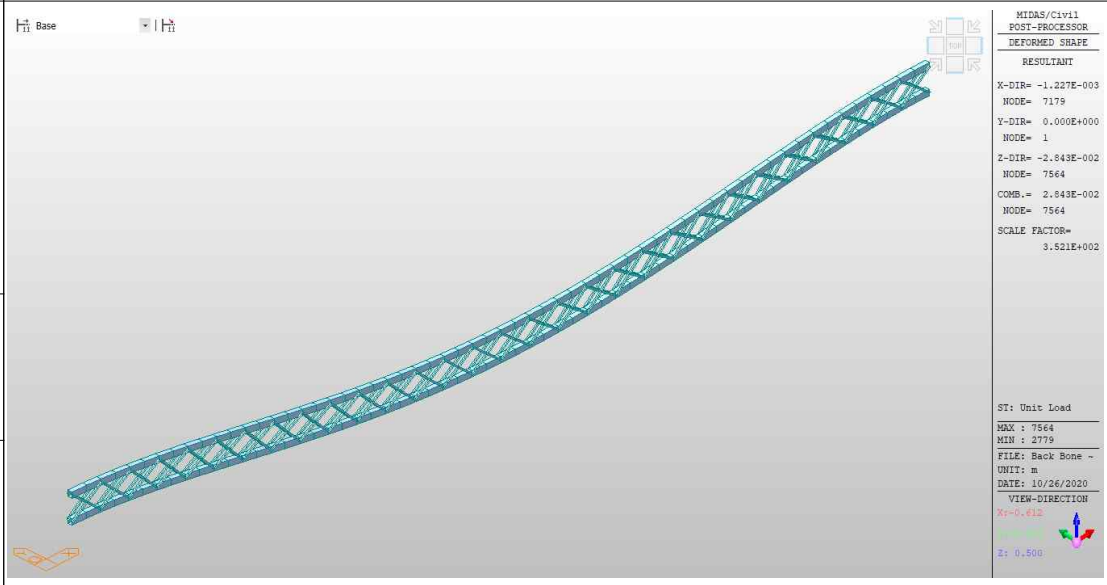
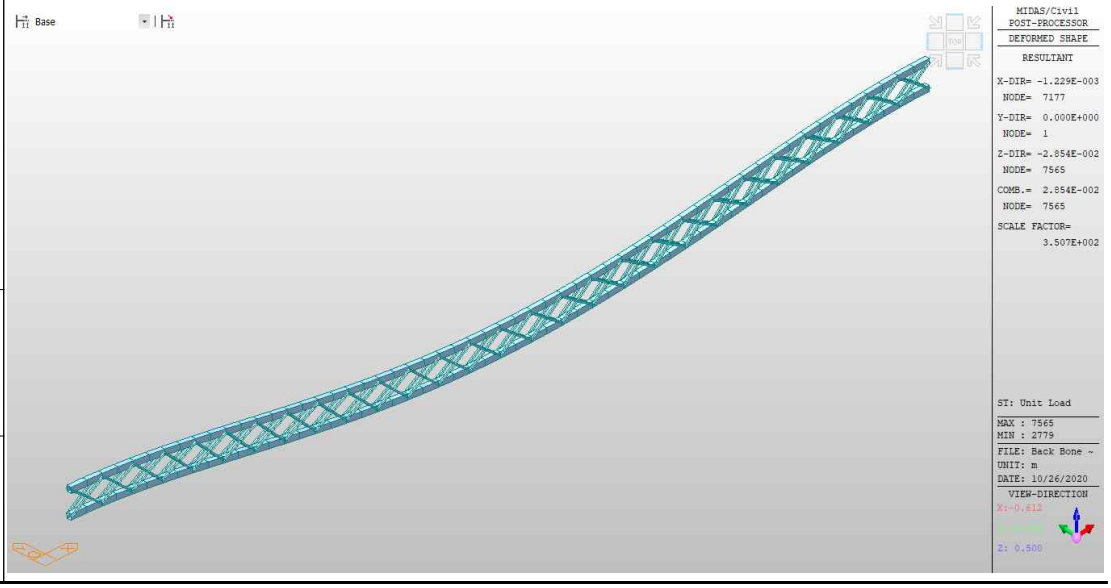
Model - E	32 EA C.T.C=6.250m	
Model - F	30 EA C.T.C=6.667m	
Model - G	28 EA C.T.C=7.143m	

(나) 대상모델별 해석결과

< 검토 대상모델 : 200m 구간 >

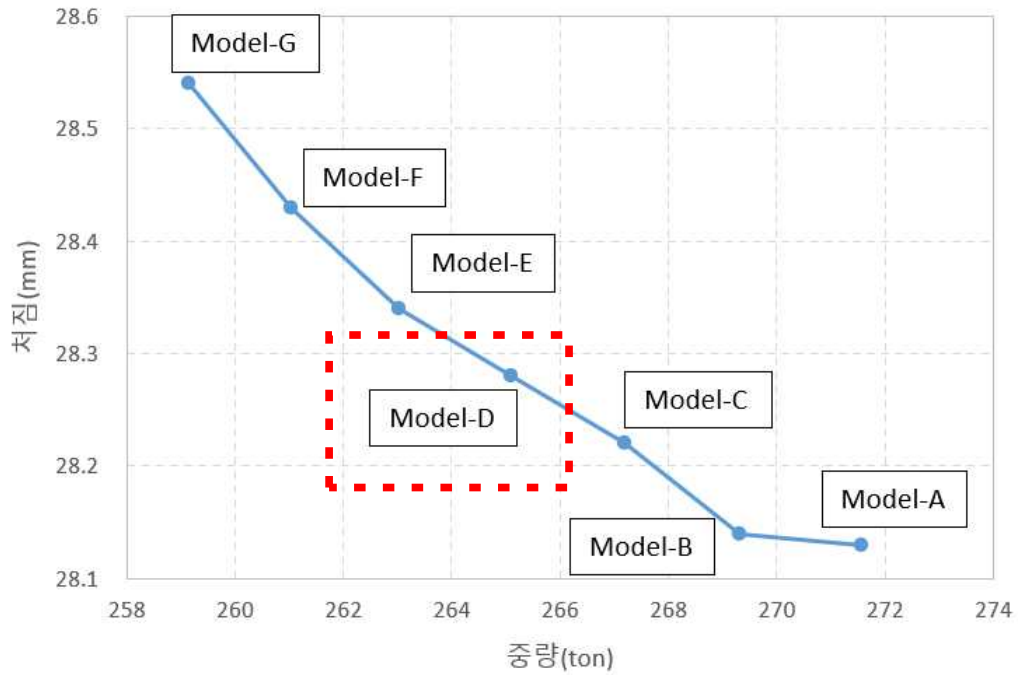
구 분	해 석 결 과
Model - A	
δ = 28.13mm	
W= 271.567ton	

Model - B	
δ = 28.14mm	
W= 269.317ton	
Model - C	
δ = 28.22mm	
W= 267.199ton	
Model - D	
δ = 28.28mm	
W= 265.098ton	

구 분	해 석 결 과
Model - E	
δ = 28.34mm	
W= 263.040ton	
Model - F	
δ = 28.43mm	
W= 261.036ton	
Model - G	
δ = 28.54mm	
W= 259.151ton	

(다) 구조해석 및 비교분석을 통한 검토결과

백본의 최적설계를 위한 검토모델별 비교분석을 아래와 같이 정리하였으며, 고찰결과 백본의 모듈개소수(수직재 배치간격)에 따른 처짐과 강중의 차이가 반비례관계를 보이는 것을 확인할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이후 검토모델에서는 Model-D (34EA, C.T.C=5.882m)의 모델을 적용하여 구조해석 및 비교검토를 수행하였다.



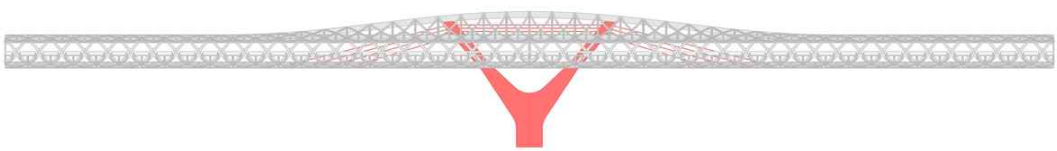
< 백본의 최적설계를 위한 검토모델별 비교분석 >

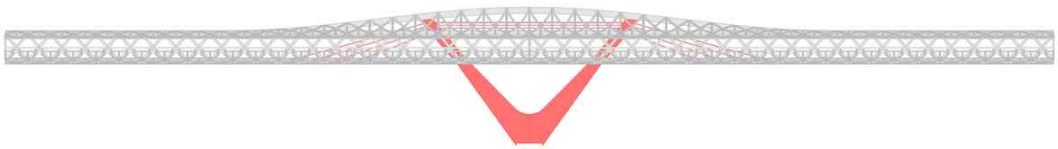
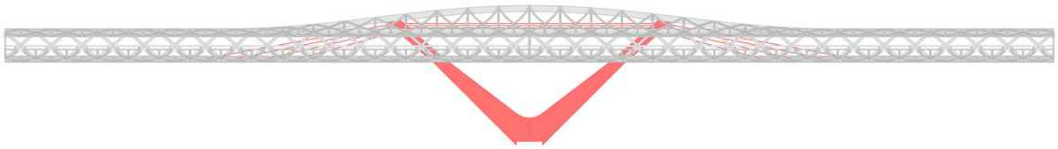
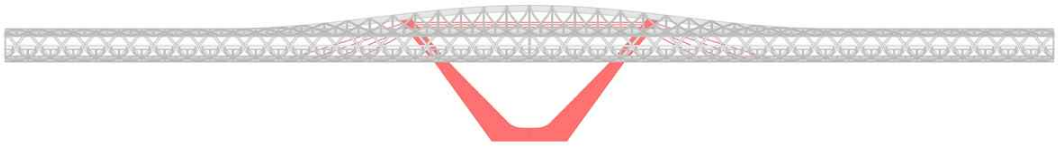
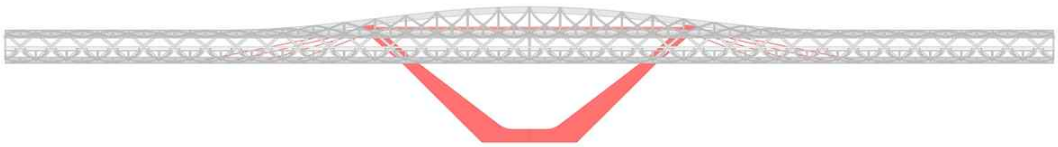
(2) 지점부 교각(옵션: 내부주탑-케이블 적용)의 형식/형상설계에 따른 최적설계

(가) 검토 대상모델 선정

지점부의 교각(내부주탑)의 형식/형상설계에 따른 검토대상 모델을 다음과 같이 정리하였으며, 검토대상 모델별 구조해석을 통해 상부구조와 하부구조의 단면 효율성을 검토하여 최적 설계를 위한 설계과정을 검토하였다.

<검토 대상모델>

구 분	해 석 모 델
Model - A	

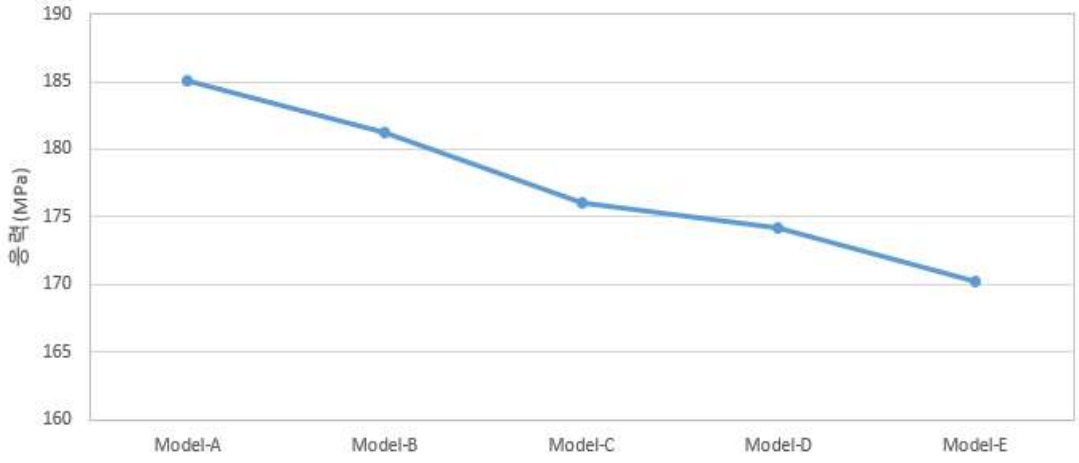
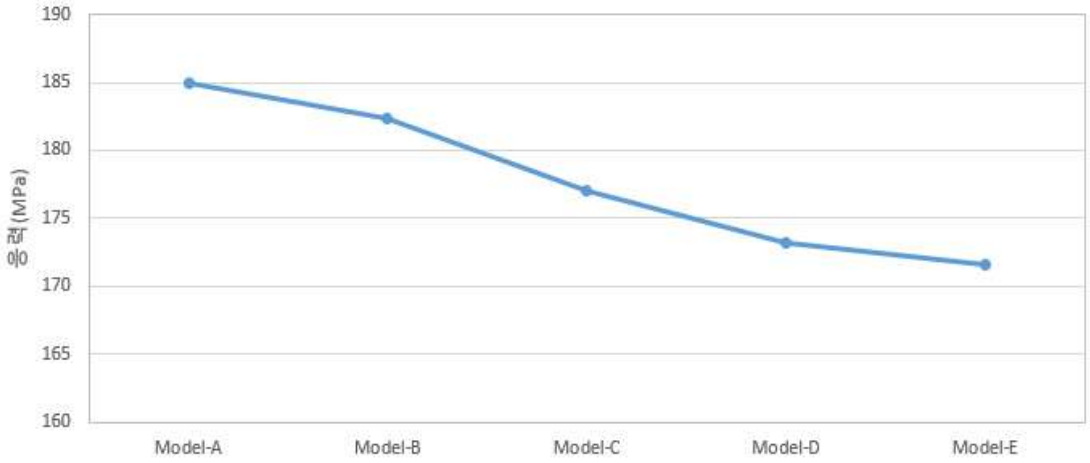
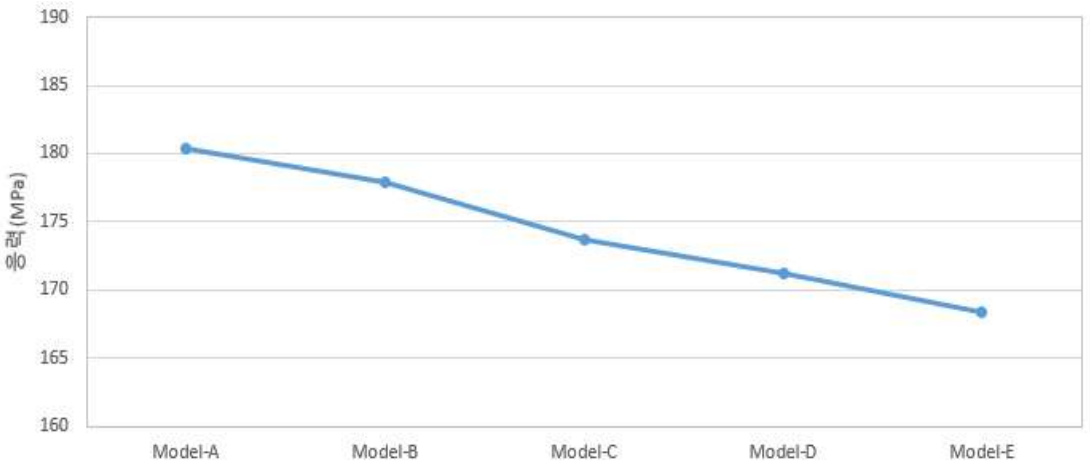
Model - B	
Model - C	
Model - D	
Model - E	

(나) 검토대상 모델별 해석결과 분석

지점부의 교각(내부주탑)의 형식/형상설계에 따른 검토대상 모델에 대한 주요 부재별 응력검토 결과를 아래와 같이 정리하였으며, 모델별 비교분석을 통해 최적설계 방향을 고려할 수 있도록 하였다. 최적설계를 위한 검토모델별 응력 비교분석을 아래와 같이 정리하였으며, 고찰결과 V형 교각(Model -E)의 내부간격 변화에 따른 응력변화를 확인할 수 있으며, V형 교각의 간격이 커질수록 내부지간 효과에 의해 응력저감 효과가 발생되는 것으로 판단된다. 따라서 이후 검토모델에서는 Model-E를 적용하여 구조해석 및 비교검토를 수행하였다.

신형식 경전철 고가구조물 최종 설계안에서는 케이블 및 내부 강연선을 배제하고, Model-E의 V형 교각을 적용하여 최적화를 수행하였다.

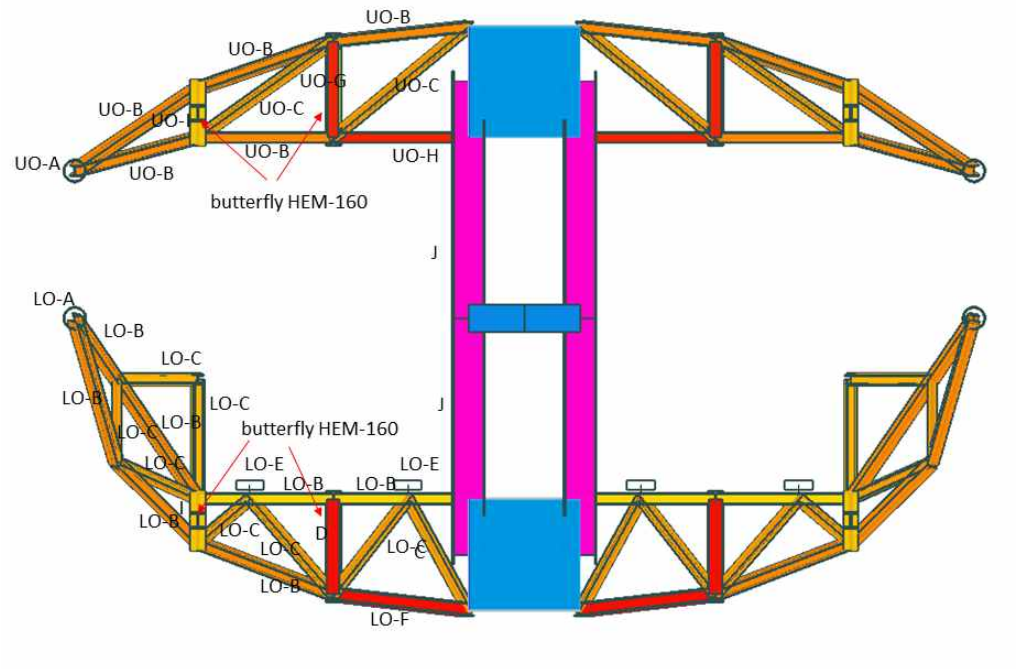
< 지점부 교각 형상에 따른 주요 부재의 응력검토 비교분석 >

구 분	분 석 결 과
지점부	
중앙부	
내 부 주탑부	

(3) 아웃리거의 단면계획 및 구성에 따른 설계효율성 및 단면 안전성에 대한 검토

(가) 아웃리거의 구성요소

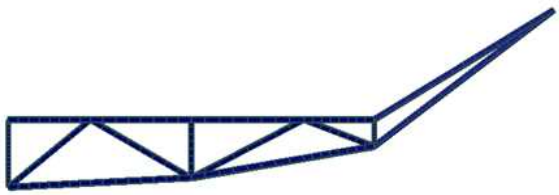
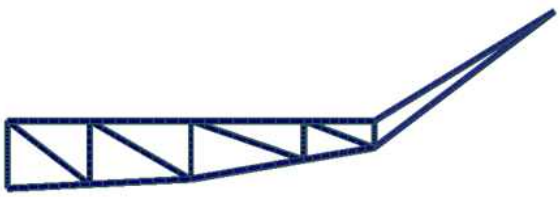
아웃리거는 아래 그림과 같이 상부 아웃리거와 하부 아웃리거로 구분되고, 상하부의 아웃리거 또한 다양한 부재로 구성되며 횡방향 강성의 확보와 함께 전체 단면형상을 유지하면서 종방향 강성에도 기여하고 있다. 따라서 아웃리거의 단면 효율화를 통한 최적설계 과정이 반드시 필요하며 이를 위한 복잡하고 다양한 부재의 특성에 대한 비교분석과 고찰을 통해 자중 감소와 강성증대의 두 가지 목적이 동시에 실현될 수 있는 구조시스템이 확보되어야 할 것으로 판단된다.



< 아웃리거의 구성요소 >

(나) 검토 대상모델 선정

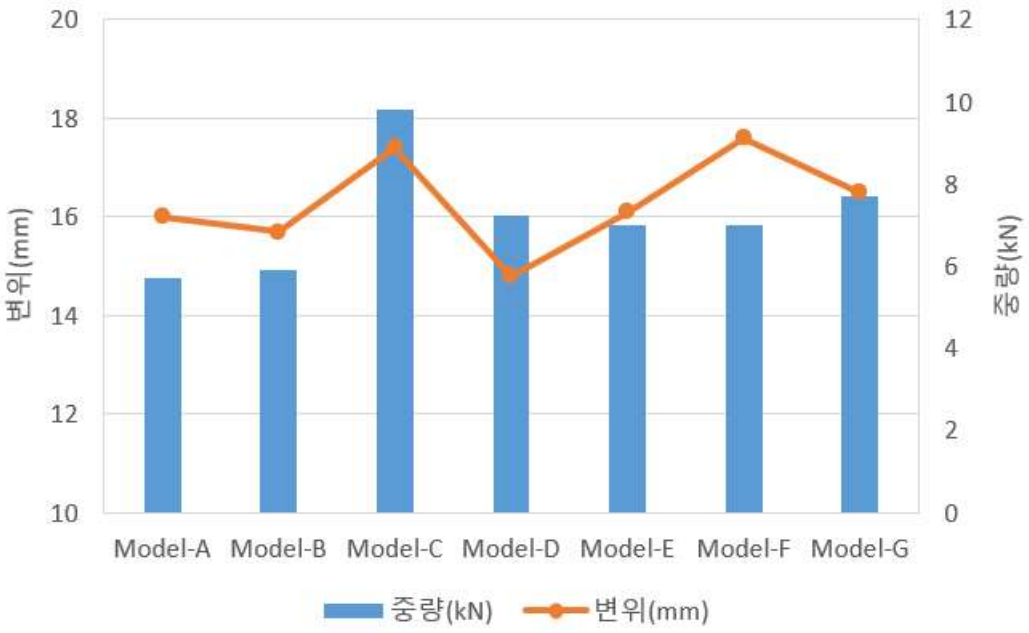
< 아웃리거 검토 대상모델 >

구 분	검 토 모 델
Model - A	
Model - B	
Model - C	
Model - D	

Model - E	
Model - F	
Model - G	

(다) 구조해석 및 비교분석을 통한 검토결과

아웃리거의 최적설계를 위한 검토모델별 비교분석을 아래와 같이 정리하였으며, 고찰결과 아웃리거의 부재배치 및 단면계획은 Model A(하부)와 B(상부)가 유리한 것으로 분석되었다. 따라서 본 연구에서는 이후 검토모델에서는 Model-A(상부), B(하부)의 모델을 적용하여 전체계 해석을 수행하였다.



< 아웃리거의 최적설계를 위한 검토모델별 비교분석 >

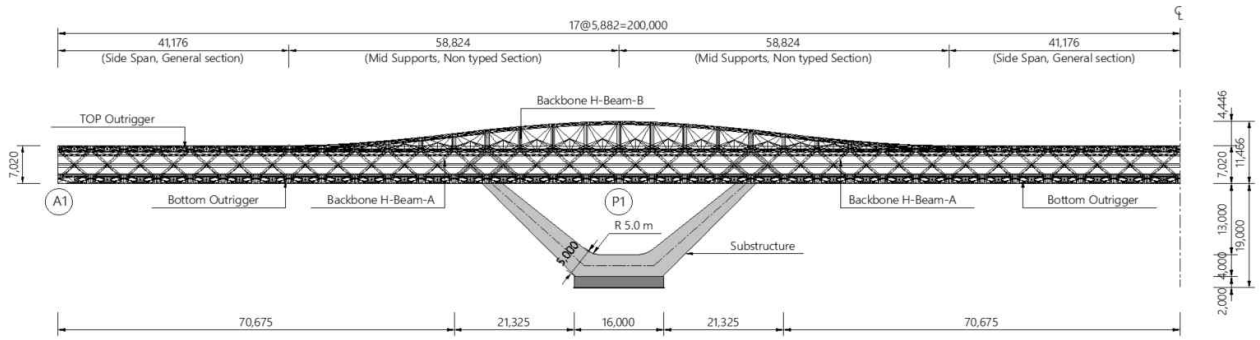
다. 신형식 구조(백본, 아웃리거, 하부구조) 분담율 검토를 통한 최적 조합

(1) 최종 적용 모델

① 백본 - Model D 적용

② 지점부 하부 - Model E 적용(케이블 적용 배제)

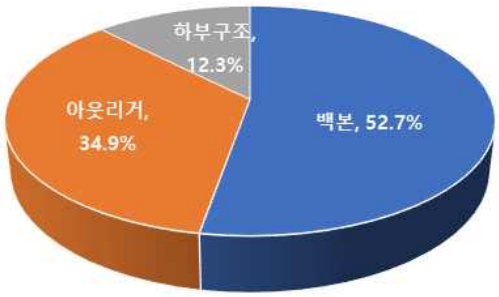
③ 아웃리거 - Model A 개선 모델(하부), Model B 개선 모델(상부)적용



(2) 하중분담율 산정

신형식 경전철 고가구조물의 하중 분담율 검토 결과, 상부 백본 및 아웃리거 구조가 전체 구조물 하중의 약 88%를 분담하고 상부구조와 연결된 하부구조가 나머지 약 12%를 분담하는 구조로, 하부구조가 상부 응력·처짐의 12%를 부담함으로써 장경간화하는데 크게 기여하였다.

<하중 분담율>

구 분	하중분담율	
백 본	52.7 %	
아웃리거	34.9 %	
하부구조	12.3 %	

라. 도심지 곡선부 및 주요 경간장 설계 기법

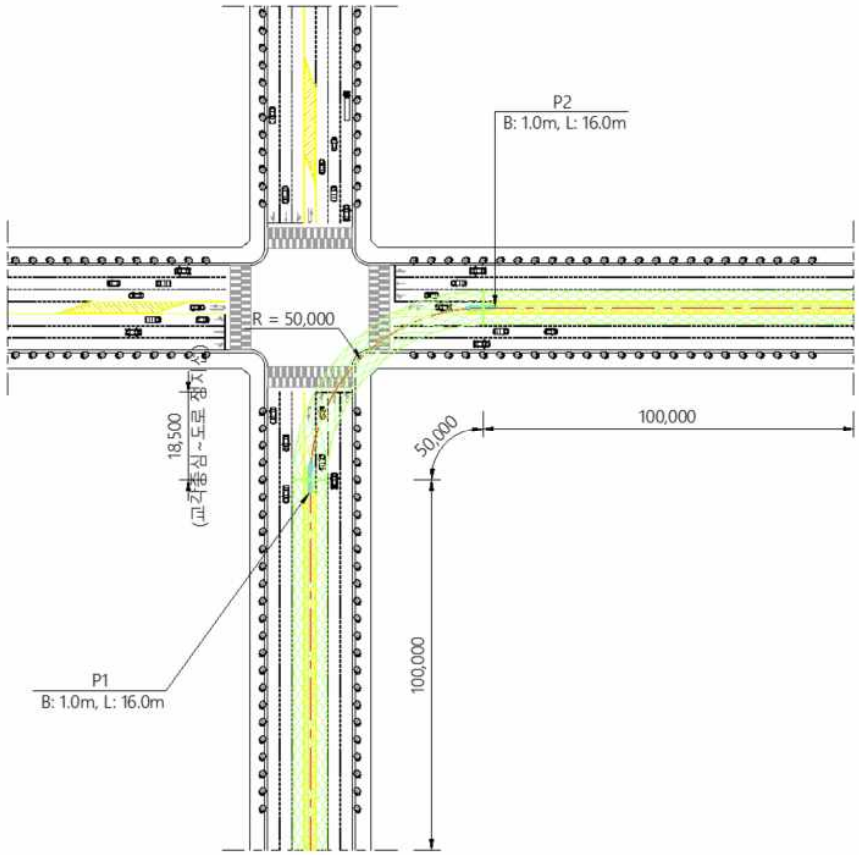
(1) 도심지 곡선부 설계 방안

(가) 단순교 적용시 (교차로 등에 적용 가능)

① 경간구성 : 100.0m(직선 연속구간) + 50.0m(단순교 곡선구간) + 100.0m(직선 연속구간)

② 곡선반경 : R50.0m(본선, 복선 기준)

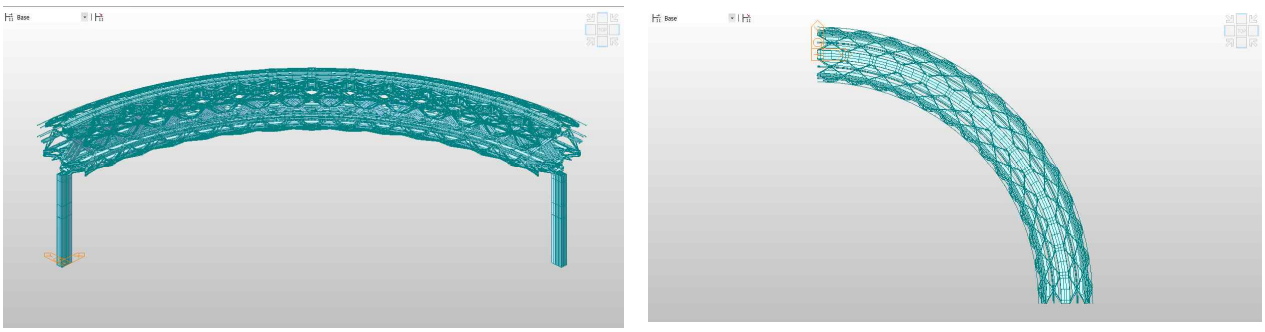
③ 도심지 교차로 구간 적용 예시



<교차로 설계(예시)>

④ 구조해석 검토

- 곡선부(R50m) 구조해석 모델

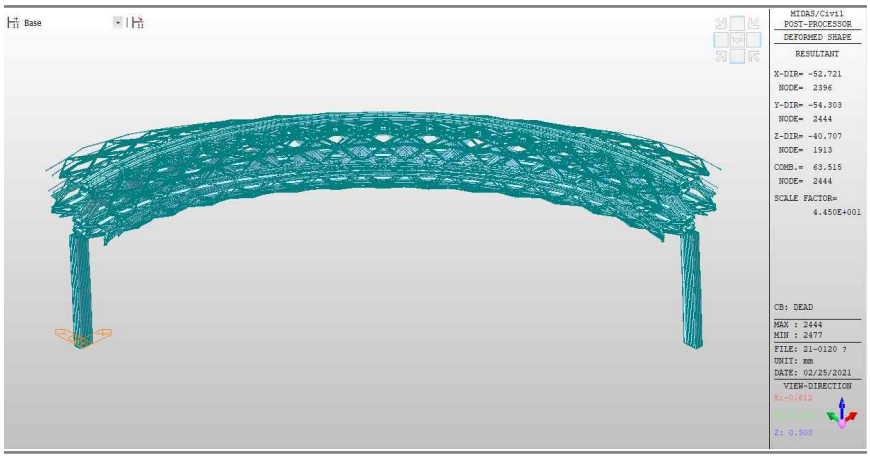


(a) 3차원 구조해석 모델 (b) 해석 모델의 종평면

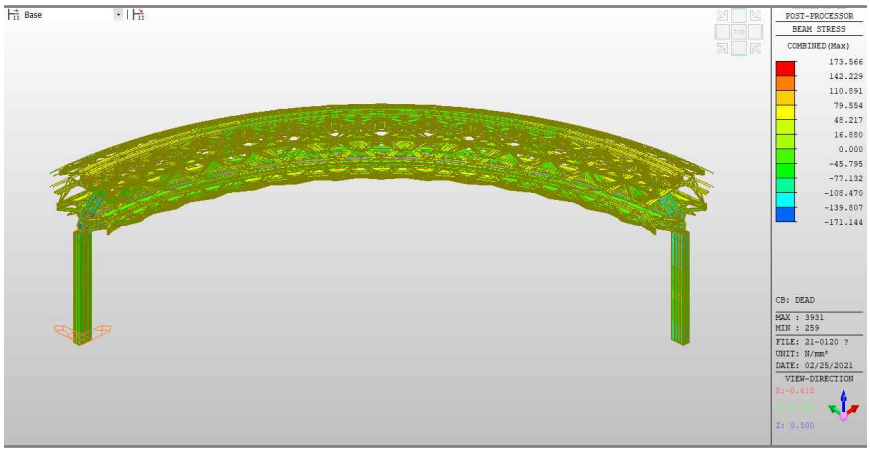
<곡선부(R50m) 구조해석 모델>

- 곡선부(R50m) 구조해석 결과

· 활하중 처짐 : 40.707 mm < 83.3 mm O.K



· 응력검토 : 173.6 MPa < 215.0 MPa O.K



*곡선부 단면은 최종 설계안(일반부) 단면을 적용한 것으로, 차후 상세설계를 통해 응력 감소 가능.

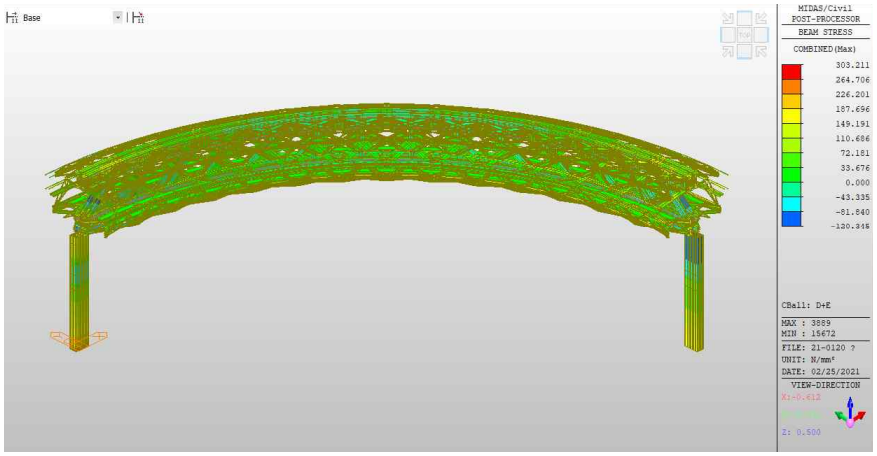
· 하부구조 응력검토(지진시) : 303.211 MPa < 322.5 MPa O.K

지진시 발생하는 하중에 의한 교각부의 응력은 전반적으로 허용응력 내에 있으므로 실제 상세설계시 구조적으로 문제없을 것으로 판단되며, 내진검토시 사용된 설계응답스펙트럼은 아래와 같다.

<설계응답스펙트럼(S2) 산정>

- 내진성능 평가기준 지진의 가속도계수(S) : S = Z × I
- 지진구역은 I 지역
- 지진구역계수(Z) : 0.11
- 지진위험도계수(I) : 1.4(재현주기 1000년)
- 가속도 계수 : S = 0.11×1.4 = 0.154g

구 분	발생응력
검토하중조합 : 자중 +지진하중	인장 : 303.211 MPa, 압축 : 120.345 MPa
허용응력 : SM520 = 215MPa	지진시 허용응력 할증계수 : 1.5



(a) 구조물 최대발생 응력



(b) 지진에 의한 하부구조 응력

<지진하중에 의한 곡선부(R50m) 구조해석 결과>

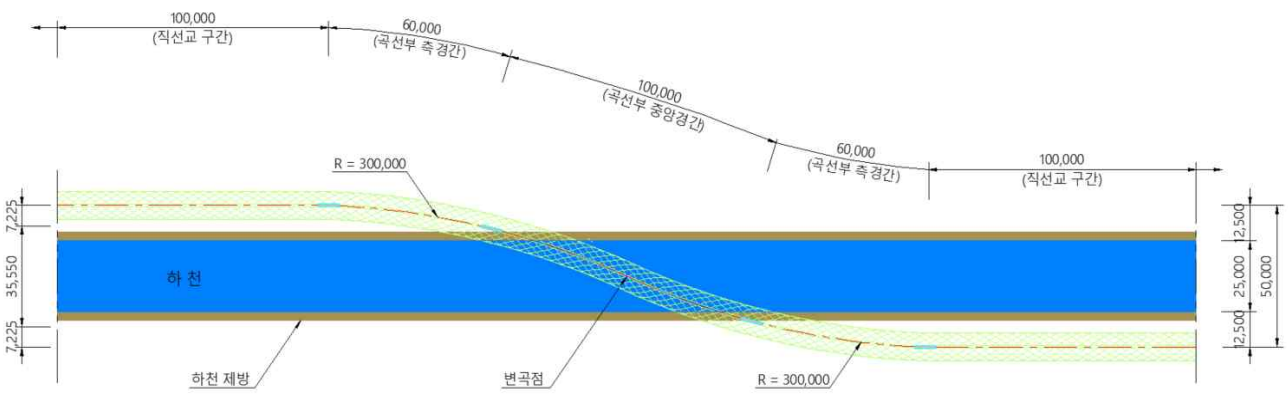
(나) 연속교 적용시 (도로·하천 선형에 맞춰 시공하거나 하천 횡단시 등에 적용 가능)

① 경간구성 : 60.0m + 100.0m + 60.0m (연속교)

*현장 여건에 맞춰 자유롭게 경간구성(예: 100m+200m+100m) 가능함.

② 곡선반경 : R300.0m(본선, 복선 기준)

③ 연속교 적용시 곡선 구간 적용 방안

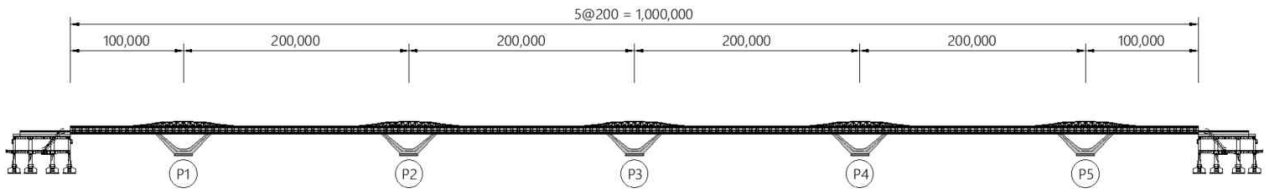


<하천 횡단 설계(예시)>

(2) 주요 경간장 설계 방안

(1) 정거장간 구간이 1.0km일 경우(예시)

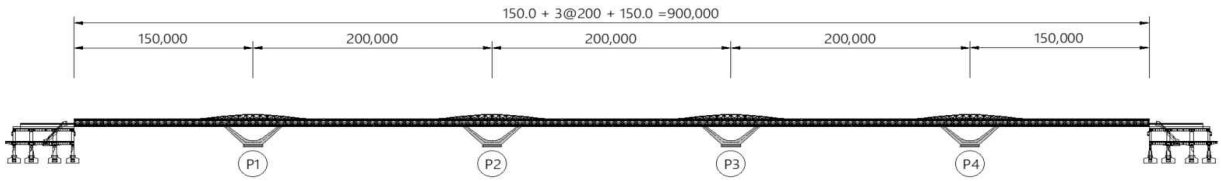
- 경간 구성 : 5@200 =1,000 m



(2) 정거장간 구간이 1.0km 이하일 경우(예시)

① 900.0m 정치수 일 경우

- 경간 구성 : 150.0 + 3@200 + 150.0 = 900.0 m



② 정치수가 아닐 경우

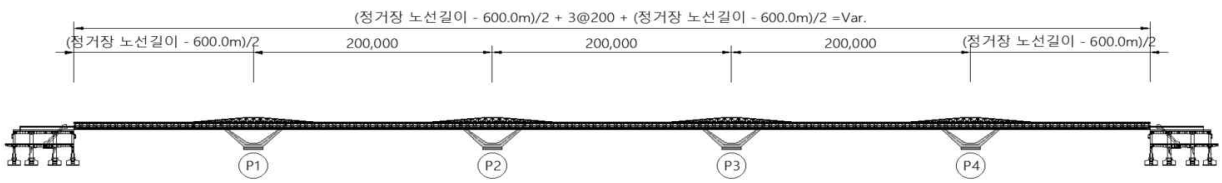
- 경간 구성

: 정거장 노선 길이에 따른 분할값 + N@200 + 정거장 노선 길이에 따른 분할값

= Var. Length m

이때, 정거장 노선 길이에 따른 분할값 ≤ 100m

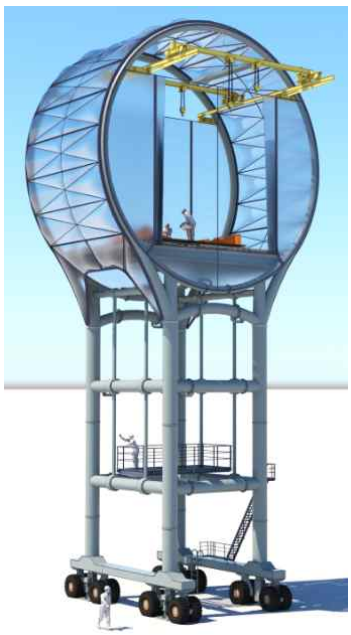
- 정거장 노선 길이에 따라 신형식 구조물의 측경간 길이를 조정하여 경간을 구성함.



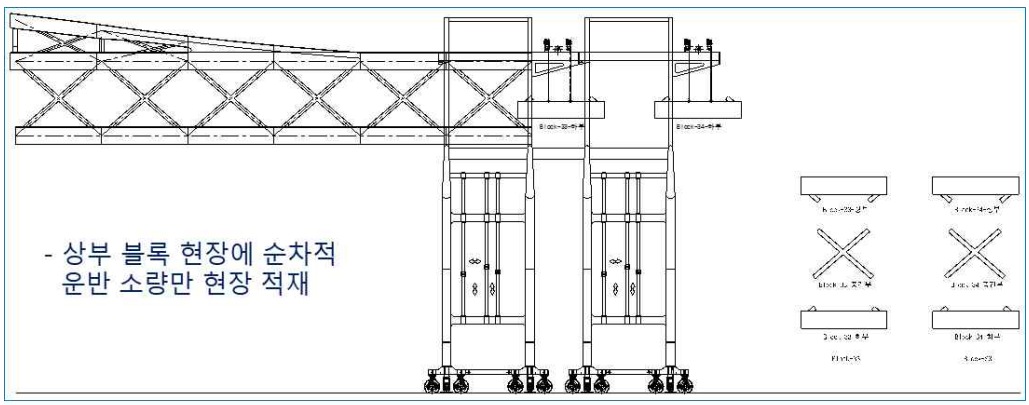
마. 시공단계별 구조안전성 검토

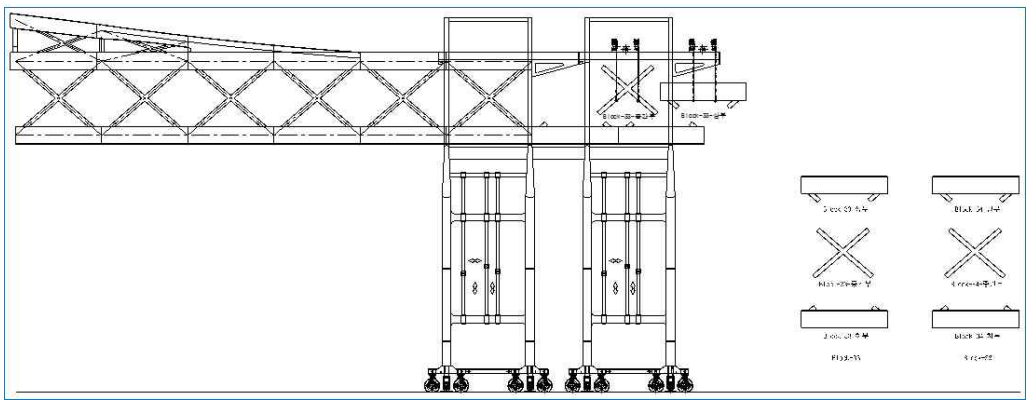
(1) GFCM 공법 (MCE장비를 아용한 가설시공법: p.206 참조)

① MCE(MCE ; Modular Construction Equipment) 개요도

3D	정면 View
	

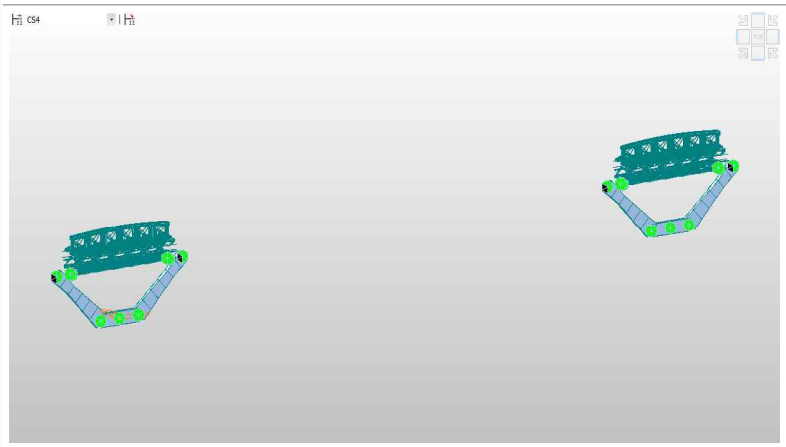
② MCE 장비를 이용한 상부 시공 순서도

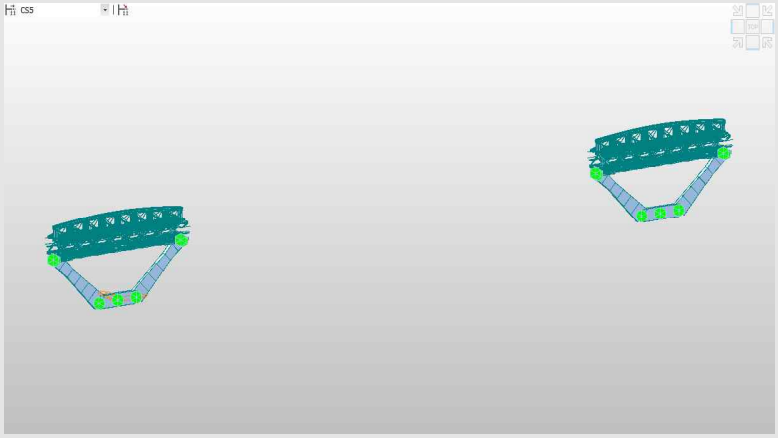
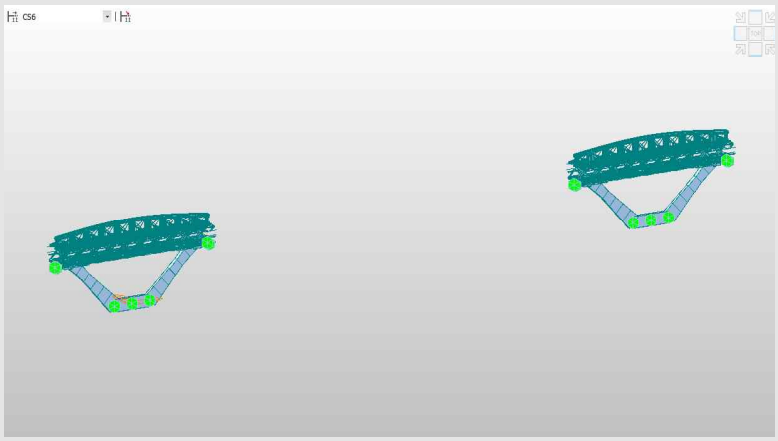
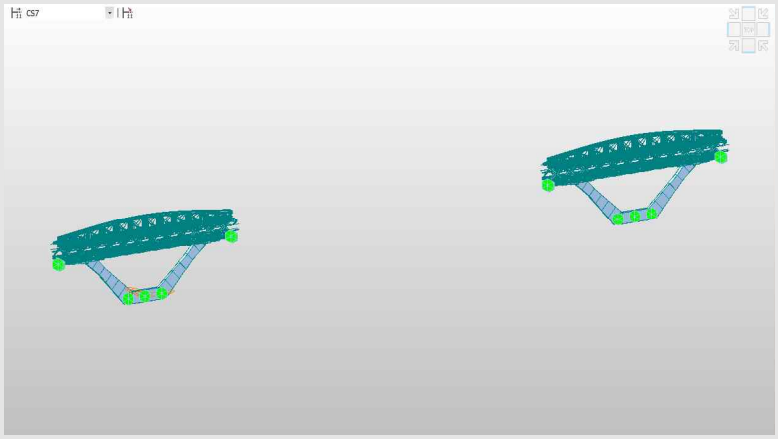
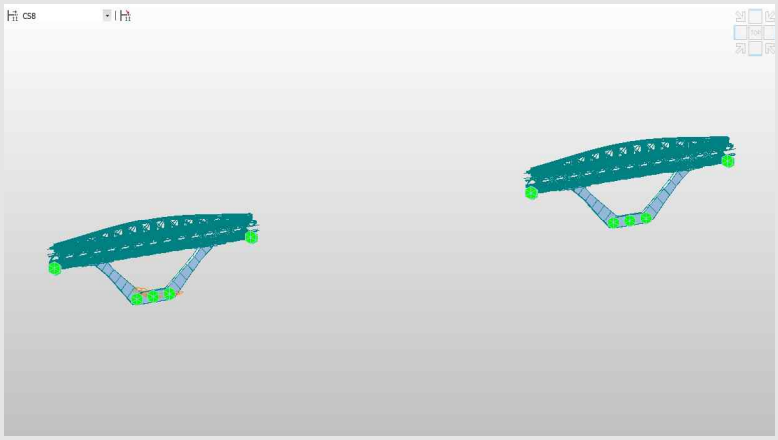


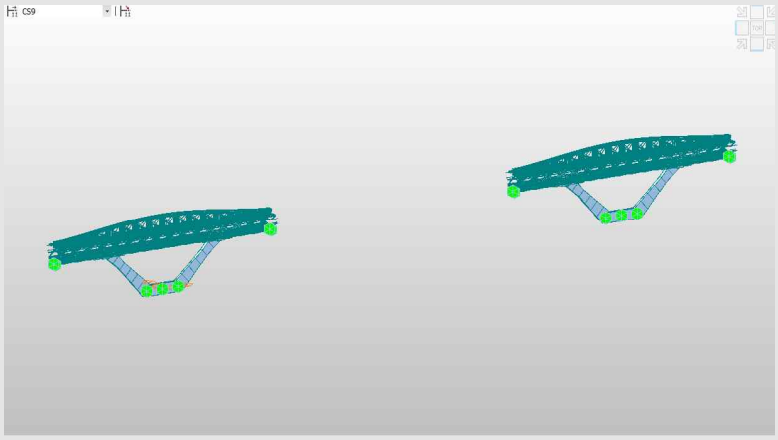
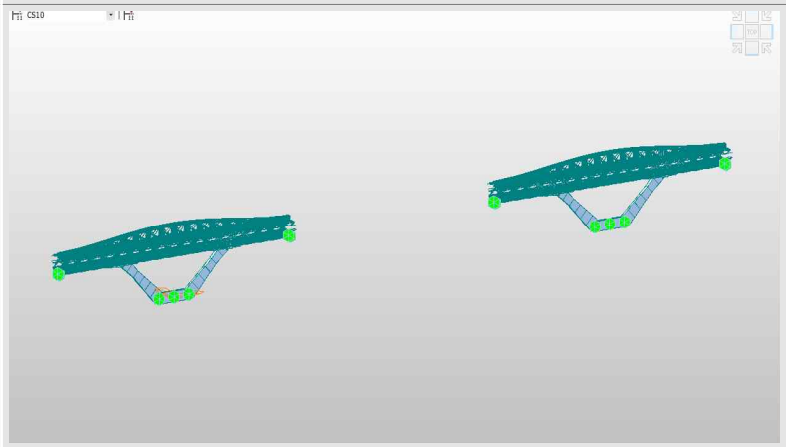
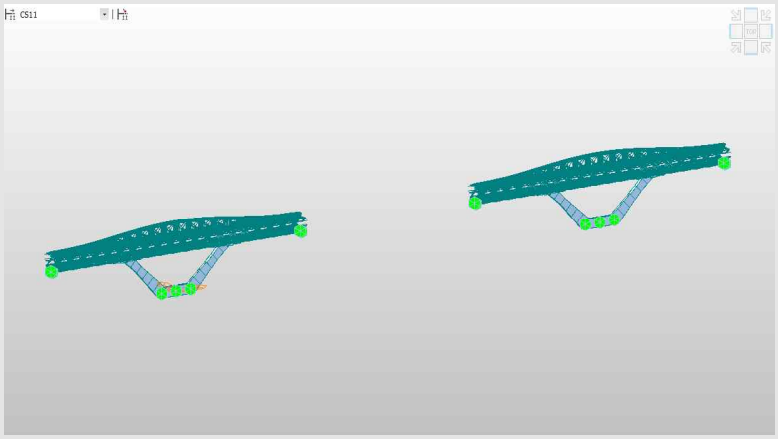
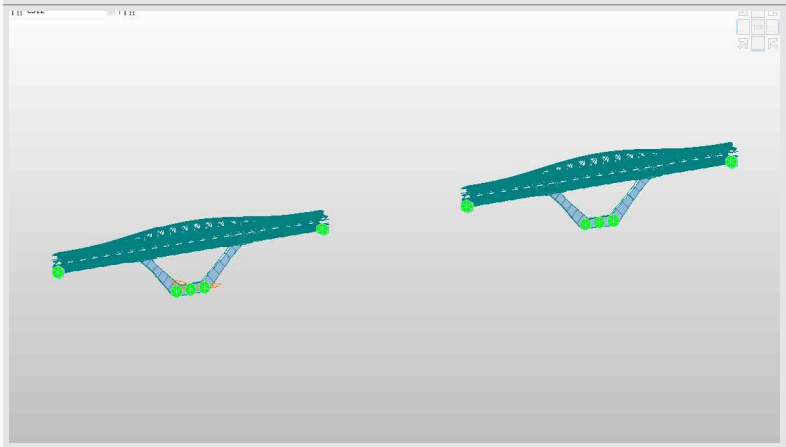


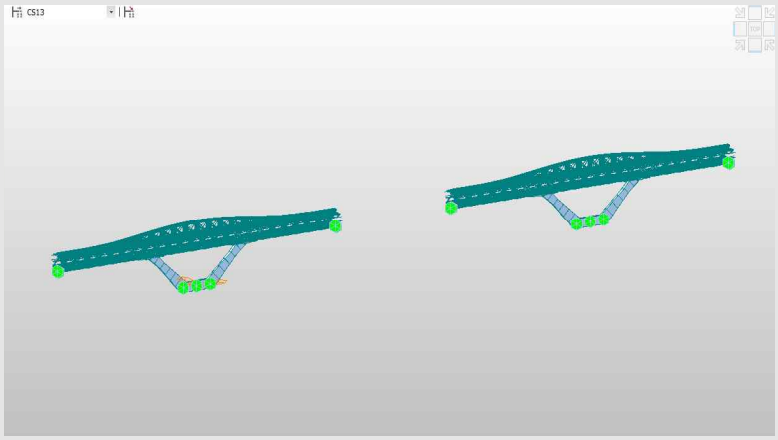
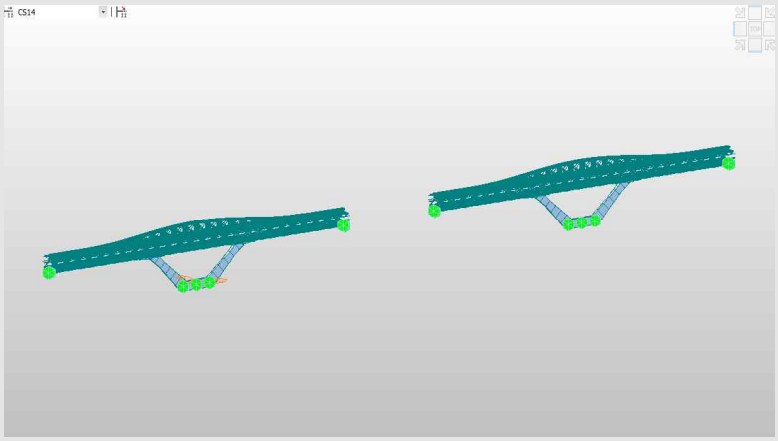
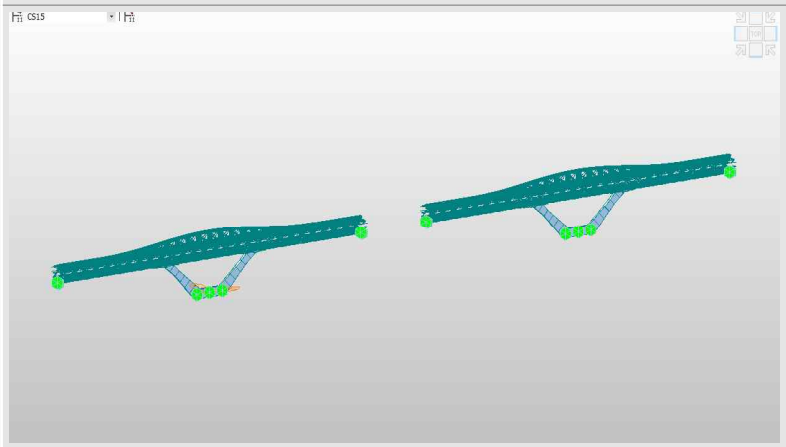
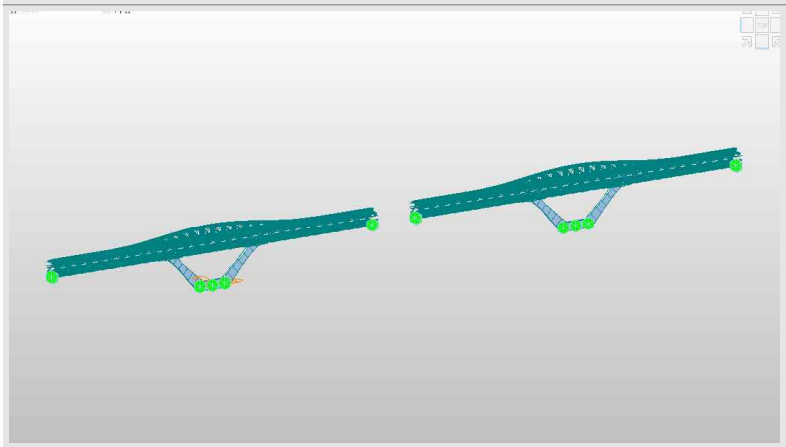
(2) 구조해석

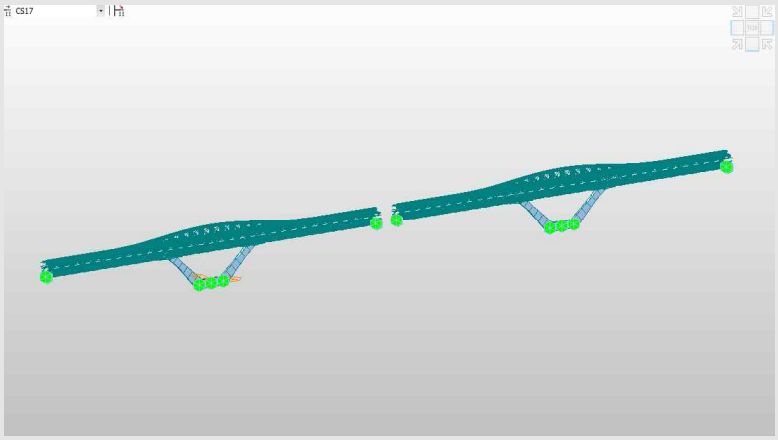
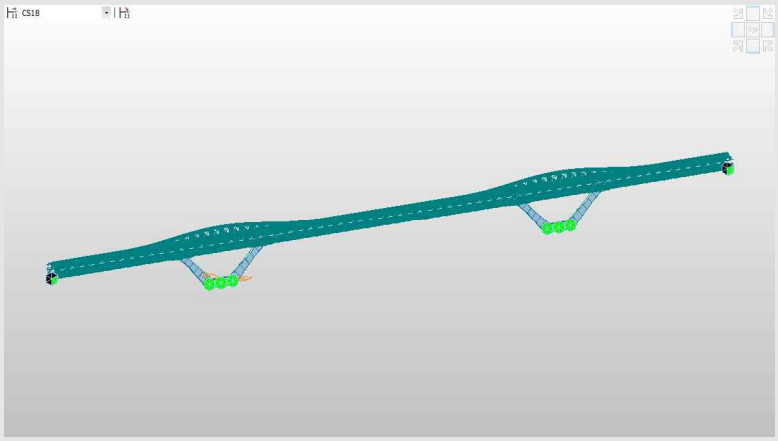
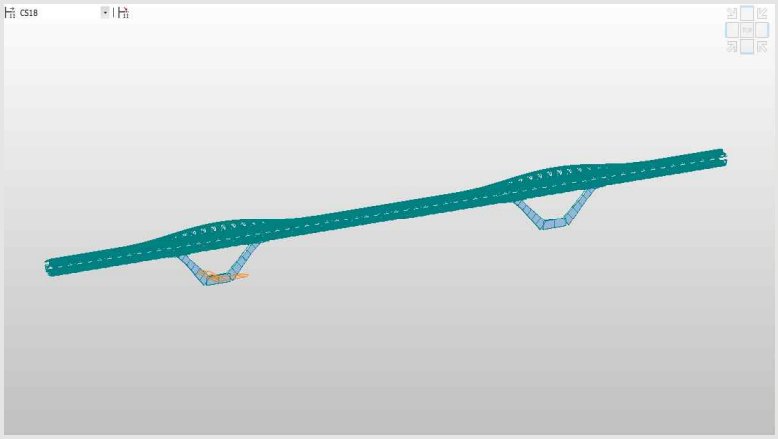
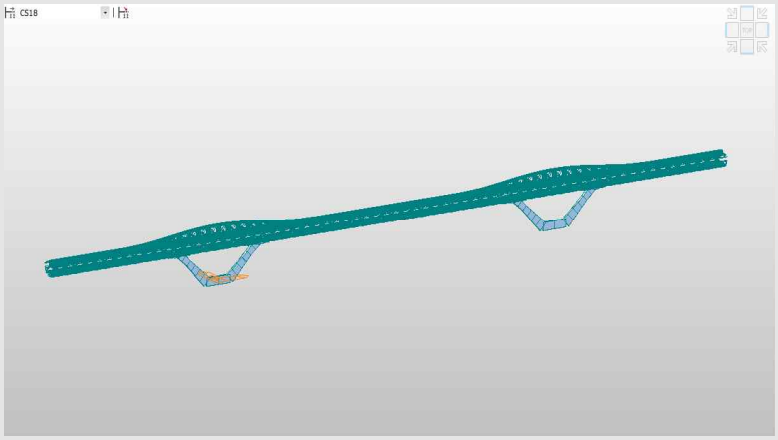
① 시공단계별 해석 모델

구 분	3D 모델링	비고
CS 1		하부 구조 시공
CS 2		MCE 장비를 이용한 백본 및 아웃리거 일괄 시공
CS 3		MCE 장비를 이용한 백본 및 아웃리거 일괄 시공
CS 4		MCE 장비를 이용한 백본 및 아웃리거 일괄 시공

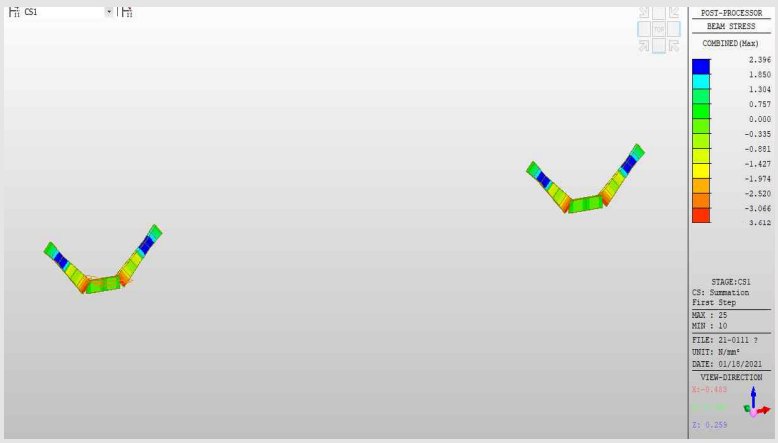
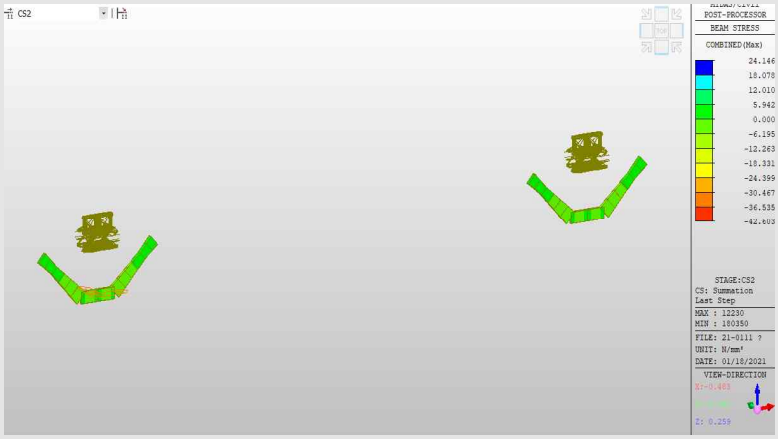
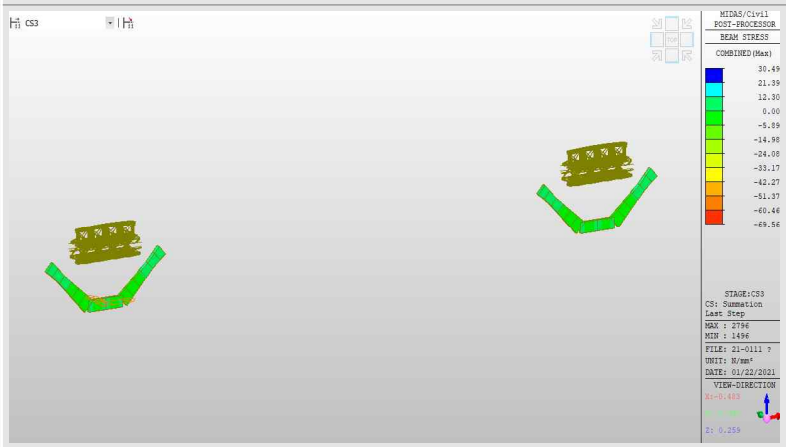
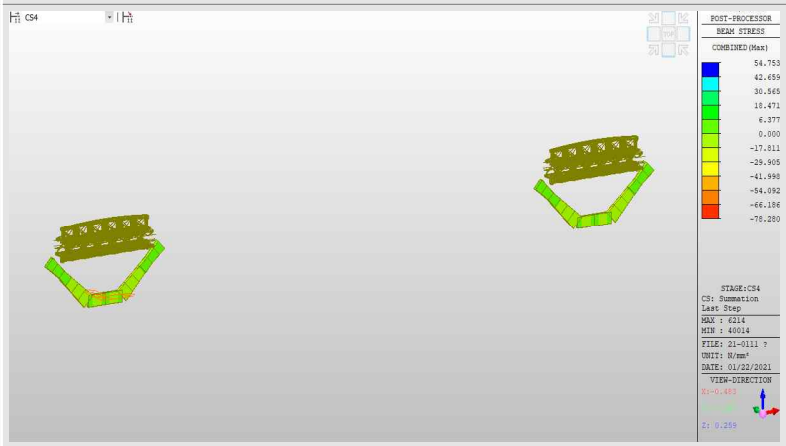
구 분	3D 모델링	비고
CS 5		하부 구조와 상부구조(백본, 아웃리거) 연결
CS 6		MCE 장비를 이용한 백본 및 아웃리거 일괄 시공
CS 7		MCE 장비를 이용한 백본 및 아웃리거 일괄 시공
CS 8		MCE 장비를 이용한 백본 및 아웃리거 일괄 시공

