

20CTAP-
C143683
-03

보안 과제(), 일반 과제(O) / 공개(O), 비공개() 발간등록번호()
국토교통기술촉진연구사업 최종 보고서

R&D / 20CTAP-C143683-03

고무차륜 경전철 주행로의
환경소음 진동 저감을 위한
핵심기술 개발 최종보고서

고무차륜 경전철 주행로의 환경소음 진동 저감을 위한 핵심기술 개발 최종보고서

2020. 12. .

주관연구기관 / 한국철도기술연구원
협동연구기관 / 천운케도(주)

2020

국토교통과학기술진흥원
국토교통부

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통부장관(국토교통과학기술진흥원장) 귀하

‘고무차륜 경전철 주행로의 환경소음 진동 저감을 위한 핵심기술 개발’(연구개발기간 : 2018. 04. ~ 2020. 12.) 과제의 최종보고서 1부를 제출합니다.

2020 . 12 .

주관연구기관명 : 한국철도기술연구원
협동연구기관명 : 천운궤도(주)
위탁기관명 : 부산교통공사
광주도시철도공사

나희승
윤현석
김심인
오상근



(인)
(인)
(인)
(인)

주관연구기관책임자: 이일화
협동연구기관책임자: 윤현석
위탁기관책임자: 김심인, 오상근

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

제 출 문

국토교통부장관(국토교통과학기술진흥원장) 귀하

‘고무차륜 경전철 주행로의 환경소음 진동 저감을 위한 핵심기술 개발’(연구개발 기간 : 2018. 04. ~ 2020. 12.) 과제의 최종보고서 1부를 제출합니다.

2020 . 12 . .

주관연구기관명 : 한국철도기술연구원
협동연구기관명 : 천운궤도(주)
위탁기관명 : 부산교통공사
광주도시철도공사

나희승
윤현석
김심인
오상근



주관연구기관책임자: 이일화
협동연구기관책임자: 윤현석
위탁기관책임자: 김심인, 오상근

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.



제 출 문

국토교통부장관(국토교통과학기술진흥원장) 귀하

'고무차륜 경전철 주행로의 환경소음 진동 저감을 위한 핵심기술 개발'(연구개발 기간 : 2018. 04. ~ 2020. 12.) 과제의 최종보고서 1부를 제출합니다.

2020 . 12 .

주관연구기관명 : 한국철도기술연구원
협동연구기관명 : 천운궤도(주)
위탁기관명 : 부산교통공사
광주도시철도공사

나희승
윤현석
김심인
오상근

(인)
(인)
(인)
(인)



주관연구기관책임자: 이일화
협동연구기관책임자: 윤현석
위탁기관책임자: 김심인, 오상근

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

제 출 문

국토교통부장관(국토교통과학기술진흥원장) 귀하

‘고무차륜 경전철 주행로의 환경소음 진동 저감을 위한 핵심기술 개발’(연구개발 기간 : 2018. 04. ~ 2020. 12.) 과제의 최종보고서 1부를 제출합니다.

2020 . 12 . .

주관연구기관명 : 한국철도기술연구원
협동연구기관명 : 천운궤도(주)
위탁기관명 : 부산교통공사
광주도시철도공사

나희승
윤현석
김심인
오상근

(인)
(인)
(인)
(인)



주관연구기관책임자: 이일화
협동연구기관책임자: 윤현석
위탁기관책임자: 김심인, 오상근

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	20CTAP-C143 683-03	해당 단계 연구 기간	3차년도	단계구분	3/3
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명	창의도전연구분야(사회이슈 해결)			
연구과제명	대과제명	고무차륜 경전철 주행로의 환경소음진동 저감을 위한 핵심기술 개발			
	세부과제명				
연구책임자		해당단계 참여연구원 수	총: 26명 내부: 5명 외부: 21명	해당단계 연구비	정부: 200,000천원 민간: 66,750천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계: 266,750천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 26명 내부: 5명 외부: 21명	총 연구비	정부: 600,000천원 민간: 200,250천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계: 800,250천원
연구기관명 및 소속 부서명	한국철도기술연구원 첨단인프라연구팀			참여기업명 : 천운궤도(주)	
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위탁연구	연구기관명:부산교통공사, 광주도시철도공사			연구책임자:이일화	

※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음

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

9대 성과 등록·기탁번호

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

국가과학기술종합정보시스템에 등록된 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 115
고무차륜 경전철 주행로의 환경소음진동을 저감시키기 위한 방진주행로와 분기기의 재료, 구조, 시공법 개발 및 성능검증 - 고무차륜 주행로 유지보수 자료 분석 - 고무차륜 AGT 시스템(주행로, 분기기)의 진동 계측 - 고무차륜 AGT 방진주행로 및 분기기 설계기술 개발 - 주행로 방진재료 및 구조의 선정 - 차량하중에 대한 인터페이스 및 진동해석 - 주행로 전단저항구조 개발 - 고무차륜 AGT 분기기 시제품 제작 - 분기기 관련 설비, 급전, 신호시스템, 주행륜, 안내륜과의 인터페이스 분석 - 운행선 상 분기기 시험부설 - 차량주행시험을 통한 성능검증 및 개선 - 주행로용 색판 개선품 제작 및 성능 평가	

요약문

연구의 목적 및 내용	교통문제 해결을 위해 각 대도시 및 각 지자체들은 기존의 중전철보다 비용이 저렴하고 대규모 수송보다는 중규모의 수송을 필요로 하는 신교통시스템인 경전철 도입을 추진 중이다. 국내에 현재 도입되어 운행되고 있는 경전철 시스템은 인천공항의 자기부상열차, 대구시의 모노레일, 부산지하철 4호선 고무차륜 AGT, 의정부의 고무차륜 AGT, 인천공항여객터미널의 고무차륜 AGT 등이 있다. 고무차륜 AGT 시스템은 소음 진동에 유리한 교통시스템이기는 하나, 정온시설에는 이동 중에 의한 소음진동이 필연적으로 발생하기 때문에 이에 대한 대책을 수립할 필요성이 있다. 현재 국내에서는 고무차륜 주행로의 소음진동 저감대책은 수립되지 않은 상태이며 향후 저심도 구간 등에서의 소음진동으로 인한 민원 발생이 예상되어 이에 대한 문제를 사전에 대비하는 과제로서 민원분쟁의 해소와 더불어 유지관리 효율화에 기여하고자 한다.																																						
연구개발성과	- 고무차륜 AGT용 방진용 주행로 및 분기기 설계/시공기술 표준화 - 고무차륜 AGT 분기기 및 방진주행로 구간 환경진동 3dB(V)_p 이상 저감 - 고무차륜 AGT 분기기 제작비용 10% 이상 절감 - 고무차륜 AGT용 방진주행로 또는 분기기 신기술 인증 - 정온구간 또는 민원예상구간에 대한 선제적인 방진대책공법으로 적용 <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">구분</th><th rowspan="2">논문</th><th rowspan="2">특허</th><th rowspan="2">보고서 원문</th><th rowspan="2">연구 시설·장비</th><th rowspan="2">기술요약 정보</th><th rowspan="2">소프트 웨어</th><th rowspan="2">화합물</th><th colspan="2">생명자원</th><th colspan="2">신품종</th></tr> <tr> <th>생명 정보</th><th>생물 자원</th><th>정보</th><th>실물</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>예상성과 (N/Y)</td><td>Y</td><td>Y</td><td>Y</td><td>N</td><td>N</td><td>N</td><td>N</td><td>N</td><td>N</td><td>N</td><td>N</td></tr> </tbody> </table>											구분	논문	특허	보고서 원문	연구 시설·장비	기술요약 정보	소프트 웨어	화합물	생명자원		신품종		생명 정보	생물 자원	정보	실물	예상성과 (N/Y)	Y	Y	Y	N	N	N	N	N	N	N	N
구분	논문	특허	보고서 원문	연구 시설·장비	기술요약 정보	소프트 웨어	화합물	생명자원		신품종																													
								생명 정보	생물 자원	정보	실물																												
예상성과 (N/Y)	Y	Y	Y	N	N	N	N	N	N	N	N																												
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	- 향후 발주되는 국내외 고무차륜 AGT분야에 적용 - 고무차륜 AGT 시스템의 방진성능 확보																																						
국문핵심어 (5개 이내)	고무차륜	주행로	분기기	방진																																			
영문핵심어 (5개 이내)	rubber tired	runway	turnout	anti-vibration																																			

※ 국문으로 작성(영문 핵심어 제외)

< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요	6
가. 연구 개발 목적	6
(1) 최종 목표	6
(2) 최종 목표의 성격 및 설정 근거	6
(3) 연구개발과제의 설명	6
나. 연구 개발의 필요성	7
(1) 연구개발의 필요성	7
(2) 국내외 현황 및 연구동향	8
다. 연구 개발 범위	9
 2. 연구수행내용 및 성과	10
가. 방진주행로 설계	10
(1) 주행로 상태평가를 위한 차상시험	10
(2) 주행로 방진성능 향상 방안 검토	12
(3) 주행로 구조해석	13
(4) 차량하중에 대한 인터페이스 및 진동해석	19
(5) 방진주행로의 단면 설계	20
(6) 전단앵커 검토	26
나. 방진재 검토 및 선정	35
(1) 방진주행로 구조해석 및 진동해석	35
(2) 이음매부 응력해석	41
(3) 방진주행로의 시험부설	45
(4) 주행로 방진성능 평가	50
다. 주행로 색판 시제품 제작	59
(1) 기존 색판의 문제점 분석	59
(2) 색판 성능 개선	60
(3) 색판 시제품 제작	62

라. 밀착형 분기기 제작 및 성능 평가	64
(1) 수평안내식 분기기 문제점 분석	64
(2) 분기기 개량방안 선정	66
(3) 밀착형 분기기 설계	67
(4) 밀착형 분기기 시제품 제작 및 성능검토	77
(5) 밀착형 분기기 1차 시험 부설	83
(6) 1차 시제품 성능개선	86
(7) 밀착형 분기기 2차 시험 부설	93
마. 분기기 시공관련 타분야와의 인터페이스 분석	96
바. 논문 및 지적재산권 성과	105
(1) 논문 게재	105
(2) 특허 출원	105
(3) 특허 등록	106
(4) 기타	106

3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도 107

가. 목표 달성도	107
(1) 과제 목표	107
(2) 세부과제 성과목표	107
(3) 3차년도 성과목표 달성도	109
나. 관련 분야 기여도	111

4. 연구개발성과의 활용 계획 등 112

가. 연구성과의 활용방안	112
나. 연구개발 성과에 따른 파급효과	112
다. 연구개발 성과 홍보실적	112

붙임. 참고문헌 113

1. 연구개발과제의 개요

가. 연구개발 목적

(1) 최종 목표

- 고무차륜 경전철 주행로의 환경소음진동을 저감시키기 위한 방진주행로와 분기기의 재료, 구조, 시공법 개발 및 성능검증
 - 고무차륜 AGT 시스템의 소음진동특성 분석
 - 고무차륜 AGT 방진주행로 및 분기기 설계기술
 - 고무차륜 AGT 방진주행로 및 분기기 시제품
 - 분기기 관련 설비, 급전, 신호시스템, 주행륜, 안내륜과의 인터페이스 분석
 - 운행선(분기기 2틀) 및 시험선(방진주행로) 시험부설
 - 차량주행시험을 통한 성능검증 및 개선
 - 고무차륜 AGT용 방진용 주행로 및 분기기 설계/시공기술 표준화
 - 분기기 및 방진주행로 구간에 대하여 피크값 기준 환경진동 3dB(V) 이상 저감
 - 분기기 제작비용 10% 이상 절감

(2) 최종 목표의 성격 및 설정 근거

- 고무차륜 AGT 시스템은 소음진동에 유리한 교통시스템이기는 하나, 정온시설에서는 이동하중에 의한 소음진동이 필연적으로 발생하기 때문에 이에 대한 대책을 사전에 수립하여야 함
- 고무차륜 AGT 시스템은 현재 신림선에 건설중에 있으며, 광주 2호선, 사상-하단선은 설계중에 있어 약 3년 후에는 주행로 공사가 시작되기 때문에 그 전에 적용 가능단계 기술수준을 확보하는 것이 매우 중요
- 방진주행로의 개발은 세계 최초로 시도되는 것으로서 고무차륜 AGT 시스템의 핵심기술이 될 것이며, 분기기는 국내에서 최초로 설계 및 제작기술을 확보함으로써 국산화 달성 및 해외경쟁력 확보에 기여
- 고무차륜 AGT 방진주행로와 분기기의 제품개발을 통하여 기존대비 소음진동 3dB(V) 이상 및 생산비용 10% 이상 저감을 목표로 설정

(3) 연구개발과제의 설명

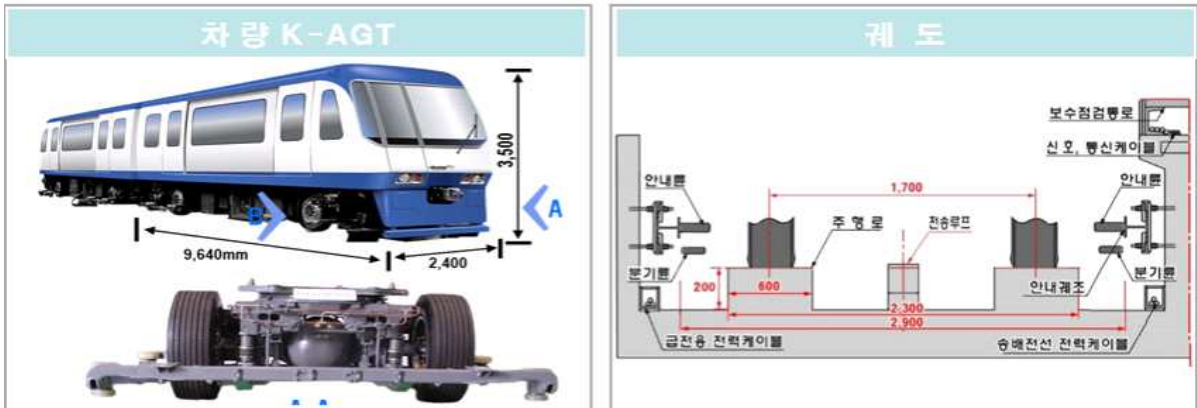
- 최근 교통문제 해결을 위하여 각 대도시 및 지자체들에서는 기존 중전철보다 비용이 저렴하고 대규모 수송보다는 중규모의 수송이 가능한 신교통시스템인 경전철도입을 추진중임
- 국내에 현재 도입되어 운행되고 있는 경전철 시스템은 인천공항의 자기부상열차, 대구시의 모노레일, 부산지하철 4호선의 고무차륜 AGT, 의정부의 고무차륜 AGT, 인천공항

터미널의 고무차륜 AGT 등이 대표적임



〈그림 1.1〉 각 국의 고무차륜 AGT 경전철

- 이 중에서 국내 경전철도 가장 많이 채택된 시스템은 단연 고무차륜 AGT 시스템임. 이 시스템은 고무바퀴와 안내궤조를 채택하여 탈선의 우려가 없고 등판능력과 곡선부 주행성능이 우수하여 급곡선 급구배의 도심구간 노선에 적합



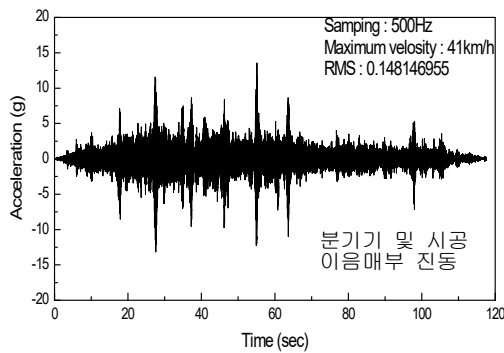
〈그림 1.2〉 고무차륜 AGT(Automatic guided transit) 시스템

- 고무차륜 AGT 시스템은 소음진동에 유리한 교통시스템이기는 하나, 정온시설에서는 이동하중에 의한 소음진동이 필연적으로 발생하기 때문에 이에 대한 대책을 사전에 수립하여야 함
- 이에 따라 고무차륜 AGT 방진주행로와 분기기의 제품개발을 통한 기존 대비 진동 3dB(V) 이상 및 생산비용 10% 이상 저감을 목표로 함

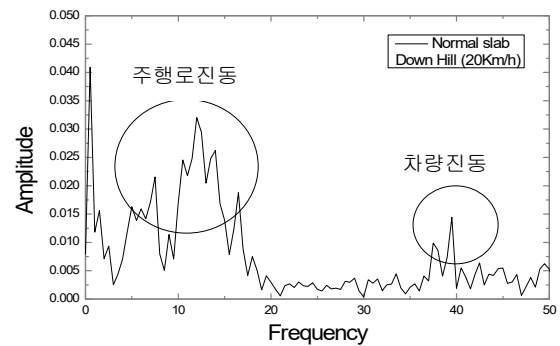
나. 연구 개발의 필요성

(1) 연구개발의 필요성

- 현재 국내에서는 고무차륜 주행로에 대한 소음진동저감대책이 수립되지 않은 상태임
- 고무차륜 주행로는 고무바퀴가 주행로에 직접 접촉하기 때문에 시설물의 상태에 따라 소음진동 발생이 결정됨. 대부분의 분기기와 주행로의 굴곡에 의해서 발생하며 최대피크가속도는 10g를 초과함. 〈그림 1.3〉은 주행로의 상태에 따른 진동가속도 시간이력값으로서 분기기 및 시공이음매부에서의 발생특성을 나타내며, 〈그림 1.4〉는 진동의 주파수성분이력에서도 진동에너지는 주행로의 상태에 의해서 주로 발생하는 것으로 확인됨



<그림 1.3> 고무차륜 차량의 시간이력특성



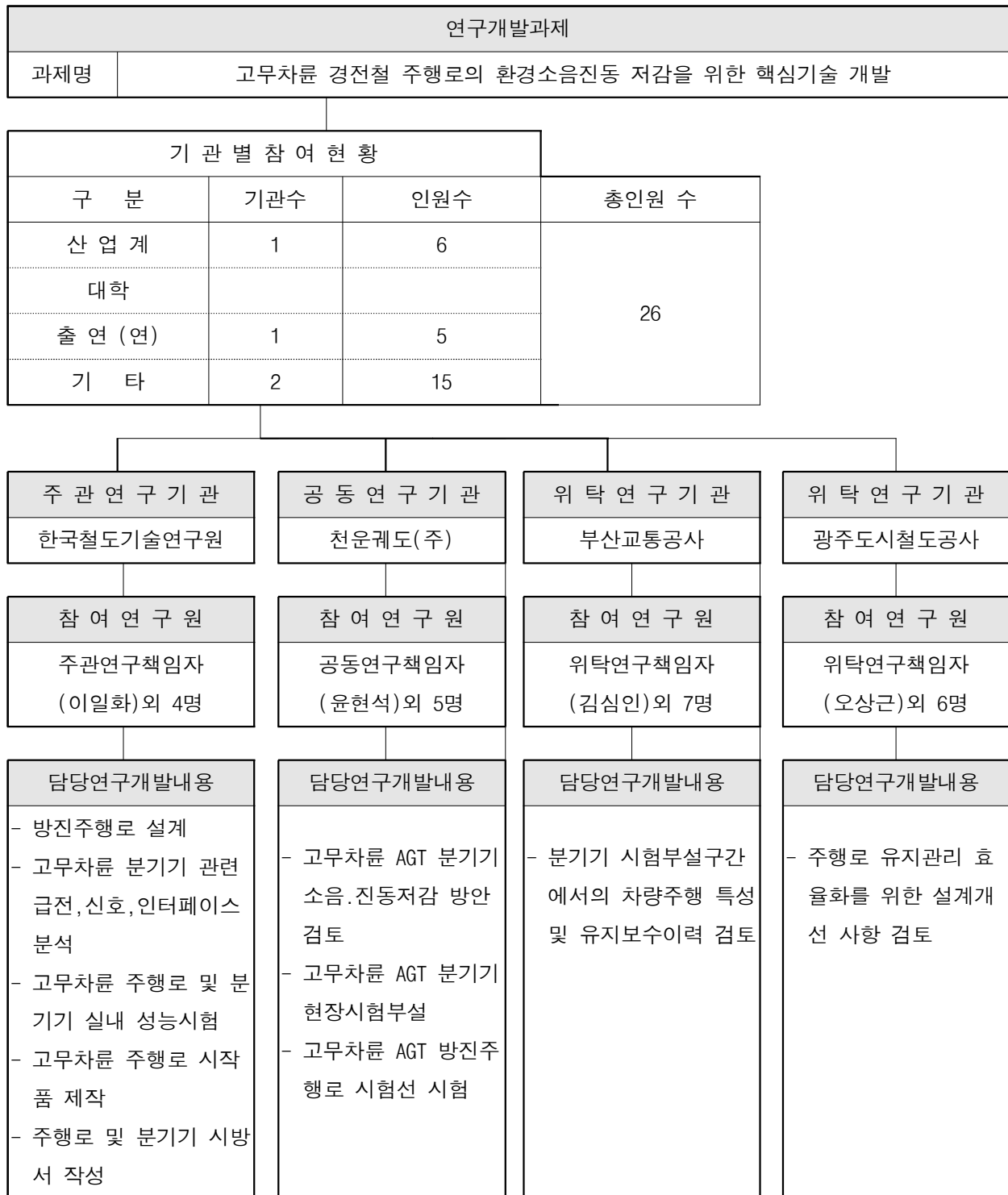
<그림 1.4> 고무차륜 차량의 주파수이력

- 고무타륜 AGT 시스템의 확장성을 확보하기 위하여 방진주행로 및 최적 분기기구조의 기술개발을 통하여 소음진동저감, 건설비 절감, 유지관리 효율화, 민원분쟁 해소 등의 목표 달성할 수 있음

(2) 국내의 현황 및 연구동향

- 국내 동향
 - 고무차륜 AGT 경전철시스템으로의 수요가 급격히 증가
 - 향후 서울 신림선, 광주지하철 2호선, 부산지하철 사상~하단, 부산지하철 노포~북정 구간 등을 비롯하여 연장 200km, 5,000억(궤도주행로) 규모 건설계획이 수립될 만큼 미래 경전철의 핵심시스템임
 - 향후 광주지하철 2호선 및 부산지하철 등에서의 분기기 수요현황은 부산교통공사가 현재 2도분기기 8틀, 3도분기기 29틀로 운행중 임으로 광주지하철은 2도분기기 12틀(2,842백만), 3도분기기 45틀(4,152백만) 정도가 소요될 것으로 판단됨. 또한 분기기는 내구수명이 도래하면 교환 및 개량 물량도 발생하게 되므로 국내의 경우, 연간 40억 수준의 비용 발생이 예상되며 국외의 경우에는 200억 이상의 비용발생이 예상됨.
 - 특히 고무차륜 AGT 시스템은 도입 당시 30년 전의 일본 시스템을 그대로 받아들여 국내에서 자체 개발된 고무차륜 AGT 차량(K-AGT)과는 시스템적으로 불일치하는 부분이 많아 운행중에 소음 및 진동이 다소 발생하고 있는 실정임. 약 3년 후에는 신규 주행로공사가 착공되므로 그 전에 적용가능 단계의 기술수준을 확보하는 것이 매우 중요
- 국외 동향
 - 국외에서도 다양한 고무차륜 AGT 시스템을 적용하고 있으나, 이에 대한 R&D가 매우 저조한 실정
 - 이에 해외 고무차륜 AGT 주행로의 진출에도 기술적 계기를 마련할 수 있음

다. 연구 개발 추진체계 및 범위



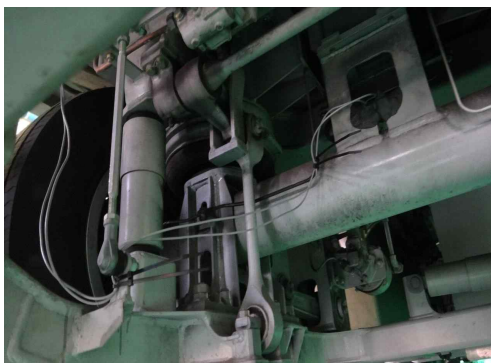
2. 연구수행내용 및 성과

가. 방진주행로 설계

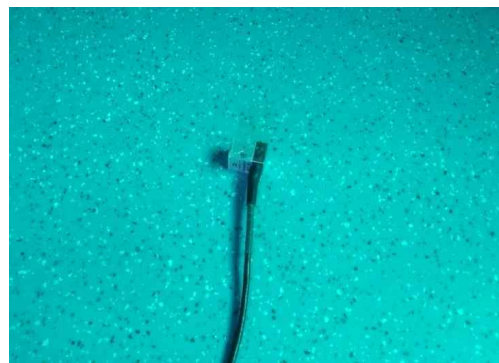
(1) 주행로 상태평가를 위한 차상시험

① 시험목적

현장타설형의 고무차륜 주행로의 성능을 평가하기 위해 주행시험을 통한 차상진동가속도의 특성을 분석하였다. 시험의 대상은 부산지하철 4호선 전 구간이며 진동가속도의 측정항목은 대차의 차체의 수직 진동가속도이다.



(a) 대차(수직) 진동가속도



(b) 차체 수직진동가속도

< 대차 및 차체에 부착된 진동가속도계 >

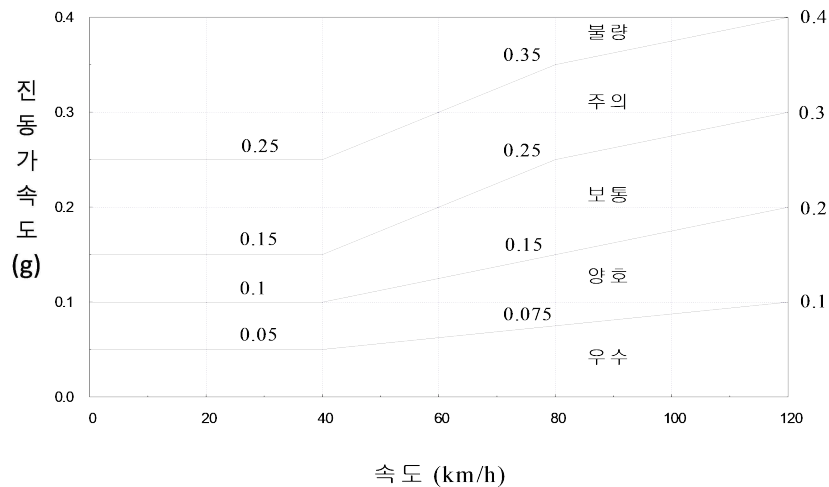
② 진동시험 규격

진동시험은 도시철도차량의 성능시험에 관한기준(국토해양부 고시 제2009-641호)의 제5조 제1항 제9호에 의거 수행하였다. 이 규격은 도시철도차량 주행시 차체에서의 진동가속도, 진동수 등의 진동특성 측정방법에 대해 규정하고 있다.

< 측정항목 및 측정위치 >

측정항목	측정위치
상하방향진동의 진동가속도 및 진동수	전·후위 대차중심상의 차체 바닥
좌우방향진동의 진동가속도 및 진동수	전·후위 대차중심상의 차체 바닥

측정방법은 10km/h부터 매 10km/h마다의 일정속도로 주행시켜 매 속도마다의 차체 및 대차(수직)가속도를 평가한다. 측정결과는 각 구간 진동가속도의 최대진폭(peak-peak, 2a)과 그 때의 속도를 구하며, 동일 속도마다 진동가속도 최대진폭의 평균치를 구하고, 주행속도를 가로축으로 진동가속도를 세로축으로 한 그래프를 도시한다. 이때의 진동가속도는 최대진폭으로 중력단위인 g로 하며, 평가기준은 다음 그림을 따르며 진동가속도는 보통 수준 이상이어야 한다.



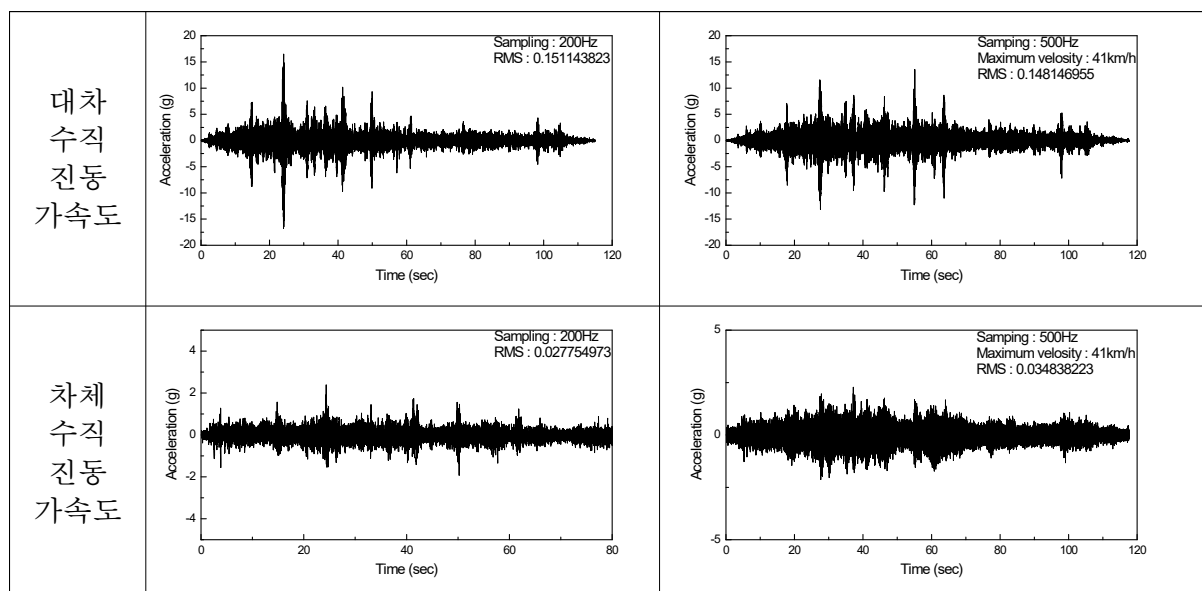
〈 상하방향 진동가속도 평가기준(차체) 〉

③ 시험 결과 및 분석

차량진동시험은 시험대상구간 통과시 주행방향, 속도대역, 부설구간별로 진동가속도의 시간이력 및 주파수이력특성을 중심으로 검토하였으며, 보다 상세한 검토를 위하여 일본 승차감기준을 준용한 lowpass filter를 사용한 자료와 전체 진동에너지의 크기수준을 검토하기 위한 RMS(Root Mean Square)자료 등을 활용하여 부산지하철 4호선 전 구간의 주행 성능특성을 평가하였다.

㉠ 부산지하철 본선구간 진동계측 데이터

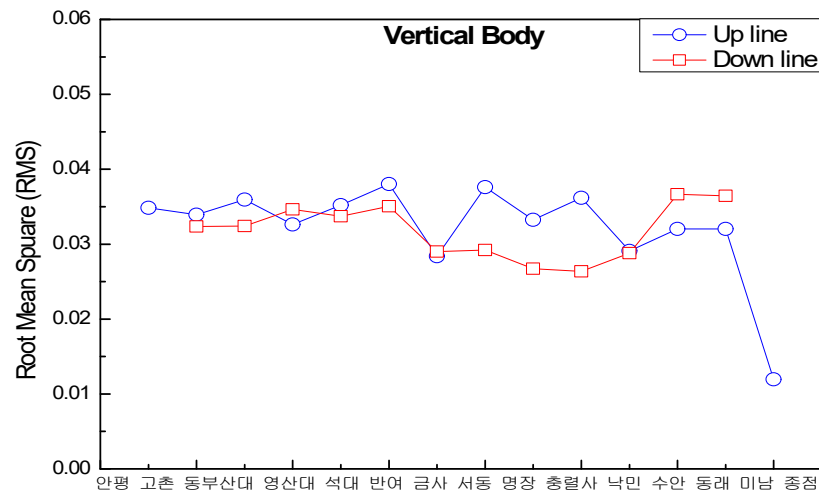
부산지하철 4호선 구간에서의 주행로 상태를 검토하기 위해 전 구간을 대상으로 대차 및 차체의 수직 진동가속도를 계측하였다.



〈 대표 진동가속도 계측 결과 (안평->고촌 구간, 최대속도 41km/h) 〉

진동가속도는 전체적으로 속도가 증가하면 그 값이 증가하는 것을 알 수 있으며, 구간별로 종구배에 의해 영향을 받기 때문에 진행 방향별 진동가속도의 차이가 발생한다. 특히, 대표 수직진동가속도 측정 결과(안평->고촌 구간)를 살펴보면 대차 및 차체의 수직진동가속도 값이 보통수준 0.15g을 상회 구간이 존재한다.

전체구간에서의 주행로상태를 판단하기 위하여 RMS(Root Mean Square)값을 비교하였다. 측정자료 중 500Hz sampling ratio를 아래 그림에 나타내었다.



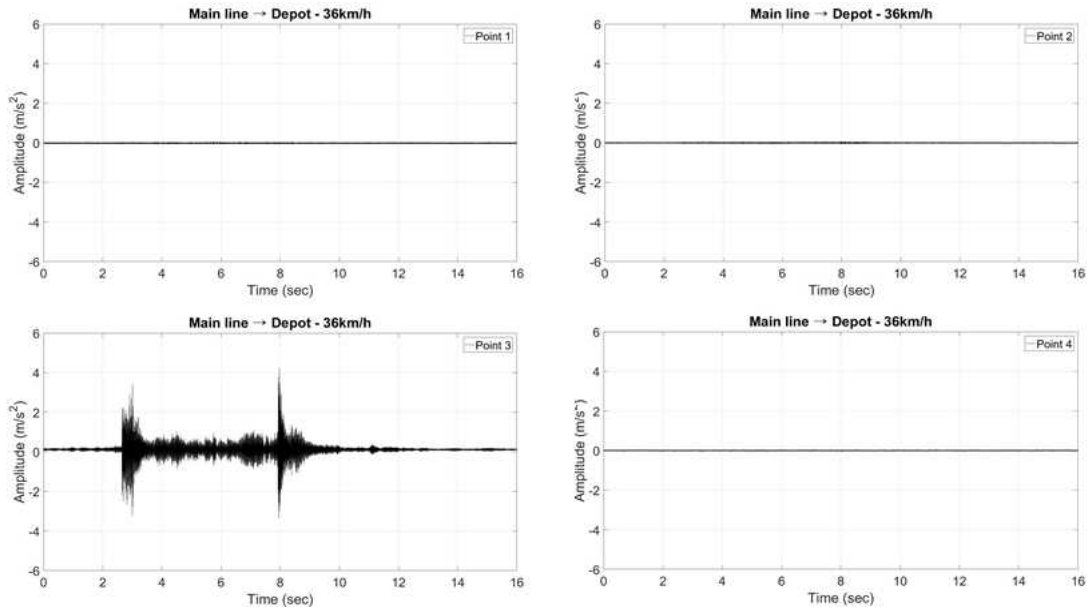
< 부산 4호선 진동가속도 측정 2차(500Hz) >

(2) 주행로 방진성능 향상 방안 검토

① 현장 진동가속도 측정 결과

고무차륜이 콘크리트 주행로를 지나갔을 때 각 위치에서 진동가속도 측정 값을 검토해보면, 3번 지점에서 고무차륜이 통과했을 때 가장 높은 9.78 m/s^2 의 진동가속도가 측정되었으며, 다른 지점에서는 진동이 작게 측정되었다. 3번 지점에서 진동가속도가 두 번 측정된 이유는 첫 번째 피크 지점은 고무차륜이 주행하면서 센서 위치에 다다르기 전에 고무차륜이 지면에 가하는 진동가속도의 최대값이며, 두 번째 피크 지점이 고무차륜이 통과할 때의 진동가속도의 최대값으로 판단된다. 타 연구 사례나 본 연구의 해석 결과에서도 이와 유사한 경향이 나타난 것을 확인할 수 있다.