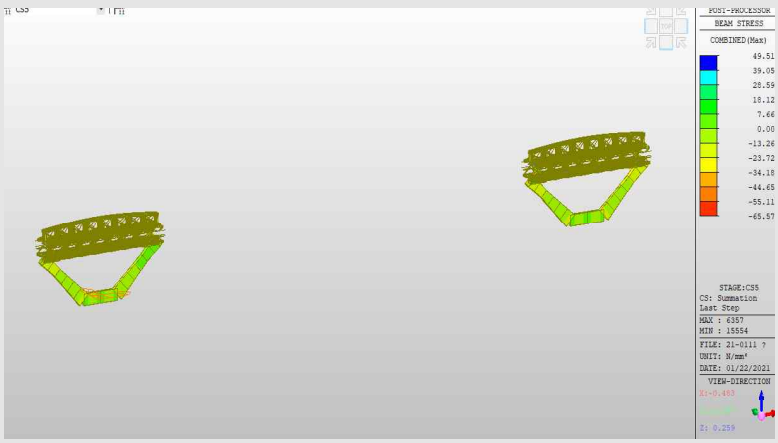
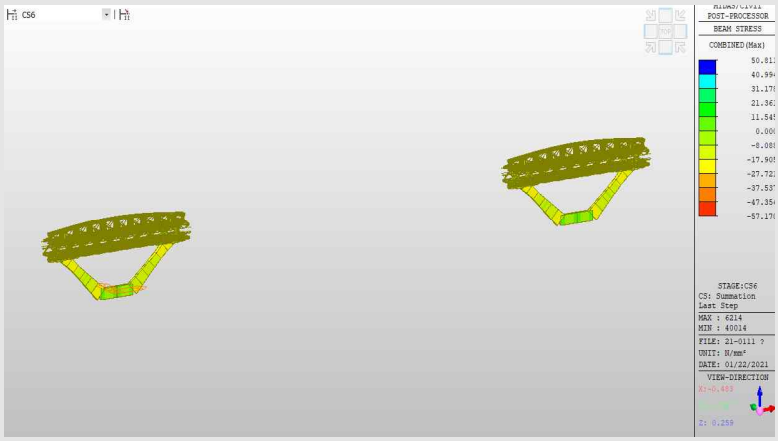
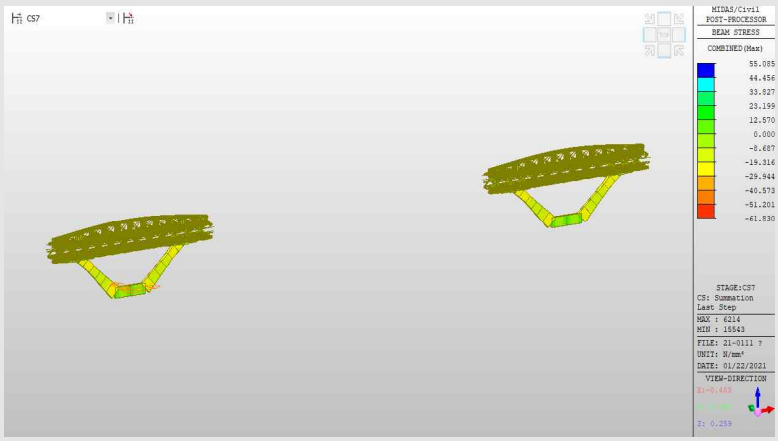
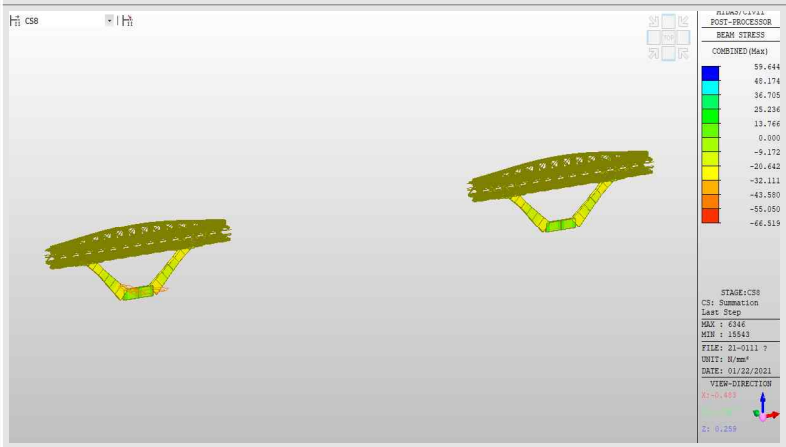
구 분	3D 모델링	비고
CS 9		MCE 장비를 이용한 백본 및 아웃리거 일괄 시공
CS 10		MCE 장비를 이용한 백본 및 아웃리거 일괄 시공
CS 11		MCE 장비를 이용한 백본 및 아웃리거 일괄 시공
CS 12		MCE 장비를 이용한 백본 및 아웃리거 일괄 시공

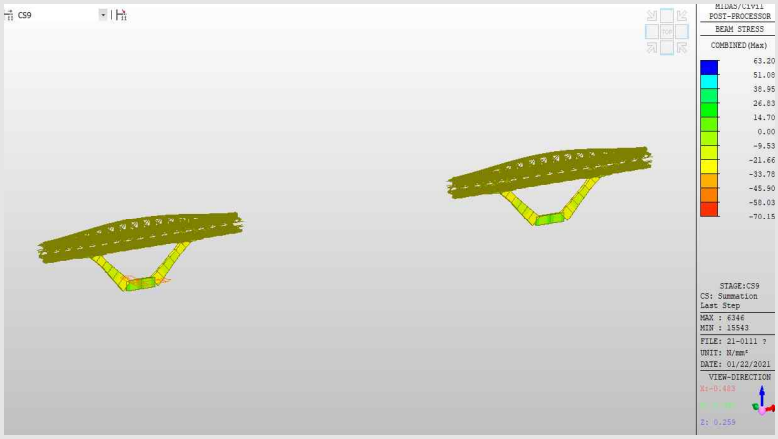
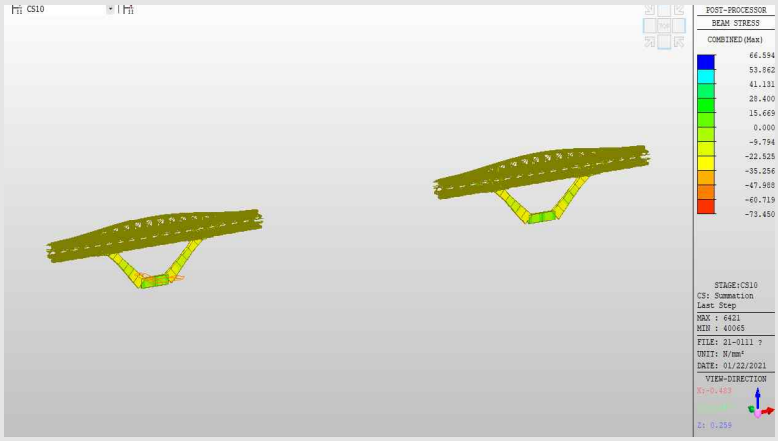
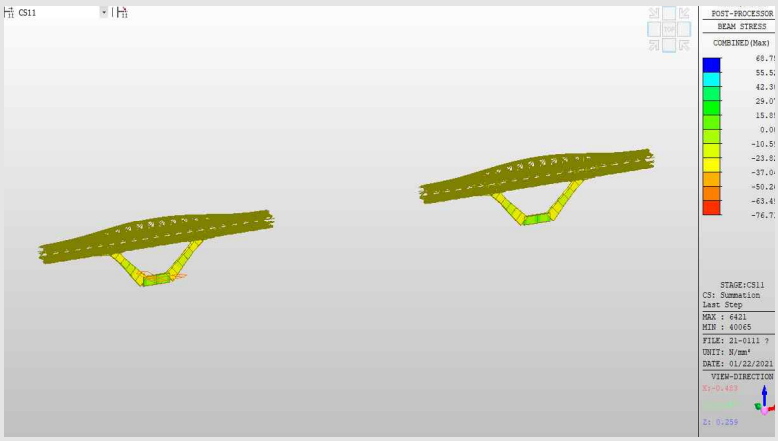
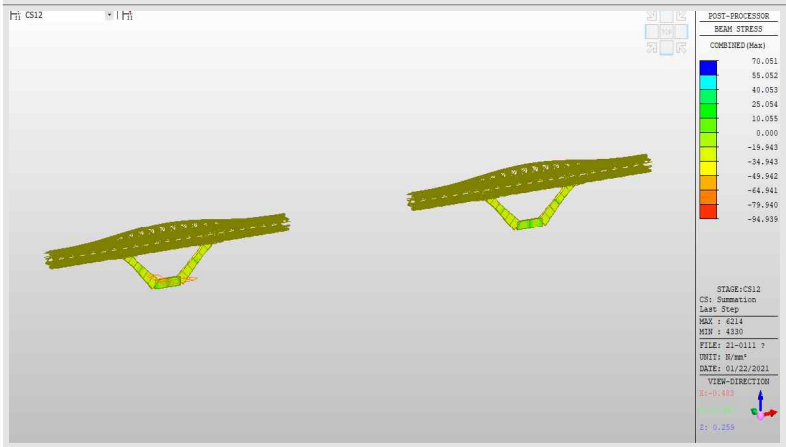
구 분	3D 모델링	비고
CS 13		MCE 장비를 이용한 백본 및 아웃리거 일괄 시공
CS 14		MCE 장비를 이용한 백본 및 아웃리거 일괄 시공
CS 15		MCE 장비를 이용한 백본 및 아웃리거 일괄 시공
CS 16		MCE 장비를 이용한 백본 및 아웃리거 일괄 시공

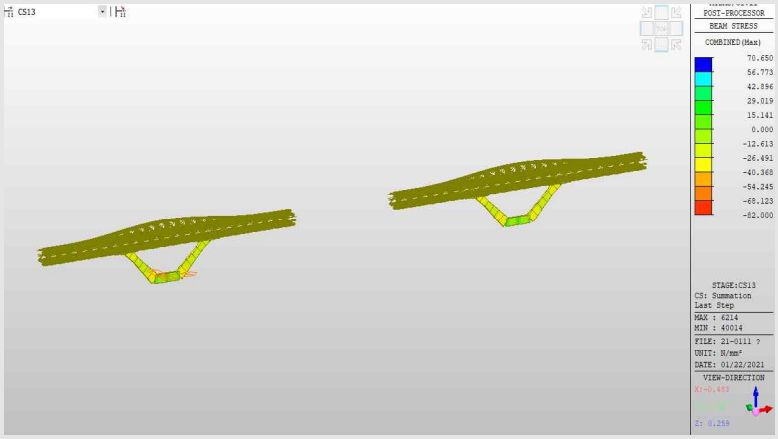
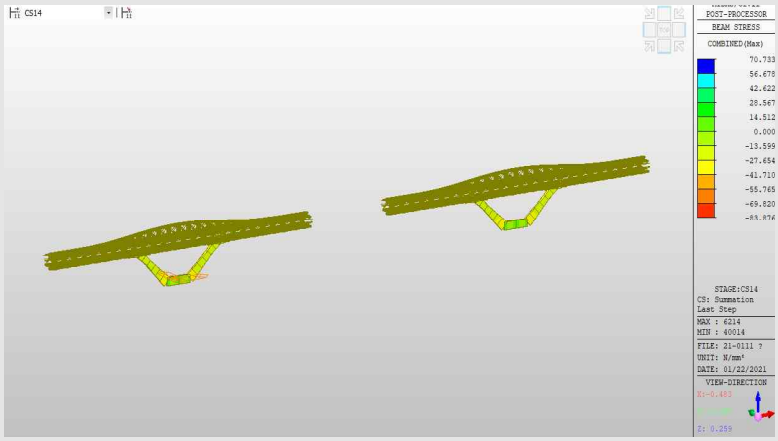
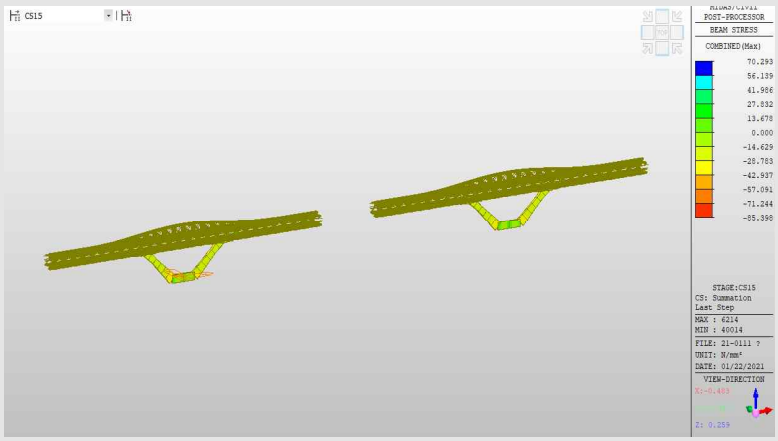
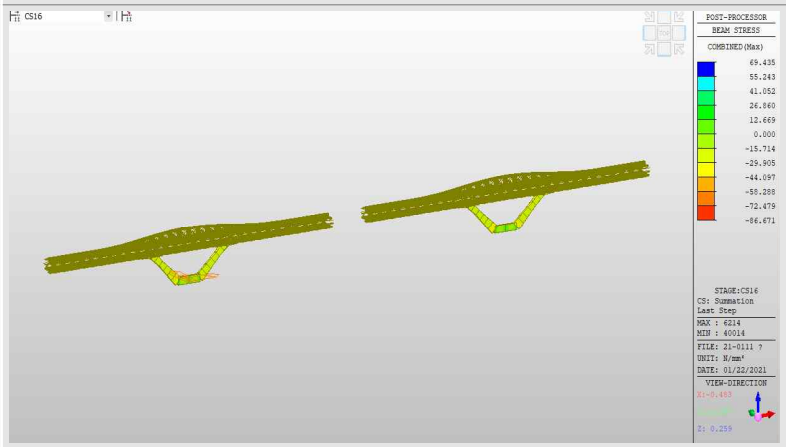
구 분	3D 모델링	비고
CS 17		MCE 장비를 이용한 백본 및 아웃리거 일괄 시공
CS 18		중앙부 Key Seg 결합
CS 19		바닥틀, 주행로, 2차 고정하중
CS 20		공용중 하중 재하 (활하중 온도하중 풍하중 설하중)

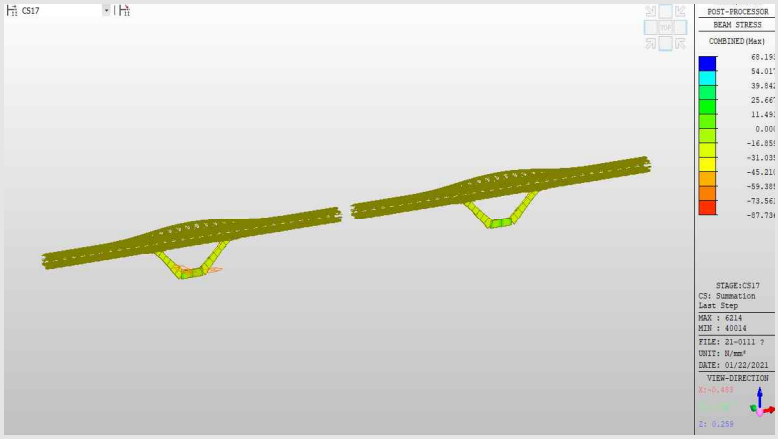
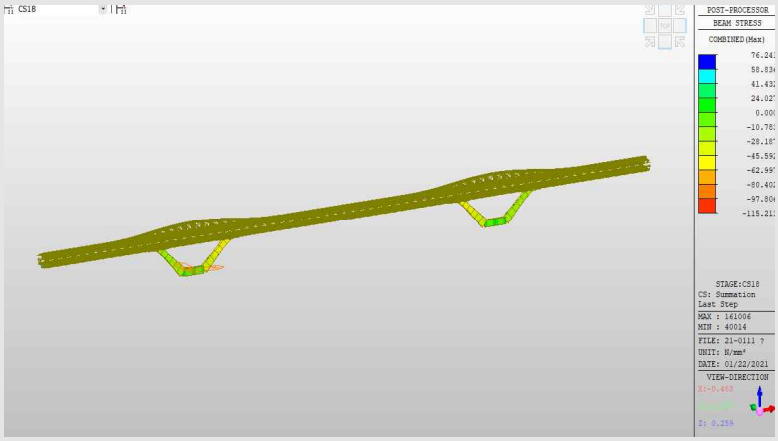
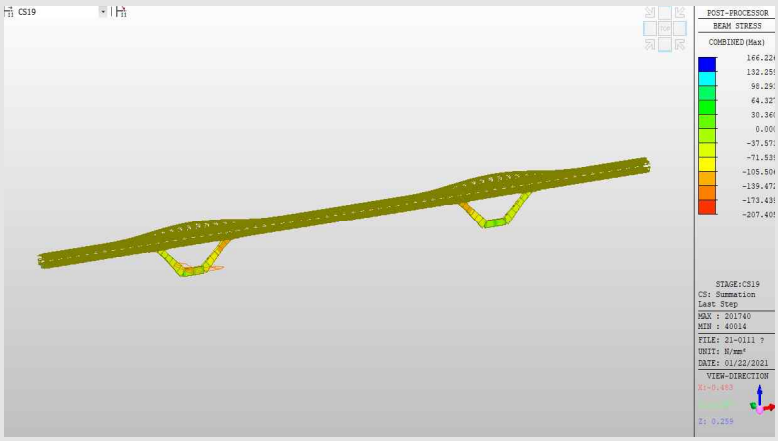
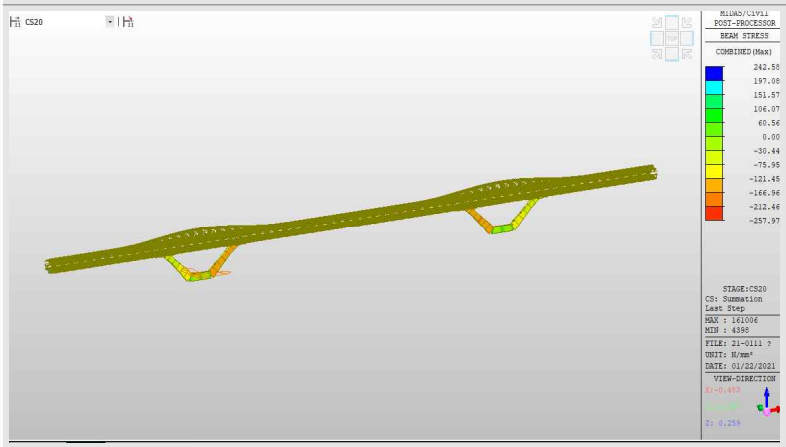
(3) 시공단계별 응력 검토

구 분	해석 결과	발생응력
CS 1		인장 : 2.396 MPa < 215 MPa (O.K) 압축 : -3.612 MPa < 215 MPa (O.K)
CS 2		인장 : 24.146 MPa < 215 MPa (O.K) 압축 : -42.603 MPa < 215 MPa (O.K)
CS 3		인장 : 30.495 MPa < 215 MPa (O.K) 압축 : -69.563 MPa < 215 MPa (O.K)
CS 4		인장 : 54.753 MPa < 215 MPa (O.K) 압축 : -78.280 MPa < 215 MPa (O.K)

구 분	해석 결과	발생응력
CS 5		인장 : 49.519 MPa < 215 MPa (O.K) 압축 : -65.579 MPa < 215 MPa (O.K)
CS 6		인장 : 50.811 MPa < 215 MPa (O.K) 압축 : -57.170 MPa < 215 MPa (O.K)
CS 7		인장 : 55.085 MPa < 215 MPa (O.K) 압축 : -61.830 MPa < 215 MPa (O.K)
CS 8		인장 : 59.644 MPa < 215 MPa (O.K) 압축 : -66.519 MPa < 215 MPa (O.K)

구 분	해석 결과	발생응력
CS 9		인장 : 63.204 MPa < 215 MPa (O.K) 압축 : -70.156 MPa < 215 MPa (O.K)
CS 10		인장 : 66.594 MPa < 215 MPa (O.K) 압축 : -73.450 MPa < 215 MPa (O.K)
CS 11		인장 : 68.750 MPa < 215 MPa (O.K) 압축 : -76.717 MPa < 215 MPa (O.K)
CS 12		인장 : 70.051 MPa < 215 MPa (O.K) 압축 : -94.939 MPa < 215 MPa (O.K)

구 분	해석 결과	발생응력
CS 13		인장 : 70.650 MPa < 215 MPa (O.K) 압축 : -82.000 MPa < 215 MPa (O.K)
CS 14		인장 : 70.733 MPa < 215 MPa (O.K) 압축 : -83.876 MPa < 215 MPa (O.K)
CS 15		인장 : 70.293 MPa < 215 MPa (O.K) 압축 : -85.398 MPa < 215 MPa (O.K)
CS 16		인장 : 69.435 MPa < 215 MPa (O.K) 압축 : -86.671 MPa < 215 MPa (O.K)

구 분	해석 결과	발생응력
CS 17		인장 : 68.193 MPa < 215 MPa (O.K) 압축 : -87.736 MPa < 215 MPa (O.K)
CS 18		인장 : 76.241 MPa < 215 MPa (O.K) 압축 : -115.211 MPa < 215 MPa (O.K)
CS 19		인장 : 166.226 MPa < 215 MPa (O.K) 압축 : -207.405 MPa < 215 MPa (O.K)
CS 20		인장 : 242.589 MPa < 290.25 MPa (O.K) 압축 : -257.974 MPa < 290.25 MPa (O.K)

(4) 검토 결과

시공단계별 응력 검토 결과, 시공 전 단계에 걸쳐 모든 부재가 허용응력치 내에 존재하는 것으로 나타나 신형식 경전철 고가구조물의 MCE장비를 이용한 가설시공 단계별 구조 안전성을 확인하였다.

시공 단계	인장응력(MPa)	압축응력(MPa)	허용응력(MPa)	검토 결과	비고
CS 1	2.396	-3.612	215.0	O.K	
CS 2	24.146	-42.603	215.0	O.K	
CS 3	30.495	-69.563	215.0	O.K	
CS 4	54.753	-78.280	215.0	O.K	
CS 5	49.519	-65.579	215.0	O.K	
CS 6	50.811	-57.170	215.0	O.K	
CS 7	55.085	-61.830	215.0	O.K	
CS 8	59.644	-66.519	215.0	O.K	
CS 9	63.204	-70.156	215.0	O.K	
CS 10	66.594	-73.450	215.0	O.K	
CS 11	68.750	-76.717	215.0	O.K	
CS 12	70.051	-94.939	215.0	O.K	
CS 13	70.650	-82.000	215.0	O.K	
CS 14	70.733	-83.876	215.0	O.K	
CS 15	70.293	-85.398	215.0	O.K	
CS 16	69.435	-86.671	215.0	O.K	
CS 17	68.193	-87.736	215.0	O.K	
CS 18	76.241	-115.211	215.0	O.K	중앙부 Key Seg 결합
CS 19	166.226	-207.405	215.0	O.K	바닥틀, 주행로, 2차 고정하중
CS 20	242.589	-257.974	290.3	O.K	하중조합에 따른 허용응력 할증계수 1.35

가. 상부구조 모듈화 및 연결부 검토

국내 도시철도 고가구조물은 일반 철도교 형식으로 설계되는 관계로 시공 또한 철도교 시공 기술이 적용되고 있다. 국내의 철도교 시공기술은 다양한 교량 형식 및 시공법이 적용된 고속철도 및 도시철도의 건설 경험이 풍부하여 우수한 수준이다. 최근 철도교 시공기술 동향은 건설비용의 절감, 품질 향상, 안전사고 방지 등을 위해 건설 현장 관리의 고도화 하는 방향으로 발전하고 있으며, 이에 따라 상부구조 모듈화를 통한 급속시공법의 개발 및 적용이 확대되는 추세이다.

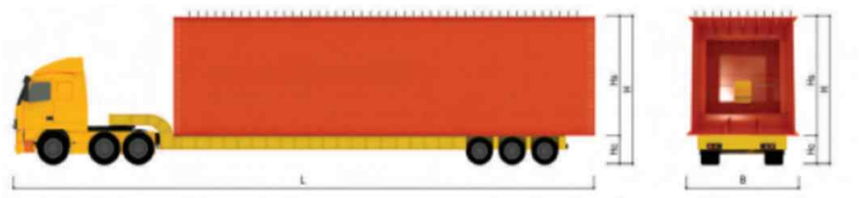
본 연구에서는 슬림한 장경간 고가구조물의 상부 구조의 모듈화 및 형상을 결정하고 각 요소간 새로운 연결방식을 제안하고 검증하여, 이를 협소하고 민원 발생이 많은 도심지 공간에서 효과적으로 가설 및 시공하기 위한 모듈화 기술 개발함을 목적으로 한다.

(1) 상부구조 모듈화 사이즈 결정

상부구조의 모듈 사이즈 및 형상은 다음과 같은 점들을 고려하여 결정한다.

- 도심지 도로법 (제59조) 도로운반 길이 및 중량 기준 준용
- 운반 및 가설 장비의 용량
- 도로 점용 허가 및 교통 통제 최소화
- 가설시 구조적 안전성 확보
- 도심지 운반 가능한 모듈 사이즈

상부 모듈의 분할은 도로법 (제59조) 운반 길이 기준을 참고하여 도심지에서 적재하중 25ton이내로 길이 16.7m, 폭 2.5m, 높이 4.0m 이하로 계획하였다.

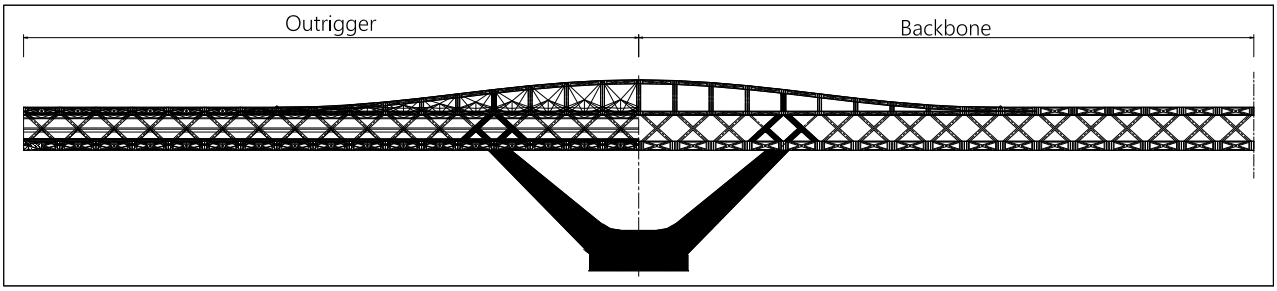


구 분		폭 (B)	높이 (H)	길이(L)	전체중량
도로운행 제한 기준	도로운행 기준	2.5m	4.0m	16.7m	총 중량 40ton (적재하중 25ton)
	도로운행 허가 기준	3.5m	4.5m	19.0m	

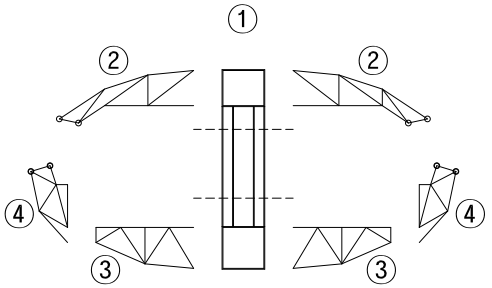
< 도로법 (제59조) 차량 운행 제한 기준 >

(가) 상부구조의 모듈 분할 및 크기 결정

① 상부 구조물 백본(backbone), 아웃리거(outrigger) 일반도



② 상부 모듈화 분할



① 백본공장 제작 및 현장연결

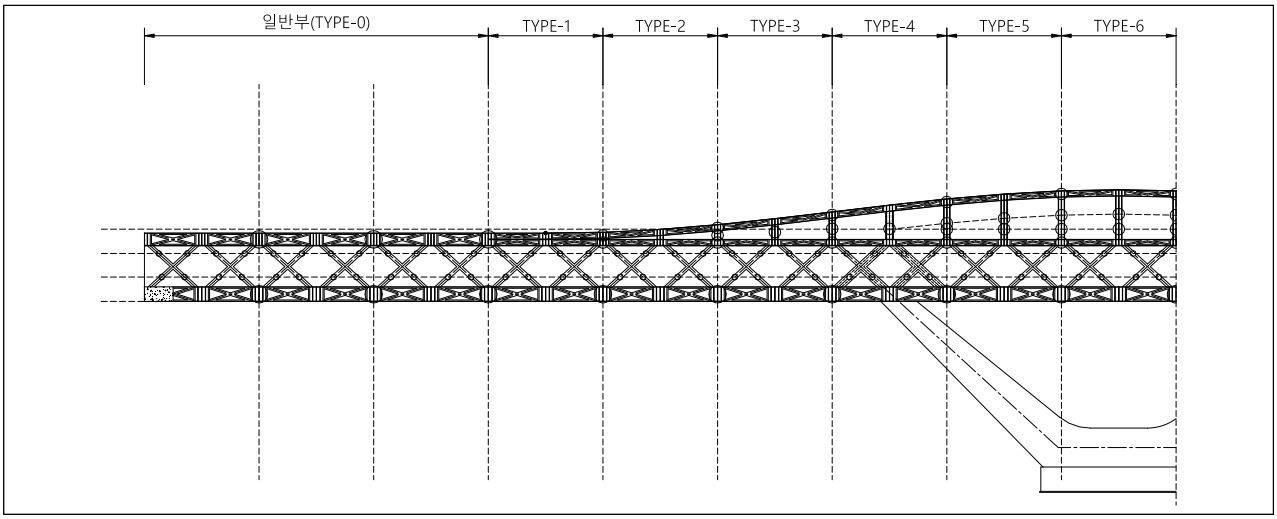
② 아웃리거 상부 공장제작 및 백본 현장연결

③ 아웃리거 하부 공장제작 및 현장연결

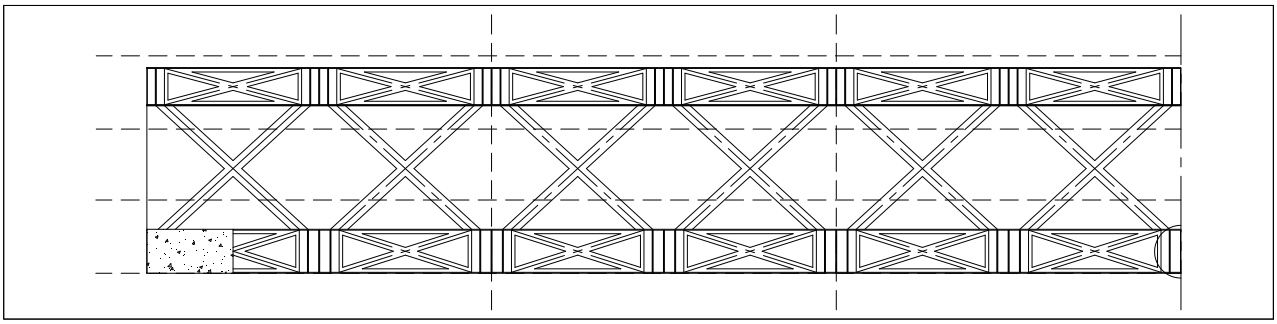
④ 난간부 공장제작 후 아웃리거 하부 현장연결

③ 백본 모듈단위

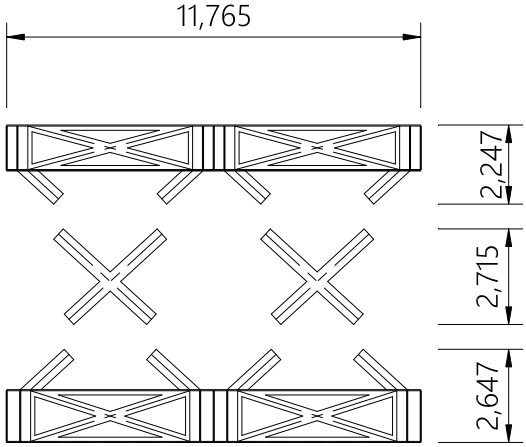
- 백본(Back Bone) 단면 분할 상세



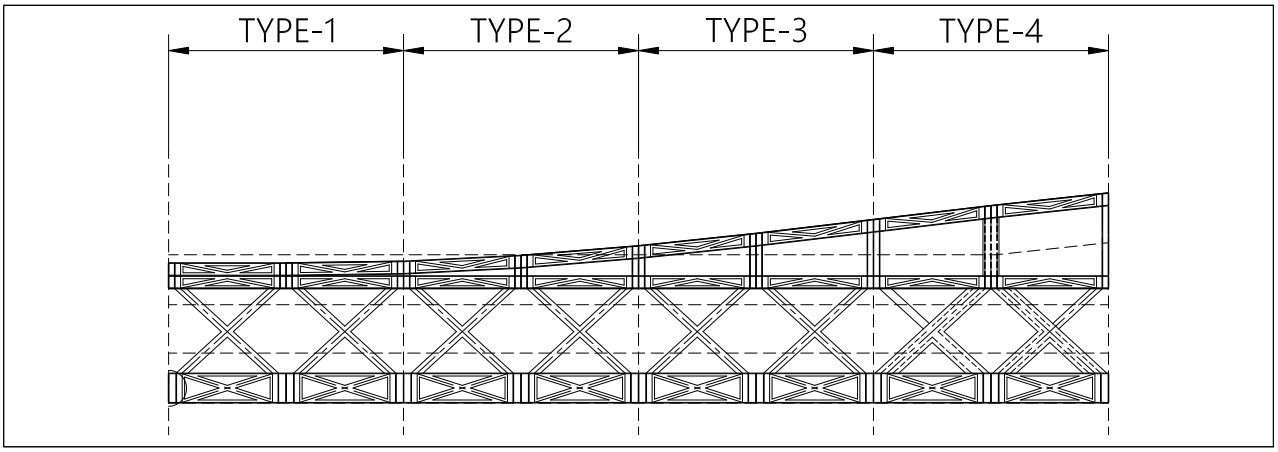
- 백본 블록(Back Bone Block) 분할도 : 일반부(TYPE-0)



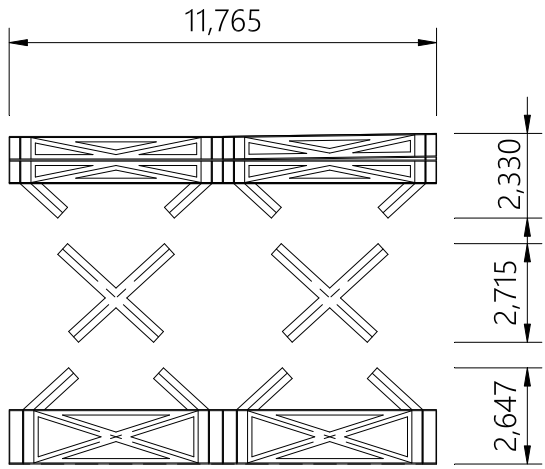
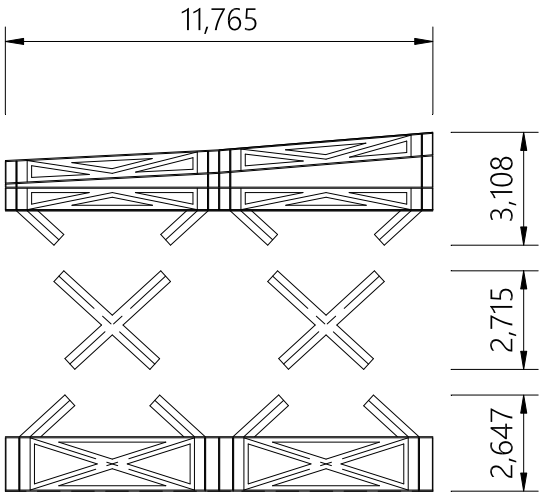
- 백본 블록(Back Bone Block) 제작 및 운반 분할도 : 일반부(TYPE-0)

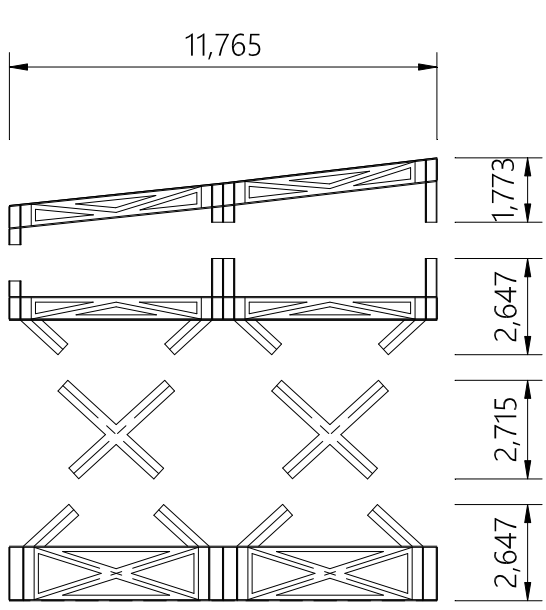
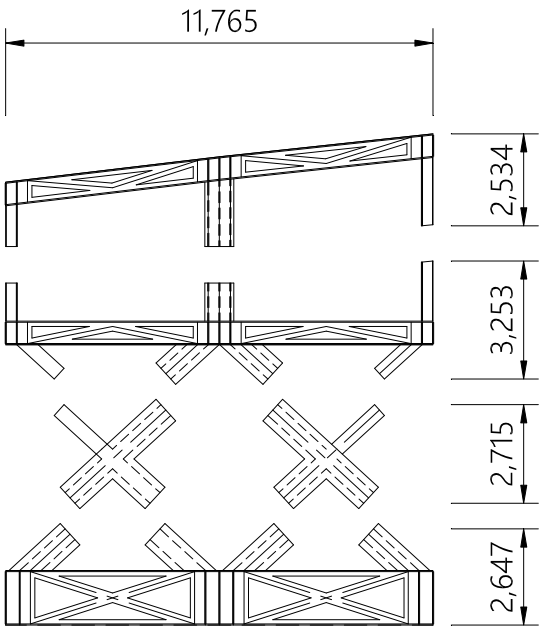
구 분	일반부(TYPE-0)
백본	

- 백본 블록(Back Bone Block) 분할도 : 변곡부(TYPE-1~4)

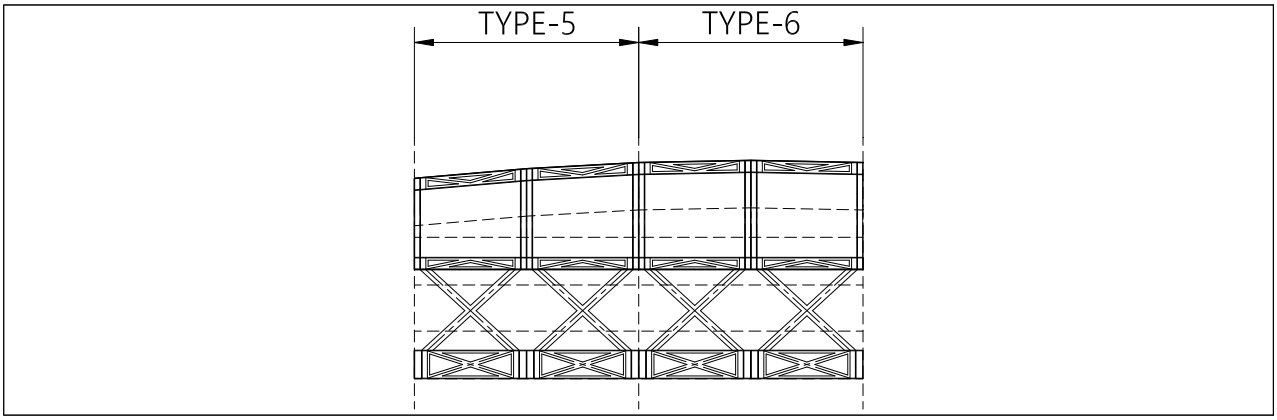


- 백본 블록(Back Bone Block) 제작 및 운반 분할도 : 변곡부(TYPE-1~4)

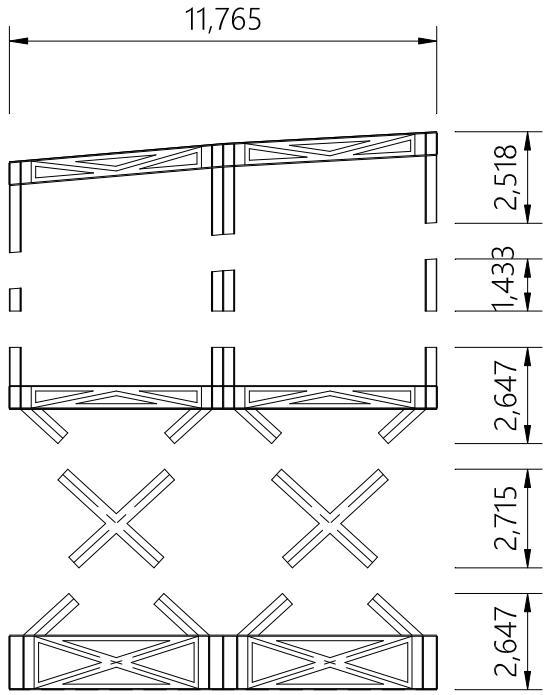
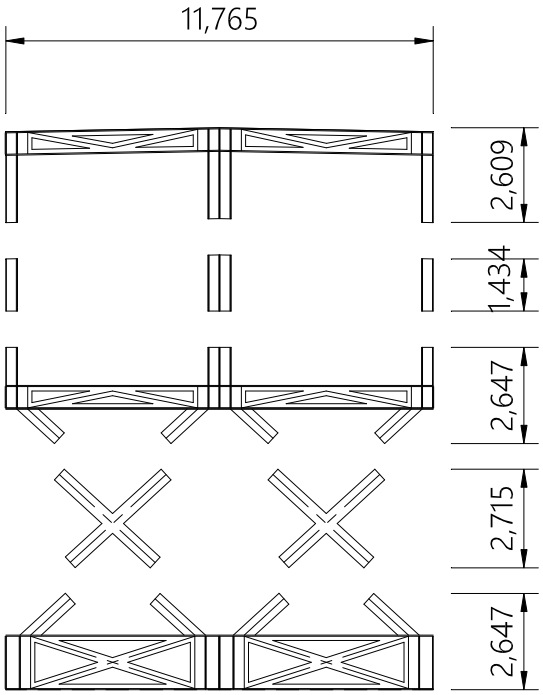
구 분	TYPE-1	TYPE-2
Back Bone		

구 분	TYPE-3	TYPE-4
Back Bone		

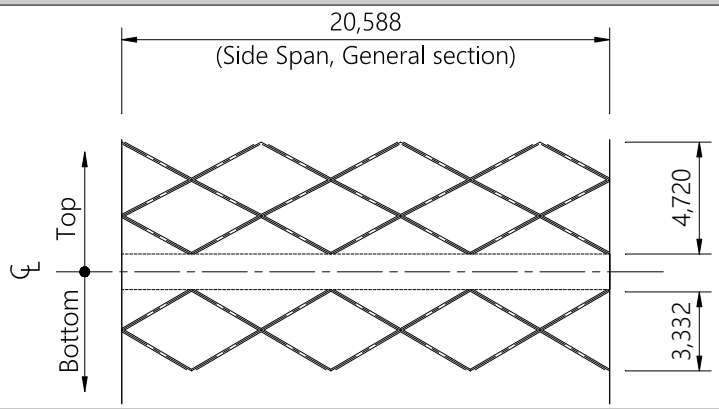
- 백본 블록(Back Bone Block) 분할도 : 지점부(TYPE-5~6)



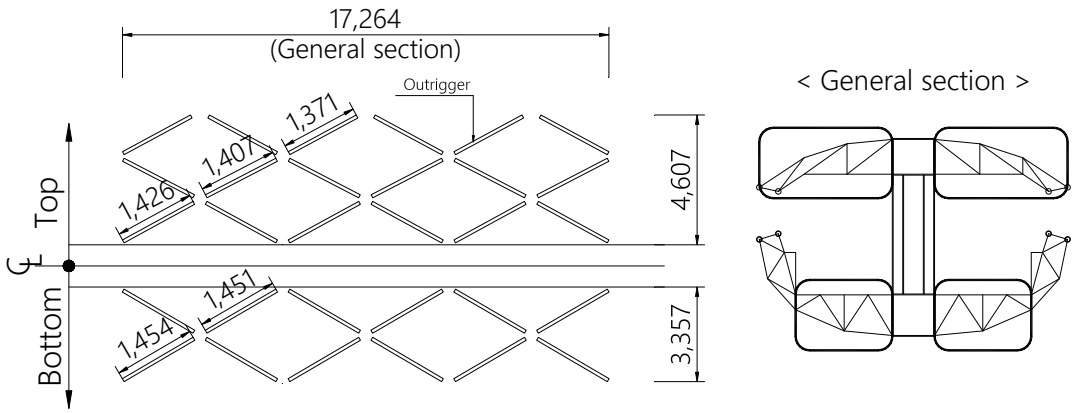
- 백본 블록(Back Bone Block) 제작 및 운반 분할도 : 지점부(TYPE-5~6)

구 분	TYPE-5	TYPE-6
Back Bone		

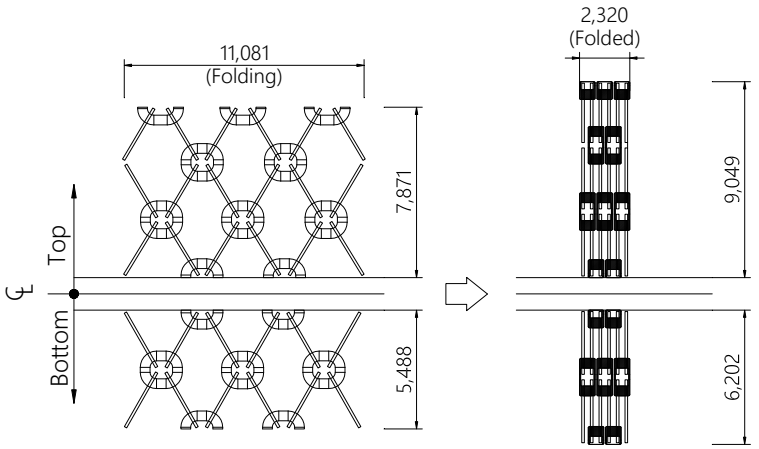
④ 백본 모듈단위- 아웃리거 분할도

아웃리거 모듈


아웃리거 연결접합을 위한 세부 모듈분할



아웃리거 연결접합을 위한 세부 모듈분할 (폴딩 기능)



(2) 상부구조 연결부 연구

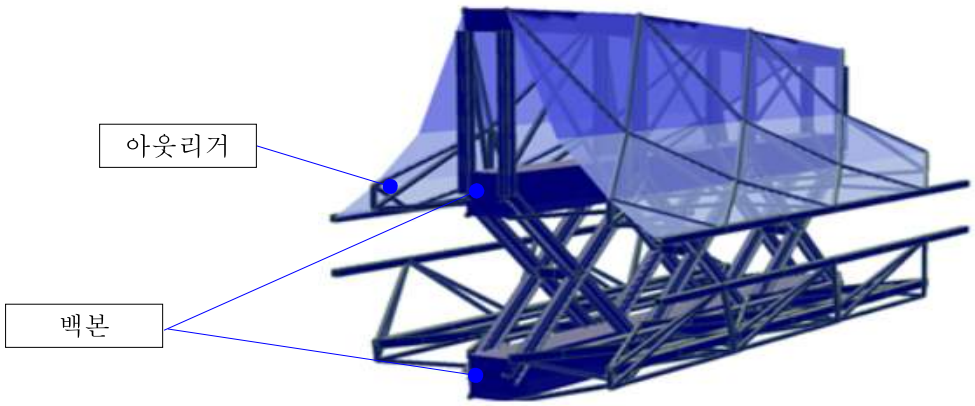
신형식의 상부구조는 구조 부재의 중량을 줄여 장경간화를 위한 백본과 아웃트리거로 구성된 새로운 형식의 구조물로서 다양하고 복잡한 구조형식의 연결 구조를 가지고 있다. 각 부재들은 운반을 위해 소블럭 혹은 소부재로 제작이 되어 현장에서 가설을 해야 한다. 강구조물의 연결접합은 용접접합, 볼트 접합, 리벳접합 방식을 채용하여 왔다.

용접접합의 경우 강재의 절감으로 자중이 감소하며 응력전달이 확실하고 무소음, 무진동으로 접합이 가능하지만 용접열에 의한 모재의 손상과 현장에서 품질관리가 까다롭고 전문용접사의 채용, 공기 등으로 인건비의 상승 등의 문제점이 있다.

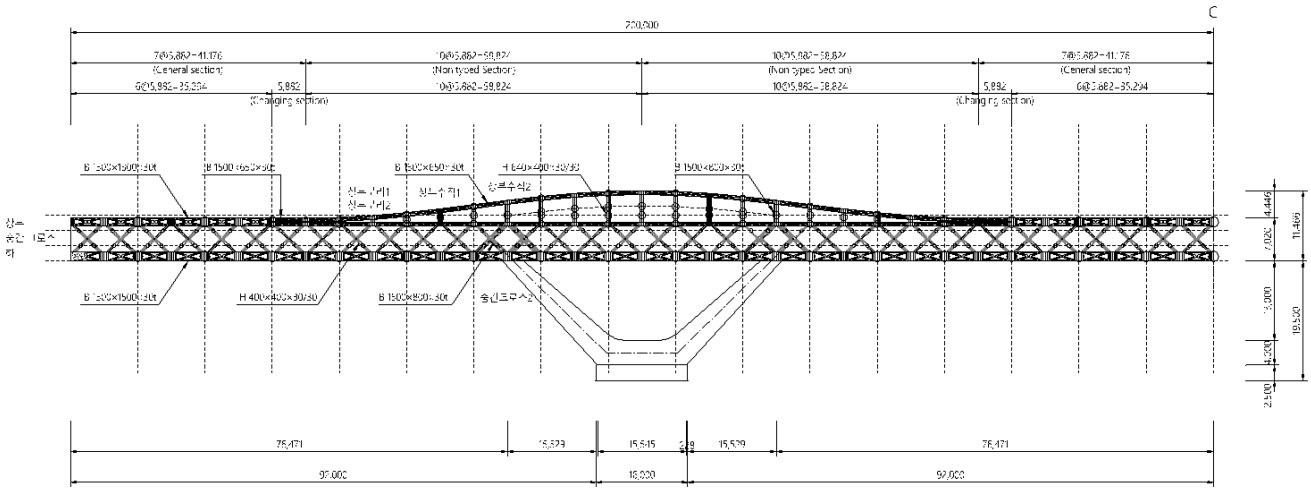
볼트접합의 경우 볼트의 채용만으로 쉽게 부재간의 접합이 가능하여 시공이 용이하나 진동, 충격 또는 반복하중을 받으면 볼트풀림 현상 및 접합부에 큰 변형이 발생할 수 있으며 볼트 체결 후 도장 등의 유지관리 및 미관손상의 문제가 있다.

리벳 접합의 경우는 시공시 소음이 있고 복잡하고 숙련된 기술자 확보가 어려워서 도심지 공사에서는 사용할 수가 없다.

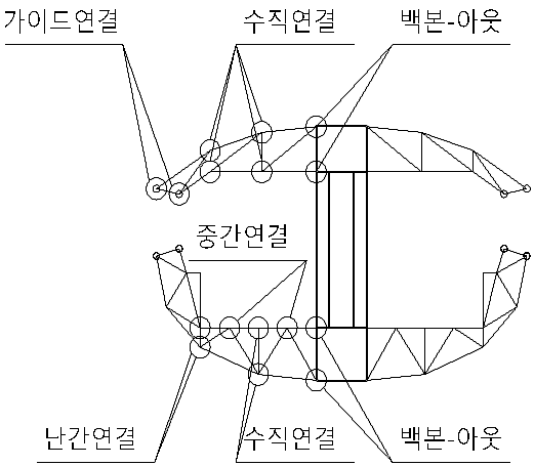
따라서, 이러한 기존 연결방식의 문제점을 해결하고 개선하여 현장에서 쉽게 연결 조립이 가능하며 미관을 해치지 않는 새로운 형식에 걸맞은 연결 구조의 연구가 필요하다.



<백본-아웃리거 신형식 구조 형상>



<신형식 구조 종방향 연결 위치>



구 분	연결부 수량
백본-백본 연결	201 개소
백본 -아웃리거	138 개소
아웃리거-아웃리거 (상부)	308 개소
아웃리거-아웃리거 (하부)	478 개소

<신형식 구조 연결부 형상 및 수량 (200m 기준)>

(가) 백본과 백본의 연결구조

백본과 백본의 모든 상부의 힘을 받아 하부로 전달하는 중요한 부재이다. 따라서, 용접에 의한 부재연결이 가능하나, 백본 부재는 부재가 매우 크고 높이도 높기 때문에 공장에서 용접으로 제작한 후 현장에서 운반 후에 빠른 가설을 위해서는 새로운 모듈 연결구조를 제안하고자 한다. 기존의 강교 구조물에 적용하는 볼트 연결 방식은 마찰이음에 의한 볼트 연결 방식이 주를 이루고 있고 이는 추가 플레이트 및 많은 볼트 연결 체결로 인하여 미관이 불량하고 또한 도장등의 유지관리 문제가 있다. 따라서, 이를 개선하기 위해 인장접합 방식에 의한 새로운 모듈 연결구조를 연구하였다. 기존의 강교에서는 인건비가 싸고 박판부재를 적용 얇은 판형 부재로 설계를 해왔기 때문에 인장접합 방식을 적용했을 때 얇은 모부재가 변형이 발생하거나 결로수 유입등의 문제등으로 연결

구조로 적합하지 않게 여겨왔다. 이러한 이유로 주로 영구구조물이 아닌 가설장비 등의 연결이나 대형 송유관 등의 용접이 어려운 대형의 두꺼운 원형 강관부재의 연결에 주로 적용되어왔다. 그러나 본 새로운 신형식 교량의 경우에는 두꺼운 부재의 생산이 가능하고 연결 강봉 등의 기술을 접목하여 기존의 인장접합방식을 개선하여 적용하고자 한다.



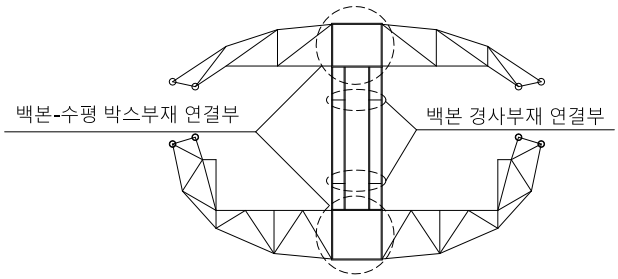
(a) 마찰 접합



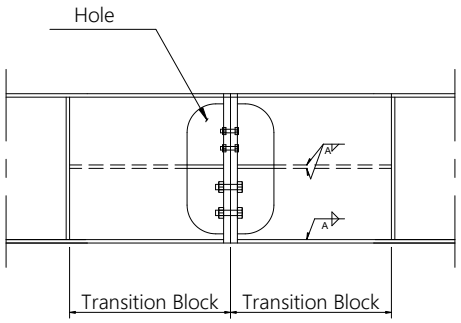
(b) 인장접합(건축 구조)

<마찰 접합 및 인장접합 연결 사례>

연결블록 구간을 제작 공장에서 용접을 통해 설치하고, 단면의 끝단에 보강 플레이트를 통해 공장에서 트랜지션(Transition) 블록을 설치하여 인장접합 체결하여 작업자가 레고처럼 용접없이 접합 체결이 용이하도록 하였다.

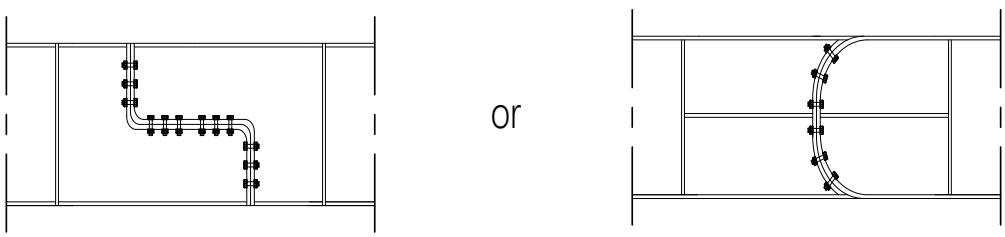


<백본 연결부위의 연결 위치>



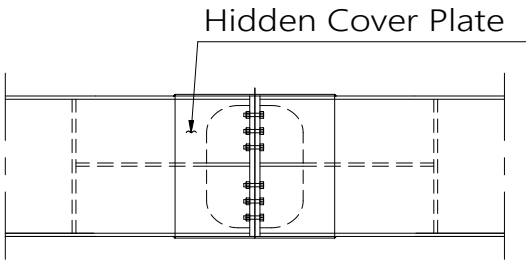
<개선된 인장접합 볼트연결>

다양한 형상 개선을 통해 전단 볼트와 인장볼트를 동시에 사용하여 연결성능을 증대하거나 시공성을 개선할 수 있다.



<형상 변경에 따른 시공성 및 연결성능 개선>

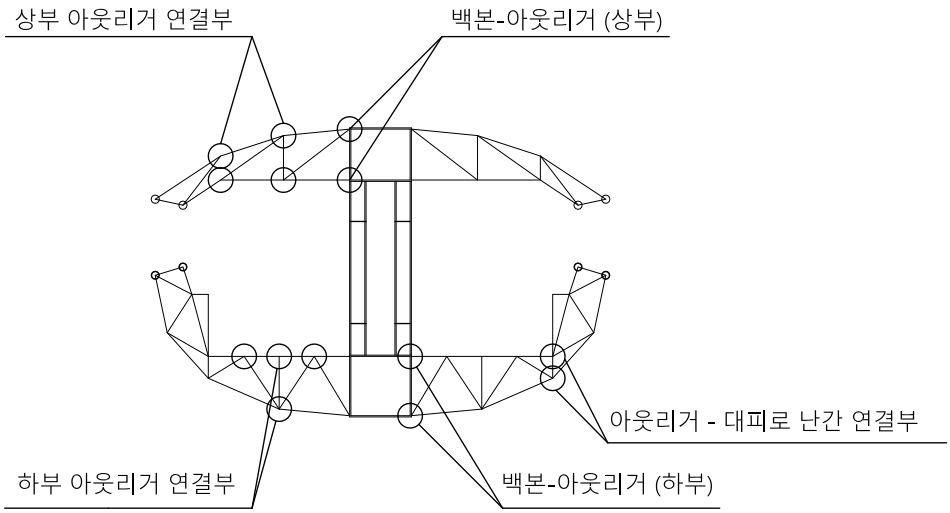
또한, 숨김 마감판 (Hidden Cover Plate)을 설치하여 볼트 위치를 가려 미관 개선 및 유지관리를 용이하게 할 수 있다.



<숨김 마감판(Hidden Cover Plate)에 의한 미관 개선>

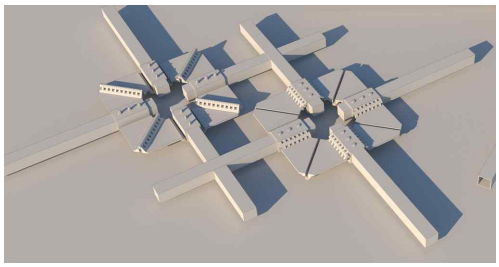
(나) 아웃리거와 아웃리거 연결구조

아웃리거와 아웃리거간의 연결구조는 가장 많은 연결구조로 이루어져 있으면서 가장 복잡한 구조이기 때문에 볼트연결도 쉽지 않다. 따라서, 현장 연결 중 가장 비중이 있는 부재들이다. 이를 위해서는 매우 복잡한 구조이다. 도심지 소부재로 가지고 올 때 공장에서 현장간 운반 부재 회수도 가장 많으므로 운반이 용이하고 폴딩힌지(Folding Hinge) 시스템에 의한 접합방식을 적용하였다. 이 공법은 용접을 최소화하고 형상을 쉽게 유지하면서도 부재운반을 위해 접기에 쉬운 구조로 되어 운반이 용이하고 현장에서의 가설시 별도의 용접이 없이 주조된 고정 연결재(Casting Fixiging Connector)에 의해 부재를 견고하게 연결할 수 있는 매우 획기적인 가설방법이다.

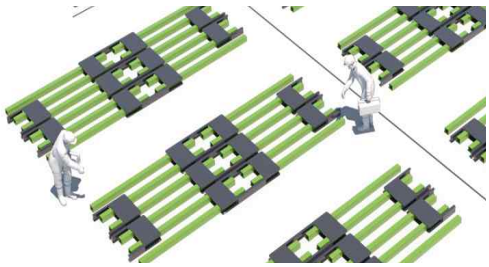


<아웃리거 연결 위치>

임시 고정힌지(Temporary Fixing Hinge)는 강성(Stiffness)구조재와 연성(Flexible) 구조재의 조합으로 얇은 판형구조로 주부재를 용접이나 볼트없이 위치를 고정하고 임시로 고정 힌지 역할을 하고 아웃리거 구조물을 접어서 아웃리거 부재를 운반이 용이한 조밀한(compact) 구조로 다량을 공장에서 현장까지 운송할 수 있다.

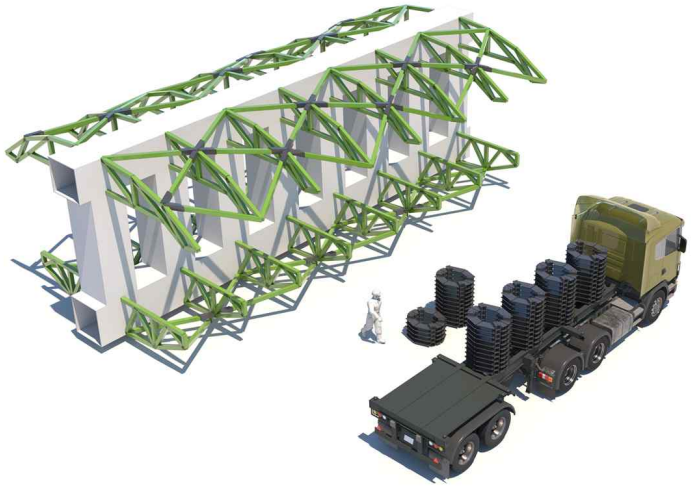


<임시 고정힌지 형상>



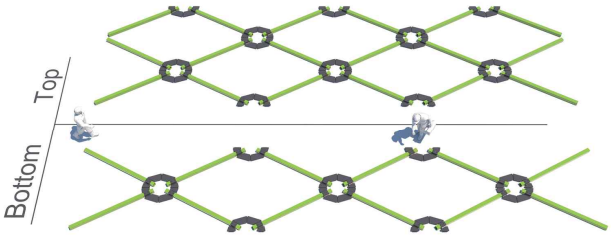
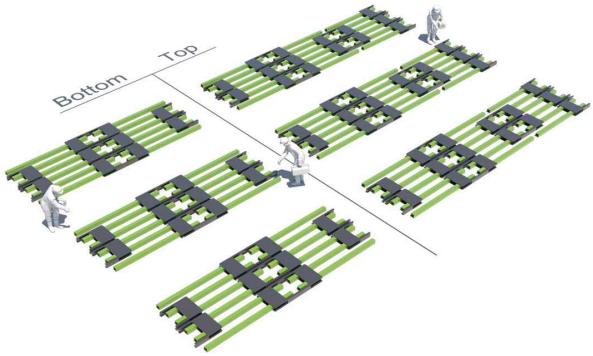
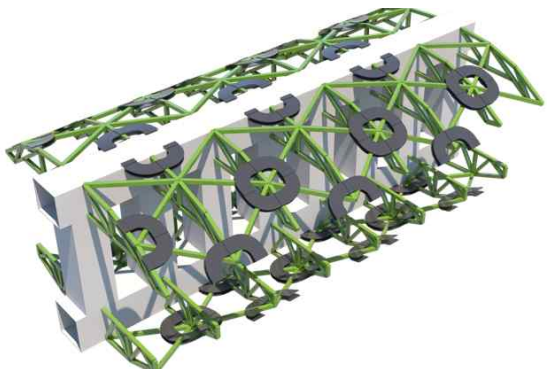
<아웃리거 부재 폴딩(FOLDING) 전경>

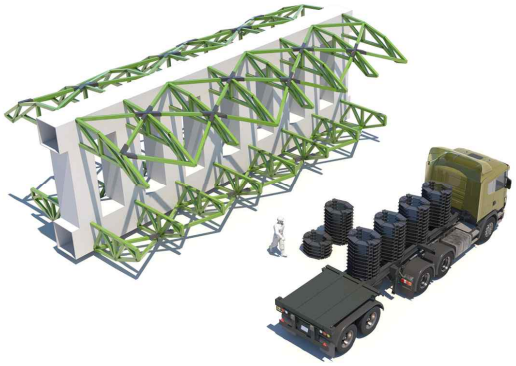
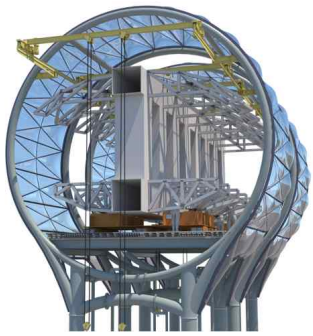
또한, 가설현장위치에서는 연결부위에 주조하여 만든 고정 연결재(Casting Fixing Connector)를 설치하여 구조물을 볼트로 간단히 연결한 후 임시 고정힌지(Temporary Fixing Hinge)를 철거하고 재활용하여 사용한다.



<주조된 고정 연결재(Casting Fixing Connector) 설치 및 임시고정 힌지 수거>

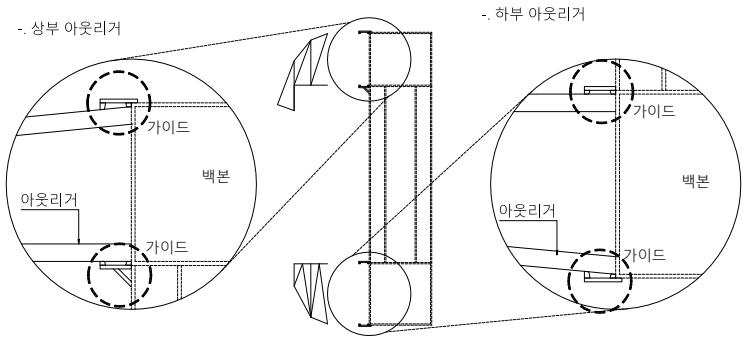
폴딩힌지(Foldidng Hinge)시스템에 의한 아웃리거의 시공순서는 다음과 같다.

1. 임시 고정 힌지 전개 및 설치	2. 아웃리거 의한 폴딩(Folding)작업
	
3. 운반 트레일러에 의한 현장 운반	4. 폴딩 아웃리거 설치위치로 인양
	
5. 아웃리거 전개	6. 아웃리거 전개 상세 현황
	

7. 주조 힌지 연결재 설치 및 임시 고정 힌지 제거	8. 아웃리거 설치 완료 전경
	

(다) 백본과 아웃리거 연결구조

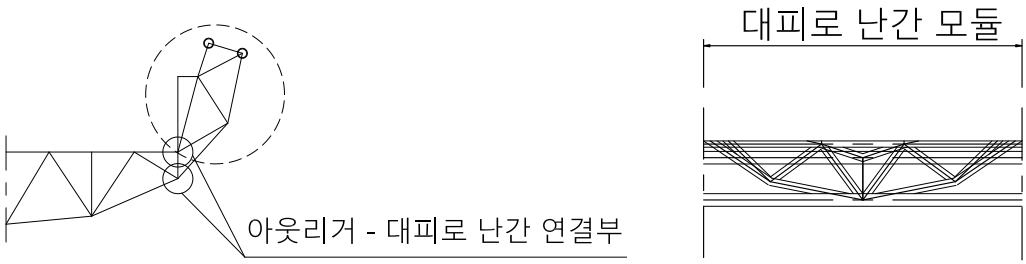
백본과 아웃리거의 연결구조는 가설된 백본에 폴딩된 아웃리거를 거치하고 아웃리거를 전개한 이후 볼트 연결하여 구조체를 완성한다. 아웃리거의 빠른 가설을 위하여 백본에 임시 가이드를 설치하고 아웃리거를 거치 후 경량 장비를 이용하여 가이드를 따라 전개하여 볼트연결을 체결한 후 임시 가이드를 제거한다.



<백본-아웃리거 연결부 백본 임시 가이드 및 볼트연결>

(라) 아웃리거와 대피로 난간 연결구조

아웃리거와 대피로 난간의 연결구조는 난간부를 일괄로 가설하여 볼트 체결을 해야 한다. 난간 부재는 접는 작업이 어렵고 공장에서 용접으로 부재간 연결을 한 후에 한번에 운반 및 설치가 가능한 사이즈이기 때문에 별도로 하나의 모듈을 볼트접합으로 일괄로 가설하여 설치할 수 있다.



<아웃리거와 대피로 난간 부재 연결부>

(마) 연결구조의 경제성 검토

신형식 고가구조의 경우 도심지에서 시공하기 때문에 신속하고 용이한 연결구조에 따라 어떠한 경제적 효과가 있는지를 검토해 보고자 한다. 가장 일반적인 시공 및 연결구조인 용접에 의한 접합 방식을 기준으로 하여 볼트접합 방식과 새로운 연결구조에 대한 공사비를 상부구조 기본 연장인

200m 수량을 기준하여 비교 분석 하였다. 공사비는 직접공사비 기준이며, 인양 및 설치장비는 동일한 장비를 사용하는 기준으로 산정하였다.

① 백본 연결에 관한 공사비 비교

접 합 방 식	공 사 비 (원)	용접접합 대비 공사비 비율
용 접 접 합	405,253,861 (원)	-
볼 트 접 합	302,547,310 (원)	75%
트랜짓 블록(Transit Block) 연결접합	221,516,022 (원)	55%

백본 연결과 관련하여 접합방법에 따른 공사비를 비교한 결과 용접접합대비 45%이상 절감할 수 있었다. 용접방식은 볼트방식에 비해 구조적인 강성 및 성능은 우수하지만, 현장에서의 용접시 비파괴 검사와 공기지연 그리고 용접 숙련공이 필요하다. 하지만, 기존의 볼트접합과 더욱 최적화한 트랜짓 블록(Transit Block)의 연결 접합은 시공성과 경제성에서 매우 우수함을 확인하였다. 연결성능에 대한 검증이 된다면 가격 경쟁력과 면밀히 검토해 볼 필요가 있음을 알 수 있었다.

② 아웃리거 연결에 관한 공사비 비교

접 합 방 식	공 사 비 (원)	용접접합 대비 공사비 비율
용 접 접 합	520,620,106 (원)	-
볼 트 접 합	525,150,105 (원)	101%
폴딩 힌지(Folding Hinge) 시스템 접합	377,427,921 (원)	72.5%

아웃리거에 의한 연결과 접합방법에 따른 공사비를 비교한 결과 폴딩 힌지(Folding Hinge) 시스템에 의합 접합 방법은 기존 용접접합대비 27.5%이상 공사비를 절감할 수 있었다. 특이한 것은 볼트연결 접합 방식이 아웃리거의 경우에 경제적이지 않다는 점이다. 그 이유는 연결부를 용접에 의해 수행하고 현장에서만 볼트연결을 하기 때문에 가설속도는 빠르나 경제성에서는 오히려 용접접합보다 불리했다. 폴딩 힌지(Folding Hinge)시스템의 경우 빠른 시간내에 숙련공이 없이도 쉽게 가설할 수 있는 방식이고 현장에서의 작업을 최소화하여 경제성면에서 매우 우수함을 확인하였다.

(바) 결론

이상에서 새로운 신형식 고가구조물의 접합방식은 기존의 용접과 볼트연결방식을 탈피하여 도심지에서 더욱 최적화되고 유용한 접합방식이다. 기존의 용접방식은 볼트방식에 비해 구조적인 강성 유지가 용이하지만, 현장에서의 용접시 비파괴 검사와 공기지연 그리고 고도의 훈련된 용접 숙련공이 필요하다. 하지만, 트랜짓 블록(Transit Block)을 이용한 백본간 연결과 폴딩힌지(Folding Hinge) 시스템에 의한 아웃리거간 접합 연결방법은 가설이 매우 용이하고 경제적인 무용접 방식이며, 이산화탄소 배출등 환경피해도 최소화 할 수 있다. 후속 2단계 연구과제에서 연결성능에 대한 실험적 검증이 된다면 기존 용접 및 볼트접합 대비 25% 이상 원가를 절감하고 미관도 우수한 경쟁력있는 매우 획기적인 접합방식이라 판단된다.

나. 하부구조 모듈화 및 연결부 검토

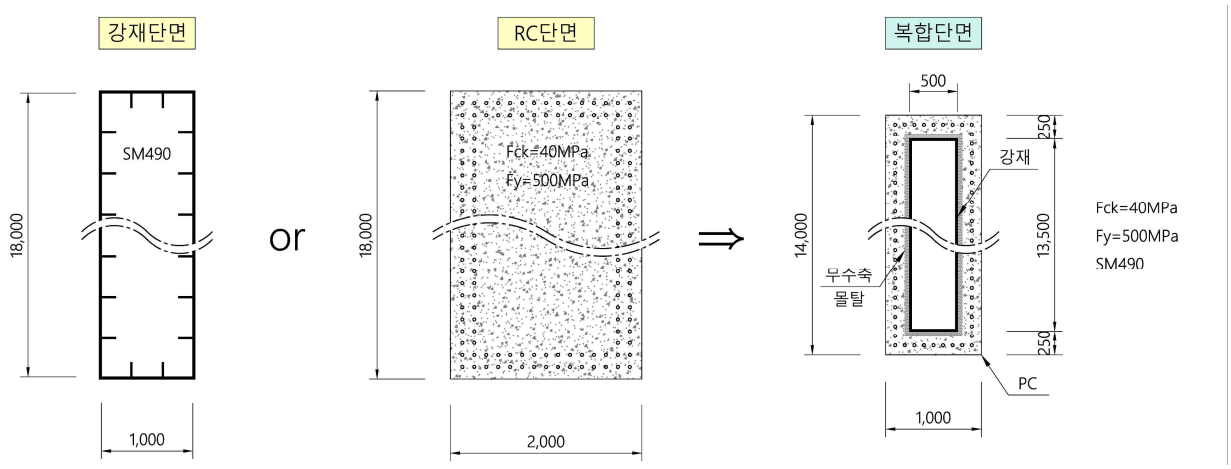
하부구조의 교각 하단부는 큰 압축력과 모멘트에 의한 인장력을 동시에 받는 구조물로서, 이를 위해 도심지를 고려하여 단면 축소가 가능한 강재 콘크리트 합성단면을 검토하였다. 교각의 가설여건과 형상에 따라 검토 된 합성단면의 선택적 적용이 가능하다. 첫 번째는 중공형의 강재-콘크리트 하이브리드 하부구조는 중공형 각관 강재와 PC세그먼트의 합성단면을 가지며, 합성단면 세그먼트 간 연결부는 슬리브와 에폭시에 의해 연결되는 구조이다. 두 번째는 각형강재 교각 설치 후 내부에 콘크리트를 충진하는 합성단면을 가지며, 각형강재 교각간 연결은 강재 현장용접으로 연결되는 구조이다.

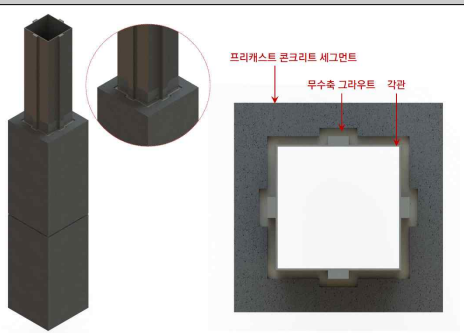
(1) 하부교각 모듈화 연결 방안 검토

<강-콘크리트 합성단면 비교>

구분	SRC 합성단면	중공강재+PC 합성단면	각형강재 충진 합성단면
개요도			
특 징	철골+철근콘크리트 합성	내부 중공강재+외부 PC	외부강관+콘크리트 충진
적용성	소규모 건축기둥 적합	PC교각 적용성 우수	강재교각 적용성 우수
시공성	현장타설/양생 필요 별도 거푸집 필요	접합부 무수축 그라우팅 PC 급속시공	각형 강재 내부충진으로 거푸집 불필요
검토의견	장경간 하부구조 부적합	도심지 여건에 적합	도심지 여건에 적합

(가) 중공강재 PC세그형 합성 단면



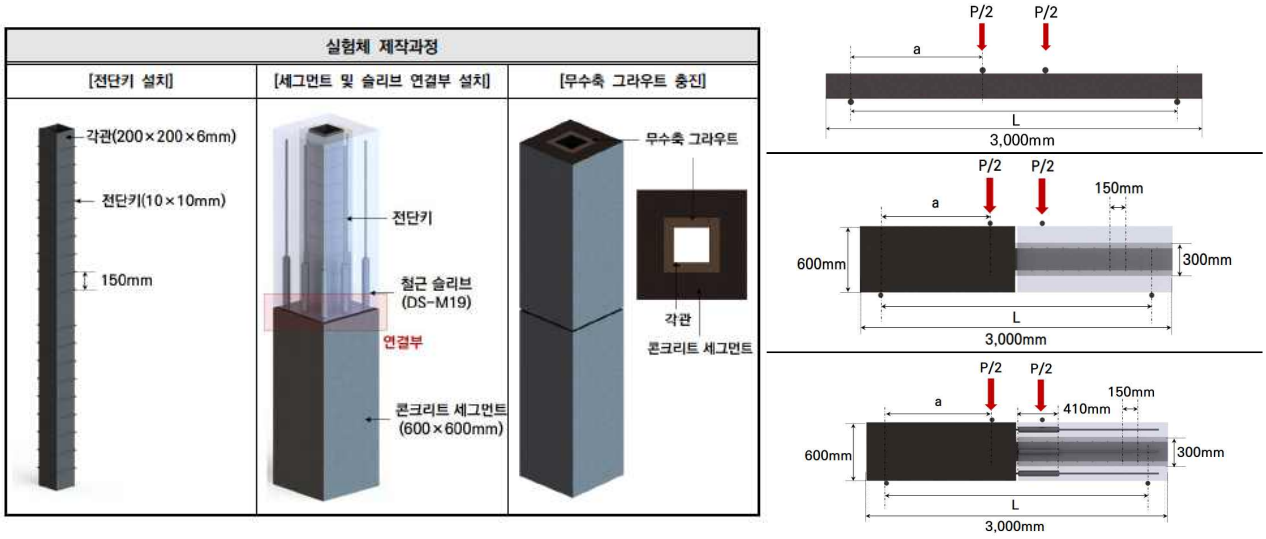
모듈화 합성단면 검토(중공강재+PC세그)	세그먼트간 연결부(슬리브+에폭시)
	

<하부구조 모듈화 합성단면 개요>

① 프리캐스트 세그먼트 연결부 요소실험

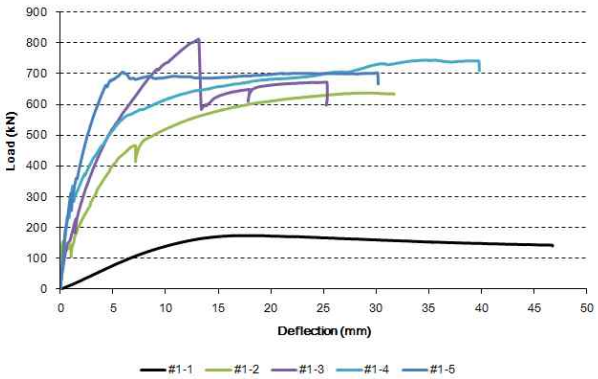
신형식 하부구조 프리캐스트 연결부 시공법에 따라 시공되는 프리캐스트 교각 세그먼트간 연결부의 내하성능을 검증하기 위해 세그먼트 연결부의 합성거동을 파악하였다.

㉮ 실험체 제작개요 및 변수



㉯ 프리캐스트 세그먼트간 연결부 실험

신형식 프리캐스트 세그먼트 연결부 실험 및 결과는 다음과 같다.



#1-1	(각관)
#1-2	(각관+무수축 그라우트)
#1-3	(각관+전단키+ 무수축 그라우트)
#1-4	(각관+슬리브 +무수축 그라우트)
#1-5	(각관+전단키+슬리브 +무수축 그라우트)

<변수별 하중-처짐 선도>

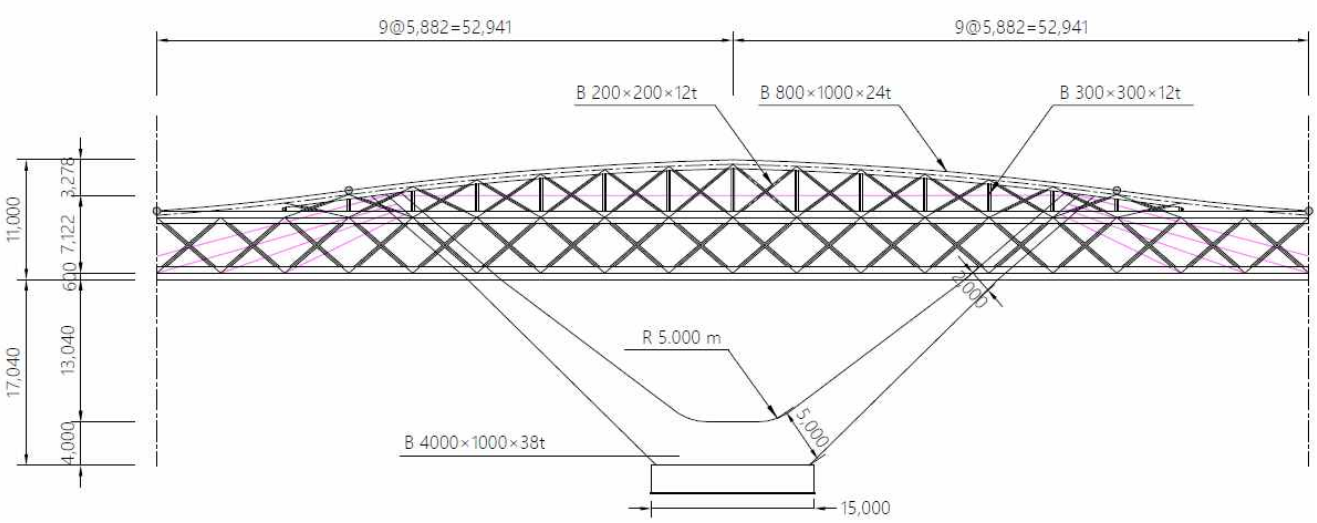


<실험체 제작 및 실험>

실험결과, 전단키의 경우 약 25%, 슬리브의 경우 약 17% 그리고 동시에 적용한 경우는 약 50%의 내하력 증진 효과가 있음을 확인하였다. 2차년도 실험결과에 따라 강재 또는 PC 단일단면 보다 콘크리트와 강재의 합성단면을 통해 단면크기를 감소가 가능함을 확인 할 수 있다. 향후 현장여건에 따라 강재내부 충진 합성단면 혹은 PC 합성단면을 통해 단면 개선이 가능할 것으로 사료된다.

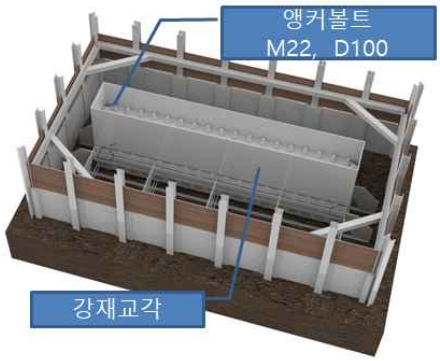
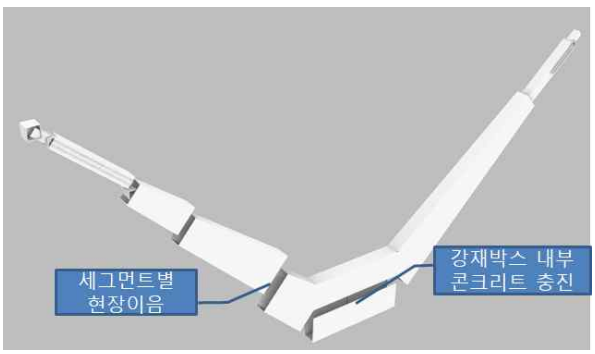
(나) 각형 중공강재 콘크리트 충진 합성단면

① 강재단면 내부충진 합성단면 검토



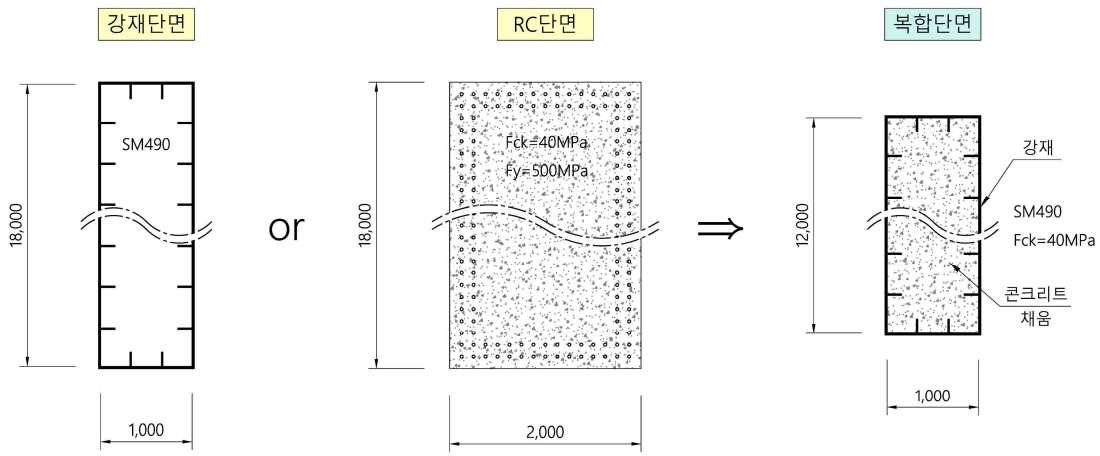
<강교각 일반도>

㉮ 강교각-하부기초간 연결부 검토

하부기초-강교각 연결부(앵커프레임)	하부구조 강재 세그먼트 현장용접
	

<강재단면 내부충진 합성단면 및 현장이음 개요>

㉯ 각형강재 콘크리트 충진 합성단면 검토

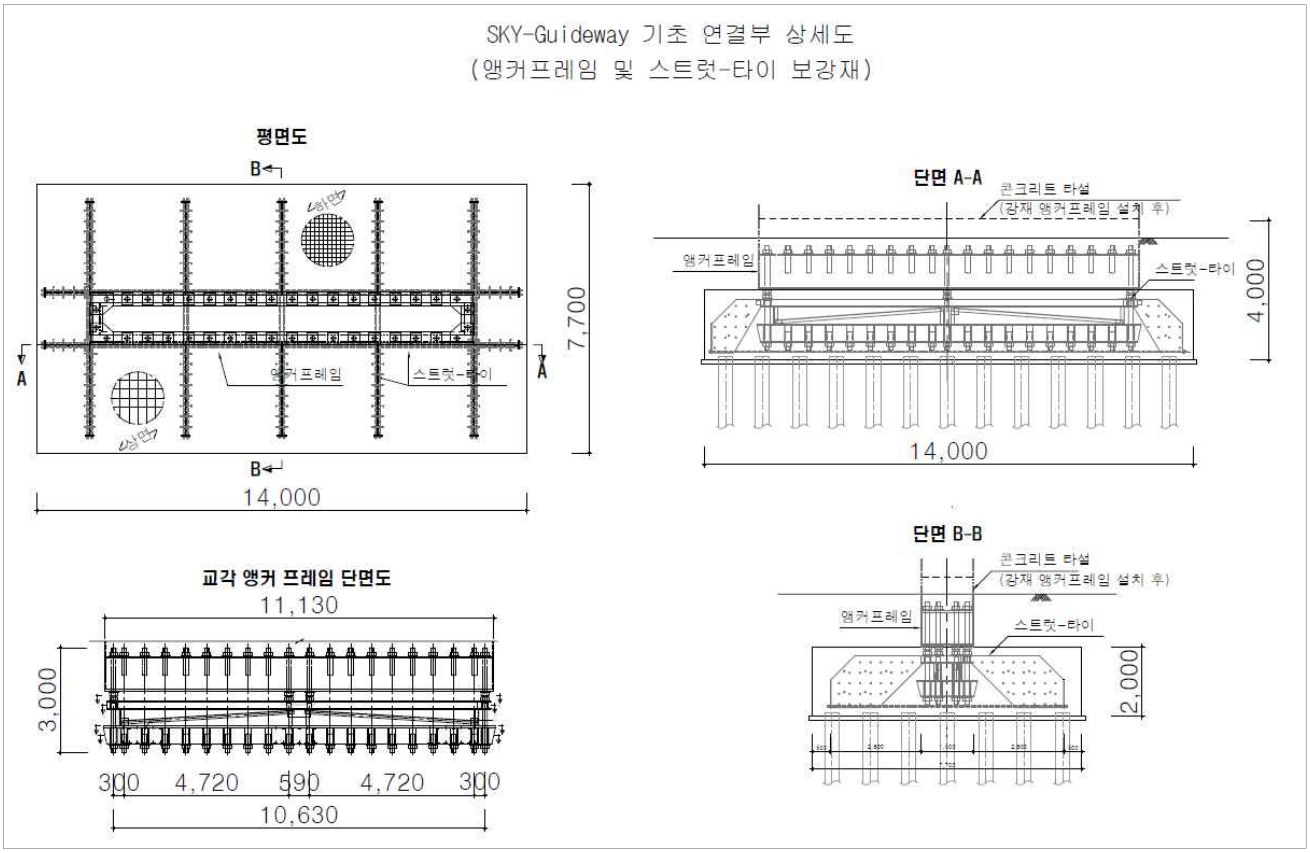


<강재단면 내부충진 합성단면 개요>

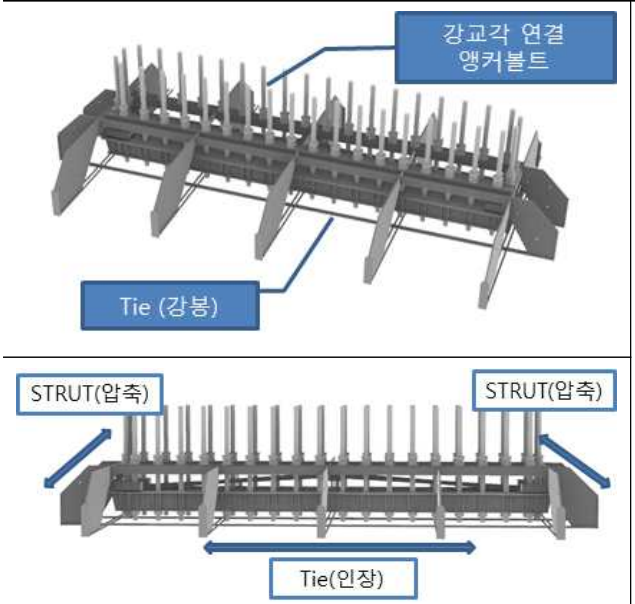
장경간 하부구조에서 하단부의 단면은 큰 압축력과 휨 모멘트에 의해 지배된다. 강재단면 또는 RC단면보다 휨강성이 우수한 각형강재의 내부를 콘크리트로 충진한 복합단면을 통해 단면 감소 및 휨강성 증대가 가능하다. 검토한 바와 같이 하부구조의 형상과 현장여건에 따라 강재와 PC합성 또는 각형강재 내부충진 합성단면을 이용한 교각 하부단면의 축소가 가능할 것으로 사료된다.

(2) 기초부와 교각부 연결검토

스트럿-타이 보강재의 실험결과에 따라 일반 RC기초 보다 기초두께 감소에도 내하력 성능이 확보됨을 알 수 있다. 현장타설 콘크리트 하부기초와 강재교각의 연결부 상세를 도출하였다. 앵커프레임은 인발력에 저항하고 콘크리트 충진된 강합성 교각에서는 압축력을 콘크리트가 부담하며, 스트럿-타이 보강재가 앵커프레임에 추가되어 RC기초보다 기초의 두께를 감소할 수 있다. 또한, 하부기초에 교각 앵커와 연결된 스트럿-타이 보강재의 도입을 통해, 중앙부 말뚝으로 하중이 집중되지 않고 하중이 균등하게 기초 상면 전체에 고루 작용토록 하였으며, 기초 상면 전체에 분포된 하중이 말뚝기초로 전달되도록 하였다.



<하부구조 기초-강교각 연결부상세도>

스트럿-타이 보강재	강재교각 내부 앵커프레임과 앵커볼트 체결
	

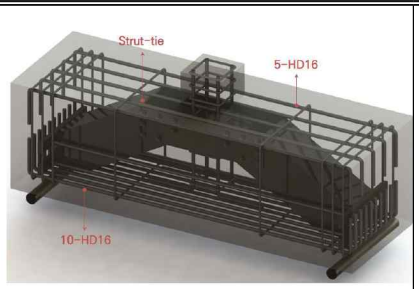
(3) 스트럿-타이 보강재를 이용한 기초부 단면 축소방안 검토

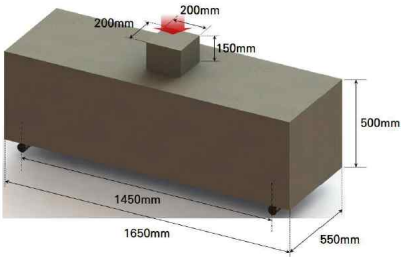
(가) 하이브리드 기초부 단면 축소를 위한 요소 실험

① 실험체 제작개요 및 변수

스트럿-타이 실험체 제작과정



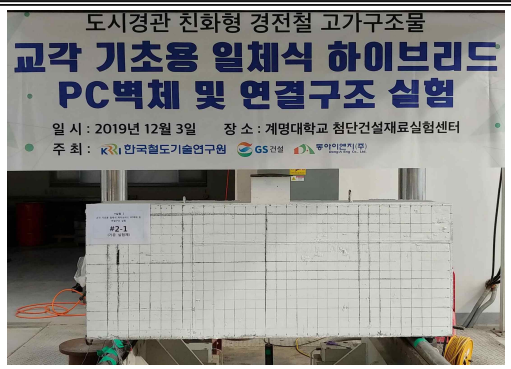


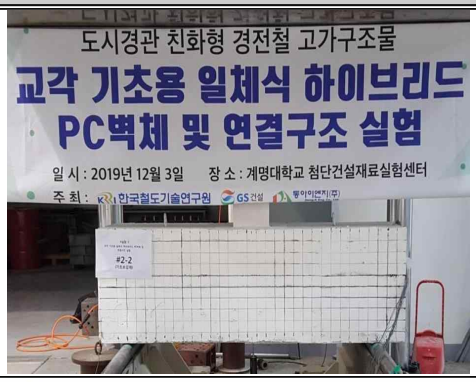


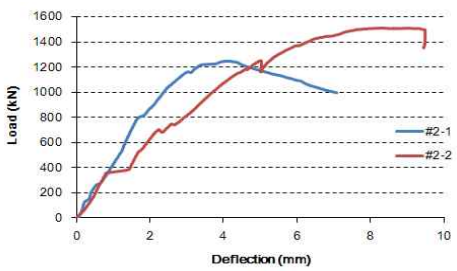
② 프리캐스트 세그먼트간 연결부 실험

기초부 스트럿-타이 구조 실험 및 결과는 다음과 같다.

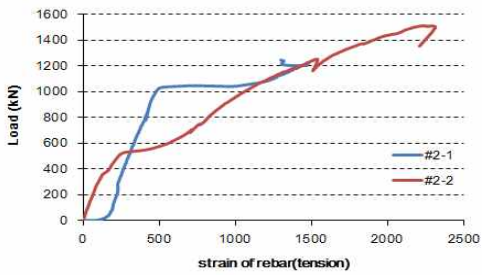
스트럿-타이 실험 및 결과





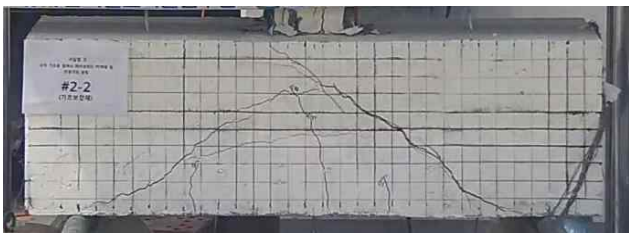


변수 별 하중-처짐 선도



하중-변형률(인장철근) 선도





두 실험체 모두 전단파괴에 의한 파괴양상을 나타내었으며, 기초보강재 적용 시 기초구조물의 두께(높이)를 700mm부터 500mm로 감소시켰음에도 불구하고, 최대 내하력은 20% 가량 증가하는 것으로 확인되었다. 실험#2-2의 균열 분포가 더 넓게 나타났으므로, 스트럿의 각관 내 콘크리트 충전 효과 및 타이 강봉의 역할로 실험 #2-1에 비해 기초구조물 내 응력전달이 원활히 이루어져 기초구조물의 두께(심도) 감소에도 내하력 개선이 나타남을 확인할 수 있다.

5. 도시친화형 신형식 경전철 고가구조물 가설시공 계획 수립

가. 상부구조 가설시공방안

(1) 기존 강교 가설 공법에 대한 고찰

장경간의 철도교량에 적용된 트러스교 및 아치교 그리고 사장교의 가설 공법은 다음과 같다.

(가) 크레인+동바리 가설공법

거더하부에 상부구조를 지지하는 가교각을 설치하여 거더를 직접지지하며 교량을 완성시키는 공법으로 가설 및 관리가 용이하고 특수한 설비가 불필요하며 거더를 무응력 상태로 가설하는 방법이다. 가설을 위해 크레인 넓은 작업공간 및 벤트의 장기 거치등으로 인해 도심지에서 가설작업시 교통통제나 혼잡등으로 많은 민원발생의 우려가 많은 공법이다.



< 낙동강 하구둑 배수문 증설공사 강교 거치 전경 >

(나) 케이블 지지식 가설공법

양교대 또는 교각위에 철탑을 세워 그 사이게 케이블을 설치하고 로프를 내려 가설하는 공법으로 수심이 깊은 하천이나 가교각을 설치할 수 없는 곳에 적용하며 가설비가 많이 들고 작업이 어려우 공기가 매우 길다. 도심지의 교량에는 적용하기 어렵다.



< 케이블 현수지지에 의한 강아치교 가설 전경 >

(다) 압출공법

가설지점 인근에서 거더를 조립한 다음 거더의 휨 저항력을 이용 밀어내어 가설하는 공법으로 가교각을 세울 수 없거나 비경제적일 경우에 유리하며 가설중 교번응력의 발생으로 복부판의 국부좌굴에 유의해야 해서 상부구조 및 하부구조의 보강이 필요한 가설공법이다.



< 경전선 삼랑진-김해생림 중 낙동강교 >

(라) 캔틸레버 공법

가설이 완료된 좌우측 인접거더를 캔틸레버식으로 균형을 유지하며 가설하는 공법으로 하천이나 해상등 교하공간의 이용 제한시 유리한 가설공법이며 주로 사장교등의 케이블 교량 시공시 주로 사용되며 케이블 없이 캔틸레버 공법을 적용시에 캠버관리등의 미세조정이 매우 어렵고 지점부 단면이 매우 커지고 비대해 지는 문제가 있다.



< 삼천포 대교 사장교 캔틸레버 가설전경 >

(마) 대블럭 공법

일체로 조립한 거더를 대형 운반·가설장비를 이용하여 일괄적으로 가설하는 공법으로 공기단축이 가능한 반면, 대블럭을 조립하고 이동할 수 있는 조립 공간이 필요하며 가설 공간이 협소한 도심지 공간에 적용하기 어렵다. 주로 하천이나 광활지 및 해상등 대형장비가 대블럭을 조립할 공간이 충분한 경우에만 사용될 수 있는 공법이다.



< 압해대교 대블럭 가설공법 >

(바) 가설용 트러스를 이용한 공법

가설용 트러스를 이용하여 거더를지지, 가설하는 공법으로 교하공간의 이용에 제약을 받는 도심지 고가 교량에 사용될 수 있은 장점이 있다. 그러나, 가설용 트러스를 이용할 경우 매우 고가의 장비비가 소요되므로 경제성이 매우 불리하며 가설용 트러스 설치를 위한 별도의 설치공기로 인하여 공기가 지연되는 우려가 많은 공법이다.

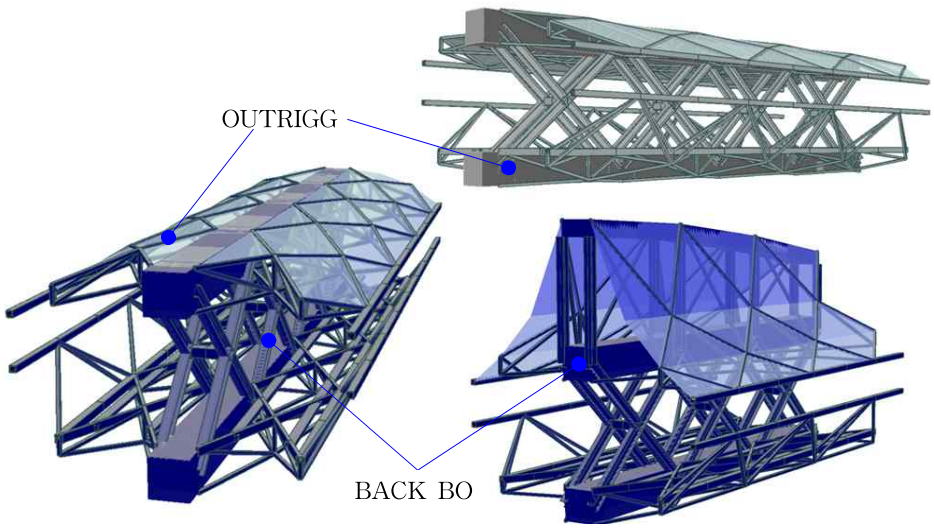


< 언양고가 강아치교 가설전경 >

(2) 새로운 가설공법의 제안

본 연구과제에서 제안한 신형식 고가구조물은 장경간(최장 200m) 구조 형상(아래 그림 참조)으로 기존의 중·소규모의 철도 및 도시철도 교량의 상부구조 가설시공을 위해 다양한 시공법들이 연구검토 되어 실제 적용이 되었으나, 협소하고 민원 발생이 많은 도심지 공간에서 효과적으로 가설 및 시공하기 위한 기술 개발이 필요하며 아래와 같은 사항들을 고려하여 연구가 진행되었다.

- 장경간 신형식의 교량의 시공시 구조적 안전성 및 캠버등의 미세한 조정이 가능한 시공기술의 개발
- 상부가설 작업공간을 최소화하며 교통차량 통제 최소화하는 시공 기술 개발
- 2km 이내의 합리적이고 경제적인 상부 시공 기술 개발
- 기존공법 대비 신속한 가설작업으로 공기 단축 시공 기술 개발
- 소음, 진동 등의 환경피해 및 최소화 시공 기술 개발
- 모듈화 부재 중량 및 형상을 고려한 시공 기술 개발
- 하부 시공시에도 활용 가능한 장비 기술 개발



<신형식 고가구조물의 3D 모듈형상 및 특징 >

신형식 고가구조물은 백본(Backbone) 및 아웃리거(Outrigger) 구조로 주된 하중을 백본구조의 육중한 트러스구조와 경량의 아웃리거 구조가 촘촘하게 강성을 유지하는 구조형식으로 되어 있어 박스형태의 강구조물에 비해 매우 복잡한 구조형식이며 정밀한 시공을 요구하는 구조물이다. 또한 크고 작은 요소별, 부재별 연결이 많고 좁은 공간에서 조립해야 하므로 정밀 시공과 이러한 구조물에 적합한 시공 장비가 필요하다. 이러한 특징으로 인해서 공장에서 제작된 크고 작은 부재들이 현장까지 운반되어 조립되기 위해서는 기존의 크레인 가설공법으로 가설할 때 많은 작업공간과 장비 시공인력이 필요하게 된다. 또한 별도의 제작장에서 모듈작업을 위한 부지도 필요한데 본 형식을 적용하는 도심지에는 이러한 제작장 부지가 없는 경우가 대부분이다. 가설위치에서 먼 거리에서 모듈을 제작하면 운반의 문제가 있기 때문에 가설위치 근처에 인접하여 제작장 부지가 있어야 한다. 하지만 이 경우도 가설교량이 2km내외로 길어질 경우에 운반의 제약은 계속 상존하게 된다.



< 크레인가설을 위한 4차선이상 점용한 네덜란드 Beatrix 교량 시공사례 >



< 제작장에서 조립하는 교량 시공사례 >

이러한 제약조건을 극복하기 위해 본 연구과제에서는 백본 및 아웃리거 등의 구조물을 운반 가능한 소부재로 공장에서 제작한 후 현장에서 모듈화 조립작업 및 가설작업을 동시에 작업할 수 있는 가칭 MCE(Modular Construction Equipment)장비를 개발하여 공장에서 제작된 소부재를 윈치등의 인양장치를 활용하여 인양하여 제작대에서 모듈 블록(Module Block)을 제작하고 유압식 임시벤트에 지지하고 캔틸레버 방식으로 전진하여 가설하는 GFCM(Ground Free Cantilever Method) 가설형식의 멀티 기능형 장비를 개발하여 도심지에서의 적용하고자 한다.

(가) MCE(Modular Construction Equipment) 가설장비 개요 및 특징

MCE 장비는 다음과 같은 특징이 가능한 구조로 위에서 언급한 단면에 기초해서 연구개발된 멀티 작업형 가설장비로 6M폭의 2차선내로 운용이 가능하여 차선점유를 최소화하고 최적화된 총중량 90ton의 특수 장비이다. 볼트연결 의해 장비 각 부재의 제작 및 연결을 용이하게 할 수 있으며 부재를 조립하는 제작대로 부재간 모듈을 올려 조립 및 가설을 동시에 작업할 수 있는 구조이다. 주두부 벤트 없이도 시공이 가능하며 4계절 날씨에 상관없이 가설이 가능하다. 또한 고소작업에 따

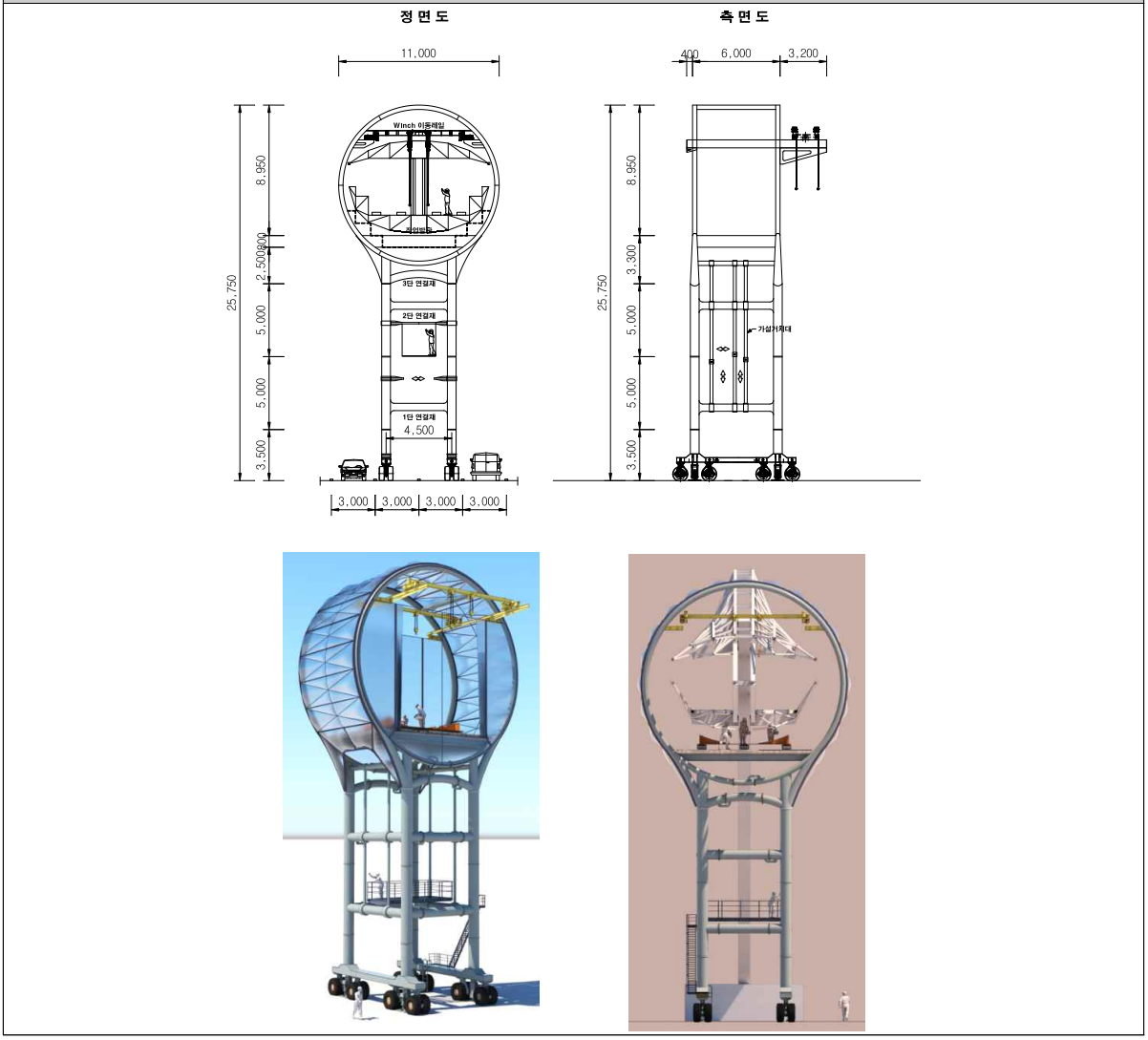
른 안전설비가 없이도 시공이 가능하고 상부구조와 유사한 타원구조로 최적화된 단면이고 백본(Back Bone) 및 아웃리거 설치가 순차적으로 가설이 가능하여 작업의 효율성을 높였다. 기존에 대형 장비를 사용하여 설치한 예가 있으나 빌딩크기만 하게 매우 육중하고 단순히 인양만 하는 구조와 크게 차별화 된다고 할 수 있다.



< 육중한 구조의 대형장비 사례(베트남 경전철) >

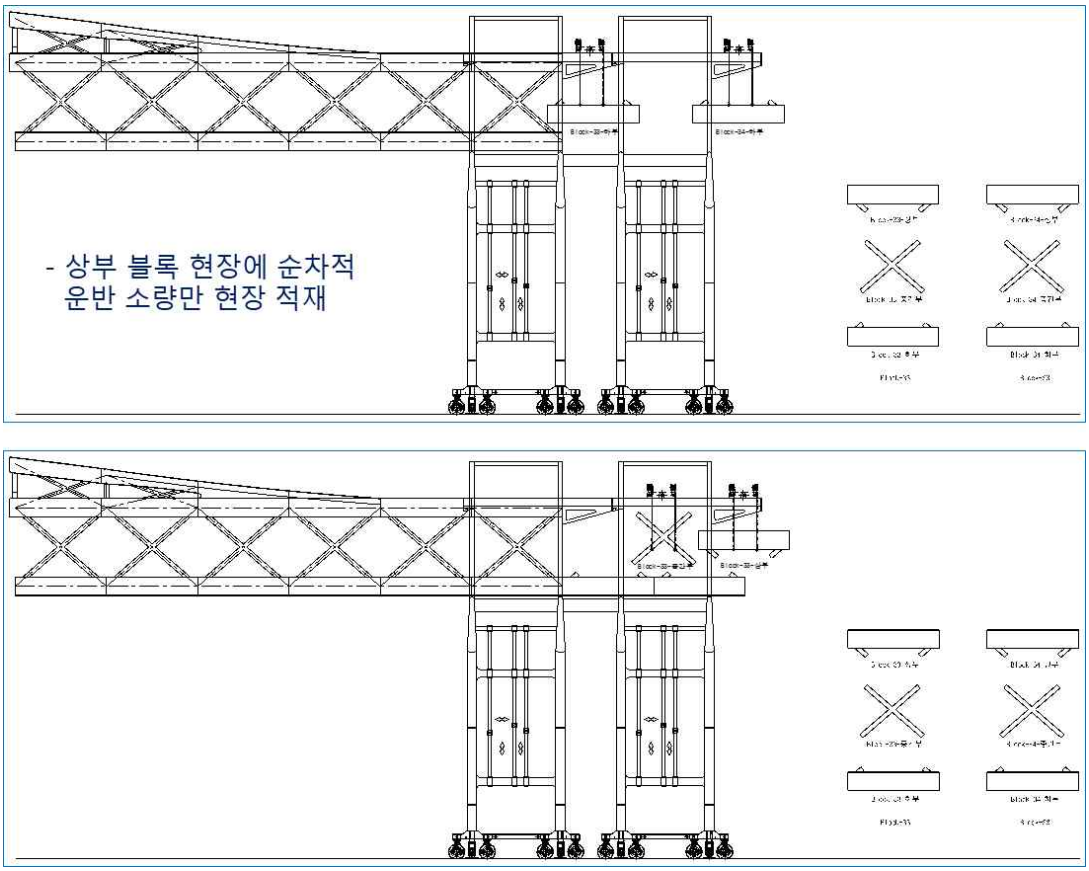
또한, 외부에 판넬이나, 차양막등을 설치하여 소음이나 풍하중의 영향 그리고 환경피해를 최소화 할 수 있고 도심지의 미관을 해치지 않도록 고려하였으며 MCE장비의 형상의 개요는 아래 그림과 같다.

MCE 개요도



(나) MCE장비에 의한 상부 시공 순서도

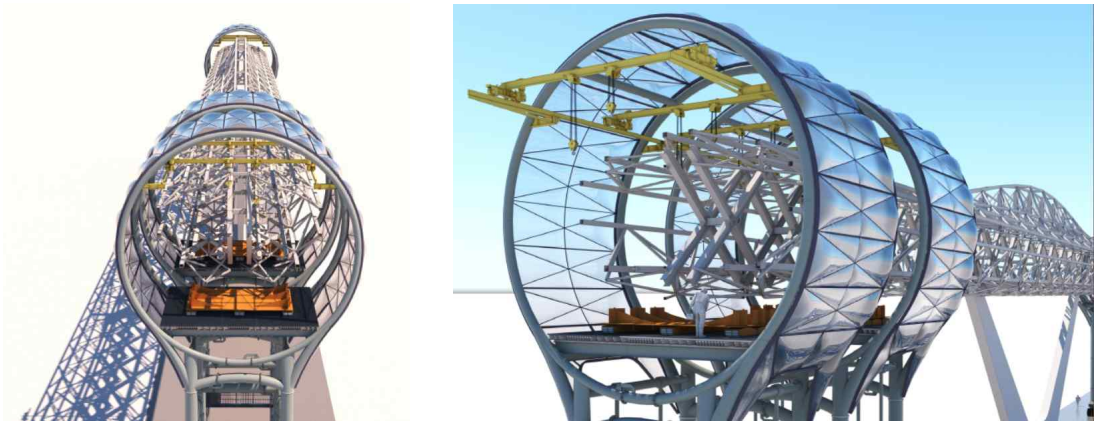
MCE 장비를 이용한 상부 시공 개요도



(다) MCE 운영 3D 조감도



< MCE 장비 운영 전경 >

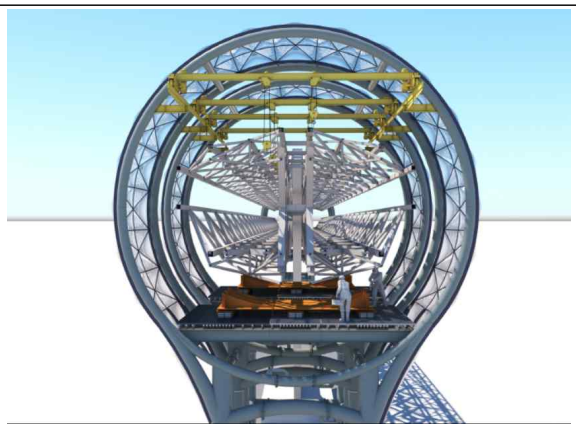


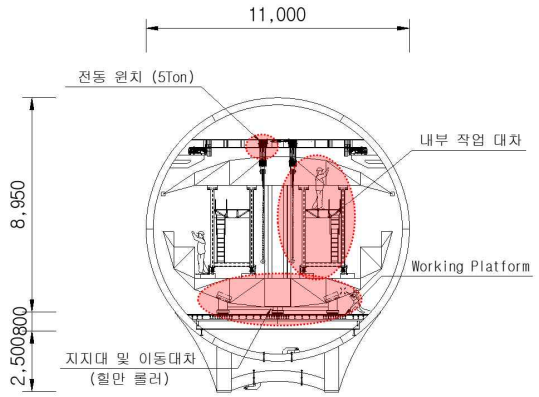
< MCE 장비 내부 작업 전경>



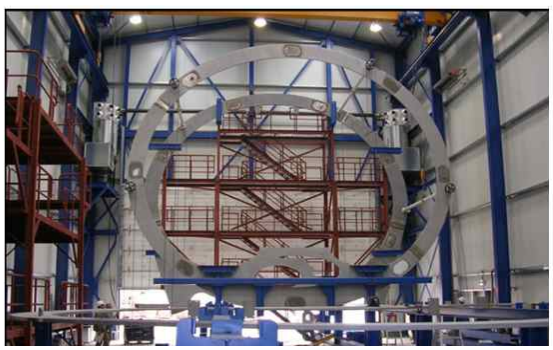
< MCE 장비 도심지 가설전경 >

(라) MCE장비 내부시설 상세도





< MCE 내부시설 및 상세 >



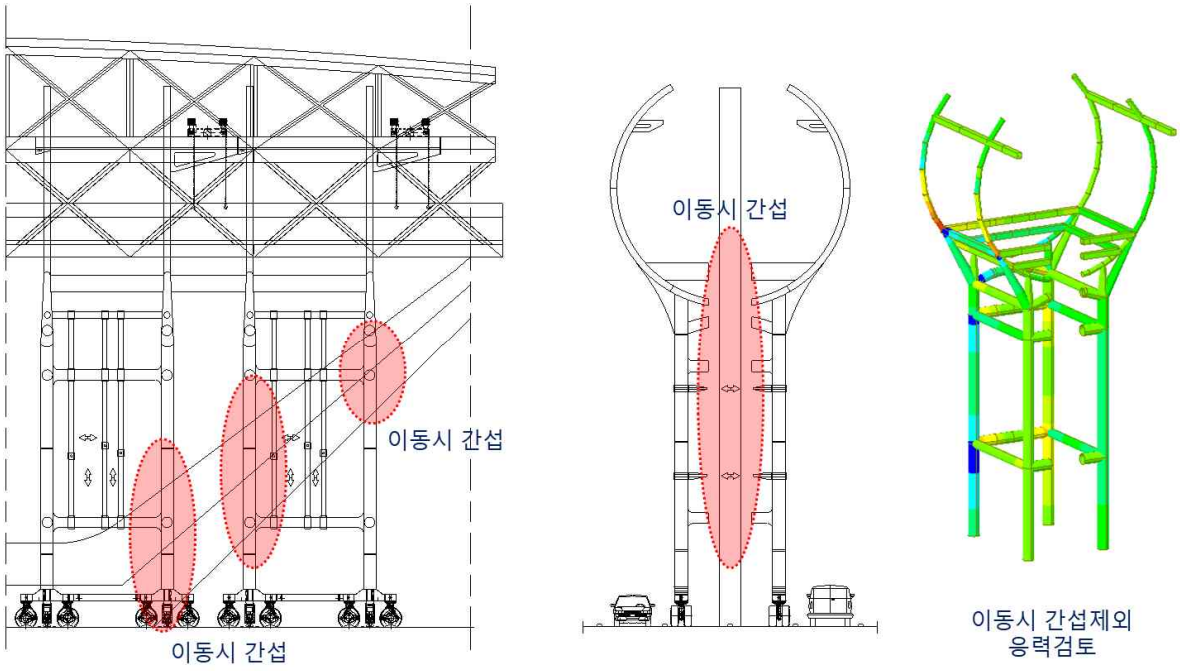


< MCE 장비 도심지 가설전경 >

(마) 상부구조 시공시 제약 조건의 해결방안

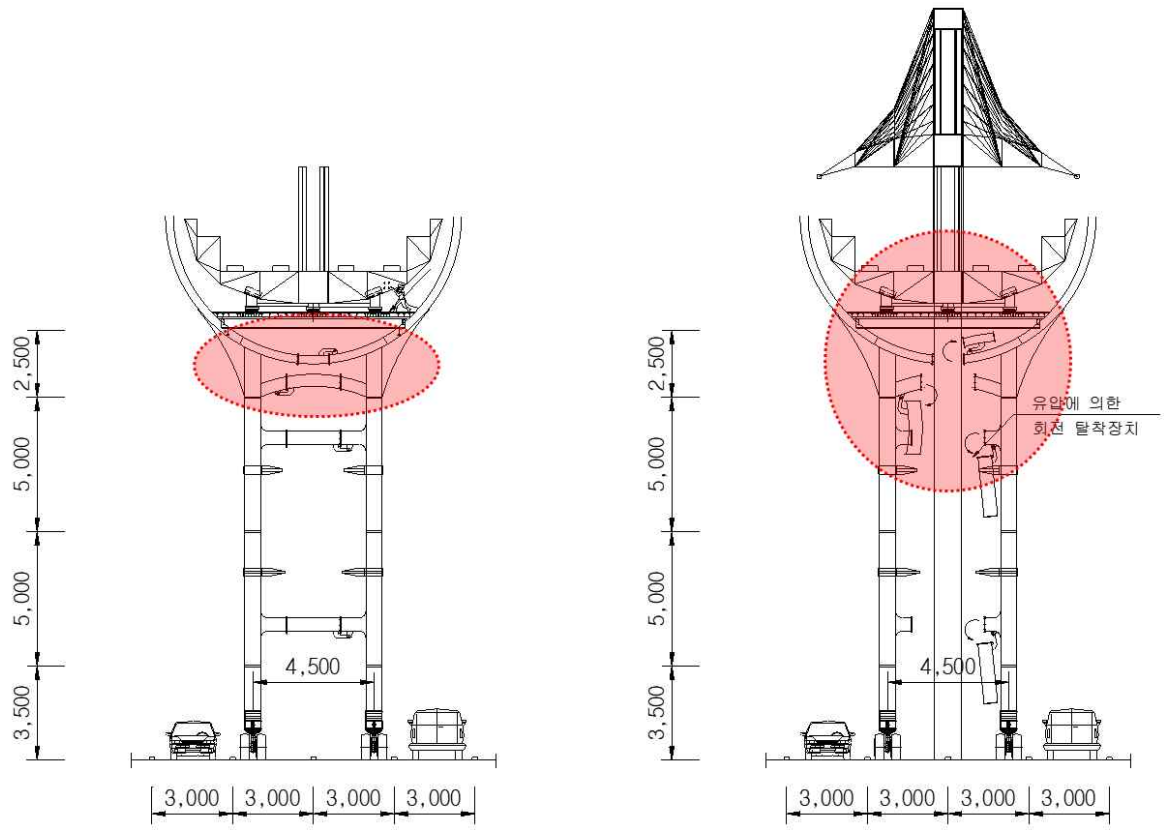
① 주두부 교각 간섭부 통과 방안

MCE 장비를 이용한 하부 가설시 간섭부 통과 개념도



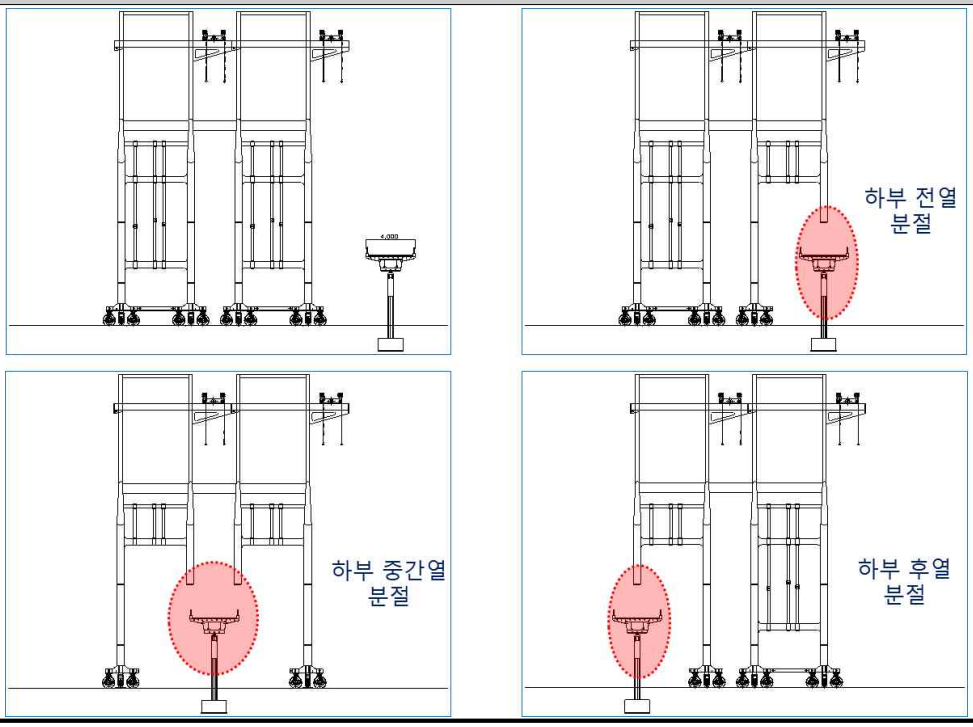
<표준구간 운영시>

<교각 간섭구간 통과시>



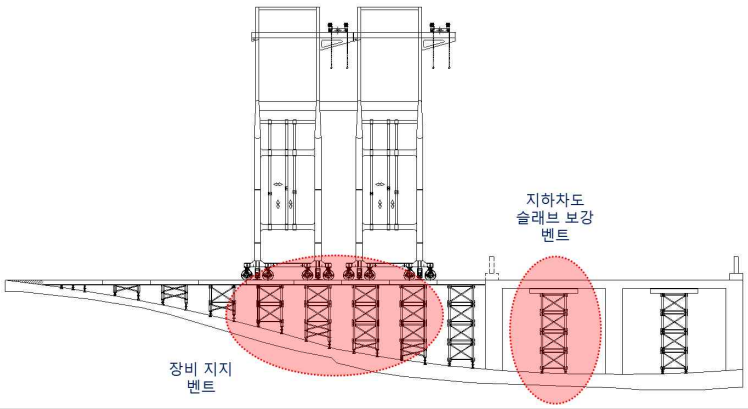
③ 육교 횡단 구간 통과 방안

MCM 장비 하부 분절을 이용한 육교 횡단 방안



④ 지하차도 구간 통과 방안 (구조물 벤트 일부 보강)

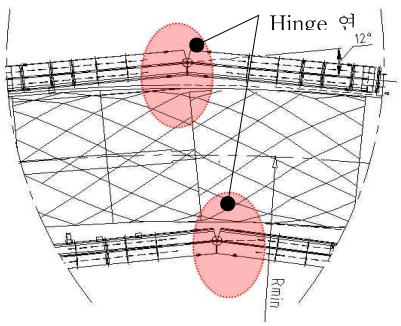
구조물 벤트보강을 이용한 지하차도 횡단 방안



⑤ 작은 회전반경 구간 통과 방안

회전반경이 R=200m이내의 구간은 장비에 힌지구조를 적용하여 곡선반경 제약을 극복함.