3번 지점에서 속도에 따라 비교해보면 고무차륜이 시속 26 km/h로 통과 했을 때는 평균 4.08 m/s^2 의 진동가속도가 측정되었으며, 고무차륜이 시속 36 km/h로 통과 했을 때는 평균 4.87 m/s^2 의 진동가속도가 측정되었다. 고무차륜이 콘크리트 주행로를 통과 했을 때의 소음은 최대 84.8 dB로 측정되었다. 속도에 따라서 비교해보면 고무차륜이 시속 26 km/h로 지나갔을 때는 평균 78.9 dB이고, 고무차륜이 시속 36 km/h로 통과 했을 때는 평균 84.2dB로 측정되었다. 이 같은 소음 수치는 표에 나타나 있는 생활 진동 규제 기준을 넘는 수치로서 진동소음 문제가 야기될 것으로 판단되어, 콘크리트 주행로를 대체할 수 있는 새로운 주행로가 필요하다.



< 부산 4호선 진동가속도 현장계측 결과 >

< 최대 진동가속도 계측 결과 >

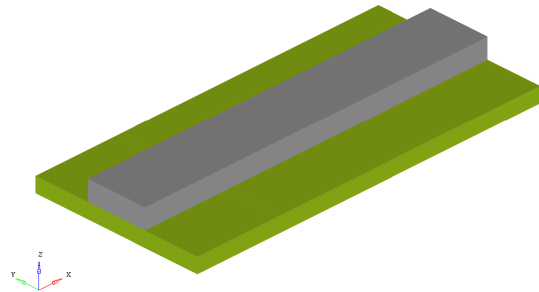
Case	Point 1 $A_{peak}(mm/s^2)$	Point 2 $A_{peak}(mm/s^2)$	Point 3 $A_{peak}(mm/s^2)$	Point 4 $A_{peak}(mm/s^2)$
No.1(36km/h)	0.07110	0.07813	5.2074	0.04769
No.1(36km/h)	0.06062	0.06297	4.222	0.05020
No.2(36km/h)	0.07681	0.07391	4.2398	0.05110
No.2(36km/h)	0.05731	0.08146	4.104	0.04855
No.3(36km/h)	0.06864	0.09290	5.163	0.05070
No.3(36km/h)	0.06037	0.05967	3.993	0.04903

(3) 주행로 구조해석

프리캐스트형(3D-PST)으로 제작된 고무차륜 주행로의 특성 해석 모델을 개발하고, 유한 요소해석을 이용하여 하중-처짐 및 진동 성능 등의 특성을 예측하기 위하여 실제 주행로 도면을 바탕으로 3D 모델링을 수행하였다.

① 주행로 3D CAD 모델링

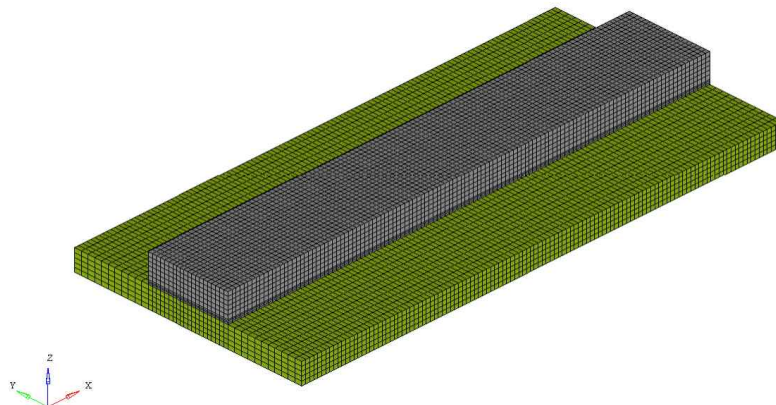
해석 대상인 고무차륜 AGT 시스템의 주행로에 대하여 3D 모델링을 수행하였다. 이를 위해 실물 사진과 CAD도면을 활용해 실제 사이즈와 동일한 프리캐스트형 고무차륜 주행로를 모델링하였다.



< 고무차륜 주행로의 실물 및 CAD 형상 >

② 고무차륜 주행로 구조해석 및 진동해석 모델 개발

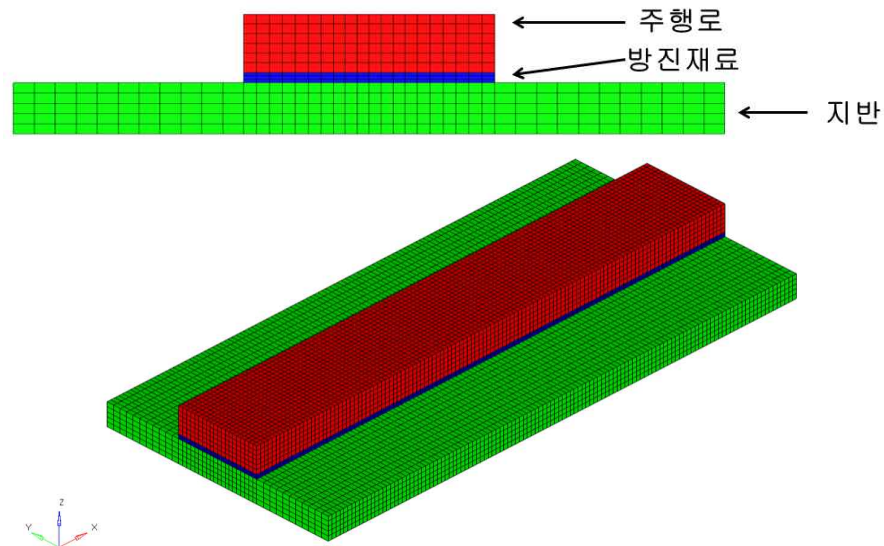
Altair 社의 상용 전처리 S/W인 Hypermesh 13.0을 이용하여 고무차륜 주행로의 유한요소모델을 생성하였다. 해석 모델의 간소화를 위하여 콘크리트 부의 전단앵커 및 배수관 등은 삭제하여 모델을 구성하였다. 또한, 콘크리트와 지반은 8절점 솔리드 요소인 C3D8을 사용하여 요소망을 생성하였고 그 크기는 평균 30mm이며, Geometry에 따라 최소 10mm로 구성하였다. 고무차륜 주행로의 유한요소모델은 다음과 같다.



< 고무차륜 주행로의 유한요소해석 모델 >

㉠ 방진주행로 유한요소해석 모델 구성

일반 고무차륜 주행로와 방진주행로의 구조 및 진동특성을 비교 분석하기 위하여 방진주행로의 유한요소해석 모델을 구성하였다. 일반 프리캐스트형(3D-PST)으로 제작된 고무차륜 주행로의 아래 방진성능이 우수한 방진재를 삽입하여 주행로 자체에서 진동을 감소하도록 설계된 주행로이다. 방진 재료는 edilon sedra 社가 제공하는 방진재료 4종 중 가장 강성이 높은 재료인 Corkelast VA-90을 선정하였다.



< 방진주행로 해석 모델 >

< 유한요소모델 정보 >

구성	Number of Nodes	Number of Elements
방진재	5,082	7,200
주행로/지반	49,035	39,600
합계	54,117	46,800

< 주행로 구성 요소 상세 치수 >

구성	너비(mm)	높이(mm)	길이(mm)	재질
주행로	600	170	3600	콘크리트
방진재	600	30	3600	고무/고무+철판
지반	1700	150	3600	콘크리트

< 주행로 물성 >

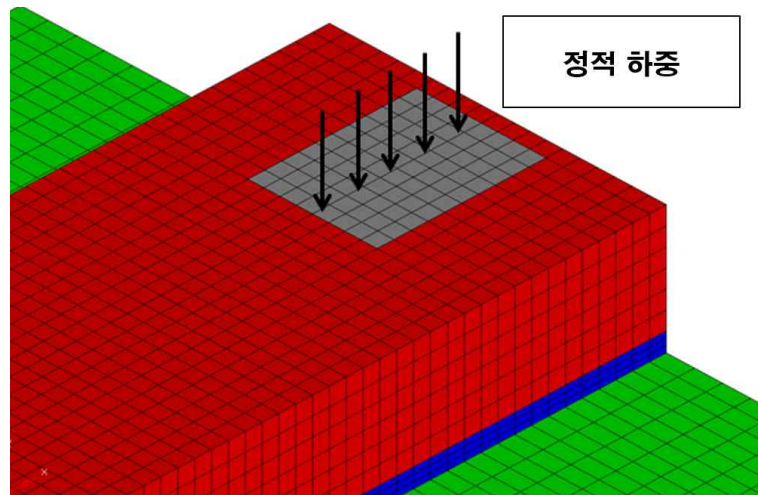
구성	밀도 (ton/mm3)	탄성계수 (GPa)	프아송비
방진재료	1.25E-09	7.3E-03	0.46
콘크리트	2.3E-09	35.7	0.18
철판	7.8E-09	200	0.3

㉠ 주행로 해석기법 개발

주행로의 구조적 안정성과 진동 감쇠 성능을 평가하기 위하여 Dassault Systemes 社의 상용 구조해석 S/W Abaqus 12-1을 이용한 주행로 특성해석 기법을 개발하였다. 차량 정차 시 주행로의 구조적 안정성을 평가하기 위해서 콘크리트 주행로 끝단에 윤충을 인가하는 구조해석기법과 차량이 이동할 때 주변으로 전달되는 진동을 평가하기 위하여 이동 하중을 인가하는 진동 해석기법을 개발하였다.

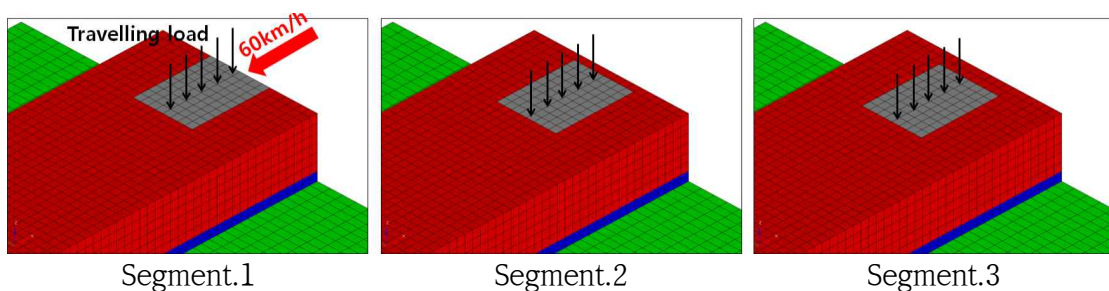
차량 정차 시와 같은 구속조건을 부여하기 위하여 그림 3.38과 같이 고무차륜의 접지

면적에 해당하는 구간에 차량하중을 가하고 지반 아랫부분의 자유도는 모두 구속하였다. 접지면적은 고무차륜의 약 40° 로 가정하여 계산하였고 작용하중은 운중에 중력가속도를 곱하여 계산하였다.



< 주행로의 하중 조건 >

또한 진동해석에서는, 차량의 이동을 해석적으로 구현하기 위해 그림6과 같이 하중이 차량의 진행방향으로 이동하는 구속조건을 설정하였다. 이동하는 하중을 표현하기 위해 하중의 이동속도는 차량의 선속도와 같게 설정하였으며, 120개의 Segment로 분할하여 삼각과 형태 하중을 각 Segment에 입력하였다. 진동특성은 주행로 옆 지반의 측정점에서 도출된 수직방향의 가속도 데이터를 바탕으로 계산하였다. 이를 위해 측정점 부근의 Z방향 구속은 풀어주었다.



< 이동하중 개념 >

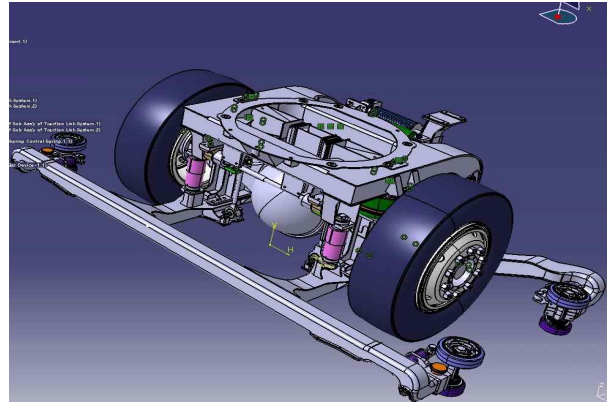
③ 고무차륜 3D CAD 모델링

해석 대상인 고무차륜 AGT에 대하여 3D 모델링을 수행하였다. 고무차륜 주행로의 동특성 해석을 위한 모델은 해석의 효율성을 높이기 위해 동적거동을 하는 파트만을 시뮬레이션 상에 모델링하였다. 따라서 CATIA를 사용하여 모든 부품이 상세하게 구현된 모델에서 주행에 영향을 미치는 부품만을 남기는 간략화 과정을 거쳤다. 이 과정에서 객차 부

분은 직육면체로 대체하였으며, 대차를 제어하는데 필요한 전기 부품과 오일배관 및 상세 볼트 및 너트 등이 제거되었다.



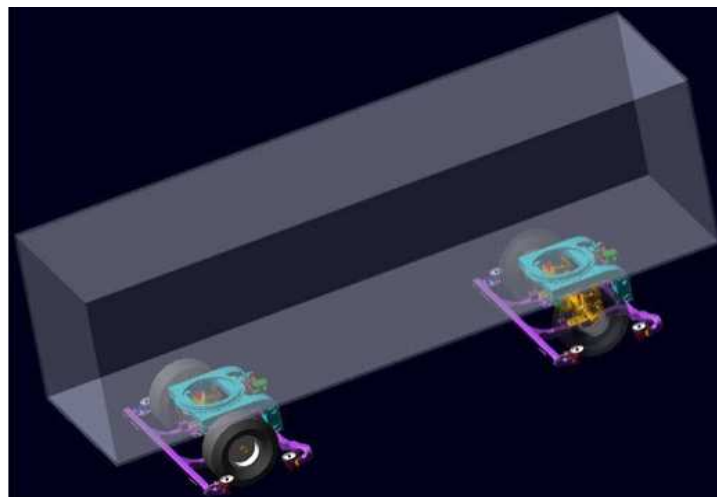
< 고무차륜 AGT >



< 고무차륜 AGT 3D CAD 모델 >

④ 고무차륜 동특성 해석 모델 구성

3D CAD 모델에서 ADAMS 해석을 위해 주행에 영향을 미치는 부품만을 남기는 간략화 과정을 거쳤다. 이 과정에서 대차를 제어하는데 필요한 전기 부품과 오일배관, 상세 볼트 및 너트 등이 제거되었다. 또한, 각종 스프링 및 댐퍼와 같은 현가장치와 타이어 등은 ADAMS 상에서 구현해야 하므로 CATIA 파일에서 제거되었다. 간략화된 대차는 선회프레임, 휠바디, 가이드 프레임, 로테이션 스프링 및 댐퍼링크부, 타이어로 총 5부분으로 나눌 수 있다. 아래 그림은 ADAMS 프로그램에서의 고무차륜 형상을 보여주고 있다.



< ADAMS에서의 고무차륜 형상 >

< 만차 및 공차에 따른 차체의 특성 >

비교	응력(MPa)	변위(mm)
콘크리트 주행로	0.53	4.4E-03
방진 주행로	1.02	2.1E-01

〈 대차 모델의 특성 〉

	대차
질량[kg]	235
$I_{xx}[kg-m^2]$	43.2
$I_{yy}[kg-m^2]$	35.5
$I_{zz}[kg-m^2]$	63.5

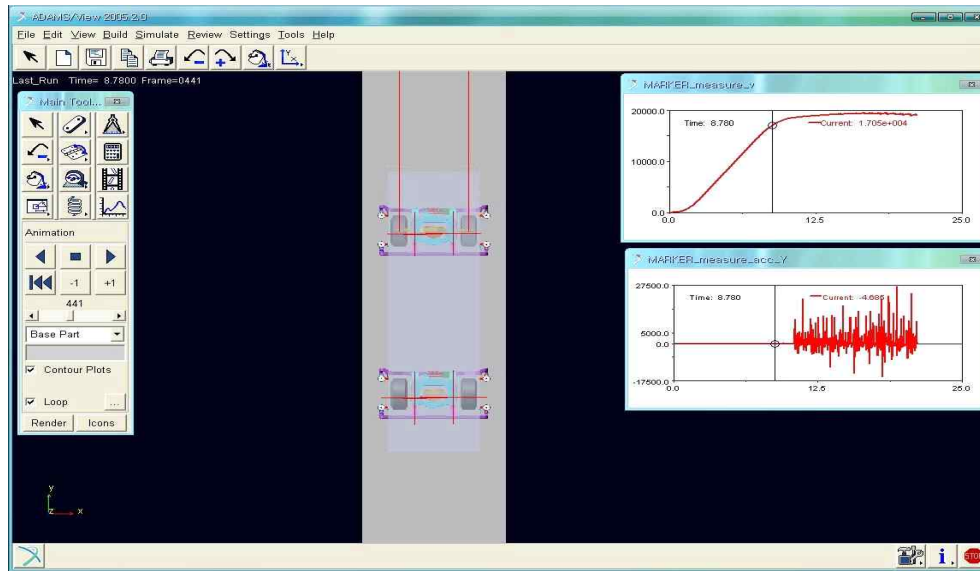
⑤ 고무차륜 및 주행로 해석기법 개발

고무차륜의 동적 거동을 하는 부품들의 상호간 거동 자유도를 설정하기 위하여 ADAMS/View 상에서 조인트를 사용하여 구현하였다. 각각의 파트들을 각각의 local marker를 사용하여 상호간에 자유도를 구속하게 되어, 실제 메카니즘과 같이 거동하게 하였다. 주요 동적 거동을 하는 연결부로는 각각 공기 스프링과 버티컬 댐퍼, 로테이션 스프링과 댐퍼, 레터럴 댐퍼, 가이드 링크부로 나눌 수 있다. 레일의 구성은 직선 구간으로 설정하여 모델링 하였다.

공기 스프링 및 버티컬 댐퍼에서는 축 프레임과 선회 프레임 사이에 부착되어 상하 운동을 완화시켜주는 공기스프링과 선회프레임과 가이드 프레임 사이에 부착되어 상하 운동의 급격한 변위의 변화를 막아주는 버티컬 댐퍼가 장착되어 있다. 로테이션 스프링과 댐퍼 및 레터럴 댐퍼에서는 안내레일을 따라 진행되는 대차가 차체에 대해 과도한 회전을 하지 않도록 막아주는 로테이션 스프링과 댐퍼, 안내 프레임과 가이드 프레임 사이에 장착되어 있고, revolute joint가 사용되었다. 가이드 링크부에서는 안내륜이 안내레일과 접촉 발생 시 대차에 가해지는 충격을 완화하기 위한 가이드 링크부의 역할을 하며, revolute joint가 사용되었다.

⑥ 고무차륜 동특성 해석을 통한 결과 분석

완성된 고무차륜 모델을 바탕으로 직선 구간을 통해 해석을 수행하였다. 차체와 타이어에 속도(60km/h)를 설정하고, General motion generator를 이용하여 차체의 무게 중심에 진행 방향으로 역시 60km/h의 속도를 설정해 주었다. 그림은 해석 완료 후 내이메이션 기능으로 차량의 주행 모습을 확인하고 있는 그림이며, 우측 상단부터 각각 주행 시간에 따른 차체의 진행 방향 속도, 수평방향 가속도를 나타낸 그래프이다.



< ADAMS에서의 차량 주행 모습 >

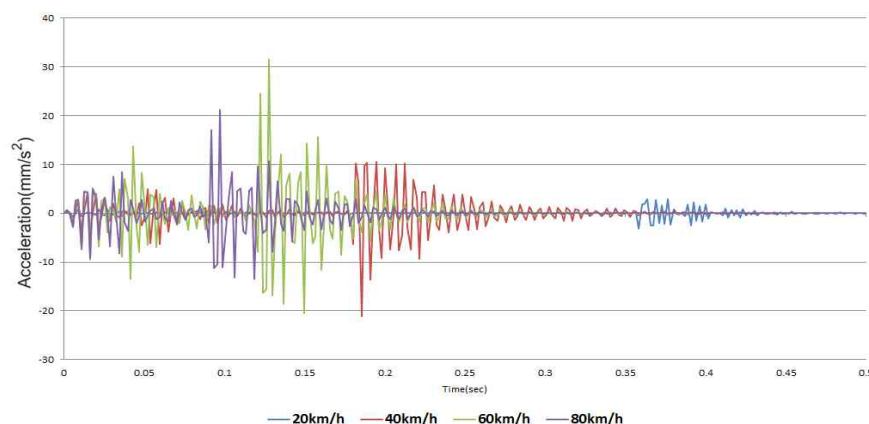
(4) 차량하중에 대한 인터페이스 및 진동해석

① 진동 해석조건

해석 모델 및 조건은 앞선 진동해석 조건인 그림과 동일하다. 주행 속도에 따른 주행로에서의 진동을 측정하기 위하여 ABAQUS를 이용해 진동해석을 수행하였다. 따라서 주행 속도별(20km/h, 40km/h, 60km/h, 80km/h)모델 구축한 후 동일한 측정점에서 진동가속도를 도출하였다. 그리고 아래 그림은 이동하는 고무차륜의 하중을 표현하기 위해 3,600mm의 주행로를 120개의 segment로 분할하여 각 segment에 따라 이동하는 개별 하중을 모델링 하여, 실제 차량이 거동하는 것과 같은 효과를 보일 수 있도록 FE모델을 구성하였다.

② 진동 해석결과

측정점에서의 주행속도(20km/h, 40km/h, 60km/h, 80km/h)에 따른 진동가속도선도 분석결과는 다음과 같다. 주행속도가 증가할수록 A_{peak} 및 A_{rms} 값이 증가하다가 주행속도 60km/h 넘는 순간부터는 오히려 A_{peak} 및 A_{rms} 값이 감소하는 경향을 보여주고 있다. 따라서 일정 주행속도 이상부터는 재료의 감쇠 성능이 증가함을 알 수 있다.



< 주행속도별 진동가속도 결과 >

〈 주행속도별 최대 진동 가속도 및 진동 가속도 실효치 분석 결과 〉

case	$A_{peak}(mm/s^2)$	$A_{rms}(mm/s^2)$
20km/h	0.56	3.09
40km/h	2.62	21.1
60km/h	4.09	31.6
80km/h	2.81	21.3

(5) 방진주행로 단면 설계

① 하중

㉠ 고정하중

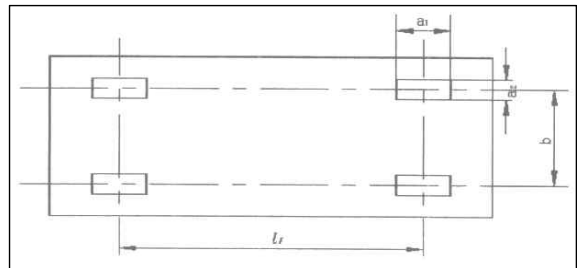
〈 재료의 단위중량 〉

재 료	단위중량(kN/m ³)	재 료	단위중량(kN/m ³)
강, 주강, 단강	77.0	철근콘크리트	24.5
무근콘크리트	23.0	프리스트레스트콘크리트	24.5

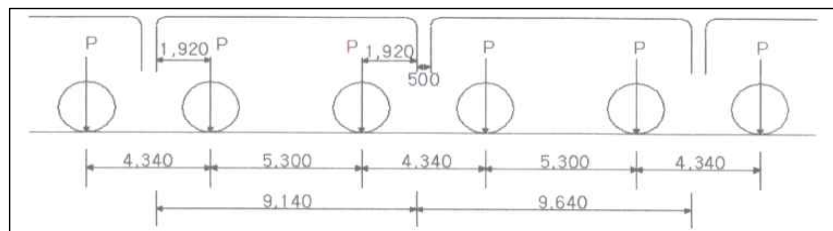
㉡ 활하중



〈 상용 K-AGT 차량 〉



〈 고무차륜 AGT 접지면 〉



〈 고무차륜 AGT 축하중 개념도 〉

아래 표에 나타난 것과 같이 실제 K-AGT 차량하중에 있어 만차시 접지면에 분포되는 압력과 공차시 접지면에 분포되는 압력을 비교하면 만차시 차량하중에 의한 영향력이 더 크기 때문에 설계에서는 만차시 하중을 고려하였다. 차륜간격은 그림과 같이 한 차량의 전륜, 후륜의 간격보다 첫 번째 차량과 두 번째 차량의 후륜, 전륜의 간격이 더 가까우므로 4,340mm에 대하여 설계를 수행하였다.

〈 고무차륜 AGT 차량하중 및 접지면 〉

구 분	차량하중(W)	윤중(0.25W)	l1	b	차륜접지면 (mm)	
					a1	a2
만 차	180.0kN	45.0kN	5,300	1,700	380	250
공 차	120.0kN	30.0kN			300	250

㉔ 곡선구간 원심하중에 의한 증가분

횡방향 하중에 대한 수직하중의 증가분은 다음과 같이 산정하였다.

$$H_{cf} = P \cdot \frac{V^2}{127R} \cdot f$$

여기서, P : 축하중(kN), V : 곡선부 통과속도(km/h), R : 곡선반경(m), f : 감소계수

위 식에서 통과속도(V)는 40km/h, 곡선반경(R)은 30m, 감소계수(f)는 차량속도 및 주행로 길이를 고려하여 1을 적용한 원심하중은 표와 같다. 여기서, 차량의 궤간 1,700mm 및 무게중심 1,661mm을 고려하여 원심하중에 대한 수직하중(V_{cf})을 계산하였다.

〈 곡선부 원심하중에 의한 수직하중 〉

구 분	P(kN)	V(km/h)	R(m)	Hcf(kN)	Vcf(kN)	비 고
곡 선	90.000	40.0	30.0	37.795	36.928	감소계수 미적용

곡선구간 원심하중에 의한 증가분은 다음 식을 적용하며 그 결과는 아래 표와 같다.

〈 곡선구간 원심하중에 의한 증가분 산정 〉

구 분	결 과 치	
내측 주행로 감소분	1-0.410	0.590
외측 주행로 증가분	1+0.410	1.410

충격계수는 차량의 동적특성에 의해 연직방향으로 발생하는 최대 하중조건에서 차량의 정적인 발생하중 대비 증가하는 비율을 충격계수(i)로 정의할 수 있다. 차륜/패널간 요철 등에 의한 차량 탄성하 부분의 상하 진동에 따른 충격에 의한 동적하중은 KR C-14030을 기준으로 아래의 식을 이용하여 산정하였다.

$$i = 1 + \beta(n\Phi)$$

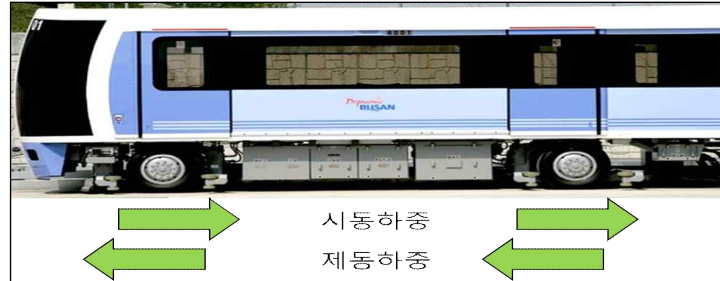
여기서, i : 충격계수, n : 궤도품질에 좌우되는 계수,

β : 확률 신뢰구간에 좌우되는 표준편차 가중치(레일응력, 체결장치, 침목구조 계산),

Φ : 여객열차의 경우 설계속도 $60 < V \leq 300$ km/h 조건

㉔ 시·제동 하중

열차가 출발할 때 바퀴에 발생하는 수평력 및 급정거할 때 바퀴에 발생하는 수평력을 검토하여야 한다. 고무차륜 AGT의 시동하중과 제동하중의 차량의 가·감속도를 고려해 다음 식을 이용하여 구할 수 있다.



〈 고무차륜 AGT 차량의 시·제동 하중특성 〉

$$F = a \cdot \frac{w}{g}$$

여기서, a : 시·제동시 가·감속도, w : 차량중량, g : 중력가속도 ($9.8m/s^2$)

㉕ 기울기(종구배)에 의한 하중

기울기 하중은 최급기울기 58% 조건하에서 발생하는 기울기 하중을 다음 식으로 산정 하였으며, 차량의 축하중, 차량의 축간거리, 충격계수 및 궤도패널 길이를 고려하였다.

$$H_s = (P' + P_D) \times \frac{S}{1,000}$$

여기서, P' : 차량의 발생하중, P_D : 사하중, S : 최급기울기

㉖ 원심하중과 캔트효과

원심하중은 곡선부 캔트설치에 대한 상쇄효과가 없는 것으로 가정하여 안전측으로 산정하였다. 집중하중에 의한 원심하중은 차량의 축중, 곡선구간 원심하중에 의한 외측레일 증가분, 곡선부 충격계수를 고려하여 산정하였으며, 곡선구간 운행속도 40km/h, 곡선반경 30m에 대해 발생하는 횡방향 하중은 다음 표와 같다.

$$Q_c = \frac{v^2}{127R} \times w$$

〈 원심하중 〉

구 분	하 중 인 자
설계속도(v)	40km/h
곡선반경(R)	30m
집중하중(w)	축하중×외측주행로증가분×충격계수3 (90kN×1.410×1.400=177.660kN)

㉞ 부가 고정하중

자중에 부가되는 고정하중은 구조물 자중을 제외한 영구적으로 설치되는 부재들에 대한 무게이며, 궤도, 방수, 방음벽, 신호기 기둥, 전차선 지주 등을 포함한다.

㉟ 하중조합

구조물이나 구조부재를 설계할 때는 제시된 하중계수와 하중조합을 모두 고려하여 해당 구조물에 작용하는 최대 소요강도에 대하여 만족하도록 설계해야 한다. [철도설계지침]의 주요 하중계수 및 하중조합은 다음과 같으며, 설계시 [콘크리트 구조설계기준]의 하중계수 및 하중조합도 고려하여 안전측으로 설계하여야 한다.

$$U = 1.4D + 2.0(L + I) + 1.7H + 1.4Q$$

$$U = 1.7\{D + (L + I) + H + Q\}$$

$$U = 1.0D + 1.0(L + I) \quad \text{— 균열 검토시}$$

여기서, D : 고정하중 또는 이에 따른 단면력, L : 활하중 또는 이에 따른 단면력,

H : 토압 또는 이에 따른 단면력, I : 충격 또는 이에 따른 단면력,

Q : 부력 또는 양압력, 수압, 파압 등의 하중 또는 이에 따른 단면력

② 프리캐스트 주행로 구조해석

프리캐스트 주행로의 단면력 검토를 위하여 MIDAS-Civil을 이용해 빔요소로 모델링하였으며, 지반조건은 Elastic link의 압축조건(Compression only)만을 고려하여 해석하였다.

㉡ 지반반력계수 산정

구조해석에 적용된 연직방향 지반반력계수는 다음과 같다.

$$K_{vo} = 1/0.3 \times \alpha \times E_o = 1/0.3 \times 1 \times 84,000 = 280,000 \text{ kN/m}^3$$

여기서, Eo : 지반변형계수 ($E_o = 2,800 \times N = 2,800 \times 30 = 84,000 \text{ kN/m}^2$)

환산재하폭(B)이 L이하인 경우에 환산재하폭을 고려한 지반반력계수는 다음과 같다.

$$K_v = K_{vo} \times (B_v/0.3)^{-3/4}$$

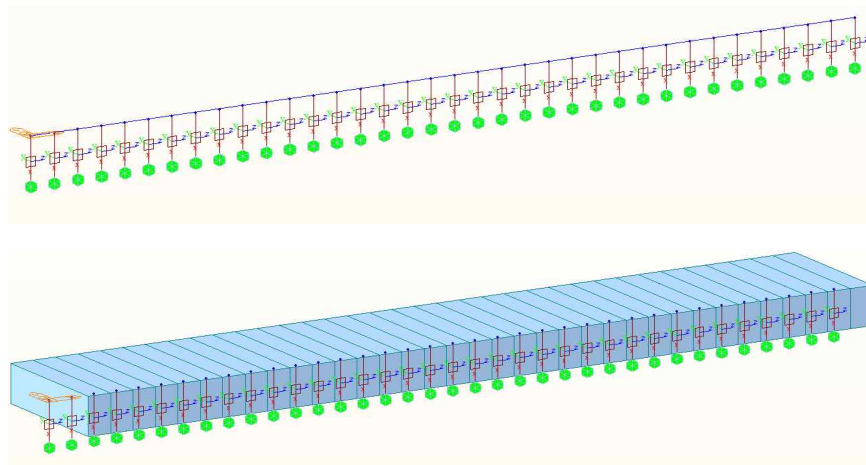
$$= 280,000 \times (0.6/0.3)^{-3/4} = 166,489 \text{ kN/m}^3$$

여기서, $B_v = \sqrt{0.6 \times 0.6} = 0.6 \text{ m}$

③ 해석모델링 및 해석결과

㉢ 해석모델링

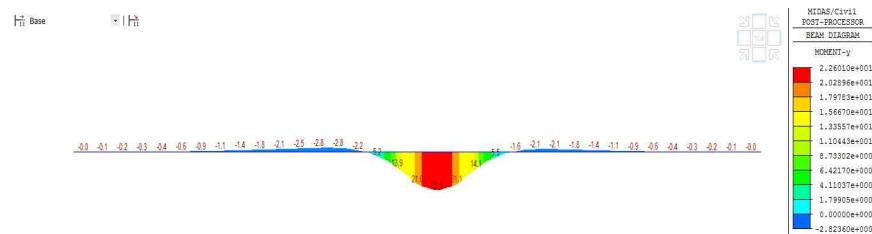
구조해석에 적용된 해석모델링은 다음 그림과 같다.



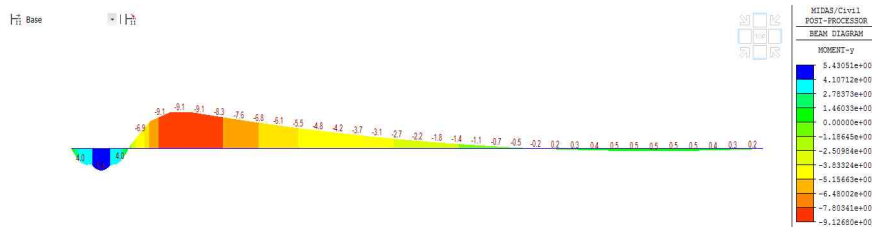
< 해석모델링 >

㉔ 해석결과

- 직선부 최대모멘트



< 직선부 최대 정모멘트 >



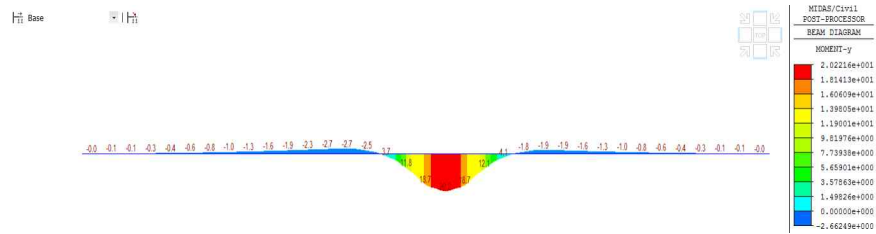
< 직선부 최대 부모멘트 >

직선부 주행로에 대한 단면력 해석결과, 패널 Edge에 하중이 작용할 때 최대 부모멘트 (-)가 발생하였으며, 패널 중앙부에 하중이 작용할 때 최대 정모멘트가 발생하였다. 이때 발생하는 최대전단력은 다음 표와 같다.