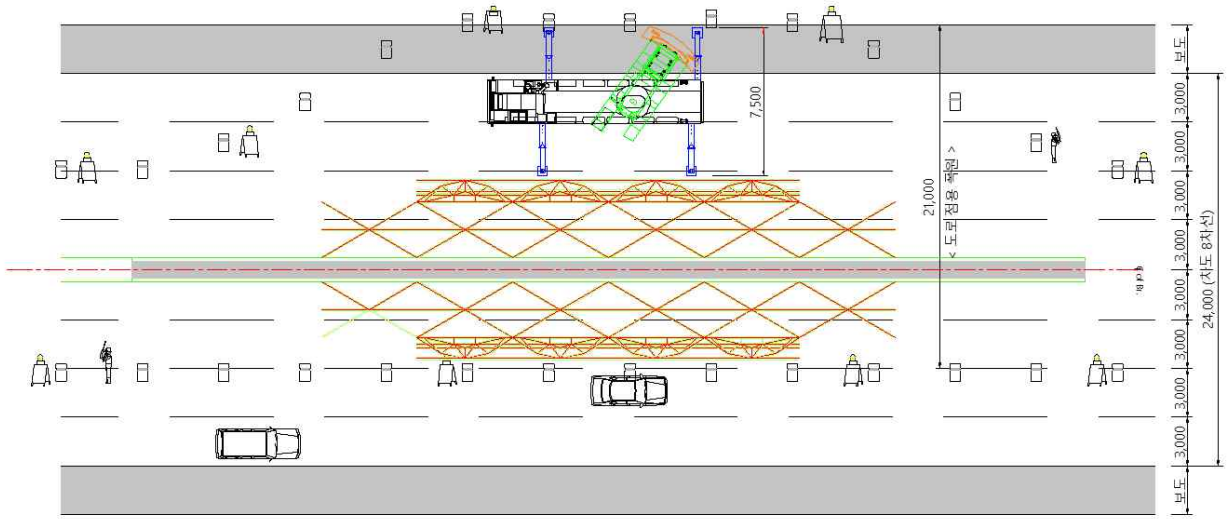
회전반경이 R=200m이내 구간



(바) 도심지 도로점용 폭에 관한 검토

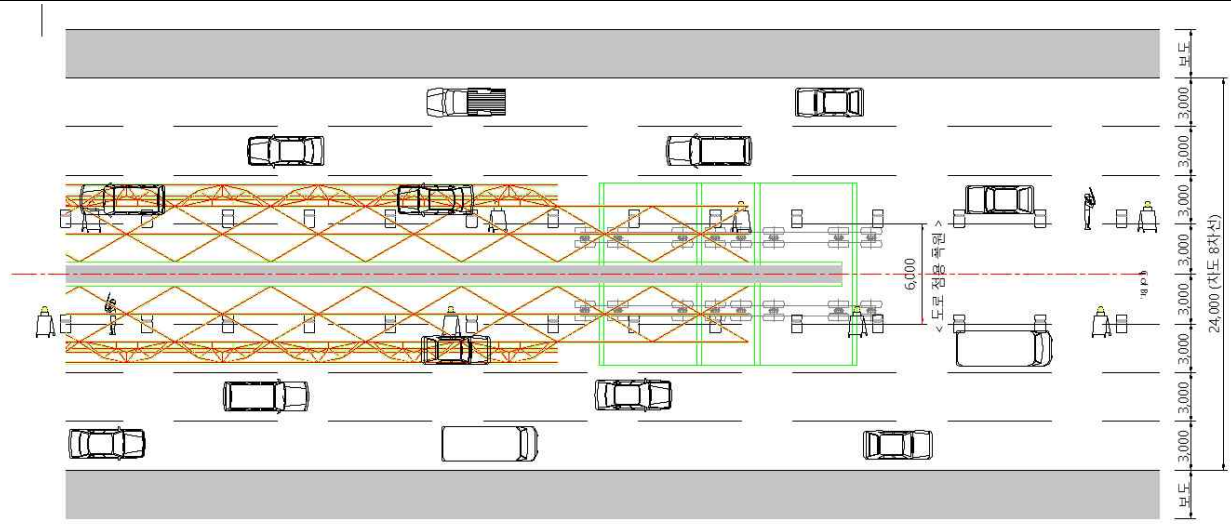
① 크레인 장비에 의한 시공시 도로점용 폭원 (도심지 8차선의 경우)

크레인 장비에 의한 시공시 도로 점용 및 교통통제 계획



② MCE장비에 의한 시공시 도로점용 폭원 (도심지 8차선의 경우)

MCE 장비에 의한 시공시 도로 점용 및 교통통제 계획



상기 그림에 일반적인 도심지 8차선 도로에서의 크레인 장비에 의한 신형식 고가구조물 가설시공과 이와 대비된 시공법인 MCE장비를 이용한 가설시공에 대한 예시를 나타내었다.

크레인에 의한 가설은 가설벤트 설치 및 크레인 용량에 따라 편측 4차선(21.0m) 내외의 도로 폭을 점용해야 하는 문제가 있음을 알 수 있다. 이는 교통 혼잡구간의 우회 혹은 교통통제를 해야 하기 때문에 극심한 교통체증 및 사회적 비용이 발생하게 된다. 따라서, 하천 통과부 혹은 회전반경이 매우 작고 경간장이 짧은 교차로부 등 하부공간이 넓은 일부구간은 대형 크레인에 의한 일시적인 가설이 가능하지만, 도심지의 지하차도부 등 하부 공간 제약이 있는 구간은 크레인가설에 의한 점용폭 등을 고려할 때 더욱 공사가 복잡하고 차량을 전면 통제해야 하는 문제가 있을 뿐 아니라, 차량 통행을 위한 별도의 임시 도로 부설까지 필요하게 된다. 이에 반해 MCE장비에 의한 가설은 2차선 이내(6.0m내외)의 도로점용으로 신형식 고가구조물의 가설이 가능하기 때문에, 도심지내 교통통제를 최소화하고 공사용 도로점용 인허가 및 사회적 비용을 절감할 수 있으며, 하부공간 제약이 있는 구간에서도 최소한의 벤트 보강만으로 시공이 가능함을 알 수 있다.

(3) MCE 장비의 구조적 안전성 검토

(가) 설계개요

목적 : MCE(Modular Construction Equipment) 검토

설계기준 : 철도설계기준 (노반편, 2016)

(나) 사용재료 및 허용응력

사용강재 : SM490

(다) 하중산정

- 고정하중

① 자중 : 프로그램에서 자동재하(Weight Density : 76.98kN/㎥)

② 고정하중 : 작업대 상단 프레임 재하 - 32.781kN/m

- 작업대 - 5.7m × 5.4m
- 상부자중 - 200m 모델링 자중 : 10603.89kN
- 부속하중 고려 20% 할증

③ 운반하중 : 운반 레일 상단 2지점 하중 재하 - 39.26kN

- outrigger 1type 검토 - 1 block 최대5.9m, 분리 운반 고려 33%반영
- outrigger 자중 - 200m 모델링 back bone자중 : 6654.11kN

④ 풍하중

- 가시설 설계 풍하중과 철도설계기준 설계 풍하중 중 큰 값 적용
- 가시설 설계 풍하중
- 설계기준풍속 Ud = 30m/s, 항력계수 Cd = 2.2, 거스트응답계수 G=1.9
- $p = ½ \ \rho \ Ud^2 \ \ Cd \ G = ½ \times 1.23 \times 30^2 \times 2.2 \times 1.9 = 2.31 \ kN/㎡$

철도설계기준 설계 풍하중 : 투사면 3.0kN/㎡

(라) 하중조합

① 하중

- 고정하중 : 자중(SW), 고정하중(D), 운반하중(Dcarry1~7)
- 풍하중 : 교축방향풍하중(Wl), 교직방향풍하중(Wv)

② 하중조합

- comb1 = SW + D
- comb2 = SW + D + Dcarry
- comb3 = SW + W
- comb4 = SW + D + W

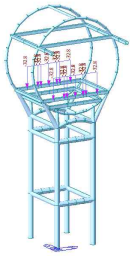
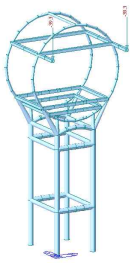
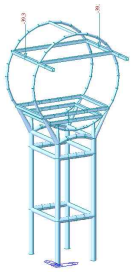
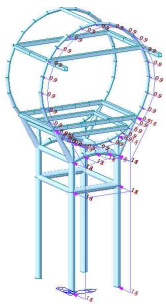
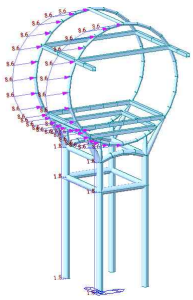
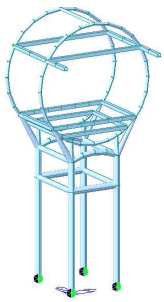
(마) 구조해석

① 사용 프로그램 : MIDAS 2019

② 모델링

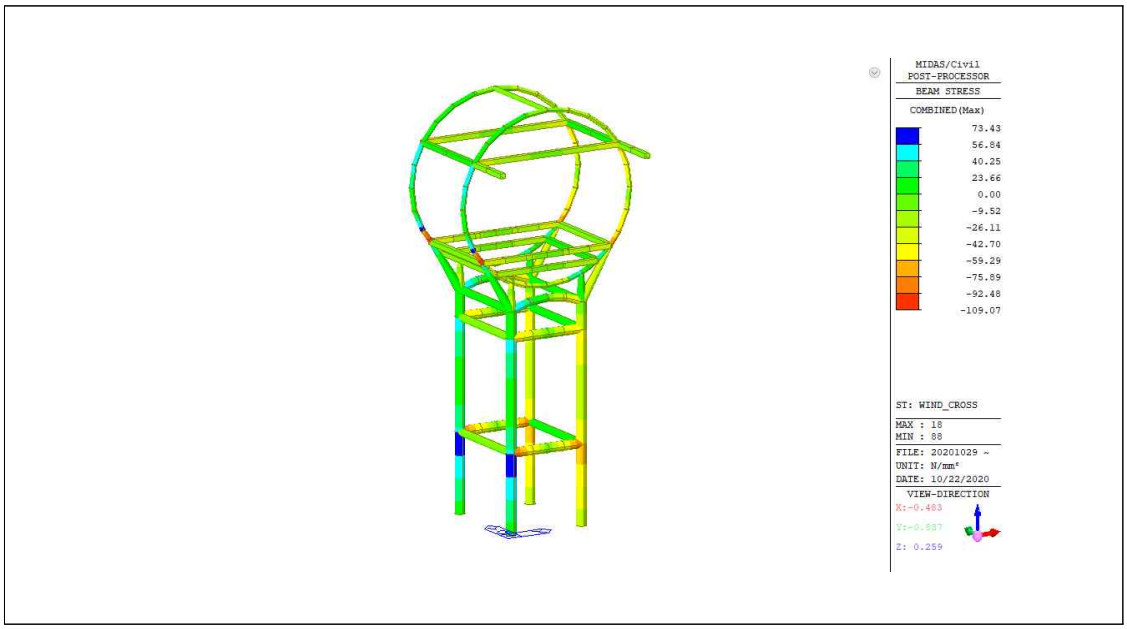


③ 하중재하 및 지점조건

고정하중	운반하중(type1)	운반하중(type2)
		
풍하중 : 교축방향	풍하중 : 교축방향	지점조건
		

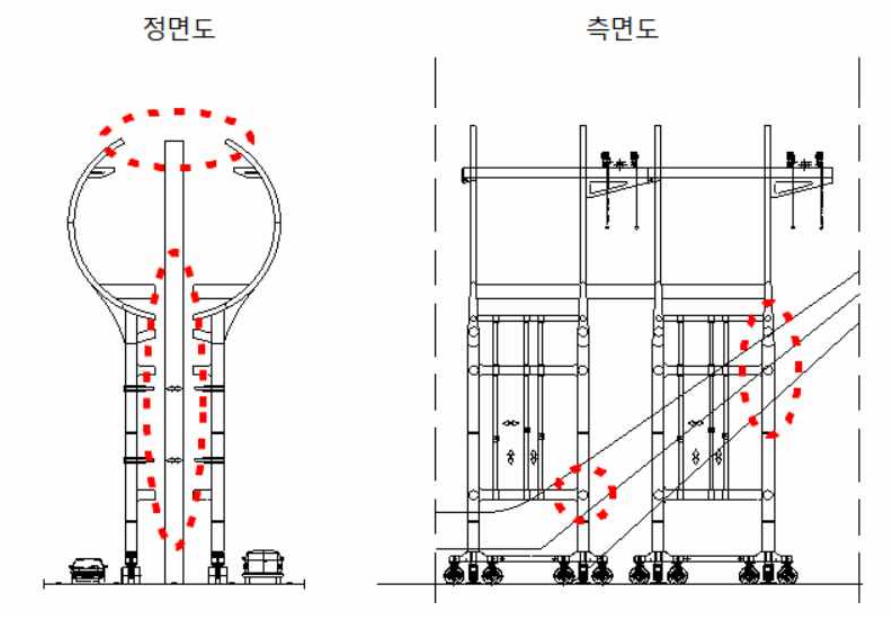
(사) 해석결과 (장비 운영시 최대하중)

응력도 : 최대응력 109.07㎫ < 190㎫ (SM490 허용응력)



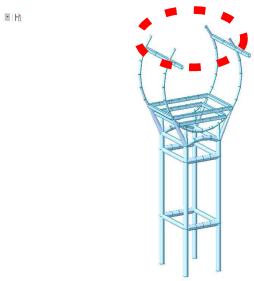
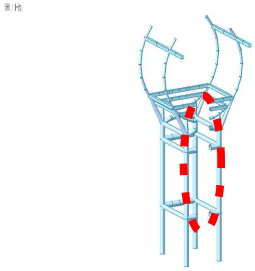
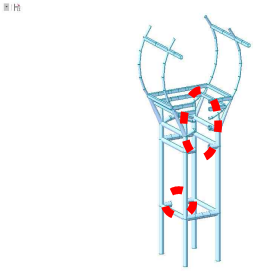
(아) 지점부 시공을 고려한 부재별 부재시 검토

MCE를 이용하여 주탑부 시공시 주탑과 MCE하부, 백본상부와 MCE상부간의 간섭이 발생되어, 간섭발생부재 배제시의 MCE 응력검토를 수행하였다.



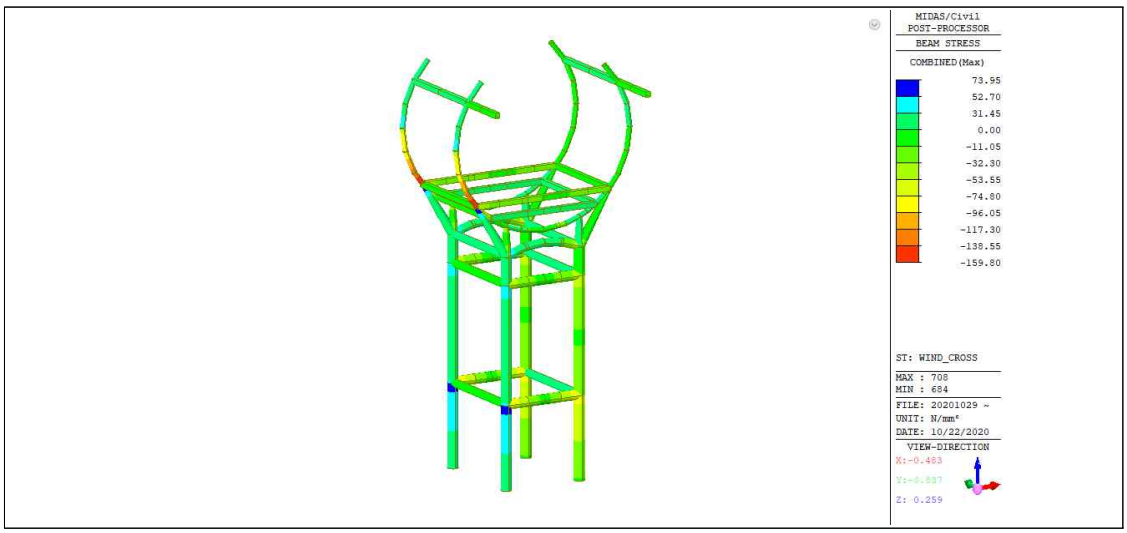
< 지점부 시공시 교각 간섭부 검토 >

① 모델링

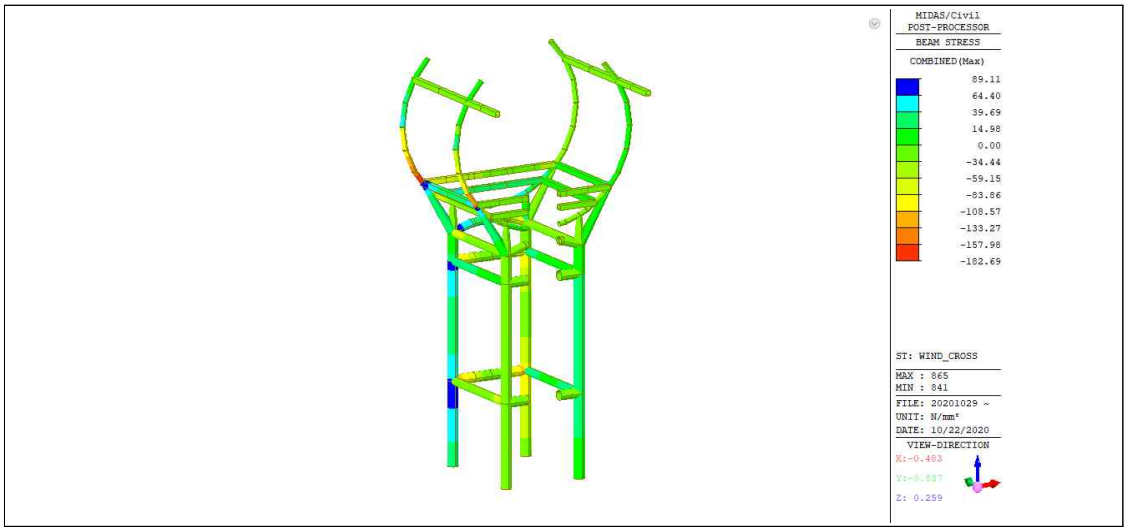
Type-1 : 상부부재 제외시	Type-2 : Type1 + 전열부재 제외시)	Type-3 : Type1 + 전열상단부재, 후열하단부재 제외시
		

③ 해석결과

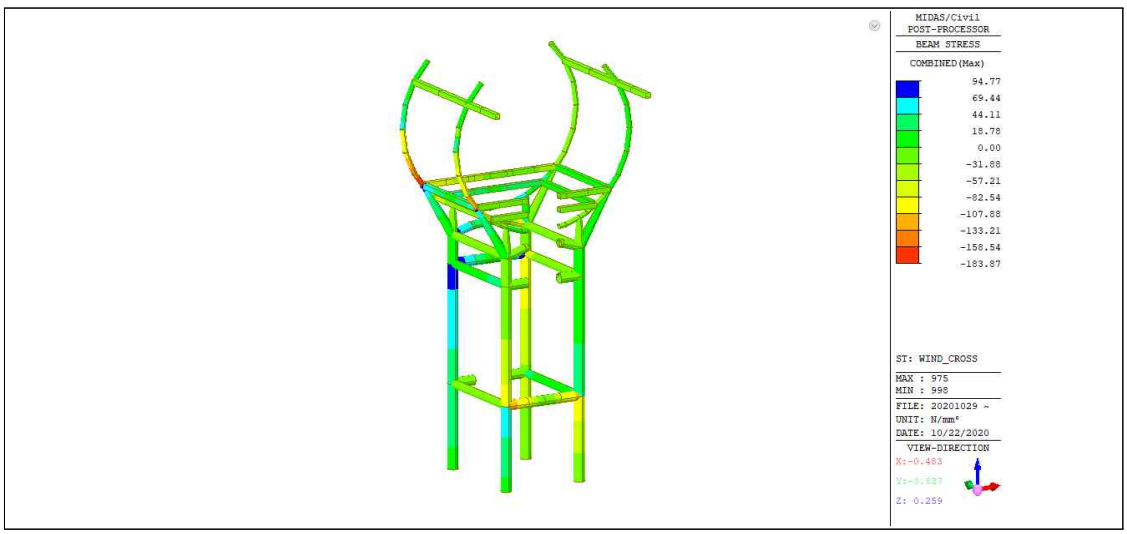
- 상부부재 제외시 : 최대응력 159.80㎫ < 190㎫



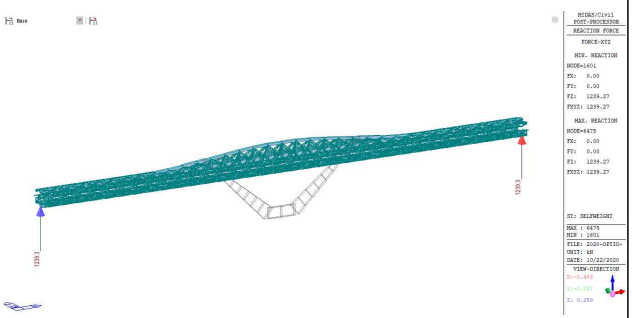
- 전열부재 제외시 : 최대응력 182.69㎫ < 190㎫



- 전열상단부재, 후열하단부재 제외시 : 최대응력 183.87㎫ < 190㎫

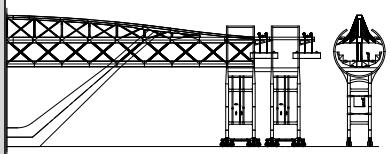
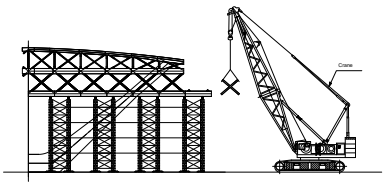
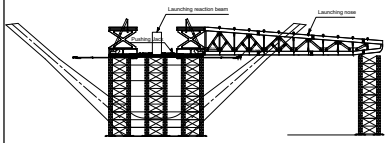


(자) 가설시 임시 벤트 부재 검토

해석 모델링	응력 검토
	① 100m 지간시 상부 반력(자중) : 1,240kN ② 임시 벤트 높이 : 17m ③ 발생응력(1ea) : P/A = 1,240,000N / 18535㎟ = 66.899㎫ ④ 사용규격 : Φ600 - t10 ⑤ 허용응력(SM490-1ea) i) I=17000mm⁴ , r=209mm, l/r=81 ii) 8<l/r≤110 : 190-1.26(l/r-8) = 97.408㎫ iii) 66.899㎫ < 97.408㎫

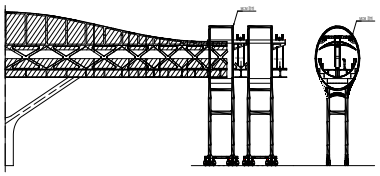
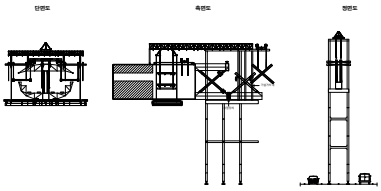
(4) 신형식 고가구조물의 상부 가설공법별 비교

신형식 고가구조물에 적용 가능한 가설공법을 비교하여 기존 상부 가설공법과 공기, 공사비를 425m기준으로 산정하여 비교하여 새로운 MCE가설 장비를 이용하는 GFCM 가설공법의 적정성을 비교분석 하였다. 도심지에서 장경간의 신형식 고가구조물의 가설이 가능한 공법은 크게 가설벤트를 통해 크레인가설을 하는 FSM(Full Staging Method)와 제작대를 설치하여 좌,우로 가설하는 압출방식인 ILM(Incremental Launching Method) 방식이다.

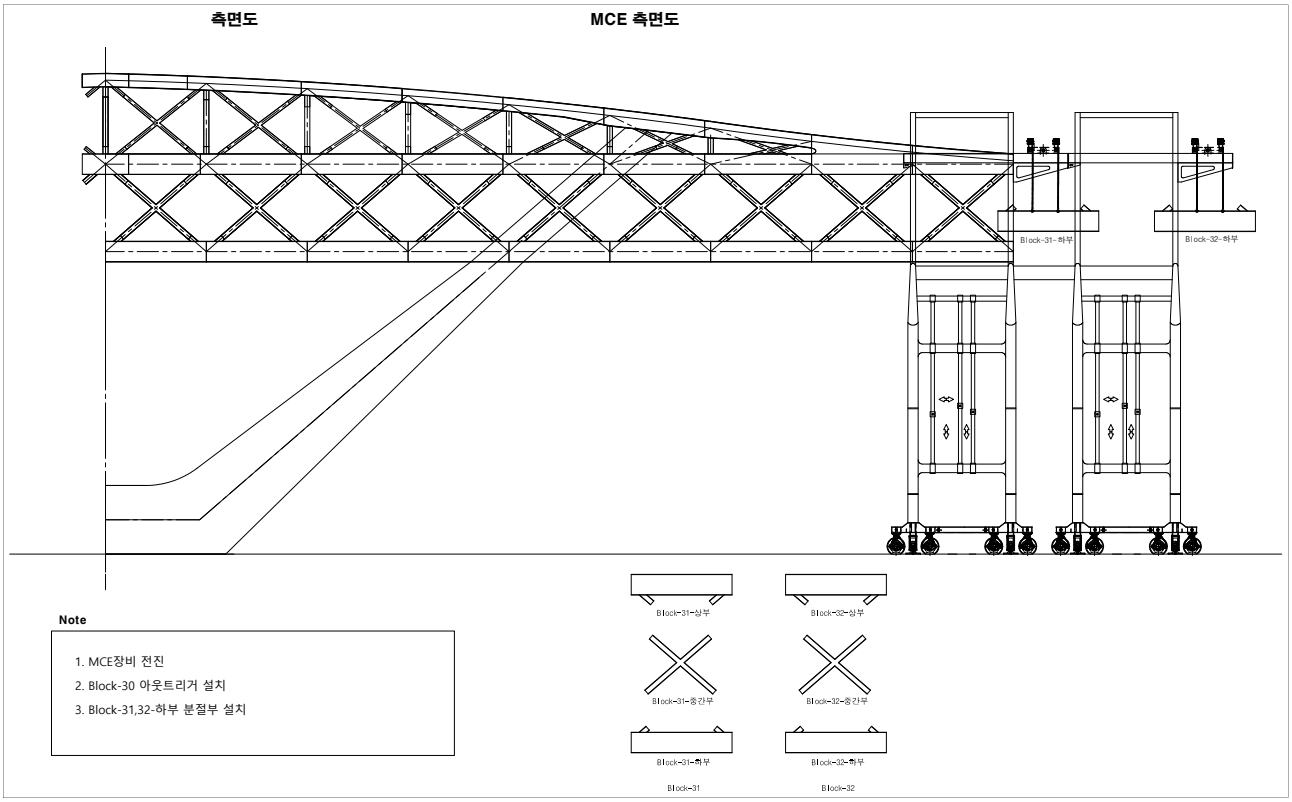
구 분	GFCM 가설 공법 (MCE 가설방비 이용)	FSM 가설 공법	ILM 가설 공법
공 법 개 요			
장 점	・도심지에서 작업하기에 적합하도록 특화한 최초의 가설공법. - 가설 작업시 공간 최소화 - 가설 공기 단축 ・ 도심지에서 도로 점용 최소화 - 2차선 폭원 (7M 내외) 및 종방향 20m~40m내외 일시 점용 ・ 현장 인력작업 최소화 및 공기 추가 단축 가능 ・ 육교횡단 및 지하차도 구간, 회전 반경(R=200m) 제약 극복이 가능한 구조 ・ 우천 등 날씨에 따른 작업 제약 없음	・가장 시공실적이 많은 가설공법 ・인력 및 장비 수급이 용이함 ・육교횡단 및 지하차도 구간, 회전 반경(R=200m) 제약이 없는 가설공법	・지점부에서 작업하는 경전철 특성에 맞게 작업 공간 최소화가 가능한 공법 - 폭원 (12m) 및 제작대 구간 시공시까지 점용 필요 ・현장 인력을 최소화 할 수 있는 자동화 용접 시스템 도입시 인력작업 최소화 가능 ・육교횡단 및 지하차도 구간, 회전 반경(R=200m) 제약 극복이 가능한 구조 ・우천시 등 날씨에 따른 작업 제약 최소화 및 작업 안정성 확보
단 점	・특수 가설 장비로 초기 투입비고가 (개소당 약 21억 내외) ・차량 통제 구간이 최소화 되어 사회 비용 감소 ・1.8km 이상 연장시 경제적 공법 ・시공사례가 적고 정밀 시공	・도심지에서 넓은 가설 작업 공간 필요 - 가설벤트 폭원 (12m) + 좌우로 크레인 작업 공간(10~15m)로 30m 내외의 작업 공간 필요 ・Block 가조립하여 조립 운반시 ・별도의 제작장 부지 필요 ・현장 투입 작업 인력이 많아 혼잡하여 작업 안전성 불리 ・우천 시 등 날씨에 따른 작업 제약 ・공사 중 교통통제 소음으로 인한 민원 발생 우려	・반력대가 보강된 ILM 제작대 및 노즈 및 횡방향 가이드 프레임 설치 필요 (개소당 약 20억 소요) ・ 압출가능한 교량 연장에 제약이 있음 (종구배, 횡구배 제약 ・런칭 하는 전 구간 가설 벤트 필요 (연장이 길어질수록 벤트 비용 증가) ・수평력에 지지하는 벤트 보강 필요
가설 공기	8.6개월(259일) /km	12.0개월(360일) /km	12.5개월(376일) /km
상부 가설 공사비	125억/km (상부 제작비 제외, 장비비 포함)	160억/km (상부 제작비 제외)	129억/km (상부 제작비 제외)

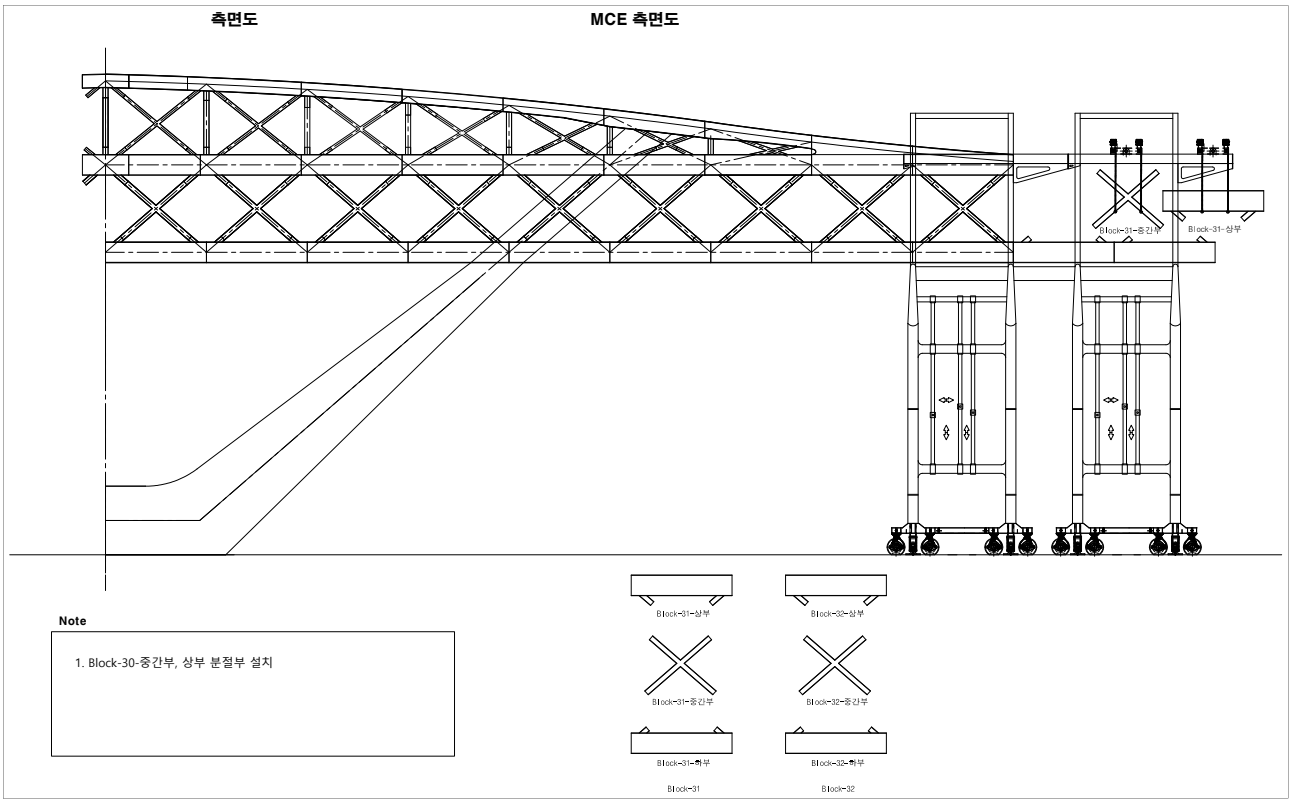
(5) GFCM 가설공법의 가설방식에 따른 비교

MCE 가설장비를 활용한 신형식 고가구조물 시공법(GFCM 가설공법) 검토 결과, 작은 연장에서의 장비비가 매우 고가이기 때문에 장비를 두 가지 방향으로 검토하였다. MCE OPTION-1은 백본 아웃리거를 일괄로 가설하는 구조이다 보니 장비가 대형화되고 고가가 되므로, 짧은 연장 가설시공을 대비, 백본 아웃리거 순차가설방법(MCE OPTION-2)과 백본 아웃리거 분리시공방식 (MCE OPTION-3)으로 구분하여 각각의 장단점을 비교하여 효과적인 장비개발을 위한 연구 분석을 수행하였다.

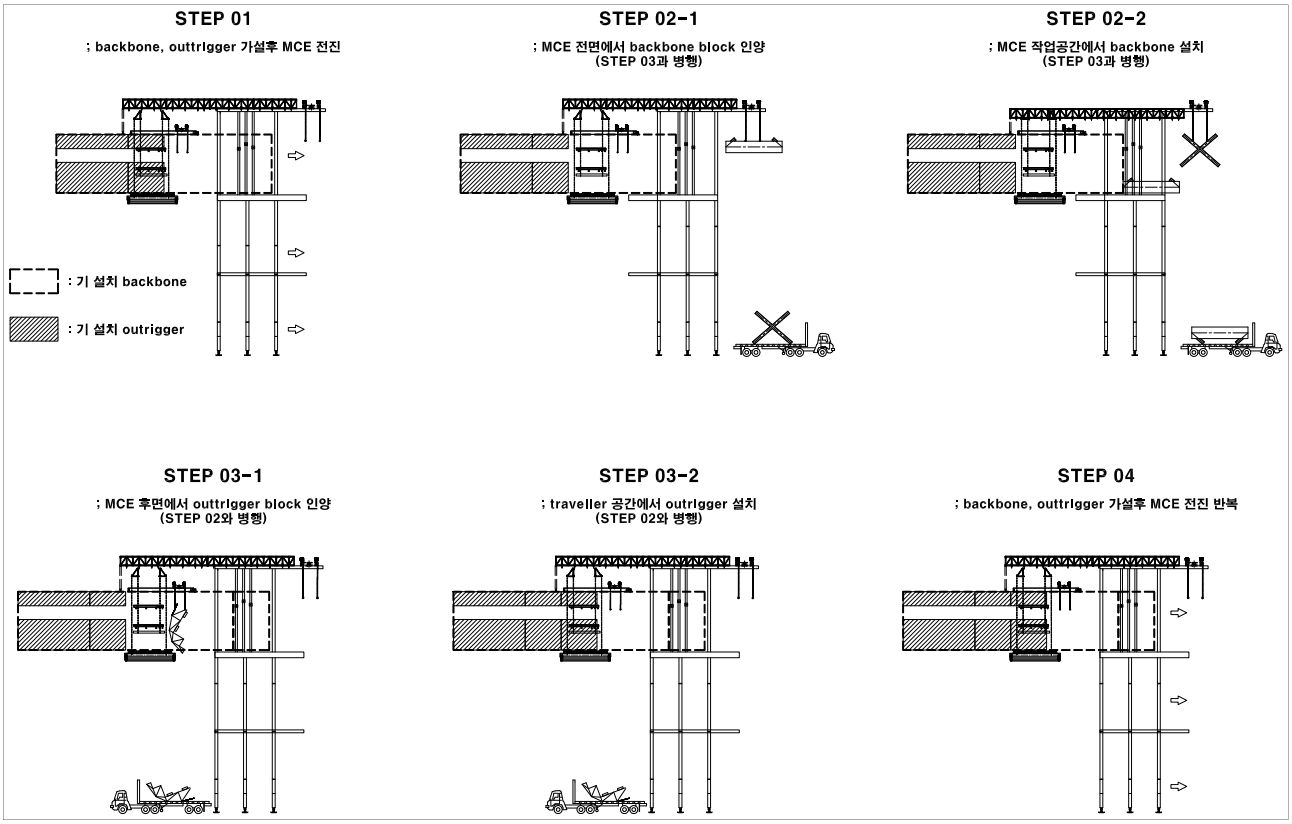
구 분	MCE OPTION-01 (백본 및 아웃리거 일괄 가설 방식)	MCE OPTION-02 (백본 및 아웃리거 순차 가설 방식)	MCE OPTION-03 (백본 및 아웃리거 분리 가설 방식)
공 법 개 요			
특 징	· 백본 및 아웃리거 한 공간에서 동시 작업하는 일괄 가설 방식 · 도심지에서 도로 점용폭원 - 폭원 6m이내, 종방향 20m이내 일시 점용 · 고소작업이 많아 작업 효율성 다소 저하 · 육교횡단 및 지하차도 구간, 곡선구간 (R=200m) 제약 극복이 가능한 구조 · 하부 바퀴 방식으로 자체 이동하며 우천 등 날씨에 따른 작업 제약 없음 · 내부 환기시설 및 풍하중 저감위한 각종 시설 필요 · 가설장비가 대형화 되어 장비비 가장 고가 · 초기 공사비는 가장 비싸지만 연장 1.825km부터는 경제적	· 백본 작업 후 아웃리거 순차 가설 방식 · 백본 인양가설장비 및 아웃리거 가설장비가 구분되나 연결된 구조 · 도심지 도로 점용 폭원 - 폭원 5m이내, 종방향 6m이내 일시 점용 · 고소작업이 많아 작업 효율성 다소 저하 · 육교횡단 및 지하차도 구간, 회전반경 (R=200m) 제약 극복이 곤란 · 우천시 등 날씨에 따른 작업 제약 최소화 및 작업 안정성 확보 · 하부 유압 잭 방식으로 이동성 다소 저하 · 내부 환기시설 및 풍하중 저감위한 각종 시설 필요 · 가설 장비가 대형화로 다소 고가 · 초기 공사비는 다소 비싸지만 연장 1.025~1.625km 연장에서 경제적	· 백본 작업 후 아웃리거 순차 가설 방식 - 두 개의 가설 공정이 분리하여 진행 가능함 · 헤비리프팅(Heavy Lifting) 장치 및 상향식 스태들 케리어(Straddle Carrier) 가설장비로 분리 · 도심지에서 도로 점용 폭원 - 가설시 폭원 6m이내 종방향 160m이상 (1span)의 작업 공간 필요 · 고소작업 최소화 작업 효율성 증대 · 육교 및 지하차도 횡단시 제약 · 현장 작업 인력이 많아 혼잡하여 작업 안전성 불리 · 우천 시 등 날씨에 따른 작업 다소 제약이 따름 · 내부 환기시설 및 풍하중 저감위한 각종 시설 불필요 · 가설 장비 소형화로 장비비 가장 저렴 · MCE 장비중 장비비 가장 저렴하고 연장 825m까지 경제적
가설 공기 (순공기)	8.6개월(259일) /km	9.8개월(294일) /km	9.4개월 (282일) /km
상부 가설 공사비	125억/km (상부 자재비 제외, 장비비 포함)	121억/km (상부 자재비 제외, 장비비 포함)	121억/km (상부 자재비 제외, 장비비 포함)

① 백본 및 아웃리거 일괄 가설 방식 (MCE OPTION-01) 시공 개념도





② 백본 및 아웃리거 순차 가설 방식 (MCE OPTION-02) 시공순서도

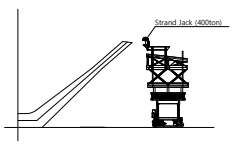


③ 백본 및 아웃리거 분리 가설 방식 (MCE OPTION-03) 시공순서도

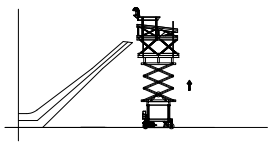
지점부 Back-Bone 가설 공법

STEP-1 주탑 설치

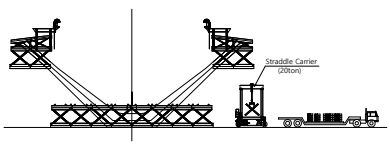
STEP-2 주두부 주탑연결부 및 Strand Jack 설치 후 제작 운반



STEP-3 주두부 주탑 연결부 Back Bone Lifting

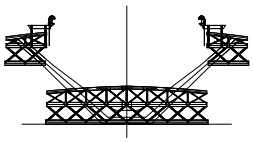


STEP-4 주두부 주탑 연결부 Back Bone 설치완료

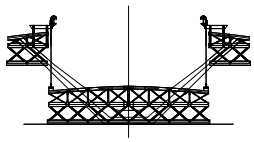


Back Bon 중량 +Strand Jack 중량 : 50ton 내외

STEP-5 주두부 지점부 Back Bone 제작 완료

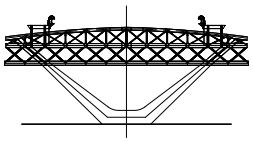


STEP-6 주두부 지점부 Back Bone Lifting

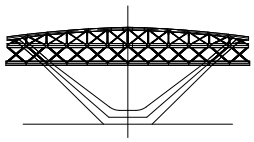


Back Bone 중량 120ton 내외

STEP-7 주두부 Back Bone 설치 완료

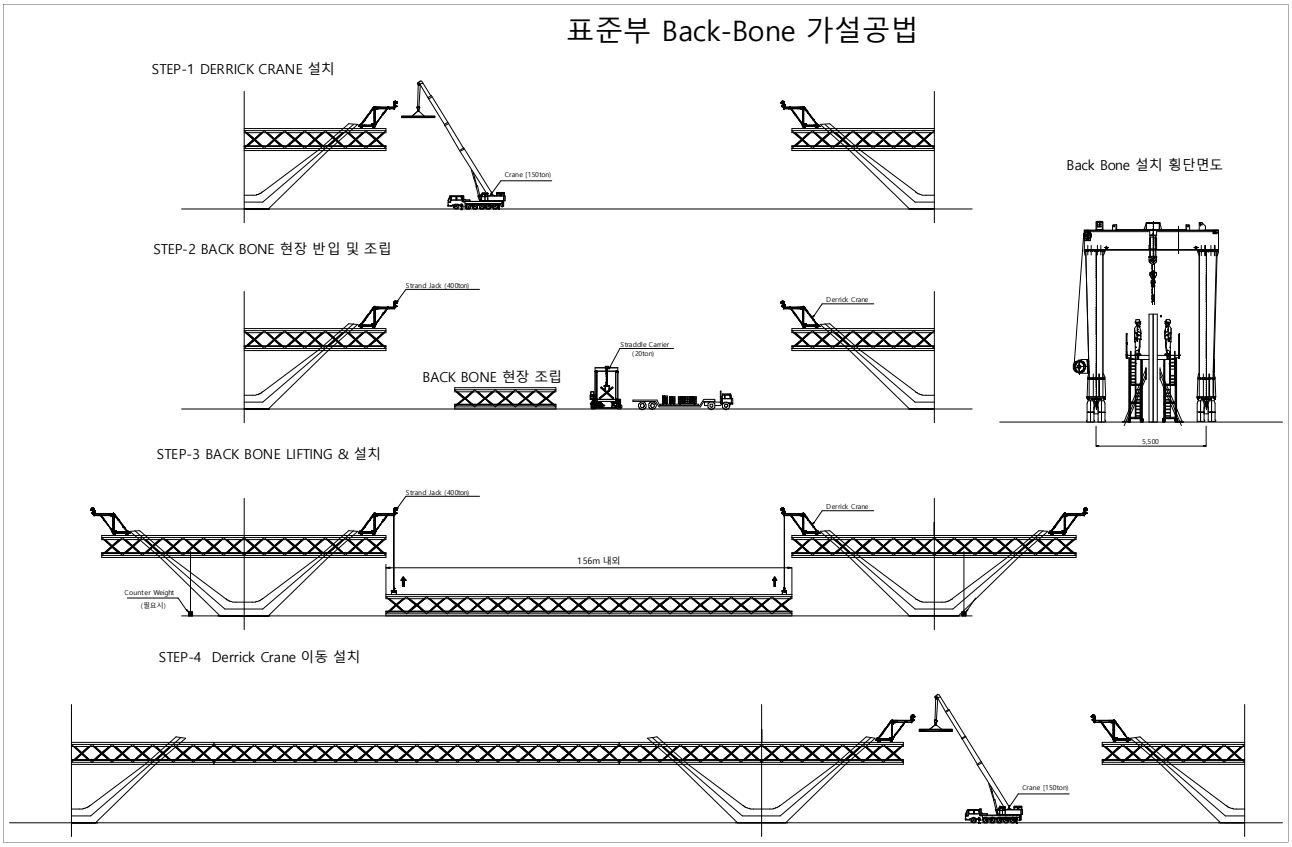


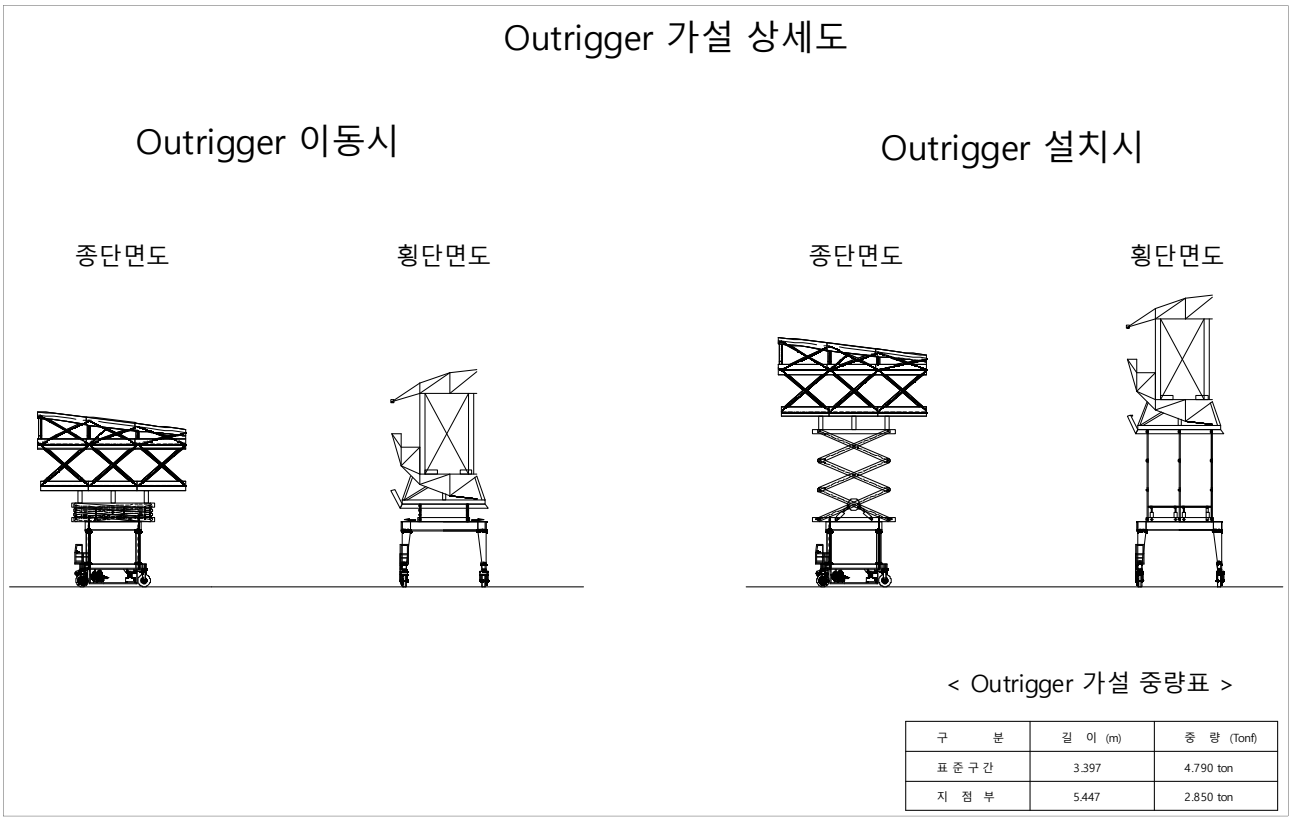
STEP-8 Hydraulic Jack 및 수평지지대 설치 완료



< 주두부 Back Bone 가설 중량 >

구 분	길 이 (m)	중 량 (Tonf)
주 두 부	44m 내외	198.4 ton





< Outrigger 가설 중량표 >

구 분	길 이 (m)	중 량 (Tonf)
표준구간	3.397	4.790 ton
지 점 부	5.447	2.850 ton

(6) 상부구조 가설시공법 공사비 검토

(가) 상부공 가설공사비 산출

가설공법별 경간 425m에 대한 공사비 산출을 근거(첨부자료 산출근거 참조)로 하여 상부구조물의 가설 공사비를 산정하였다. 이는 각 연장별로 실제 경제성을 분석하기 위한 것으로 MCE 장비의 OPTION 1안, OPTION 2, OPTION 3안과 같이 비교 분석하였다. 하기 공사비산정은 직접공사비 기준이며 공장 제작에 따른 재료비 및 제작비는 제외한 순수 가설 공사비이다.

구분	FSM 가설공법	ILM 가설 공법	MCE OPTION-1안	MCE OPTION-2안	MCE OPTION-3안
연장(m)	425	425	425	425	425
산정공사비(원)	5,501,787,026	6,828,077,086	3,145,192,419	3,373,658,044	4,130,811,794
가설장비(원)	-	-	5,176,500,000	4,233,420,000	2,407,000,000

* MCE OPTION-1안 ; 백본 및 아웃리거 일괄가설 방식
* MCE OPTION-2안 ; 백본 및 아웃리거 순차가설 방식
* MCE OPTION-3안 ; 백본 및 아웃리거 분리가설 방식

(나) km당 상부 가설공사비 산정

상기 425km 가설공법별 공사비를 km에 대한 공사비로 환산하여 산정하였는데 이는 2km를 공구 분할기준으로 하여 산정하였다.

- MCE OPTION 1안, OPTION 2, OPTION 3안 별도 가설 장비 1set/2km 반영

구분	FSM 가설공법	ILM 가설 공법	MCE OPTION-1안	MCE OPTION-2안	MCE OPTION-3안
상부 가설 공사비(원)	12,945,381,238	16,066,063,732	7,400,452,751	7,938,018,927	9,719,557,162
장비비(원)	-	0	5,176,500,000	4,233,420,000	2,407,000,000
합 계	12,945,381,238	16,066,063,732	12,576,952,751	12,171,438,927	12,126,557,162

(다) 단위 연장별 상부 가설공사비 비교

425m를 기준으로 200m 경간장이 늘어감에 따라 가설 공법별 공사비를 비교 분석하여 산정하면 아래 표와 같다. 연장 625m이하에서는 재래식 FSM 가설공법이, 연장 825m에서는 OPTION 3안이 경제적이었으며, 연장 1,025m이상은 공사비 차이는 1% 이내로 OPTION 1안 및 OPTION 2안이 경제적인 것으로 나타났다.

연장(km)	FSM 가설공법	ILM 가설 공법	MCE OPTION-1안	MCE OPTION-2안	MCE OPTION-3안
0.225	2,912,710,778	3,614,864,340	6,841,601,869	6,019,474,259	4,593,900,362
0.425	5,501,787,026	6,828,077,086	8,321,692,419	7,607,078,044	6,537,811,794
0.625	8,090,863,274	10,041,289,832	9,801,782,969	9,194,681,829	8,481,723,226
0.825	10,679,939,521	13,254,502,579	11,281,873,519	10,782,285,615	10,425,634,659
1.025	13,269,015,769	16,467,715,325	12,761,964,069	12,369,889,400	12,369,546,091
1.225	15,858,092,016	19,680,928,071	14,242,054,619	13,957,493,186	14,313,457,524
1.425	18,447,168,264	22,894,140,818	15,722,145,170	15,545,096,971	16,257,368,956
1.625	21,036,244,511	26,107,353,564	17,202,235,720	17,132,700,756	18,201,280,389
1.825	23,625,320,759	29,320,566,310	18,682,326,270	18,720,304,542	20,145,191,821
2.025	26,214,397,006	32,533,779,057	20,162,416,820	20,307,908,327	22,089,103,254

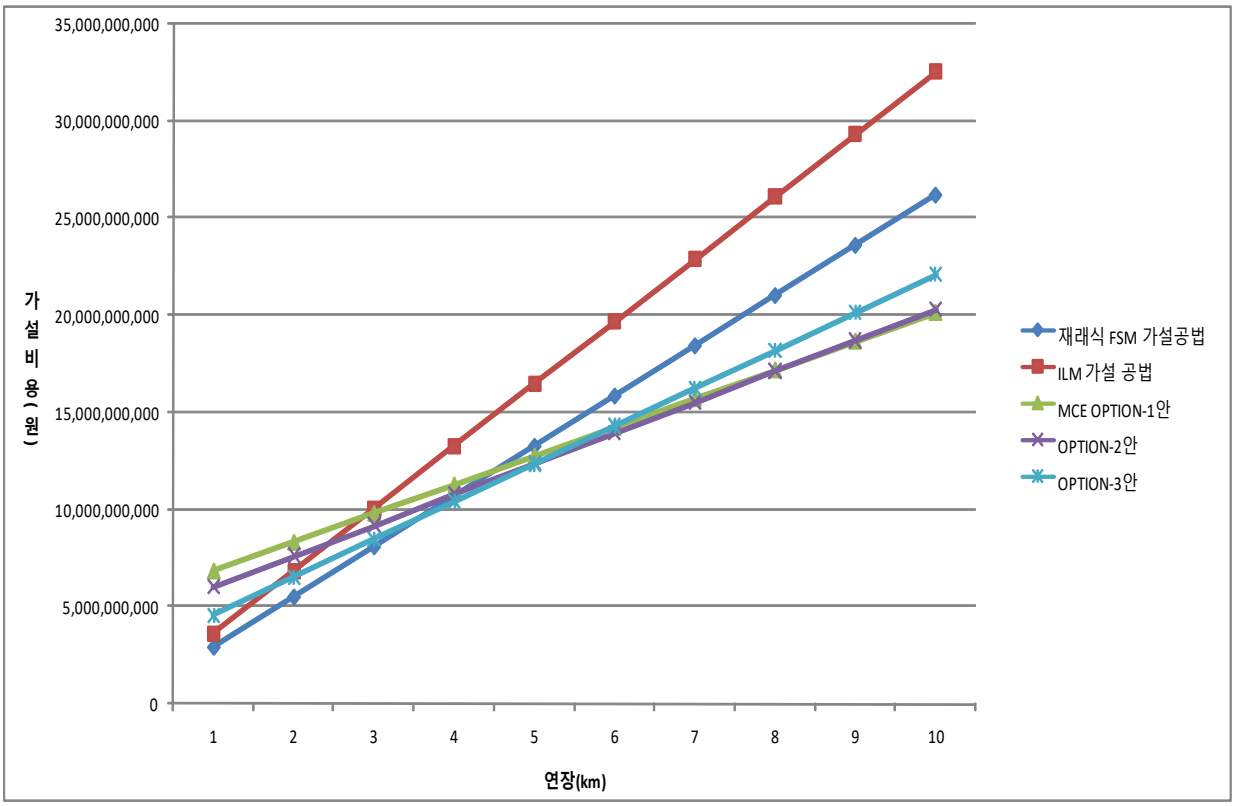
(라) 결론

가설장비의 초기 투입비용을 기준으로 825m이하는 재래식 FSM 가설공법이 유리하나, 825m이상으로 갈수록 가설장비를 활용한 MCE장비를 이용한 상부 가설공사비가 유리하다. 1,025~1,625m 구간에서는 MCE OPTION-2안, 1,625m이상은 OPTION-1안이 경제적이며 따라서, 2km이상의 공구분할 기준으로 볼 때 MCE OPTION-1안이 가장 경제적임을 알 수 있다.

신형식 고가구조물의 형식은 도심지에 적용하기 위해 개발된 상부형식으로 진동 등의 환경피해 최소화하여 현장 민원을 최소화하고 운반 및 가설시 교통통제 최소화를 위해 작업공간을 최소화하여 협소한 작업 공간 내에서도 신속한 가설작업이 가능해야 한다. 이러한 목적을 위해 적용 가능한 기존 공법인 FSM 및 ILM공법과 새로운 가설공법을 제안하여 연구하여 분석 하였다.

기존 크레인에 의한 가설 공법인 가설벤트 및 크레인에 의한 FSM가설공법은 시공경험이 많고 짧은 경간에서는 경제적이지만, 도심지에서 적용시 크레인 작업을 위해서는 가설벤트 설치하는 FSM공법의 경우 기존 도로를 무려 최대 30m내외의 폭을 점유하여 교통 혼잡 뿐 아니라 소음 및 미관 등의 많은 문제점들을 가지고 있다. 그리고 기존 ILM공법은 이러한 문제점들을 개선할 수는 있으나, 시공시 연장의 제약 및 경제성 그리고 연장이 길어질수록 가설인력이 증가해야 하는 문제가 있고 제작장 좌우 1km이상 압출제약등의 문제가 있다.

그러나, 본 연구과제를 통해서 제시한 GFCM 가설공법을 적용할 경우, 차선 점유폭을 6M 이내로 최소화 할 수 있고 가설공기도 425m기준 1.5개월 이상 공기를 단축 할 수 있다. 이는 동일한 공사비 기준시에 km당 최대 3개월 이상 공기를 단축할 수 있음을 의미하는 획기적인 가설공법이다. 다만, 대형장비 및 작업대(Working platform)등의 설치로 인해서 초기 장비비가 고가여서 425m등의 짧은 교량은 FSM공법 대비 공사비가 고가이나, 경전철의 일반적인 공구분할 기준인 2km기준으로 가정한다면, 공사비 분석결과 다양한 가설장비의 활용에 따라서는 825m 이상에서는 경제성이 충분히 있음을 확인 알 수 있다. 본 연구에서는 GFCM공법을 장비의 규모를 경제성 및 공기등의 영향 등을 고려하여 200m단위로 세분화하여 백본 및 아웃리거 분리가설방식, 순차가설방식, 일괄가설방식으로 구분하여 경제성을 연구한 결과 1.02km이내의 연장은 분리가설방식을 1.02km이상에서는 일괄가설방식이 경제적인 가설방식이라는 결과를 도출하였다.

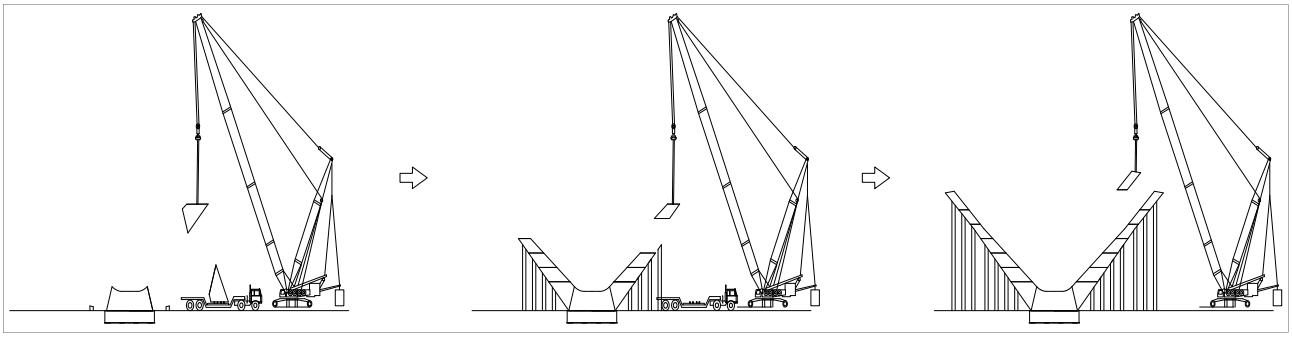


<공법별・연장별 가설비>

나. 하부구조 가설시공방안

도심지 경전철 고가 구조물 하부구조를 수행함에 있어 가시설 설치 시 발생하는 진동, 소음으로 민원이 빈번하게 발생하며, 공기 및 공사비가 증가함에 따라 가시설을 설치하지 않고 도심지내 하부 시공을 진행할 수 있는 시공기술이 요구된다. 이를 통해 공기단축 및 상부구조를 위해 개발된 가설장비를 활용한 시공이 가능하여 훨씬 경제적이고 효율적인 시공 기술의 도출이 가능하다.

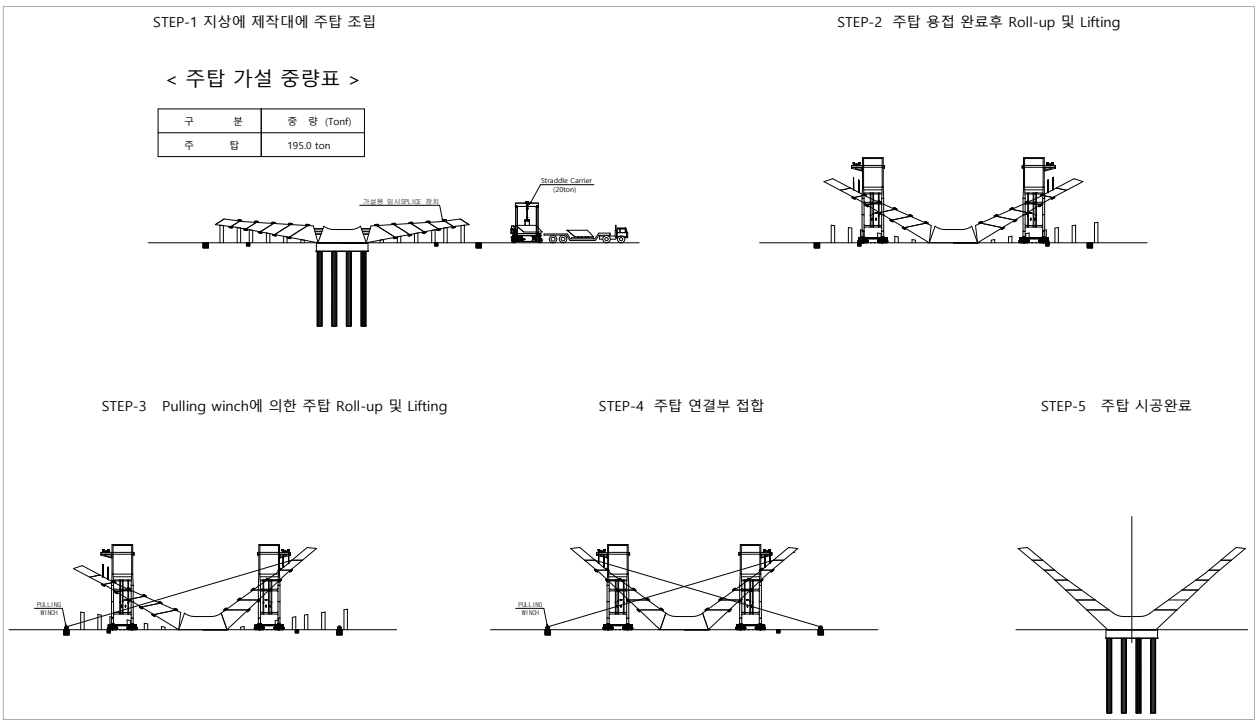
(1) 크레인 및 벤트에 의한 기존 가설공법



< 크레인 가설 공법에 의한 하부시공 순서도 >

기존 크레인의 가설공법은 하부 기둥 모듈 블럭을 공장에서 현장으로 운반하여 가설벤트를 설치하고 크레인으로 가설하는 방식으로 현장에서 벤트 설치로 인한 공기 및 공사비가 증가하며 고소작업에 의한 시공 효율성이 떨어진다.

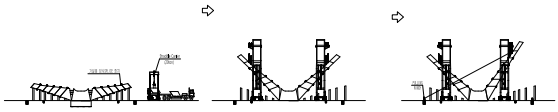
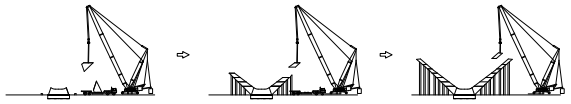
(2) MCE 장비를 이용한 회전 & 인양에 의한 가설 공법



< 회전 & 인양에 한 하부시공 순서도 >

본 연구과제에서 제안하는 하부시공법은 기존의 MCE장비나 스테들 캐리어를 활용하여 공장에서 제작되어 운반된 교각 모듈 블록들을 지면에 눕혀 시공하고 하단 고정용 힌지 회전장치를 기준으로 하여 들어 올려 시공하는 시공법으로 지면에서 일괄 가설 후에 시공하기 때문에 가설벤트가 불필요하며 고소작업의 위험을 최소화 할 수 있는 가설공법으로 공기를 획기적으로 단축이 가능하며 공사비도 경제적인 가설공법이다.

(3) 하부 시공 공법 비교안

구 분	회전 & 인양 가설공법	크레인 및 가설벤트에 의한 가설공법
공 법 개 요		
특 징	· 도심지에서 작업하기에 적합하도록 차량점용 최소화 할 수 있는 가설공법 · 가설 작업시 공간 최소화, 가설 공기 단축 · 육상 제작대에 눕혀 용접작업으로 작업 안전성 및 품질성 확보용이 · 필요시 동시 작업으로 작업일정 추가단축가능 · 일괄 작업후 인양 가설하므로 크레인 작업 최소화 가능 · 유압 장비 및 회전 작업을 위한 고도의 정밀 가설 기술 작업 필요 · 경제적 시공법	· 시공실적이 많은 재래식 가설공법 · 교각 Block 고소작업에 의한 작업안전성 및 품질성 확보 불리 · 가설을 위한 별도의 가시설 벤트 설치비용 고가 · 도심지에서 넓은 작업 공간 점용 필요 · 공사 중 교통통제 비용 인한 민원 발생 우려 · 시공경험이 많은 시공법
가설공기	6.25 개월 (188일)	7.5 개월 (225일)
공사비 (5기/km)	19.9억 (제잡비 포함)	20.9억 (제잡비 포함)

(4) 하부구조 가설시공법 공사비 검토

(가) 하부 가설 공사비 산출

가설공법별 경간 425m 교각 2개소에 대한 공사비 산출하면 아래 표와 같다.

	회전 & 인양 가설공법	**크레인 가설 공법**
개소	2	2
하부 공사비 (원)	794,925,786	837,193,286

(나) km당 하부 가설 공사비 산정

가설공법별 km에 대한 교각 5개소에 대한 공사비로 산정하여 보면, 회전 및 인양 가설 공법이 크레인과 벤트에 의한 일반적인 가설 공법과 비교해서 경제적인 가설공법임을 알 수 있다.

	회전 & 인양 가설공법	**크레인 가설 공법**	**비 교**
하부 공사비 (원)	1,987,314,465	2,092,983,215	5개소/km 기준

신형식 고가구조물의 하부구조의 가설공법을 도심지에 적용하기 위해서는 경사진 하부구조 가설을 위한 시공 안전성 및 품질확보가 용이하며 경사구조의 시공을 위한 가설벤트 등의 가설재를 최소화하고 경제성 및 품질관리 그리고 가설공기 단축등의 시공성이 용이하여야 한다. 또한, 상부구조 가설시공과 마찬가지로 운반 및 가설시 교통통제 최소화를 위해 작업공간을 최소화하여 협소한 작업 공간 내에서도 신속한 가설작업이 가능해야 한다. 이러한 목적을 위해 회전 & 인양방식을 기존 크레인 가설공법과 비교 검토한 결과, 육상에서의 5.5m의 좁은 폭원내에서 부재연결 작업이 가능하여 품질 및 시공 안전성 확보가 용이하고, 1km 교각 5기 기준으로 공기를 1.25개월 단축이 가능하며, 경제성 면에서도 5%이상의 공사비 감소 효과가 있음을 도출하였다.

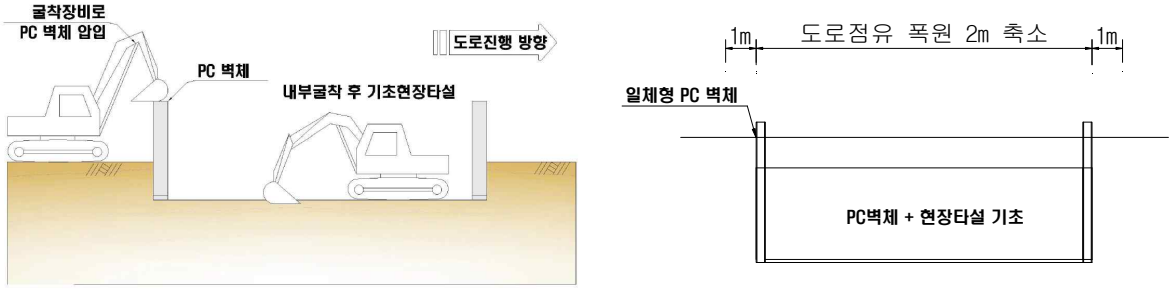
다. 하부기초 시공방안

(1) 기초부 가설시공계획

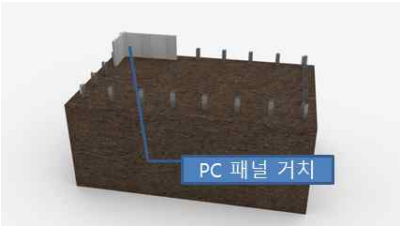
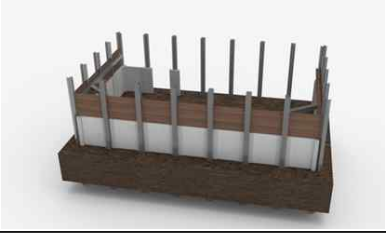
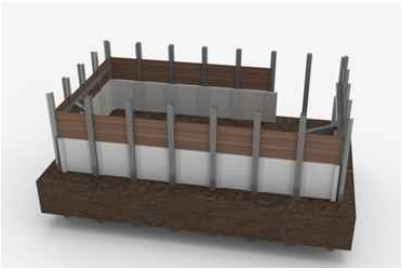
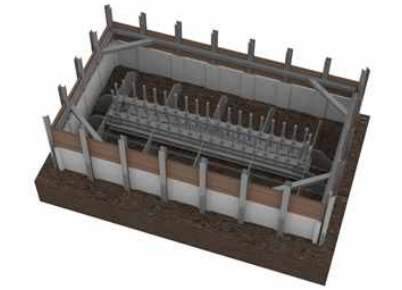
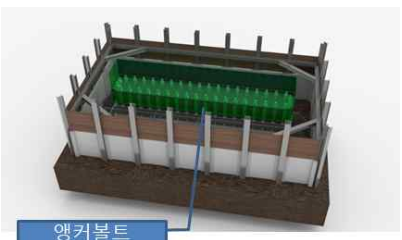
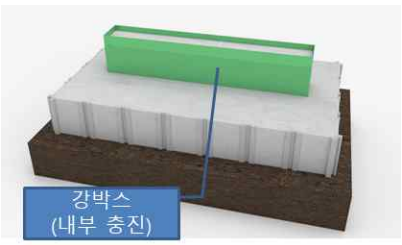
(가) 기초부 시공개요

기초부 시공은 도심지 가설을 고려하여 교통차단 및 시공중 점유폭 최소화하고, 기초높이를 감소시켜 굴착 심도를 최소화하고자, 가시설 겸용 거푸집 일체형 PC 패널을 이용한 하부기초 시공법을 제시하였다.

가시설 겸용 거푸집 일체형 PC 패널을 이용한 하부기초 시공 개요도



(나) 거푸집 일체형 하부기초 시공

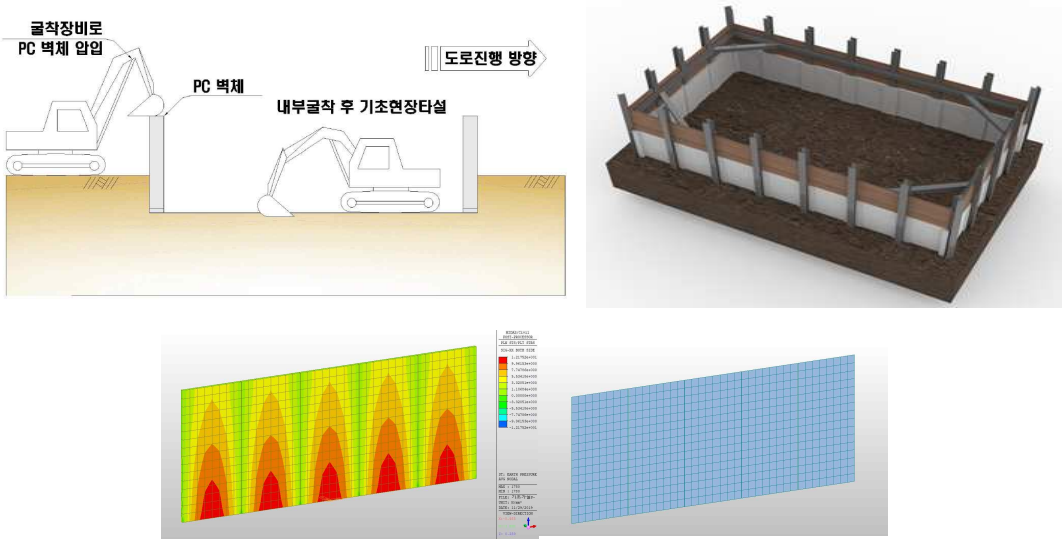
STEP-1 : 지반천공 후 H-pile 설치 (모래채움 수직도 확보)	STEP-2 : PC블록 운반 후 H-pile에 거치(백호우 장비 사용)	STEP-3 : 단계별 지반 굴착 및 PC패널 블록 압입(반복작업)
		
STEP-4 : 상단부 흙막이용 임시 가설패널 설치(토류판)	STEP-5 : PC패널 및 가시설 설치 완료	STEP-6 : 앵커프레임 거치 및 철근배근(스트럿-타이 보강재)
		
STEP-7 : 강재교각 설치 후 내측 앵커볼트 체결	STEP-8 : 강박스 내부 앵커프레임과 기초 앵커프레임간 앵커볼트 체결	STEP-9 : 콘크리트 타설 후 H-pile 제거 및 배면부 뒤채움(복토) 완료
		

<하부기초 시공순서도>

(2) 기초부 하이브리드 PC패널 모듈화 방안 검토

도심지에서 하부기초 굴착에 따른 굴착폭원 및 굴착심도를 감소하여 교통민원과 공사기간을 단축하는 방안을 검토하였다.

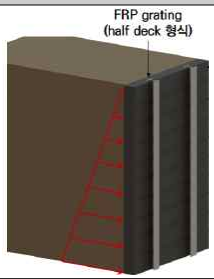
(가) 기초부 모듈화 및 연결부 검토



<기초부 하이브리드 PC패널 모듈화 개요>

기초부 하이브리드 PC패널의 단면을 비교하였다.

<기초부 PC패널 단면 비교>

구분	섬유보강 PC패널 합성	GFRP 보강 합성	하이브리드 PC벽체
개요도			
특 징	섬유보강 복합체로 경량재	GFRP 소재로 검증필요	일체식 PC벽체
장단점	현장타설 콘크리트와 계면부 일체성 곤란	제작 및 시공성 우수 GFRP 소재가 고가	제작 및 시공성 우수 H-beam 재사용 가능
검토의견	구조적 일체성 미흡	GFRP 수급여건 고려필요	PC패널 적용성 우수

가시설 겸용 거푸집 일체형 PC패널 시공후 현장타설 콘크리트부에 스트럿-타이를 적용하여 기초심도를 감소하여 굴착량 및 기초두께를 감소하였다.



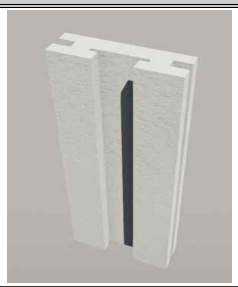
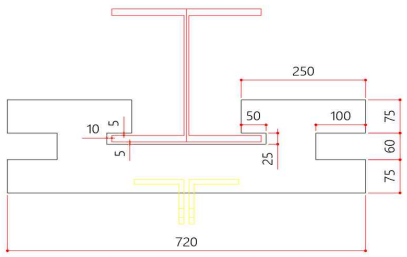
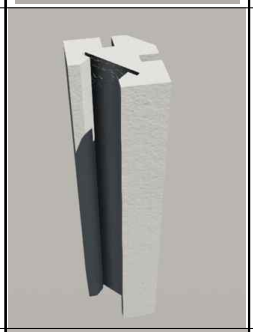
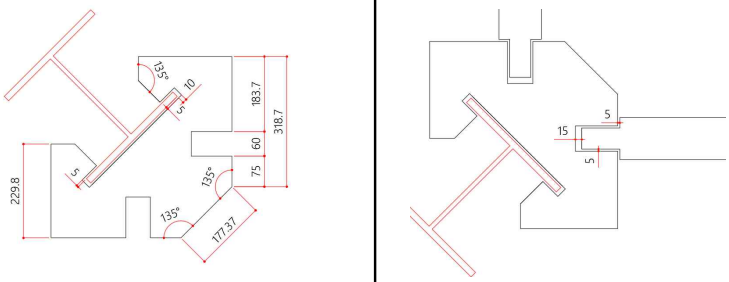
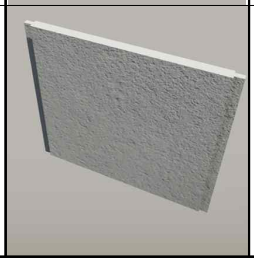
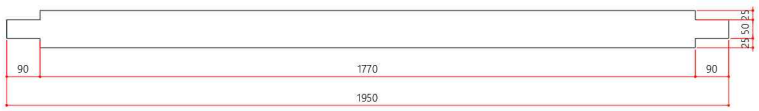
<기초부 스트럿-타이 모델>

(나) PC 패널과 H-beam 연결부 상세도

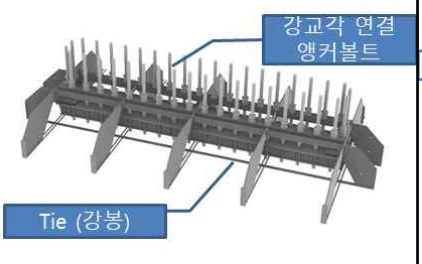
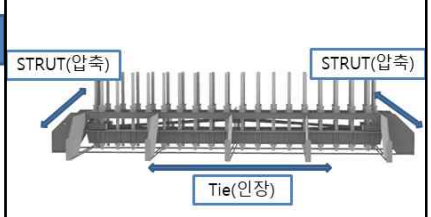
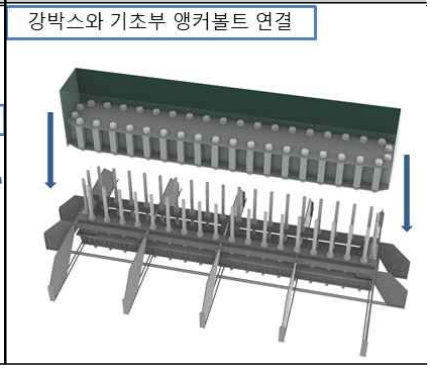
① 정 PC 패널 설치완료 및 코너연결부 상세

기초 일체식 PC패널 설치 개요도 및 코너부 연결상세	
	

② PC 블록 및 패널 상세

구 분	이미지	상세 치수
기준 블록		
코너 블록		
PC 패널		

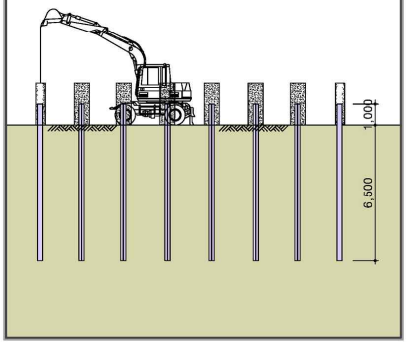
③ 스트럿-타이 보강재 시공상세도

스트럿-타이 보강재 상세		기초부와 강재교각 연결
		

(3) 단계별 시공계획도

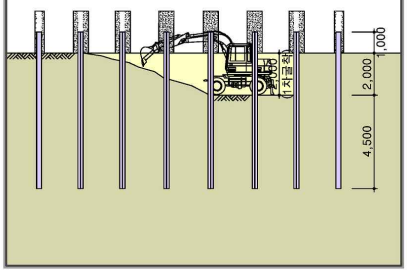
STEP 1

< H-PILE 삽입 및 PC패널 거치 >
- 지반 천공 후 H-PILE 삽입(모래채움)
- PC패널 가설위치 운반
- 포크레인 직립 거치



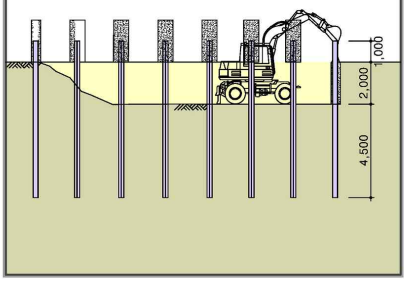
STEP 2

< 지반 굴착 - 1차 >
- 기초부 지반 1차 굴착 (GL -2.0m)
- 1차 굴착 완료



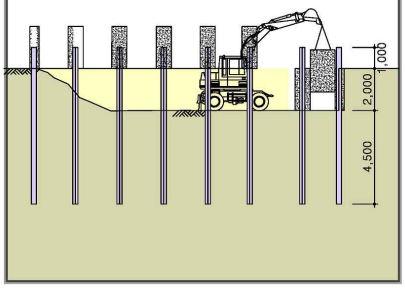
STEP 3

< PC패널 압입 - 1차 >
- PC 코너블록 1차 압입(포크레인)



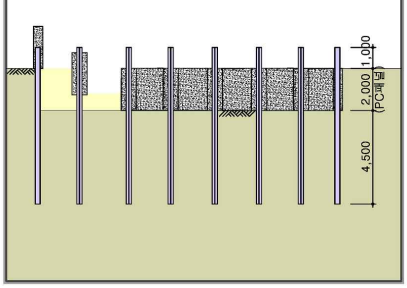
STEP 4

< PC패널 압입 - 1차 >
- PC 기준블록 1차 압입(포크레인)
- PC패널 1차 압입(포크레인)



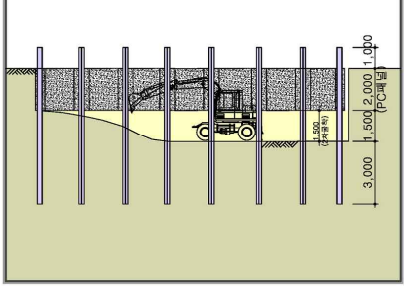
STEP 5

< PC패널 압입 - 1차 >
- PC패널 1차 압입(포크레인)
- 1차 압입 완료



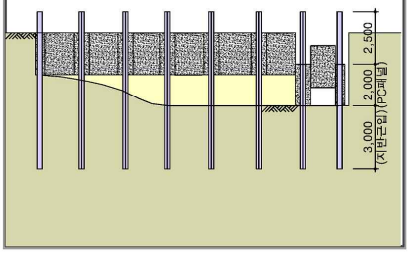
STEP 6

< 지반 굴착 - 2차 >
- 기초부 지반 2차 굴착 (GL -3.5m)
- 2차 굴착 완료



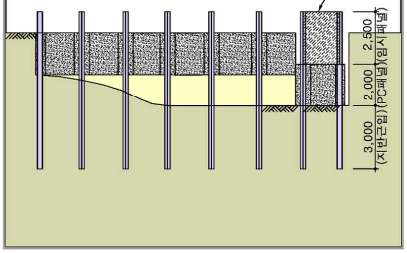
STEP 7

< PC패널 압입 - 2차 >
- PC 기준블록 및 패널 2차 압입(포크레인)



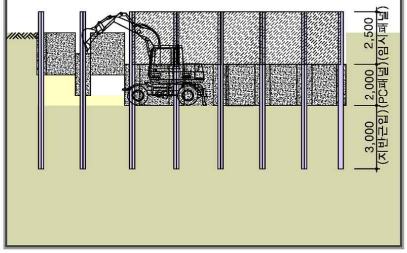
STEP 8

< PC패널 압입 - 2차 >
- 상단부 흙막이용 임시 가설 패널 설치



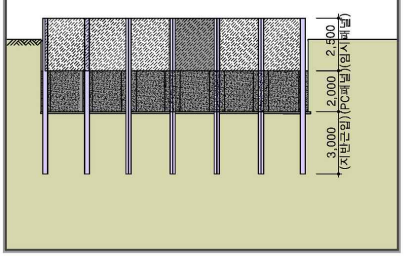
STEP 9

< PC패널 압입 - 2차 >
- 2차 압입 완료



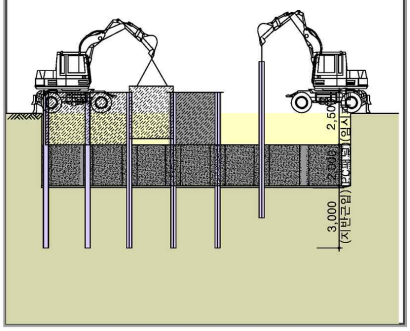
STEP 10

< 기초 시공 >
- 기초 앵커프레임, 스트럿-타이 설치 및 철근 조립
- 기초 콘크리트 타설
- 교각 기둥연결부 시공



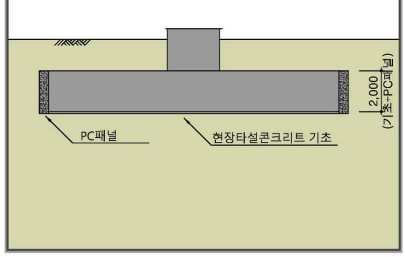
STEP 11

< 임시패널 및 H-PILE 철거 >
- 흙막이용 임시 가설 패널 철거
- H-PILE 철거



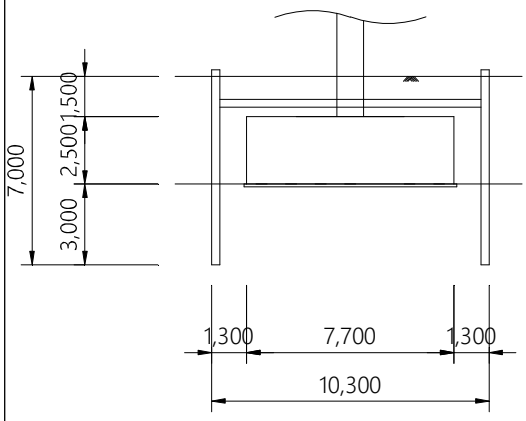
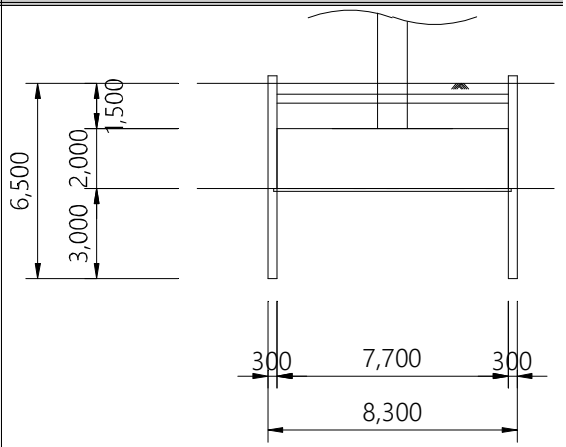
STEP 12

< 기초 시공 완료 >
- 기초상면 되메우기
- 기초 시공 완료

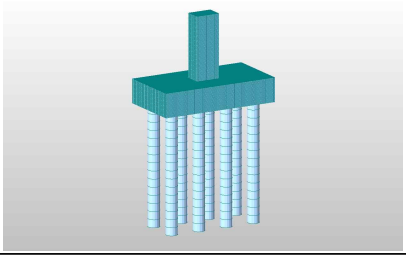
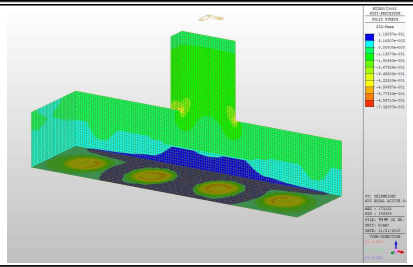
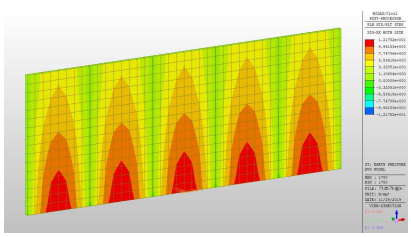


(4) 거푸집 일체형 하부기초 공법 검토

(가) 공법비교

구 분	가시설+거푸집 공법	거푸집 일체형 하부기초 공법
개요도		
굴착폭원	도로 점용폭원 : 10.3m	도로 점용폭원 : 8.3m(▽ 2.0m)
굴착심도	4.0m	3.5m(▽ 0.5m)
장단점	가시설과 기초 여유폭 (2m) 필요 거푸집 설치·해체 공정 필요	도심지 굴착심도 및 폭원 감소 → 시공장비 소형화 및 교통차단 최소화

(나) 가설단계 구조검토

기초 모델링	스트럿-타이 기초 응력분포	PC패널 유한요소해석
		

검토결과 기초 일체화로 인한 거푸집 설치해체 공정을 삭제할 수 있어 공사기간 단축이 가능하다. 향후 현장타설 콘크리트와 일체성에 대한 실험을 통해 성능을 확보하면 도심지 시공시 시공성, 경제성이 우수한 공법으로 판단된다.

(5) 하부기초 공사기간 및 공사비 검토

(가) 하부기초 공사기간 검토

구 분		단위	규격	수량	산정기준	소요일수
기초공	말뚝기초	본	D406, DRA L=19m/본	98	20m이하 12본/일 = 98/12 = 8.1	8
	두부보강	본	D406	98	10본/1일 = 98/10 = 9.8	10
가시설공	가시설공	m	H말뚝 천공	175	백호우 일시공량 170 m3 2대 : 3일, 일체식PC블록설치 1일 = 3+1 = 4	4
	터파기	m3	백호우굴착 0.45m3급	406		
하부 기초공	버림콘크리트	m3	빈배합	10	타설, 면정리	1
	철근조립	ton	매우복잡	36.96	하부 철근-앵커프레임 및 조립철근-상부 철근 순 조립	2
	앵커 프레임	식	강재	1		
	콘크리트 타설/ 양생	m3	슬럼프 15 (펌프카)	264	시공이음 없이 1회타설 (H=2m+ 내부충진)	7
소요기간		일	하부기초 및 하부구조 가설 작업공기 현장여건에 따라 달라지는 작업준비, 가설용지, 토공사 등은 별도 계상 필요			32

※ 공공 건설공사 표준 공사기간 산정에 관한 연구(2018.12, 국토교통부)

(나) 하부기초 공사비 검토.

구 분			단 위	수 량	단 가	금 액
토공		터파기 및 되메우기	m3	406	1식	5,472,802
가시설공	가시설	H-pile 설치해체	m	143	1식	14,336,778
	일체형 거푸집	PC블럭 제작설치	ea	22	913,763	913,763
		PC패널 제작설치	ea	222	897,072	19,735,584
	가시설공 소계		식	1	-	54,175,148
기초공	말뚝기초	D406, L=15m	본	98	1식	276,942,723
	구체	철근 콘크리트	m3	246	1식	54,647,590
	앵커 프레임	강재교각용 앵커프레임	식	1	1식	76,422,612
	기초공 소계		식	1	-	408,012,925
합 계					1기당	467,660,875

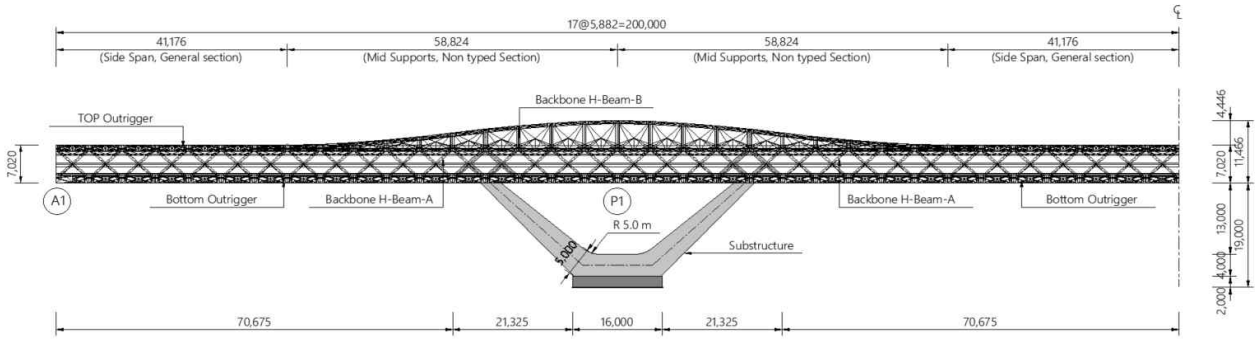
6. 도시친화형 신형식 경전철 고가구조물 타당성 검토

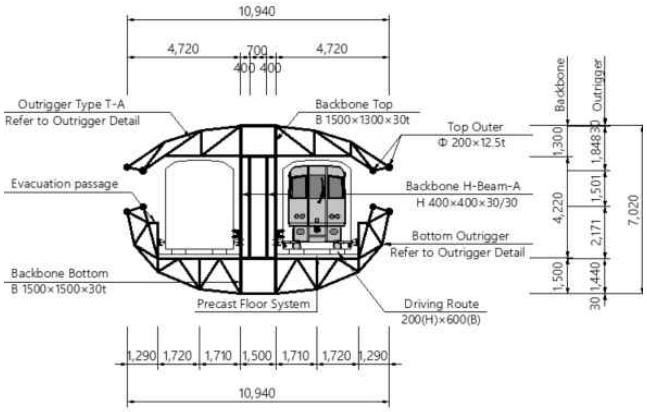
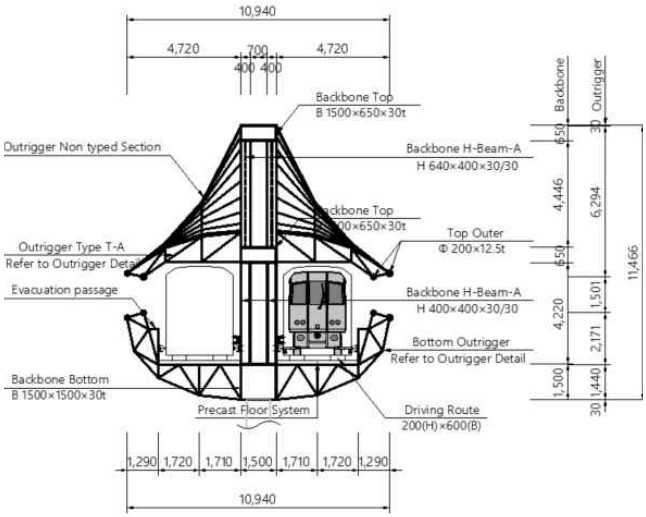
가. 신형식 경전철 고가구조물의 공사비 검토 (연장 400m 기준)

(1) 개요

구 분	신형식 고가구조물
형 식	백본 + 아웃리거(버터플라이 구조 적용) + V형 하부구조
경간구성	100.0m + 200m + 100.0m = 400.0m(최대 경간장 200m)

(2) 검토모델



중 앙 부	지 점 부
	

(3) 공사비 분석

① 주요자재 집계 (연장 400m 기준)

구 분	신형식 고가구조물
강재(TON)	2605.6
케이블(TON)	-
철근(TON)	81.2
강재 합계(TON)	2686.8
콘크리트(㎥)	1057.9

② 공사비 분석

(단위: 백만원)

구 분	신형식 고가구조물
1. 상부공	14,197
2. 하부공	1,179
3. 부대공	1,717
4. 자재대	3,119
합 계	20,212
M당 공사비	50.5

③ 공사비 산출내역

(단위 : 백만원)

구 분	신형식 고가구조물
합 계	20,212
1. 상부공	14,197
1) 가설장비(MCE)	5,177
2) 강관비계	0
3) 강교 제작	5,725
4) 강교 운반	34
5) 강교 가설	3,145
6) 가설벤트	0
7) 강교 도장	89
8) 비파괴 검사	24
9) 거푸집	1
10) 철근가공조립	1
11) 콘크리트타설	0
12) 스페이셔	0
13) 콘크리트 양생	0
14) 강연선 설치 및 긴장작업	0
15) 케이블 설치 및 긴장작업	0
2. 하부공	1,179
1) 토공	5
2) 강교 제작	632
3) 강교 운반	5
4) 강교 가설	63
5) 강교 도장	12
6) 철근가공조립	0
7) 콘크리트타설	0
8) 스페이셔	0
9) 콘크리트 양생	0
10) 강재거푸집	0
11) 기초	185
12) 강관 파일공	277
3. 부대공	1,973
1) 교량받침	30
2) 신축이음장치	30
3) 안전난간설치	61
4) 보행통로	14
5) 기타 부대공	1,867
4. 자재대	3,501

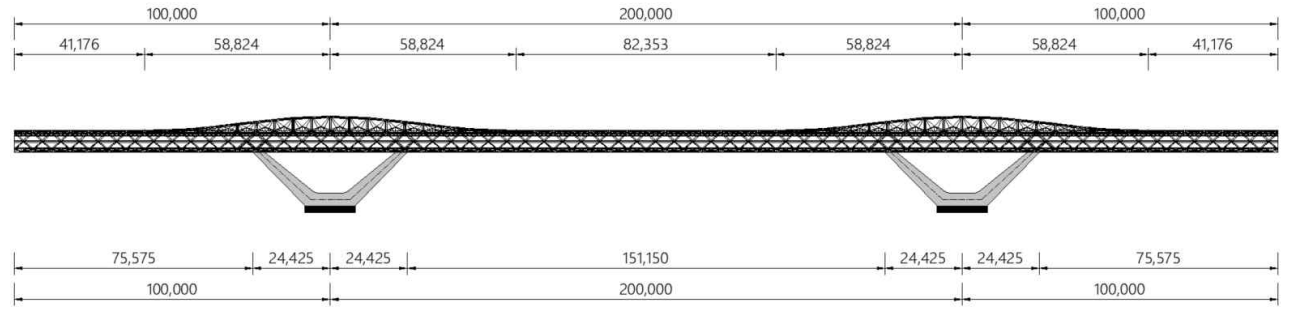
나. 기존 형식 고가구조물간 공사비 비교・검토(최장경간 200m 동일조건)

(1) 개요

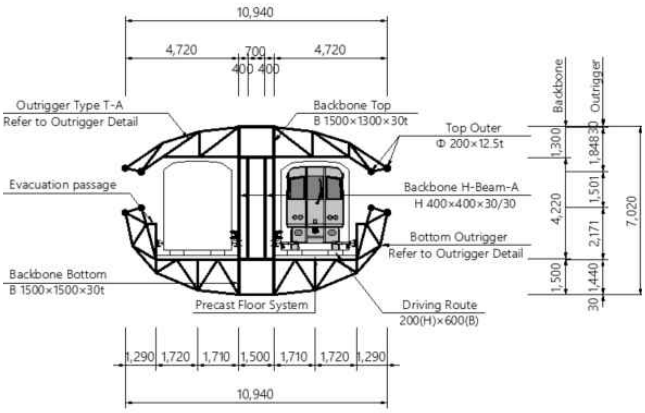
구 분	신형식 고가 구조물	비교 1안	비교 2안	비교 3안	비교 4안
형 식	백본+아웃리거	강트러스교	강아치교	강상판형교	강복합 ED교
경간구성	100.0m + 200m + 100.0m = 400.0m(최대 경간장 200m)				
분석 방향	신형식 고가구조물 대비 비교 1-4안의 공사비 비교 분석				

(2) 검토모델

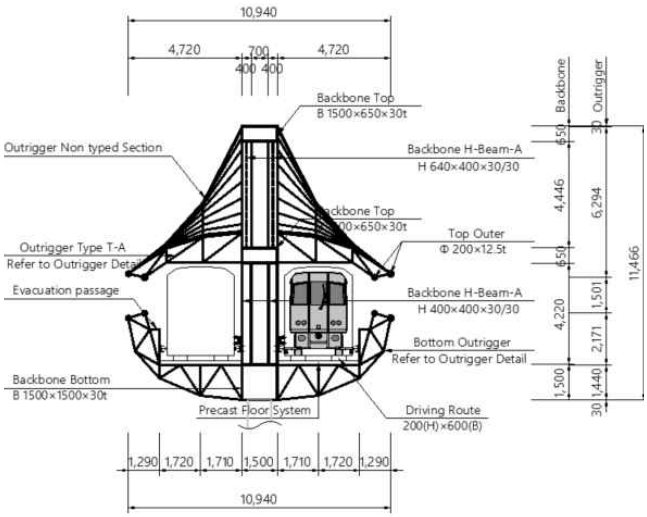
① 신형식 고가 구조물(백본 + 아웃리거)



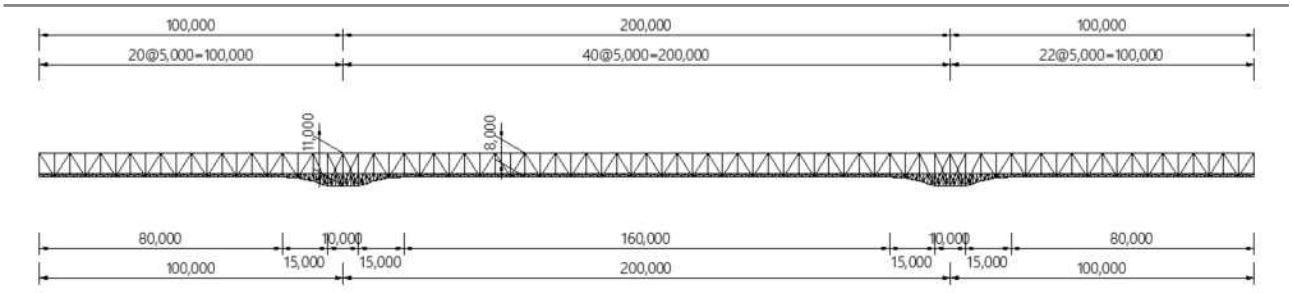
중 앙 부

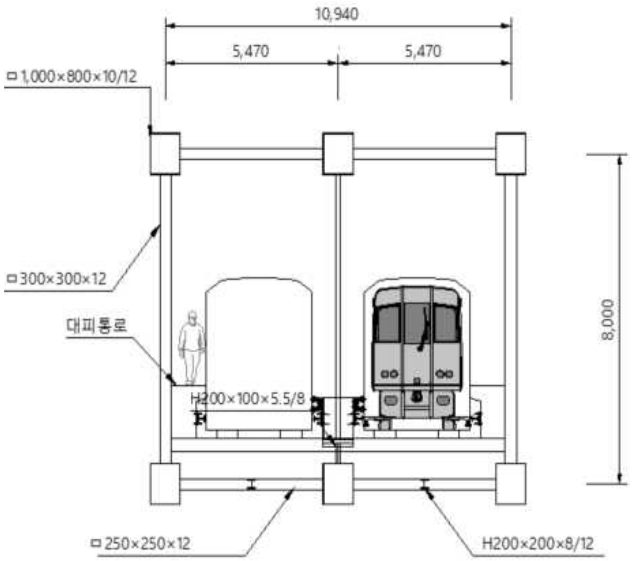
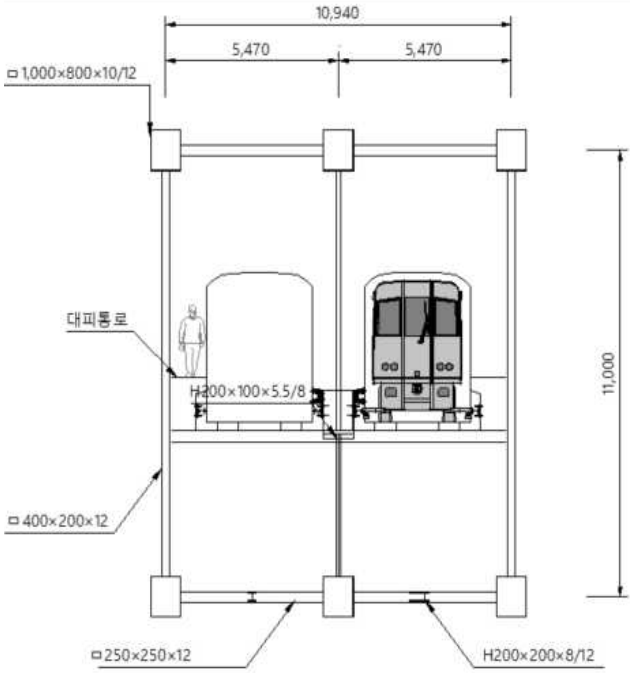


지 점 부

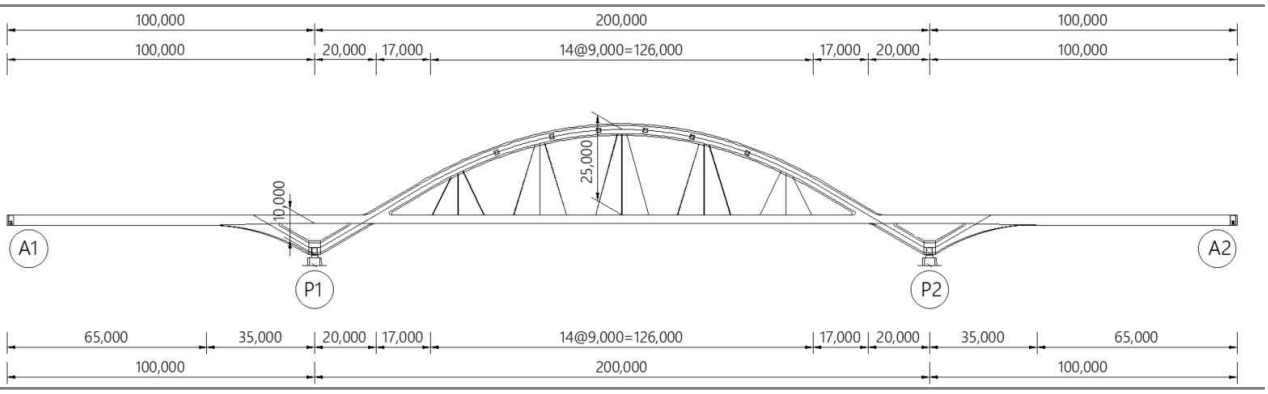


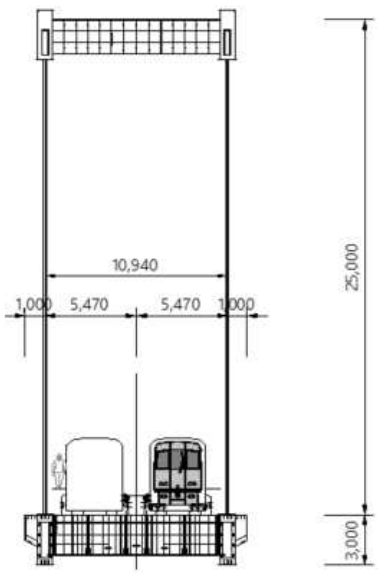
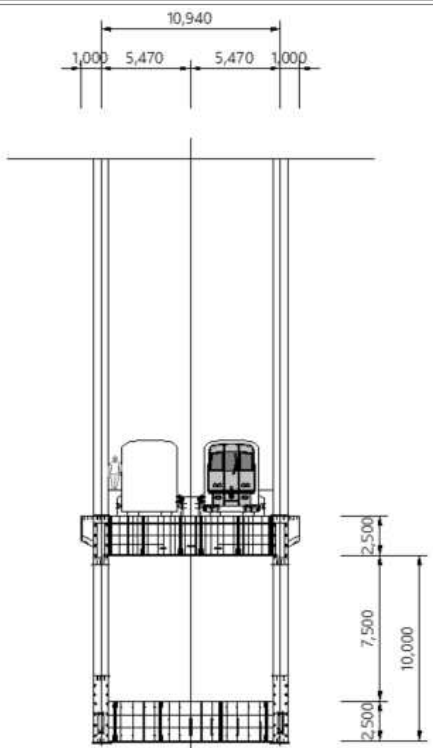
② 비교 1안 : 강트러스교



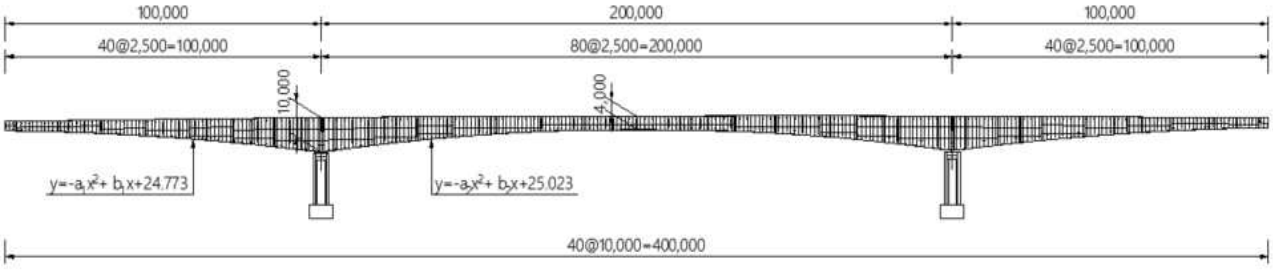
중 앙 부	지 점 부
	

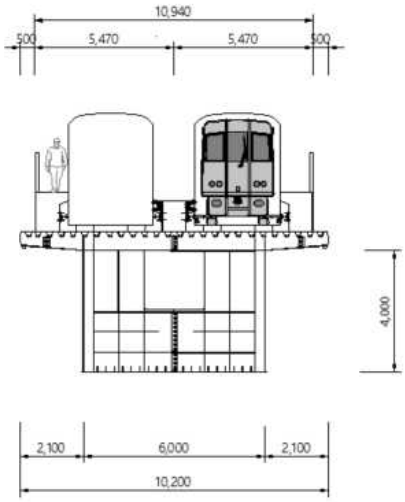
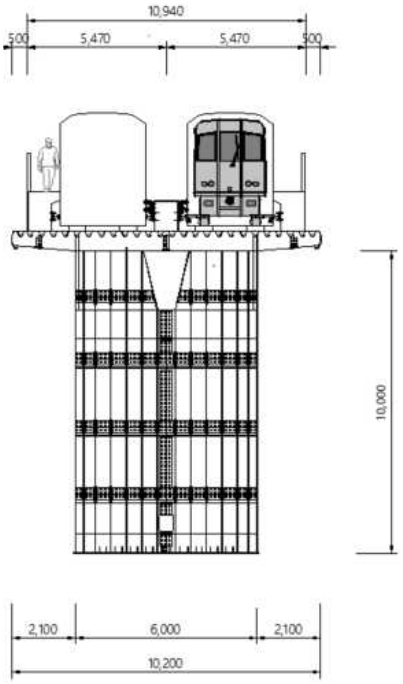
③ 비교 2안 : 강아치교



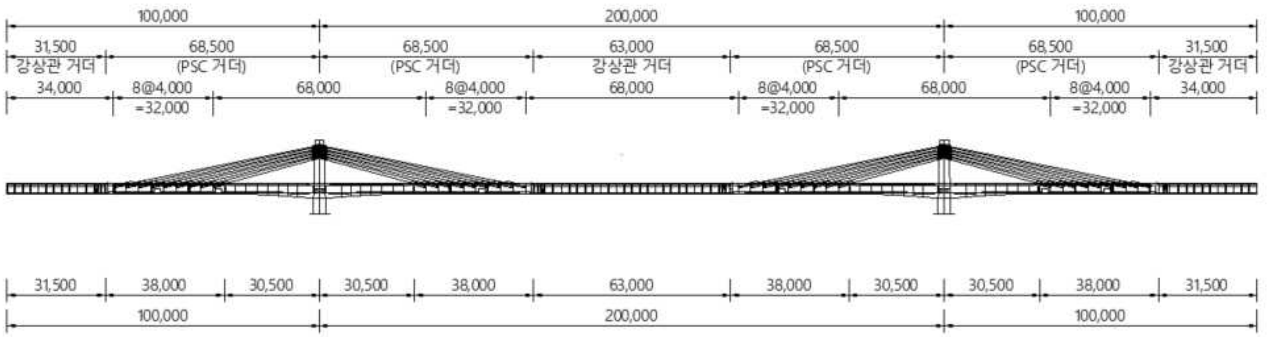
중 앙 부	지 점 부
	

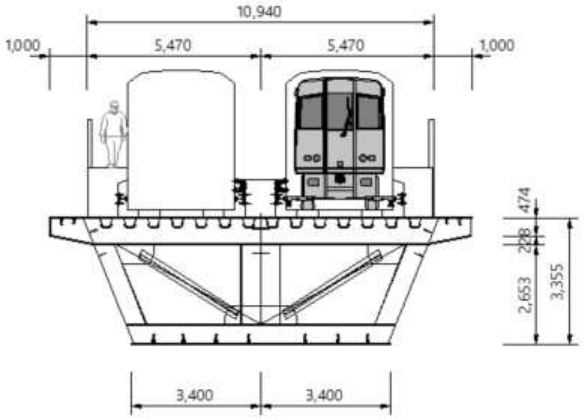
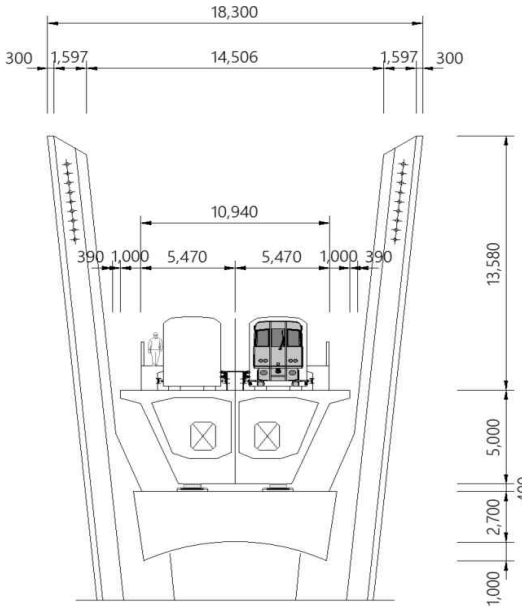
④ 비교 3안 : 강상판형교



중 앙 부	지 점 부
	

⑤ 비교 4안 : 강복합 ED교



중 앙 부	지 점 부
	

(3) 공사비 분석

① 주요자재 집계 (연장 400m 기준)

구 분	신형식 고가 구조물	강트러스	강아치	강상판형	강복합 ED
강재(TON)	2605.6	3463.4	3934.4	4488.6	1808.8
강연선(TON)	-	-	-	-	34.5
케이블(TON)	-	-	-	-	174.7
철근(TON)	81.2	621.4	542.3	673.6	1354.0
콘크리트(㎥)	1057.9	2900.1	3615.2	4490.4	7960.3

② 공사비 분석

(단위 : 백만원)

구 분	신형식 고가 구조물	강트러스	강아치	강상판형	강복합 ED
1. 상부공	14,197	12,336	14,355	15,296	9,388
(비 율)	(1.000)	(0.869)	(1.011)	(1.077)	(0.661)
2. 하부공	1,179	306	2,363	4,294	4,410
(비 율)	(1.000)	(0.260)	(2.004)	(3.641)	(3.739)
3. 부대공	1,717	3,049	4,538	5,270	3,612
(비 율)	(1.000)	(1.775)	(2.642)	(3.069)	(2.103)
4. 자재대	3,119	4,727	5,197	5,987	3,492
(비 율)	(1.000)	(1.515)	(1.666)	(1.920)	(1.119)
합 계	20,212	20,417	26,453	30,847	20,901
(비 율)	(1.000)	(1.010)	(1.309)	(1.526)	(1.034)
M당 공사비	50.5	51.0	66.1	77.1	52.3

③ 공사비 산출내역

(단위 : 백만원)

구 분	신형식 고가 구조물	강트러스	강아치	강상판형	강복합 ED
합 계	20,212	20,417	26,453	30,847	20,901
1. 상부공	14,197	12,336	14,355	15,296	9,388
1) 가설장비(MCE)	5,177	2,455	2,455	2,455	0
2) 강관비계	0	2,455	2,455	2,455	0
3) 강교 제작	5,725	8,658	9,836	11,221	4,522
4) 강교 운반	34	52	59	67	27
5) 강교 가설	3,145	866	984	1,122	452
6) 가설벤트	0	143	220	220	35
7) 강교 도장	89	135	172	182	63
8) 비파괴 검사	24	26	28	28	28
9) 거푸집	1	0	0	0	178
10) 철근가공조립	1	0	0	0	86
11) 콘크리트타설	0	0	0	0	75
12) 스페이셔	0	0	0	0	1
13) 콘크리트 양생	0	0	0	0	2
14) 강연선 설치 및 긴장작업	0	0	0	0	114
15) 케이블 설치 및 긴장작업	0	0	0	0	3,805
16) 아치리브 설치 및 긴장작업	0	0	602	0	
2. 하부공	1,179	306	2,363	4,294	4,410
1) 토공	5	25	20	42	51
2) 강교 제작	632	0	0	0	0
3) 강교 운반	5	0	0	0	0
4) 강교 가설	63	0	0	0	0
5) 강교 도장	12	0	0	0	0
6) 철근가공조립	0	53	53	56	127
7) 콘크리트타설	0	19	19	21	46
8) 스페이셔	0	1	0	0	1
9) 콘크리트 양생	0	0	0	0	1
10) 강재거푸집	0	78	58	60	70
11) 기초	185	131	108	142	142
12) 강관 파일공	277	2,099	2,104	3,972	3,972
3. 부대공	1,973	3,049	4,538	5,270	3,612
1) 교량받침	30	9	24	24	24
2) 신축이음장치	30	33	33	33	33
3) 안전난간설치	61	63	67	67	67
4) 보행통로	14	15	16	16	16
5) 기타 부대공	1,867	2,929	4,398	5,130	3,472
4. 자재대	3,501	4,727	5,197	5,987	3,492

*신형식 고가구조물의 경우, 특수가설장비 제작비 포함된 금액임.

다. 기존 형식 고가구조물간 공사비 비교・검토(1km 기준, 일반 경간 조건: 40m)

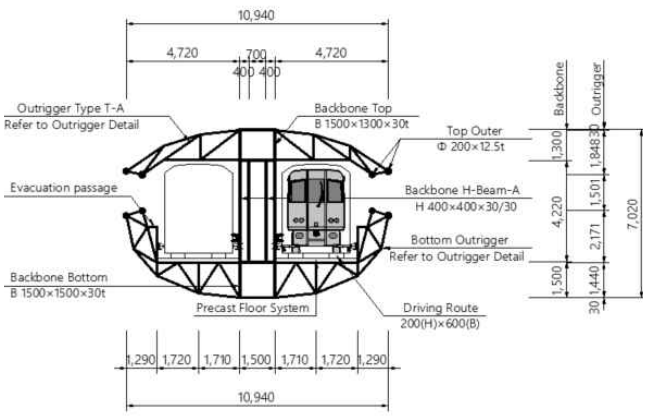
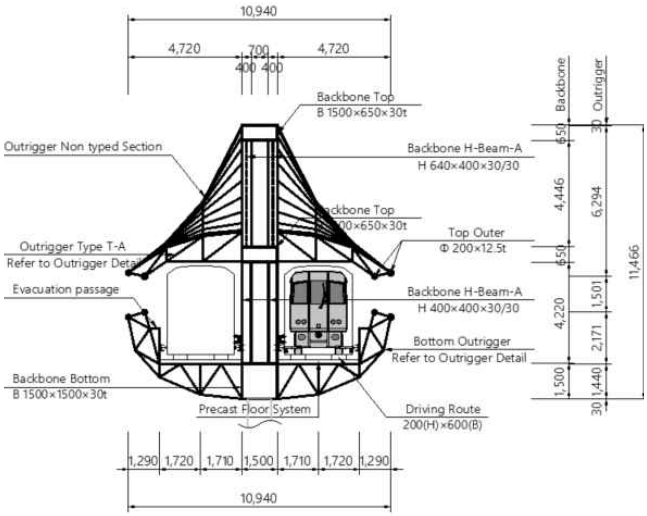
(1) 개요

구 분	신형식 고가구조물	비교 1안	비교 2안	비교 3안	비교 4안
형 식	백본+아웃리거	강합성 박스거더교	강합성 플레이트거더교	U형 PSC 하로교	PSC 박스거더교
경간구성	5@200=1,000m	2@40+7@(3@40)+2@40=1,000m			25@40=1,000m
분석 방향	신형식 고가구조 대비 비교 1-4안의 공사비 비교 분석				

(2) 검토모델

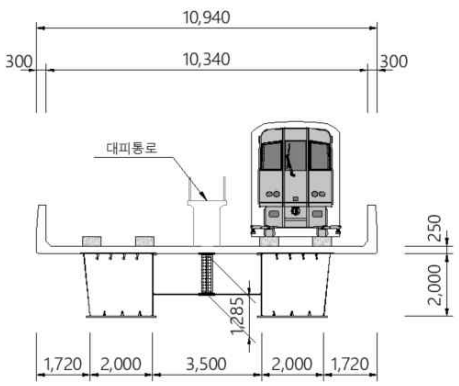
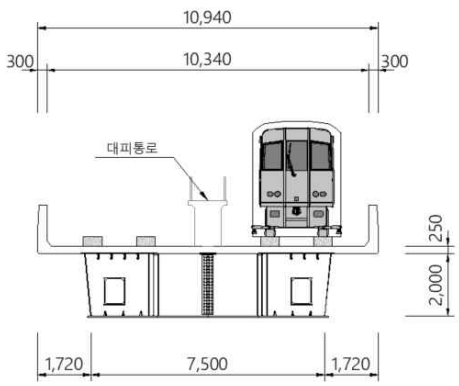
① 신형식 고가구조물(백본 + 아웃리거)

- 경간구성 : 5@200m = 1,000m

중 앙 부	지 점 부
	

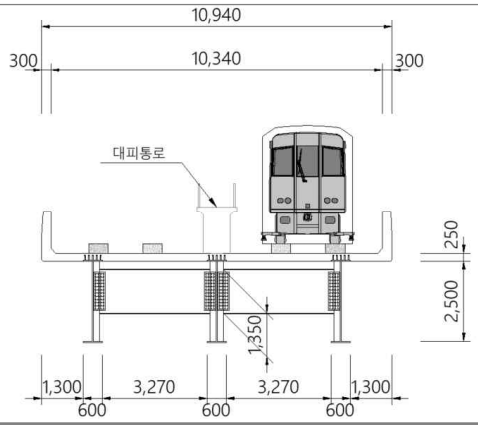
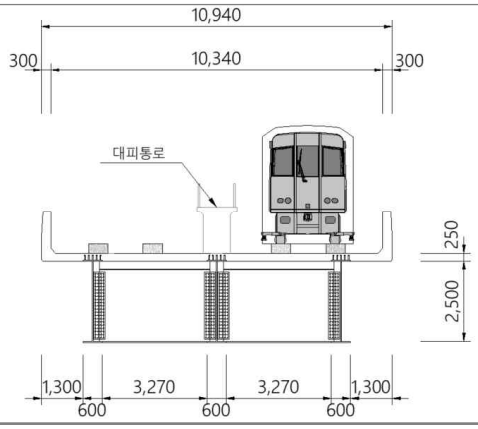
② 강합성 박스 거더교

- 경간구성 : 2@40+7@(3@40)+2@40=1,000m

중 앙 부	지 점 부
	

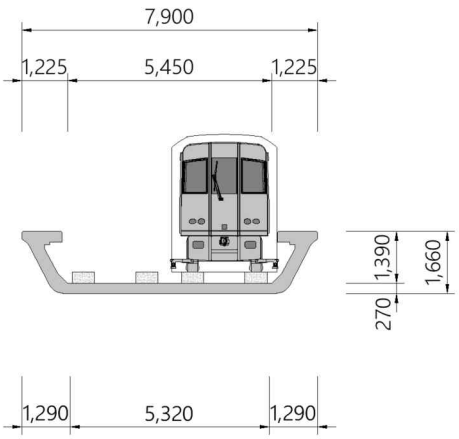
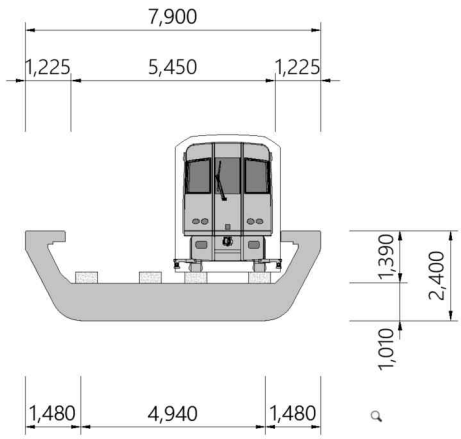
③ 강합성 플레이트 거더교

- 경간구성 : 2@40+7@(3@40)+2@40=1,000m

중 앙 부	지 점 부
	

④ U형 PSC 하로교

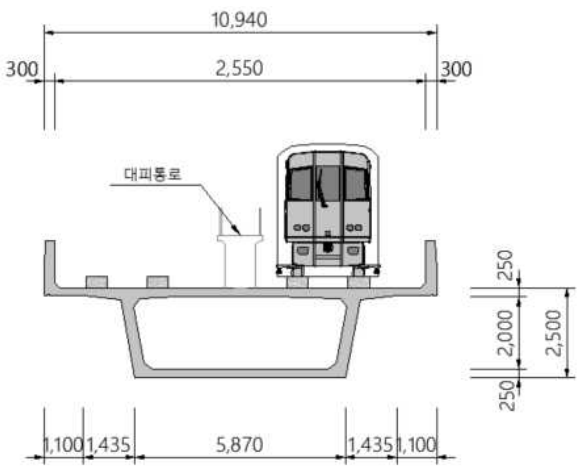
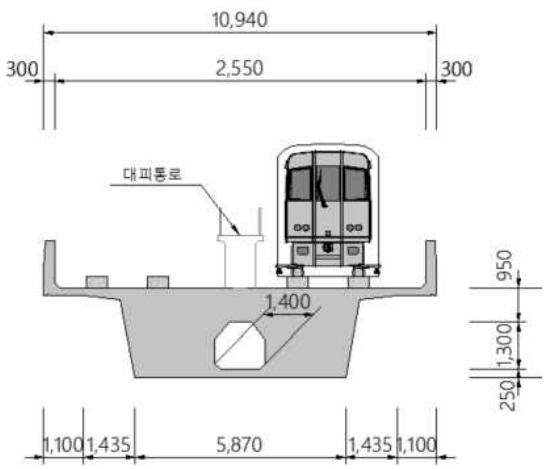
- 경간구성 : 2@40+7@(3@40)+2@40=1,000m

중 앙 부	지 점 부
	

※ U형 PSC 하로교의 폭원은 경전철에 특화하여 개발된 교량으로 폭원 조절 불가.

⑤ PSC 박스 거더교

- 경간구성 : 25@40=1,000m

중 앙 부	지 점 부
	

(3) 공사비 분석

신형식 경전철 고가구조물의 타 교량형식과의 공사비 비교 분석 결과, 일반적으로 경전철 고가구조물에 적용되고 있는 강합성박스 거더교 대비 6.9%, PSC박스 거더교 대비 13.6% 절감할 수 있는 것으로 검토되었다. 이는 일반적인 지반조건(N=12)에 준한 공사비용으로, 타 형식의 경우 신형식 고가구조물 대비 하부기초 본수가 많아 지반조건에 따라 공사비 절감 효과는 더 클 것으로 판단된다.

① 주요자재 집계 (연장 1km 기준)

구 분	신형식 고가 구조물	강합성 박스거더교	강합성 플레이트거더교	U형 PSC 하로교	PSC 박스거더교
강재(TON)	6514.1	2918.0	2773.5	-	-
강연선(TON)	-	-	-	376.6	538.7
철근(TON)	203.03	3556.3	3556.3	5702.1	6019.7
콘크리트(㎥)	2644.7	35232.6	35232.6	45252.1	56740.7

② 공사비 분석 (단위 : 백만원)

구 분	신형식 고가 구조물	강합성 박스거더교	강합성 플레이트거더교	U형 PSC 하로교	PSC 박스거더교
1. 상부공 (비 율)	28,070 (1.000)	11,940 (0.425)	11,684 (0.416)	10,247 (0.365)	14,699 (0.524)
2. 하부공 (비 율)	4,138 (1.000)	10,898 (2.634)	10,898 (2.634)	11,368 (2.747)	12,034 (2.908)
3. 부대공 (비 율)	1,523 (1.000)	2,617 (1.718)	2,591 (1.701)	3,456 (2.269)	2,792 (1.833)
4. 자재대 (비 율)	7,931 (1.000)	7,821 (0.986)	7,651 (0.965)	6,406 (0.808)	7,266 (0.916)
합 계(1+2+3+4) (비 율)	41,662 (1.000)	33,275 (0.799)	32,823 (0.788)	31,477 (0.756)	36,792 (0.883)
(1+2+3+4)의 M당 공사비	41.7	33.3	32.8	31.5	36.8
5. 도로확장 (비 율)	0	11,500 -	11,500 -	11,500 -	11,500 -
합 계(1+2+3+4+5) (비 율)	41,662 (1.000)	44,775 (1.075)	44,323 (1.064)	42,977 (1.032)	48,292 (1.159)
(1+2+3+4+5)의 M당 공사비	41.7	44.8	44.3	43.0	48.3

*신형식 고가구조물의 경우, 특수가설장비 제작비 포함된 금액임.

*하부공의 경우 일반적인 지반조건(N=12)에 준한 공사비용으로, 타 형식의 경우 신형식 고가구조물 대비 하부기초 본수가 많아 지반조건에 따라 기초공사비가 상대적으로 증가될 수 있음.

*신형식 고가구조물의 경우 하부폭원 1.0m로 도로 확장없이 차선조정 가능하나, 타 형식의 경우 하부직경 2.0m ~ 2.5m로 도로 확장 필요

*도로확장비용(토공 및 기타 기준) : 도로업무편람(2020) 도로건설단가(p.143) 참조

*상기 도로확장비용에는 용지보상비 제외된 비용임(용지보상비: 도로업무편람에는 159억/km이나, 도심지의 경우 해당 비용보다 상회 예상).

③ 공사비 산출내역

(단위 : 백만원)

구 분	신형식 고가 구조물	강합성 박스거더교	강합성 플레이트거더교	U형 PSC 하로교	PSC 박스거더교
합계	41,662	44,775	44,323	42,977	48,292
1. 상부공	28,070	11,940	11,684	10,247	14,699
1) 강교 제작	14,312	7,295	6,934	0	0
2) 강교 운반	86	44	42	0	0
3) 강교 가설(가설장비 포함)*	12,577	730	693	0	0
4) 가설벤트	0	342	342	0	0
5) 강교 도장	223	2,795	2,845	0	0
6) 비파괴 검사	60	64	64	0	0
7) 거푸집	2	82	82	2,301	3,485
8) 철근가공조립	4	17	17	360	490
9) 콘크리트타설	1	2	2	187	384
10) 스페이셔	0	1	1	18	24
11) 콘크리트 양생	0	0	0	4	8
12) 강연선 설치 및 긴장작업	0	0	0	3,106	4,873
13) 케이블 설치 및 긴장작업	0	0	0	0	0
14) 기타공(강교 용접 외)	806	569	661	0	0
15) PSC교 제작	0	0	0	1,048	1,333
16) PSC교 제작장				3,143	3,999
17) PSC교 가설				82	105
2. 하부공	4,138	10,898	10,898	11,368	12,034
1) 토공	27	88	88	82	88
2) 강재 제작	1,579	0	0	0	0
3) 강재 운반	12	0	0	0	0
4) 강교각 가설	158	0	0	0	0
5) 도장	31	0	0	0	0
6) 철근가공조립	0	94	94	88	94
7) 콘크리트타설	0	45	45	42	65
8) 스페이셔	0	0	0	0	0
9) 콘크리트 양생	0	1	1	1	1
10) 강재거푸집	0	32	32	30	32
11) 기초(가시설 포함)	926	1,070	1,070	1,143	1,070
12) 교량받침	20	44	44	276	296
13) 기초 파일공	1,385	9,524	9,524	9,706	10,387
3. 부대공	1,523	2,617	2,591	3,456	2,792
1) 신축이음장치	45	144	144	134	384
2) 안전난간설치	144	155	155	144	155
3) 보행통로	34	36	36	34	36
4) 비계공	0	732	732	684	732
5) 기타 부대공	1,300	1,550	1,524	2,460	1,485
4. 자재대	7,931	7,821	7,651	6,406	7,266
5. 도로확장	0	11,500	11,500	11,500	11,500

*신형식 고가구조물의 경우, 특수가설장비 제작비 포함된 금액으로, 상부공 가설공사비는 연장이 늘어날수록 저렴(예: 연장 1km 시공시: 12,577백만원/km, 연장 2km 시공시: 10,100백만원/km).