< 직선부 해석결과 >

하중지점	최대 정모멘트(kN · m)	최대부모멘트(kN · m)	최대전단력(kN)
0m		-9.1	132
1.8m	22.6		111

- 내측 곡선부 최대모멘트 산출



< 내측 곡선부 최대 정모멘트 >



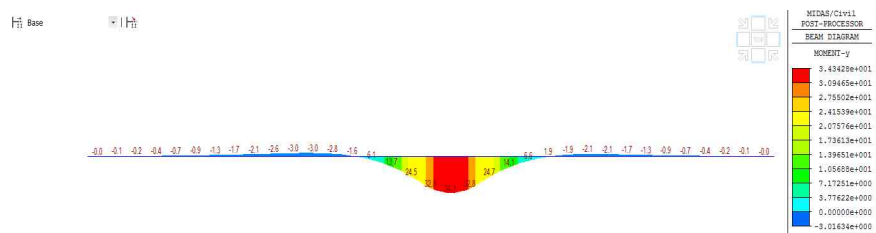
< 내측 곡선부 최대 부모멘트 >

주행로 내측 곡선부에 대한 단면력 해석결과 패널 Edge에 하중이 작용할 경우 최대 부모멘트(-)가 발생하였으며, 패널 중앙부에 하중이 작용할 경우 최대 정모멘트가 발생하였다. 이때 발생하는 최대 전단력은 표와 같다.

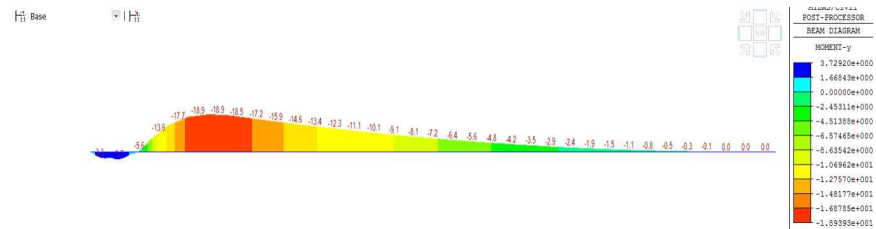
< 내측 곡선부 해석결과 >

하중지점	최대 정모멘트(kN · m)	최대부모멘트(kN · m)	최대전단력(kN)
0m		-7.6	107
1.8m	20.2		127

- 외측 곡선부 최대모멘트 산출



< 외측 곡선부 최대 정모멘트 >



< 외측 곡선부 최대 부모멘트 >

주행로 외측 곡선부에 대한 단면력 해석결과 패널 Edge에 하중이 작용할 경우 최대 부 모멘트(-)가 발생하였으며, 패널 중앙부에 하중이 작용할 경우 최대 정모멘트가 발생하였 다. 이때 발생하는 최대 전단력은 표와 같다.

〈 외측 곡선부 해석결과 〉

하중지점	최대 정모멘트(kN · m)	최대부모멘트(kN · m)	최대전단력(kN)
0m		-18.9	132
1.8m	34.3		142

(6) 전단앵커 검토

① 재료

전단앵커에 대한 규격은 궤도공사시 각종 체결장치 및 구조물을 선로에 고정시키기 위하여 사용되는 고정용 앵커장치(앵커볼트, 너트 및 케미컬 레진)이며, 전단앵커의 재 료적 성능은 KS D 3503(일반구조용 압연강재), KS D 0201(용융아연도금), KS D 0246 (용융아연도금), KS B 1012(육각너트)의 재료적 특성을 기준으로 검토하였다.

1) 앵커볼트, 너트

앵커볼트는 KS D 3503(일반구조용 압연강재)의 SS490 또는 동등 이상의 것을 사용하 여야 하며, 너트는 KS B 1012(육각너트)의 규격에 따른다.

2) 케미칼 앵커

불포화 폴리에스텔, 에폭시 아크릴레이트 레진 또는 동등 이상의 것을 사용하여야한 다.

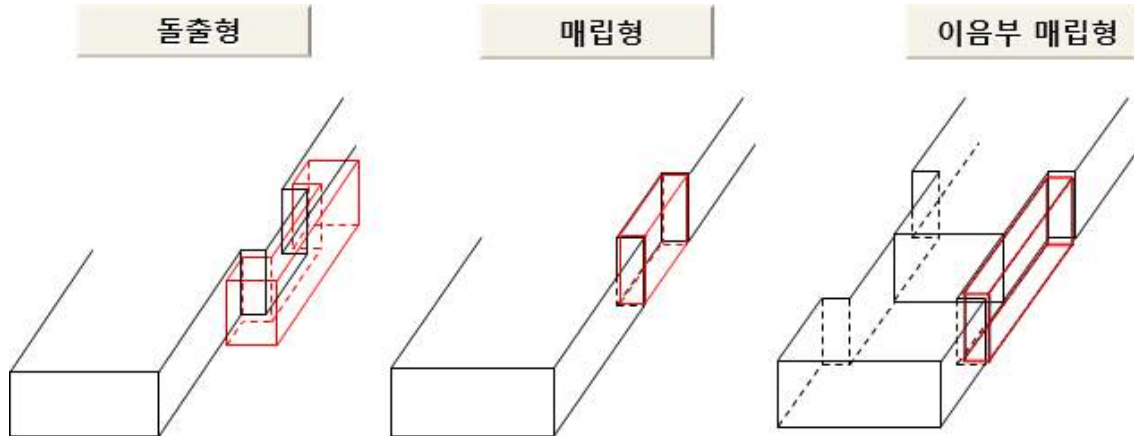
② 앵커설계

주행로에서 발생하는 차량하중조건에 대하여 궤도패널(L=3.6m)의 안정성을 만족하는 전단앵커설계를 수행하였다. 적용하중은 현재 부산 4호선 설계시 적용한 하중조건으 로 한국철도기술연구원에서 수행한 “저비용 저심도 인프라 핵심기술개발(2014)” 에서 산정한 하중조건을 적용하였으며, 콘크리트 앵커 설계기준(KDS 14 20 54 : 2016), 콘 크리트 구조기준(2018) 및 강구조연결 설계기준(KDS 14 31 25 : 2017)을 준용하여 검 토하였다. 앵커설치 방식은 후설치 방식으로 콘크리트 단면형 및 L형강에 대해 각각 검토를 수행하였다.

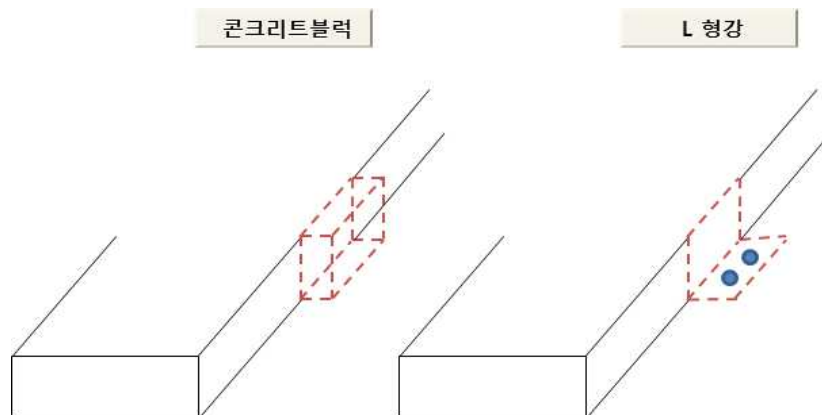
1) 설계조건

방진주행로의 전후단의 주행로는 종방향으로 구속이 되어있는 상태이며, 또한 주행로의

설계를 단순화하여 방진재의 성능 저해요소를 최소화 하기 위해 주행로를 구속하기 위한 전단키의 설계조건은 기본적으로 횡방향 구속만을 고려하였다. 그림에서 알 수 있듯이 주행로의 종횡방향을 구속하게 되면 주행로의 설계변경과 더불어 설계가 복잡해지고 이에 따른 유지보수비용이 증가하는 단점이 발생할 수 있다. 반면 횡방향만 구속할 경우 주행로의 추가적인 설계변경이 없으며 이에 따른 추가적인 유지보수비용도 불필요하게 되는 장점이 있다.



<그림 3.34> 주행로 종·횡방향 구속



<주행로 횡방향 구속>

2) 작용전단력 V_u 산정

“저비용 저심도 인프라 핵심기술개발(2014)”에서 산정한 하중조건, 즉 고무차륜 AGT 차량의 성능 및 제원과 곡선반경 $R=30m$, 최급기울기 60%에서의 선구특성을 고려하여 발생하는 하중을 검토한 결과, 다음 표 와 같이 정리할 수 있다.

〈작용전단력(Vu)〉

구 분	계산치
고정하중	6.125kN
시/제동하중	22.86kN
기울기하중	6.15kN
원심하중	47.2kN

3) 설계전단력 Vu 산정

구조물 설계 시 구조체의 특성을 고려하여 관련 제 규정을 만족하는 하중계수 및 하중조합을 고려하여 구조물에 작용하는 최대소요강도를 만족하는 설계가 필요하다. 궤도패널에 작용하는 전단앵커의 안전측 설계를 위하여 최대전단력이 발생하는 하중조합을 선행연구결과 [저비용 저심도 인프라 핵심기술개발(2014)]를 준용하여 다음과 같이 적용하였으며, 최대발생전단력은 약 143kN으로 나타났다.

- 최대발생 작용전단력(Vu) 하중조합 :

$$U = 1.4D + 2.0(L+I) + 1.7H + 1.4Q$$

여기서, D : 고정하중 또는 이에 따른 단면력

L : 활하중 또는 이에 따른 단면력

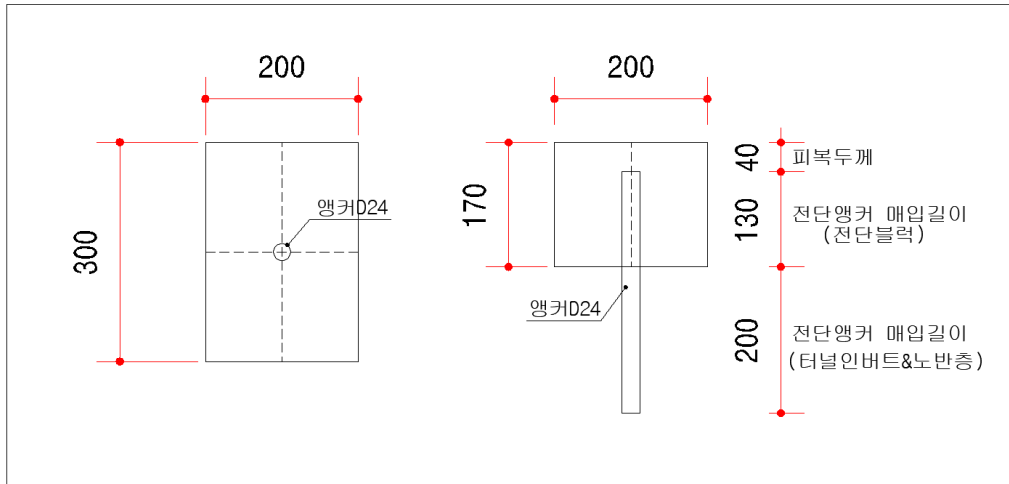
H : 토압 또는 이에 따른 단면력

I : 충격 또는 이에 따른 단면력

Q : 부력 또는 양압력, 수압, 파압 등의 하중 또는 이에 따른 단면력

4) 콘크리트 블록형 앵커설계

콘크리트 앵커 설계기준(KDS 14 20 54 : 2016)에 따라 앵커의 전단강도, 전단에 대한 콘크리트 파괴강도, 프라이아웃강도 중 작은 값을 기준으로 소요강도(V_{ua})를 계산하여 최대전단하중을 결정하였다. 그리고 설계단면은 주행로 패널 좌우측 여유공간을 약 300mm 조건으로, 노반은 콘크리트(혹은 터널인버트)로 가정하였다.



〈콘크리트 앵커 가정단면의 제원〉

① 앵커의 전단강도에 의해 지배되는 경우

$$- \Phi V_{sa} \geq V_{ua}$$

$$- V_{sa} = n 0.6 A_{se, V} f_{uta}$$

여기서, Φ : 0.6(취성강재 가정)

n: 앵커갯수

$A_{se, V}$: 353mm^2 (앵커지름 24mm:전단력을 받는 앵커의 유효단면적)

f_{uta} : 860MPa(앵커강재의 설계기준인장강도)

$$- \Phi V_{sa} = 0.6 \times 1 \times 0.6 \times 353 \times 860 = 109,288.8\text{N} = 109.3\text{kN} \text{ (앵커 하나당 전단강도)}$$

② 콘크리트 파괴강도에 의해 지배되는 경우(전단력은 가장자리 방향으로 작용하는 것으로 가정)

$$- \Phi V_{cb} \geq V_{ua}$$

여기서, $\Phi=0.7$ (보조철근 없는 조건)

$$\begin{aligned} - V_{cb} &= \frac{A_{Vc}}{A_{Vco}} \Psi_{ed, V} \Psi_{c, V} \Psi_{h, V} V_b \\ &= \frac{39,000}{45,000} \times 1 \times 1 \times 1 \times 24.4 = 21.1\text{kN} \end{aligned}$$

$$- A_{Vc} = 2 \times (1.5 \times 100) \times 130 = 39,000\text{mm}^2$$

$$- A_{Vco} = 4.5 \times 100^2 = 45,000\text{mm}^2$$

$$\begin{aligned}
- V_b &= 0.6 \left(\frac{l_e}{d_a} \right)^{0.2} \sqrt{da} \times \sqrt{f_{ck}} \times (c_{a1})^{1.5} \\
&= 0.6 \left(\frac{192}{24} \right)^{0.2} \sqrt{24} \times \sqrt{30} \times (100)^{1.5} \\
&= 24402.56 N = 24.4 kN
\end{aligned}$$

$$- \Phi V_{cb} = 0.7 \times 21.1 = 14.8 kN$$

여기서, A_{Vc} : 전단강도 산정을 위한 단일앵커 콘크리트 파괴면 투영면적($2(1.5c_{a1})h_a$)

A_{Vco} : 모서리의 영향, 간격 또는 부재두께에 제한을 받지 않는 경우 전단강도 산정을 위한 단일앵커 콘크리트 파괴면 투영면적= $4.5(c_{a1})^2$

$\Psi_{ed,V}$: 연단거리 영향에 따른 전단강도에 대한 수정계수=1.0

(부재두께가 $1.5c_{a1}$ 이상이고, 전단력과 직교방향의 거리 ca_2 가 $1.5c_{a1}$ 이상, 단 ca_1 은 전단력 방향 연단거리 100mm)

$\Psi_{c,V}$: 연단거리 영향에 따른 전단강도에 대한 수정계수=1.0

(사용하중 하에서 콘크리트 균열발생)

V_b : 균열 콘크리트에서 전단을 받는 단일앵커의 기본 콘크리트 파괴강도

여기서 설계기준(KDS 14 20 54)의해 $A_{Vc} < nA_{Vco}$ 조건을 만족하지 못함에따라 콘크리트 로 단면으로 설계할 경우 주행로 측면의 단면확보를 충분히 하여야 한다.

③ 콘크리트 프라이아웃강도에 의해 지배되는 경우

$$- \Phi V_{cp} \geq V_{ua}$$

여기서, $\Phi=0.7$ (프라이아웃강도가 앵커시스템의 강도를 지배하는 조건)

$$- V_{cp} = k_{cp} N_{cb}$$

여기서, k_{cp} : 프라이아웃강도 계수

N_{cb} : 인장을 받는 단일 앵커의 공칭콘크리트 파괴강도(N)

$$- k_{cp} = 2.0, h_{ef} \geq 65mm$$

$$- N_{cb} = \frac{A_{Nc}}{A_{Nco}} \Psi_{ed,N} \Psi_{c,N} \Psi_{p,N} N_b$$

$$= \frac{115,050}{152,100} \times 0.817 \times 1 \times 1 \times 92.6 = 57.2 kN$$

$$\begin{aligned}
- A_{Nc} &= (100 + 195) \times (195 + 195) = 115,050 \text{mm}^2 \\
- A_{Nco} &= 9(h_{ef})^2 = 9 \times 130^2 = 152,100 \text{mm}^2 \\
- \Psi_{ed,N} &= 0.7 + 0.3 \frac{C_{a,\min}}{1.5h_{ef}} = 0.7 + 0.3 \frac{100}{1.5 \times 170} = 0.817 \\
- N_b &= k_c \sqrt{f_{ck}} \times (h_{ef})^{1.5} \\
&= 10 \times \sqrt{30} \times (130)^{1.5} = 925,651.1 \text{N} = 92.6 \text{kN} \\
&(\because k_c=10: \text{선설치앵커 조건}) \\
\therefore \Phi V_{cp} &= \Phi k_{cp} N_{cb} \\
&= 0.7 \times 2.0 \times 57.2 = 80.1 \text{kN}
\end{aligned}$$

여기서, A_{Nc} : 인장강도 산정을 위한 단일앵커 콘크리트 파괴면 투영면적

(앵커 중심으로부터 $1.5h_{ef}$ 에 해당되는 거리와 연단거리에 의해 형성되는 직사각형태로서 인장 파괴면의 투영면적)

A_{Nco} : 모서리의 영향, 간격 또는 부재두께에 제한을 받지 않는 경우 인장강도 산정을 위한 단일앵커 콘크리트 파괴면 투영면적

$\Psi_{ed,N}$: 연단거리 영향에 따른 인장강도에 대한 수정계수=1.0

$\Psi_{c,N}$: 균열유무에 따른 인장강도에 대한 수정계수=1.0

(사용하중 하에서 콘크리트 균열발생)

$\Psi_{cp,N}$: 앵커를 철근 없이 비균열 콘크리트에 사용하기 위한 인장강도에 대한 수정계수=1.0(보조철근 없음)

N_b : 균열 콘크리트에서 인장을 받는 단일앵커의 기본 콘크리트 파괴강도

④ 콘크리트 쪼갬파괴를 방지하기 위한 연단거리, 볼트간격 및 두께

- 피복두께는 콘크리트 구조기준의 최소 피복두께를 적용하면 지름 24mm인 앵커의 최소 피복두께는 흙 또는 대기에 노출된 조건에서 40mm이다.

검토결과, 다음 표에서 알 수 있듯이 한 개의 전단앵커와 전단블럭(L:300×W:200×H:170) 반영시 콘크리트 전단파괴강도에서 지배적인 강도를 보여주고 있다. 즉 앞서 설정한 횡방향 작용력 143.0kN으로 설계할 경우 가정한 단일앵커의 경우 콘크리트단면이 총 10개 이상 설치가 필요하다.

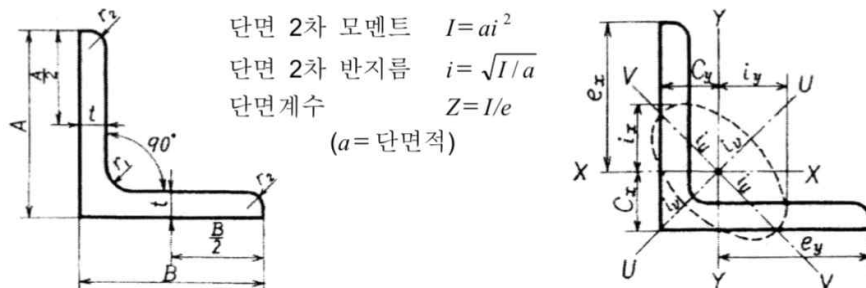
〈전단앵커와 전단블럭 반영시 강도 비교〉

구분	기호	검토결과	비 고
앵커의 전단강도	ϕV_{sa}	109.3kN	
콘크리트 전단파괴강도	ϕV_{cb}	14.8kN	지배강도
콘크리트 프라이 아웃강도	ϕV_{cp}	80.1kN	

또한 이를 보강하기 위해 콘크리트 전단파괴 강도 보강을 위한 앵커철근(D13:헤어핀) 반영시 전단파괴 강도는 약 2배 이상 증가시킬 수 있으나, 보강철근의 정착길이가 추가로 필요함에 따라 필요단면적은 당초 300mm에서 200mm 이상 증가된 약 500mm 이상의 폭원이 필요하다.

5) ㄱ 형강 보강형 앵커설계

앞서 검토한 결과, 횡방향 보강을 위한 전단키를 콘크리트 단면으로 보강할 경우 소요 콘크리트단면 확보 및 유지보수상 문제를 야기할 수 있다. 따라서 여기서는 보다 단순하면서 저항력을 확보할 수 있는 “ㄱ 형강” 보강에 대해서도 추가로 검토를 하여 향후 현장상황에 맞게 적용을 하고자 한다. ㄱ 형강은 KS D 3502의 표준규격을 적용하였으며, 앞서 가정한 설계조건(단면, 앵커)으로 작용하중에 대한 안정성을 검토하였다. 그림 7은 KS D 3502상의 단면제원을 나타내고 있다.



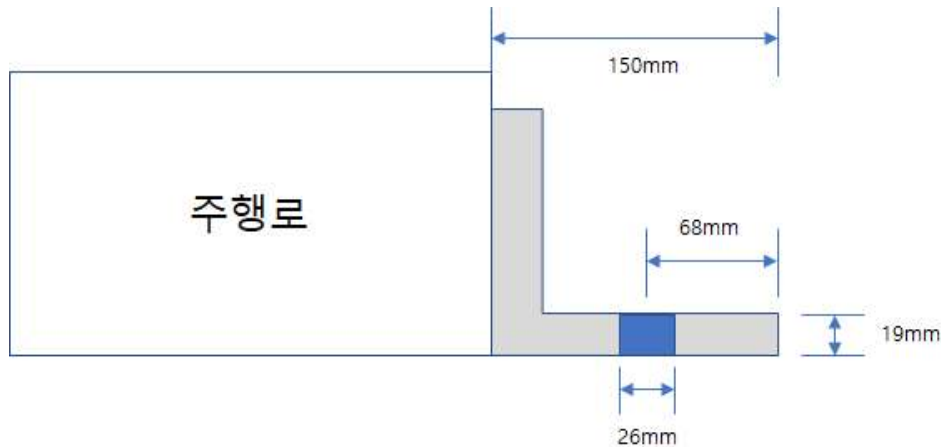
표준 단면치수 mm				단면적 cm ²	단위 무게 kg/m	참고											
						중심의 위치 cm		단면2차 모멘트 cm ⁴				단면2차 반지름 cm				단면계수 cm ³	
$A \times B$	t	r_1	r_2			C_x	C_y	I_x	I_y	최대 I_u	최소 I_v	i_x	i_y	최대 i_u	최소 i_v	Z_x	Z_y
100×100	7	10	5	13.62	10.7	2.71	2.71	129	129	205	53.2	3.08	3.08	3.88	1.98	17.7	17.7
100×100	10	10	7	19.00	14.9	2.82	2.82	175	175	278	72.0	3.04	3.04	3.83	1.95	24.4	24.4
100×100	13	10	7	24.31	19.1	2.94	2.94	220	220	348	91.1	3.00	3.00	3.78	1.94	31.1	31.1
120×120	8	12	5	18.76	14.7	3.24	3.24	258	258	410	106	3.71	3.71	4.67	2.38	29.5	29.5
130×130	9	12	6	22.74	17.9	3.53	3.53	366	366	583	150	4.01	4.01	5.06	2.57	38.7	38.7
130×130	12	12	8.5	29.76	23.4	3.64	3.64	467	467	743	192	3.96	3.96	5.00	2.54	49.9	49.9
130×130	15	12	8.5	36.75	28.8	3.76	3.76	568	568	902	234	3.93	3.93	4.95	2.53	61.5	61.5
150×150	12	14	7	34.77	27.3	4.14	4.14	740	740	1180	304	4.61	4.61	5.82	2.96	68.1	68.1
150×150	15	14	10	42.74	33.6	4.24	4.24	888	888	1410	365	4.56	4.56	5.75	2.92	82.6	82.6
150×150	19	14	10	53.38	41.9	4.40	4.40	1090	1090	1730	451	4.52	4.52	5.69	2.91	103	103
175×175	12	15	11	40.52	31.8	4.73	4.73	1170	1170	1860	480	5.38	5.38	6.78	3.44	91.8	91.8
175×175	15	15	11	50.21	39.4	4.85	4.85	1440	1440	2290	589	5.35	5.35	6.75	3.42	114	114
200×200	15	17	12	57.75	45.3	5.46	5.46	2180	2180	3470	891	6.14	6.14	7.75	3.93	150	150
200×200	20	17	12	76.00	59.7	5.67	5.67	2820	2820	4490	1160	6.09	6.09	7.68	3.90	197	197
200×200	25	17	12	93.75	73.6	5.86	5.86	3420	3420	5420	1410	6.04	6.04	7.61	3.88	242	242
250×250	25	24	12	119.4	93.7	7.10	7.10	6950	6950	11000	2860	7.63	7.63	9.62	4.90	388	388
250×250	35	24	18	162.6	128	7.45	7.45	9110	9110	14400	3790	7.49	7.49	9.42	4.83	519	519

<등변 ㄱ형강의 표준 단면치수와 제원(KS D 3502:2016)>

검토시 ㄱ형강의 제원은 주행로 단면높이를 고려하여 높이 150mm, 그리고 두께는 19mm를 적용하였으며 강재의 종류는 SS315를 적용하였다.

① ㄱ형강 단면 및 재료특성

- 150mm(A)×150mm(B)×19mm(t)
- 단면적 $A_g = 5,338\text{cm}^2$
- 항복강도 $F_y = 315\text{MPa}$
- 인장강도 $F_u = 490\text{MPa}$
- 소요 작용력 $P = 143\text{kN}$
- 앵커볼트 지름 : 24mm



<ㄱ형강 보강형 앵커의 제원>

② 순단면적 계산

- 볼트 구멍의 지름 $d = 24 + 2 = 26\text{mm}$ (ref : 강구조연결설계기준 2017)

$$- A_n = A_g - n \times d \times t = 5,338 - 2 \times 26 \times 19 = 4,350\text{mm}^2$$

$$\therefore \text{순단면적 } A_n = 4,350\text{mm}^2$$

여기서, A_n : 순단면적, A_g : 총단면적

n : 앵커갯수, t : 부재 두께

③ 유효순단면적

$$- A_e = U \times A_n = 0.6 \times 4350 = 2,610\text{mm}^2 \text{ (ref : 강구조 설계기준 2017, 4.1.2.3)}$$

④ 설계인장강도

$$- \text{총단면의 항복} : \phi T_n = \phi F_y A_g = 0.9 \times 315 \times 5338 = 1,513\text{kN}$$

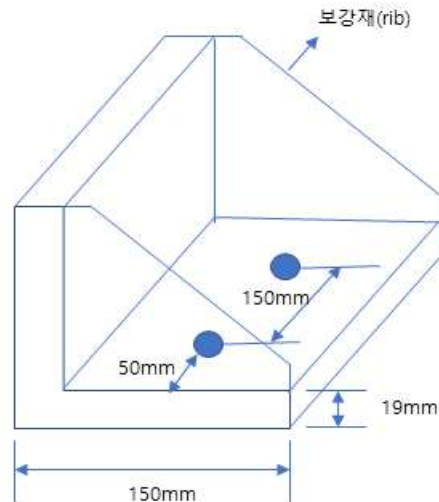
$$- \text{순단면의 파단} : \phi T_n = \phi F_u A_n = 0.75 \times 490 \times 2610 = 959\text{kN}$$

⑤ 설계인장강도 검토

$$\phi T_n = 959\text{kN} > 143\text{kN} \quad \text{O.K}$$

③ 소결

검토 결과 콘크리트 블록보다는 ㄱ형강으로 설치하는 것이 현장여건이나 시공측면에서 훨씬 유리할 것으로 판단되며 콘크리트 파괴 및 프라이아웃 강도에 대한 안전을 위해 주행로 양단 대칭으로 한쪽면에 두 개 이상 설치하는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 그리고 여기서 가정한 설계조건에 대한 앵커의 연단거리는 50mm이상, 앵커간격은 150mm이상을 확보하여야 하나(KDS 14 20 54, 2016) 향후 현장여건 및 설계조건 변경시에는 설계기준을 만족하도록 설계하여야 한다. 앵커문힘 길이도 안전을 위해 150mm이상 확보하는 것이 좋다. 또한 시공불량 등에 의한 편심이 작용할 것을 대비해 ㄱ형강에 동일재질의 리브(보강재)를 설치하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.



〈전단키 설계단면〉

나. 방진재 검토 및 선정

(1) 방진주행로 구조해석 및 진동해석

① 방진재 구조 종류

해석모델을 바탕으로 방진재의 구조 및 방진재 종류를 선정하였다. 방진재의 구조 선정을 위하여 방진재가 없는 콘크리트 주행로 모델과 단순 방진재료 삽입된 방진주행로 모델 그리고 방진재료의 크리프 현상 방지를 위하여 방진재료 사이에 철판을 삽입한 철판방진 주행로 모델을 구성하였다. 이 3가지 모델에 대하여 각각 구조해석과 진동해석을 수행하고 구조적 안정성과 진동저감 특성을 종합적으로 고려하여 방진재의 구조 및 종류를 결정하였다. 그림은 정면에서 바라본 3가지 종류의 주행로의 구조이다.



〈 3가지 종류의 주행로 〉

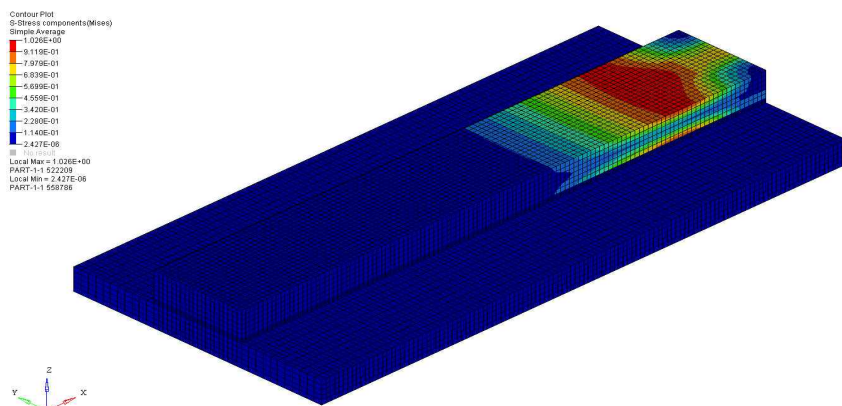
② 방진 주행로 구조해석 및 진동해석 결과

3가지 종류의 방진재 구조에 대하여 구조해석을 수행하였다. 주행로의 구조적 안정성을 평가하기 위하여 정적하중이 가해졌을 때 주행로의 변위와 응력을 도출하였다. 허용응력은 설계기준강도(f_{ck})를 바탕으로 계산한 허용휨인장응력을 기준으로 판단하였다. 허용휨인장응력의 계산식은 $f_{ta} = 0.13 \sqrt{f_{ck}}$ 이고 이를 바탕으로 도출한 허용응력은 0.87MPa이다. 허용변위는 주행로의 처짐기준 3.0mm(고저기준)으로 판단하였다.

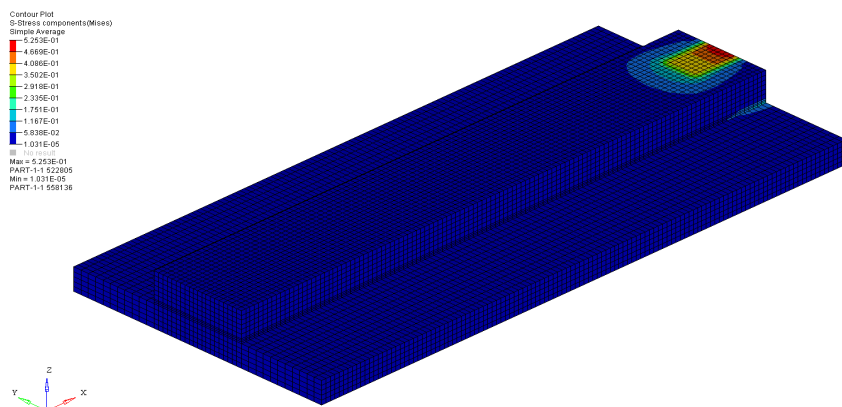
발생응력은 방진 주행로, 철판방진 주행로, 콘크리트 주행로 순으로 큰 응력이 발생하였다. 특히, 방진 주행로의 경우 상대적으로 큰 변위가 발생하여 휨응력이 발생하며 허용응력 이상의 응력이 발생한다. 변위의 경우는 방진 주행로, 콘크리트 주행로, 철판방진 주행로 순으로 크게 발생하였고 3가지 주행로 모두 처짐기준을 만족하였다. 방진 주행로별 발생 응력과 변위는 아래 표에 정리하였다.