제3장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

1절. 목표 달성도

1. 연구개발 목표의 달성도

구분	연구목표	주요 연구내용	달성도 (%)
한계상태설계법 기반 경전철 고가구조물 설계기준	○ 경량전철 차종별 실차주행 계측시험	○ 국토부 고시 경전철 5개 차종(고무차륜형, 모노레일형, 철제차륜형, LIM형, 자기부상형)별 실차주행 계측시험 -고무차륜형: 부산4호선 -철제차륜형: 부산김해경전철 -모노레일형: 대구3호선 -LIM형: 용인에버라인 -자기부상형: 인천자기부상철도	100
	○ 경전철 고가구조물 주요 설계요소별 정량적 분석 및 기준(안) 연구	○ 열차주행안전 및 승차감 확보 위한 경전철 고가구조물 처짐한계 기준(안) 연구 -경전철 차량-고가구조물 동적시뮬레이션 해석기법 개발 -경전철 고가구조물 연직변위 기준 설정 위한 정량적 프로세스 정립 -경전철 고가구조물 연직처짐 기준안 제시	
		○ 경량전철 활하중 특성 통계 분석을 통한 활하중 기준안 제안	
		○ 경전철 고가구조물 충격계수, 차량 횡하중 및 시제동하중 기준(안) 연구 -5개 차종별 현장계측결과 분석 -5개 차종별 수치모델링 및 구조해석을 통한 현장계측치와의 비교・분석 -경전철 고가구조물 충격계수 기준안 제시 -차량 횡하중 및 시제동하중 기준안 제시	
	○ 경전철 고가구조물 신뢰성 분석을 통한 목표신뢰도지수 연구	○ 경전철 고가구조물 신뢰성 분석을 통한 목표신뢰도지수 연구 -국내외 설계기준 비교・분석을 통한 목표신뢰도지수 제안 -국내 경전철 고가구조물 신뢰성 분석을 통한 목표신뢰도지수 검증	
	○ 신뢰도 기반 경량전철 하중계수 및 저항계수 분석 연구	○ 신뢰도 기반 경량전철 하중계수 및 저항계수 분석 연구 -국내외 설계기준 비교・분석을 통한 하중계수 및 저항계수 제안 -국내 경전철 고가구조물 신뢰성 분석을 통한 하중저항계수 검증	

	○ 신뢰도 기반 경량전철 설계하중 및 하중조합 연구	○ 신뢰도 기반 경량전철 설계하중 및 하중조합 제안 -고정하중계수 및 활하중계수 제안 -국내 경전철 고가구조물 신뢰성 분석을 통한 한계상태설계법 하중조합(안) 검증	
	○ 한계상태설계법 기반의 경전철 고가구조물 설계기준(안) 작성	○ 경전철 고가구조물 설계기준 (한계상태설계법)(안) 작성 -설계일반사항, 설계하중, 설계하중조합 (한계상태설계법), 재료, 설계 등	
	○ 국내외 한계상태설계기준에 따른 설계 비교/분석을 통한 기준 검증 및 효율성 분석	○ 경전철 고가구조물 설계기준 / 기존 한계상태설계법(도로교, 철도교)/ 기존 결정론적설계법(허용응력설계법, 강도설계법)을 적용한 설계 결과 비교·검토	
도시친화형 신형식 경전철 고가구조물 설계기술	○ 국내외 도시 고가구조물 장경간화 사례 및 가설·시공 사례 조사·분석	○ 국내외 도시 고가구조물 장경간화 사례 및 가설·시공 사례 조사·분석	100
	○ 장경간 구현이 가능한 도시친화형 신형식 고가구조 개발(승객대피,탈선/폭설/소음 대비)	○ 백본-아웃리거 신형식 구조를 갖는 세계 최장경간(200m) 구현 가능한 도시친화형 신형식 고가구조물 개발 -승객대피, 탈선/폭설/소음 대비 구조 -차량·건축한계 검토 -경량 신소재를 이용한 상부구조 경량화 검토	
	○ 도시친화형 신형식 고가구조물 핵심설계요소 개발 및 설계 검증	○ 도시친화형 신형식 고가구조물 핵심설계요소 설계 검증 -신형식 고가구조물 3차원 모델링 및 구조검토 -허용처짐, 주요 부재 응력 검토 등을 통한 구조안전성 검증	
	○ 도시친화형 신형식 고가구조물 동적안전성 및 내풍안전성 검증	○ 도시친화형 신형식 고가구조물 동적안전성 검증 ○ 도시친화형 신형식 고가구조물 지진하중 및 풍하중에 대한 구조안전성 검증	
	○ 도시친화형 신형식 고가구조물 최적 설계기법 개발	○ 도시친화형 신형식 고가구조물 최적 설계기법 개발 -백본/아웃리거/하부구조의 하중 분담율 검토를 통한 최적 조합 검토 -백본·아웃리거 구조의 단면계획 및 구성에 따른 최적설계 -지점부 형식/형상에 따른 최적설계 -도심지 곡선부 및 주요 경간장 설계 -시공단계별 구조안전성 검토	

	○ 도시친화형 신형식 고가구조물 상·하부 구조 모듈화 방안 및 가설·시공계획 정립	○ 도시친화형 신형식 고가구조물 모듈화 및 연결부 검토 -상부구조 모듈화 및 연결부 검토 ・도심지 상차 운반을 위한 백본-아웃리거 분할 상세 계획 수립 ・백본-백본간 트랜짓 블록을 이용한 인장접합 볼트 연결방식 검토 ・폴딩힌지시스템과 주조된 고정힌지를 이용한 아웃리거-아웃리거간 폴딩힌지접합 연결방식 검토 ・임시 가이드를 이용한 백본-아웃리거간 볼트 연결방식 검토 -하부구조 모듈화 및 연결부 검토 ・중공강재 PC세그형 합성단면 검토 ・중공강재 콘크리트 충진 합성단면 검토 -기초부 심도 축소 및 내하력 향상을 위한 스트럿-타이 기초부 구조 검토 -하부기초의 앵커프레임을 이용한 하부구조와의 연결방식 검토 ○ 도시친화형 신형식 고가구조물 가설시공 계획 수립 -상부구조 가설시공방안 ・MCE(Modular Construction Equipment) 장비를 이용한 백본-아웃리거 일괄시공방안 ・백본-아웃리거 분리시공방안(연장이 짧은 경우) -Rolling & Lifting Up 가설공법을 이용한 하부구조 가설시공방안 -PC패널을 이용한 거푸집 일체형 하부기초 시공방안	
	○ 도시친화형 신형식 고가구조물 타당성 검토	○ 도시친화형 신형식 고가구조물 공사비 검토 -기존 형식 고가구조물간 공사비 비교 (일반 경간 조건, 경간 200m 조건)	

2. 연구성과목표 및 실적 ([별권1: 연구성과 증빙자료] 성과점검기준표 참조)

가. 질적 성과목표 및 실적 (1~3차년)

구분	질적목표	목표치	달성치	검증방법	달성도 (%)
한계상태설계법 기반 경전철 고가구조물 설계기준	경전철 하중 특성을 반영한 설계하중 기준 수립	고무차륜형 경전철 고가구조물 설계하중 기준 수립	연직처짐한계 충격하중 횡하중 시제동하중 등 설계하중 기준 제시*	경전철 고가구조물 실차주행 계측시험 및 수치해석 결과 분석을 통한 설계하중 기준 수립의 적정성 평가	100
		철제차륜형 경전철 고가구조물 설계하중 기준 수립			100
		자기부상형 경전철 고가구조물 설계하중 기준 수립			100
	경전철 고가구조물 설계하중조합 기준 수립	한계상태별 설계하중조합 기준 수립	한계상태별 설계하중조합 (하중조합 및 하중계수) 수립	목표신뢰도지수, 하중조합 및 하중·저항계수 도출분석의 적정성 평가	100
	경전철 고가구조물 설계기준 (한계상태설계법) 작성	경전철 고가구조물 설계기준 (한계상태설계법) 작성	경전철 고가구조물 설계기준 (한계상태설계법) 작성*	기존설계기준에 따른 설계 비교검증 통한 신규제안 설계기준안의 적정성 및 효율성 평가	100
도시친화형 신형식 경전철 고가구조물 설계기술	세계 최장경간(200m) 신형식 경전철 고가구조 설계	세계 최장경간 (200m) 신형식 경전철 고가구조 설계	세계 최장경간 (200m) 구현이 가능한 백본-아웃리거 신형식 경전철 고가구조 설계	신형식 경전철 고가구조물 구조해석을 통한 설계검증의 적정성 평가	100
	상부구조 경량화	20% 이상	28.4% 경량화	기존 강재박스형 상부구조 대비 중량 비교	100
	하부구조의 상부 응력·처짐 분담율	10% 이상	18.5%	구조계산서 확인	100
	상부구조의 구조 안전성	허용치 이내	처짐, 응력 등 허용치 이내 만족	구조계산서 확인	100
	신형식 고가구조물 연결구조의 적정성	연결상세, 제작효율, 성능적정	강재간, 강재-콘크리트간, 콘크리트간 연결구조	연결구조보고서 확인	100
	신형식 고가구조물의 창의성 및 우수성	도시친화적인 세계 최장경간 (200m) 신형식 경전철 고가구조	도심지 최장경간 (200m)의 백본-아웃리거 구조를 갖는 도시친화형 신형식 경전철 고가구조*	기존 고가문제 해결 가능성, 기술성, 미래지향성 등 종합검토	100
	신형식 고가구조물의 정·동적 구조 안전성	허용치 이내	응력, 처짐, 가속도, 면틀림 허용치 이내*	구조계산서 및 보고서 확인	100

	신형식 고가구조물 시공성	시공성능 우수	·MCE장비를 이용한 GFCM 상부구조 가설시공 (기존FSM공법 대비 공사비 21.9%, 공기 28% 절감, 기존 ILM 공법 대비 공사비 3.1%, 공기 30% 절감) ·Rolling&Lifting Up 공법을 이용한 하부구조 가설시공 (기존 크레인-가설벤트공법 대비 공사비 6%, 공기 16.7%절감) ·PC패널을 이용한 거푸집 일체형 하부기초 시공 (도로잠식폭 2m, 굴착심도 0.5m 축소) · 백본간 트랜짓블록 인장접합연결 (용접방식 대비 45% 원가절감) · 아웃리거간 폴딩힌지접합연결 (용접방식대비 27.5% 원가절감) · 앵커프레임을 이용한 하부구조-하부기초간 연결	도심지 정밀/급속 가설시공방안의 적정성 확인 (공기단축, 공사비, 신속정확한 연결시공방안 제시 등)	100
	신형식 고가구조물 경제성	기존 고가대비 공사비 5%이상 절감	· 강합성박스 거더교 대비 6.9% 절감 ·PSC박스 거더교 대비 13.6% 절감	km당 공사물량 및 공사비 비교 검토 (보고서 확인)	100

*3차년도 연구성과 및 상세 달성치 내용은 '[별권]연구성과 증빙자료' 성과점검기준표 참조

나. 양적 성과목표 및 실적(1~3차년)

구분		목표치	달성치	달성도(%)
논문 게재	국내	3편	4편 (3편 게재, 1편 게재확정)	133
	국외	-	-	-
	계	3편	4편	133
특허출원	국내	4건	7건	175
	국외	-	-	-
	계	4건	7건	175
특허등록	국내	-	2건	100
	국외	-	-	-
	계	-	2건	100
설계기준	경전철 고가구조물 설계기준안 (한계상태설계법)	1건	1건	100
설계기법	신형식 경전철 고가구조물 설계기법	1건	1건	100
설계도서	신형식 경전철 고가구조물 설계도서	1건	1건	100

*3차년도 연구성과 및 상세 달성치 내용은 '[별권]연구성과 증빙자료' 성과점검기준표 참조

(1) 논문(국내외 전문 학술지) 게재

번호	논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행기관	SCI여부	게재일
1	고무차륜 경전철 차량의 시제동으로 인한 교량의 하중 효과 분석	한국강구조학회논문집	채수호	Vol.32 No.2	KR	한국강구조학회	비SCI	2020.4
2	승차감을 고려한 경전철 고가구조물의 처짐 한계 제안	한국철도학회 논문집	이진호	Vol.23 No.4	KR	한국철도학회	비SCI	2020.4
3	승차감을 고려한 자기부상 가이드웨이 구조물의 처짐 한계	한국전산구조공학회 논문집	이진호	Vol.33 No.6	KR	한국전산구조공학회	비SCI	2020.12
4	고무차륜형 경전철 고가구조물의 충격계수에 관한 연구	한국도시철도학회	신정열	Vol.9 No.1	KR	한국도시철도학회	비SCI	2021.3 (예정)

(2) 지식재산권(특허, 실용신안, 의장, 디자인, 상표, 규격, 신품종, 프로그램)

번호	지식재산권 등 명칭 (건별 각각 기재)	국명	출원			등록			기여율	활용여부
			출원인	출원일	출원 번호	등록인	등록일	등록 번호		
1	나노셀 형식의 폐합단면을 갖는 고가구조물	대한민국	철도연	2018.12	10-2018-0157101	철도연	2020.12	10-2194475		
2	하이브리드 폐합단면을 갖는 고가구조물	대한민국	철도연	2018.12	10-2018-0157102	철도연	2020.12	10-2194476		
3	종방향 백본 상부구조를 갖는 상하부 일체형 고가구조물	대한민국	철도연	2019.11	10-2019-0152433	-	-	-		
4	강재와 콘크리트 구조물의 강결구조 및 강결방법	대한민국	철도연	2020.03	10-2020-0039088	-	-	-		
5	거푸집 일체화 PC패널을 이용한 하부기초 시공방법	대한민국	철도연	2020.10	10-2020-0137672	-	-	-		
6	비노출형 연결구조를 갖는 모듈형 PC교각 및 그 제작방법	대한민국	철도연	2020.10	10-2020-0137673	-	-	-		
7	스트럿 타이 보강재를 이용한 하부기초구조 및 그 시공방법	대한민국	철도연	2020.10	10-2020-0137674	-	-	-		

(3) 설계 기준/설명서(시방서)/지침/안내서에 반영

번호	구 분 (설계 기준/설명서/ 지침/안내서)	활용 구분 (신규/개선)	설계 기준/설명서/ 지침/안내서 명칭	반영일	반영 내용
1	설계기준	신규	경전철 고가구조물 설계기준 (한계상태설계법)	2021 예정	국토부, 설계기준 고시 및 지자체 시달 (예정)

2절. 관련 분야 기여도

구분	연구개발 성과	기존 국내외 기술 현황	기술의 발전 기여도
한계상태설계법 기반 경전철 고가구조물 설계기준	○경전철 차량 특성을 반영한 경전철 고가구조물 설계하중 기준 마련 ○국내외 교량설계기준(한계상태설계법) 비교분석을 통한 경전철 고가구조물의 적정 목표신뢰도지수 선정 및 설계하중조합 도출 ○경전철 고가구조물 설계기준(한계상태설계법)(안) 작성	○과학적이고 효율적인 구조물 설계를 위하여 미국 AASHTO LRFD, 유럽 Eurocode LSD 등 철도 선진국에서는 교량 설계 시 신뢰도 기반의 한계상태설계법 설계기준을 도입 ○국내에서도 도로교의 경우 2015년부터 한계상태설계법 기반의 설계기준 도입 ○2018년, 한계상태설계법 기반의 철도교 설계기준을 제정(고시예정)	○국내 최초 경전철 고가구조물 설계기준 마련 ○세계적 추세에 맞춰, 신뢰도 기반의 한계상태설계법 도입
도시친화형 신형식 경전철 고가구조물 설계기술	○도시단절・미관훼손・교통혼잡 문제 해결 가능한 세계 최장경간(200m, 도심지 기준)의 최적의 구조효율을 갖는 백본-아웃리거형의 신형식 고가구조 개발 ○도시미관을 고려하고 소음・악천후시 안전 문제 등을 해결 가능한 장경간 캐노피 방식의 도시친화형 신형식 고가구조 개발 ○세계 최장경간 경전철 고가구조물 모듈화 및 가설시공방안 수립을 통해 이를 고려한 설계 ○세계 최장경간 신형식 경전철 고가구조물 경제성 및 시공성 검증	○강 박스거더형, PSC I형/U형 거더형 등 기존 철도교 형식의 육중한 규모로 일반적으로 20~50m지간의 고가구조물 시공으로 도시단절・미관훼손 문제 야기 ○현수교, 사장교, 아치교, 트러스교 등을 통한 장경간화 기술을 확보하고 있으나, 도심지에 적용하기에는 육중한 규모와 공사비 측면에서 한계 ○도로교의 경우, 합성형 교량 및 경량재료를 활용한 교량 장경간화 추세이나, 공사비 문제로 하천, 도로 횡단 등 특수한 경우에만 적용 ○국내 주경간장이 수km에 달하는 세계 최고 수준의 초장대 도로교 기술을 확보하고 있으나, 도심지 적용은 한계	○세계 최장경간(200m, 도심지 기준) 경전철 고가구조물 설계기술 확보 ○도시단절・미관훼손・교통혼잡・소음・악천후시 열차안전 문제 등 기존 경전철 고가구조물이 야기한 모든 문제를 한꺼번에 해결 가능한 도시친화형 신형식 고가구조물 개발 ○도심지 교통혼잡을 최소화하면서 급속 정밀시공이 가능하고, 기존 고가구조물 공사비 수준 이하의 가설시공방안 수립

제4장. 연구개발성과의 활용계획

1절. 연구개발성과의 기대효과

기술적 측면에서, 경전철 고가구조물 설계에 있어 세계적 추세인 신뢰도 기반의 한계상태설계법 도입에 따른 설계기준 적용으로 철도기술의 글로벌화 및 철도교 설계기술 수준 향상 기대된다. 한편, 세계최장경간(200m급, 도심지 기준)의 도시친화형 신형식 경전철 고가구조물 기술 확보로 국내 철도기술 수준 향상 및 기술 선점을 통한 해외 기술 선도로 국가기술경쟁력도 확보할 수 있을 것으로 기대된다.

사회·경제적 측면에서는, 도시과밀화, 교통정체 가중 등의 해소를 위해 국내 지자체별로 다양한 방식의 경전철 사업을 계획 중인 가운데, 도시단절·미관훼손·교통혼잡·소음·악천후시 운행사고 등 기존 고가건설방식 경전철 문제를 단번에 해소가능할 것으로 기대되며, 국내외 20-50m 수준의 경간장을 최장경간 200m(도심지 세계최고수준) 가능으로 고가하부 개방감 제고와 함께, 기존 2-3m 수준의 하부구조(교각) 폭/직경을 최대 1.5m 수준으로 최소화하여 고가구조물로 인한 도로차선잠식 최소화를 통해 도로교통혼잡 문제 해소가 가능할 것으로 기대된다. 이를 통해, 국내 저비용·친환경 교통수단인 경전철 사업의 확충 및 원활한 추진으로 그에 따른 국가 재정부담 경감 및 대국민 도시철도 서비스 확충 기대되는데, 현재 국내 41개 노선(621.07km) 27조원 규모의 경전철 사업이 계획되어 있으며, 고가화의 경우 지하화 대비 구축비 약 400-500억원/km 절감으로, 현 계획 노선의 20%를 고가건설방식으로 전환 시 약 5-6조의 사업비 절감 및 국가재정부담 경감이 기대된다. 아울러, 그간 사업성(B/C) 부족으로 시행되지 못하고 있는 국내 경전철 사업의 활성화를 통한 일자리 창출 뿐만 아니라, 향후 해외 선도기술에 대한 엔지니어·시공 인력 양성 및 세계 인력시장 진출도 가능할 것으로 기대된다. 이렇듯, 경전철 고가구조물 설계에서의 한계상태설계법 도입과 함께 세계 최장경간 신형식 경전철 고가구조물 개발로 동남아 등 해외 경전철시장 진출 기대되어 국내 고가 경전철 사업의 원활한 추진과 해외 고가 경전철 시장 진출 등 관련 철도산업 발전도 기대할 수 있다.

2절. 연구개발성과의 활용방안

현재 도심지 과밀화로 이미 도로교통환경이 한계상태에 있고, 미래 도시인구 증가에 따른 도심지 과밀화, 환경오염 이슈가 더욱 가중되면서, 철도 중심의 환경친화적인 도시교통체계로의 전환이 가시화되고 있다. 현재 우리나라 광역시·도에서 연계 교통망 확충을 위해 41개 노선(620여 km, 27조원 규모)의 도시전철 사업을 추진 및 계획 중인데, 향후에도 도시화 및 광역도시간 연계 이동수요의 증가로 친환경 도시교통수단인 경전철의 지속 확충이 예상된다.

우선, 개발한 경전철 고가구조물 설계기준(한계상태설계법)은 21년 상반기 국토부 고시 및 지자체 시달을 통해 향후 지자체별 신규 계획 중인 고가건설방식 경전철 사업에 설계표준으로 적용되어, 보다 효율적이고 경제적인 구조물 설계가 가능해질 것으로 기대된다.

아울러, 개발한 세계 최장경간(200m급)의 도시친화형 신형식 경전철 고가구조물 설계기술은 후속 2단계 사업으로 추진 중인 “세계 최장경간(200m급) 경전철 고가구조물 실증 연구 사업”을 통해 향후 부산 하단-녹산선, 기장선 등 국내 경전철 신규사업에 신형식 고가구조물 도입 추진을 기대할 수 있다. 또한, 현재 해외건설 수주 효자지역인 동남아(베트남, 말레이시아 등)에서만 17개 노선(300여 km 규모) 경전철 사업 계획 중인데, 이러한 국내 실적을 기반으로 동남아를 중심으로 한 해외 경전철 시장 진출도 병행 추진할 수 있다. 이외, 최근 국토교통부의 신도시 교통대책 및 수도권 광역교통 개선대책으로 발표한 S-BRT(도로 위 지하철) 혹은 트램의 입체 교차로 등 고가경전철 외 일반 도로교, 보도교로도 확대 적용이 가능할 것으로 기대된다.

3절. 연구개발성과의 실용화 방안

국내 수도권을 포함한 전국 지자체별로 경전철을 중심으로 한 도시철도 시장이 형성되고 있고, 현재 광역시・도에서 연계 철도교통망 확충을 위해 41개 노선(총연장 620여 km, 약 27조원 규모)의 신규 도시철도 사업을 계획・추진 중이다. 또한, 국외에서도 동남아에서만 17개 노선(총연장 300여 km) 규모의 도시철도 사업이 추진 중에 있는 등, 향후 동남아, 중동 등을 중심으로 한 수십 조원 규모의 경전철 사업이 계획・추진될 것으로 예상된다.

국내외 경전철 사업에의 연구개발성과 실용화를 위해, 우선 세계적인 추세인 한계상태설계법에 부합되도록 마련한 경전철 고가구조물 설계기준(한계상태설계법)은 '21년 상반기 국토교통부에서의 지자체 의견수렴을 통한 최종 기준 고시 및 지자체 시달을 통해 향후 고가건설방식 경전철 사업의 실시설계시 설계표준으로 활용되도록 기술 및 고시 지원*할 계획이다.

*상세 고시지원 계획: 국토부 광역시설운영과 기준 설명 및 향후 추진일정 협의(`21.3), 지자체 의견수렴 및 보완(`21.4~`21.5), 최종 기준 고시 및 지자체 시달(`21.6)

또한, 세계 최장경간(200m)의 도시친화형 신형식 경전철 고가구조물에 대한 실용화를 위해, 본 연구에서 개발한 설계기술은 2단계 사업으로 추진 중인 "세계 최장경간(200m) 경전철 고가구조물 실증연구사업('21~'24)" 을 통해 부산 하단-녹산선 등(테스트베드 대상지, 예타 진행중)을 대상으로 테스트베드를 구축하여 시공성 및 차량주행 안전성 검증을 수행함으로써 바로 실현장에 실용화시킬 계획이다. 이를 위해, 우선 '21년 부산 하단-녹산선 기본계획 수립시부터 본 신형식 경전철 고가구조물의 테스트베드 기본계획이 반영될 수 있도록 부산시와 협의 추진할 계획이고, 테스트베드에 대한 설계 및 시공 등 구축 전반에 대하여 부산교통공사와 공동으로 추진할 계획에 있다.

향후 신형식 경전철 고가구조물의 국내 신규 경전철 사업에 확대 적용될 수 있도록, 연구개발 단계에서 혹은 연구 종료 후, 적용 대상 신규 경전철 사업에의 설계 및 기술 검토와 함께 관련 지자체 대상 홍보 활동을 적극 추진할 계획이다.

아울러, 독자적인 국내 기술을 가지고 있는 K-AGT 고무차륜형 경전철 차량기술과 제작기술을 가지고 있는 철제차륜형 경전철 차량기술, 국내 주요 지자체의 경전철시스템에 대한 건설・운영 노하우(know-how), 그리고 본 연구개발을 통해 확보될 도심지 세계 최장경간(200m)의 도시친화형 신형식 경전철 고가구조물에 대한 세계 선도기술을 발판으로 베트남, 인도네시아 등 동남아를 중심으로 활발히 추진 중인 해외 경전철 시장에의 사업화를 병행 추진할 계획이다.

[부록 1] 국내외 설계기준에 따른 경전철 고가구조물 비교설계

(1) 국내외 기존 한계상태설계법 및 결정론적설계법에 따른 경전철 고가구조물 설계

기존 설계법과 신규제안 설계법을 적용한 설계 비교 분석을 위해 적용한 국내외 기존 한계상태 설계법은 다음과 같다

① 국내 도로교 설계기준(한계상태설계법)

② 국내 철도교 설계기준(한계상태설계법)

③ AASHTO LRT 설계기준(미국 LRFD)

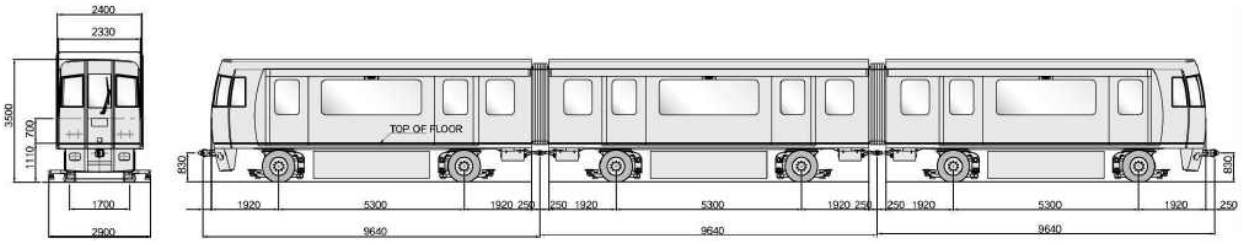
④ Eurocode (유럽 LSD)

⑤ 기존 결정론적 설계법(강도설계법, 허용응력설계법)

(가) 설계하중

경전철 차량 종류에 따른 하중은 다음과 같으며, 5가지 차량에 대해 설계를 수행하여 결과를 비교하였다.

① K-AGT(고무차륜) : 3량 1편성

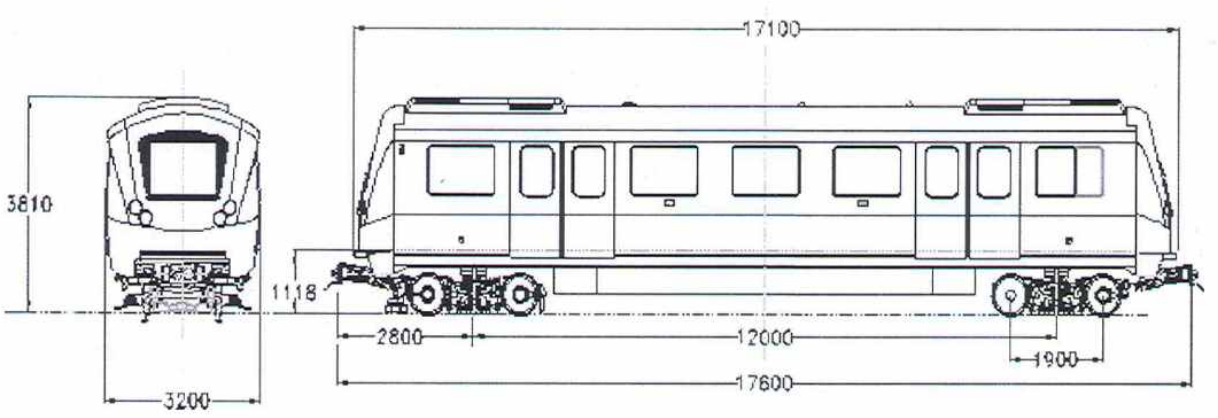


- 바퀴당 축하중 : 90kN(만차기준)
- 차량하중(만차중량) : 180kN/량
- 시동하중 : 전차하중의 10% = 1.87kN/m, 4.12kN.m/m
- 제동하중 : 전차하중의 15% = 2.80kN/m, 6.19N.m/m
- 충격계수(Im) : (1.44/(√Le -0.2))-0.18

  PSC 거더교 (L=30m) = 9.3%

  강합성 거더교 (L=40m) = 5.5%

② 용인경전철(철제차륜) : 2량 1편성



- 바퀴당 축하중 : 105kN(만차기준)
- 차량하중(만차중량) : 419kN/량

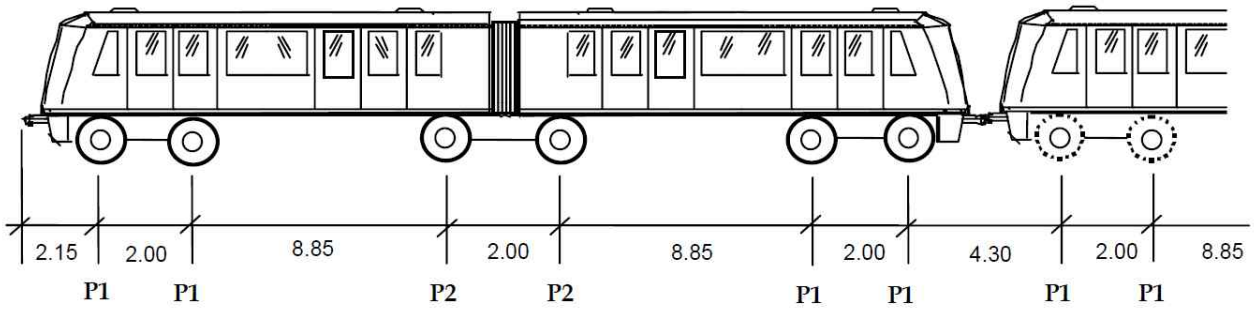
- 시동하중 : 전차하중의 10% = 2.38kN/m, 6.83kN.m/m
- 제동하중 : 전차하중의 15% = 3.57kN/m, 10.25N.m/m
- 장대레일 종하중 : 6kN/m
- 충격계수(Im) : (1.44/(√Le -0.2))-0.18

  PSC 거더교 (L=30m) = 9.3%

  강합성 거더교 (L=40m) = 5.5%

③ 김해경전철(철제차륜) : 2량 1편성

- P1 = 100 kN
- P2 = 135 kN

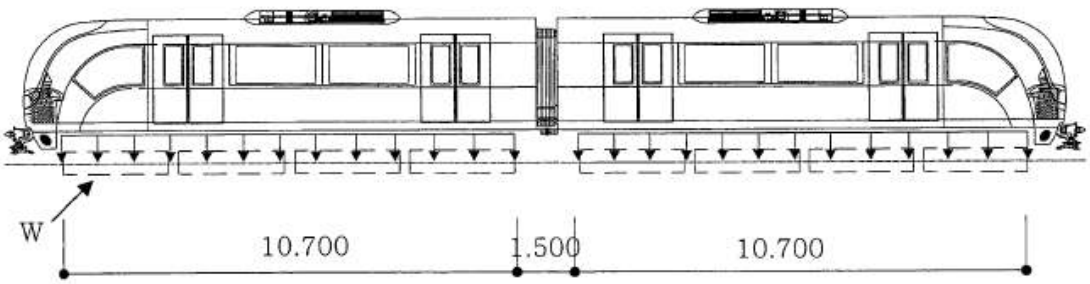


- 차량하중(만차중량) : 670kN/량
- 시동하중 : 전차하중의 10% = 2.39kN/m, 6.46kN.m/m
- 제동하중 : 전차하중의 15% = 3.59kN/m, 9.69N.m/m
- 장대레일 종하중 : 6kN/m
- 충격계수(Im) : (1.44/(√Le -0.2))-0.18

  PSC 거더교 (L=30m) = 9.3%

  강합성 거더교 (L=40m) = 5.5%

④ 자기부상열차 : 2량 1편성



가. 만차하중 : 26.000 kN/m

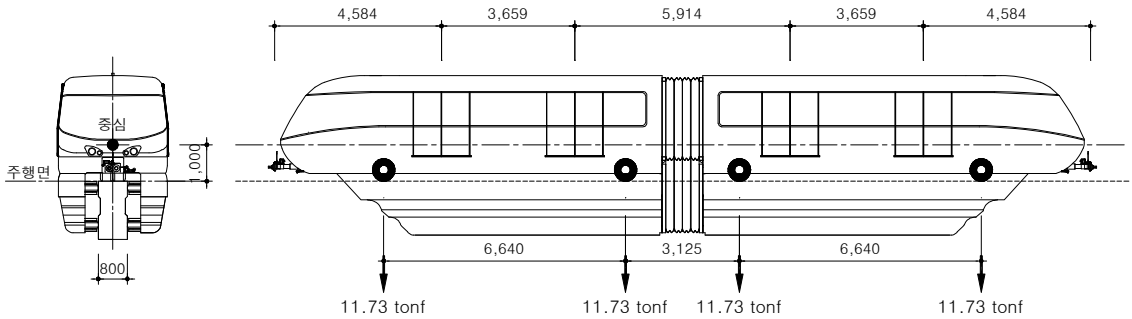
나. 공차하중 : 19.000 kN/m

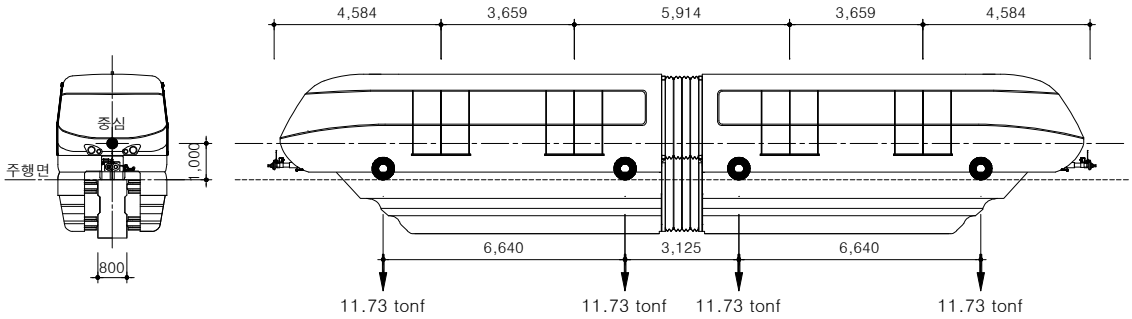
- 시동하중 : 전차하중의 10% = 2.60kN/m, 7.16kN.m/m
- 제동하중 : 전차하중의 15% = 3.90kN/m, 10.75N.m/m
- 충격계수(Im) : (1.44/(√Le -0.2))-0.18

  PSC 거더교 (L=30m) = 9.3%

  강합성 거더교 (L=40m) = 5.5%

⑤ 모노레일 : 2량 1편성





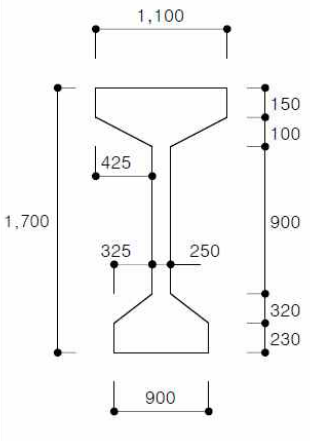
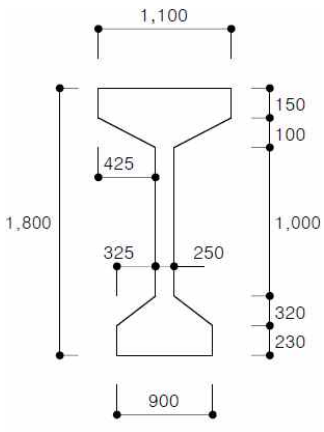
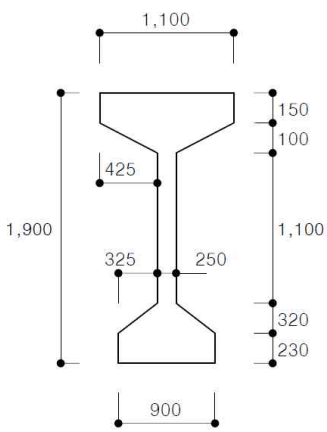
- 차량 총하중 : 46.9 tonf (2량)
- 시동하중 : 전차하중의 10% = 2.09kN/m, 2.09kN.m/m
- 제동하중 : 전차하중의 15% = 3.14kN/m, 3.14N.m/m
- 충격계수(Im) : (1.44/(√Le -0.2))-0.18

  PSC 거더교 (L=30m) = 9.3%

  강합성 거더교 (L=40m) = 5.5%

(나) PSC 거더교 설계 결과 (L=30m)

① PSC 거더 단면

TYPE-1 (H=1.7m)	TYPE-2 (H=1.8m)	TYPE-3 (H=1.9m)
		

② 국내 도로교 한계상태 설계기준

a. K-AGT(고무차륜형) (단면 : TYPE-1, H=1.70m)

ㄱ) 극한한계상태 검토

구 분	휨강도 검토			취성파괴 검토		
	Mu(kN.m)	Mr(kN.m)	판정	M(kN.m)	Md,red (kN.m)	판정
외측거더	7816.9	9247.0	O.K!	5428.9	6031.4	O.K!
내측거더	8130.0	9240.6	O.K!	5634.6	6402.3	O.K!

ㄴ) 사용한계상태 검토 (내측거더)

거더(MPa)	프리스트레스 도입 직후			사용한계상태 - I			비고
	프리 스트레스	거더 자중	계	유효프리 스트레스	작용하중	계	
상연응력	-4.430	7.081	2.651	-3.889	12.899	9.010	
하연응력	17.525	-6.520	11.005	15.385	-13.799	1.586	O.K!
응력한계	(인장) -2.6≤(계)≤19.2 (압축)			(인장) -2.6≤(계)≤24.0 (압축)			

b. 용인경전철(철제차륜) (Type 2, H=1.80m)

ㄱ) 극한한계상태 검토

구 분	휨강도 검토			취성파괴 검토		
	Mu(kN.m)	Mr(kN.m)	판정	M(kN.m)	Md,red (kN.m)	판정
외측거더	8951.4	9779.6	O.K!	6056.5	68189	O.K!
내측거더	9362.6	9773.1	O.K!	6326.1	7298.7	O.K!

ㄴ) 사용한계상태 검토 (내측거더)

거더(MPa)	프리스트레스 도입 직후			사용한계상태 - I			비고
	프리 스트레스	거더 자중	계	유효프리 스트레스	작용하중	계	
상연응력	-4.394	6.691	2.297	-3.863	12.597	8.734	
하연응력	17.103	-6.145	10.958	15.037	-13.963	1.074	O.K!
응력한계	(인장) -2.6≤(계)≤19.2 (압축)			(인장) -2.6≤(계)≤24.0 (압축)			

c. 김해경전철(철제차륜) (Type 2, H=1.80m)

ㄱ) 극한한계상태 검토

구 분	휨강도 검토			취성파괴 검토		
	Mu(kN.m)	Mr(kN.m)	판정	M(kN.m)	Md,red (kN.m)	판정
외측거더	9027.6	9779.6	O.K!	6090.4	6877.0	O.K!
내측거더	9440.0	9773.1	O.K!	6360.5	7357.3	O.K!

ㄴ) 사용한계상태 검토 (내측거더)

거더(MPa)	프리스트레스 도입 직후			사용한계상태 - I			비고
	프리 스트레스	거더 자중	계	유효프리 스트레스	작용하중	계	
상연응력	-4.394	6.691	2.297	-3.863	12.630	8.766	O.K!
하연응력	17.103	-6.145	10.958	15.037	-14.034	1.003	
응력한계	(인장) -2.6≤(계)≤19.2 (압축)			(인장) -2.6≤(계)≤24.0 (압축)			

d. 자기부상열차 (Type 1, H=1.7m)

ㄱ) 극한한계상태 검토

구 분	휨강도 검토			취성파괴 검토		
	Mu(kN.m)	Mr(kN.m)	판정	M(kN.m)	Md,red (kN.m)	판정
외측거더	8177.1	9247.0	O.K!	5589.0	6307.0	O.K!
내측거더	8495.4	9240.6	O.K!	5797.0	6680.4	O.K!

ㄴ) 사용한계상태 검토 (내측거더)

거더(MPa)	프리스트레스 도입 직후			사용한계상태 - I			비고
	프리 스트레스	거더 자중	계	유효프리 스트레스	작용하중	계	
상연응력	-4.430	7.081	2.651	-3.889	13.063	9.174	O.K!
하연응력	17.525	-6.520	11.005	15.385	-14.166	1.220	
응력한계	(인장) -2.6≤(계)≤19.2 (압축)			(인장) -2.6≤(계)≤24.0 (압축)			

e. 모노레일 (Type 1, H=1.7m)

ㄱ) 극한한계상태 검토

구 분	휨강도 검토			취성파괴 검토		
	Mu(kN.m)	Mr(kN.m)	판정	M(kN.m)	Md,red (kN.m)	판정
외측거더	8105.2	9247.0	O.K!	5557.0	6252.1	O.K!
내측거더	8422.4	9240.6	O.K!	5764.6	6624.9	O.K!

ㄴ) 사용한계상태 검토 (내측거더)

거더(MPa)	프리스트레스 도입 직후			사용한계상태 - I			비고
	프리 스트레스	거더 자중	계	유효프리 스트레스	작용하중	계	
상연응력	-4.430	7.081	2.651	-3.889	13.030	9.141	O.K!
하연응력	17.525	-6.520	11.005	15.385	-14.092	1.293	
응력한계	(인장) -2.6≤(계)≤19.2 (압축)			(인장) -2.6≤(계)≤24.0 (압축)			

③ 국내 철도교 한계상태 설계기준

a. K-AGT(고무차륜형) (단면 : TYPE-1, H=1.70m)

ㄱ) 극한한계상태 검토

구 분	휨강도 검토			취성파괴 검토		
	Mu(kN.m)	Mr(kN.m)	판정	M(kN.m)	Md,red (kN.m)	판정
외측거더	7870.1	9247.0	O.K!	5641.7	6397.4	O.K!
내측거더	8184.0	9240.6	O.K!	5850.5	6771.7	O.K!

ㄴ) 사용한계상태 검토 (내측거더)

거더(MPa)	프리스트레스 도입 직후			사용한계상태 - I			비고
	프리 스트레스	거더 자중	계	유효프리 스트레스	작용하중	계	
상연응력	-4.430	7.081	2.651	-3.889	12.899	9.010	
하연응력	17.525	-6.520	11.005	15.385	-13.799	1.586	O.K!
응력한계	(인장) -2.6≤(계)≤19.2 (압축)			(인장) -2.6≤(계)≤24.0 (압축)			

b. 용인경전철(철제차륜) (Type 2, H=1.8m)

ㄱ) 극한한계상태 검토

구 분	휨강도 검토			취성파괴 검토		
	Mu(kN.m)	Mr(kN.m)	판정	M(kN.m)	Md,red (kN.m)	판정
외측거더	9022.5	9779.6	O.K!	6340.8	7305.3	O.K!
내측거더	9434.8	9773.1	O.K!	6614.6	7789.1	O.K!

ㄴ) 사용한계상태 검토 (내측거더)

거더(MPa)	프리스트레스 도입 직후			사용한계상태 - I			비고
	프리 스트레스	거더 자중	계	유효프리 스트레스	작용하중	계	
상연응력	-4.394	6.691	2.297	-3.863	12.597	8.734	
하연응력	17.103	-6.145	10.958	15.037	-13.963	1.074	O.K!
응력한계	(인장) -2.6≤(계)≤19.2 (압축)			(인장) -2.6≤(계)≤24.0 (압축)			

c. 김해경전철(철제차륜) (Type 2, H=1.8m)

ㄱ) 극한한계상태 검토

구 분	휨강도 검토			취성파괴 검토		
	Mu(kN.m)	Mr(kN.m)	판정	M(kN.m)	Md,red (kN.m)	판정
외측거더	9100.7	9779.6	O.K!	6383.1	7377.4	O.K!
내측거더	9514.2	9773.1	O.K!	6657.5	7861.8	O.K!

ㄴ) 사용한계상태 검토 (내측거더)

거더(MPa)	프리스트레스 도입 직후			사용한계상태 - I			비고
	프리 스트레스	거더 자중	계	유효프리 스트레스	작용하중	계	
상연응력	-4.394	6.691	2.297	-3.863	12.630	8.766	O.K!
하연응력	17.103	-6.145	10.958	15.037	-14.034	1.003	
응력한계	(인장) -2.6≤(계)≤19.2 (압축)			(인장) -2.6≤(계)≤24.0 (압축)			

d. 자기부상열차 (Type 1, H=1.7m)

ㄱ) 극한한계상태 검토

구 분	휨강도 검토			취성파괴 검토		
	Mu(kN.m)	Mr(kN.m)	판정	M(kN.m)	Md,red (kN.m)	판정
외측거더	8240.3	9247.0	O.K!	5841.7	6739.8	O.K!
내측거더	8559.6	9240.6	O.K!	6953.6	7117.1	O.K!

ㄴ) 사용한계상태 검토 (내측거더)

거더(MPa)	프리스트레스 도입 직후			사용한계상태 - I			비고
	프리 스트레스	거더 자중	계	유효프리 스트레스	작용하중	계	
상연응력	-4.430	7.081	2.651	-3.889	13.063	9.174	O.K!
하연응력	17.525	-6.520	11.005	15.385	-14.166	1.220	
응력한계	(인장) -2.6≤(계)≤19.2 (압축)			(인장) -2.6≤(계)≤24.0 (압축)			

e. 모노레일 (Type 1, H=1.7m)

ㄱ) 극한한계상태 검토

구 분	휨강도 검토			취성파괴 검토		
	Mu(kN.m)	Mr(kN.m)	판정	M(kN.m)	Md,red (kN.m)	판정
외측거더	8166.4	9247.0	O.K!	5801.8	6671.6	O.K!
내측거더	8484.5	9240.6	O.K!	6913.0	7048.2	O.K!

ㄴ) 사용한계상태 검토 (내측거더)

거더(MPa)	프리스트레스 도입 직후			사용한계상태 - I			비고
	프리 스트레스	거더 자중	계	유효프리 스트레스	작용하중	계	
상연응력	-4.430	7.081	2.651	-3.889	13.030	9.141	O.K!
하연응력	17.525	-6.520	11.005	15.385	-14.092	1.293	
응력한계	(인장) -2.6≤(계)≤19.2 (압축)			(인장) -2.6≤(계)≤24.0 (압축)			

④ 국외 LRFD 설계기준 (AASHTO LRT)

a. K-AGT(고무차륜형) (단면 : TYPE-1, H=1.70m)

ㄱ) 극한한계상태 검토

구 분	휨강도 검토			취성파괴 검토		
	Mu(kN.m)	Mr(kN.m)	판정	M(kN.m)	Md,red (kN.m)	판정
외측거더	7657.3	9247.0	O.K!	5428.9	6031.4	O.K!
내측거더	7968.0	9240.6	O.K!	5634.6	6402.3	O.K!

ㄴ) 사용한계상태 검토 (내측거더)

거더(MPa)	프리스트레스 도입 직후			사용한계상태 - I			비고
	프리 스트레스	거더 자중	계	유효프리 스트레스	작용하중	계	
상연응력	-4.430	7.081	2.651	-3.889	12.899	9.010	O.K!
하연응력	17.525	-6.520	11.005	15.385	-13.799	1.586	
응력한계	(인장) -2.6≤(계)≤19.2 (압축)			(인장) -2.6≤(계)≤24.0 (압축)			

b. 용인경전철(철제차륜) (Type 2, H=1.8m)

ㄱ) 극한한계상태 검토

구 분	휨강도 검토			취성파괴 검토		
	Mu(kN.m)	Mr(kN.m)	판정	M(kN.m)	Md,red (kN.m)	판정
외측거더	8738.2	9779.6	O.K!	6056.5	6818.9	O.K!
내측거더	9146.3	9773.1	O.K!	6326.1	7298.7	O.K!

ㄴ) 사용한계상태 검토 (내측거더)

거더(MPa)	프리스트레스 도입 직후			사용한계상태 - I			비고
	프리 스트레스	거더 자중	계	유효프리 스트레스	작용하중	계	
상연응력	-4.394	6.691	2.297	-3.863	12.597	8.734	O.K!
하연응력	17.103	-6.145	10.958	15.037	-13.963	1.074	
응력한계	(인장) -2.6≤(계)≤19.2 (압축)			(인장) -2.6≤(계)≤24.0 (압축)			

c. 김해경전철(철제차륜) (Type 2, H=1.8m)

ㄱ) 극한한계상태 검토

구 분	휨강도 검토			취성파괴 검토		
	Mu(kN.m)	Mr(kN.m)	판정	M(kN.m)	Md,red (kN.m)	판정
외측거더	8808.0	9779.6	O.K!	6090.4	6877.0	O.K!
내측거더	9217.2	9773.1	O.K!	6360.5	7357.3	O.K!

ㄴ) 사용한계상태 검토 (내측거더)

거더(MPa)	프리스트레스 도입 직후			사용한계상태 - I			비고
	프리 스트레스	거더 자중	계	유효프리 스트레스	작용하중	계	
상연응력	-4.394	6.691	2.297	-3.863	12.630	8.766	O.K!
하연응력	17.103	-6.145	10.958	15.037	-14.034	1.003	
응력한계	(인장) -2.6≤(계)≤19.2 (압축)			(인장) -2.6≤(계)≤24.0 (압축)			

d. 자기부상열차 (Type 1, H=1.7m)

ㄱ) 극한한계상태 검토

구 분	휨강도 검토			취성파괴 검토		
	Mu(kN.m)	Mr(kN.m)	판정	M(kN.m)	Md,red (kN.m)	판정
외측거더	7987.5	9247.0	O.K!	5589.0	6307.0	O.K!
내측거더	8303.0	9240.6	O.K!	5797.0	6680.4	O.K!

ㄴ) 사용한계상태 검토 (내측거더)

거더(MPa)	프리스트레스 도입 직후			사용한계상태 - I			비고
	프리 스트레스	거더 자중	계	유효프리 스트레스	작용하중	계	
상연응력	-4.430	7.081	2.651	-3.889	13.063	9.174	O.K!
하연응력	17.525	-6.520	11.005	15.385	-14.166	1.220	
응력한계	(인장) -2.6≤(계)≤19.2 (압축)			(인장) -2.6≤(계)≤24.0 (압축)			

e. 모노레일 (Type 1, H=1.7m)

ㄱ) 극한한계상태 검토

구 분	휨강도 검토			취성파괴 검토		
	Mu(kN.m)	Mr(kN.m)	판정	M(kN.m)	Md,red (kN.m)	판정
외측거더	7921.6	9247.0	O.K!	5557.0	6252.1	O.K!
내측거더	8236.1	9240.6	O.K!	5764.6	6624.9	O.K!

ㄴ) 사용한계상태 검토 (내측거더)

거더(MPa)	프리스트레스 도입 직후			사용한계상태 - I			비고
	프리 스트레스	거더 자중	계	유효프리 스트레스	작용하중	계	
상연응력	-4.430	7.081	2.651	-3.889	13.030	9.141	O.K!
하연응력	17.525	-6.520	11.005	15.385	-14.092	1.293	
응력한계	(인장) -2.6≤(계)≤19.2 (압축)			(인장) -2.6≤(계)≤24.0 (압축)			

⑤ 국외 LSD 설계기준 (Euro Code)

a. K-AGT(고무차륜형) (단면 : TYPE-1, H=1.70m)

ㄱ) 극한한계상태 검토

구 분	휨강도 검토			취성파괴 검토		
	Mu(kN.m)	Mr(kN.m)	판정	M(kN.m)	Md,red (kN.m)	판정
외측거더	7775.8	9247.0	O.K!	5641.7	6397.4	O.K!
내측거더	8060.2	9240.6	O.K!	5850.5	6771.7	O.K!

ㄴ) 사용한계상태 검토 (내측거더)

거더(MPa)	프리스트레스 도입 직후			사용한계상태 - I			비고
	프리 스트레스	거더 자중	계	유효프리 스트레스	작용하중	계	
상연응력	-4.430	7.081	2.651	-3.889	12.899	9.010	O.K!
하연응력	17.525	-6.520	11.005	15.385	-13.799	1.586	
응력한계	(인장) -2.6≤(계)≤19.2 (압축)			(인장) -2.6≤(계)≤24.0 (압축)			

b. 용인경전철(철제차륜) (Type 3, H=1.9m)

ㄱ) 극한한계상태 검토

구 분	휨강도 검토			취성파괴 검토		
	Mu(kN.m)	Mr(kN.m)	판정	M(kN.m)	Md,red (kN.m)	판정
외측거더	8888.3	10312.1	O.K!	6426.0	7156.8	O.K!
내측거더	9265.8	10305.6	O.K!	6703.3	7652.3	O.K!

ㄴ) 사용한계상태 검토 (내측거더)

거더(MPa)	프리스트레스 도입 직후			사용한계상태 - I			비고
	프리 스트레스	거더 자중	계	유효프리 스트레스	작용하중	계	
상연응력	-4.361	6.348	1.987	-3.824	11.851	8.028	O.K!
하연응력	16.709	-5.818	10.891	14.650	-13.045	1.605	
응력한계	(인장) -2.6≤(계)≤19.2 (압축)			(인장) -2.6≤(계)≤24.0 (압축)			

c. 김해경전철(철제차륜) (Type 3, H=1.9m)

ㄱ) 극한한계상태 검토

구 분	휨강도 검토			취성파괴 검토		
	Mu(kN.m)	Mr(kN.m)	판정	M(kN.m)	Md,red (kN.m)	판정
외측거더	8951.7	10312.1	O.K!	6468.3	7229.6	O.K!
내측거더	9330.3	10305.6	O.K!	6746.3	7725.8	O.K!

ㄴ) 사용한계상태 검토 (내측거더)

거더(MPa)	프리스트레스 도입 직후			사용한계상태 - I			비고
	프리 스트레스	거더 자중	계	유효프리 스트레스	작용하중	계	
상연응력	-4.361	6.348	1.987	-3.824	11.883	8.059	O.K!
하연응력	16.709	-5.818	10.891	14.650	-13.111	1.539	
응력한계	(인장) -2.6≤(계)≤19.2 (압축)			(인장) -2.6≤(계)≤24.0 (압축)			

d. 자기부상열차 (Type 1, H=1.7m)

ㄱ) 극한한계상태 검토

구 분	휨강도 검토			취성파괴 검토		
	Mu(kN.m)	Mr(kN.m)	판정	M(kN.m)	Md,red (kN.m)	판정
외측거더	8075.9	9247.0	O.K!	5841.7	6739.8	O.K!
내측거더	8364.7	9240.6	O.K!	6053.6	7117.1	O.K!

ㄴ) 사용한계상태 검토 (내측거더)

거더(MPa)	프리스트레스 도입 직후			사용한계상태 - I			비고
	프리 스트레스	거더 자중	계	유효프리 스트레스	작용하중	계	
상연응력	-4.430	7.081	2.651	-3.889	13.063	9.174	O.K!
하연응력	17.525	-6.520	11.005	15.385	-14.166	1.220	
응력한계	(인장) -2.6≤(계)≤19.2 (압축)			(인장) -2.6≤(계)≤24.0 (압축)			

e. 모노레일 (Type 1, H=1.7m)

ㄱ) 극한한계상태 검토

구 분	휨강도 검토			취성파괴 검토		
	Mu(kN.m)	Mr(kN.m)	판정	M(kN.m)	Md,red (kN.m)	판정
외측거더	8016.0	9247.0	O.K!	5801.8	6671.6	O.K!
내측거더	8303.8	9240.6	O.K!	6013.0	7048.2	O.K!

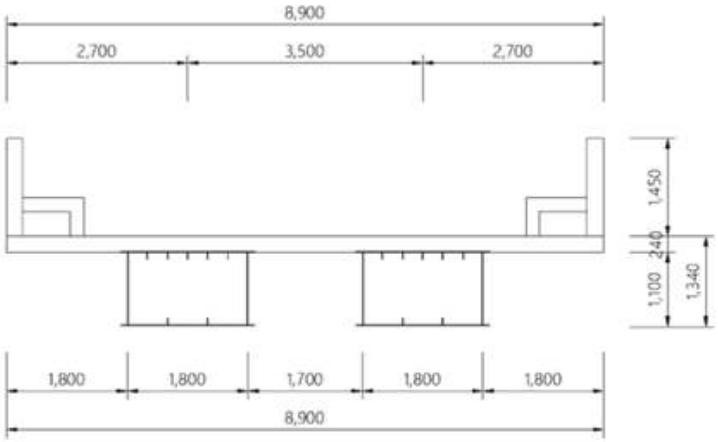
ㄴ) 사용한계상태 검토 (내측거더)

거더(MPa)	프리스트레스 도입 직후			사용한계상태 - I			비고
	프리 스트레스	거더 자중	계	유효프리 스트레스	작용하중	계	
상연응력	-4.430	7.081	2.651	-3.889	13.030	9.141	O.K!
하연응력	17.525	-6.520	11.005	15.385	-14.092	1.293	
응력한계	(인장) -2.6≤(계)≤19.2 (압축)			(인장) -2.6≤(계)≤24.0 (압축)			

(라) ST. BOX 거더교 설계 결과 (L=40m)

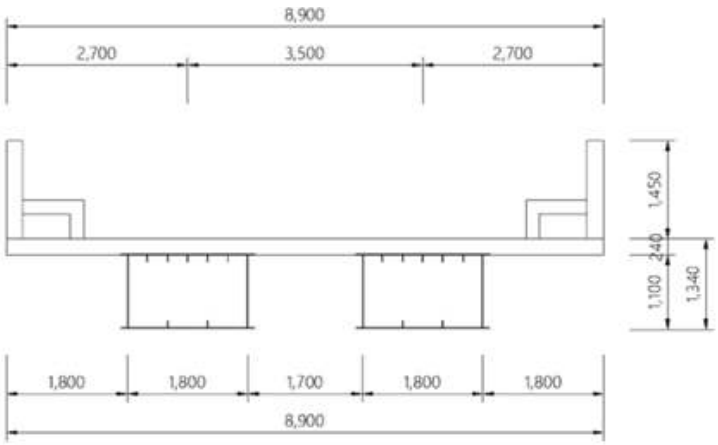
① ST. BOX 거더 단면

TYPE-1 (K-AGT, 자기부상, 모노레일)



- 거 더 간 격 : 3.500 m
- 교 량 폭 원 : B = 8.90m
- 바닥판 두께 : 0.240 m
- 캔틸레버 길이 : 1.800 m (G1)
  : 1.800 m (G2)
- 상하판/웹 두께 : 12.0mm

TYPE-2 (용인경전철(철제), 김해경전철(철제))



- 거 더 간 격 : 3.500 m
- 교 량 폭 원 : B = 8.90m
- 바닥판 두께 : 0.240 m
- 캔틸레버 길이 : 1.800 m (G1)
  : 1.800 m (G2)
- 상하판/웹 두께 : 14.0mm

② 국내 도로교 한계상태 설계기준

a. K-AGT(고무차륜형)

ㄱ) 극한한계상태(I) 검토

응력(MPa)	작용응력	응력한계	안전율	비고
상연응력	257.3	380.0	1.48	O.K!
하연응력	350.7	380.0	1.08	

ㄴ) 사용한계상태(I) 검토

응력(MPa)	작용응력	응력한계	안전율	비고
Fc	202.5	380.0	1.88	O.K!

b. 용인경전철(철제차륜)

ㄱ) 극한한계상태(Ⅰ) 검토

응력(MPa)	작용응력	응력한계	안전율	비고
상연응력	235.2	380.0	1.62	O.K!
하연응력	336.6	380.0	1.13	

ㄴ) 사용한계상태(Ⅰ) 검토

응력(MPa)	작용응력	응력한계	안전율	비고
Fc	183.3	380.0	2.07	O.K!

c. 김해경전철(철제차륜)

ㄱ) 극한한계상태(Ⅰ) 검토

응력(MPa)	작용응력	응력한계	안전율	비고
상연응력	235.6	380.0	1.61	O.K!
하연응력	339.7	380.0	1.12	

ㄴ) 사용한계상태(Ⅰ) 검토

응력(MPa)	작용응력	응력한계	안전율	비고
Fc	183.6	380.0	2.07	O.K!

d. 자기부상열차

ㄱ) 극한한계상태(Ⅰ) 검토

응력(MPa)	작용응력	응력한계	안전율	비고
상연응력	258.1	380.0	1.47	O.K!
하연응력	357.9	380.0	1.06	

ㄴ) 사용한계상태(Ⅰ) 검토

응력(MPa)	작용응력	응력한계	안전율	비고
Fc	202.9	380.0	1.87	O.K!

e. 모노레일

ㄱ) 극한한계상태(Ⅰ) 검토

응력(MPa)	작용응력	응력한계	안전율	비고
상연응력	257.6	380.0	1.48	O.K!
하연응력	353.4	380.0	1.08	

ㄴ) 사용한계상태(Ⅰ) 검토

응력(MPa)	작용응력	응력한계	안전율	비고
Fc	202.7	380.0	1.87	O.K!

③ 국내 철도교 한계상태 설계기준

a. K-AGT(고무차륜형)

ㄱ) 극한한계상태(Ⅰ) 검토

응력(MPa)	작용응력	응력한계	안전율	비고
상연응력	257.5	380.0	1.48	O.K!
하연응력	352.3	380.0	1.08	

ㄴ) 사용한계상태(Ⅰ) 검토

응력(MPa)	작용응력	응력한계	안전율	비고
Fc	202.9	380.0	1.87	O.K!

b. 용인경전철(철제차륜)

ㄱ) 극한한계상태(Ⅰ) 검토

응력(MPa)	작용응력	응력한계	안전율	비고
상연응력	235.4	380.0	1.61	
하연응력	338.6	380.0	1.12	

ㄴ) 사용한계상태(Ⅰ) 검토

응력(MPa)	작용응력	응력한계	안전율	비고
Fc	184.4	380.0	2.06	

c. 김해경전철(철제차륜)

ㄱ) 극한한계상태(Ⅰ) 검토

응력(MPa)	작용응력	응력한계	안전율	비고
상연응력	235.9	380.0	1.61	
하연응력	341.7	380.0	1.11	

ㄴ) 사용한계상태(Ⅰ) 검토

응력(MPa)	작용응력	응력한계	안전율	비고
Fc	184.7	380.0	2.06	

d. 자기부상열차

ㄱ) 극한한계상태(Ⅰ) 검토

응력(MPa)	작용응력	응력한계	안전율	비고
상연응력	258.3	380.0	1.47	
하연응력	359.7	380.0	1.06	

ㄴ) 사용한계상태(Ⅰ) 검토

응력(MPa)	작용응력	응력한계	안전율	비고
Fc	203.5	380.0	1.87	

e. 모노레일

ㄱ) 극한한계상태(Ⅰ) 검토

응력(MPa)	작용응력	응력한계	안전율	비고
상연응력	257.8	380.0	1.47	
하연응력	355.1	380.0	1.07	

ㄴ) 사용한계상태(Ⅰ) 검토

응력(MPa)	작용응력	응력한계	안전율	비고
Fc	203.1	380.0	1.87	

④ 국외 LRFD 설계기준 (AASHTO LRT)

a. K-AGT(고무차륜형)

ㄱ) 극한한계상태(Ⅰ) 검토

응력(MPa)	작용응력	응력한계	안전율	비고
상연응력	256.8	380.0	1.48	
하연응력	345.8	380.0	1.10	

ㄴ) 사용한계상태(Ⅰ) 검토

응력(MPa)	작용응력	응력한계	안전율	비고
Fc	202.5	380.0	1.88	

b. 용인경전철(철제차륜)

ㄱ) 극한한계상태(Ⅰ) 검토

응력(MPa)	작용응력	응력한계	안전율	비고
상연응력	234.4	380.0	1.62	
하연응력	330.7	380.0	1.15	

ㄴ) 사용한계상태(I) 검토

응력(MPa)	작용응력	응력한계	안전율	비고
Fc	183.3	380.0	2.07	

c. 김해경전철(철제차륜)

ㄱ) 극한한계상태(I) 검토

응력(MPa)	작용응력	응력한계	안전율	비고
상연응력	234.8	380.0	1.62	
하연응력	333.5	380.0	1.14	

ㄴ) 사용한계상태(I) 검토

응력(MPa)	작용응력	응력한계	안전율	비고
Fc	183.6	380.0	2.07	

d. 자기부상열차

ㄱ) 극한한계상태(I) 검토

응력(MPa)	작용응력	응력한계	안전율	비고
상연응력	257.5	380.0	1.48	
하연응력	352.5	380.0	1.08	

ㄴ) 사용한계상태(I) 검토

응력(MPa)	작용응력	응력한계	안전율	비고
Fc	202.9	380.0	1.87	

e. 모노레일

ㄱ) 극한한계상태(I) 검토

응력(MPa)	작용응력	응력한계	안전율	비고
상연응력	257.1	380.0	1.48	O.K!
하연응력	348.4	380.0	1.08	

ㄴ) 사용한계상태(I) 검토

응력(MPa)	작용응력	응력한계	안전율	비고
Fc	202.7	380.0	1.87	O.K!

⑤ 국외 LSD 설계기준 (Euro Code)

a. K-AGT(고무차륜형)

ㄱ) 극한한계상태(Ⅰ) 검토

응력(MPa)	작용응력	응력한계	안전율	비고
상연응력	274.2	380.0	1.39	O.K!
하연응력	360.3	380.0	1.05	

ㄴ) 사용한계상태(Ⅰ) 검토

응력(MPa)	작용응력	응력한계	안전율	비고
Fc	202.9	380.0	1.87	O.K!

b. 용인경전철(철제차륜)

ㄱ) 극한한계상태(Ⅰ) 검토

응력(MPa)	작용응력	응력한계	안전율	비고
상연응력	249.5	380.0	1.52	O.K!
하연응력	346.8	380.0	1.10	

ㄴ) 사용한계상태(Ⅰ) 검토

응력(MPa)	작용응력	응력한계	안전율	비고
Fc	184.4	380.0	2.06	O.K!

c. 김해경전철(철제차륜)

ㄱ) 극한한계상태(Ⅰ) 검토

응력(MPa)	작용응력	응력한계	안전율	비고
상연응력	249.9	380.0	1.52	O.K!
하연응력	349.2	380.0	1.09	

ㄴ) 사용한계상태(Ⅰ) 검토

응력(MPa)	작용응력	응력한계	안전율	비고
Fc	184.7	380.0	2.06	O.K!

d. 자기부상열차

ㄱ) 극한한계상태(Ⅰ) 검토

응력(MPa)	작용응력	응력한계	안전율	비고
상연응력	275.0	380.0	1.38	O.K!
하연응력	368.1	380.0	1.03	

ㄴ) 사용한계상태(Ⅰ) 검토

응력(MPa)	작용응력	응력한계	안전율	비고
Fc	203.5	380.0	1.87	O.K!

e. 모노레일

ㄱ) 극한한계상태(I) 검토

응력(MPa)	작용응력	응력한계	안전율	비고
상연응력	274.5	380.0	1.38	O.K!
하연응력	363.1	380.0	1.05	

ㄴ) 사용한계상태(I) 검토

응력(MPa)	작용응력	응력한계	안전율	비고
Fc	203.1	380.0	1.87	O.K!

(2) 신규 제안 한계상태 설계법에 따른 경전철 고가구조물 설계

(가) PSC 거더교 설계 결과 (L=30m)

① K-AGT(고무차륜형) (단면 : TYPE-1, H=1.70m)

ㄱ) 극한한계상태 검토

구 분	휨강도 검토			취성파괴 검토		
	Mu(kN.m)	Mr(kN.m)	판정	M(kN.m)	Md,red (kN.m)	판정
외측거더	7657.3	9247.0	O.K!	5641.7	6397.4	O.K!
내측거더	7968.0	9240.6	O.K!	5850.5	6771.7	O.K!

ㄴ) 사용한계상태 검토 (내측거더)

거더(MPa)	프리스트레스 도입 직후			사용한계상태 - I			비고
	프리 스트레스	거더 자중	계	유효프리 스트레스	작용하중	계	
상연응력	-4.430	7.081	2.651	-3.889	12.899	9.010	O.K!
하연응력	17.525	-6.520	11.005	15.385	-13.799	1.586	
응력한계	(인장) -2.6≤(계)≤19.2 (압축)			(인장) -2.6≤(계)≤24.0 (압축)			

② 용인경전철(철제차륜) (Type 2, H=1.8m)

ㄱ) 극한한계상태 검토

구 분	휨강도 검토			취성파괴 검토		
	Mu(kN.m)	Mr(kN.m)	판정	M(kN.m)	Md,red (kN.m)	판정
외측거더	8738.2	9779.6	O.K!	6340.8	7305.3	O.K!
내측거더	9146.3	9773.1	O.K!	6614.6	7789.1	O.K!

ㄴ) 사용한계상태 검토 (내측거더)

거더(MPa)	프리스트레스 도입 직후			사용한계상태 - I			비고
	프리 스트레스	거더 자중	계	유효프리 스트레스	작용하중	계	
상연응력	-4.394	6.691	2.297	-3.863	12.597	8.734	O.K!
하연응력	17.103	-6.145	10.958	15.037	-13.963	1.074	
응력한계	(인장) -2.6≤(계)≤19.2 (압축)			(인장) -2.6≤(계)≤24.0 (압축)			

③ 김해경전철(철제차륜) (Type 2, H=1.8m)

ㄱ) 극한한계상태 검토

구 분	휨강도 검토			취성파괴 검토		
	Mu(kN.m)	Mr(kN.m)	판정	M(kN.m)	Md,red (kN.m)	판정
외측거더	8808.0	9779.6	O.K!	6383.1	7377.4	O.K!
내측거더	9217.2	9773.1	O.K!	6657.5	7861.8	O.K!

ㄴ) 사용한계상태 검토 (내측거더)

거더(MPa)	프리스트레스 도입 직후			사용한계상태 - I			비고
	프리 스트레스	거더 자중	계	유효프리 스트레스	작용하중	계	
상연응력	-4.394	6.691	2.297	-3.863	12.630	8.766	O.K!
하연응력	17.103	-6.145	10.958	15.037	-14.034	1.003	
응력한계	(인장) -2.6≤(계)≤19.2 (압축)			(인장) -2.6≤(계)≤24.0 (압축)			

④ 자기부상열차 (Type 1, H=1.7m)

ㄱ) 극한한계상태 검토

구 분	휨강도 검토			취성파괴 검토		
	Mu(kN.m)	Mr(kN.m)	판정	M(kN.m)	Md,red (kN.m)	판정
외측거더	7987.5	9247.0	O.K!	5841.7	6739.8	O.K!
내측거더	8303.0	9240.6	O.K!	6053.6	7117.1	O.K!

ㄴ) 사용한계상태 검토 (내측거더)

거더(MPa)	프리스트레스 도입 직후			사용한계상태 - Ⅰ			비고
	프리 스트레스	거더 자중	계	유효프리 스트레스	작용하중	계	
상연응력	-4.430	7.081	2.651	-3.889	13.063	9.174	O.K!
하연응력	17.525	-6.520	11.005	15.385	-14.166	1.220	
응력한계	(인장) -2.6≤(계)≤19.2 (압축)			(인장) -2.6≤(계)≤24.0 (압축)			

⑤ 모노레일 (Type 1, H=1.7m)

ㄱ) 극한한계상태 검토

구 분	휨강도 검토			취성파괴 검토		
	Mu(kN.m)	Mr(kN.m)	판정	M(kN.m)	Md,red (kN.m)	판정
외측거더	7921.6	9247.0	O.K!	5801.8	6671.6	O.K!
내측거더	8236.1	9240.6	O.K!	6913.0	7048.2	O.K!

ㄴ) 사용한계상태 검토 (내측거더)

거더(MPa)	프리스트레스 도입 직후			사용한계상태 - Ⅰ			비고
	프리 스트레스	거더 자중	계	유효프리 스트레스	작용하중	계	
상연응력	-4.430	7.081	2.651	-3.889	13.030	9.141	O.K!
하연응력	17.525	-6.520	11.005	15.385	-14.092	1.293	
응력한계	(인장) -2.6≤(계)≤19.2 (압축)			(인장) -2.6≤(계)≤24.0 (압축)			

(나) ST. BOX 거더교 설계 결과 (L=40m)

① K-AGT(고무차륜형)

ㄱ) 극한한계상태(Ⅰ) 검토

응력(MPa)	작용응력	응력한계	안전율	비고
상연응력	256.8	380.0	1.48	O.K!
하연응력	350.7	380.0	1.08	

ㄴ) 사용한계상태(Ⅰ) 검토

응력(MPa)	작용응력	응력한계	안전율	비고
Fc	202.9	380.0	1.87	O.K!

b. 용인경전철(철제차륜)

ㄱ) 극한한계상태(Ⅰ) 검토

응력(MPa)	작용응력	응력한계	안전율	비고
상연응력	234.4	380.0	1.62	O.K!
하연응력	330.7	380.0	1.15	

ㄴ) 사용한계상태(I) 검토

응력(MPa)	작용응력	응력한계	안전율	비고
Fc	184.4	380.0	2.06	O.K!

c. 김해경전철(철제차륜)

ㄱ) 극한한계상태(I) 검토

응력(MPa)	작용응력	응력한계	안전율	비고
상연응력	234.8	380.0	1.62	O.K!
하연응력	333.5	380.0	1.14	

ㄴ) 사용한계상태(I) 검토

응력(MPa)	작용응력	응력한계	안전율	비고
Fc	184.7	380.0	2.06	O.K!

d. 자기부상열차

ㄱ) 극한한계상태(I) 검토

응력(MPa)	작용응력	응력한계	안전율	비고
상연응력	257.5	380.0	1.48	O.K!
하연응력	352.5	380.0	1.08	

ㄴ) 사용한계상태(I) 검토

응력(MPa)	작용응력	응력한계	안전율	비고
Fc	203.5	380.0	1.87	O.K!

e. 모노레일

ㄱ) 극한한계상태(I) 검토

응력(MPa)	작용응력	응력한계	안전율	비고
상연응력	257.1	380.0	1.48	O.K!
하연응력	348.4	380.0	1.09	

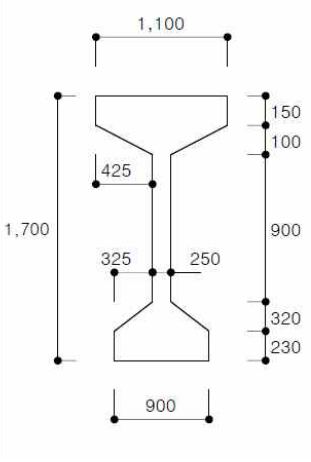
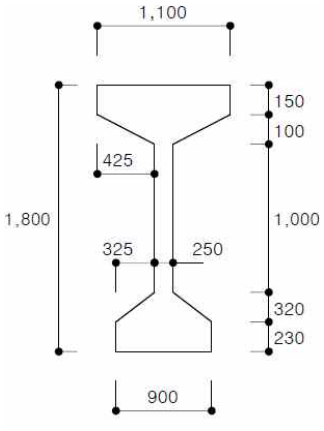
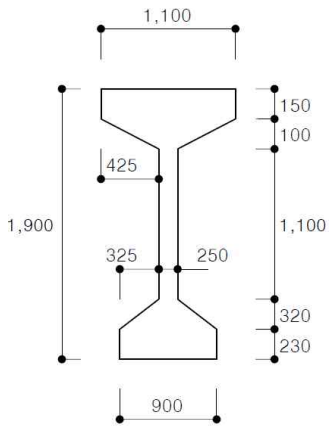
ㄴ) 사용한계상태(I) 검토

응력(MPa)	작용응력	응력한계	안전율	비고
Fc	203.1	380.0	1.87	O.K!

(3) 설계 비교 및 분석

(가) PSC 거더교 (L=30m)

① 거더 단면 비교

TYPE-1 (H=1.7m)	TYPE-2 (H=1.8m)	TYPE-3 (H=1.9m)
		
거더 높이 : 1.70m 단면적 : 0.85㎡	거더 높이 : 1.80m 단면적 : 0.87㎡	거더 높이 : 1.90m 단면적 : 0.90㎡

② 강도 검토 비교

a. K-AGT(고무차륜형)

구 분	Mu(kN.m)	ΦMn(kN.m)	안전율	단면높이(m)
국내 도로교	8130.0	9240.6	1.14	H=1.70m
국내 철도교	8184.0	9240.6	1.13	H=1.70m
국외 LRFD	7968.0	9240.6	1.16	H=1.70m
국외 LSD	8060.2	9240.6	1.15	H=1.70m
신규 제안	7968.0	9240.6	1.16	H=1.70m

국내외 기존 설계법과 신규제안 설계법을 적용한 단면의 거더 높이는 1.70m 이며, 극한모멘트는 국내도로교 기준 8130.0(kN.m), 국내철도교 기준 8184.0(kN.m), 국외 LRFD 7968.0(kN.m), 국외 LSD 8060.2(kN.m), 신규제안 설계법 7968.0(kN.m)이다. 이때 설계안전율은 각각 1.14, 1.13, 1.16, 1.15, 1.16으로 나타났다. 신규제안 설계법과 국외 LRFD기준은 고정하중 및 활하중에 대한 하중계수과 동일하여 동일한 안전율을 나타냈으며 국내 도로교, 국내 철도교, 국외 LSD에 비해 미소하나 큰 안전율을 확보하는 것으로 나타났다. 이는 활하중에 대한 하중계수가 국내 도로교 및 국내 철도교 설계기준에 비해 신규제안 설계기준에서 감소하였으나 (도로교 설계기준 1.80, 철도교 설계기준, 1.85, 신규제안 설계기준 1.65) 하중계수 변화 크기가 작고 경전철 특성상 전체하중에서 활하중이 차지하는 비율이 작아 설계안전율의 변화가 크지 않았으며, 단면 변화도 없는 것으로 검토되었다.

b. 용인경전철(철제차륜)

구 분	Mu(kN.m)	ΦMn(kN.m)	안전율	단면높이(m)
국내 도로교	9362.6	9773.1	1.04	H=1.80m
국내 철도교	9434.8	9773.1	1.04	H=1.80m
국외 LRFD	9146.3	9773.1	1.07	H=1.80m
국외 LSD	9265.8	10305.6	1.11	H=1.90m
신규 제안	9146.3	9773.1	1.07	H=1.80m

국내외 기존 설계법과 신규제안 설계법을 적용한 단면의 거더 높이는 국외 LSD기준에서는 1.90m 이며 그 외 설계기준 적용시에는 1.80m이다. 극한모멘트는 국내도로교 기준 9362.6(kN.m), 국내철도교 기준 9434.8(kN.m), 국외 LRFD 9146.3(kN.m), 국외 LSD 9265.8(kN.m), 신규제안 설계법 9146.3(kN.m)이다. 이때 설계안전율은 각각 1.04, 1.04, 1.07, 1.11, 1.07으로 나타났다. 신규제안 설계법과 국외 LRFD기준은 고정하중 및 활하중에 대한 하중계수과 동일하여 동일한 안전율을 나타냈으며 국내 도로교, 국내 철도교에 비해 미소하나 큰 안전율을 확보하는 것으로 나타났다. 이는 활하중에 대한 하중계수가 국내 도로교 및 국내 철도교 설계기준에 비해 신규제안 설계기준에서 감소하였으나 (도로교 설계기준 1.80, 철도교 설계기준, 1.85, 신규제안 설계기준 1.65) 하중계수 변화 크기가 작고 경전철 특성상 전체하중에서 활하중이 차지하는 비율이 작아 설계안전율의 변화가 크지 않았으며, 단면 변화도 없는 것으로 검토되었다. 국외 LSD설계시 안전율은 1.11로 타 설계기준 보다 높게 나타났으며 이때 단면 높이는 1.90m로 고정하중에 대한 하중계수가 타 설계기준보다 높고 경전철 특성상 고정하중이 타하중에 비해 전체하중에서 차지하는 비율이 크기 때문에 단면이 증가하였기 때문인것으로 판단된다.

c. 김해경전철(철제차륜)

구 분	Mu(kN.m)	ΦMn(kN.m)	안전율	단면높이(m)
국내 도로교	9440.0	9773.1	1.04	H=1.80m
국내 철도교	9514.2	9773.1	1.03	H=1.80m
국외 LRFD	9217.2	9773.1	1.06	H=1.80m
국외 LSD	9330.3	10305.6	1.10	H=1.90m
신규 제안	9217.2	9773.1	1.06	H=1.80m

국내외 기존 설계법과 신규제안 설계법을 적용한 단면의 거더 높이는 국외 LSD기준에서는 1.90m 이며 그 외 설계기준 적용시에는 1.80m이다. 극한모멘트는 국내도로교 기준 9440.0(kN.m), 국내철도교 기준 9514.2(kN.m), 국외 LRFD 9217.2(kN.m), 국외 LSD 9330.3(kN.m), 신규제안 설계법 9217.2(kN.m)이다. 이때 설계안전율은 각각 1.04, 1.03, 1.06, 1.10, 1.06으로 나타났다. 신규제안 설계법과 국외 LRFD기준은 고정하중 및 활하중에 대한 하중계수과 동일하여 동일한 안전율을 나타냈으며 국내 도로교, 국내 철도교에 비해 미소하나 큰 안전율을 확보하는 것으로 나타났다. 이는 활하중에 대한 하중계수가 국내 도로교 및 국내 철도교 설계기준에 비해 신규제안 설계기준에서 감소하였으나 (도로교 설계기준 1.80, 철도교 설계기준, 1.85, 신규제안 설계기준 1.65) 하중계수 변화 크기가 작고 경전철 특성상 전체하중에서 활하중이 차지하는 비율이 작아 설계안전율의 변화가 크지 않았으며, 단면 변화도 없는 것으로 검토되었다. 국외 LSD설계시 안전율은 1.11로 타 설계기준 보다 높게 나타났으며 이때 단면 높이는 1.90m로 고정하중에 대한 하중계수가 타 설계기준보다 높고 경전철 특성상 고정하중이 타하중에 비해 전체하중에서 차지하는 비율이 크기 때문에 단면이 증가하였기 때문인것으로 판단된다.

d. 자기부상열차

구 분	Mu(kN.m)	ΦMn(kN.m)	안전율	단면높이(m)
국내 도로교	8495.4	9240.6	1.09	H=1.70m
국내 철도교	8559.6	9240.6	1.08	H=1.70m
국외 LRFD	8303.0	9240.6	1.11	H=1.70m
국외 LSD	8364.7	9240.6	1.10	H=1.70m
신규 제안	8303.0	9240.6	1.11	H=1.70m

국내외 기존 설계법과 신규제안 설계법을 적용한 단면의 거더 높이는 1.70m 이며, 극한모멘트는 국내도로교 기준 8495.4(kN.m), 국내철도교 기준 8559.6(kN.m), 국외 LRFD 8303.0(kN.m), 국외 LSD 8364.7(kN.m), 신규제안 설계법 8303.0(kN.m)이다. 이때 설계안전율은 각각 1.09, 1.08, 1.11, 1.10, 1.11로 나타났다. 신규제안 설계법과 국외 LRFD기준은 고정하중 및 활하중에 대한 하중계수과 동일하여 동일한 안전율을 나타냈으며 국내 도로교, 국내 철도교, 국외 LSD에 비해 미소하나 큰 안전율을 확보하는 것으로 나타났다. 이는 활하중에 대한 하중계수가 국내 도로교 및 국내 철도교 설계기준에 비해 신규제안 설계기준에서 감소하였으나 (도로교 설계기준 1.80, 철도교 설계기준, 1.85, 신규제안 설계기준 1.65) 하중계수 변화 크기가 작고 경전철 특성상 전체하중에서 활하중이 차지하는 비율이 작아 설계안전율의 변화가 크지 않았으며, 단면 변화도 없는 것으로 검토되었다.

e. 모노레일

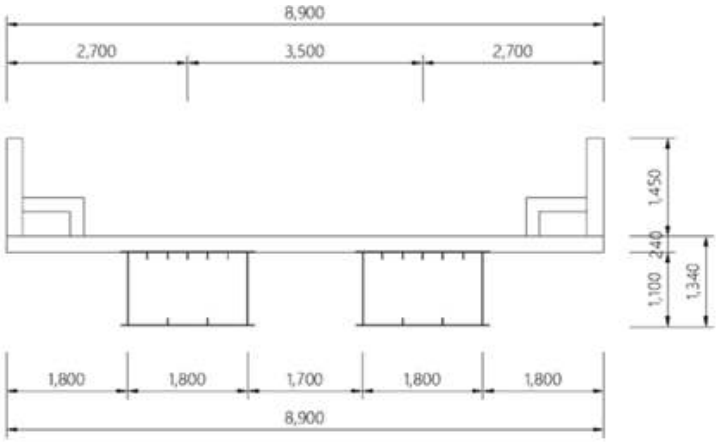
구 분	Mu(kN.m)	ΦMn(kN.m)	안전율	단면높이(m)
국내 도로교	8422.4	9240.6	1.10	H=1.70m
국내 철도교	8484.5	9240.6	1.09	H=1.70m
국외 LRFD	8236.1	9240.6	1.12	H=1.70m
국외 LSD	8303.8	9240.6	1.11	H=1.70m
신규 제안	8236.1	9240.6	1.12	H=1.70m

국내외 기존 설계법과 신규제안 설계법을 적용한 단면의 거더 높이는 1.70m 이며, 극한모멘트는 국내도로교 기준 8422.4(kN.m), 국내철도교 기준 8484.5(kN.m), 국외 LRFD 8236.1(kN.m), 국외 LSD 8303.8(kN.m), 신규제안 설계법 8236.1(kN.m)이다. 이때 설계안전율은 각각 1.10, 1.09, 1.12, 1.11, 1.12로 나타났다. 신규제안 설계법과 국외 LRFD기준은 고정하중 및 활하중에 대한 하중계수과 동일하여 동일한 안전율을 나타냈으며 국내 도로교, 국내 철도교, 국외 LSD에 비해 미소하나 큰 안전율을 확보하는 것으로 나타났다. 이는 활하중에 대한 하중계수가 국내 도로교 및 국내 철도교 설계기준에 비해 신규제안 설계기준에서 감소하였으나 (도로교 설계기준 1.80, 철도교 설계기준, 1.85, 신규제안 설계기준 1.65) 하중계수 변화 크기가 작고 경전철 특성상 전체하중에서 활하중이 차지하는 비율이 작아 설계안전율의 변화가 크지 않았으며, 단면 변화도 없는 것으로 검토되었다.

(나) ST. BOX 거더교 (L=40m)

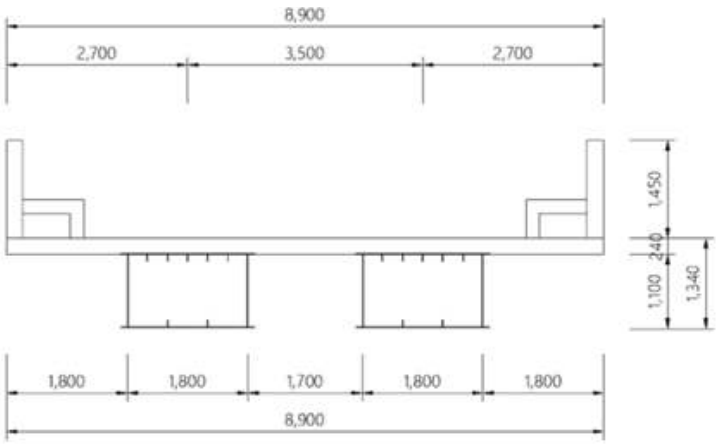
① 거더 단면 비교

TYPE-1 (K-AGT, 자기부상, 모노레일)



- 거 더 간 격 : 3.500 m
- 교 량 폭 원 : B = 8.90m
- 바닥판 두께 : 0.240 m
- 캔틸레버 길이 : 1.800 m (G1)
  : 1.800 m (G2)
- 상하판/웹 두께 : 12.0mm

TYPE-2 (용인경전철(철제), 김해경전철(철제))



- 거 더 간 격 : 3.500 m
- 교 량 폭 원 : B = 8.90m
- 바닥판 두께 : 0.240 m
- 캔틸레버 길이 : 1.800 m (G1)
  : 1.800 m (G2)
- 상하판/웹 두께 : 14.0mm

② 응력 검토 비교

a. K-AGT(고무차륜형)

응력(MPa)	작용응력	응력한계	안전율	비 고
국내 도로교	350.7	380.0	1.08	하연응력
국내 철도교	352.3	380.0	1.08	
국외 LRFD	345.8	380.0	1.10	
국외 LSD	360.3	380.0	1.05	
신규 제안	345.8	380.0	1.10	

국내외 기존 설계법과 신규제안 설계법을 적용한 단면 설계 결과, 작용응력(하연응력)은 국내도로교 기준 350.7(MPa), 국내철도교 기준 352.3(MPa), 국외 LRFD 345.8(MPa), 국외 LSD 360.3(MPa), 신규제안 설계법 345.8(MPa)이다. 이때 설계안전율은 각각 1.08, 1.08, 1.10, 1.05, 1.10으로 나타났다.

신규제안 설계법과 국외 LRFD기준은 고정하중 및 활하중에 대한 하중계수과 동일하여 동일한 안전율을 나타냈으며 국내 도로교, 국내 철도교, 국외 LSD에 비해 미소하나 큰 안전율을 확보하는 것으로 나타났다. 이는 활하중에 대한 하중계수가 국내 도로교 및 국내 철도교 설계기준에 비해 신규제안 설계기준에서 감소하였으나 (도로교 설계기준 1.80, 철도교 설계기준, 1.85, 신규제안 설계기준 1.65) 하중계수 변화 크기가 작고 경전철 특성상 전체하중에서 활하중이 차지하는 비율이 작아 설계안전율의 변화가 크지 않았으며, 단면 변화도 없는 것으로 검토되었다.

b. 용인경전철(철제차륜)

응력(MPa)	작용응력	응력한계	안전율	비 고
국내 도로교	336.6	380.0	1.13	하연응력
국내 철도교	338.6	380.0	1.12	
국외 LRFD	330.7	380.0	1.15	
국외 LSD	346.8	380.0	1.10	
신규 제안	330.7	380.0	1.15	

국내외 기존 설계법과 신규제안 설계법을 적용한 단면 설계 결과, 작용응력(하연응력)은 국내도로교 기준 336.6(MPa), 국내철도교 기준 338.6(MPa), 국외 LRFD 330.7(MPa), 국외 LSD 346.8(MPa), 신규제안 설계법 330.7(MPa)이다. 이때 설계안전율은 각각 1.13, 1.12, 1.15, 1.10, 1.15로 나타났다. 신규제안 설계법과 국외 LRFD기준은 고정하중 및 활하중에 대한 하중계수과 동일하여 동일한 안전율을 나타냈으며 국내 도로교, 국내 철도교, 국외 LSD에 비해 미소하나 큰 안전율을 확보하는 것으로 나타났다. 이는 활하중에 대한 하중계수가 국내 도로교 및 국내 철도교 설계기준에 비해 신규제안 설계기준에서 감소하였으나 (도로교 설계기준 1.80, 철도교 설계기준, 1.85, 신규제안 설계기준 1.65) 하중계수 변화 크기가 작고 경전철 특성상 전체하중에서 활하중이 차지하는 비율이 작아 설계안전율의 변화가 크지 않았으며, 단면 변화도 없는 것으로 검토되었다.

c. 김해경전철(철제차륜)

응력(MPa)	작용응력	응력한계	안전율	비 고
국내 도로교	339.7	380.0	1.12	하연응력
국내 철도교	341.7	380.0	1.11	
국외 LRFD	333.5	380.0	1.14	
국외 LSD	349.2	380.0	1.09	
신규 제안	333.5	380.0	1.14	

국내외 기존 설계법과 신규제안 설계법을 적용한 단면 설계 결과, 작용응력(하연응력)은 국내도로교 기준 339.7(MPa), 국내철도교 기준 341.7(MPa), 국외 LRFD 333.5(MPa), 국외 LSD 349.2(MPa), 신규제안 설계법 333.5(MPa)이다. 이때 설계안전율은 각각 1.12, 1.11, 1.14, 1.09, 1.14로 나타났다. 신규제안 설계법과 국외 LRFD기준은 고정하중 및 활하중에 대한 하중계수과 동일하여 동일한 안전율을 나타냈으며 국내 도로교, 국내 철도교, 국외 LSD에 비해 미소하나 큰 안전율을 확보하는 것으로 나타났다. 이는 활하중에 대한 하중계수가 국내 도로교 및 국내 철도교 설계기준에 비해 신규제안 설계기준에서 감소하였으나 (도로교 설계기준 1.80, 철도교 설계기준, 1.85, 신규제안 설계기준 1.65) 하중계수 변화 크기가 작고 경전철 특성상 전체하중에서 활하중이 차지하는 비율이 작아 설계안전율의 변화가 크지 않았으며, 단면 변화도 없는 것으로 검토되었다.

d. 자기부상열차

응력(MPa)	작용응력	응력한계	안전율	비 고
국내 도로교	357.9	380.0	1.06	하연응력
국내 철도교	359.7	380.0	1.06	
국외 LRFD	352.5	380.0	1.08	
국외 LSD	368.1	380.0	1.03	
신규 제안	352.5	380.0	1.08	

국내외 기존 설계법과 신규제안 설계법을 적용한 단면 설계 결과, 작용응력(하연응력)은 국내도로교 기준 357.9(MPa), 국내철도교 기준 359.7(MPa), 국외 LRFD 352.5(MPa), 국외 LSD 368.1(MPa), 신규제안 설계법 352.5(MPa)이다. 이때 설계안전율은 각각 1.06, 1.06, 1.08, 1.03, 1.08로 나타났다. 신규제안 설계법과 국외 LRFD기준은 고정하중 및 활하중에 대한 하중계수과 동일하여 동일한 안전율을 나타냈으며 국내 도로교, 국내 철도교, 국외 LSD에 비해 미소하나 큰 안전율을 확보하는 것으로 나타났다. 이는 활하중에 대한 하중계수가 국내 도로교 및 국내 철도교 설계기준에 비해 신규제안 설계기준에서 감소하였으나 (도로교 설계기준 1.80, 철도교 설계기준, 1.85, 신규제안 설계기준 1.65) 하중계수 변화 크기가 작고 경전철 특성상 전체하중에서 활하중이 차지하는 비율이 작아 설계안전율의 변화가 크지 않았으며, 단면 변화도 없는 것으로 검토되었다.

e. 모노레일

응력(MPa)	작용응력	응력한계	안전율	비 고
국내 도로교	353.4	380.0	1.08	하연응력
국내 철도교	355.1	380.0	1.07	
국외 LRFD	348.4	380.0	1.08	
국외 LSD	363.1	380.0	1.05	
신규 제안	348.4	380.0	1.08	

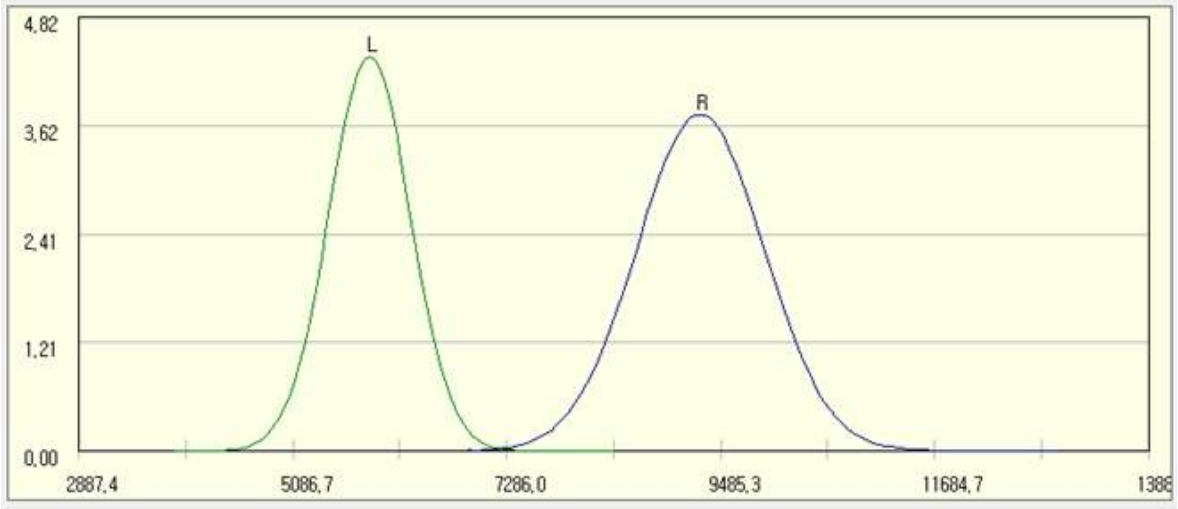
국내외 기존 설계법과 신규제안 설계법을 적용한 단면 설계 결과, 작용응력(하연응력)은 국내도로교 기준 353.4(MPa), 국내철도교 기준 355.1(MPa), 국외 LRFD 348.4(MPa), 국외 LSD 363.1(MPa), 신규제안 설계법 348.4(MPa)이다. 이때 설계안전율은 각각 1.08, 1.07, 1.08, 1.05, 1.08로 나타났다. 신규제안 설계법과 국외 LRFD기준은 고정하중 및 활하중에 대한 하중계수과 동일하여 동일한 안전율을 나타냈으며 국내 도로교, 국내 철도교, 국외 LSD에 비해 미소하나 큰 안전율을 확보하는 것으로 나타났다. 이는 활하중에 대한 하중계수가 국내 도로교 및 국내 철도교 설계기준에 비해 신규제안 설계기준에서 감소하였으나 (도로교 설계기준 1.80, 철도교 설계기준, 1.85, 신규제안 설계기준 1.65) 하중계수 변화 크기가 작고 경전철 특성상 전체하중에서 활하중이 차지하는 비율이 작아 설계안전율의 변화가 크지 않았으며, 단면 변화도 없는 것으로 검토되었다.

(다) 신뢰도지수 검토

① PSC 거더 (30m)

- 신규제안설계법 적용 설계단면의 파괴확률 및 신뢰도 지수

파괴확률(Pf) = 4.00e-6, 신뢰도지수(β) = 4.47



<K-AGT차량)

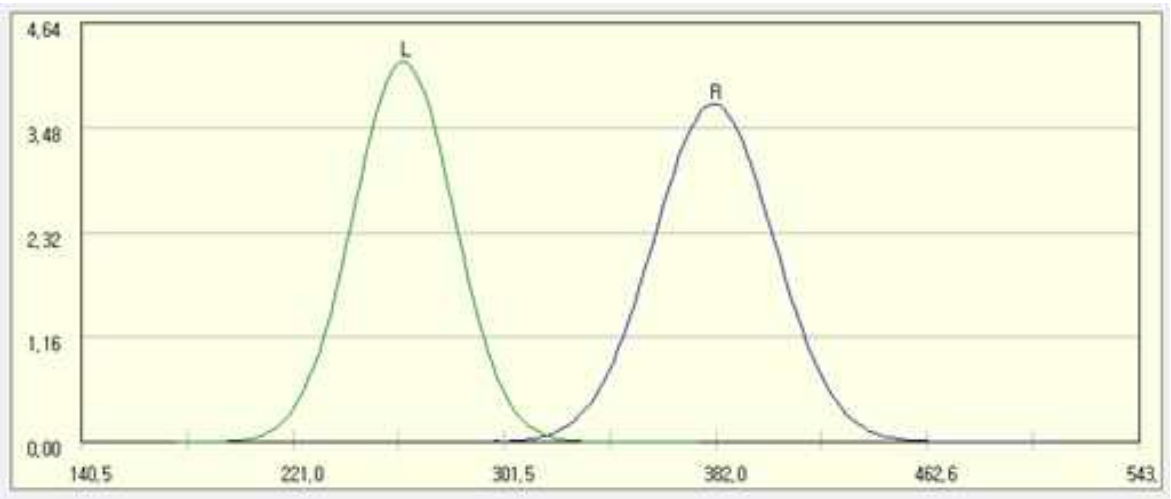
구 분	파괴확률	신뢰도지수
K-AGT(고무차륜형)	4.00e-6	4.47
김해경전철(철제차륜형)	9.10e-5	3.74
용인경전철(철제차륜형)	8.80e-5	3.75
모노레일	1.92e-5	4.12
자기부상열차	2.50e-5	4.05

신규제안 설계법을 적용한 PSC거더(30m) 단면의 설계차종별 신뢰도 지수는 3,74~4.47로 나타났으며, 목표신뢰도 지수 3.7 이상을 만족하는 것으로 검토되었다.

② ST. BOX 거더 (40m)

- 신규제안설계법 적용 설계단면의 파괴확률 및 신뢰도 지수

파괴확률(Pf) = 3.80e-5, 신뢰도지수(β) = 3.96



<K-AGT차량)

구 분	파괴확률	신뢰도지수
K-AGT(고무차륜형)	3.80e-5	3.96
김해경전철(철제차륜형)	6.00e-6	4.38
용인경전철(철제차륜형)	3.00e-6	4.53
모노레일	4.70e-5	3.91
자기부상열차	8.60e-5	3.76

신규제안 설계법을 적용한 ST. BOX거더(40m) 단면의 설계차종별 신뢰도 지수는 3.76~4.53으로 나타났으며, 목표신뢰도 지수 3.7 이상을 만족하는 것으로 검토되었다.

(라) 소결

지간 30m PSC 거더교, 지간 40m ST.BOX 거더교에 대해 기존 국내외 한계상태설계법(도로교 설계기준, 철도교 설계기준(안)), 국외 LRFD 설계기준(AASHTO LRT), 국외 LSD 설계기준(Euro Code)), 신규 제안 한계상태설계법을 적용한 설계 결과를 검토 분석하였다.

지간 30m PSC 거더는 극한모멘트의 설계안전율을 동일 수준으로 하여 단면을 선정하였으며, 지간 40m ST.BOX 거더는 극한한계상태에서 발생하는 거더 하연의 응력을 동일 수준으로 하여 최적단면을 선정하였다.

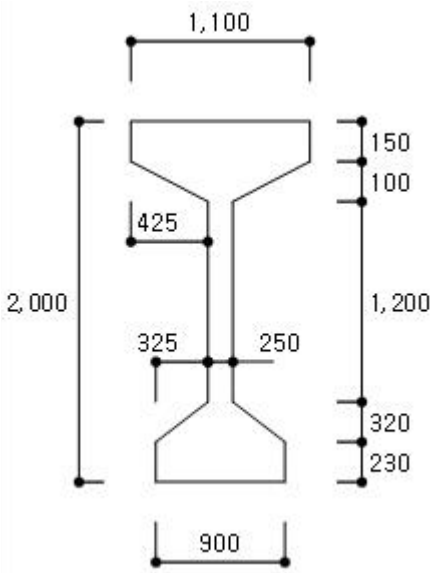
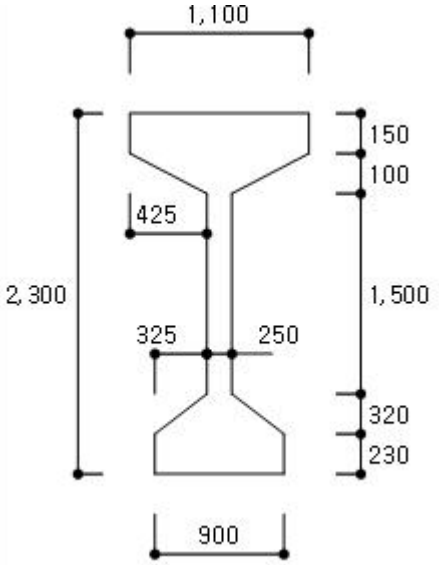
신규 제안한 경전철 고가구조물 설계기준(한계상태설계법)은 기존 국내외 한계상태설계과 동일한 수준의 파괴확률(10^{-4})을 갖도록 목표신뢰도지수(3.7)를 설정하였고, 기존 국내 한계상태설계법과의 하중조합 및 하중계수의 가장 큰 차이는 극한한계상태-Ⅰ에서 활하중에 대한 하중계수가 도로교 설계기준 대비 1.80에서 1.65로, 철도교 설계기준 대비 1.85에서 1.65로 감소한 부분인데, 하중계수 변화 크기가 작고 경전철 특성상 전체하중에서 활하중이 차지하는 비율이 작은 관계로, 기존 국내외 한계상태설계법과의 강도 검토(PSC거더교) 및 응력 검토(강박스 거더교) 결과 설계 안전율은 미미하나 신규제안 한계상태설계법이 다소 안전측으로 나타났고, 유럽 Eurocdoe (LSD) 제외한 모든 설계기준별 설계결과 차종별 동일한 단면으로 설계되었다. 유럽 Eurocdoe(LSD) 설계기준 적용시에는 고정하중에 대한 하중계수가 타 설계기준에 비해 크고 전체하중에서 고정하중이 차지하는 부분이 상당이 큰 경전철 교량 특성으로, PSC 거더의 경우 철제차륜형(용인경전철, 김해경전철)에서 단면이 상대적으로 큰 것으로 나타났다.

이상에서와 같이, 설계하중 기준을 동일하게 적용하는 경우 신규 제안 한계상태설계법과 기존 국내외 한계상태설계법에 따른 단면 설계 비교시 유사한 설계결과가 나와, 본 신규 제안한 경전철 고가구조물 설계기준(한계상태설계법)이 적정하고 합리적인 설계기준이라 판단된다.

신규 제안한 경전철 고가구조물 설계기준(한계상태설계법)을 적용한 PSC 거더교(경간장: 30m) 및 강박스 거더교(경간장: 40m)의 신뢰도지수는 차종에 따라 각각 4.05~4.47, 3.76~4.53으로 목표신뢰도 지수 3.7을 모두 만족하는 것으로 나타났다.

(4) 기존 결정론적 설계법 (허용응력설계법, 강도설계법)에 따른 고가구조물 설계

(가) PSC 거더교 설계 단면 (L=30m)

TYPE-1 (H=2.0m)	TYPE-2 (H=2.3m)
	

(나) PSC 거더교 설계 결과 (L=30m)

① K-AGT(고무차륜형) (단면 : TYPE-1, H=2.0m)

ㄱ) 극한강도 검토

구 분	휨강도 검토			균열하중		
	Mu(kN.m)	ΦMn(kN.m)	판정	Mcr(kN.m)	ΦMn(kN.m)	판정
외측거더	10,358.00	11,994.07	1.16 O.K!	9,581.98	11,994.07	1.25>1.20 O.K!
내측거더	10,735.00	11,987.87	1.12 O.K!	9,567.73	11,987.87	1.25>1.20 O.K!

ㄴ) 하중단계별 응력 검토

하중단계	외측거더(MPa)		내측거더		
	상연응력	하연응력	상연응력	하연응력	
초기긴장 단계	3.12	6.75	3.12	6.75	
	O.K	O.K	O.K	O.K	
바닥판타설 단계	6.73	2.68	6.80	2.64	
	O.K	O.K	O.K	O.K	
2차고정하중 단계	7.24	1.63	7.45	1.34	
	O.K	O.K	O.K	O.K	
활하중재하 단계	8.08	-0.09	8.32	-0.41	
	O.K	O.K	O.K	O.K	
허 용 응 력	18.00	-4.00	18.00	-4.00	

② 용인경전철(철제차륜) (Type 2, H=2.3m)

ㄱ) 극한강도 검토

구 분	휨강도 검토			균열하중		
	Mu(kN.m)	ΦMn(kN.m)	판정	Mcr(kN.m)	ΦMn(kN.m)	판정
외측거더	12,191.00	13,804.86	1.13 O.K!	11,209.14	13,804.86	1.23>1.20 O.K!
내측거더	12,696.00	13,798.62	1.09 O.K!	11,197.14	13,798.62	1.23>1.20 O.K!

ㄴ) 하중단계별 응력 검토

하중단계	외측거더(MPa)		내측거더		
	상연응력	하연응력	상연응력	하연응력	
초기긴장 단계	2.39	6.69	2.39	6.69	
	O.K	O.K	O.K	O.K	
바닥판타설 단계	5.35	3.24	5.43	3.19	
	O.K	O.K	O.K	O.K	
2차고정하중 단계	5.95	2.08	6.19	1.75	
	O.K	O.K	O.K	O.K	
활하중재하 단계	7.03	0.00	7.30	-0.36	
	O.K	O.K	O.K	O.K	
허 용 응 력	18.00	-4.00	18.00	-4.00	

③ 김해경전철(철제차륜) (Type 2, H=2.3m)

ㄱ) 극한강도 검토

구 분	휨강도 검토			균열하중		
	Mu(kN.m)	ΦMn(kN.m)	판정	Mcr(kN.m)	ΦMn(kN.m)	판정
외측거더	12,292.00	13,804.86	1.12 O.K!	11,209.14	13,804.86	1.23>1.20 O.K!
내측거더	12,798.00	13,798.62	1.08 O.K!	11,197.14	13,798.62	1.23>1.20 O.K!

ㄴ) 하중단계별 응력 검토

하중단계	외측거더(MPa)		내측거더		
	상연응력	하연응력	상연응력	하연응력	
초기긴장 단계	2.39	6.69	2.39	6.69	
	O.K	O.K	O.K	O.K	
바닥판타설 단계	5.35	3.24	5.43	3.19	
	O.K	O.K	O.K	O.K	
2차고정하중 단계	5.95	2.08	6.19	1.75	
	O.K	O.K	O.K	O.K	
활하중재하 단계	7.07	-0.07	7.34	-0.43	
	O.K	O.K	O.K	O.K	
허 용 응 력	18.00	-4.00	18.00	-4.00	

④ 자기부상열차 (Type 1, H=2.0m)

ㄱ) 극한강도 검토

구 분	휨강도 검토			균열하중		
	Mu(kN.m)	ΦMn(kN.m)	판정	Mcr(kN.m)	ΦMn(kN.m)	판정
외측거더	10,512.00	11,994.07	1.14 O.K!	9,581.98	11,994.07	1.25>1.20 O.K!
내측거더	10,891.00	11,987.87	1.10 O.K!	9,567.73	11,987.87	1.25>1.20 O.K!

ㄴ) 하중단계별 응력 검토

하중단계	외측거더(MPa)		내측거더		
	상연응력	하연응력	상연응력	하연응력	
초기긴장 단계	3.12	6.75	3.12	6.75	
	O.K	O.K	O.K	O.K	
바닥판타설 단계	6.73	2.68	6.80	2.64	
	O.K	O.K	O.K	O.K	
2차고정하중 단계	7.24	1.63	7.45	1.34	
	O.K	O.K	O.K	O.K	
활하중재하 단계	8.15	-0.22	8.39	-0.54	
	O.K	O.K	O.K	O.K	
허 용 응 력	18.00	-4.00	18.00	-4.00	

⑤ 모노레일 (Type 1, H=2.0m)

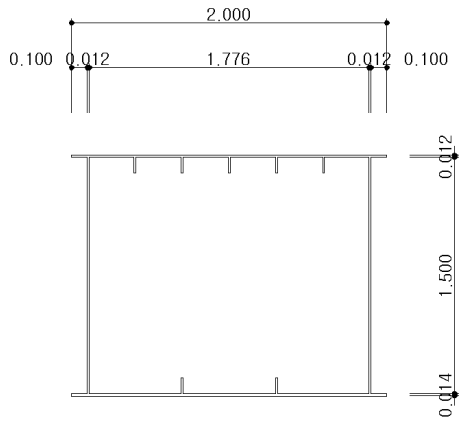
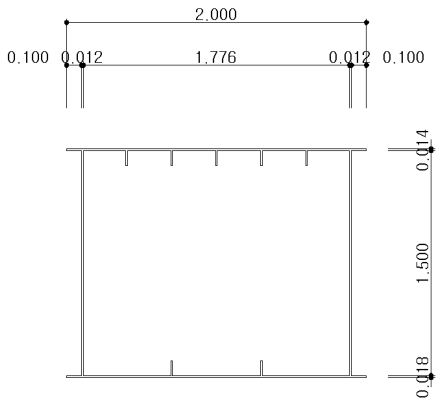
ㄱ) 극한강도 검토

구 분	휨강도 검토			균열하중		
	Mu(kN.m)	ΦMn(kN.m)	판정	Mcr(kN.m)	ΦMn(kN.m)	판정
외측거더	10,729.00	11,994.07	1.12 O.K!	9,581.98	11,994.07	1.25>1.20 O.K!
내측거더	11,111.00	11,987.87	1.08 O.K!	9,567.73	11,987.87	1.25>1.20 O.K!

ㄴ) 하중단계별 응력 검토

하중단계	외측거더(MPa)		내측거더		
	상연응력	하연응력	상연응력	하연응력	
초기긴장 단계	3.12	6.75	3.12	6.75	
	O.K	O.K	O.K	O.K	
바닥판타설 단계	6.73	2.68	6.80	2.64	
	O.K	O.K	O.K	O.K	
2차고정하중 단계	7.24	1.63	7.45	1.34	
	O.K	O.K	O.K	O.K	
활하중재하 단계	8.24	-0.41	8.48	-0.73	
	O.K	O.K	O.K	O.K	
허 용 응 력	18.00	-4.00	18.00	-4.00	

(다) ST. BOX 거더교 설계 단면 (L=40m)

TYPE-1 (H=1.5m)	TYPE-2 (H=1.5m)
	
거더 높이 : 1.50m 상부플랜지 : 12mm 하부플랜지 : 14mm	거더 높이 : 1.50m 상부플랜지 : 14mm 하부플랜지 : 18mm
단면적 : 0.095㎡	단면적 : 0.107㎡

(라) ST. BOX 거더교 설계 결과 (L=40m)

① K-AGT(고무차륜형) : TYPE-1

- 하중조합별 응력 검토(MPa)

하중	강재					
	작용응력		허용응력		안전율	
	상연	하연	상연	하연	상연	하연
1	133.886	131.104	186.100	190.000	1.39	1.45
1+2+3	140.719	170.118	186.100	190.000	1.32	1.12
1+2+3+4	146.143	171.085	186.100	190.000	1.27	1.11
1+2+3+4+5	148.012	171.432	186.100	190.000	1.26	1.11
1+2+3+4+5+6	149.753	171.716	241.930	218.500	1.62	1.27

b. 용인경전철(철제차륜) : TYPE-2

- 하중조합별 응력 검토(MPa)

하중	강재					
	작용응력		허용응력		안전율	
	상연	하연	상연	하연	상연	하연
1	133.572	121.027	186.100	190.000	1.39	1.57
1+2+3	143.813	169.175	186.100	190.000	1.29	1.12
1+2+3+4	150.671	170.202	186.100	190.000	1.24	1.12
1+2+3+4+5	152.461	170.483	186.100	190.000	1.22	1.11
1+2+3+4+5+6	154.170	170.715	241.930	218.500	1.57	1.28

c. 김해경전철(철제차륜) : TYPE-2

- 하중조합별 응력 검토(MPa)

하중	강재					
	작용응력		허용응력		안전율	
	상연	하연	상연	하연	상연	하연
1	133.572	121.027	186.100	190.000	1.39	1.57
1+2+3	144.132	170.673	186.100	190.000	1.29	1.11
1+2+3+4	150.990	171.701	186.100	190.000	1.23	1.11
1+2+3+4+5	152.780	171.982	186.100	190.000	1.22	1.10
1+2+3+4+5+6	154.488	172.213	241.930	218.500	1.57	1.27

d. 자기부상열차 : TYPE-1

- 하중조합별 응력 검토(MPa)

하중	강재					
	작용응력		허용응력		안전율	
	상연	하연	상연	하연	상연	하연
1	133.886	-131.104	186.100	190.000	1.39	1.45
1+2+3	141.086	-172.209	186.100	190.000	1.32	1.10
1+2+3+4	146.509	-173.176	186.100	190.000	1.27	1.10
1+2+3+4+5	148.378	-173.524	186.100	190.000	1.25	1.09
1+2+3+4+5+6	150.120	-173.807	241.930	218.500	1.61	1.26

e. 모노레일

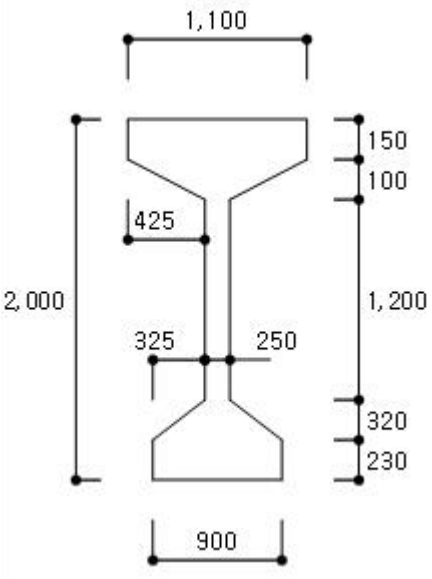
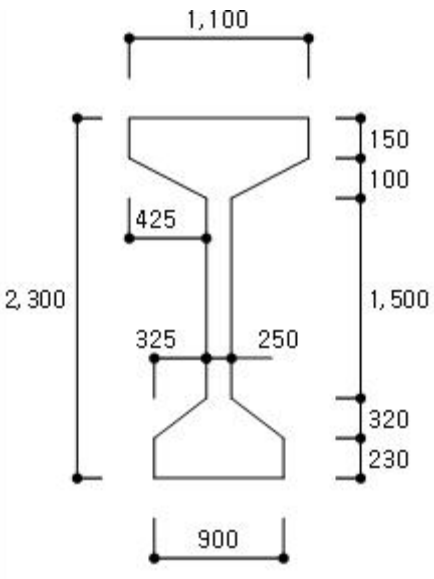
- 하중조합별 응력 검토(MPa)

하중	강재					
	작용응력		허용응력		안전율	
	상연	하연	상연	하연	상연	하연
1	133.886	131.104	186.100	190.000	1.39	1.45
1+2+3	141.042	171.958	186.100	190.000	1.32	1.10
1+2+3+4	146.465	172.925	186.100	190.000	1.27	1.10
1+2+3+4+5	148.334	173.272	186.100	190.000	1.25	1.10
1+2+3+4+5+6	150.076	173.556	214.015	218.500	1.43	1.26

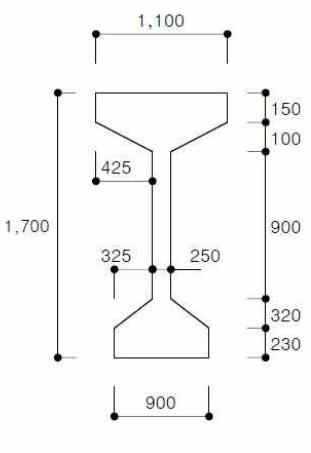
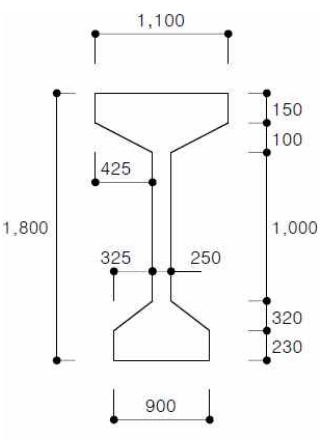
(마) 기존결정론적 설계법과 신규제안설계법 설계 결과 비교

① PSC 거더교 (L=30m) 검토

a. 기존결정론적 설계법 설계 단면

TYPE-1 (H=2.0m)	TYPE-2 (H=2.3m)
	
단면적 : 0.92㎡ (K-AGT, 모노레일, 자기부상)	단면적 : 0.99㎡ (용인경전철(철제), 김해경전철(김해))

b. 신규제안 설계법 설계 단면

TYPE-1 (H=1.7m)	TYPE-2 (H=1.8m)
	
단면적 : 0.85㎡ (K-AGT, 모노레일, 자기부상)	단면적 : 0.87㎡ (용인경전철(철제), 김해경전철(김해))

c. 검토 결과

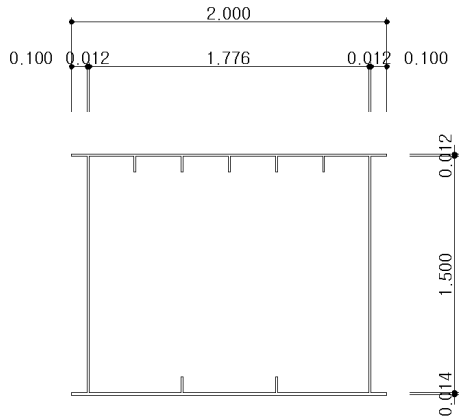
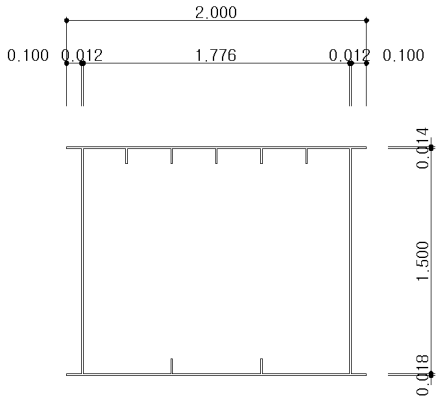
구 분	신규제안설계법			기존결정론적 설계법		
	Mu (kN.m)	Mr (kN.m)	안전율	Mu (kN.m)	ΦMn (kN.m)	안전율
K-AGT	7968.0	9240.6	1.16	10,735.00	11,987.87	1.12
용인경전철	9146.3	9773.1	1.07	12,696.00	13,798.62	1.09
김해경전철	9217.2	9773.1	1.06	12,798.00	13,798.62	1.08
자기부상열차	8303.0	9240.6	1.11	10,891.00	11,987.87	1.10
모노레일	8236.1	9240.6	1.12	11,111.00	11,987.87	1.08

- K-AGT, 용인경전철, 김해경전철, 자기부상열차, 모노레일 등 5개 열차 차중에 대해 신규제안 설계법과 기존결정론적 설계법(허용응력설계법, 강도설계법)을 적용하여 강도 검토시 동등 수준의 안전율을 확보한 설계 결과를 비교 검토하였음.
- K-AGT, 자기부상열차, 모노레일을 적용한 설계결과 신규제안 설계법에서의 설계단면의 형고는 1.7m, 단면적은 0.85㎡이며, 기존결정론적 설계법 적용시 형고는 2.0m. 단면적은 0.92㎡로 신규제안 설계법 적용시 거더높이는 0.3m 감소, 단면적은 8% 감소하였음.
- 용인경전철, 김해경전철을 적용한 설계결과 신규제안 설계법에서의 설계단면의 형고는 1.8m, 단면적은 0.87㎡이며, 기존결정론적 설계법 적용시 형고는 2.3m. 단면적은 0.99㎡로 신규제안 설계법 적용시 거더높이는 0.5m 감소, 단면적은 12% 감소하였음.

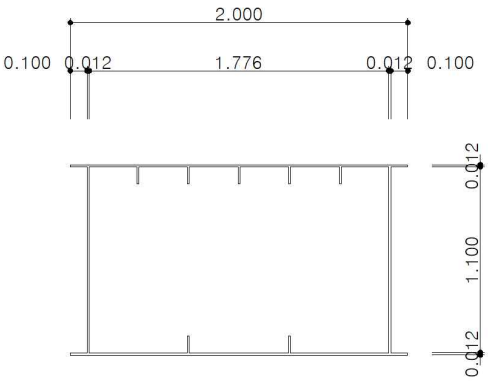
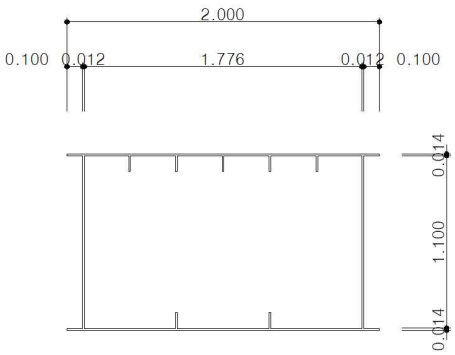
구 분	거더높이(m)		단면적(㎡)		단면적비	
	기존결정론적설계	신규제안	기존결정론적설계	신규제안	기존결정론적설계	신규제안
K-AGT, 모노레일, 자기부상열차	2.0	1.7	0.92	0.85	1.00	0.92
용인경전철, 김해경전철	2.3	1.8	0.99	0.87	1.00	0.88

② ST. BOX 거더교 (L=40m) 검토

a. 기존결정론적 설계법 설계 단면

TYPE-1 (H=1.5m)	TYPE-2 (H=2.3m)
	
단면적 : 0.095㎡ (K-AGT, 모노레일, 자기부상)	단면적 : 0.107㎡ (용인경전철(철제), 김해경전철(김해))

b. 신규제안 설계법 설계 단면

TYPE-1 (H=1.1m)	TYPE-2 (H=1.1m)
	
단면적 : 0.081㎡ (K-AGT, 모노레일, 자기부상)	단면적 : 0.094㎡ (용인경전철(철제), 김해경전철(김해))

c. 검토 결과

구 분	신규제안설계법			기존결정론적 설계법		
	작용응력 (MPa)	응력한계 (MPa_	안전율	작용응력 (MPa)	허용응력 (MPa_	안전율
K-AGT	345.8	380.0	1.10	171.4	190.0	1.11
용인경전철	330.7	380.0	1.15	170.5	190.0	1.11
김해경전철	333.5	380.0	1.14	172.0	190.0	1.10
자기부상열차	352.5	380.0	1.08	173.5	190.0	1.09
모노레일	348.4	380.0	1.08	173.3	190.0	1.10

- K-AGT, 용인경전철, 김해경전철, 자기부상열차, 모노레일 등 5개 열차 차중에 대해 신규제안 설계법과 기존결정론적 설계법(허용응력설계법)을 적용하여 강도 검토시 동등 수준의 안전율

을 확보한 설계 결과를 비교 검토하였음.

- K-AGT, 자기부상열차, 모노레일을 적용한 설계결과 신규제안 설계법에서의 설계단면의 형고는 1.1m, 단면적은 0.081㎡이며, 기존결정론적 설계법 적용시 형고는 1.5m. 단면적은 0.095㎡로 신규제안 설계법 적용시 거더높이는 0.4m 감소, 단면적은 15% 감소하였음.
- 용인경전철, 김해경전철을 적용한 설계결과 신규제안 설계법에서의 설계단면의 형고는 1.1m, 단면적은 0.094㎡이며, 기존결정론적 설계법 적용시 형고는 1.5m. 단면적은 0.107㎡로 신규제안 설계법 적용시 거더높이는 0.4m 감소, 단면적은 12% 감소하였음.

구 분	거더높이(m)		단면적(㎡)		단면적비	
	기존결정론적설계	신규제안	기존결정론적설계	신규제안	기존결정론적설계	신규제안
K-AGT, 모노레일, 자기부상열차	1.5	1.1	0.095	0.081	1.00	0.85
용인경전철, 김해경전철	1.5	1.1	0.107	0.094	1.00	0.88

③ 소결

기존 결정론적 설계법(강도설계법, 허용응력설계법)과의 설계비교를 통해 신규 제안한 설계하중 기준이 단면 설계에 미치는 영향을 분석하였다.

PSC 거더교(경간: 30m)와 강박스 거더교(경간: 40m)에 대해 5개 경전철 차종(고무차륜형, 철제차륜형, 선형유도전동기형, 모노레일형, 자기부상형)별 신규 제안한 경전철 고가구조물 설계기준(한계상태설계법) 및 기존 결정론적 설계법(허용응력설계법, 강도설계법)을 적용한 설계 결과를 검토하여 기존 설계법 대비 신규 제안 한계상태설계법의 효율성 및 경제성을 검토하였다.

PSC 거더교는 극한모멘트의 설계안전율을 동일 수준으로 하여 최적단면을 선정하였으며, 강박스 거더교는 휨응력의 설계안전율을 동일 수준으로 하여 최적단면을 선정하고 그 결과를 비교 검토하였다.

신규 제안 한계상태설계법을 적용하여 최적 단면을 설계한 결과, PSC거더교의 경우 기존 결정론적 설계법 대비 형고는 0.3~0.5m 감소, 단면적은 8~12% 감소가 가능하였고, 강박스 거더교의 경우 기존 결정론적 설계법 대비 형고는 0.5m 감소, 단면적은 12~15% 감소하는 등 신규 제안한 경전철 고가구조물 설계기준(한계상태설계법)이 보다 경제적이고 효율적인 설계가 가능한 것으로 검토되었다.

[부록2]

경전철 고가구조물 설계기준 (한계상태설계법)

국토교통부

설계기준 제정에 따른 경과 조치

이 기준은 발간 시점부터 사용하며, 이미 시행 중에 있는 설계용역이나 건설공사는 발주기관의 장이 필요하다고 인정하는 경우 종전에 적용하고 있는 기준을 그대로 사용할 수 있습니다.

목 차

1장. 설계 일반사항 ····· 1
2장. 설계하중 ····· 3
3장. 설계하중조합(한계상태설계법) ····· 23
4장. 재료 ····· 28
5장. 설계 ····· 29

1장. 설계 일반사항

1. 일반사항

1.1 적용범위

(1) 이 기준의 규정은 경전철 고가구조물의 설계에 적용함을 그 목적으로 하며, 본 기준에 제시되지 않은 사항은 KDS 24 00 00 및 철도설계기준(노반편)을 준용한다.

(2) 이 기준은 경전철 고가구조물의 설계에서 사용되는 하중들에 대한 최소한의 요구 조건, 적용한계, 하중계수 및 하중조합에 대해 규정한다. 또한 이 코드는 기존 고가구조물의 구조적 안전성 평가에도 적용될 수 있다. 이 규정들은 하중에 대한 최소 요구조건이므로, 필요한 경우 발주자의 판단에 따라 이 기준 이상의 하중을 사용할 수 있다.

(3) 고가구조물 지간 200m 이하의 경전철 전용 고가구조물에 적용하는 것으로 한다. 지간이 200m를 넘는 경우에도 장대고가구조물의 종류, 구조형식, 가설지점의 상황 등에 따라 합리적인 보정을 해야하는 사항을 제외하고는 이코드는 따른다. 다만 특별한 조사연구에 의해 설계할 때는 이 코드를 적용하지 않을 수 있는데, 이 경우에는 그 설계 근거를 명시해야 한다.

(4) 공공의 안전을 위해 필요한 최소필요조건을 기술한 것이므로, 발주자 또는 설계자는 최소필요조건보다 높은 수준의 설계나 재료 및 시공의 품질을 요구할 수 있다.

(5) 이 설계기준의 설계규정은 하중 저항계수 설계법(LRFD 방법)을 적용하였다. 이 계수들은 하중과 구조적 성능에 관한 현시점에서의 통계적 지식에 근거한 신뢰도 이론으로부터 개발되었다.

1.2 용어정의

- 경전철(Light Rail Transit): 도시교통권역에서 건설·운영되는 도시철도로서, 시간당 5,000명 이상의 수송능력을 갖추고 전철화된 궤도에 의해 운행되는 교통시설 및 교통수단
- 경량전철: 모노레일형, 노면전차형, 철제차륜형, 고무차륜형, 선형유도전동기형, 자기부상형 등으로 운행되고, 차량 최대 설계축중 13.5톤 이하(분포하중의 경우 단위 미터당 2.8톤 이하)의 전기철도 차량
- 모노레일형 경전철: 하나의 주행로(궤도거더) 위에 차량이 과좌식 또는 현수식으로 주행하는 교통시스템
- 철제차륜형 경전철: 철체차륜을 가진 경량전철이 레일이 부설된 전용 궤도를 따라 주행하는 교

통시스템
- 고무차륜형 경전철: 고무차륜을 가진 경량전철이 안내레일의 도움을 받아 정해진 전용 주행로를 따라 주행하는 교통시스템
- 선형유도전동기형 경전철: 선형유도전동기를 이용하여 전자력에 의해 차량을 주행하는 교통시스템
- 자기부상형 경전철: 안내궤조 내에서 전자력에 의해 차량을 부상시켜 전자력으로 주행하는 교통시스템
- 극단상황한계상태(Extreme Event Limit State): 고가구조물의 설계수명을 초과하는 재현주기를 갖는 지진, 유빙하중, 차량과 선박의 충돌 등과 같은 사건과 관련한 한계상태
- 극한한계상태(Ultimate(Strength) Limit State): 설계수명동안 강도, 안정성 등 붕괴 또는 이와 유사한 형태의 구조적인 파괴에 대한 한계상태
- 사용한계상태(Serviceability Limit State): 균열, 처짐, 피로 등의 사용성에 관한 한계상태로서, 일반적으로 구조물 또는 부재의 특정한 사용 성능에 해당하는 상태
- 재료계수: KDS 24 14 21에서 사용하는 저항계수이며, 재료 설계값을 구하기 위하여 재료 기준값에 곱하는 부분안전계수로서 대개 1 보다 작은 값으로 재료저항계수라고도 한다.
- 저항계수: 부재나 재료의 공칭값에 곱하는 통계기반 계수이며, 일차적으로 재료와 치수 및 시공의 변동성과 저항모델의 불확실성을 고려하기 위한 계수이다. 이 기준에서는 콘크리트구조에 사용하는 저항계수는 재료계수, 그 이외의 모든 경우에는 저항계수로 용어를 통일한다.
- 피로와 파단한계상태(Fatigue and Fracture Limit State): 반복적인 차량하중에 의한 피로파괴 및 파단에 관한 한계상태
- 하중계수: 하중효과에 곱하는 통계에 기반한 계수이며, 일차적으로 하중의 가변성, 해석 정확도의 결여 및 서로 다른 하중의 동시작용확률을 고려하며, 계수 보정과정을 통하여 저항의 통계와도 연관되어 있다.
- 한계상태(Limit State): 고가구조물 또는 구성요소가 사용성, 안전성, 내구성의 설계규정을 만족하는 최소한 의 상태로서, 이 상태를 벗어나면 관련 성능을 만족하지 못하는 한계

1.3 설계원칙

KDS 24 00 00 및 철도설계기준(노반편)을 준용한다.