< 주행로별 구조해석 결과 >

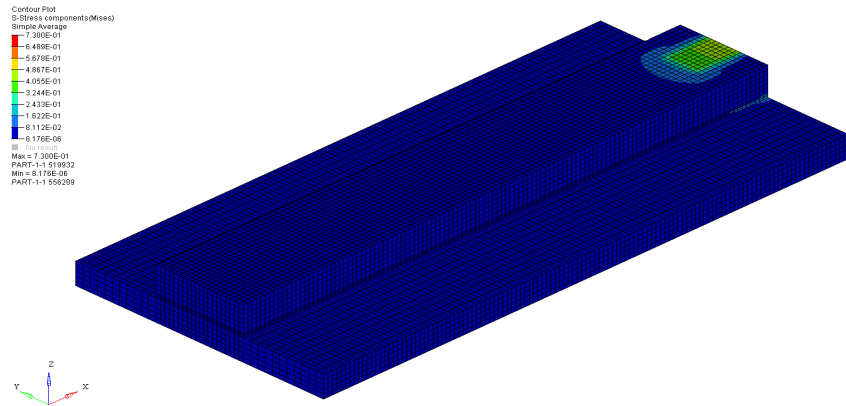
비교	응력(MPa)	변위(mm)
콘크리트 주행로	0.53	4.4E-03
방진 주행로	1.02	2.1E-01
철판방진 주행로	0.73	4.3E-03



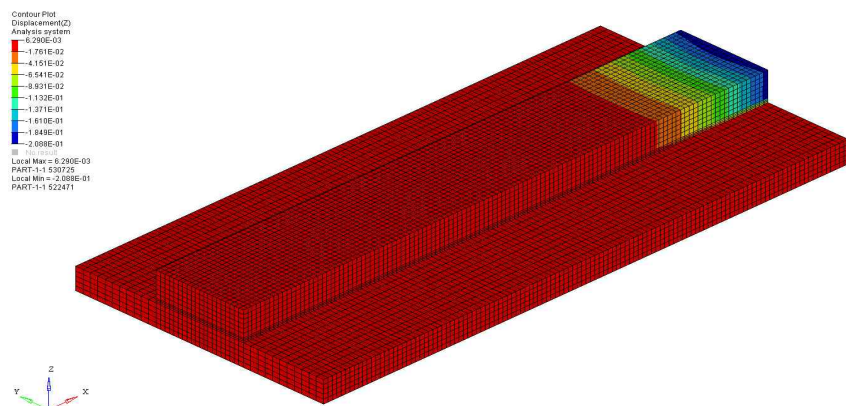
< 방진 주행로의 응력해석 결과 (Max. stress 1.026MPa) >



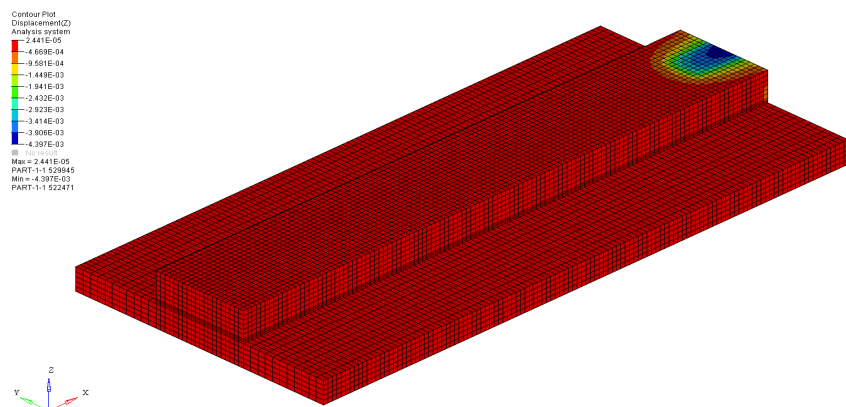
< 콘크리트 주행로의 응력해석 결과 (Max. stress 0.52MPa) >



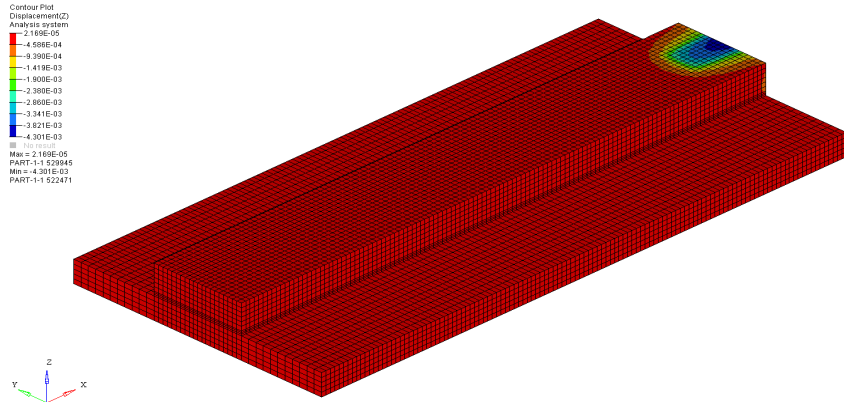
< 철판방진 주행로의 응력해석 결과 (Max. stress 0.73MPa) >



< 방진 주행로의 변위해석 결과 (Max. displacement 0.21mm) >



< 콘크리트 주행로의 변위해석 결과 (Max. displacement 4.4E-03mm) >

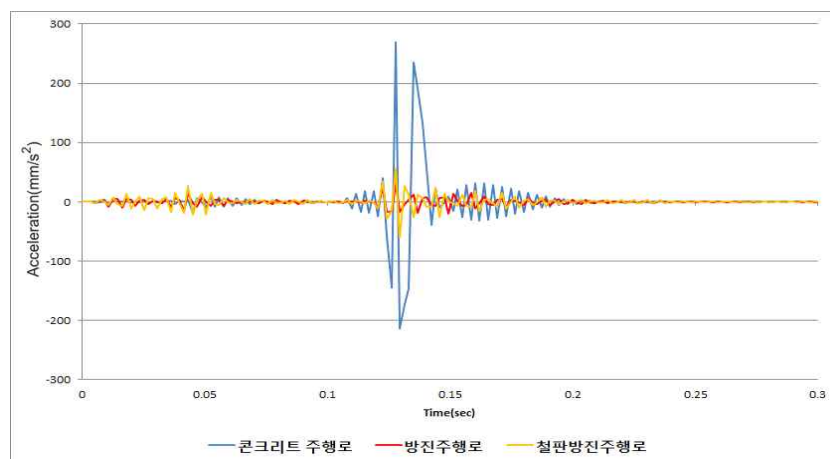


< 철판방진 주행로의 변위해석 결과 (Max. displacement 4.3E-03mm) >

③ 방진재 구조에 따른 진동해석 결과

3가지 종류의 방진재 구조에 대하여 진동해석을 수행하였다. 방진 주행로의 진동 저감 성능을 평가하기 위하여 이동하중이 가해졌을 때 특정 지점에서의 최대 진동 가속도 (A_{peak})와 진동 가속도 실효치(Root Mean Square; A_{rms}) 값의 도출하였다. 3가지 주행로에 대하여 해당 값들을 서로 비교하면 상대적으로 진동저감 성능이 우수한 방진 주행로 구조를 판단할 수 있다. 여기서 최대 진동가속도는 측정 시간에서 가속도 신호의 최고 값이며, 가속도 RMS는 진동신호의 에너지 함량을 추정해 진동 크기를 평가하는 인자이다.

아래 그림은 주행로별 진동가속도 결과이다. 방진 주행로 중앙 부근의 진동 측정점에서 시간에 따른 진동가속도 선도를 분석해보면, 가속도 값은 이동하중이 측정점의 근처를 지나는 0.12sec 부근에서 가장 큰 값을 가진다. 또한 각 주행로별 진동가속도를 비교해 보았을 때, 콘크리트 주행로, 철판방진 주행로, 방진 주행로 순으로 큰 진동이 발생함을 확인할 수 있다. 특히, 콘크리트 주행로 대비 다른 두 방진 주행로의 확연한 진동저감 효과를 분석할 수 있다. 그 중 방진재 만으로 이루어진 단순 방진 주행로가 여타 주행로 대비 가장 우수한 진동저감에 효과를 나타낸다.



< 주행로 종류별 진동가속도 결과 >

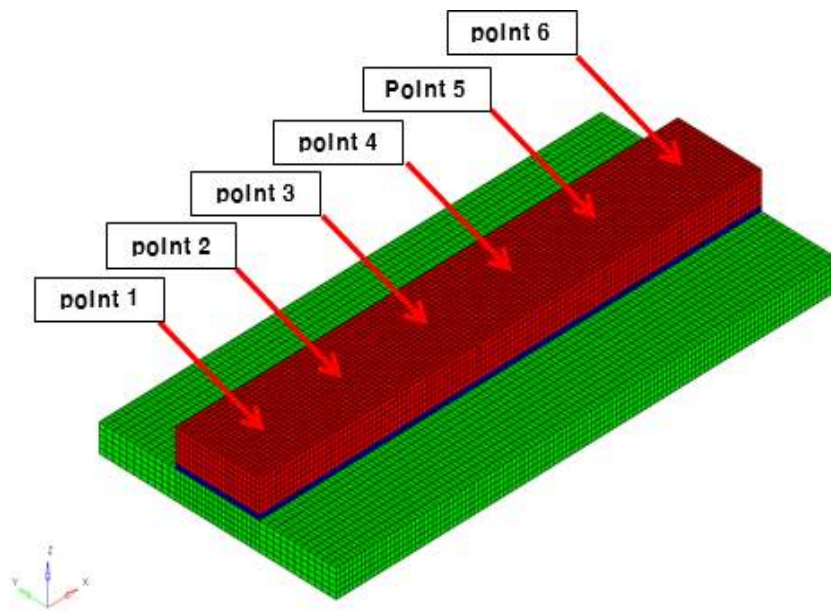
아래 표는 주행로 종류별 A_{peak} - A_{RMS} 분석 결과이다. 주행로별 진동 특성을 수치적으로 분석해본 결과, 방진주행로 경우 콘크리트 주행로보다 A_{RMS} 와 A_{Peak} 모두 70%이상 감소하였다. 특히 방진 주행로 같은 경우 85% 이상의 진동 저감율을 보여 3가지 방진 주행로 중 가장 우수한 진동 저감 효과를 보였다.

< 주행로별 진동해석 결과 >

주행로	A_{RMS} (mm/s^2)	콘크리트 주행로 대비 A_{RMS} 감소율(%)	A_{Peak} (mm/s^2)	콘크리트 주행로 대비 A_{Peak} 감소율(%)
콘크리트 주행로	29.93	-	269	-
방진 주행로	4.09	86.33	31.6	88.25
철관 방진 주행로	7.15	76.11	60.1	77.66

④ 이동하중 모델의 응력 및 변위 분석

3가지 종류의 주행로에 대해 하중 위치별 변위와 응력 해석을 수행하였다. 그림과 같이 콘크리트를 6 부분으로 나누어 각 구간별로 60km/h로 이동하는 이동하중을 부여하였다. 표를 보면 콘크리트 주행로의 6구간 모두에서 비슷한 수준의 변위와 응력이 발생하였으나 방진재가 포함된 방진 주행로와 철관방진 주행로는 콘크리트 주행로에 비하여 상대적으로 변위와 응력 편차가 크게 나타남을 알 수 있다. 특히 상대적으로 큰 변위가 발생하는 방진 주행로에서는 최대 23%까지 허용응력 차이가 발생한다. 향후 방진 재료가 포함된 프리캐스트 주행로 설계 시 이를 고려하여 설계를 수행해야 할 것이다. 그림들은 이동하중에 따른 위치별 응력과 변위 분포를 각 주행로 별로 비교한 그래프이다.



< 변위 및 응력 측정점 >

< 콘크리트 주행로 point별 최대 응력 및 변위 >

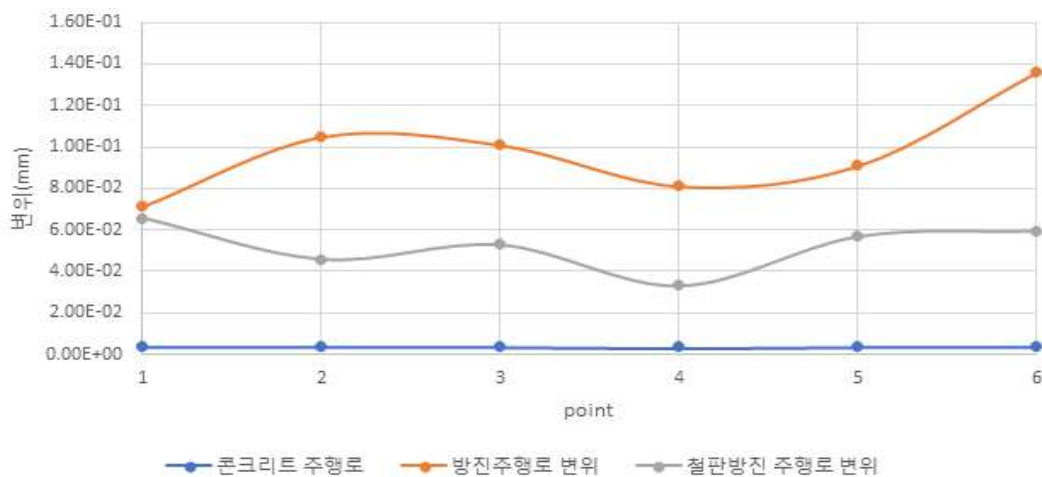
콘크리트 주행로	point 1	point 2	point 3	point 4	point 5	point 6
최대 변위 (mm)	3.508E-3	3.505E-3	3.505E-3	3.474E-3	3.504E-3	3.513E-3
최대응력 (MPa)	4.499E-01	4.498E-01	4.499E-01	4.491E-01	4.498E-01	4.505E-01

< 방진 주행로 point별 최대 응력 및 변위 >

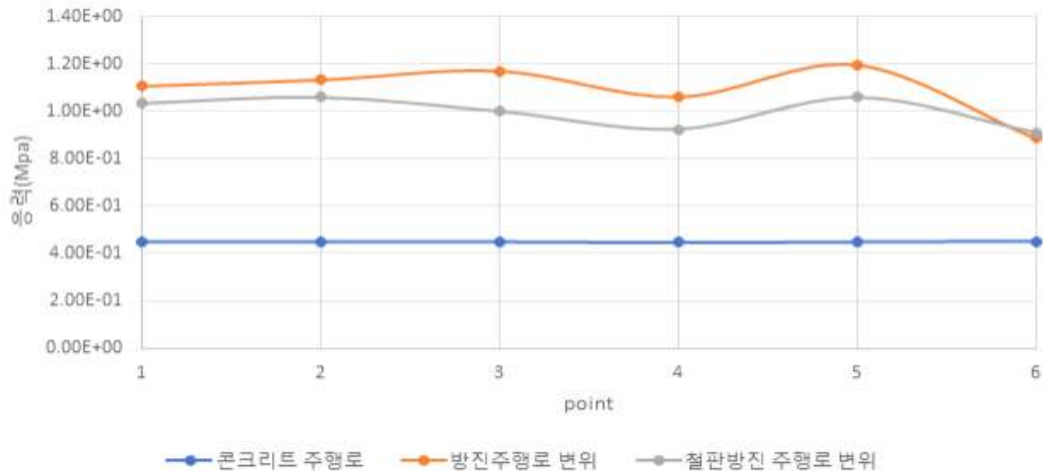
콘크리트 주행로	point 1	point 2	point 3	point 4	point 5	point 6
최대 변위 (mm)	7.13E-02	1.049E-01	1.01E-01	8.105E-02	9.093E-02	1.361E-01
최대응력 (MPa)	1.107	1.133	1.171	1.062	1.196	0.8879

< 철판방진 주행로 point별 최대 응력 및 변위 >

콘크리트 주행로	point 1	point 2	point 3	point 4	point 5	point 6
최대 변위 (mm)	6.578E-02	4.598E-02	5.288E-02	3.321E-02	5.688E-02	5.95E-02
최대응력 (MPa)	1.035	1.062	1.001	0.9228	1.062	0.9087



< 이동하중에 따른 위치별 발생 변위 >



< 이동하중에 따른 위치별 발생 응력 >

⑤ 방진 주행로 구조 선정

3가지 주행로의 구조해석 및 진동해석을 수행한 결과 구조해석에서는 콘크리트 주행로, 철판방진 주행로, 방진 주행로 순으로 낮은 응력이 발생하였다. 콘크리트 주행로와 철판방진 주행로는 허용응력을 만족하였지만 방진 주행로의 경우 허용응력을 약 15%정도 초과한 것으로 분석되었다. 따라서 구조적 안정성은 콘크리트 주행로, 철판방진 주행로, 방진 주행로 순으로 우수하다고 판단된다.

진동해석에서는 방진 주행로, 철판방진 주행로, 콘크리트 주행로 순으로 낮은 진동 크기와 진동에너지가 발생하였다. 특히, 방진 주행로의 경우, 콘크리트 주행로 대비 진동 크기 및 에너지 모두 85%이상 감소되어 가장 우수한 방진 효과를 나타내었다. 종합적으로 판단하였을 때, 감쇠성능 측면에서 방진 주행로가 가장 우수하였다.

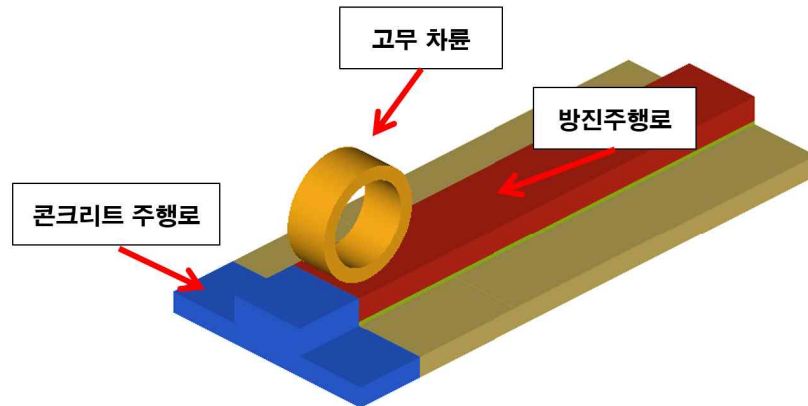
(2) 이음매부 응력해석

서로 다른 특성을 지닌 방진 주행로 구간 사이를 지나갈 때 기존 주행로에서 나타난 응력 및 변위보다 큰 변형을 일으킬 것으로 판단된다. 방진주행로 및 콘크리트 주행로의 상세해석은 고무차륜 AGT 차량에서 발생하는 하중조건에서 방진주행로, 방진재(충전재), 콘크리트 주행로에 발생하는 응력, 변위 특성을 검토하기 위하여 범용유한요소 해석프로그램 ABAQUS를 이용하여 수치해석을 수행하였다. 대표 구성은 방진주행로와 방진재(충전재), AGT의 고무차륜, 콘크리트 주행로를 3차원 형상 모델을 적용하였으며, 주행로(방진, 콘크리트)와 고무 차륜은 All with self 접촉조건을 적용하였다.

① 동특성 해석모델

방진주행로와 콘크리트 주행로, 고무 차륜을 3차원 형상으로 모델링 하였다. 방진주행로의 궤도 패널 형상(콘크리트)은 폭(W)600mm x 높이(H)200mm x 길이(L)3,600mm로 모델링하였으며, 방진재(충전재)의 형상은 폭(W)600mm x 높이(H)30mm x 길이(L)3,600mm로 모델링하였다. 또한, 고무 차륜의 형상은 폭(W)330mm, 지름 800mm이며, 콘크리트 주행로

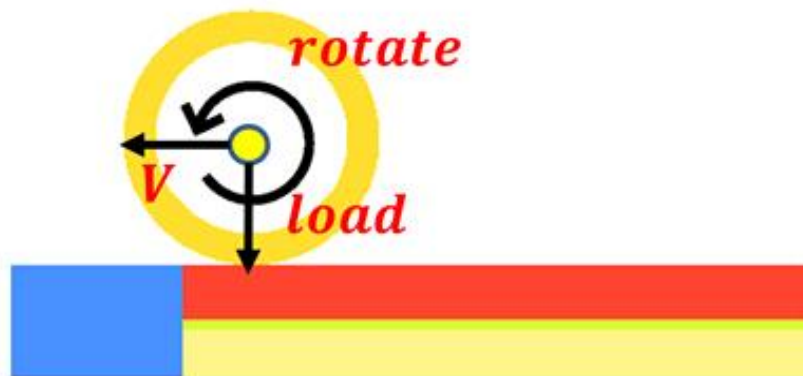
의 형상(지반)은 폭(W)1,700mm x 높이(H)150mm x 길이(L)3,600mm로 모델링하였다.



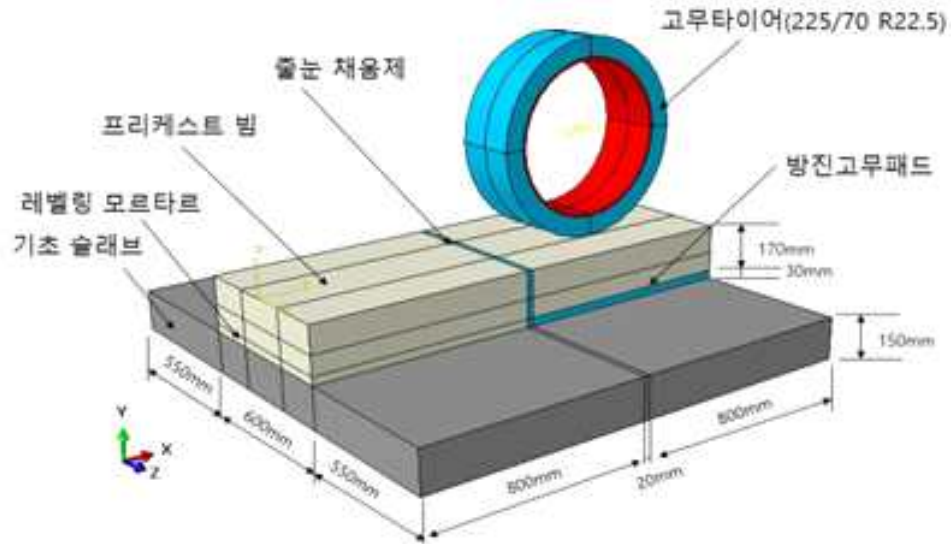
< 방진주행 이음매부 모델 >

② 동특성 해석조건

고무차륜 AGT 차량이 거동하면서 이음매 부 주행로의 응력해석을 수행하기 위하여 ABAQUS/Explicit를 이용하였다. 고무 차륜과 방진주행로 사이의 마찰계수는 0.88을 적용하였으며, 속도는 국내 고무차륜 AGT 차량의 운전최고속도인 60km/h와 만차 하중을 고려하여 윤중을 4.5ton 적용하였다. 따라서 고무차륜에 선속도는 60km/h, 회전속도는 41.7rad/s를 적용하였다. 그리고 지반 밑면의 자유도는 모두 구속하였다. 또한, 고무차륜 모델에 안쪽과 바깥쪽 2개의 파트로 나뉘서 주행로 닿는 파트는 고무모델로 형성하고, 내부 파트는 스틸 모델로 형성하여, 고무차륜의 휠과 타이어와 같은 모델을 형성하였다. 고무차륜 중심에 Reference Point를 생성하고, 내부 노드와 Reference Point를 Kinematic Coupling로 연결한다. 그리고 Reference Point에 만차 하중인 4.5ton을 적용하고 선속도와 각속도도 적용하였다. 타이어는 변형률 에너지 밀도 함수인 Ogden 3차를 사용하였다.



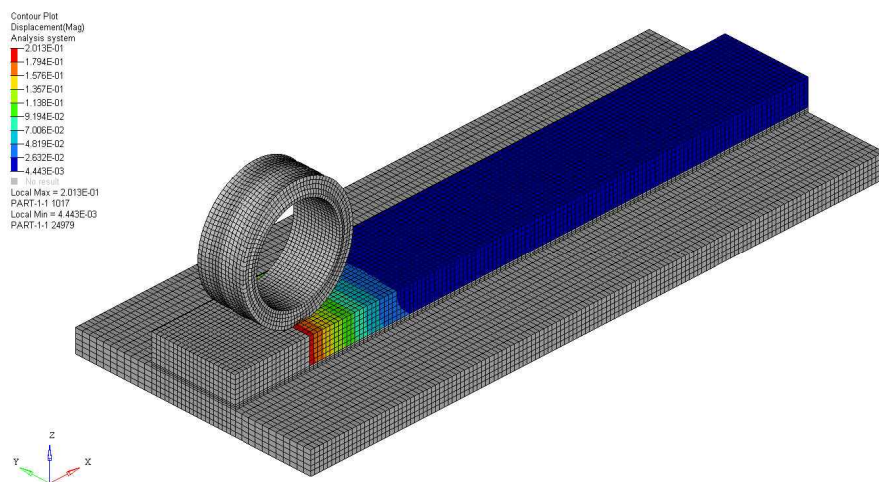
< 방진주행 이음매부 모델 >

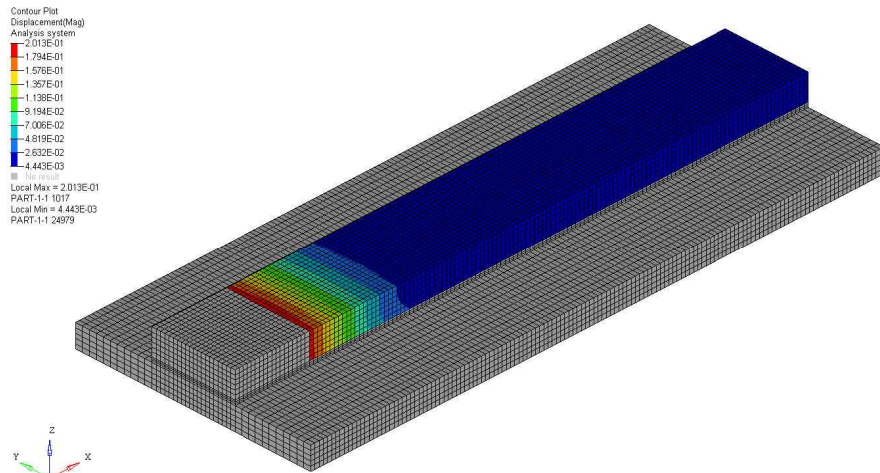


〈 FE모델의 방진주행 이음매부 경계조건 〉

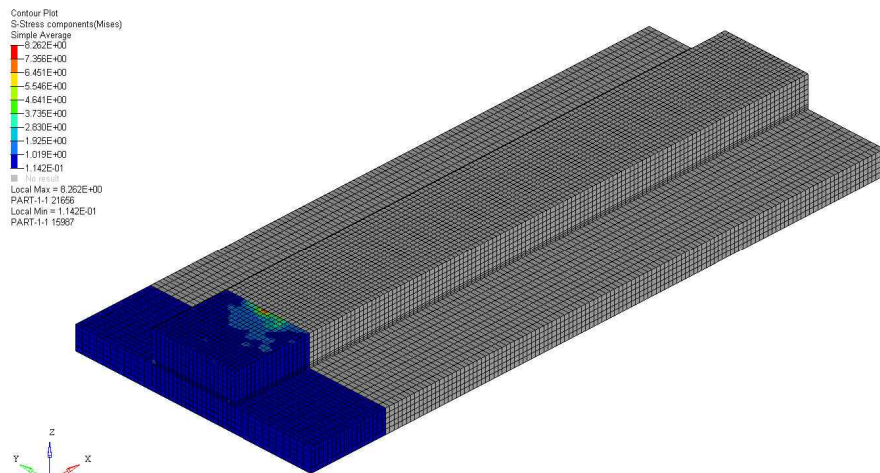
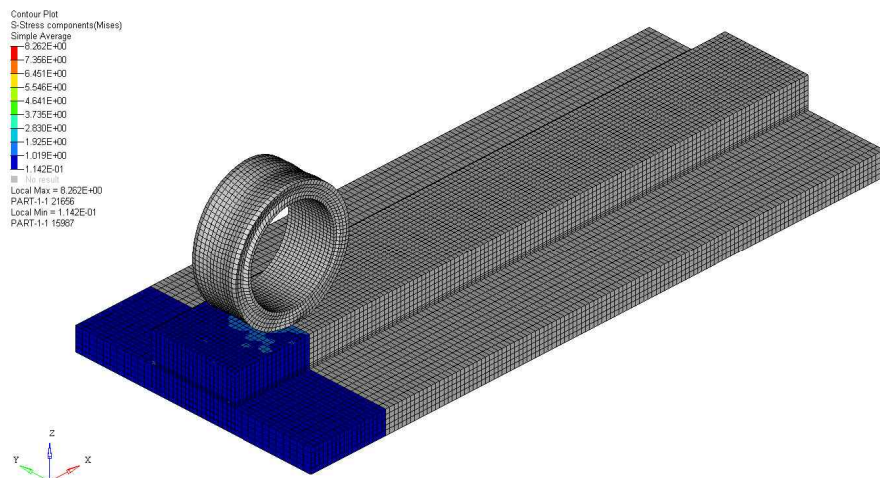
③ 발생변위 및 응력특성 검토

이음매부 주행로에 발생한 응력 및 변위는 아래 그림과 같다. 그림에서 방진 주행로에 발생한 최대 변위로 0.2mm가 발생했으며, 콘크리트 주행로의 최대 발생 응력을 나타내며 약 8MPa의 응력이 발생하였다. 이와 같은 응력이 발생한 이유는 고무차륜의 이동에 따라 콘크리트 주행로와 방진주행로의 변위차가 발생하고 그 이음매 부에서 응력이 집중 현상이 발생하기 때문이다.





< 방진주행로 발생 변위 (0.2mm) >



< 콘크리트 주행로의 응력분포(8.2 MPa) >

(3) 방진주행로 시험부설

① 경산 시험선 시험 부설 (2020.05)

개발 방진로구조의 방진성을 평가하기 위하여 경산시험선에 시험부설(토공구간)하고 그 성능을 평가하였다.

1) 시험시공 주행로 규격

. B=600mm*2열, T=250mm, L=5,000mm, 충전층 : 30mm



시험시공전 주행로 모습

2) 레미콘 규격

. 25-30-12(굵은골재 최대치수, 압축강도, 슬럼프)

3) 충전재 규격

. 품명 : edilon(sedra Corkelast VA-90)

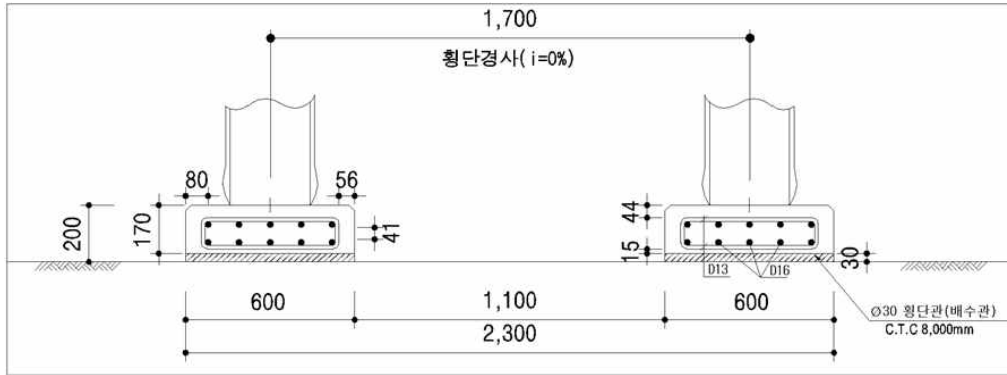
. 가사시간

제품온도(℃)	가사시간(℃)
15	14
20	13
25	12
30	11



② 방진주행로 설계

시험부설에 적용된 방진주행로의 구조는 방진재료의 유동성 및 현장시공성 확보 등의 이유로 현장타설방식을 적용하였다. 현장타설방식을 적용하면서 별도의 양카볼트는 적용하지 않았다. 구조의 표준단면은 아래 그림과 같다.



〈그림 방진주행로 적용 단면〉

③ 방진주행로 시험시공

시험시공은 한국철도기술연구원 경산 시험선에서 실시하였으며 기간은 주행로 부설관련 양생기관을 포함하여 총 15일이 소요되었으나 콘크리트 양생기간을 제외하면 순수 작업일은 7일이 소요되었다. 본 시험과 관련된 시공일정은 아래의 표와 같다.

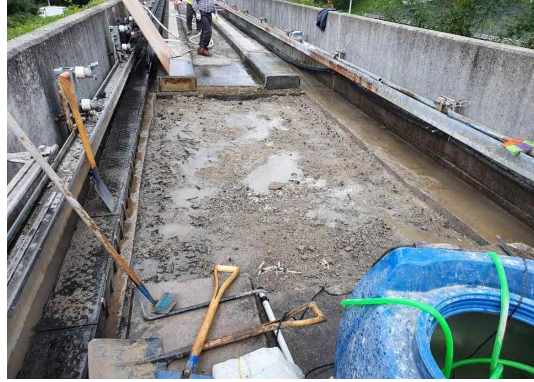
〈방진 주행로 시공일정〉

구분 월일	작업내용	비 고
9월23일	장비 및 자재반입	
9월24일	기존 주행로 철거 및 바닥청소, 하부 콘크리트 타설	
9월25일	하부 콘크리트 양생, 철근가공 조립	
9월26일	거푸집 설치 및 철근 설치	
9월27일	방진 충진재 포설	
9월28일	주행로 콘크리트 타설, 폐기물 반출	
10월9일	주행로 표면 연마	

1.2.1 방진 주행로 부설을 위해 기존에 설치된 주행로를 우선적으로 철거하고 바닥에 하부 콘크리트를 타설한후 바닥 콘크리트를 양생한다.



기존 주행로 철거



기존주행로 철거후



하부 콘크리트 타설



하부 콘크리트 타설완료

1.2.2 양생이 끝난 하부 콘크리트에 방진 충전재 5,000mm * 높이 30mm * 폭 600mm로 시공하게 된다.

1) 충전재

충진재는 edilon sedra Corkelast VA-90으로 코르크 과립 충전재로서 폴리 우레탄 수지를 기반으로 하는 무용제이며, 경화공정이 낮은 발열 반응이 특징으로 부피 수축이 방지된다.

2) 충전재는 수지 및 경화제의 두 가지 구성으로 이루어지며 액상 상태의 수지에 경화제를 중량별 혼합비 100:86.2, 또는 체적별 100:135.5 로 혼합하여 사용하게 된다.

3) 혼합시 온도는 +15℃ ~ +30℃ 에서 혼합하는 것이 이상적이다.

4) 충전재료의 역학적 물성특성을 다음 표와 같다.

〈충진재료의 역학적 물성특성〉

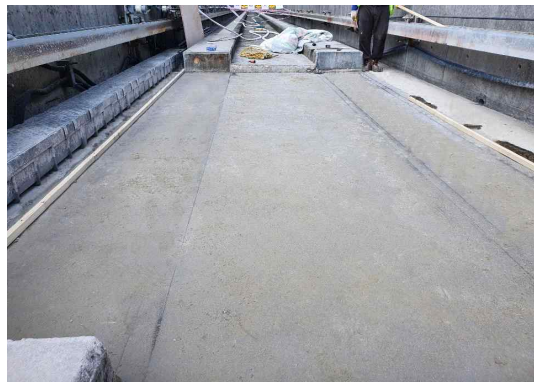
Property	Standard	Value	Unit	Additional information
Tensile strength	ISO 527	> 1.7	MPa	
Modulus of elasticity	ISO 527	7.3	MPa	
Tensile strain at break	ISO 527	> 120	%	
Static compressive modulus	ISO 604	11	MPa	Test sample size: 50 × 50 × 25 mm
Tear strength	ISO 34	> 20	N/mm	
Rubber hardness after 24 hours	ISO 7619-1	65 ± 5	Shore A	
Rubber hardness after 7 days	ISO 7619-1	70 ± 5	Shore A	
Surface wear resistance (TWA)	ISO 9352	< 263	μl / 1000 rotations	
Adhesive properties on primed steel (tested on Primer 21 and Primer U90WB)	Based on ISO 4624	> 1.7	MPa	Cohesive Corkelast failure
Adhesive properties on primed concrete (tested on Primer 21 and Primer U90WB)	Based on ISO 4624	> 1.7	MPa	Cohesive Corkelast failure

- Test samples are prepared by mixing both components thoroughly with the ediMix14 mobile mixing machine.
- Test results, are determined with cured material after 7 days at a temperature of + 20 °C, unless specified otherwise.
- The applied test samples and test methods are subject to change without prior notice.

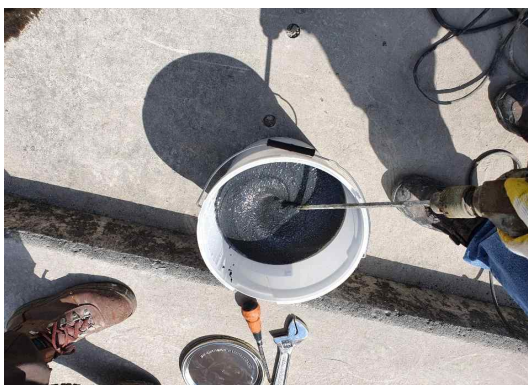
5) 충진재 시공사진



충진재 제품사진



하부 콘크리트 양생후



수지 및 경화제 혼합



충진재 충전

1.2.3 충진재가 시공되면 경화되기 까지 약30분 정도 소요된다.

1.2.4 충진재가 경화되면 충진재 위에 철근을 가공 조립한후 거푸집을 설치한다.

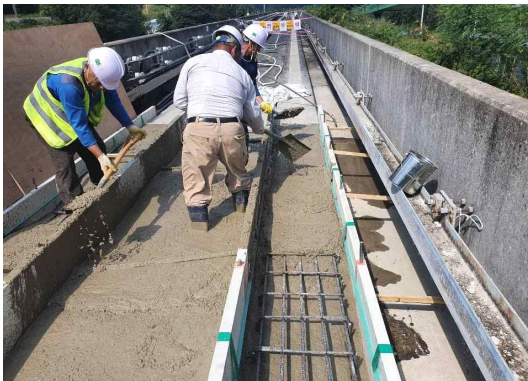


주행로 철근조립



주행로 거꾸집 설치

1.2.5 주행로 콘크리트 타설 레미콘 규격은 25-30-12(굵은골재 최대치수-압축강도-슬럼프)를 사용하여 충전재 상부에 콘크리트를 타설한다.