1.4 조사 및 계획

KDS 24 00 00 및 철도설계기준(노반편)을 준용한다.

2장. 설계하중

1. 하중의 종류

설계에 있어서는 다음 하중을 고려한다.

(1) 지속하는 하중

① 고정하중

가. 구조부재와 비구조적 부착물의 중량(DC)

나. 포장과 설비의 고정하중(DW)

② 프리스트레스힘(PS)

포스트텐션에 의한 2차 하중효과를 포함한, 시공과정 중 발생한 누적 하중효과

③ 시공 중 발생하는 구속응력(EL)

④ 콘크리트 크리프의 영향(CR)

⑤ 콘크리트 건조수축의 영향(SH)

⑥ 토압

가. 수평토압(EH)

나. 상재토하중(ES)

다. 수직토압(EV)

라. 말뚝부마찰력(DD)

(2) 변동하는 하중

① 활하중

가. 차량 및 열차활하중(LL)

나. 상재활하중(LS)

다. 보도하중(PL)

라. 열차횡하중(LF)

② 충격하중(IM)

③ 풍하중

가. 차량에 작용하는 풍하중(WL)

나. 구조물에 작용하는 풍하중(WS)

④ 온도변화의 영향

가. 단면평균온도(TU)

나. 온도 경사(TG)

⑤ 지진의 영향(EQ)

⑥ 정수압과 유수압(WA)

⑦ 부력 또는 양압력(BP)

⑧ 설하중 및 빙하중(IC)

⑨ 지반변동의 영향(GD)

⑩ 지점이동의 영향(SD)

⑪ 파압(WP)

⑫ 원심하중(CF)

⑬ 가설 시 하중(ER)

⑭ 충돌하중

가. 차량충돌하중(CT)

나. 나. 선박충돌하중(CV)

⑮ 시제동하중(SB)

⑯ 탈선하중(DR)

⑰ 장대레일 종방향 하중(LR)

2. 고정하중: DC, DW

(1) 고정하중은 구조물의 자중・부속물과 그곳에 부착된 제반설비와 계획된 확폭 등에 의한 모든 예측 가능한 중량을 포함한다. 고정하중을 산출할 때는 표 2.1에 나타낸 단위질량을 사용하여야 한다. 다만, 실질량이 명백한 것은 그 값을 사용한다.

표 2.1 재료의 단위체적중량

재료		단위체적중량 (kN/m^3)
강재, 주강, 단강		77.0
주철, 주물강재		77.0
연철		76.5
알루미늄 합금		27.5
철근콘크리트		24.5
프리스트레스트 콘크리트		24.5
콘크리트		23.0
인공경량골재콘크리트		15~17
시멘트 모르타르		21.0
역청재(방수용)		11.0
아스팔트 포장재		22.6
석재		26
도상(자갈 또는 쇄석)		19
모래, 자갈, 부순돌, 흙		16~20
석탄, 탄가루		10
목재	단단한 것	9.4
	무른 것	7.8
용수	담수	9.8
	해수	10.2

(2) 2차고정하중(부가되는 고정하중)

①2차고정하중은 궤도, 방수, 방음벽, 신호기 기둥, 전차선 지주 등을 포함한다. 제거 가능한 2차고정하중은 자갈도상, 케이블 등이 있다.

②자갈 및 콘크리트 도상 궤도의 2차고정하중은 정량적으로 계산하여 적용하는 것으로 하며, 단선 궤도에 대한 재료의 중량은 다음 값을 사용할 수 있다.

가. 레일(체결구 포함) 1.5 kN/m

나. 침목: 일반철도용 4.1 kN/m

다. 자갈도상 19 kN/m^3

보조도상 16 kN/m^3

라. 콘크리트궤도 도상 24.5 kN/m^3

콘크리트궤도 보조도상 24.5 kN/m^3

마. 콘크리트 주행로 24.5 kN/m^3

강재 주행로 77.0 kN/m^3

③ 자갈도상의 중량은 보선작업과정을 고려하여 30% 할증된 값을 사용한다. 또 곡선부에서 자갈도상의 중량은 캔트부설에 따른 증가량을 추가하여 사용한다.
④ 전선 및 신호케이블 등의 2차고정하중은 1 kN/m로 하고 트러프하중은 별도로 계산한다.
⑤ 제3궤조의 2차고정하중은 단선인 경우 4.1kN/m, 복선인 경우 7.0kN/m으로 적용한다.
⑥ 안내레일의 2차고정하중은 단선인 경우 1.3kN/m, 복선인 경우 2.5kN/m으로 적용한다.
⑦ 선형유도전동기(LIM) 리액션 플레이트의 2차고정하중은 단선인 경우 0.23kN/m, 복선인 경우 0.46kN/m으로 적용한다.

3. 프리스트레스힘: PS

구조물에 프리스트레스힘을 도입하는 경우에는 설계에 이를 고려하여야 한다. 프리스트레스트 콘크리트에 도입하는 프리스트레스힘에 관해서는 다음과 같이 정한다.

(1) 설계 시에 고려하여야 할 프리스트레스힘은 프리스트레싱 직후의 프리스트레스힘과 유효프리스트레스힘이다. 또 프리스트레스힘에 의하여 부정정력이 일어나는 경우에는 이들도 고려하여야 한다.

(2) 프리스트레싱 직후의 프리스트레스힘의 감소는 프리텐션 방식에서는 콘크리트의 탄성변형만을 고려하여야 하고, 포스트텐션 방식에서는 콘크리트의 탄성변형, PS강재와 쉬스의 마찰, 정착장치 및 정착부 내부의 마찰, 정착장치에서의 활동량을 고려하여야 한다.

(3) 유효프리스트레스힘은 (2)의 규정으로 산출한 프리스트레싱 직후의 프리스트레스힘에 다음의 영향을 고려하여 산출한다.
① 콘크리트의 크리프
이 경우에 고려하는 지속하중은 프리스트레스힘과 고정하중이다.
② 콘크리트의 건조수축
③ PS강재의 릴랙세이션

(4) 일반적으로 프리스트레스힘에 의해 보의 변형이 구속되어 이로 인하여 부정정력이 발생하게 되는데 단면의 응력을 검사할 경우에 이 부정정력을 고려하여야 한다. 유효프리스트레스힘에 의한 부정정력은 PS강재 인장력의 유효계수를 부재 전체에 걸쳐 평균한 값을 프리스트레싱 직후의 부정정력에 곱하여 산출할 수 있다.

4. 콘크리트의 크리프: CR

콘크리트와 목재의 크리프 변형도는 KDS 24 14 21에 따른다. 크리프로 인한 하중과 변형량을 결정하기 위하여 시간의존성과 압축응력의 변화를 고려하여야 한다.

5. 콘크리트의 건조수축: SH

다른 재령과 재질의 콘크리트 사이, 콘크리트와 강재 또는 목재와의 사이에서 발생하는 부등건조수축에 의한 변형도는 일반적으로 KDS 24 14 21에 따라 결정되어야 한다.

6. 토압 : EH, ES, LS, DD

(1) 토압은 구조물과 지반의 상대적인 변위와 관계하여 정지토압, 주동토압 및 수동토압으로 구분된다.

(2) 토압과 토압분포는 구조물과 지반과의 상대적인 변위, 구조물의 형태, 토질종류, 토층상태, 배면지형, 상재하중조건 등을 고려하여 산정한다.

(3) 토압은 다음과 같은 요인에 의하여 영향을 받는다.

① 지반의 종류와 밀도
② 함수비
③ 흙의 크리프특성
④ 다짐도
⑤ 지하수위
⑥ 지반-구조물 상호작용
⑦ 상재하중
⑧ 지진효과
⑨ 후면경사각
⑩ 벽체 경사

7. 활하중

7.1 열차활하중, LL

(1) 경전철 전용 노선인 경우에는 해당 노선 경전철 차량의 만차시 열차하중을 재하한다.

(2) 열차하중의 재하방법으로, 단선 혹은 복선인 경우 각각의 궤도에 경전철 열차하중을 적용하고, 3선 이상의 경우 복선재하 하중과 나머지 1선은 1/2하중을 재하하고 나머지 선에는 재하하지 않는다.

(3) 피로의 영향을 검토할 때의 열차하중은 설치되는 선로수에 관계없이 단선재하 하중을 적용하고, 고려하는 상세부위에 최대 응력이 발생하도록 하중을 재하한다. 다만 동시재하 가능성이 높은 경우에는 동시재하 확률을 고려하여 검토한다.

(4) 바람의 영향을 검토할 때의 열차하중은 해당 노선 경전철 차량의 만차시 열차하중을 적용하고 충격은 가산하지 않는다.

7.2 보도하중, PL

(1) 경전철 고가구조물에는 유사시 승객의 비상대피 및 일상 점검 관리의 목적으로 비상대피로만 설치하고 있는 관계로, 고가구조물 주거더 설계시 경전철 차량 하중 이외 별도 보도하중을 추가하여 고려하지 않는다.

(2) 비상대피로를 직접 지지하는 구조의 설계에서는 $5kN/m^2$의 등분포 수직하중을 적용한다.

7.3 횡하중 LF

(1) 경전철 차량 횡하중은 해당노선에 운행하는 경전철 차량의 하나의 대차와 연결된 차축(혹은 안내륜축)에만 작용하는 것으로 하고, 축간거리를 고려하여 연행집중이동하중으로 한다.

(2) 열차횡하중은 철체차륜형 경전철의 경우 레일면의 높이에서, 고무차륜형 및 모노레일형 경전철의 경우 안내레일의 높이(혹은 안내륜이 지나는 위치)에서 교축에 직각이고 수평으로 작용하는 것으로 한다.

(3) 열차횡하중의 크기는 경전철 차량 축중의 20%로 한다.

(4) 복선 이상의 선로를 지지하는 구조물인 경우, 열차횡하중은 1궤도에 대한 것만을 고려하는 것으로 한다.

(5) 열차횡하중은 레일 체결구와 직접적으로 접촉하는 구조 부재(자갈도상이 없는 궤도가 사용되어질 때)에 고려하며, 자갈도상을 가지는 고가구조물상부의 설계에는 고려하지 않는다. 그러나 슬래브 궤도구조(콘크리트도상)인 경우에는 고려되어야 한다.

7.4 캔트(cant) 효과

(1) 곡선궤도를 가지는 구조물에서는 캔트 효과를 고려해야 한다. 이 효과는 횡방향으로 열차의 중심을 이동시키는 것으로 고려해야 한다.

(2) 캔트 효과를 적용하는 데에 있어 다음의 두 가지 경우가 고려되어야 한다.

① 정지상태 열차

② 운행 중인 열차: 이 경우는 원심하중이 고려되어야 한다.

8. 충격하중(충격계수) : IM

(1) 경전철 열차하중은 충격계수에 의한 하중이 곱해지는 동적 충격효과를 포함해야 한다.

(2) 충격계수는 고가구조물의 진동 효과와 응력의 동적 확대로 산정된다. 그러나 공진효과와 상부구조에서 초과 진동은 이 값에서 고려되지 않으며 그 효과는 별도 해석으로 검토되어야 한다.

(3) 충격계수는 철근콘크리트, 프리스트레스 콘크리트와 강구조 또는 합성구조물에서 동일한 값을 갖는다.

(4) 충격계수의 값은 구조물의 길이 특성치 L_e(m)에 의존해야 한다. L_e(m)의 크기는 표 2.2를 따른다.

(5) 식 (2-1)로 충격계수를 계산하여 적용한다.

$$I_m = \frac{1.44}{\sqrt{L_e} - 0.2} - 0.18 \qquad (2\text{-}1)$$

여기서, $0 \leq I_m \leq 0.67$

L_e: 경간장

다만, 모노레일형 경전철 차량이 주행하는 궤도빔 거더교에서 궤도빔과 궤도빔 사이에 사선형 이음매판 등 별도의 충격완화 신축이음부를 설치하지 않은 경우에는 식(2-2)로 계산하여 적용한다.

$$I_m = \frac{2.16}{\sqrt{L_e} - 0.2} - 0.27 \qquad (2\text{-}2)$$

여기서, $0 \leq I_m \leq 1.0$

L_e: 경간장

(6) 충격계수가 적용된 하중은 다음과 같은 부분의 설계에 적용해야 한다.

① 상부구조, 강재 또는 콘크리트로 지지하는 기둥, 라멘구조의 기둥, 그리고 일반적으로 일부주 기초에까지 이르는 구조 부분도 확장 적용해야 할 필요가 있다.

② 콘크리트 또는 강파일 지반선위의 부분으로서 상부구조와 직접 연결된 강결형식이나 연속형식의 구조

(7) 충격하중은 다음의 구조물에서는 적용하지 않는다.

① 교대, 옹벽, 벽식 기초, 그리고 말뚝기초나 가구

② 기초와 지반, 터널안의 기초 바닥 슬래브

③ 보도부

표 2.2 충격계수 산정을 위한 구조물 길이 특성치 L_e

번호	교량 부재, 교량 유형		L_c
	바닥 부재		
1	레일베어러(Rail Bearer)		가로거더 간격 + 3.0 m
2	단순 지지된 레일베어러에 의해 재하된 가로거더		가로거더 간격의 2배 + 3.0 m
3	연속 상판 부재에 의해 재하된 가로거더		주거더의 지간 또는 가로거더 지간의 2배 중 작은 값
4	단부 가로거더		4.0 m
5	상판 슬라브		각각의 주 지간 방향에 대하여 번호 1-4에 해당하는 값
6	캔틸레버로 된 가로거더		가로거더에 해당하는 값 (번호 2-4)
7	캔틸레버로 된 레일베어러		0.50m
8	오직 가로거더에 의해서만 재하된 서스펜션 바(Suspension Bars) 또는 지지(Supports)		가로거더에 해당하는 값 (번호 2-4)
9	박스거더 돌출(Box Girder Overhang)		2 × 돌출 폭
10	박스거더 슬라브		복부 사이 거리
	주거더		
11	거더	2개 지지점 위에서	주거더의 지간
12	거더	n개 지간에 걸쳐서 연속 $L_m = \frac{1}{n}(L_1 + L_2 \cdots + L_n)$	Lm
13	캔틸레버/ 현수(Suspended) 지간 교량	캔틸레버 거더	거더의 지간
14	캔틸레버/ 현수(Suspended) 지간 교량	현수 거더	현수 거더의 지간
15	아치		지간 절반
16	주거더 위에 침목을 바로 놓는 경우, 보와 이음매에 대하여		주거더의 Lc
17	교량 부재의 L_c는 강기둥, 지지 뼈대(Support Frame), 가로보, 연결 조인트, 받침, 앵커, 주춧돌(Bed Stone) 등과 같은 부재들과 주춧돌과 벽돌 사이 및 받침 아래의 압력의 지지에 적용된다.		
18	부재에서의 총 응력이 몇 몇 항들의 합인 경우, 각 상응하는 지지 함수, 즉, 상판 슬라브 또는 레일베어러 경우의 방정식은 만약, 그 단면이 주거더의 계산에 고려된다면, 총 응력의 각 항은 상응하는 특성치 지간 L_c를 사용하여(4, 14번은 제외), 문제에 있어서의 운반 함수(Carrying Function)에 대한 동적 인자를 고려하여 계산되어야 한다.		

9. 풍하중

9.1 풍속

9.1.1 기본풍속

기본풍속(V_{10})이란 재현기간 100년에 해당하는 개활지에서의 지상 10 m의 10분 평균 풍속을 말한다. 기본풍속은 대상지역 인근 기상관측소의 장기풍속기록(태풍 또는 계절풍)과 지역적 위치를 동시에 고려하여 극치분포로부터 추정하거나 태풍자료의 시뮬레이션 등의 합리적인 방법으로 추정한다. 단 대상지역의 풍속자료가 가용치 못한 경우에는 표 2.3에 주어진 지역별 기본풍속을 사용할 수 있다.

표 2.3 지역별 기본풍속(V_{10})

구분	지역	지명	기본풍속(m/s)
Ⅰ	내륙	서울, 대구, 대전, 춘천, 청주, 수원, 추풍령, 전주, 익산, 진주, 광주	30
Ⅱ	서해안	서산, 인천	35
Ⅲ	서남해안 남해안 동남해안	군산 여수, 충무, 부산 포항, 울산	40
Ⅳ	동해안 제주지역 특수지역	속초, 강릉 제주, 서귀포 목포	45
Ⅴ		울릉도	50

9.1.2 설계기준풍속

(1) 일반 중소지간 교량의 설계기준풍속(V_D)은 40 m/s로 한다.

(2) 태풍이나 돌풍에 취약한 지역에 위치한 중대지간 교량의 설계기준풍속(V_D)은 대상지역의 풍속기록과 구조물 주변의 지형 및 환경 그리고 교량상부구조의 지상 높이 등을 고려하여 합리적으로 결정한 10분 평균 풍속이다. 그러나 대상지역의 풍속자료가 가용치 못한 경우에는 고도보정을 위하여 식 (2-3)을 사용할 수 있다.

$$V_D = 1.723\left(\frac{z_D}{z_G}\right)^{\alpha} V_{10} \qquad (2\text{-}3)$$

여기서, a = 표 2.3의 지표조도지수

z = 지상 또는 수면으로부터 구조물의 대표 높이(m)로 교량 주거더와 같은 수평 구조물의 경우에는 평균 높이를, 교각과 같은 수직 구조물의 경우에는 총 높이의 65 %를 사용한다.

V_D = 설계고도 z에서의 10분 평균 설계기준풍속(m/s)

z_D = z와 표 2.4의 z_b 중에서 큰 값

표 2.4 지표조도구분에 의한 각종 계수들

지표조도 구분	지표 상황	a	a_2	β	c	e	l(m)	z_b(m)	z_G(m)
I	• 해상, 해안	0.12	0.174	1.25	0.15	0.125	200	2	200
II	• 개활지, 농지, 전원 수목과 저층건축물이 산재하여 있는 지역	0.16	0.210	1.54	0.20	0.200	150	5	300
III	• 수목과 저층건축물이 밀집하여 있는 지역 • 중, 고층 건물이 산재하여 있는 지역 • 완만한 구릉지	0.22	0.286	2.22	0.30	0.333	100	10	400
IV	• 중, 고층 건물이 밀집하여 있는 지역 • 기복이 심한 구릉지	0.29	0.400	3.33	0.45	0.500	50	20	500

9.1.3 시공기준풍속

시공기준풍속은 태풍에 취약한 지역에 위치한 중장대 지간 교량의 시공중 검토를 위한 풍속으로, 공사기간에 대한 최대풍속의 비초과확률 80 %에 해당하는 10분 평균 풍속이다. 이때 재현기간 R, 비초과확률 P_{NE}, 공사기간 N의 관계는 식 (2-4)를 사용하여 구할 수 있다.

$$R = \frac{1}{1-(P_{NE})^{1/N}} \qquad (2\text{-}4)$$

9.2 설계풍압

9.2.1 일반 중소지간 교량의 설계풍압

(1) 박스거더교, 플레이트거더교, 슬래브교에 작용하는 풍압은 표 2.5에 나타낸 값으로 한다.

표 2.5 거더교의 풍압(kPa)

단면형상	풍압(kPa)
$1 \le B/D < 8$	$\left(4.0-0.2\frac{B}{D}\right)$
$8 \le B/D$	2.4

여기서, B= 교량 총폭(m) (그림 2.1 참조)

D= 교량 총높이(m) (그림 2.1 참조)

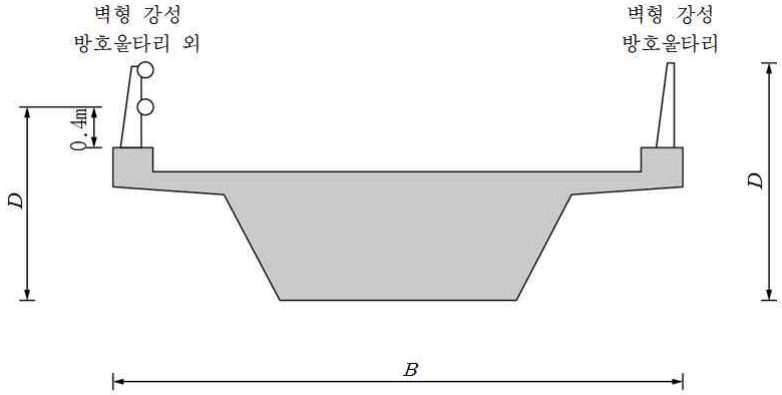


그림 2.1 교량 총폭 B와 총높이 D

(2) 풍상측 트러스에는 활하중 비재하시 유효연직투영면적당 $2.4/\sqrt{\phi}$ 의 풍압이 작용하고, 풍하측 트러스에는 그 절반이 작용한다. 이때 ϕ는 트러스의 충실률로 트러스 외곽 면적에 대한 트러스 투영면적의 비율이다.

(3) 기타 형식 교량의 주거더 부분에 작용하는 풍하중은 주거더의 형상에 따라 (1) 또는 (2)를 적용한다. (1) 또는 (2)에 규정되지 않은 부재에 작용하는 활하중 비재하시 풍압은 단면형상에 따라 표 2.6에 나타낸 값을 사용한다.

표 2.6 기타 교량 부재에 작용하는 풍압(kPa)

단면형상	풍상측 부재	풍하측 부재
원형	1.5	1.5
각형	3.0	1.5

(4) 거더교가 병렬로 놓여있는 경우에는 이 영향을 고려하여 풍하중을 적절히 보정하여야 한다.

(5) 차량 활하중이 재하 시 풍압은 풍상측 부재에 1.5kN/m^2 , 풍하측 부재에 1.0kN/m^2 의 풍압이 작용하는 것으로 본다.

(6) 차량 활하중이 재하될 때에는 통과 차량에 대한 연직투사면에 1.5kN/m^2의 풍압이 작용하는 것으로 본다. 차량의 연직투사면은 주행면 혹은 레일 상면으로부터 실 차량 높이의 폭으로 하고, 차량과 겹쳐지는 보의 풍상측 및 풍하측 부재에 대하여는 풍하중을 고려하지 않는다.

9.2.2 태풍이나 돌풍에 취약한 지역에 위치한 중대지간 교량의 설계풍압

구조물의 정적설계를 위한 단위면적당 작용하는 풍압 p(Pa)는 설계기준풍속 V_D(m/s), 공기밀도 ρ(=1.25 kg/m^3), 항력계수 C_D 및 거스트계수 G를 사용하여 식 (2-5)에 의하여 구한다.

$$p = \frac{1}{2}\rho V_D^2 C_D G_r \quad f_1 > 1Hz \qquad (2\text{-}5)$$

$$p = \frac{1}{2}\rho V_D^2 C_D G_f \; f_1 \leq 1Hz$$

여기서, f_1은 구조물의 바람방향 1차 모드 고유진동수이고, 항력계수 C_D는 기존 문헌, 실험, 해석 등의 합리적인 방법으로 산정한다. 거스트계수 G는 풍속의 순간적인 변동의 영향을 보정하기 위한 계수이며, 강체 및 유연 구조물에 따라 구분하며 아래의 방법에 따라 구한다.

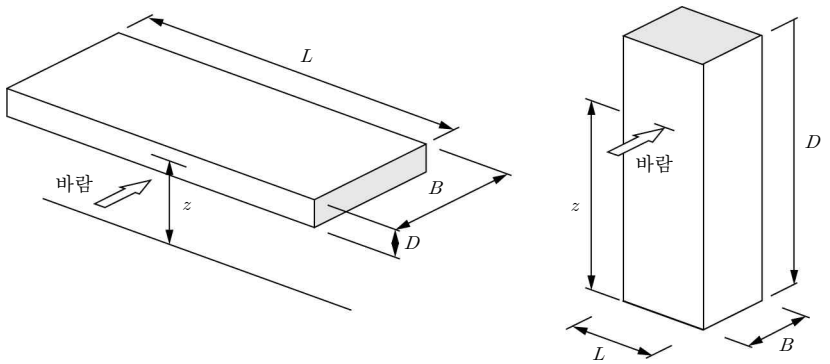


그림 2.2 수평 및 수직 구조물의 제원

거스트계수는 바람방향 1차 모드 고유진동수가 1 Hz를 초과하는 구조물은 강체구조물로, 바람방향 1차 모드 고유진동수가 1 Hz 이하인 구조물은 유연구조물로 분류되며, 각각의 거스트계수 G_r은 식 (2-6), 식(2-7) 및 표 2.4에 의하여 구한다.

$$G_r = K_p \frac{1 + 5.78 I_z Q}{1 + 5.78 I_z} \tag{2-6}$$

$$G_f = K_p \frac{1 + 1.7 I_z \sqrt{11.56 Q^2 + g_R^2 R^2}}{1 + 5.78 I_z} \tag{2-7}$$

여기서, B, D, L = 그림 2.2의 제원

$I_z = c\left(\frac{10}{z_D}\right)^{1/6}$: 난류강도

$L_z = l\left(\frac{z_D}{10}\right)^{\epsilon}$: 난류길이

z_5 : z 와 5 m 중 큰 값

$K_p = 2.01\beta^2\left(\frac{10 z_5}{z_D z_G}\right)^{\alpha_2}$: 풍압보정계수

$$Q = \sqrt{\frac{1}{1 + 0.63\left(\frac{L+D}{L_z}\right)^{0.63}}}$$

$$B_1 = 15.4 f_1 \frac{B}{V_D}$$

$$D_1 = 4.6 f_1 \frac{D}{V_D}$$

$$L_1 = 4.6 f_1 \frac{L}{V_D}$$

$$N_1 = \frac{f_1 L_z}{V_D}$$

$$R_n = \frac{7.47 N_1}{(1+10.3 N_1)^{5/3}}$$

$$R_B = \frac{1}{B_1} - \frac{1}{2B_1^2}(1 - e^{-2B_1})$$

$$R_D = \frac{1}{D_1} - \frac{1}{2D_1^2}(1 - e^{-2D_1})$$

$$R_L = \frac{1}{L_1} - \frac{1}{2L_1^2}(1 - e^{-2L_1})$$

$$R = \sqrt{\frac{1}{\xi} R_n R_D R_L (0.53 + 0.47 R_B)}$$

ξ= 한계감쇠에 대한 구조 감쇠비(예를 들면, 감쇠비 2 %인 경우에 0.02를 사용)

$$g_R = \sqrt{2\log_e(600 f_1)} + \frac{0.577}{\sqrt{2\log_e(600 f_1)}}$$

9.2.3 하부구조에 작용하는 풍압

하부구조에 직접 작용하는 풍압은 교축직각방향 및 교축방향에 작용하는 수평하중으로 한다. 그러나 동시에 2방향으로 작용하지 않는 것으로 한다. 풍압의 크기는 표 2.6의 값을 사용하거나, 유효연직투영면적에 대하여 식 (2-5)를 사용하여 구한다. 식 (2-5)를 적용할 경우에 항력계수로 원형 및 트랙형 단면의 경우에 0.6, 각형 단면의 경우에 1.2를 사용할 수 있다.

9.3 공기역학적 안정성

주경간 길이가 200 m 이상인 장대 특수교량이나 주경간 길이와 폭(또는 높이)의 비율이 30을 넘는 교량이나 부재는 바람에 의한 진동이 발생하기 쉽다. 장대 특수교량이나 세장 구조부재는 전항의 정적설계 결과에 대하여, 동적해석과 풍동실험을 통하여 풍하중의 동적효과에 대한 제반 공기역학적 안정성을 검토하여야 한다. 또한 가설단계에서의 내풍안정성에 대해서도 충분히 검토하여야 한다.

10. 온도변화

10.1 평균온도(TU)

10.1.1 온도범위

온도에 관한 정확한 자료가 없을 때, 온도의 범위는 표 2.7에 나타낸 값을 사용한다. 온도에 의한 변형효과를 고려하기 위하여 설계 시 기준으로 택했던 온도와 최저 혹은 최고온도와의 차이 값이 사용되어야 한다.

표 2.7 온도의 범위

기후	강교(강바닥판)	합성교(강거더와 콘크리트바닥판)	콘크리트교
보통	-10° 에서 50°C	-10° 에서 40°C	-5° 에서 35°C
한랭	-30° 에서 50°C	-20° 에서 40°C	-15° 에서 35°C

10.1.2 가설 기준온도

교량이나 교량부재의 가설 기준온도는 가설 직전 24시간 평균값을 사용하여야 한다.

10.1.3 계절별 온도변화

계절별 온도 변화는 가설지점이나 가장 가까운 기상청의 자료를 사용할 수 있다.

10.2 온도경사(TG)

(1) 바닥판이 콘크리트인 강재나 콘크리트 상부구조에서 수직온도경사는 그림 2.3과 같이 택한다. 그림 2.3에서 A의 제원은 다음과 같다.

두께가 400 mm 이상인 콘크리트 상부구조물의 경우,

A = 300 mm

400 mm 이하의 콘크리트단면의 경우,

A = 실제 두께보다 100 mm 작은 값

강재로 된 상부구조물인 경우,

A = 300 mm, t = 콘크리트 바닥판의 두께

(2) 상부의 온도가 높을 때의 T_1과 T_2의 값은 표 2.8과 같다. 하부의 온도가 높을 때의 값은 표 2.8에 정해진 값에 콘크리트 포장에는 -0.3을, 아스팔트포장에는 -0.2를 곱하여 구한다.

(3) 현장조사에 의하여 T_3의 값을 정하지 않는 경우, T_3의 값은 영(0 ℃)으로 하여야 한다. 그러나 3 ℃를 넘어서는 안 된다.

(3) 온도경사를 고려할 때 양 또는 음의 온도변화에 의한 내부응력과 구조변형은 KDS 24 10 11(4.6.13)에 의하여 결정하여야 한다.

표 2.8 온도경사 기본값

T_1(°C)	T_2(°C)
23	6

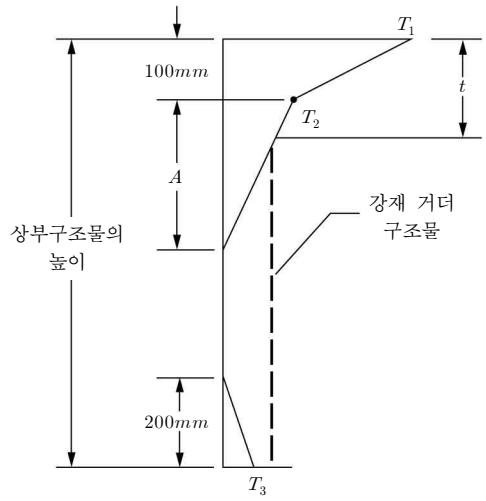


그림 2.3 콘크리트와 강재상부구조물에 발생하는 온도의 수직변화곡선

11. 지진의 영향: EQ

지진의 영향에 대해서는 KDS 24 17 11에서 정하는 바에 따른다.

12. 정수압, 유수압, 부력, 파압: WA, BP, WP

12.1 정수압

정수압은 수압을 지지하고 있는 구조물의 벽면에 직각으로 작용한다고 가정한다. 압력은 작용점으로부터 연직상방 수면까지의 거리에 물의 밀도와 중력가속도 (g)를 곱하여 계산된다. 다양한 한계상태의 설계수위는 발주자에 의해 규정된 것이거나 승인 받은 것이어야 한다.

12.2 유수압

12.2.1 종방향

(1) 하부구조물에 종방향으로 작용되는 유수에 의한 압력은 식 (2-8)과 같이 구한다.

$$p = 0.514 C_D V^2 \qquad (2\text{-}8)$$

여기서, p= 유수에 의한 압력(kN/m^2)

C_D= 표 2.8에 의해 주어지는 교각의 기하학적 형상에 따른 항력계수

V = 설계홍수시의 설계유속(m/s)

표 2.9 항력계수

교각의 단면 형상	C_D
반원형(선단) 교각	0.7
사각형 교각	1.4
부유물질이 부착・집적된 교각	1.4
쐐기형 선단 교각(선단각 90°이하)	0.8
타원형	0.4

(2) 종방향 항력은 종방향 동수압과 흐름에 노출된 투영면적을 곱하여 구한다.

12.2.2 횡방향

(1) 교각단면의 종축에 θ의 각도로 접근하는 흐름이 하부구조에 미치는 횡방향 등분포 압력은 식 (2-9)와 같이 구한다.

$$p = 0.514 C_L V^2 \qquad (2\text{-}9)$$

여기서, p = 횡방향 압력(kN/m^2)

C_L= 횡방향 항력계수(표 2.9)

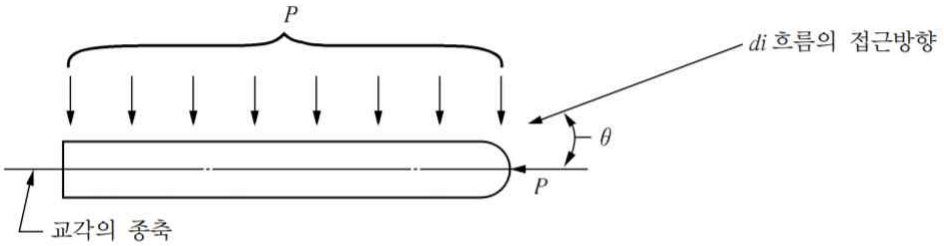


그림 2.4 동수압을 보여 주는 교각의 평면도

표 2.10 횡방향 항력계수

흐름과 교각의 종축이 이루는 각도, θ	C_L
0°	0.0
5°	0.5
10°	0.7
20°	0.9
≥ 30°	1.0

(2) 횡방향 항력은 횡방향 동수압과 흐름에 노출된 면적의 곱으로 구한다.

12.3 부력(BP)

부력은 양압력으로 간주되며, 12.1에 기술된 바와 같이 설계수면고 하부의 모든 구조물에 작용하는 정수압의 연직상방분력의 합으로 취한다.

12.4 파압(WP)

상당한 파력이 발생하는 지역에서 파랑에 노출된 교량구조물에 대해서는 이의 영향을 고려하여야 한다.

12.5 세굴에 대한 한계상태에서의 기초의 변화

KDS 24 10 11(2.6.4(4))의 규정이 적용된다. 세굴설계홍수로 인한 기초상태 변화의 영향은 교량의 극한한계상태 및 사용한계상태 검토 시 고려한다. 세굴검측홍수 및 태풍에 의한 기초상태 변화의 영향은 극단상황한계상태 검토 시 고려한다.

13. 설하중 및 빙하중: IC

설하중 및 빙하중은 1.0kN/m^{2}으로 하되, 가설지점의 실제 상황에 따라 적당한 값을 정할 수 있다.

14. 지반변동 및 지점이동의 영향: GD, SD

하부 구조물들 사이 또는 하부구조물의 세부구조들 사이에서 발생하는 최대 부등침하에 의한 하중을 고려하여야 한다. 침하량의 산정은 KDS 24 14 51(3.3.2.3)에 따라 계산한다.

15. 원심하중: CF

(1) 고가구조물상의 궤도가 일부 또는 전 구간에 걸쳐 곡선부를 갖는 경우에는 원심력을 고려한다.

(2) 원심력은 경전철 열차하중에 식 (2-10)에서 계산되는 계수 α를 곱한 값으로 한다.

$$\alpha = \frac{V^2}{127\,R} \qquad (2\text{-}10)$$

여기서, V : 설계속도(km/h)

R : 선로 곡선반경 (m)

(3) 원심하중은 레일 상면에서 경전철 차량 무게중심의 높이에 수평방향으로 곡선 바깥쪽으로

작용하도록 해야 한다.

(4) 원심하중에는 충격계수를 고려하지 않는다.

(5) 원심하중과 횡하중이 동시에 작용하는 경우 큰 쪽의 하중이 작용하는 것으로 가정한다.

16. 가설 시 하중: ER

교량 가설 시에는 가설단계별 가설방법과 가설중의 구조를 고려하여 자중, 가설장비, 기자재, 바람, 지진의 영향 등 모든 재하조건에 대한 안전도 검토를 수행하여야 한다.

17. 차량충돌하중: CT

17.1 구조물의 보호

구조물이 아래와 같이 충돌로부터 보호된 경우 차량충돌하중을 적용시킬 필요가 없다.

(1) 제방

(2) 구조적으로 독립된, 충돌에 강한 높이 1,370 mm가 넘는 방호울타리가 보호받아야 할 구조물로부터 3,000 mm 내에 있는 경우

(3) 높이 1,070 mm인 방호울타리가 보호받아야 할 구조물로부터 3,000 mm 이상 떨어져 있는 경우

(4) 이러한 경우 방호울타리는 구조적, 기하적으로 도로안전시설 설치 및 관리 지침의 규정에 따라야 한다.

17.2 구조물과 차량이나 열차의 충돌

17.1에서 허용된 경우를 제외하고 도로의 가장자리로부터 9,000 mm 내에 위치하거나, 궤도의 중심선으로부터 15,000 mm 거리 내에 위치한 교대나 교각은 1,800 kN 크기의 등가정적 하중에 대해 설계된다. 이 하중은 노면상 1,200 mm 높이에서 수평으로 임의의 방향으로 작용할 수 있다.

18. 선박충돌하중: CV

KDS 24 12 21을 준용한다.

19. 시제동하중: SB

(1) 열차의 시동하중은 차량하중의 15%로 하고, 열차 주행면 혹은 레일면에서 열차 진행 반대 방향으로 수평되게 작용하는 것으로 한다.

(2) 열차의 제동하중은 차량하중의 15%로 하고, 열차 주행면 혹은 레일면에서 열차 진행 방향으로 수평되게 작용하는 것으로 한다.

(3) 이때, 차량하중은 고가구조물의 경간 구성에 따라 부재에 최대영향을 주는 차량하중 재하길이를 고려하여 산정한다.

(4) 복선 이상의 경우 단선재하 상태에서 검토하며, 시동하중 혹은 제동하중 중 큰 쪽의 하중이 작용하는 것으로 한다. 여기에서 충격은 고려하지 않는다.

(5) 시제동하중은 열차하중과 조합하여 검토되어야 한다.

20. 열차의 탈선하중 : DR

(1) 철제차륜형 경전철 고가구조물의 경우, 경전철 열차하중을 선로중심에서 1.5m씩 편기하여 작용시켜 단면을 검토하고, 복선의 경우, 반대편 선로에 경전철 열차하중을 재하한다.

(2) 별도의 안내궤조를 갖는 고무차륜형, 모노레일형 혹은, 자기부상형 경전철의 경우에는 탈선하중 검토를 생략한다.

21. 장대레일 종하중(철제차륜형) : LR

(1) 고가구조물상의 궤도에 장대레일을 적용하는 경우 궤도에 있어서 궤도와 슬래브 각각에서의 신축이음 적용여부에 따라 종방향 응력 결과가 다르다.

(2) 이러한 응력은 궤도에서부터 슬래브 위쪽 면으로 마찰 등에 의해 전달되거나 상호 작용하게 된다.

(3) 식 (2-11), 식 (2-12)는 한쪽 끝단에 고정받침을 가지는 자갈도상이 있는 상부구조에 사용될 수 있다.

① 레일신축이음장치가 없을 경우

$f_{v0} = \pm 3L\ (kN)$ (1레일 당) (2-11)

여기서, L =슬래브의 팽창이 고려될 수 있는 길이

② 구조물의 가동끝단에서 레일 신축이음이 있는 경우

$f_{v0} = \pm 500\ (kN)$ (1레일 당) (2-12)

(4) 식 (2-13), 식 (2-14)는 한쪽 끝단에 고정받침을 가지는 콘크리트도상이 있는 상부구조에 사용될 수 있다.

① 레일신축이음장치가 없을 경우

$f_{v0} = \pm 6L\ (kN)$ (1레일 당) (2-13)

여기서, L =슬래브의 팽창이 고려될 수 있는 길이

② 구조물의 가동끝단에서 레일 신축이음이 있는 경우

$f_{v0} = \pm 1{,}000\ (kN)$ (1레일 당) (2-14)

(5) 기타 다른 특별한 경우는, 그에 합리적으로 적용될 수 있는 특별한 해석을 수행해야 한다.

3장 설계하중조합(한계상태설계법)

1. 하중계수와 하중조합

(1) 하중계수를 고려한 총 설계하중은 다음과 같이 결정된다.

$$Q = \Sigma \eta_i \gamma_i \ Q_i \qquad (3\text{-}1)$$

여기서, η_i = 하중수정계수 (KDS 24 10 11(1.3.2) 참조)

Q_i= 하중 또는 하중효과

γ_i = 하중계수 (표 3.1 및 표3.2 참조)

(2) 고가구조물의 부재들과 연결부들은 다음의 각 한계상태에서 규정된 극한하중효과의 조합들에 대하여 식 (3-1)에 의해 검토하여야 한다.

① 극한한계상태 하중조합 Ⅰ: 일반적인 차량통행을 고려한 기본하중조합. 이때 풍하중은 고려하지 않는다.

② 극한한계상태 하중조합 Ⅱ: 발주자가 규정하는 특수차량이나 통행허가차량을 고려한 하중조합. 풍하중은 고려하지 않는다.

③ 극한한계상태 하중조합Ⅲ: 거더 높이에서의 풍속 25 m/s를 초과하는 설계. 풍하중을 고려하는 하중조합

④ 극한한계상태 하중조합Ⅳ: 활하중에 비하여 고정하중이 매우 큰 경우에 적용하는 하중조합

⑤ 극한한계상태 하중조합 Ⅴ: 차량 통행이 가능한 최대 풍속과 일상적인 차량통행에 의한 하중 및 궤도 구조 상호작용과 관련된 효과를 고려한 하중조합

⑥ 극단상황한계상태 하중조합 Ⅰ: 지진하중을 고려하는 하중조합

⑦ 극단상황한계상태 하중조합 Ⅱ: 빙하중, 선박 또는 차량의 충돌하중 및 감소된 활하중을 포함한 수리학적 사건에 관계된 하중조합. 이때 차량충돌하중 CT의 일부분인 활하중은 제외된다.

⑦ 극단상황한계상태 하중조합Ⅲ: 열차 탈선을 고려하는 하중조합

⑧ 사용한계상태 하중조합 Ⅰ: 고가구조물의 정상 운용 상태에서 발생 가능한 모든 하중의 표준값과 25 m/s 의 풍하중을 조합한 하중상태이며, 고가구조물의 설계 수명 동안 발생 확률이 매우 적은 하중조합이다. 이 하중조합은 철근콘크리트의 사용성 검증에 사용할 수 있다.

⑨ 사용한계상태 하중조합 Ⅱ: 차량하중에 의한 강구조물의 항복과 마찰이음부의 미끄러짐에 대한 하중조합

⑩ 사용한계상태 하중조합Ⅲ: 고가구조물의 정상 운용 상태에서 설계 수명 동안 종종 발생 가능한 하중조합이다. 이 조합은 부착된 프리스트레스 강재가 배치된 상부구조의 균열폭과 인장응력 크기를 검증하는데 사용한다.

⑪ 사용한계상태 하중조합IV: 설계수명 동안 종종 발생 가능한 하중조합으로 고가구조물 특

성상 하부구조는 연직하중보다 수평하중에 노출될 때 더 위험하기 때문에 연직 활하중 대신에 수평 풍하중을 고려한 하중조합이다. 따라서 이 조합은 부착된 프리스트레스 강재가 배치된 하부구조의 사용성 검증에 사용해야 한다. 물론 하부구조는 사용하중조합III에서의 사용성 요구조건도 동시에 만족하도록 설계하여야 한다.

⑫ 사용한계상태 하중조합V: 설계수명 동안 작용하는 고정하중과 수명의 약 50 %기간 동안 지속하여 작용하는 하중을 고려한 하중조합

⑬ 피로한계상태 하중조합: 반복적인 차량하중과 동적응답에 의한 피로파괴를 검토하기 위한 하중조합

(3) 이 기준의 하중조합들에 적용되는 하중계수는 표 3.1에 정리되어 있다. 설계 시 적절한 모든 하중조합들에 대한 검토가 이루어져야 할 것이다.

(4) 하중계수들은 최대하중조합효과가 계산되도록 선정되어야 하며, 각 하중조합에서 정과 부의 극한상태가 모두 검토되어야 한다. 한 하중이 다른 하중의 효과를 감소시키는 하중조합에서는 그러한 하중에 최소하중계수를 적용하여야 한다. 상시하중효과에 대해서는 표 3.2에 제시된 두 가지 하중계수중에서 큰 하중조합효과를 주는 하중계수가 적용되어야 한다. 반면에 상시하중효과가 구조물의 안정성이나 내하성능의 증가를 가져오는 경우에는 최소 하중계수가 적용되어야 한다.

(5) TU, CR 및 SH하중에 제시된 두 가지 하중계수중에서 큰 값은 변형량 계산에 적용되며, 나머지 모든 경우에는 작은 값이 적용된다.

(6) 뒤채움이나 얕은 기초 또는 깊은 기초의 설치와 관계없이 사면의 전체 안정성은 , KDS 24 14 41(4.1.2)에서 규정된 적절한 저항계수와 사용하중조합- Ⅰ에 근거하여 평가되어야 한다.

(7) 온도 경사에 대한 하중계수(γ_{TG})와 침하에 대한 하중계수(γ_{SD})는 공사별 특별시방에 의해 결정하여야 한다. 공사별 하중계수값이 없는 경우에 γ_{TG}는 다음과 같이 결정한다.

① 극한한계상태와 극단상황한계상태 조합－0.0 (고려하지 않음.)

② 활하중이 고려되지 않는 사용한계상태조합 - 1.0

③ 활하중이 고려되는 사용한계상태조합－0.5

(8) 세그먼트방식으로 가설되는 고가구조물에서는 사용한계상태에 대하여 식 (3-2)의 하중조합이 고려되어야 한다.

$$DC + DW + EH + EV + ES + WA + CR + SH + TG + PS \qquad (3\text{-}2)$$

(9) 극단상황한계상태조합 Ⅰ에서의 활하중계수(γ_{EQ})는 공사별 특별시방에 의해 결정하여야 한다.

표 3.1 하중조합과 하중계수

한계상태 하중조합	DC DD DW EH EV ES EL PS CR SH	LL IM PL LS	WA BP WP	WS	WL	TU	TG	GD SD	CF (LF)	SB LR	이 하중들은 한번에 한가지만 고려 γ_p				
											EQ	IC	CT	CV	DR
극한 I	γ_p	1.65	1.00	-	-	0.50/1.20	γ_{TG}	γ_{SD}	1.35	-	-	-	-	-	-
극한 II	γ_p	1.40	1.00	-	-	0.50/1.20	γ_{TG}	γ_{SD}	1.35	-	-	-	-	-	-
극한 III	γ_p	-	1.00	1.40	-	0.50/1.20	γ_{TG}	γ_{SD}	-	-	-	-	-	-	-
극한 IV - EH, EV, ES, DW DC만 고려	γ_p	-	1.00	-	-	0.50/1.20	-	-	-	-	-	-	-	-	-
극한 V	γ_p	1.35	1.00	0.40	1.00	0.50/1.20	γ_{TG}	γ_{SD}	1.35	1.40	-	-	-	-	-
극단상황 I	γ_p	γ_{EQ}	1.00	-	-	-	-	-	-	-	1.00	-	-	-	-
극단상황 II	γ_p	0.50	1.00	-	-	-	-	-	-	-	-	1.00	1.00	1.00	-
극단상황 III	1.00	1.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.00
사용 I	1.00	1.00	1.00	0.30	1.00	1.00/1.20	γ_{TG}	γ_{SD}	1.00	1.00	-	-	-	-	-
사용 II	1.00	1.30	1.00	-	-	1.00/1.20	-	-	1.30	-	-	-	-	-	-
사용 III	1.00	1.00	1.00	-	-	1.00/1.20	γ_{TG}	γ_{SD}	1.00	1.00	-	-	-	-	-
사용 IV	1.00	-	1.00	0.70	-	1.00/1.20	-	1.00	-	-	-	-	-	-	-
사용 V	1.00	-	-	-	-	0.50	-	-	-	-	-	-	-	-	-
피로 - LL, IM & CF만 고려	-	1.00	-	-	-	-	-	-	1.00	-	-	-	-	-	-

표 3.2 하중기호

기호	정의	기호	정의
DC	구조부재와 비구조적 부착물	WP	파압
DD	말뚝부마찰력	WS	구조물에 작용하는 풍하중
DW	포장과 설비의 고정하중	WL	풍하중에 의한 활하중
EH	수평토압	TU	단면평균온도
EV	연직토압	TG	온도 경사
ES	상재토하중	GD	지반변동의 영향
EL	시공중 발생하는 구속응력	SD	지점이동의 영향
PS	프리스트레스 힘	CF	원심하중
CR	크리프	SB	시제동하중
SH	건조수축	LR	종하중
LL	차량활하중	EQ	지진하중
IM	충격하중	IC	빙하중
PL	보도활하중	CT	차량 충돌하중
WA	정수압과 유수압	CV	선박 충돌하중
BP	부력 또는 양압력	DR	탈선하중

표 3.3 γ_p에 관한 하중계수

하중의 종류	하중계수	
	최대	최소
DC : 구조부재와 비구조적 부착물	1.25 1.50(극한한계상태 조합IV에서만)	0.90
DD : 말뚝부마찰력	1.80	0.45
DW : 보도부와 시설물	1.50	0.65
EH : 수평토압 주동 정지	 1.50 1.35	 0.90 0.90
EV : 연직토압 전체 안정성 옹벽 및 교대 강성 암거 (예, 콘크리트 박스) 뼈대형 강성구조물 (예, 라멘형) 연성 암거 (예, 파형강관) 박스형 연성 강재암거	 1.00 1.35 1.30 1.35 1.95 1.50	 - 1.00 0.90 0.90 0.90 0.90
ES : 상재토하중	1.50	0.75
EL : 시공중 발생하는 구속응력	1.0	1.0
PS : 프리스트레스힘 세그멘탈콘크리트고가구조물의 상부, 하부구조 비세그멘탈콘크리트고가구조물 상부구조 비세그멘탈콘크리트고가구조물 하부구조 - I_g를 사용하는 경우 - $I_{effective}$를 사용하는 경우 강재 하부구조	 1.0 1.0 0.5 1.0 1.0	
CR, SH : 크리프, 건조수축 세그멘탈콘크리트고가구조물의 상부,하부구조 비세그멘탈콘크리트고가구조물 상부구조 비세그멘탈콘크리트고가구조물 하부구조 - I_g를 사용하는 경우 - $I_{effective}$를 사용하는 경우 강재 하부구조	 DC에 대한 γ_p 사용 1.0 0.5 1.0 1.0	

2. 가설 시 하중에 대한 하중계수

(1) 구조물과 부속물의 중량에 대한 하중계수는 1.25 이상의 값을 택해야 한다.

(2) 발주자에 의해 특별히 제시되지 않은 경우에는 시공하중, 설비하중 그리고 동적효과에 대한 하중계수는 1.5 이상의 값을 택해야 한다. 풍하중에 대한 하중계수 는 1.25 이상의 값이어야 한다. 모든 다른 하중계수들은 1.0을 택한다.

3. 받침인상과 포스트텐션힘을 위한 하중계수

(1) 발주자에 의해 정하지 않았다면, 사용하는 설계인상력을 받침인상위치에 가장 가까운 지점에 발생하는 고정하중에 의한 반력의 1.3배보다 작아서는 안 된다. 받침인상작업 시 교통통제가 이루어지지 않은 경우에는 활하중계수를 곱한 활하중에 의한 반력을 포함하여야한다.

(2) 포스트텐션의 정착부에 대한 설계력은 최대긴장력의 1.2배를 택한다.

4장 재료

1. 강재

(1) 강교의 재료 일반사항은 KDS 14 31 05의 사항을 따른다.

2. 콘크리트

(2) 콘크리트교의 재료 일반사항은 KDS 24 14 21의 사항을 따른다.

5장 설계

1. 사용성 및 내구성

KDS 24 10 10의 사항을 따른다.

2. 운행을 위한 한계조건

2.1 주행안전성 및 승차감 검토 일반

(1) 이 규정은 경전철 고가구조물의 열차하중에 대한 주행안전성, 승차감 및 고가구조물의 동적 안전성 확보를 위한 것이다.

(2) 고가구조물의 첫 번째 휨 고유진동수가 3.0 Hz 이하일 경우 동적해석에 의한 검토를 수행한다. 우선 2.2(2)항에 따라 공진이 발생되는 임계속도를 계산하여 설계속도 내에서 실 운행열차에 대하여 공진발생 가능성이 있으면 이 규정에 의한 동적거동 검토를 수행하되, 경전철 편성 차량 수가 최대 3량 이내인 경우 공진 검토를 생략할 수 있다.

(3) 실 운행열차하중에 의한 동적거동은 속도별 최대응답을 검토하며, 검토항목은 상판의 연직가속도, 교량의 연직처짐, 상판의 면틀림이다. 검토 및 모델링 방법은 2.2를 따르며, 각 항목의 검토기준은 2.3을 따른다.

2.2 주행안전성 및 승차감 검토를 위한 절차 및 방법

본 기준에서는 설계자의 해석 절차 및 방법에 따른 검토 상의 오류 및 차이를 방지하기 위해 다음과 같이 주행열차하중에 대한 동적해석 절차 및 방법을 정의한다.

(1) 고가구조물의 주행열차하중에 대한 동적해석은 시간이력해석 혹은 모드중첩법에 의한 동적해석을 적용한다. 시간간격은 작아야(절점과 절점사이 3회 이상 각 축이 재하될 수 있도록) 하며, 동적해석은 교량 시점부터 출발하여 열차가 교량을 완전히 통과할 때까지 시간간격별로 수행되어야 한다.

(2) 동적해석은 설계속도의 1.1배까지 10 km/h 간격으로 수행한다. 주행열차하중에 대한 동적해석 전에 자유진동해석을 수행하여 공진을 일으킬 수 있는 임계속도를 미리 산정하고 이 속도에 대한 해석도 반드시 포함하여 수행해야 한다. 임계속도 산정은 식 (5-1)과 같다.

$$V_{cr} = \omega_1 \times S_{eff} \qquad (5\text{-}1)$$

여기서, ω_1은 교량의 첫번째 휨 고유진동수이며, S_{eff}는 열차의 지배적 타격간격(차량간 중심간격)

(3) 대상열차하중은 해당 노선의 실제 운행열차에 대해 수행하며 하중크기 및 축간격을 실 운행열차와 동일하게 적용한다.

(4) 열차하중의 모델링은 연행이동집중하중으로 적용한다. 정밀해석이 필요한 경우 교량-열차 상호작용 고려가 가능한 다차원 열차 수치모델을 사용할 수 있으며 이 경우 해석 프로그램에 대한 신뢰성이 입증되어야 하며 이동집중하중에 의한 해석과 동시에 수행하여 비교해야 한다.

(5) 교량의 모델링은 연속교의 경우 전체 경간 구성을 모델링하며, 단순교가 병행 구성될 경우 단순교 1개에 대해서만 해석을 수행하며 지간이 상이한 단순교에 대해서는 모두 검토를 수행한다.

(6) 교량의 모델링은 그림 5.3에서 도시된 가속도 제한값을 검토하는 위치에서 직접적인 응답을 얻을 수 있으며 교량 단면내에서 변형이 고 려될 수 있도록 공간 뼈대요소 이상의 모델링 요소를 적용하여야 하며, 교량의 모델링에 사용되는 재료 및 단면특성치는 정적설계에서 적용한 값을 사용한다.

(7) 탄성받침을 교량받침 장치로 사용할 경우 강성이 무한대인 지점처리를 해서는 안 되며, 스프링요소 등을 사용하여 해당 탄성받침의 강성을 적용하여 해석해야 한다.

(8) 동적해석 시 자중 및 궤도구조의 질량 등 2차 고정하중을 포함한 모든 부재의 질량이 고려되어야 한다.

(9) 동적해석 시 하중재하는 단선, 복선교량에 관계없이 그림 5.1과 같이 단선재하로 하되 교량에서의 편심효과가 고려될 수 있도록 재하한다.

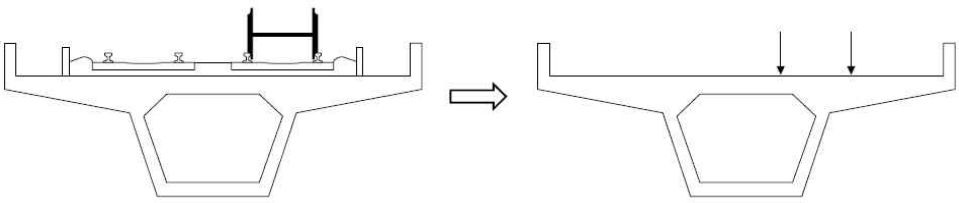


그림 5.1 하중재하 위치와 하중 모델링

(10) 도상에 의한 하중의 분포효과를 고려하여 그림 5.2와 같이 모델링 할 수 있다.

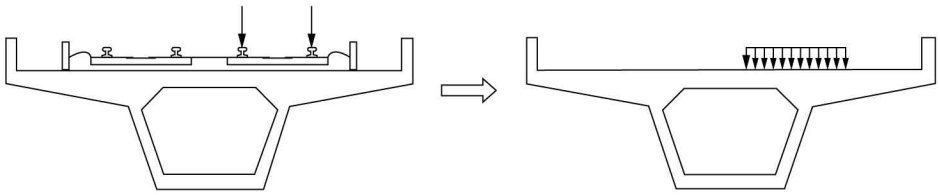


그림 5.2 도상의 하중 분포효과를 고려한 모델링

(11) 교량형식 별 감쇠비 적용은 표 5.1을 따른다. 표 5.1의 감쇠비는 각 형식별 감쇠비의 상한값이며, 이 이하의 값을 적용해야 한다. 단, 실험 등에 의한 정밀 분석 자료가 있을 경우 조정된 감쇠비를 적용할 수 있다.

표 5.1 구조형식별 감쇠비

교량형식	감쇠비(%)	
	경간<20 m	경간≥20 m
강구조(강판형교)	0.5+0.125(20-L)	0.5
강합성구조, PSC 구조	1.0+0.07(20-L)	1.0
철근콘크리트	1.5+0.07(20-L)	1.5

2.3 주행안전성 및 승차감 검토 기준

고가구조물의 주행열차하중에 대한 주행안전성은 교량의 연직가속도, 연직처짐 및 면틀림에 대한 검토를 수행하며, 승차감(진동사용성)에 대한 검토로선 연직처짐에 대한 검토를 수행한다.

(1) 교량 상판의 연직가속도

① 동적 구조해석 및 현장계측시 주행열차하중에 의해 발생하는 철도교량 상판의 최대 연직가속도 ②, ③에 따라 검토해야 하며, 그 결과 최대 연직가속도는 다음 값을 초과해서는 안된다.

가. 자 갈 궤 도 : 0.35 g

나. 콘크리트궤도 : 0.50 g

② 상기의 최대 연직가속도는 설계를 위한 해석 및 현장계측을 통한 안정성 검토에 모두 적용하며, 이때 고려하여야 할 진동수의 상한치는 다음 중 최댓값으로 한다.

가. 30Hz

나. 고유진동수의 1.5배

다. 3번째 진동모드

③ 하중재하 방법 및 해석방법은 2.2를 따르며, 그림 5.3과 같이 자갈도상의 경우에는 도상이 설치된 부분에 해당되는 교량상판 범위에, 콘크리트 도상의 경우에는 레일이 위치한 교량의 상판지점에서 검토하여야 한다.

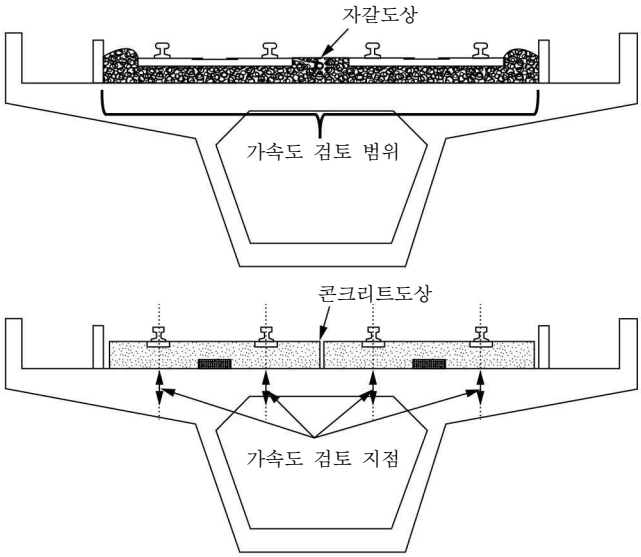


그림 5.3 가속도의 검토 범위 및 위치

(2) 교량의 연직처짐

① 주행안전성 및 승차감 평가를 위해 실 운행열차하중(단선 재하)에 의한 속도별 최대 연직처짐을 적용한다.

② 주행안전성에 대한 연직처짐 검토는 실 운행열차하중이 가장 불리하게 재하된 상태(복선 재하 포함)에서 식 (5-2)의 값으로 제한해야 한다.

$$\frac{f}{L} \leq \frac{1}{600} \qquad (5\text{-}2)$$

여기서, f : 교량 상판의 최대 처짐, L : 지간

상판의 최대 처짐검토를 위한 재하궤도수는 표 5.2를 따른다. 다만, 차량의 탈선 위험이 없는 자기부상형 경전철의 경우에는 적용하지 아니한다.

표 5.2 상판의 최대 처짐검토를 위한 하중 재하궤도수

궤도수		
1	2	3 이상
1	1 또는 2 (가장 불리한 경우를 재하)	1 또는 2 또는 3 이상 (가장 불리한 경우를 재하)

③ 승객의 승차감('매우 양호') 만족을 위한 실 운행열차하중 동적해석에 의한 최대 연직처짐은 $L/500$로 제한한다. 단, 자기부상 경전철에 대해서는 $L/1300$로 제안한다. 이는 경간 200 m까지 유효하며, 이 이상의 장대교량은 탈선에 대한 주행안전성 및 승객 승차감에 대해 교량-열차 상호작용해석을 통한 객차 내 연직 가속도 평가 등 세밀한 평가를 수행한다.

④ 하중재하 방법 및 해석방법은 2.2를 따르며 계산위치는 교량 전체에 대한 응답을 검토 후 최댓값을 결정한다.

⑤ 주행안전성에 대한 연직처짐과 승차감 검토를 위한 연직처짐, 두 가지 모두에 대한 검토를 수행한다.

(3) 면틀림

① 면틀림은 차륜과 레일의 접촉에 대한 안전을 확보하여 탈선 위험을 최소화하기 위한 것으로 교량의 교축직각방향 회전에 의한 캔트 변화(비틀림 각변화) 제한규정이다. 면틀림에 대한 규정은 1개 대차에 존재하는 4개 차륜이 같은 평면에서 벗어나지 않도록 제한하기 위한 것이다.

② 면틀림은 그림 5.4에서와 같이 3 m떨어진 두 지점에서의 양쪽레일에 대한 캔트의 변화량(mm/궤도 1 m)을 의미한다.

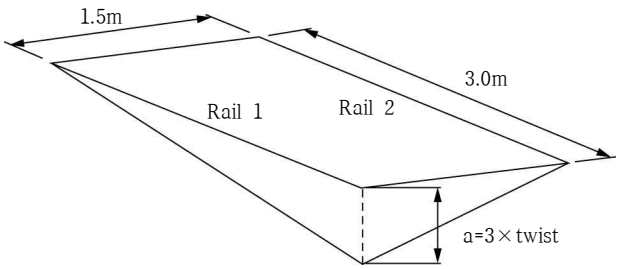


그림 5.4 면틀림의 정의

③ 면틀림 검토를 위해 실 운행열차하중을 2.2의 규정대로 단선재하하여 동적해석을 수행한다. 교량 종방향 레일부를 따라 검토하며, 임의의 속도에서의 최댓값 발생위치를 파악한 후 그 위치에서의 각 속도별 최댓값을 산출하여 검토한다.

④ 탈선 위험이 없는 고무차륜형·모노레일형·자기부상형 경전철의 경우에는 적용하지 아니한다.

⑤ 상판 면틀림은 표 5.3 규정을 따른다.

표 5.3 면틀림 기준

설계속도(V) (km/h)	면틀림 (mm/m)	3 m 기준 면틀림 변화량
실 운행열차 동적해석	0.4	1.2 mm/3 m

2.4 궤도/교량 종방향 상호작용력 검토

(1) 철체차륜형 경전철 고가구조물의 경우, 구조물 신축-레일신축과 관련한 구조물-레일-온도의 상호작용으로 인한 레일에서의 과도한 압축응력과 인장응력의 발생을 막기 위해서는 궤도, 체결구, 상부구조의 축강성 및 휨강성, 하부구조의 강성, 기초의 회전과 수평이동이 고려되는 상세해석에 의하여 장대레일 안정성이 확인되어야 한다.

(2) 장대레일 안정성 상세 검토방법은 철도설계지침 3.2 궤도-교량 종방향 상호작용 해석(2011년)을 따른다.

(3) 콘크리트궤도에서 교량의 변위발생에 따른 체결구의 압상(Uplift) 및 압축에 대한 안정성 검토는 철도설계지침 3.3 콘크리트궤도 교량 단부궤도 사용성 검토(2011년)를 따른다.

주 의

1. 이 최종보고서는 국토교통부에서 시행한 철도기술연구사업의 연구보고서입니다.

2. 이 최종보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 사업의 연구개발성과임을 밝혀야 합니다.

3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.

ISBN 91 9-11-90705-63-9