주행로 콘크리트 타설



주행로 콘크리트 타설후

1.2.6 콘크리트 타설이 완료되면 일정기간 양생기간을 두고 충전재 충전여부를 확인한다.



충진재 충전부 확인

1.2.7 충진이 완료된 것을 확인후에는 주행로 상부 표면 주행로 연마를 시행하여 방진주행로 시공을 마무리 한다.



〈방진주행로 시공완료 모습〉

(4) 주행로 방진성능 평가

① 차상시험

1) 측정방법

본 시험에서는 현장 타설 형의 콘크리트 고무차륜 주행로와 방진재를 삽입하여 개량된 프리캐스트 주행로의 성능을 평가하기 위하여 주행을 통해 발생하는 진동가속도의 특성을 측정 및 분석하여 주행로의 성능을 평가하였다. 시험 대상은 서울 경전철 신림선이며 측정항목은 대차의 수직, 수평 진동 가속도 및 주행로에서의 수직 진동가속도이다.

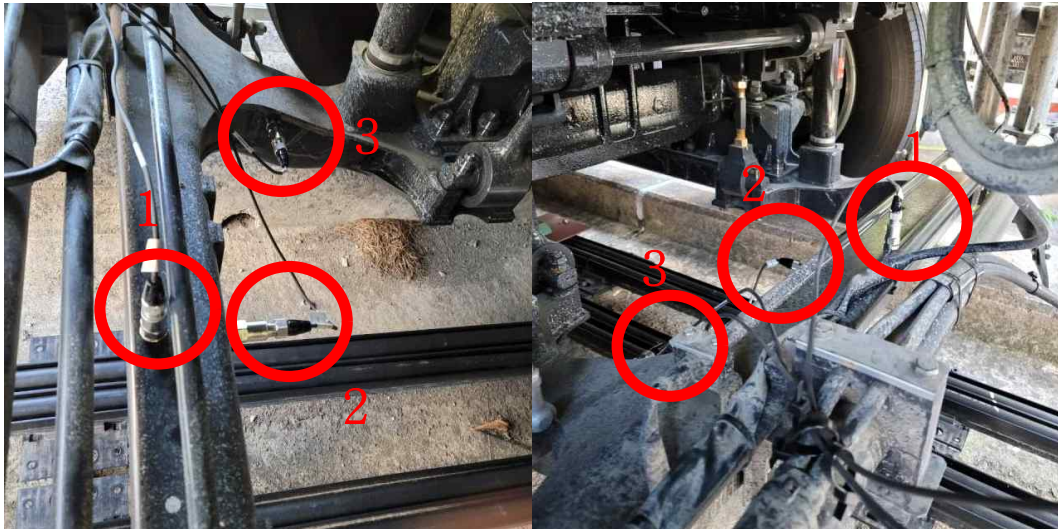
진동시험은 경산 시험선에서 진행되었으며 기존 콘크리트 주행로 및 변경 후 방진주행로 주행 시 대차와 시험 구간의 주행로에서 측정하였다. 측정항목 및 측정 위치는 표 와 같다.

〈측정항목 및 측정위치〉

측정항목	측정위치
상하방향진동의 진동가속도(대차)	전위 대차의 전방
수평방향진동의 진동가속도(대차)	전위 대차의 전방
상하방향진동의 진동가속도(주행로)	콘크리트 및 방진주행로 궤도

측정방법은 10km/h부터 40km/h까지 10km/h씩 증가한 속도로 일정하게 주행하여 대차의 진동가속도를 측정하였고, 주행로는 20km/h, 40km/h로 주행하여 속도마다 진동가속도를 측정하였다. 측정결과는 각 구간 진동가속도의 최대진폭(peak-peak, 2a)과 그 때의 속도를 구한다.

동일 속도마다 진동가속도 최대진폭의 평균치를 구한다. 주행속도를 가로축으로 진동가속도를 세로축으로 한 그래프를 그린다. 이때의 진동가속도는 최대진폭으로 중력단위인 g로 한다. 그림 3.5는 대차의 각 진동가속도 계측 위치를 나타내고 있다. 진동 측정 센서는 그림 3.5와 같이 전면부 대차에 부착되었으며 1은 대차의 수직방향, 2는 대차의 진행방향 3은 좌우방향 진동가속도 측정센서이다.



<경산 시험선 진동가속도 현장계측 측정지점 (대차)>

2) 시험 결과 및 분석

진동시험은 차량의 시험 구간 통과 시 주행방향, 속도대역, 진동가속도의 시간이력을 검토하였으며, 진동가속도의 크기를 검토하기 위하여 RMS(Root Mean Square)자료를 이용하여 주행성능을 평가하였다.

2.1) 대차 수직 진동가속도

대차 수직진동가속도는 대차 앞쪽에 설치하여 측정한다. 시공구간을 대상으로 시공전후의 차체수직가속도를 주행속도 및 주행방향(상행, 하행)별로 비교하였다. 진동가속도는 시공전후 가속도의 차이가 나타났다. 주행방향별로도 차이가 있는데, 상행에서 민감하게 반응하게 된다. Peak to peak는 오히려 방진주행로에서 크게 나타났다. 방진주행로 시공 시 기존 콘크리트 주행로를 절단하여 시공했는데 절단부에서 진동가속도가 크게 나타나는 것을 확인하였다.

아래표는 대차 수직진동가속도를 RMS(Root Mean Square)값으로 나타낸 것으로서 진동에너지의 전체 크기를 비교하는데 유효하다. 비교결과, 속도가 증가할수록 콘크리트 주행로와 방진주행로의 RMS값 증가하는데, 대차의 수직 진동가속도 RMS의 peak값은 방진주행로가 오히려 높은 값을 나타낸다. 방진주행로 시공과정에서 생긴 연결부에서 값이 크게 나타나는 것을 확인했다. RMS 평균값을 비교했을 때 상행에서는 기존 콘크리트 주행로 대비 방진주행로가 0%에서 15%까지 개선되는 것을 확인하였고 하행에서는 7%에서 14%까지 개선되는 것을 확인하

였다

<대차 수직 진동가속도 RMS Peak>

	10km/h	20km/h	30km/h	40km/h	55km/h
상행 콘크리트	1.955	3.970	4.478	4.162	5.290
상행 방진주행로	2.416	3.813	4.891	4.356	5.350
감소율	24%	4%	9%	5%	2%
하행 콘크리트	2.056	3.108	3.395	6.658	
하행 방진주행로	2.236	3.568	3.472	6.846	
감소율	9%	15%	3%	3%	

<대차 수직 진동가속도 RMS 평균>

	10km/h	20km/h	30km/h	40km/h	55km/h
상행 콘크리트	0.203	0.389	0.887	0.986	1.057
상행 방진주행로	0.203	0.378	0.792	0.847	0.902
감소율	0%	3%	11%	14%	15%
하행 콘크리트	0.431	0.525	0.789	0.845	
하행 방진주행로	0.385	0.467	0.674	0.787	
감소율	10%	11%	14%	7%	

2.2) 대차 수평진동가속도

대차의 수평진동가속도는 대차의 전방에 설치되어 차량진행의 횡방향에 대한 진동가속도를 평가한다. 수평진동가속도는 평면곡선과 안내레일의 상태에 의해서 주로 영향을 받기 때문에 정상진동가속도에 대한 평가를 수행하지만, 본 시험에서는 주행로상태에 의한 영향을 검토하기 위하여 다른 항목과 동일하게 측정하였다. 측정결과, 곡선구간에서의 정상진동가속도는 동일한 경향으로 나타나지만, 직선구간에서 대차의 수평진동가속도는 주행로의 상태에 따라서 그 차이는 크지 않지만 영향을 받는 것으로 나타났다. 주요 원인은 좌우측 주행로의 편차로 인하여 발생한 것으로 추정된다.

아래 표는 대차수평진동가속도를 RMS(Root Mean Square)값으로 나타낸 표로서 진동에너지의 전체 크기를 비교하는데 유효하다. 비교결과, 상행 방향 대차 수평진동가속도의 RMS peak는 10km/h에서 25%, 20km/h에서 27% 높게 나타났고 30~55km/h에서 9%에서 최대 27% 작게 나타났다. 하행 방향에서는 방진주행로가 콘크리트 주행로 보다 45%에서 61%까지 높게 나타났다. 상행 방향 대차 수평진동가속도의 RMS 평균은 상행 방향 10km/h에서 방진주행로가 16% 높게 나타났지만 20~55km/h에서 17~33% 작게 나타났다. 하행 방향은 10~30km/h에서 방진주행로가 10~25% 높게 나타났으며, 40km/h에서 7% 작게 나타났다.

〈대차 수평 진동가속도 RMS Peak〉

	10km/h	20km/h	30km/h	40km/h	55km/h
상행 콘크리트	0.992	1.648	2.852	2.911	3.553
상행 방진주행로	1.238	2.094	2.083	2.635	2.598
감소율	25%	27%	27%	9%	10%
하행 콘크리트	0.965	0.931	1.370	1.750	
하행 방진주행로	1.559	1.396	2.091	2.541	
감소율	61%	49%	52%	45%	

〈대차 수평 진동가속도 RMS 평균〉

	10km/h	20km/h	30km/h	40km/h	55km/h
상행 콘크리트	0.106	0.252	0.459	0.487	0.603
상행 방진주행로	0.123	0.193	0.307	0.405	0.529
감소율	16%	23%	33%	17%	29%
하행 콘크리트	0.106	0.177	0.372	0.544	
하행 방진주행로	0.132	0.208	0.336	0.505	
감소율	25%	18%	10%	7%	

② 지상시험

1) 측정방법

경산 시험선 주행로에 전동차가 지나가면서 발생하는 진동을 방진로 타설 전후비교를 통하여 현장 계측 시험을 수행하였다. 전동차가 방진로 지점을 지날 때 진동을 측정하기 위하여 방진로의 궤도에서 수직진동가속도를 측정하여 데이터를 수집하였다. 이를 바탕으로 고무차륜 AGT 시스템에 대한 진동 저감효과를 분석하고자 한다.

1) 진동 측정 장치

고무차륜 AGT 시스템의 진동 특성 데이터를 수집하기 위해서 그림 3.4와 같이 ADLINK 社の 진동 측정 장비를 사용하였다. 대차는 3채널, 주행로는 1채널을 사용하여 진동가속도를 측정하였다.

진동가속도 측정을 위하여 그림 3.5와 같은 스트레인 진동센서를 이용하였으며, 정확한 진동 데이터를 수집하기 위해서는 센서 부착지점의 표면 상태가 매우 중요하다. 이에 따른 가속도 센서의 부착 상태에 따라 데이터 신뢰성에 큰 영향을 미칠 수 있다. 대차는 철제 프레임에 부착하였고 주행로는 일반적으로 매끄럽지 않기 때문에, 이 부분에 곧바로 센서를 부착할 경우 센서와 측정지점 사이에 유격이 발생할 수 있다. 따라서 주행로에는 철판을 부착하여 센서를 고정시키는 방법으로 실험의 오차 요인을 최소화시켰다.

2) 시험결과 및 분석

2.1) 진동가속도 계측 시험

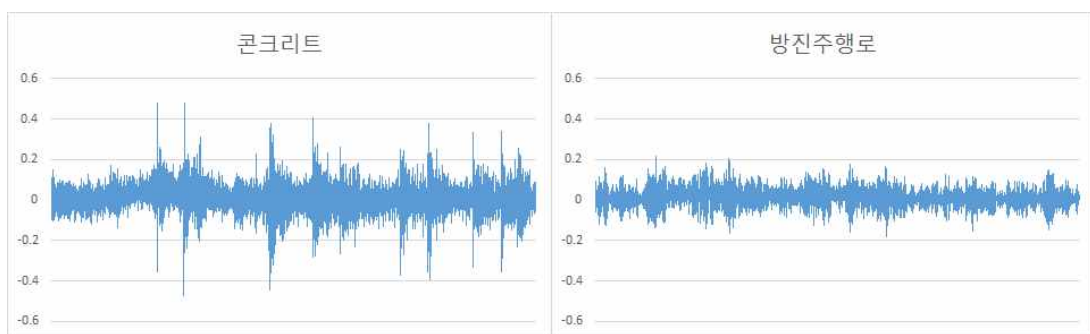
진동가속도 계측 실험에서는 콘크리트 주행로와 방진 주행로에서의 주행에 대해 그림 3.5와 같이 총 3곳과 그림 3.6와 같이 주행로 측정지점으로 총 4곳의 측정지점을 선정하였다. 해당 지점은 고무차륜 AGT 시스템과의 거리와 위치를 고려하여 선정하였으며, 거리와 위치에 따른 수직 진동가속도를 분석하여 고무차륜이 이동하면서 발생하는 진동의 영향을 확인하고자 한다.



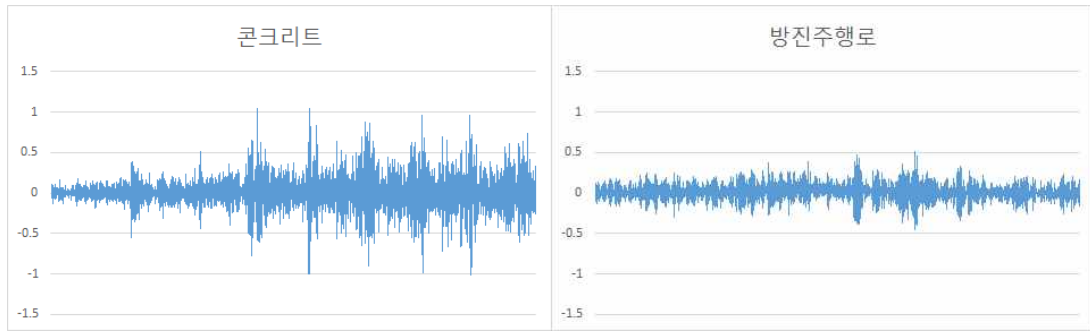
〈진동가속도 현장계측 측정지점 (주행로)〉

2.2) 주행로 수직진동가속도

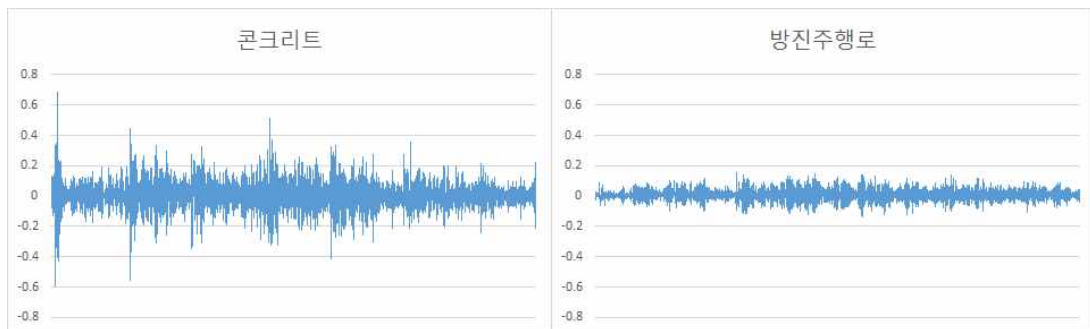
주행로 수직진동가속도는 고무차륜과 노면의 마찰에서 생기는 진동을 외부에서 평가하는 지수로 활용하기 위하여 노면에서 측정한다. 방진재 시공구간을 대상으로 시공전후의 주행로 수직진동가속도를 측정하여 비교하였다. 전체적으로 속도가 증가하면서 진동가속도도 증가하는 것을 알 수 있다. 그림 3.7 모든 경우에서의 진동가속도는 시공전후 가속도의 차이가 큰 것으로 나타났다. 그림에서 좌측은 콘크리트 주행로이고 우측은 방진재가 삽입된 방진주행로이다. 특히 일반 콘크리트 주행로의 경우 평균적인 가속도 분포와 다르게 Peak값이 높게 측정되는 경향을 보인다. 방진주행로의 경우 콘크리트 주행로에 비해 40% 이상의 편차가 감소하는 경향을 보이며, 속도가 빠를수록 효과가 큰 것으로 나타났다.



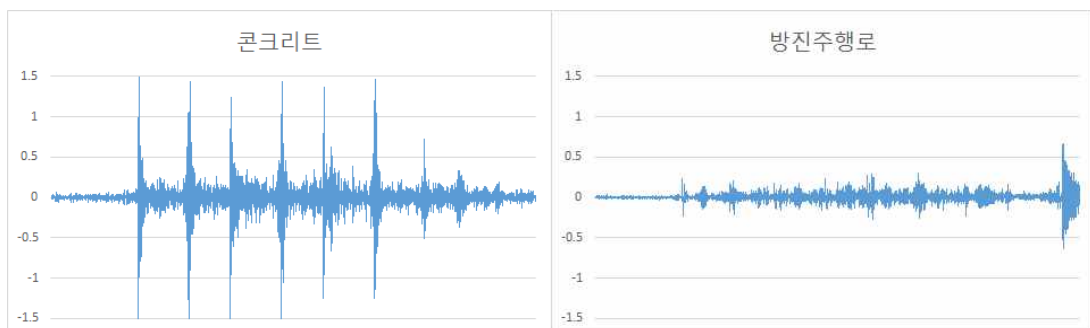
(a) 주행로에 설치된 수직방향 진동가속도(상행, 20km/h)



(b) 주행로에 설치된 수직방향 진동가속도(상행, 40km/h)



(c) 주행로에 설치된 수직방향 진동가속도(하행, 20km/h)



(d) 주행로에 설치된 수직방향 진동가속도(하행, 40km/h)

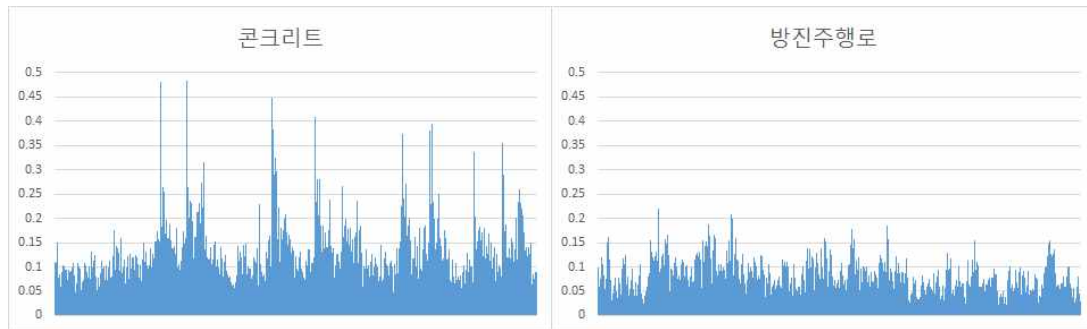
〈 주행속도 및 주행방향별 주행로 수직진동가속도 〉

〈주행로 진동가속도 Peak 표준편차〉

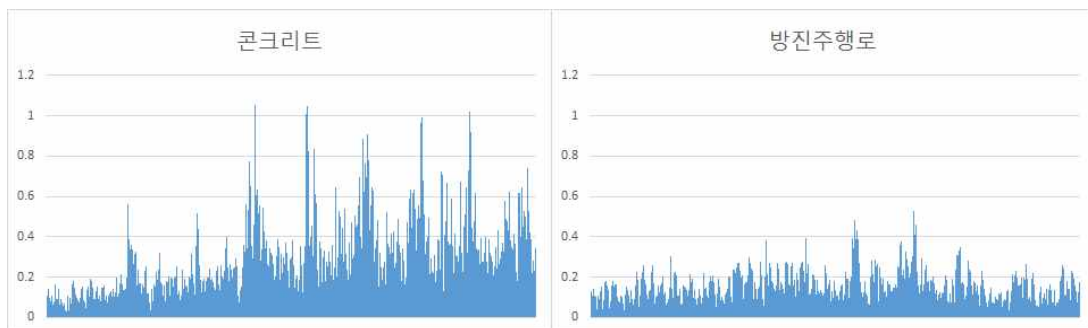
표준편차(G)	상행 20km/h	상행 40km/h	하행 20km/h	하행 40km/h
콘크리트 주행로	0.077084	0.216999	0.096044	0.194859
방진 주행로	0.048679	0.109612	0.040642	0.072701
감소율	36.85%	49.49%	57.68%	62.69%

그림 3.8은 주행로 수직진동가속도를 RMS(Root Mean Square)값으로 나타낸 그림으로서 진동에너지의 크기를 비교하는데 유효하다. 비교결과, 저속구간에서는 30%, 고속구간에서는 4

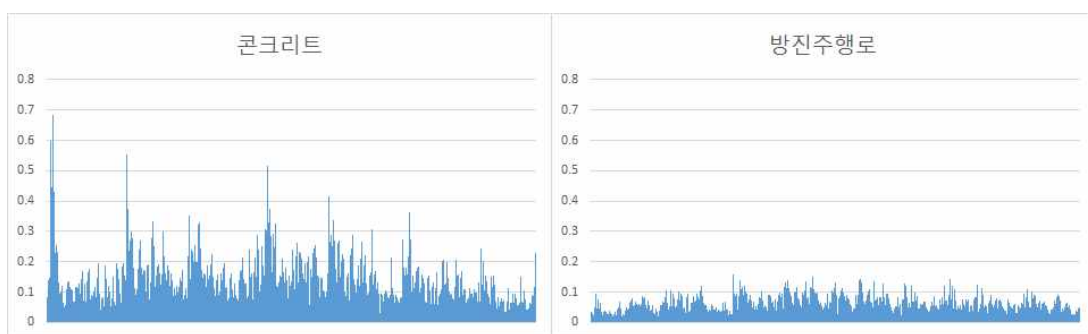
0% 가량의 감소율을 보인다. 편차 또한 저속구간에서 40% 고속구간에서 50%의 감소율을 보이며 매우 효과가 큰 것으로 나타났다. 하행의 경우, 상행보다 더 큰 진동감소가 나타났으며, 속도에 관계없이 평균은 50% 표준편차는 60%의 감소율을 보였다. 특히, 콘크리트 주행로에서 발생하는 주기적으로 높은 Peak값이 두드러지게 감소하는 경향을 보이는데, 주행 시 차륜과 노면의 접촉에서 발생하는 주기적인 진동이 효과적으로 줄어드는 것으로 보인다.



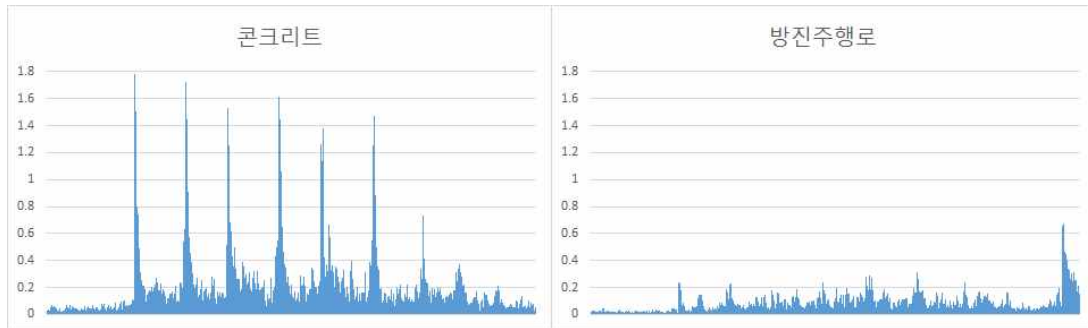
(a) 주행로에 설치된 수직방향 진동가속도(상행, 20km/h)



(b) 주행로에 설치된 수직방향 진동가속도(상행, 40km/h)



(c) 주행로에 설치된 수직방향 진동가속도(하행, 20km/h)



(d) 주행로에 설치된 수직방향 진동가속도(하행, 40km/h)

<주행속도 및 주행방향별 주행로 수직진동가속도>

<주행로 진동가속도 RMS 평균>

평균(G)	상행 20km/h	상행 40km/h	하행 20km/h	하행 40km/h
콘크리트 주행로	0.05788	0.0155148	0.070769	0.10272
방진 주행로	0.039096	0.085398	0.0324	0.046044
감소율	32.4542%	44.9572%	54.2177%	55.1755%

<주행로 진동가속도 RMS 표준편차>

표준편차(G)	상행 20km/h	상행 40km/h	하행 20km/h	하행 40km/h
콘크리트 주행로	0.051885	0.151855	0.065166	0.165581
방진 주행로	0.03158	0.069767	0.025942	0.05499
감소율	39.1353%	54.0569%	60.1908%	65.8785%

다. 주행로 색판 시제품 제작

(1) 기존 색판의 문제점

기존의 주행로 색판은 일단 설치를 하게되면 주행로와 색판의 높이차가 있어도 조절할 방법이 없었다. 이는 차량 운행시 진동 발생의 원인이 되어 많은 문제가 발생되었고, 또한 주행로 연마시 색판 부근은 연마가 불가능하여 색판 통과시 차량진동을 유발하여 차량에 탑승한 승객에 좋지 않은 승차감을 느끼게 하였다. 기존에 제작된 색판은 다음과 같은 문제점이 발생하였다.

㉠ 색판 상판 분리 및 박락

색판 입고 당시 여러 시제품을 제작하여 현장에서 강도시험 및 접착시험을 시행하였으나 열차충격이 색판에 직접적으로 가해져 색판상판 분리 및 박락현상이 발생하였다.



< 색판상판 분리 >



< 색판상판 박락 >

㉡ 하부 라이너 높이차 발생

도상높이 불균형(내, 외측의 높이차)등으로 인한 색판하부 라이너 높이차가 발생하여 색판 볼트고정이 불안정하고, 시공시 라이너 높이차에 따른 규격별 상이한 볼트를 준비해야 하는 불편함이 발생하였다.



< 하부라이너 높이차 발생모습 >

㉢ 색판 하부와 트러프 간섭

색판하부 라이너 교체시 트러프(신호, 통신관로) 간섭으로 인한 분해조립에 어려움이 있고 라이너 교체시 상판 및 하부 지지대를 완전히 해체해야만 교환할 수 있어 유지관리 업무에 상당한 어려움이 있다.

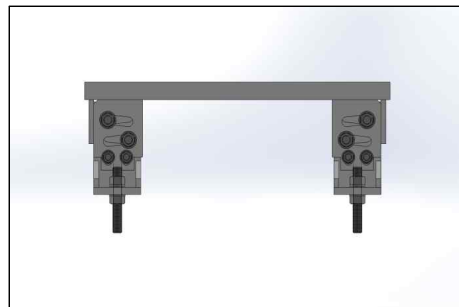
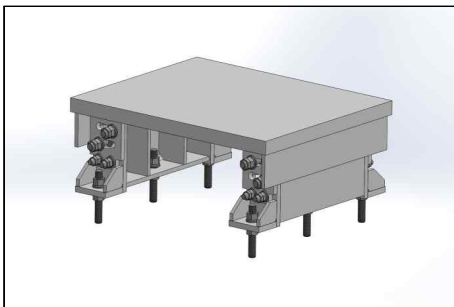


〈 색판하부와 트러프 간섭 〉

(2) 색판 성능 개선

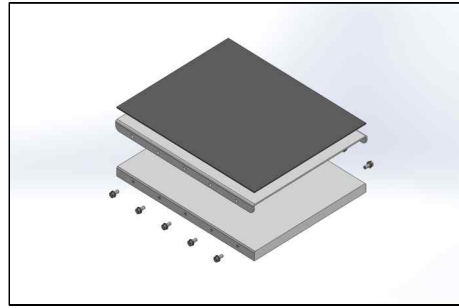
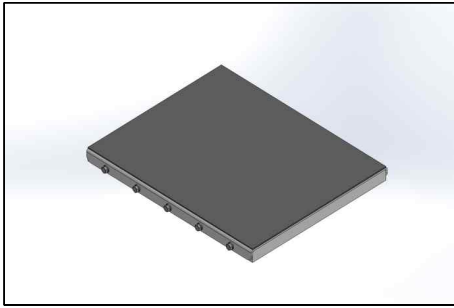
기존의 고무차륜 주행로 색판의 상판은 두꺼운 상판에 직접 모르타르를 도포해 사용한다. 사용중 모르타르가 파손되거나 닳아서 높이가 낮아져 교체하려면 상판 전체를 바꾸거나 상판의 모르타르를 걷어내고 새로 도장해야한다. 교체시에는 상판을 통째로 바꿔야 하며 작업 효율이 떨어지고 직접 현장에서 도장하게 되면 경화되는 시간동안 사용 할 수 없어 안전 및 부실 작업의 우려가 많았다. 또한 상면에 흠이 있어 모르타르의 초기 파손 원인이 되기도 한다.

이번 주행로 색판개발은 고무차륜 AGT 주행로의 높이조절이 가능한 색판으로서 색판의 하부 4곳에 장공(가로나 세로방향으로 비스드함 홈)을 비스듬히 2중으로 가공하고 또 상하로 된 장공이 2개가 가동된 브라켓을 부착하였다. 프레임에는 이와 대칭된 경사 장공을 가진 브라켓을 사용한다. 장공의 경사면을 따라 볼트체결을 하게 되면 경사 장공높이의 2배거리 만큼 높낮이 조절이 가능하게 하였다. 또한 상하 장공에 볼트로 체결하여 고정을 보완하게 하였다.



〈 색판 개발구상안 〉

현재의 불필요한 방법들을 개선하기 위해 상판을 2중 구조로 하여 하중을 주로 지지하는 하부 상판과 절곡한 철판위에 미리 모르타르를 도포한 상부 주행판 으로 구성하여 상판 전체를 교체하지 않고 상부 주행판 만 교체할 수 있게 하여 작업 능률을 올리고 현장에서 안전작업을 도모 할수 있게 하였다. 또한 여유분으로 모르타르를 작업한 상부 주행판을 미리 준비할 수 있어 균일하게 작업된 제품을 사용할수 있어 안전된 주행면을 유지할수 있게 하였다.



〈 주행로 상판 교체 개발안 〉

① 개발 색판의 구성 및 작용

금번 과제에서 개발하는 주행로 색판의 각각의 명칭 및 구조는 아래와 같으며, 각각의 역할은 다음과 같다.

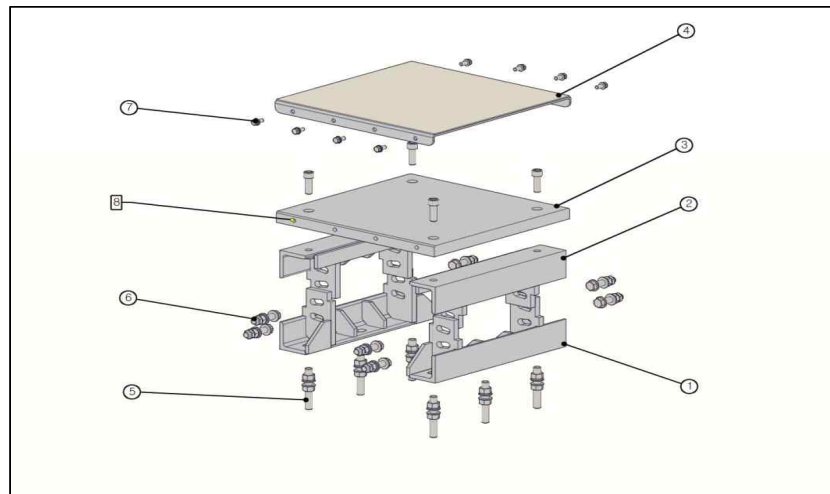
㉠ 하부프레임은 주행로 색판의 전체적인 하중을 지지하고 주행로 색판과 콘크리트 바닥면과의 고정역할을 하는 지지체 역할을 한다.

㉡ 상부 프레임은 주행로 색판의 상부 교체판의 지지역할과 상부 교체판과의 연결역할을 한다.

㉢ 상판은 차량이 통과하는 상부 주행판의 지지역할을 하며, 주행로 상부 주행판 교체시 상부 주행판 고정용 볼트를 체결할수 있도록 탭가공 홀을 지니고 있다.

㉣ 상부 주행판은 차량이 직접 통과하는 구간이며 모르타르 도포 뿐 만이 아니라 여러 가지 방법으로 표면처리가 이루어질수 있다.

㉤ 앵커볼트는 하부 프레임을 콘크리트 바닥면에 고정하는 역할을 한다.



〈 개발주행로 색판의 구성 〉

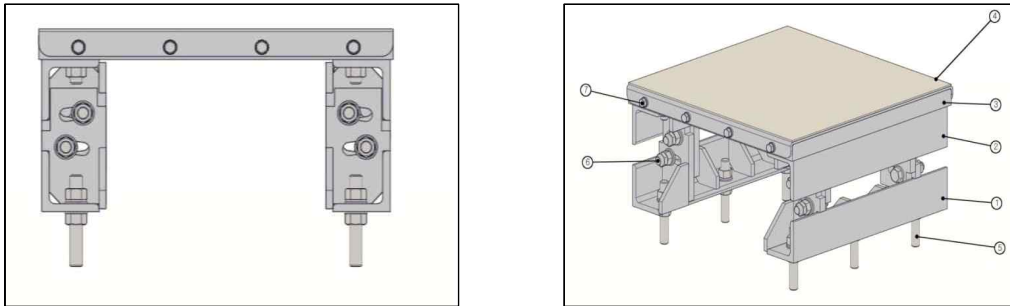
㉥ 높이조절용 볼트는 주행로 색판의 높이조절 역할을 한다.

㉦ 상부주행판 고정용볼트는 상판위에 상부주행판을 덮은 상태에서 상부주행판이 이동이나 움직임이 없도록 고정하는 역할을 한다.

㉧ 탭 가공은 상판과 상부주행판이 볼트로 연결될수 있도록 너트 역할을 하게 된다.

② 개발 색판의 사용 방법

경사진 프레임으로 상하 세트로 구성되어 색판을 경사면을 따라 이동시켜 고정하면 높이 조절이 가능하다. 높이 조절이 완료되면 경사면과 같은 각도를 가지는 장공에 볼트를 체결하여 고정한다. 외부로 노출된 볼트는 점검시 눈에 잘 띄어 이상 상태를 발견하기가 수월하여 점검 시간을 단축 시켜준다.



< 개발주행로 색판 작동 예시 >

주행로 색판 하부프레임을 앵커볼트를 이용해 바닥 콘크리트에 설치한 후 높이조절용 볼트를 이용하여 주행로 상부프레임을 좌우로 이동시켜 원하고자 하는 높이에 도달하면 볼트를 조이면 주행로 색판의 높이가 고정되게 되어있다. 상부프레임과 상판을 조립하고 상판에 탭가공을 상부주행판을 조립하는 구조로 주행로 색판 변형 및 파손시 전체 주행로 색판을 교체하지 않고 상부주행판만 교체가 가능토록해 유지보수 비용을 절감하고 주행로 색판 보수시간을 단축시킬수 있도록 하였다.

③ 개발 색판의 기대효과

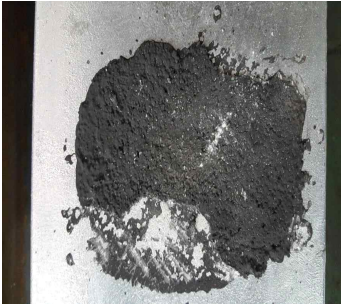
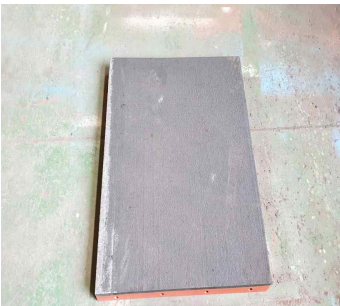
㉠ 기존 주행로 색판에서는 1회 설치된 이후 차량운행에 따른 진동 및 충격으로 주행로 색판이 최초 설치상태의 변형이 오게 되면 주행로 색판의 하부 앵커를 모두 재설치하여 조정하는 문제점을 해결할수 있다.

㉡ 본 개발의 효과로 주행로 색판의 주행판 균열이나 파손이 발생할시 주행로 색판 전체를 교체하지 않고 주행판만 교체할수 있게 되어 주행로 색판의 교체주기를 늘리고 유지관리 비용을 절감할수 있게 한다.

㉢ 또한 주행로 연마시 주행로 색판부근은 주행로 연마를 하지 않고 통과하던지 주행로 면을 색판높이에 맞추어 연마를 진행하게 되는 문제점을 주행로 연마 두께 만큼 색판의 높이를 조절할 수 있게 되어 주행로 연마시 일정한 주행면을 유지할수 있게 한다.

(3) 주행로 색판 시제품 제작

금차년도에 주행로 색판개발안이 완료되어 시제품제작을 수행하였다. 시제품 제작과정은 아래와 같다.

		
색판 상판가공(홀가공)	색판 상판제작 완료	색판 지그제작
		
색판 MMA접착테스트(철판)	색판MMA접착테스트 (아연도금)	주행판MMA접착테스트
		
주행판 제작완료	색판상판과 주행로판 조립	색판제작 완료

〈 개발 주행로 색판 제작과정 〉

색판제작 과정은 색판상판제작과 주행판제작으로 크게 2가지 공정으로 나뉘어진다. 우선적으로 주행로 상판은 차량의 중량을 받고 지탱하여야 하기 때문에 전체가 철판으로 두껍게 제작되어지고 향후 주행로판의 조립을 위해 측면에 탭가공이 이루어진다. 주행로판은 차량의 바퀴가 직접 통과하는 곳으로 표면의에 MMA 수지를 도포하여 미끄럼 저항치를 확보할수 있도록 하였다. 또한 색판 상판과의 조립을 위해 측면에 탭가공도 이루어진다.

열차운행으로 인한 주행로판의 MMA수지등이 파손 및 탈락등이 발생하게 되면 주행로 상판만 간단하게 교체할수 있게 되어있다. 또한 주행로 상판의 두께와 MMA 수지의 도포높이를 서로 조정하여 주행로와의 평탄성도 확보할수 있게 되어있다. 주행로 연마시에는 주행로 상판만 분리하여 주행로 연마시 주행로 색판에 손상이 없도록 하였다.

라. 밀착형 분기기 제작 및 성능평가

(1) 수평안내식 분기기 문제점 분석

① 가동안내판

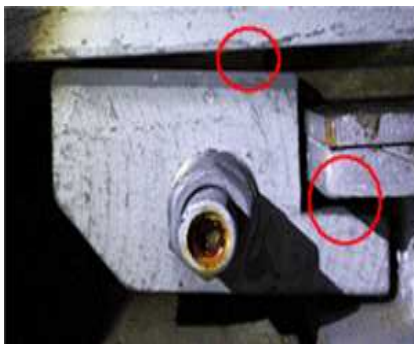
기존 분기기의 가동안내판은 제작 시 용접길이가 길어 열변형에 의한 뒤틀림현상이 발생, 이로 인해 축수의 조립견고성 및 수대의 밀착성이 나빠지고 슬라이딩 플레이트의 들뜸현상이 발생되게 된다. 이로 인해 고정블럭과 가동안내판 하부의 밀착불량이 발생하게 되어 열차가 분기기로 진입 시 심한 진동과 함께 소음이 발생되고 있다. 현재는 분기기가 주로 차량기지나 지하구간에 설치되어 있으나 향후 저심도 철도 등이 건설되게 되면 철도시설물과 주택가등이 5~10m 내외로 가까워지게 될 때는 상당한 문제로 대두될 수 있다.



< 가동안내판 형상 >

② 고정블럭

고정블럭은 가동안내판에 연결되어 있기 때문에 가동안내판에 뒤틀림이 발생하면 고정블럭과 가동안내판 하부의 밀착성이 떨어지게 되며, 수대하부 와도 이격이 발생되게 된다. 이로 인해 열차진입 시 가동안내판에 충격이 주어지게 되면 가동안내판 하부의 슬라이딩 플레이트가 빠져나오는 경우가 발생하게 된다.

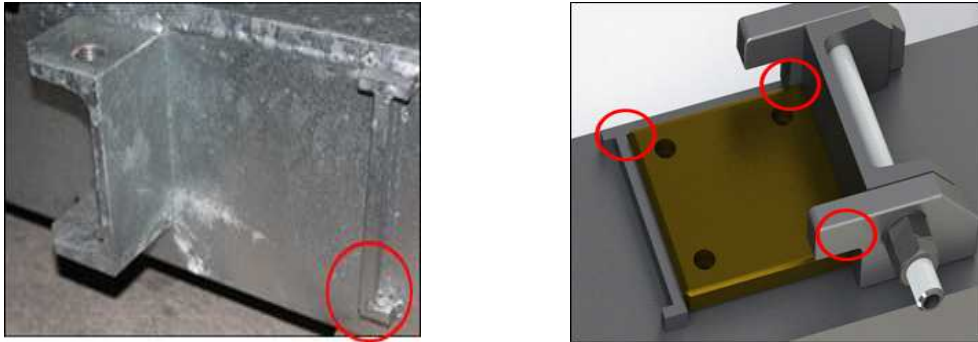


< 고정블럭 사진 >

③ 슬라이딩 플레이트 고정부

가동안내판 하부와 수대상부의 미끄럼판 위에는 가동안내판의 원활한 전환을 위한 슬라이

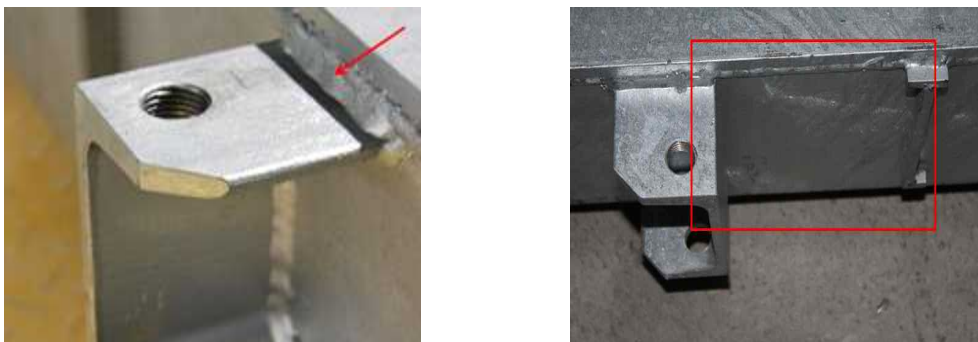
이딩 플레이트(동판)이 설치되어져 있다. 이 슬라이딩 플레이트가 미끄럼판 위에서 자연스럽게 미끄러지면서 가동안내판이 전환되게 된다. 그러므로 이 슬라이딩 플레이트는 가동안내판 전환에 필수적인 조건이며, 탈락 및 빠지지 말아야 한다. 현재 부설된 기존 가동안내판의 하부를 보면 슬라이딩 플레이트 고정부의 일부가 OPEN된 구조로 되어있으며 가동안내판과 고정블럭, 수대등이 밀착되어 부설되지 못할 경우 열차진입시 충격 및 진동 등으로 인해 슬라이딩 플레이트가 가동안내판 하부에서 빠져나오는 경우가 발생할 수 있다.



< 슬라이딩 플레이트 고정부 모습 >

④ 각종용접 부위

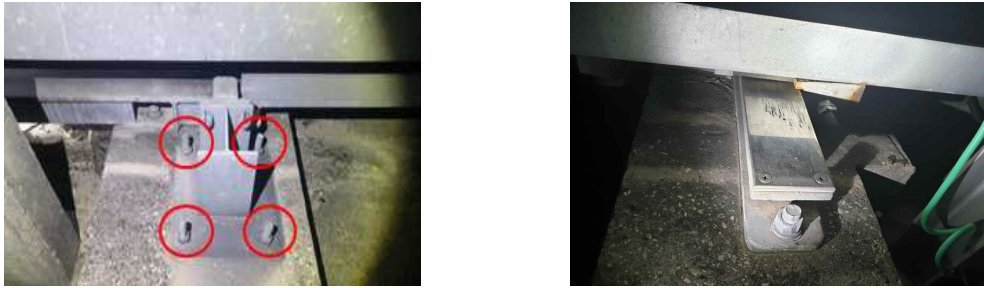
가동안내판 하부 고정블럭 체결부위는 고정블럭이 밀착하여 조립되는 부위로서 용접을 하게 되면 고정블럭의 밀착이 불가능하게 된다. 이에 현장에서는 고정블럭이 밀착되는 곳에 고정블럭을 모따기를 시행해서 시공하였다. 또한 슬라이딩 플레이트도 표면이 아주 정밀하게 가공되어 있어 가동안내판과 밀착되어 설치되어져야 하나 슬라이딩 플레이트가 설치되는 곳에 일반용접이 되어 있어 슬라이딩 플레이트가 들뜬상태로 설치된다.



< 가동안내판 용접부위 >

⑤ 축수 및 수대

현재 부설되어져 있는 고무차륜 AGT 분기기의 수대 및 축수는 매립형으로 상하높이 조절이 불가능함으로 가동안내판 설치시 상당한 어려움이 있고 향후 열차진행으로 인한 변형 발생시 유지관리의 어려움이 있다. 또한 주행로 연마시 안내레일은 높이조절이 가능하나 분기기 수대 및 축수는 매립형이기 때문에 높이 조절이 불가능하다.

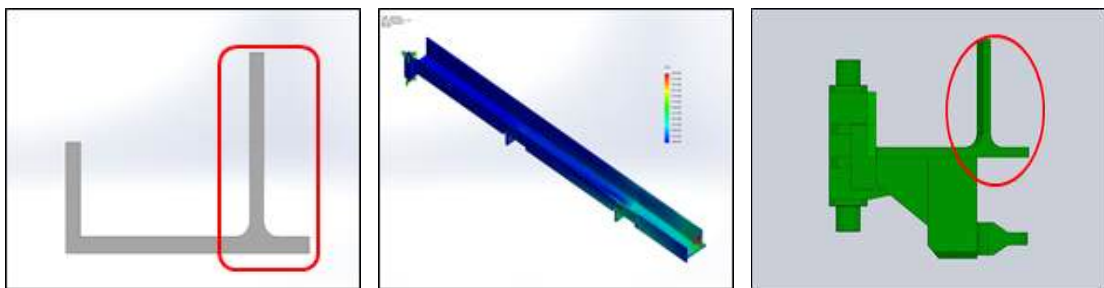


< 축수 및 수대 볼트매립 모습 >

(2) 수평안내식 분기기 개량방안

① 가동안내판 형상변경(L -> T)

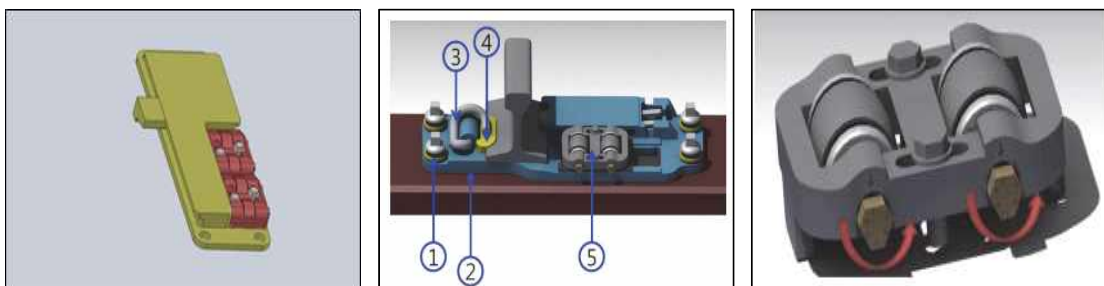
가동안내판의 형상 변경으로 용접부위를 최소화함으로써 용접 열변형에 의한 뒤틀림을 최소화 하고, 각종 부속품 고정블럭, 슬라이딩 플레이트들이 가동안내판 하부에 정밀하게 설치될 수 있도록 하였다. 또한 가동안내판의 형상을 L-> T로 변경함으로써 차량진입시 가동안내판에 작용하는 횡력을 감소시키는 역할을 한다.



< 가동안내판 형상변경 모습 >

② 슬라이딩 플레이트 롤러변경

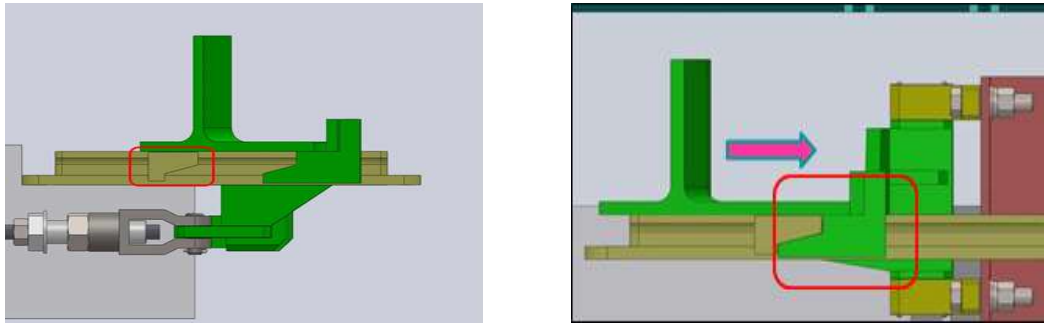
슬라이딩 플레이트를 사용하지 않고 일반철도에서 사용되는 분기기 롤러형식으로 변경하여 슬라이딩 플레이트를 사용하지 않고 고무차륜 AGT 수평안내식 분기기 가동안내판 전환 작업이 가능하도록 구상하였다.



< 슬라이딩 플레이트 롤러개량안 >

③ 고정혹크 설치

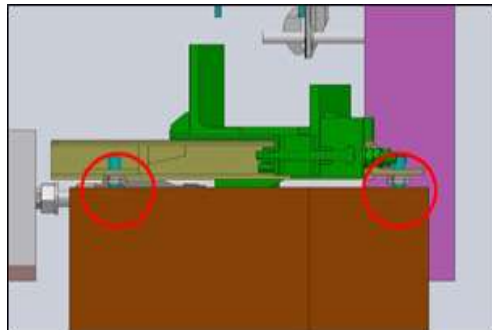
가동안내판 하부에 고정혹크를 설치하여 가동안내판의 방향전환이 완료되었을 때 고정블럭과 고정혹크가 끼워지는 형태로 하여 열차진입 시 가동안내판에 횡압이 가해지더라도 가동안내판이 들뜨지 않도록 하는 기능을 보완하였다.



< 정후크 설치 개량안 >

④ 수대 및 축수 상하높이 조절가능 볼트, 너트 설치

수대 및 축수 상하 높이 조절가능 볼트 및 너트 설치로 수대높이가 조절 가능하도록 하여 분기기 설치시 시공향상을 도모했으며, 향후 분기기 교체 및 유지관리 작업이 용이하도록 하였다.



< 수대 및 축수 개량안 >

(3) 밀착형 분기기 설계

① 가동안내판 구조 해석

가동안내판의 형상을 비교하기 위해 기본적인 구속 조건과 단순 집중하중을 부가해서 해석한 결과 T형 구조가 L형 구조보다 뒤틀림 변형에 좀 더 안정적이라는 결과값이 도출되었다. 앞으로 재료 수급이나 제작상의 가공성, 용접성 등 제작여건에 따라 적용가능성이 변할 수 있겠지만 우선적으로 개발하는 가동안내판은 T형 또는 이와 유사한 형상으로 제작하는 것이 좋을 것으로 판단된다.

설계된 고무차륜 AGT분기기를 구조해석 하였으나 개발과정에서 일부 부분이 변경되고,

현장시험부설 조사당시 현장여건과 설계여건이 불일치하여 제작전 도면의 일부를 변경하였기에 분기기 시험부설전 구조해석을 재해석하여 하였고 현장에 반입되는 고무차륜AGT분기기의 검사시트 등도 재작성 하였다.

- AGT분기기에서 가동안내판에 걸리는 힘
분기기를 통과 할 때 최대속도 30Km/h=8.33m/s이고 최소회전반경 R=30m로 가정한다.

- 분기륜에 작용하는 하중

열차의 최대중량 18ton이고 한 방향에 4개의 분기륜이 있으나 바퀴 양쪽에 있는 2개의 간격이 좁아 동시에 가동안내판에 접촉 할 수 있기 때문에 이 2개의 바퀴에 작용하는 하중을 하나로 가정한다.

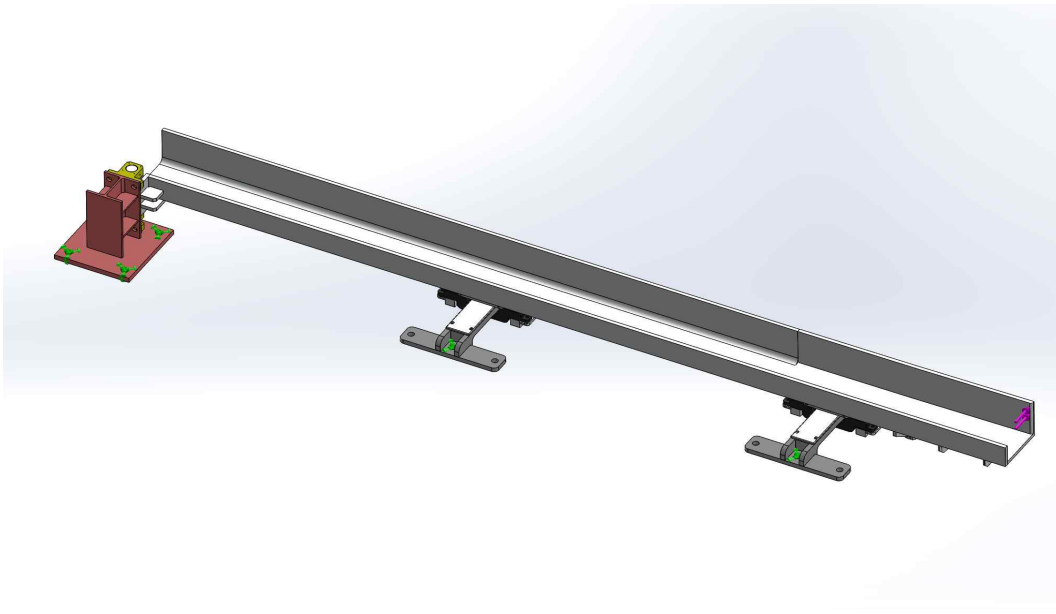
$$\frac{1}{9.8} \times \frac{8.33^2}{30} \times 18000 \div 2 = 2124\text{kgf}$$

통상 안전율 1.5를 적용하면 $2124 \times 1.5 \approx 3186 \text{ kgf}$ 이고 이것을 SI 단위계로 바꾸면 31,222N인데 해석의 편의를 위해 40,000N을 적용한다.(안전율 1.92)

- 분기륜은 가동안내판을 따라 이동하지만 구조상 초기 진입부에 가장 큰 힘을 받기 때문에 진입부에 집중하중을 받는 조건으로 정적 해석을 한다.

- 집중하중 받는 면적을 40x2 로 함(분기륜 폭이 40이고 순간 접촉되는 면은 2로 가정)
- 응력 해석과 무관한 부품은 제거 후 실행.
- 축수 및 수대 양카 고정 위치를 고정부로 지정.
- 일체형 본드 결합 적용

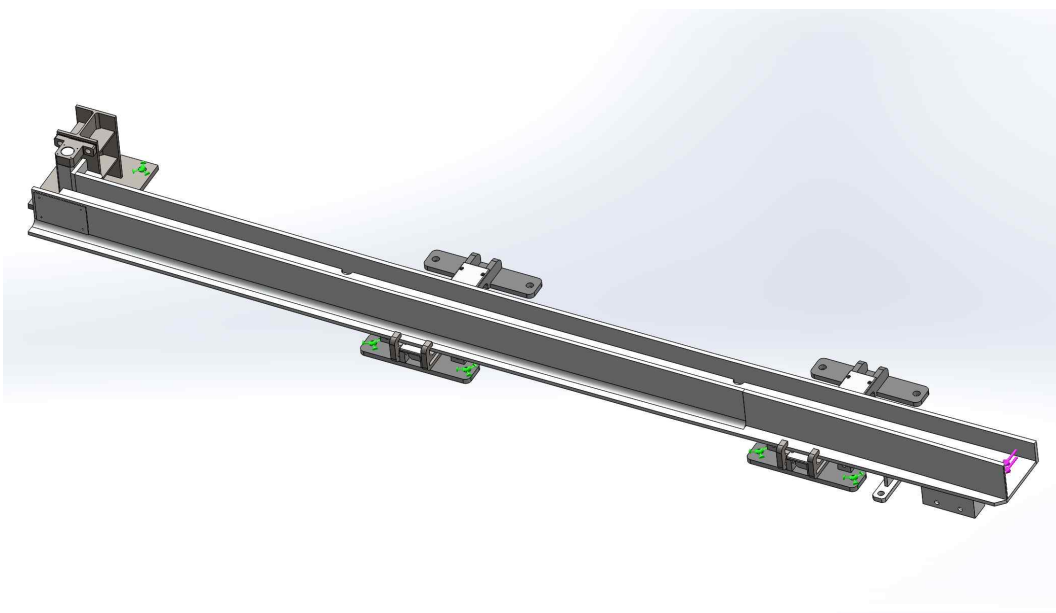
AGT 분기기 가동안내판 세트(정위)



솔리드 바디 볼륨 속성

질량 : 387.6065 kg
 볼륨 : 49258.0087 cm³
 밀도 : 7800 kg/m³

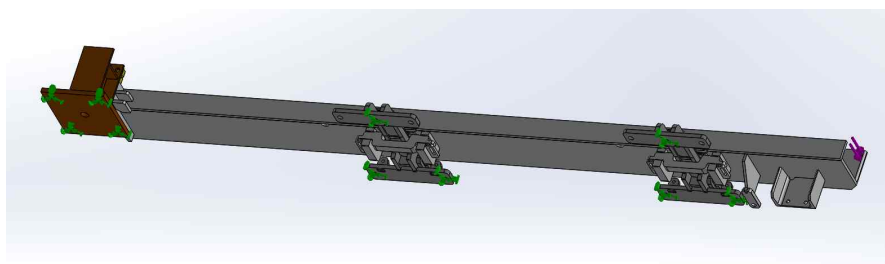
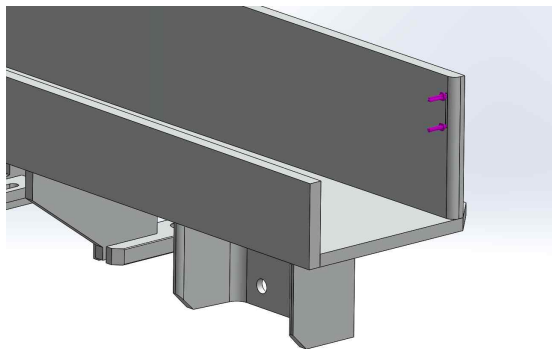
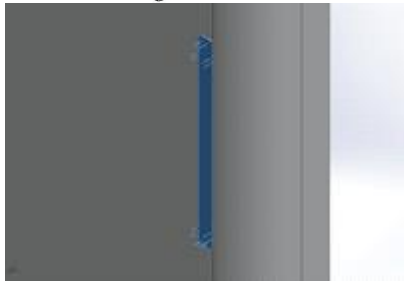
AGT 분기기 가동안내판 세트(반위)

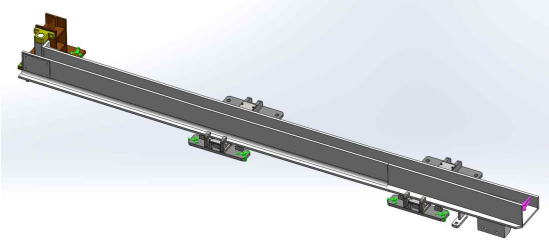
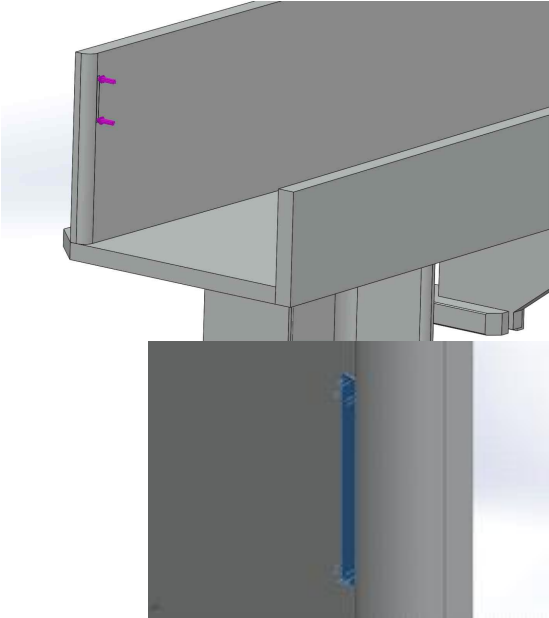


솔리드 바디 볼륨 속성

질량 : 385.8026 kg
 볼륨 : 49248.3605 cm³
 밀도 : 7850 kg/m³

② 하중 및 구속

가동안내판 (정위)				
구속				요소: 10면 유형: 고정 지오메트리
구속				
부품	X	Y	Z	총합
반력(N)	-28.6987	2.7083	39979.3	39979.3
모멘트반력(Nm)	0	0	0	0
하중				요소 : 1면 유형 : 수직하중 적용 값 : 40000N
				

가동안내판 (반위)				
구속 구속				요소: 10면 유형: 고정 지오메트리
				
부품	X	Y	Z	총합
반력(N)	2861.88	-133.289	-39947.5	40050.1
모멘트반력(Nm)	0	0	0	0
하중				요소 : 1면 유형 : 수직하중 적용 값 : 40000N

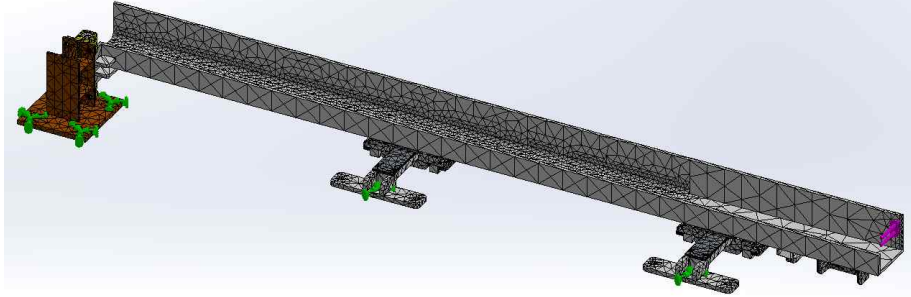
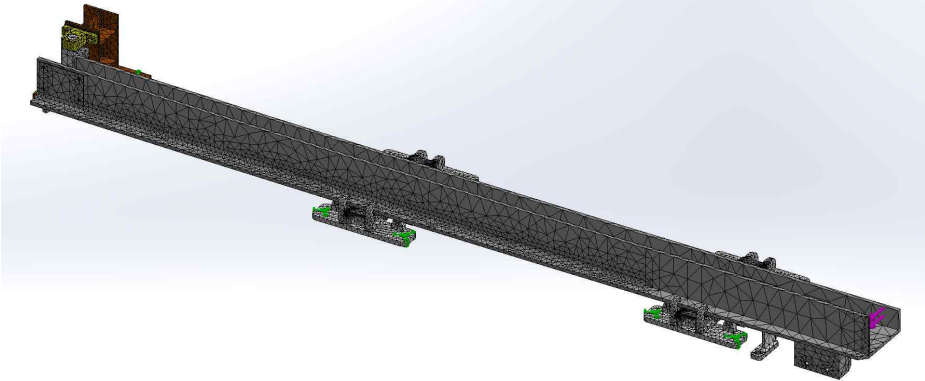
③ 접촉 정보

가동안내판 (정위)	접촉 이미지	접촉 속성
전체 접촉		유형: 본드 접촉 옵션 : 호환 가능한 메시

가동안내판 (반위)	접촉 이미지	접촉 속성
전체 접촉		유형: 본드 접촉 옵션 : 호환 가능한 메시

④ 메시 정보

	가동안내판 (정위)	가동안내판 (반위)
메시 유형	개체 메시	개체 메시
사용된 메쉬	곡률기반 메시	곡률기반 메시
야코비안 포인트	4점	4점
최대 요소 크기	106.834 mm	83.9722 mm
최소 요소 크기	21.3668 mm	16.7944 mm
메시 품질	1차 요소 해석 메시	고
비호환 메시로 실패한 파트의 메시 재 작성	적용	해제
총 절점수	768718	23428
총 요소수	37028	84766
최대 종횡비	117.52	219.58
종횡비 < 3을 가진 엘리먼트 비율 %	45.9	74.5
종횡비 >10을 가진 엘리먼트 비율 %	8.15	2.94
% 왜곡된 요소(야코비안)	0	0

메시(정위)	
메시(반위)	

⑤ 총 하중

(1) 반력

	가동안내판 (정위)	가동안내판 (반위)
선택 세트	전체 모델	전체 모델
단위	N	N
X 합계	-28.69870	2861.88
Y 합계	2.7083	-133.289
Z 합계	39979.3	-39947.5
총합	39979.3	40050.1

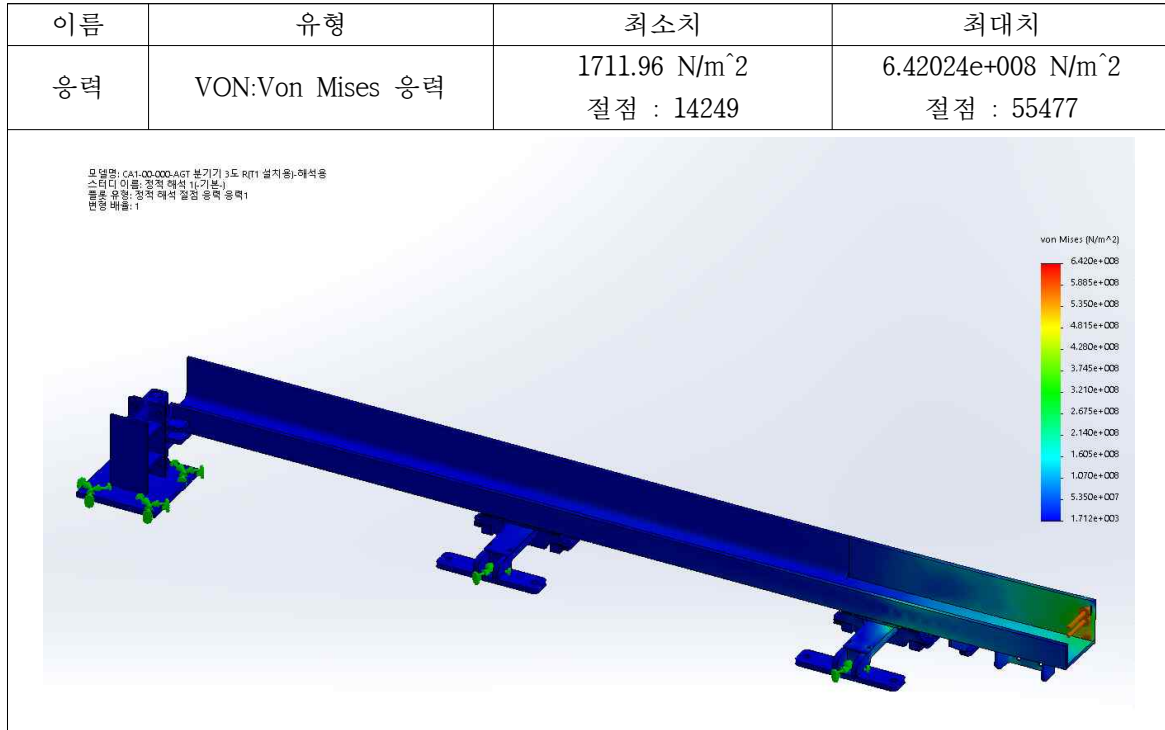
(2) 반작용 모멘트

	가동안내판 (정위)	가동안내판 (반위)
선택 세트	전체 모델	전체 모델
단위	N.m	N.m
X 합계	0	0
Y 합계	0	0
Z 합계	0	0
총합	0	0

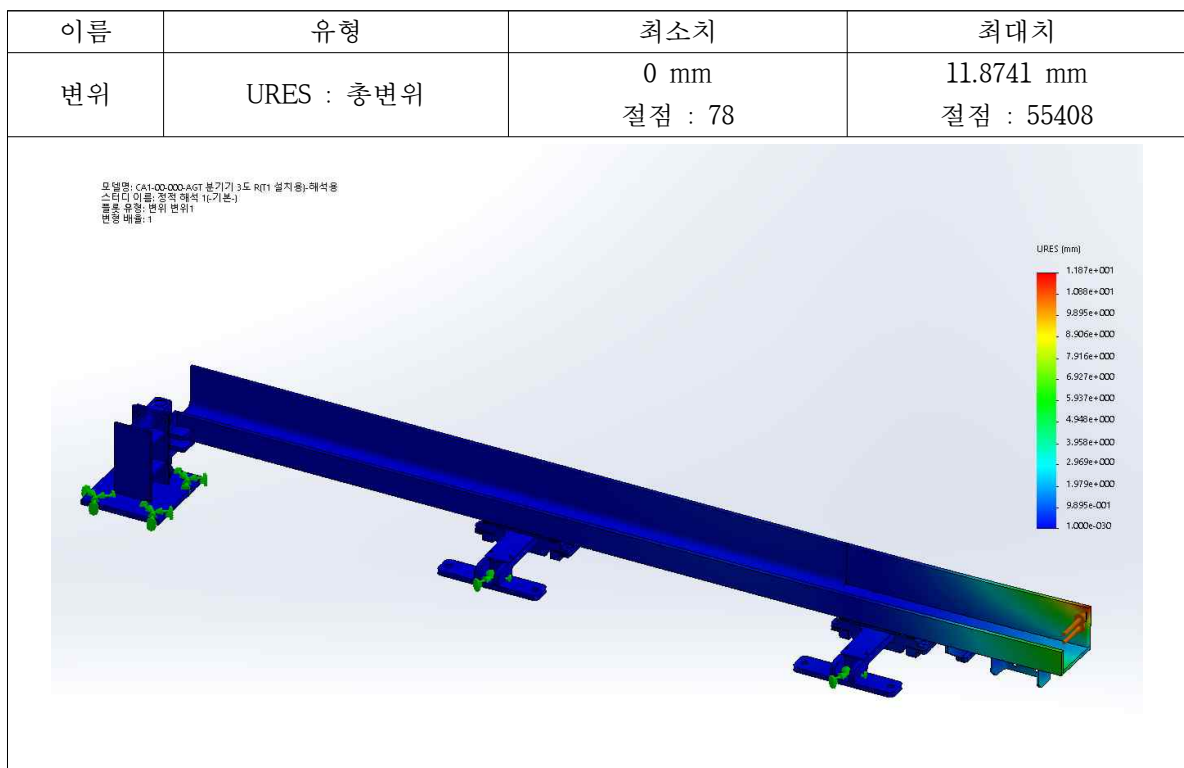
⑥ 해석결과

㉠ 가동안내판 (정위)

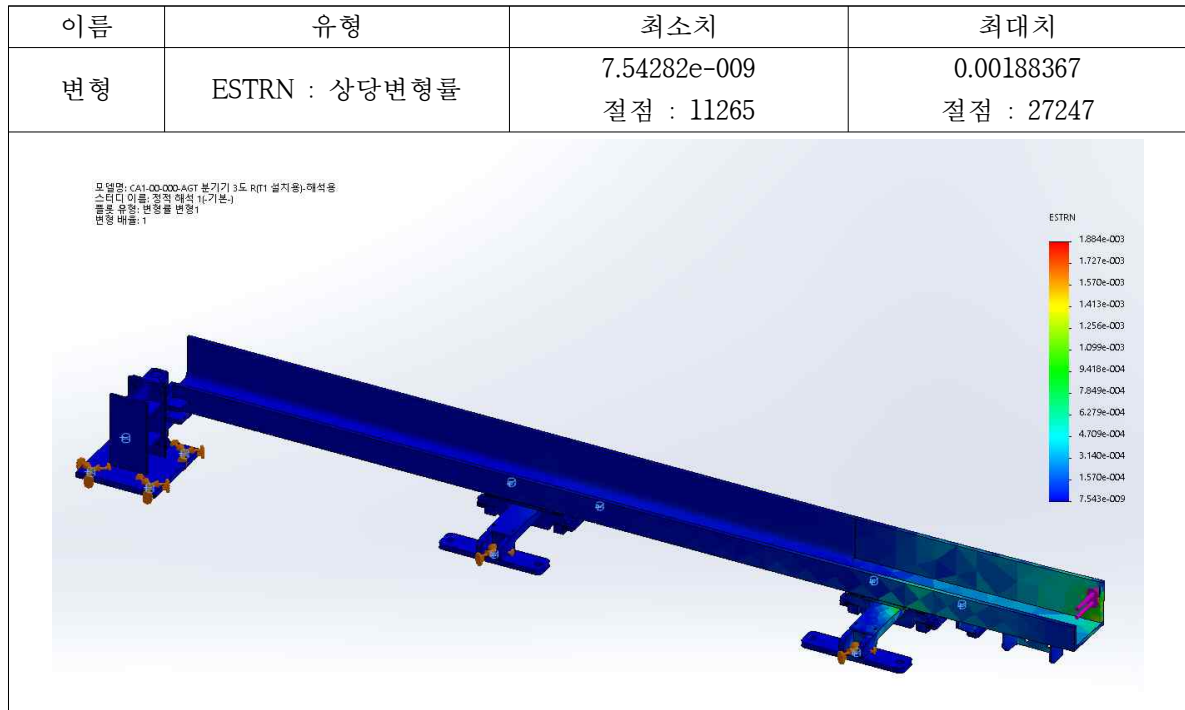
1-1) 응력



1-2) 변위

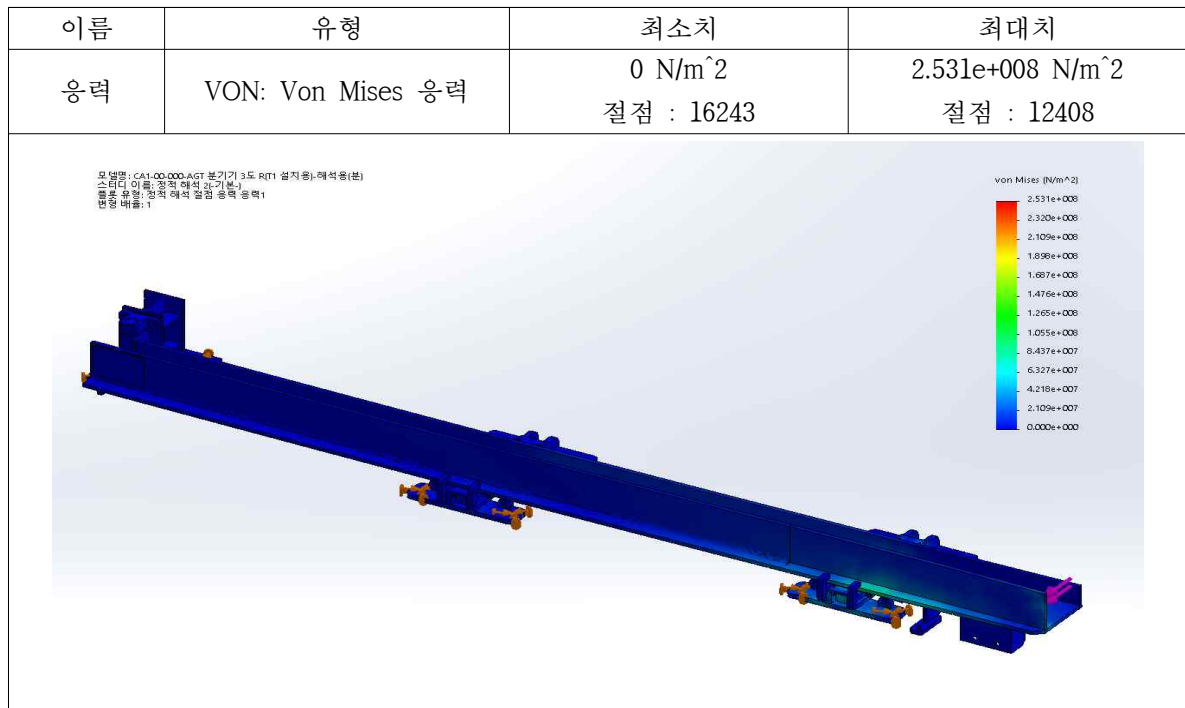


1-3) 변형

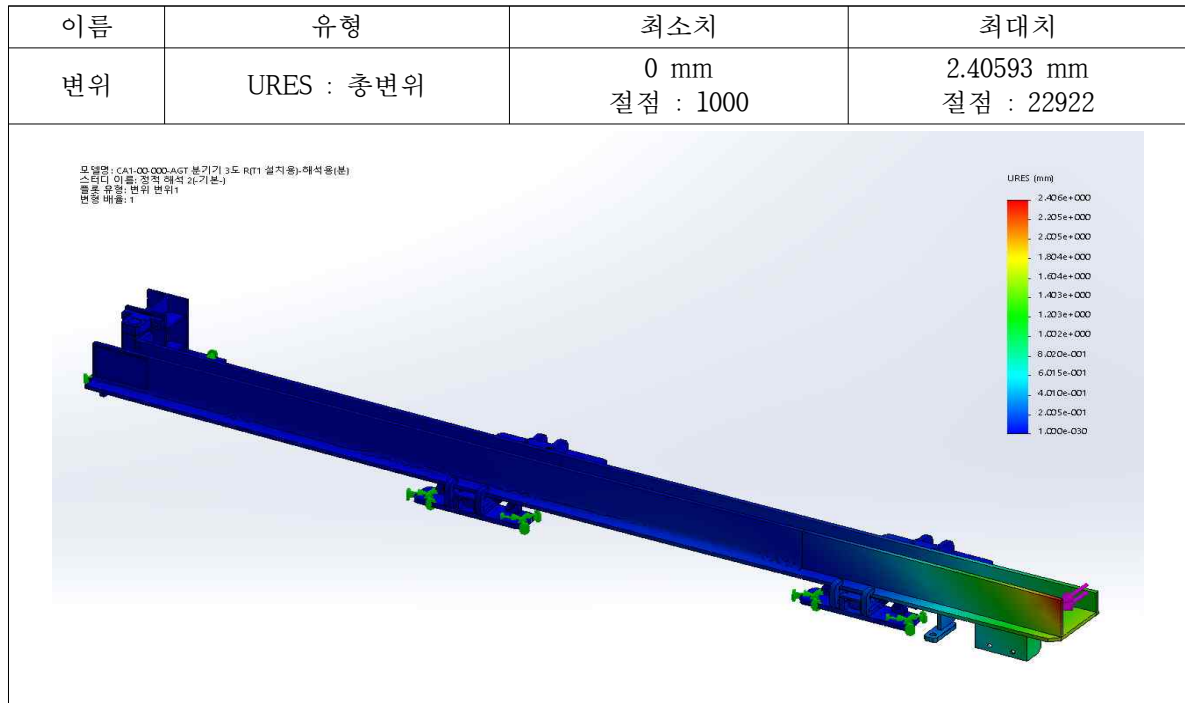


㉠ 가동안내판 (반위)

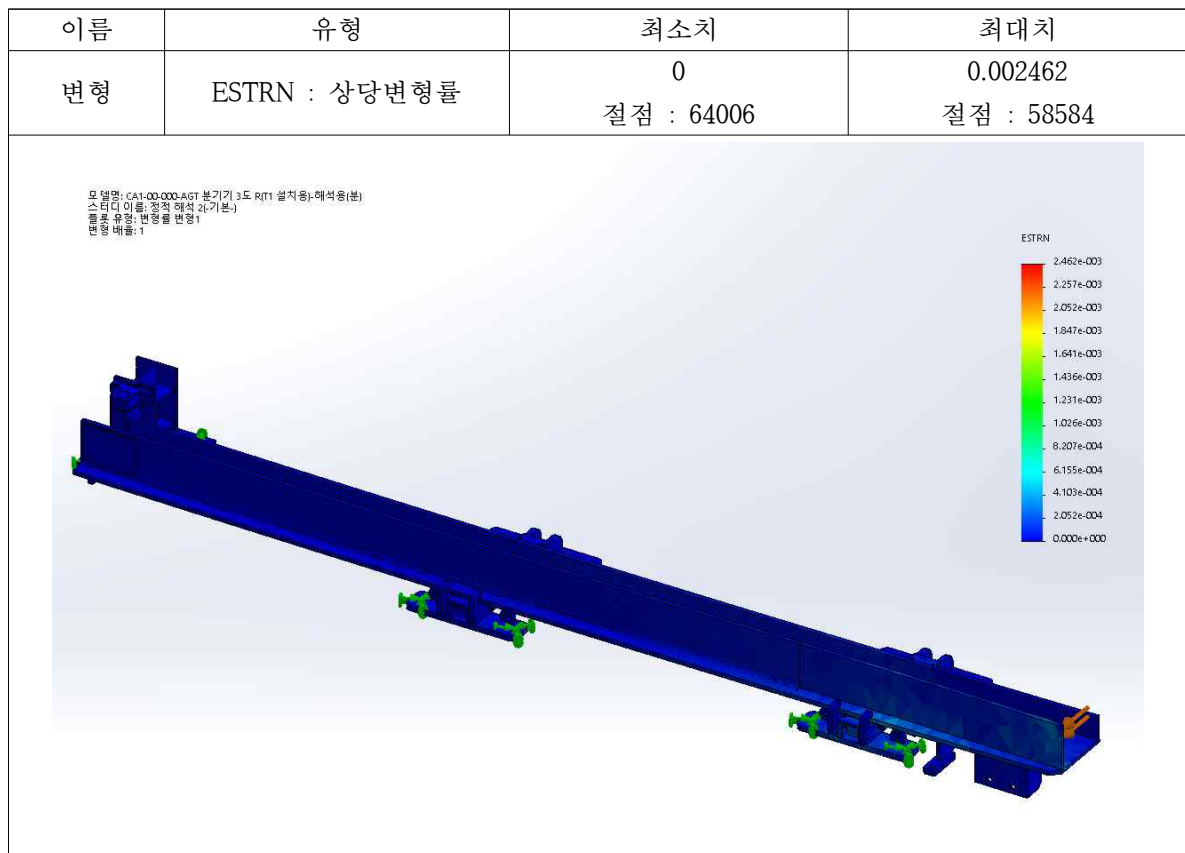
2-1) 응력



2-2) 변위



2-3) 변형



㉔ 해석 결과

- 부산 안평차량기지 시험선(T1)에 시험 설치한 AGT 분기기의 가동안내판에 대해서 정위측과 반위측에 대해서 각각 응력 해석 작업을 하였다.
- 정위측은 전체적으로 직선이며 반위측은 완만한 곡선으로 되어있어 두 부품 각각 해석한 결과 서로간의 큰 차이점은 없는 것으로 판단된다.
- 다만 반위측 해석에서 조건 변경을 많이 해서 결과치를 얻었다.
- 가동 안내판의 안전성을 검토하기 위해 기본적인 구성품과 집중하중을 부가해서 해석한 결과 전체적으로 안정적이라 판단된다.
- 앞으로 큰 범위에서 볼 때 본 가동안내판의 형상을 유지하며 실무 담당자나 다른 연구원의 의견을 반영해서 부분적인 보완 작업만 진행하면 될 것으로 판단된다.

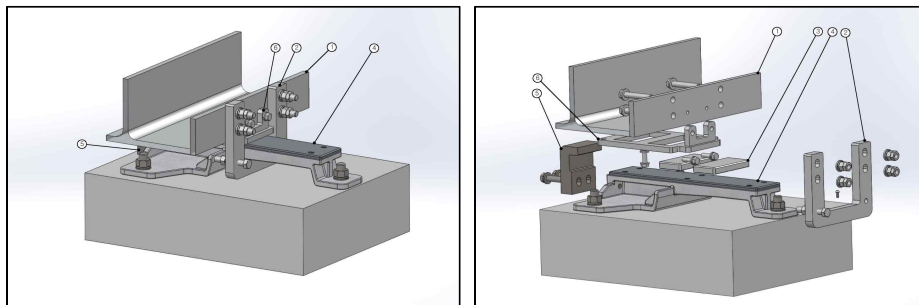
(4) 밀착형 분기기 시제품 제작 및 성능검토

① 시제품 제작

기존 고무차륜 AGT분기기의 문제점 파악, 개발분기기 실시설계, 운행회사 자문회의 및 기존시험선 분기기 현황조사 등을 통해 개발되는 AGT분기기 설계에 반영하여 최종 설계안을 작성하였다.

㉑ 고무차륜 AGT 분기기 가동안내판 및 수대 설계

본 과제를 시행하면서 설계된 고무차륜 AGT분기기 가동안내판과 수대의 상세 조립도를 보면 아래의 그림과 같다.



< 가동안내판과 수대조립도 >

각각의 명칭을 살펴보면 ① 가동안내판, ② U형고정블럭 ③ 웨어플레이트, ④ 미끄럼판, ⑤ 외부고정축크, ⑥ 웨어플레이트 고정부등으로 구성되어진다.

주요역할은 U형 고정블럭이 가동안내판과 웨어플레이트 고정부 및 수대하부를 일체로 묶어주는 역할을 하게 되어진다. U형 고정블럭이 가동안내판과 수대를 일체로 묶어주기 때문에 차량이 가동안내판으로 진입하여 횡압을 가할 때 가동안내판의 들뜸 현상을 방지하여 소음 및 진동을 감소시키는 역할을 하게 된다.

㉠ 고무차륜 AGT 분기기 실내검증 테스트베드 제작

개발된 분기기의 실내 성능검증을 위한 분기기 전환시험을 테스트하기 위한 테스트 베드를 제작하여 테스트 베드위에 분기기 축수, 수대, 가동안내판을 순차적으로 조립하여 테스트를 시행할 수 있도록 하였다. 또한 실내 성능검증외에도 각 부속품의 누락여부, 분기기의 작동상태, 현장이동 및 설치등도 가능하게 하여 제품인수 등의 방법도 간편하게 할 수 있도록 하였다.



〈 실내성능검증 테스트 베드 제작 과정 〉



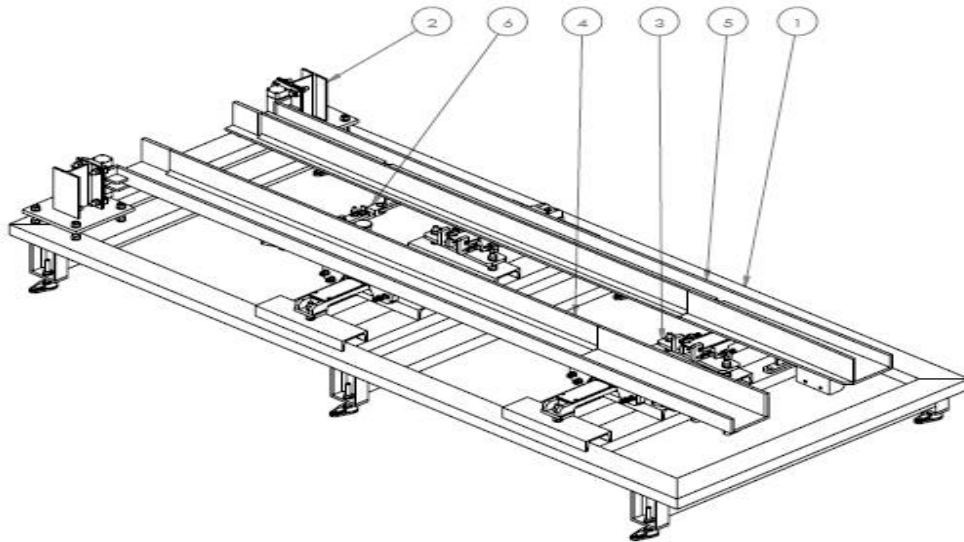
〈 테스트 베드 제작 실물사진 〉

② 분기기 시제품 성능검토

㉠ 시험목적

본 성능검토는 부산교통공사가 운영 중인 부산 도시철도 4호선에 적용 예정인 “고무차륜 주행로 분기기 시스템”의 내구성능 확인 및 요구사항과 시험 결과를 비교하는 것을 목적으로 한다. 여기서 고무차륜 주행로 분기기 시스템에 해당하는 표준 규격이 없기 때문에 KRS SG 0027-17R(MJ81형 선로전환기) 규격을 준용하여 시험을 수행하였다.

㉞ 고무차륜 주행로 분기기 시스템 조립 상태



- | | | |
|-----------------|-------------|-----------------|
| 1. 피로시험을 위한 지지대 | 2. 축지지대 | 3. Sliding base |
| 4. 가동안내판-직선 | 5. 가동안내판-곡선 | 6. 하중재하용 연결봉 |

< 고무차륜 주행로 분기기 시스템 조립도(테스트 베드 포함) >

㉟ 시험·검사 항목 및 항목별 요구사항

< 시험·검사항목 및 요구사항 >

시험·검사항목		요구사항	비고
피로 시험	시험 후 외관	· 볼트/너트 풀림 없을 것 · 구성품 균열 또는 파손 없을 것	참고 사항
	전환하중/변위	-	
	환원하중/변위	-	
	Wear plate 두께	· 마모에 의한 두께 변화율 3% 이내	피로 후
치수 검사	볼트 간격*	· 400 mm 이하 : ± 2.5 mm · 1000 mm 이하 : ± 4.0 mm	

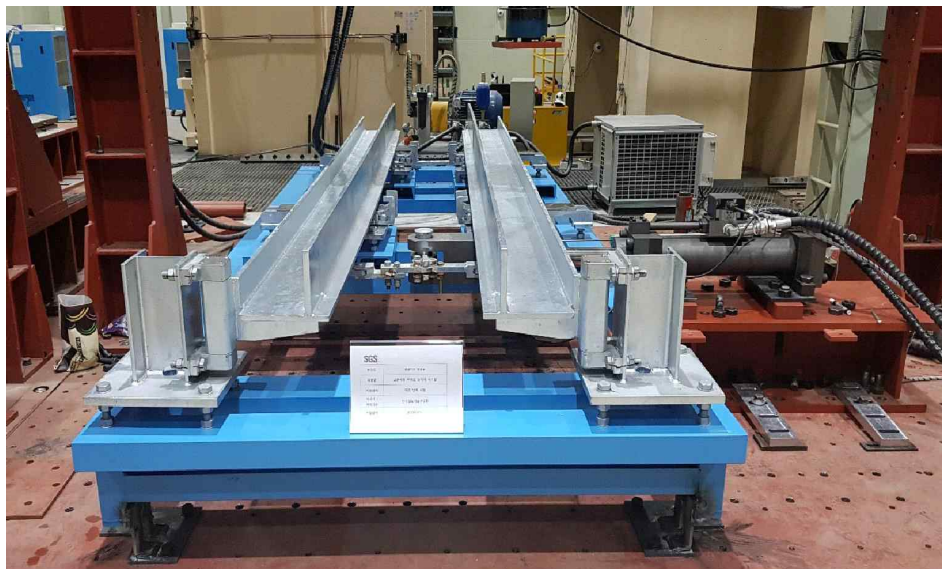
* KS B ISO 2768-1(일반공차-제1부: 개별 공차 지시가 없는 선 치수와 각도 치수에 대한 공차)

㊡ 고무차륜 주행로 분기기 시스템 피로시험

일 반 사 항	· 시험실 및 적용 장비: SGS Korea 동탄시험소, 횡방향 액츄에이터 (용량 : 200 kN) · 시험실 환경 : 23.0 °C · 시험 규격 : KRS SG 0027-17R 준용 · 요구 성능기준 : 피로 시험 과정 및 종료 후 볼트/너트 풀림 없을 것, 구성품 균열 또는 파손 없을 것, Wear plate 두께 변화율 3% 이내일 것
------------------	---

○ 시험방법

- 그림과 같이 조립된 고무차륜 주행로 분기기 시스템을 정반에 고정하고 하중재하 연결봉과 횡방향 액츄에이터를 상호 연결한다.
- 설정 분기 각도인 3° 확인을 위해 예비로 전환 및 환원을 10회 반복하고 가동안내판 이동 상황을 확인한다.
- 주파수는 8회/min로 설정하고 해당 주파수가 구현되는지 여부를 추가 예비 시험을 통해 확인한다.
- 앞의 과정이 끝나면 고무차륜 주행로 분기기 시스템에 대해 총 15만회에 걸쳐 피로 시험을 한다. 이 때 전환 및 환원 시의 하중 및 변위를 주기적으로 측정한다.
- 피로 시험 종료 후, ‘볼트/너트 풀림’ 및 ‘구성품 균열 또는 파손 여부’를 확인한다.



< 피로시험을 위한 분기기 시스템 설치 >

○ 시험결과

고무차륜 주행로 분기기 시스템에 대한 피로 시험 결과는 아래의 표와 같다. 여기서 볼트/너트 풀림은 분기기 시스템에 적용된 모든 연결부를 조사한 결과이며, Wear plate 두께는 피로 시험 후 가동안내판을 축지지대에서 분리한 후 직접 측정한 결과이다.

< 피로 시험 결과 >

항목	요구사항	결과	판정
시험 후 외관	· 볼트/너트 풀림 없을 것	· 볼트/너트 풀림 없음	적합
	· 구성품 균열 또는 파손 없을 것	· 구성품 균열 또는 파손 없음	적합
Wear plate 두께	· 마모에 의한 두께 변화율 3% 이내	· 최대 0.25% (기준 두께 20 mm 대비 0.05 mm)	적합
전환하중/변위	-	· 시작 : 8.05 kN/0.6 mm · 종료 : 1.48 kN/0.1 mm	-
환원하중/변위	-	· 시작 : 8.66 kN/39.2 mm · 종료 : 7.54 kN/34.7 mm	-

○ 치수검사

피로시험 과정에서 주요 구성품 간 연결부는 취약개소가 될 수 있으며, 분기기의 반복적인 전환-환원으로 인해 볼트 풀림이 발생할 경우 기존 볼트 간격 대비 풀림 발생 후 간격이 증가하고 이에 따른 분기기 시스템의 내구성에 문제가 발생할 수 있다. 따라서 피로 시험 종료 후, 구성품별 연결부인 볼트 간격에 대한 치수 검사를 실시하였고 그 결과는 표 5.4와 같다.

< 피로시험 후 치수 검사 결과 >

항목	요구사항	결과	판정
축지지대 힌지 볼트 상하간격	· 직선부 : 185 ± 2.5 mm	· 185.1 mm	적합
	· 곡선부 : 185 ± 2.5 mm	· 185.8 mm	
축지지대 볼트 가로 간격	· 직선부 : 240 ± 2.5 mm	· 237.8 mm	적합
	· 곡선부 : 240 ± 2.5 mm	· 238.5 mm	
축지지대 볼트 세로 간격	· 직선부 : 270 ± 2.5 mm	· 268.3 mm	적합
	· 곡선부 : 270 ± 2.5 mm	· 269.1 mm	
Sliding base 볼트 가로 간격	· 직선부(1) : 360 ± 2.5 mm	· 358.3 mm	적합
	· 직선부(2) : 360 ± 2.5 mm	· 359.5 mm	
	· 곡선부(1) : 360 ± 2.5 mm	· 358.9 mm	
	· 곡선부(2) : 360 ± 2.5 mm	· 360.7 mm	
Sliding base 볼트 대각 간격(1)	· 직선부(1) : 508 ± 4.0 mm	· 506.0 mm	적합
	· 직선부(2) : 508 ± 4.0 mm	· 504.3 mm	
	· 곡선부(1) : 508 ± 4.0 mm	· 508.0 mm	
	· 곡선부(2) : 508 ± 4.0 mm	· 508.3 mm	
Sliding base 볼트 대각 간격(2)	· 직선부(1) : 508 ± 4.0 mm	· 505.7 mm	적합
	· 직선부(2) : 508 ± 4.0 mm	· 506.0 mm	
	· 곡선부(1) : 508 ± 4.0 mm	· 507.5 mm	
	· 곡선부(2) : 508 ± 4.0 mm	· 507.4 mm	

< 피로 시험 후 Wear plate 두께 측정 결과 >

항목	요구사항	결과	판정
Wear plate 두께 직선부(1)	· No.1 : 19.4~20.0 mm	· 19.95 mm	적합
	· No.2 : 19.4~20.0 mm	· 19.97 mm	
Wear plate 두께 직선부(2)	· No.1 : 19.4~20.0 mm	· 19.96 mm	적합
	· No.2 : 19.4~20.0 mm	· 19.98 mm	
Wear plate 두께 곡선부(1)	· No.1 : 19.4~20.0 mm	· 19.97 mm	적합
	· No.2 : 19.4~20.0 mm	· 19.96 mm	
Wear plate 두께 곡선부(2)	· No.1 : 19.4~20.0 mm	· 19.96 mm	적합
	· No.2 : 19.4~20.0 mm	· 19.96 mm	

○ 시험 성적서



품질시험·검사성적서

- | | | | |
|-------------|--------------------------|-----------|------------------|
| 1. 성적서 번호 : | CMT2019 - 1178 | 5. 접수일자 : | 2018 년 11 월 14 일 |
| 2. 의뢰인 | 업체명 : 한국철도기술연구원 | 6. 발급일자 : | 2019 년 02 월 26 일 |
| | 주 소 : 경기도 의왕시 철도박물관로 176 | | |
| | 성 명 : 배 영 훈 | | |
| 3. 성과이용목적 : | 공공기관 제출용 | | |
| 4. 시 료 명 : | 고문차륜 주행로 분기기 시스템 | | |

시 험 결 과

■ 피로시험

연번	시험 · 검사종목	단 위	시험 · 검사방법	시험 · 검사결과
				시험결과
1	고문차륜 주행로 분기기 시스템 피로시험 외관검사	볼트/너트 풀림 및 균열	KRS SG 0027-17(R) 준용	이상없음
2		Sliding Base		이상없음
3		축 지지대		이상없음
4		가동안내판		이상없음

※ 시험기간 : 2019년 01월 03일 ~ 2019년 01월 21일
 ※ 시험횟수 : 150,000회
 ※ 시험각도 : 3°
 ※ 하중재하 속도 : 8회/min
 ※ 시험환경조건 : 23.0°C
 ※ 전환 하중 및 변위(+), 환원 하중 및 변위(+)

담당자 : 박 근 영
 Tel : 031-669-0665

기술책임자 : 신 도 철
 Tel : 031-646-0801

- ※비 고 : 1. 이 시험성적서는 당초 의뢰자가 제출한 시료 및 시료명으로 시험한 결과로서 전체 제품에 대한 품질을 보증 하지는 않습니다.
 2. 이 성적서는 홍보, 선전, 광고 및 소송용으로 사용될 수 없으며, 용도 이외의 사용을 금합니다.
 3. 이 성적서의 원본 진위확인을 원하시면은 시험담당자의 열람요청을 통해서 확인해 드립니다.

한국에스지이에스(주) 건설시험연구원

주 소 : 경기도 화성시 동탄면 동탄산단10길 20 (전화번호 031)669-0600

유의사항 : 기술책임자의 성명과 서명이 없는 경우에는 결과에 대한 보증을 할 수 없습니다.

페이지 1 / 11

This document is issued by the Company under its General Conditions of Service accessible at <http://www.sgs.com/en/Terms-and-Conditions.aspx>. Attention is drawn to the limitation of liability, indemnification and jurisdiction issues defined therein. Any holder of this document is advised that information contained hereon reflects the Company's findings at the time of its intervention only and within the limits of Client's instructions, if any. The Company's sole responsibility is to its Client and this document does not exonerate parties to a transaction from exercising all their rights and obligations under the transaction documents. Any unauthorized alteration, forgery or falsification of the content or appearance of this document is unlawful and offenders may be prosecuted to the fullest extent of the law.



KCP-2512-001-F07 (06) 20, Dongtansandan 10-gil, Dongtan-myeon, Hwaseong-si, Gyeonggi-do, Republic of Korea, 18487 t +82(0)31 646 0800 f +82(0)31 646 0888 www.sgs.com

Member of SGS Group(Société Générale de Surveillance)

(5) 밀착형 분기기 1차 시험 부설 (2019.08)

① 시험부설구간 선정

시험부설구간 선정을 위해 부산교통공사 경전철사업소와 기술연구소, 한국철도기술연구원, 천운케도 등이 개발 분기기과 현재 분기기의 문제점 등을 자문회의를 거쳐 설계에 반영하고, 개발분기기는 부산지하철 4호선 안평차량기지 시험선(토공구간)에 부설하였다.



< 분기기 개발관련 운영부서 자문회의 >

② 안평차량기지 시험선 부설구간 현황조사

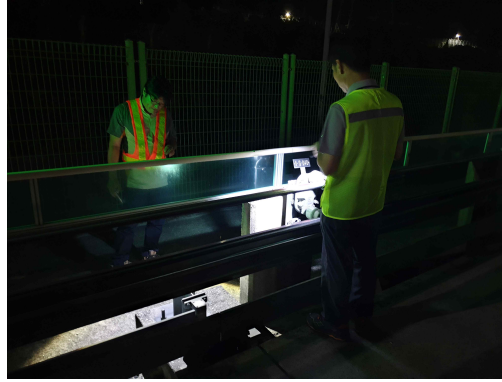
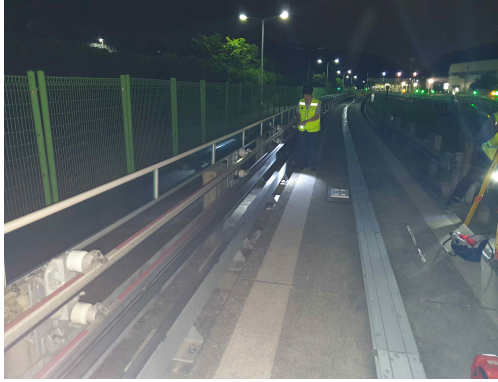
㉠ 시험부설구간 기존분기기 현황측량

상세 설계가 완료된 AGT 분기기를 제작하기 전에 시험부설구간의 분기기현황을 측량하여 개발하고자 하는 분기기가 현재 부설되어 있는 안평 차량기지내 분기기 신호장치 및 전차선등에 지장이 없는지를 사전에 파악하였다.



㉡ 시험부설구간 분기기 조사

안평차량기지 시험부설구간 분기기 조사 사항으로는 가동안내판 및 수대 분기기 각종 부속품의 위치를 확인하였으며, 향후 측량데이터를 기반으로 도면과의 일치여부를 확인하고 시제품 제작시 현장 상황을 반영하여 설계 반영하였다.



㉞ 시험부설구간 문제점 도출 및 해결

○ 시험부설관련 관계기관 협의

개발된 고무차륜 AGT분기기를 부산지하철 4호선 안평차량기지 시험선에 시험부설을 하기 위해 부산교통공사 연구소팀과 경전철 사업팀의 시설팀과 신호팀협의후 2019년 8월19일~23일까지 시험부설을 하기로 하였다. 시험부설은 과정에서 협의된 내용은 기존분기기와 개발분기기의 호환성을 확인하기 위해 기존분기기 반위쪽과 개발 분기기 정위를 연결하여 테스트를 시행하여 향후 기존선 분기기 교체시 작업시간 및 성능에 대해 검토하기로 하였다. 시험부설과 관련한 일정 및 장비 인원 투입계획은 아래의 표와 같다.

< 시험시공 예정공정표 >

구간 및 위치	공 종	세 부 내 용	2019년 8월					비고
			19일	20일	21일	22일	23일	
안평차량기지 시운전선	자재운반	분기기 운반						
	반위설치	신호분야 협동 연결관 해체 축수 및 수대 해체 및 먼갈이 후 재조립						
		신호분야 협동 연결관 해체 축수 및 수대 해체 후 가동안내판 조립						
	정위설치	신호분야 협동 연결관 해체 축수 및 수대 해체 및 먼갈이 후 재조립						
		신호분야 협동 연결관 해체 축수 및 수대 해체 후 가동안내판 조립						

< 장비 및 인원투입 계획 >

구 분		규 격	단 위	수 량	비 고
장 비	크레인	5톤	대	1	분기기 인양 및 운반
	발전기	5KW	대	2	콘크리트 수대 먼정리
	전기임팩	1/2	개	2	볼트체결
	그라인더	4인치	개	2	먼정리
	함마드릴		개	2	먼정리
	측량장비		대	1	시공 측량
인 원	작업반장		개	1	
	케도공		개	6	
	측량		개	4	

○ 자재 투입 계획

시운전선 우측 도로에 5톤카고 크레인을 위치 시키고 차단승인 이후 안전헬스 울타리 2개소를 철거하고 5톤 카고 크레인을 이용하여 기존 분기기를 인양한다. 기존분기기 인양이 완료되면 신설분기기를 인양하여 기존 분기기 위치에 내려 놓는다.



< 시험부설 분기기 장비 셋팅 위치 >

현장 실 시험부설관련하여 부산교통공사 신호팀의 협조를 받아 고무차륜AGT분기기 가동 안내판과 선로전환기 접속간 및 밀착조절판의 연결 및 해체를 시행하였다. 기존의 분기기를 해체하고 신설 분기기를 신설하는 과정이라 기존분기기의 수대 하부의 콘크리트 면의 수평을 맞추기 위해 수대하부 면갈이 작업을 수행하고 U블럭의 원활한 이동을 위해 기존 수대 콘크리트 상면을 일부 절단 제거하였다. 현장시험부설관련한 사진은 아래와 같다.

		
작업전 안전교육	분기기 현장반입	기존분기기 축수철거
		
고정블럭 수대철거	기존 가동안내판 철거	수대하부 콘크리트 제거

		
수대하부 면갈이	신설 분기기 축수 설치	개발분기기 수대설치
		
신설 가동안내판 반입	축수 조립	웨어플레이트 설치
		
U형블럭설치	선로전환기 연결	시험부설 완료

〈 개발 분기기 시험부설 관련 사진 〉

(6) 1차 시제품 성능개선

1.1 개량형 분기기 개선

2차년도에서 현장 시험부설시 기존 분기기를 교체하는 과정에서 현재 시공되어 있는 주행로 및 수대와 공간이 협소 하고 차단시간이 짧아 시공의 효율성을 높이기 위해 분기기의 일부 구조를 변경하여 재제작하여 설치하였다.

1.1.1 현장시험부설 문제점 해결내용

1) U블럭 조정부 변경

U블럭 설치 및 밀착시 끼임 방지 및 다양한 규격의 볼트 관리 어려움이 있어 동일 규격의 볼트사용으로 유지관리를 용이하게 하였고, 고정형식 변경으로 가동안내판 끼임을 방지하는 구조로 개선하였다.



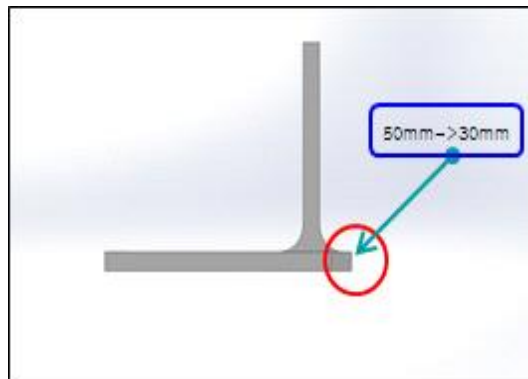
< 최초 U블럭 고정형태 >



< 개량시 U블럭 고정형태 >

2) H-beam 돌출부 축소

개발분기기와 기존 분기기 교환시 주행로와 분기기 사이의 간격이 협소하여, 가시성이 나빠고, 작업의 어려움이 발생하여 가동안내판 돌출부위를 당초50mm에서 30mm로 감소시켜 스톱퍼 가시성 확보 및 가동안내판 교환이 용이하도록 하였다.



< 가동안내판 돌출부 축소 >

3) 외측후크 수량변경

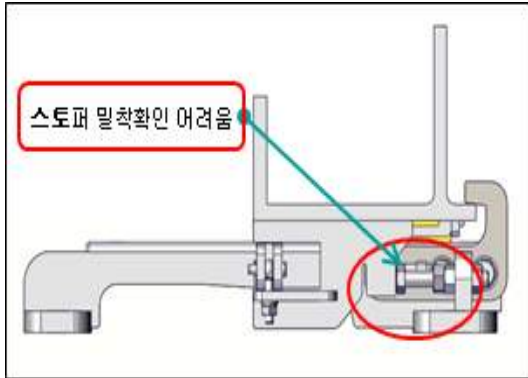
최초 외측후크를 수대 1개당 2개씩을 배치하였으나, 수량과다로 인한 현장작업의 어려움이 발생하여 외측후크의 크기를 변경하고, 수량을 수대 1개소당 2개에서 하나로 변경하여 분기기 교환의 작업 효율성을 높이고 경제적인 구조로 변경하였다.



< 외측후크 수량변경 전후 설치모습 >

4) 스톱퍼 위치변경

개발 분기기의 스톱퍼가 가동안내판 하부에 위치하여 스톱퍼 밀착확인의 어려움이 있으며 유지관리가 불편하다는 현장의 의견을 반영하여 스톱퍼의 위치를 가동안내판 내측에서 수대 외측으로 변경하고, 가동안내판 상부에 잔공을 설치하여 스톱퍼의 밀착을 확인할수 있도록 하여 스톱퍼 밀착확인이 용이하고 조정작업을 편리하게 할수 있도록 하였다.



< 개발 분기기 스톱퍼 위치 >



< 개량 분기기 스톱퍼 위치 확인 >

1.2 개량형 분기기 구조해석

1.2.1 가동안내판 모재 형상변경(L형에서 T형으로)에 따른 횡력 감소치 구조해석

1). 개요

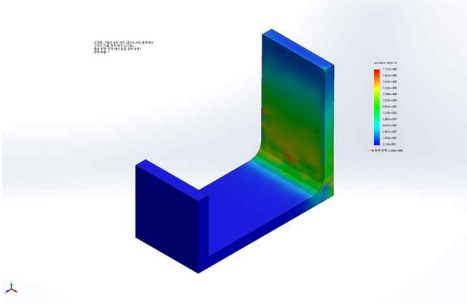
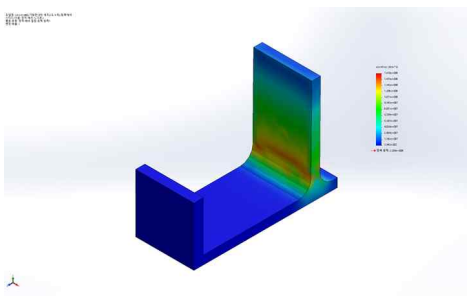
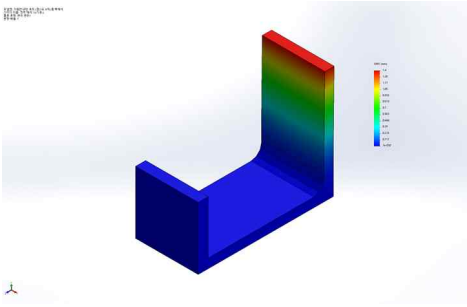
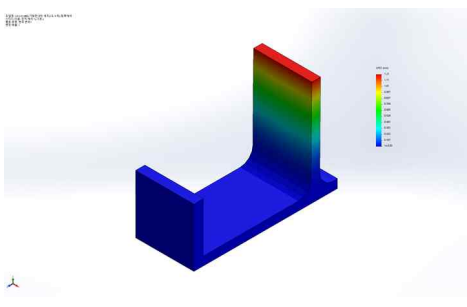
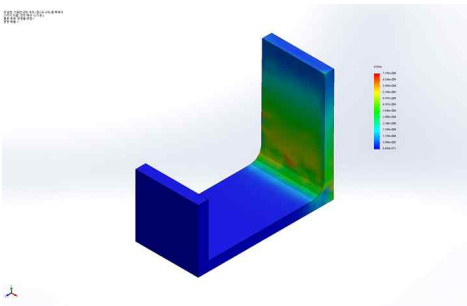
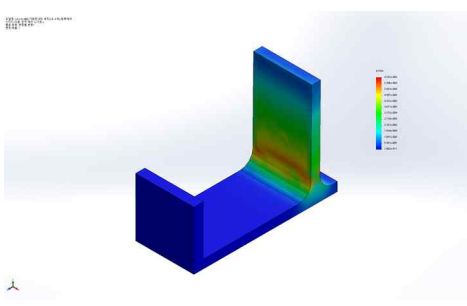
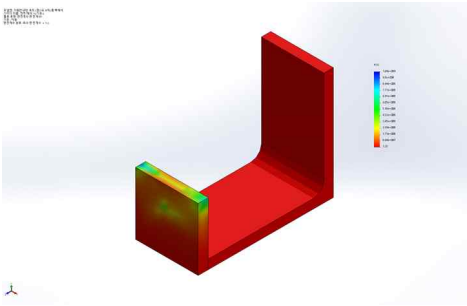
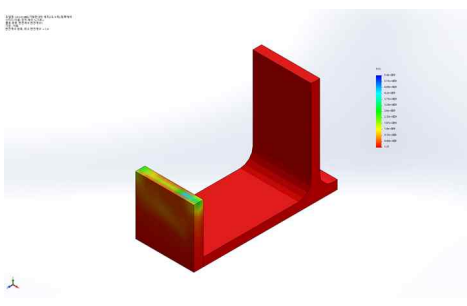
- AGT 분기기의 가동안내판 형상에 대한 비교 자료용 정적 해석 작업
- L형과 T형 가동안내판의 형상 차이에 대한 비교 자료용 해석을 수행
- 구속조건과 하중조건 등은 동일하게 적용하고 동일한 크기로 해석

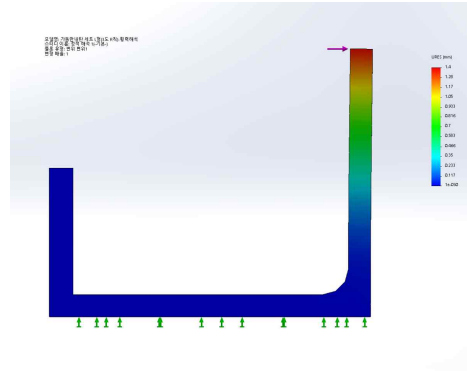
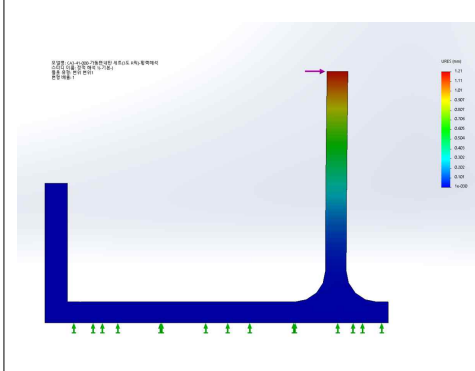
2). 가정

- 형강 상부 폭 100mm에 10,000N의 하중이 걸리는 것으로 가정.
- 하부 전면을 고정부로 구속함.

3). 비교 결과 데이터

구 분	L형 가동안내판	T형 가동안내판
메시		

응력		
변위		
변형률		
안전계수		
형상		

				
	최소값	최대값	최소값	최대값
응력	0.21284	1.77067e+8	0.039419	1.61023e+8
변위	0	1.39922	0	1.20977
변형률	8.64875e-13	7.19509e-04	1.60179e-13	6.54317e-04
안전계수	1.24582	1.03643e+09	1.36995	5.59613e+09

단위 : 응력 : N/m², 변위 : mm

4). 해석 결과

- 최대 응력값은 별 차이가 없으나 최소 응력값을 보면 T형 가동안내판이 보다 안정적임을 알 수 있었다.
- 최대 변위 값을 비교하면 약 15%정도의 차이를 보여주고 있다. 이것이 횡력에 대한 감소치라고 할 수 있다.
- 변형률에 있어서는 길이에 대한 변형의 비율이기 때문에 응력의 차이와 유사하다.
- 최소 안전계수에서 L형이 약간 떨어지며 최대 안전계수는 약 4배 이상 차이가 나는 것으로 나타내고 있다.
- 결론적으로 L형 보다 T형이 전체적인 해석 값에서 대략 10~15% 우위에 있으며 최소 응력 값이나 최대 안전계수 등과 같은 극한값을 보면 보다 안전한 범위 내에 있음을 알 수 있다.

1.2.2 개량된 가동안내판과 기존 가동안내판의 구조해석

1). 개요

- 기존 부산교통공사 4호선에 설치된 AGT 분기기와 신기술 신청 분기기의 가동안내판에 대한 비교 자료용 정적 해석이다.
- 기존 설치된 분기기와 신기술 신청 분기기의 가동안내판과 수대의 조합에 대한 해석 작업이며 연결 볼트 등과 같이 체결구는 해석 작업 편의상 제외하고 작업하였다.
- AGT 분기기 가동안내판 중 정위측에 대해 각각 해석 작업 후 비교 정리하였다.
- 구속조건과 하중조건 등은 동일하게 적용하고 모두 이상적인 조립상태로 가정하였다.

2) 가정

- AGT분기기에서 가동안내판에 걸리는 힘

분기기를 통과 할 때 최대속도 30Km/h=8.33m/s이고 최소회전반경 R=30m로 가정.

- 분기륜에 작용하는 하중

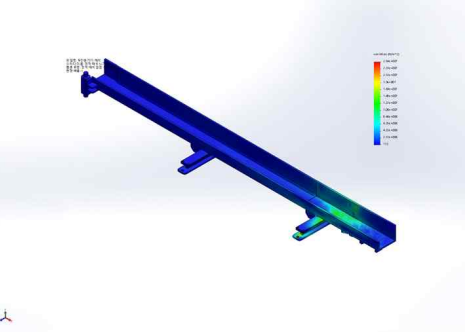
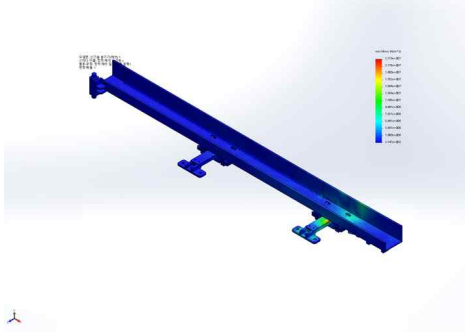
열차의 최대중량 18ton이고 한 방향에 4개의 분기륜이 있으면 순차적으로 가동안내판에 접촉되며, 실제 접촉 부위는 끝단에서 어프로치부의 2/3 지점이지만 상화에 따라 미리 접촉되는 경우도 있으므로 편의상 어프로치부의 중간 쯤에 집중 하중이 작용하는 것으로 가정.

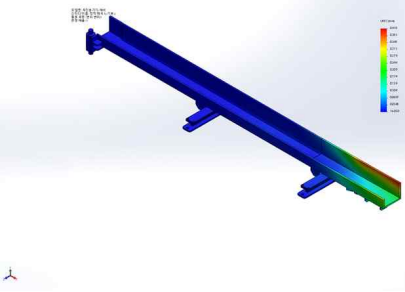
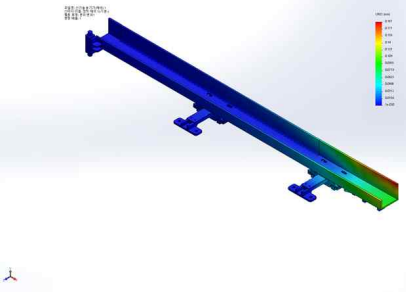
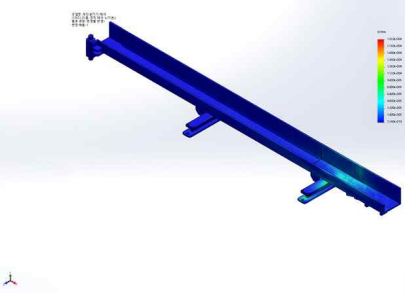
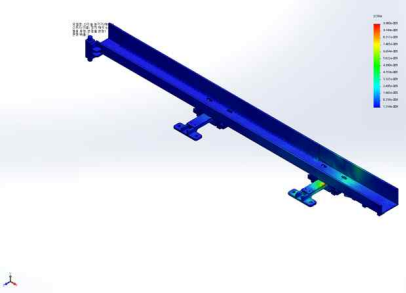
$$\frac{1}{9.8} \times \frac{8.33^2}{30} \times 18000 \div 4 = 1062.1\text{kgf}$$

이것을 SI 단위계로 바꾸면 10408N인데 해석의 편의를 위해 11000N을 적용한다. 안전율은 해석 작업에서 같이 계산.

- 분기륜은 가동안내판을 따라 이동하지만 구조상 초기 접촉부에서 가장 큰 힘을 받기 때문에 접촉부에 집중하중을 받는 조건으로 정적 해석.
- 집중하중 받는 면적을 40x2 로 함(분기륜 폭이 40이고 순간 접촉되는 면은 2로 가정)
- 응력 해석과 무관한 부품은 제거 후 실행.
- 축수 및 수대 양카 고정 위치를 고정부로 지정.
- 일체형 본드 결합 적용.

3). 비교 결과 데이터

구 분	기존 분기기	신기술 분기기
메시		
응력		

변위				
변형률				
안전계수				
	최소값	최대값	최소값	최대값
응력	172.382	2.53988e+7	214.721	2.37627e+7
변위	0	0.417998	0	0.187033
변형률	7.24006e-10	1.91996e-04	1.31393e-09	9.98032e-05
안전계수	5.03003	1.45026e+6	8.70302	1.85271e+6

단위 : 응력 : N/m^2 변위 : mm

4). 해석 결과

- 최소 응력값 및 최대 응력값에서 약간의 차이가 있으나 두 경우 모두 허용응력 범위내에 있음을 알수 있다.
- 최대 변위 값에서 기존 분기기와 신기술 분기기는 약 2배의 차이가 있다.
- 변형률에 있어서는 길이에 대한 변형의 비율이기 때문에 응력의 변화와 같다.
- 최소 안전계수에 기존 분기기와 약간의 차이는 있으나 전체적으로 모두 충분한 안전계수

를 나타내고 다.

- 결론적으로 두 분기기 모두 가동안내판의 구조가 유사하고 단지 가동안내판과 수대의 결합 방법에 차이가 있기 때문에 전체적인 값에서는 큰 차이가 없고 안전한 범위 내에 있음을 알수 있다.

(7) 밀착형 분기기 2차 시험 부설 (2020.10)

1.4 개량형 분기기 시험부설

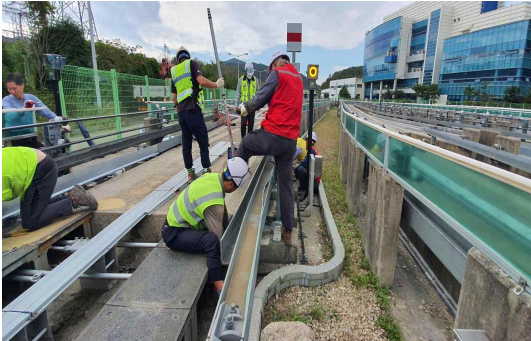
1.4.1 개량형 분기기 시공일정

개량형 분기기 부설일정은 개발된 분기기 부설시 수대하부 콘크리트 가공 및 양카볼트 설치등의 작업이 필요하지 않기 때문에 3일에 걸쳐 시행하는 것으로 부산교통공사와 협의하여 시행하였다. 작업시간은 오전 10:00 ~ 13:00으로 5시간으로 하여 주간 차단작업으로 시행하였다.

< 시험시공 예정공정표 >

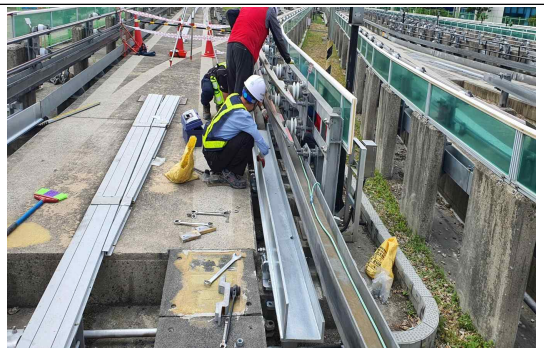
구간 및 위치	공 종	세 부 내 용	2020년 10월			비고
			13일	14일	15일	
안평차량기지 시운전선	정위설치	가동안내판,수대 정위파트 교체				
	반위설치	가동안내판, 수대 반위파트 교체				
	운행점검	신호분야 협동 연결관 해체 축수 및 수대 해체 후 가동안내판 조립				

4) 개량형 분기기 시공과정 사진

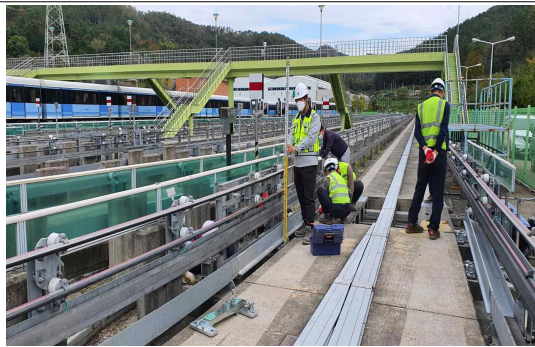
	
개량형 분기기 가동안내판 하부모습	개량형 분기기 수대모습
	
개량형 분기기 교체전 안전교육	전철기 연결봉 해체
	
개량형 분기기 작업구간 출입금지 조치	가동안내판 해체
	5 
수대해체	수대 레벨링 너트 설치



개량형 수대 설치



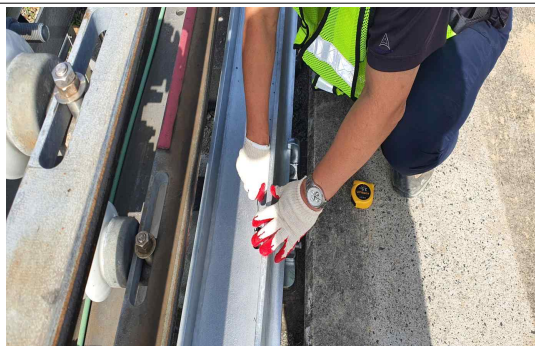
개량형 가동안내판 설치



수대레벨 측량



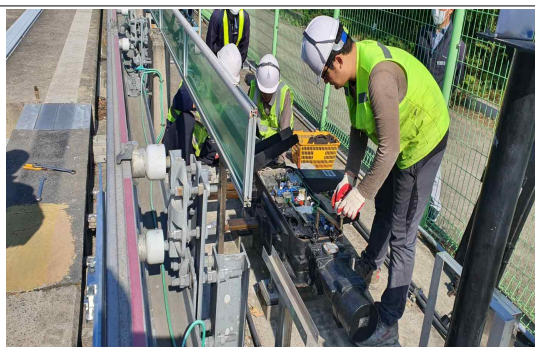
스토퍼, 외부고리 셋팅



스토퍼 밀착확인



U형블럭 셋팅



전철기 연결기 연결 작동확인



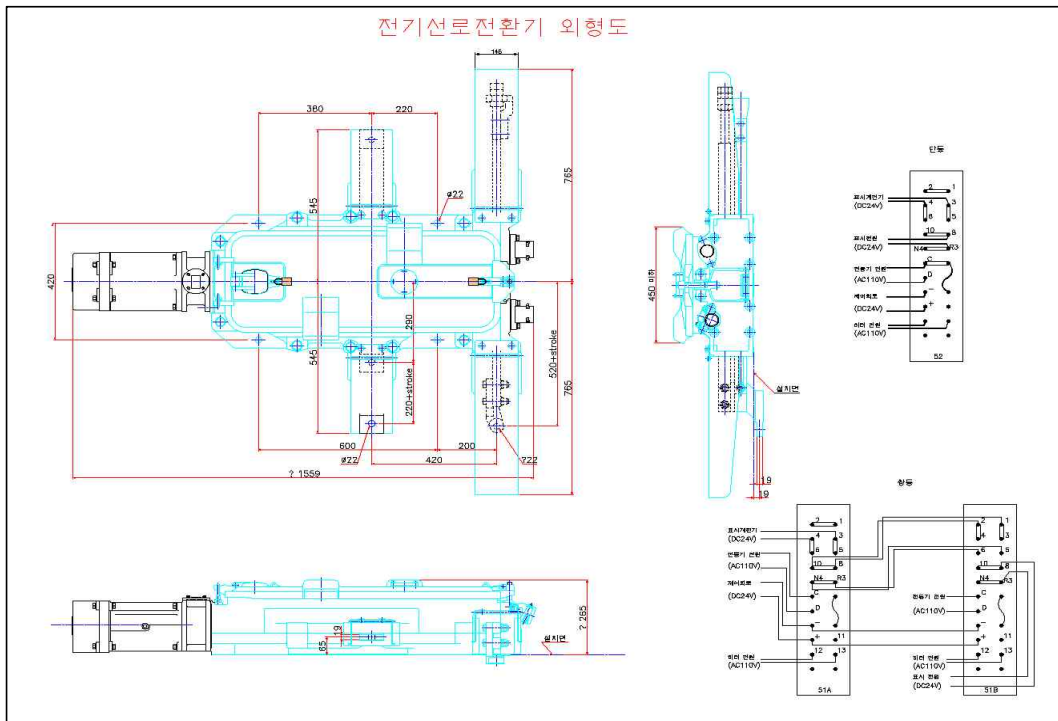
개량형 분기기 교체 시험부설 완료모습

다. 분기기 시공관련 타분야와의 인터페이스 분석

① 분기기 시공과 신호설비 인터페이스 분석

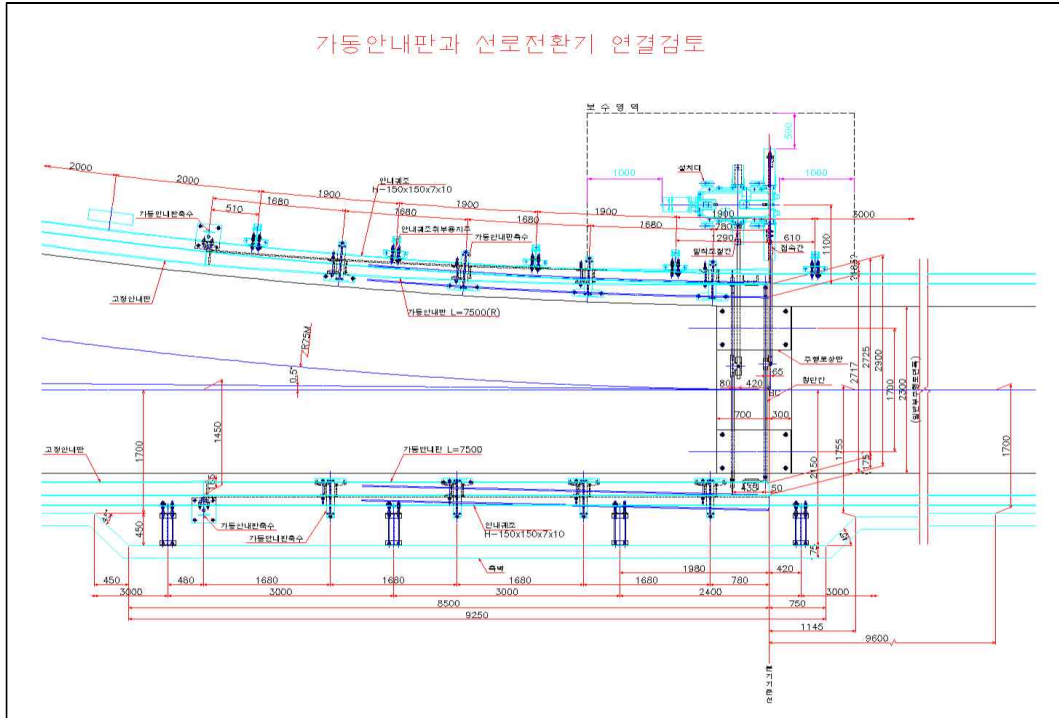
㉠ 분기기 가동안내판과 선로전환기 인터페이스 분석

분기기 가동안내판과 선로전환기는 서로 연결되어 작동하기 때문에 분기기 설치시 가장 밀접한 관계를 가지고 있다. 다음은 선로전환기 외형도를 나타내었다.



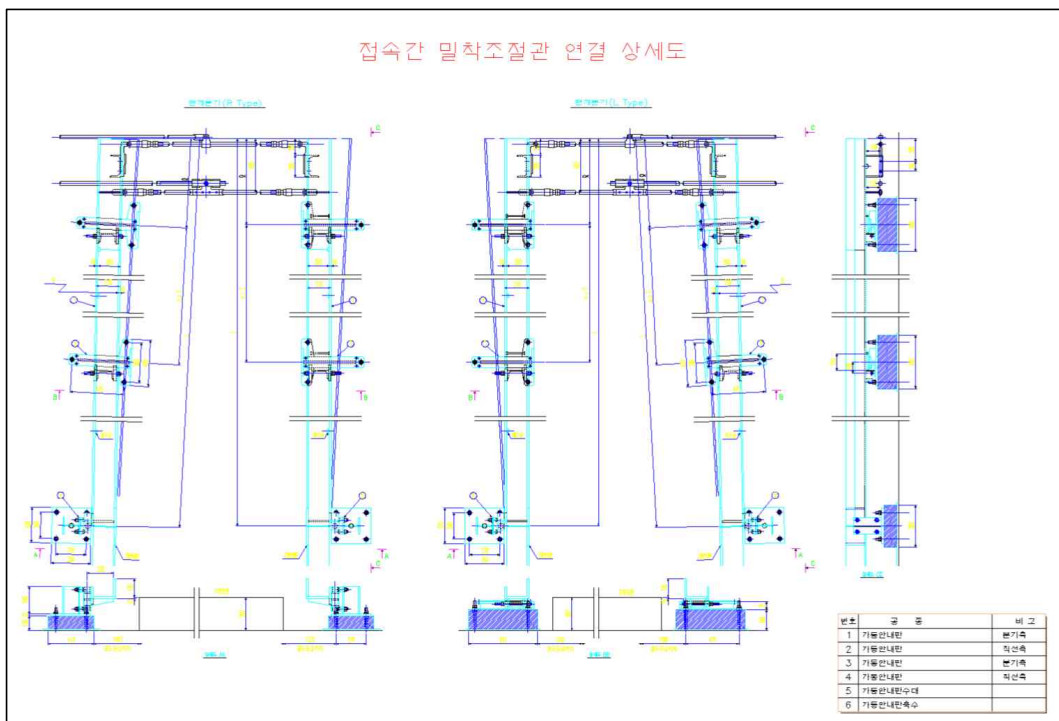
< 선로전환기 외형도 >

고무차륜AGT 분기기에 사용되는 선로전환기는 NS-AM형 전기선로전환기로서 일반적으로 철제차륜 궤도에서도 많이 사용되어지고 있는 선로전환기이다. 금번 과제의 고무차륜 AGT 분기기에 NS-AM형 선로전환기가 사용되고 있다. 가동안내판과 NS-AM형 선로전환기의 연결구조를 검토한 결과 가동안내판의 하부와 신호분야 전로전환기 밀착조절판이 서로연결되며, 가동안내판과 시설분야의 접속간이 연결되게 되어있다. 가동안내판과 선로전환기 연결과 관련하여 설치현황을 아래의 그림에 나타내었다.



〈 가동안내판과 선로전환기 연결검토 〉

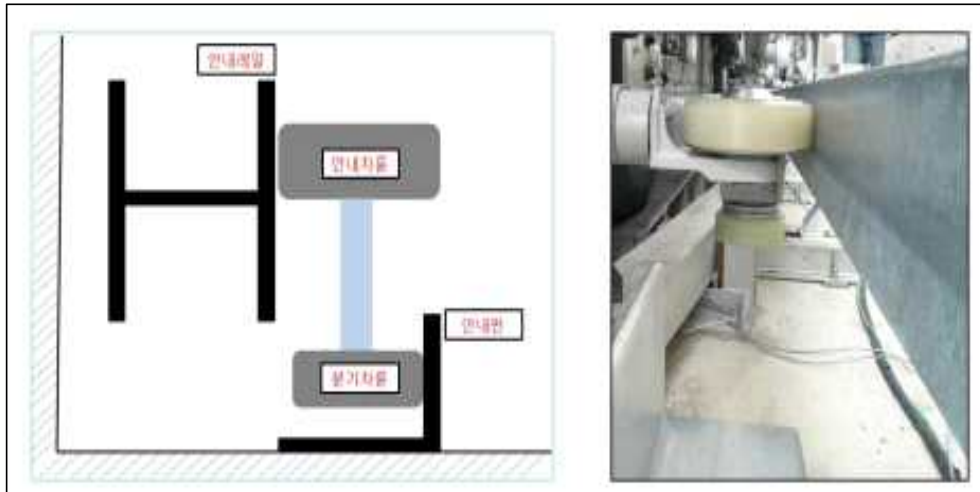
가동안내판과 접속간, 밀착조절관의 연결부분 우분기기 및 좌분기기의 연결 상세도면은 아래와 같다.



〈 접속간 밀착조절관 연결 상세도 〉

㉔ 분기기와 차량과의 인터페이스

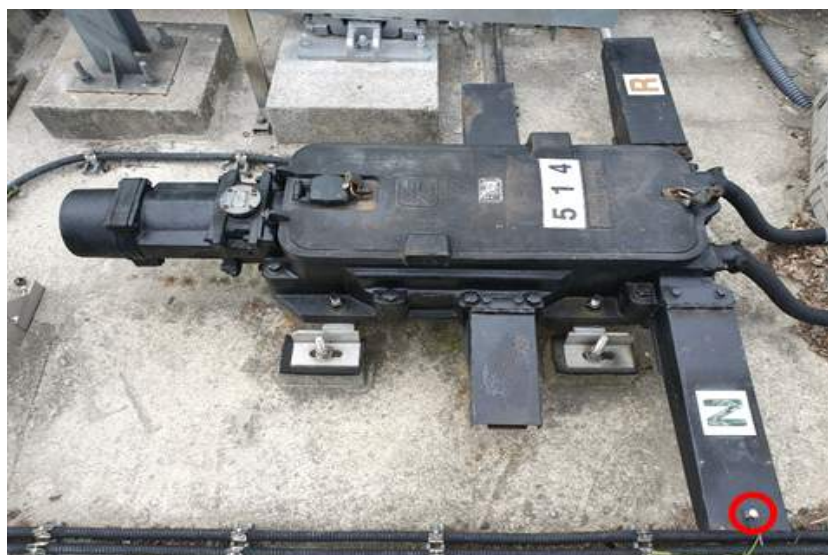
고무차륜 AGT분기기는 기존의 철도차량과 비교하여 분기륜이라는 별도의 시스템을 가지고 있다. 고무차륜AGT 시스템은 일정한 높이에 주행레일을 역할을 하는 안내레일이 측방에 설치되어 있고, 1개의 차량에는 4개의 안내륜이 안내레일을 따라 이동하는 방식이다. 또한 안내륜 하부의 분기륜이 안내판을 타고 가이드 역할을 하며 분기구간을 통과할수 있도록 구성되어 진다. 이렇게 고무차륜 AGT분기기와 차량은 차량의 분기륜과 고무차륜AGT분기기의 안내판의 상호 작용에 의해 운행된다.



< 고무차륜 AGT의 안내판과 분기륜 모습 >

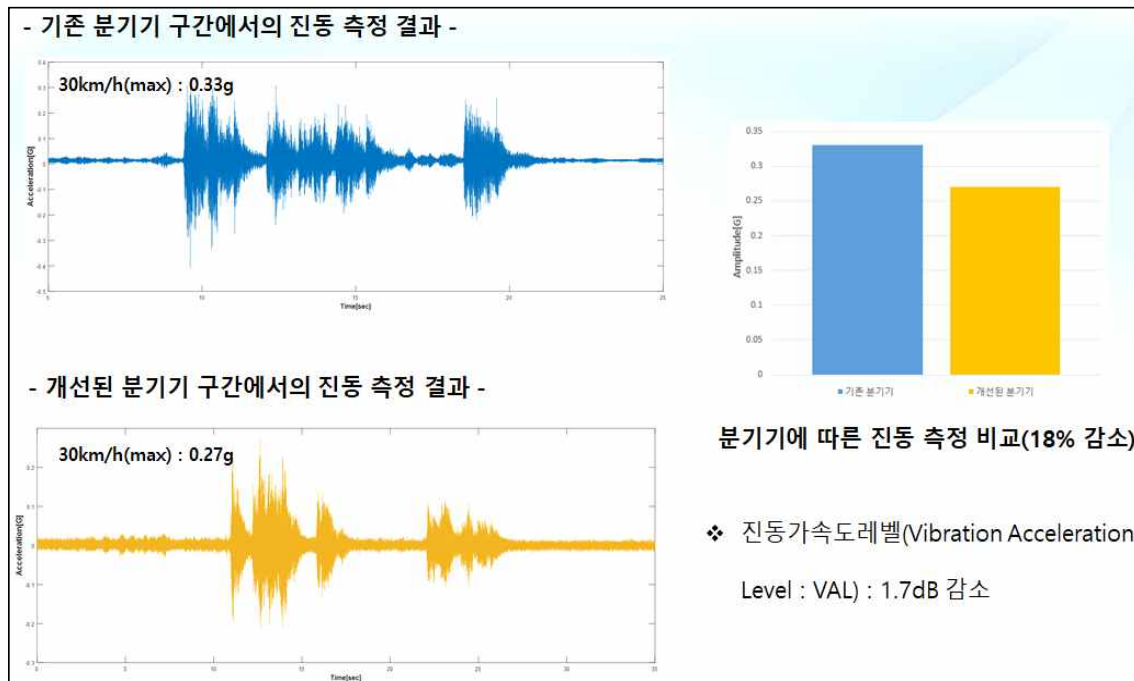
○ 지상진동가속도 측정

고무차륜 AGT분기기의 상태가 차량에 어떠한 영향을 미치는지를 확인하기 위해 다음과 같은 시험을 시행하였다. 분기기 구간의 차상과 지상에 진동 계측을 수행하여 분기기와 차량과의 인터페이스 분석하여 분기기의 진동이 차량에 미치는 영향을 분석하고자 하였다. 시험방법은 고무차륜 실차주행시 분기기 구간에서 차상진동 계측수행 및 분기기 구간에서 지상 진동 계측을 기존분기기와 개발 분기기 설치후 비교 검토하였다.



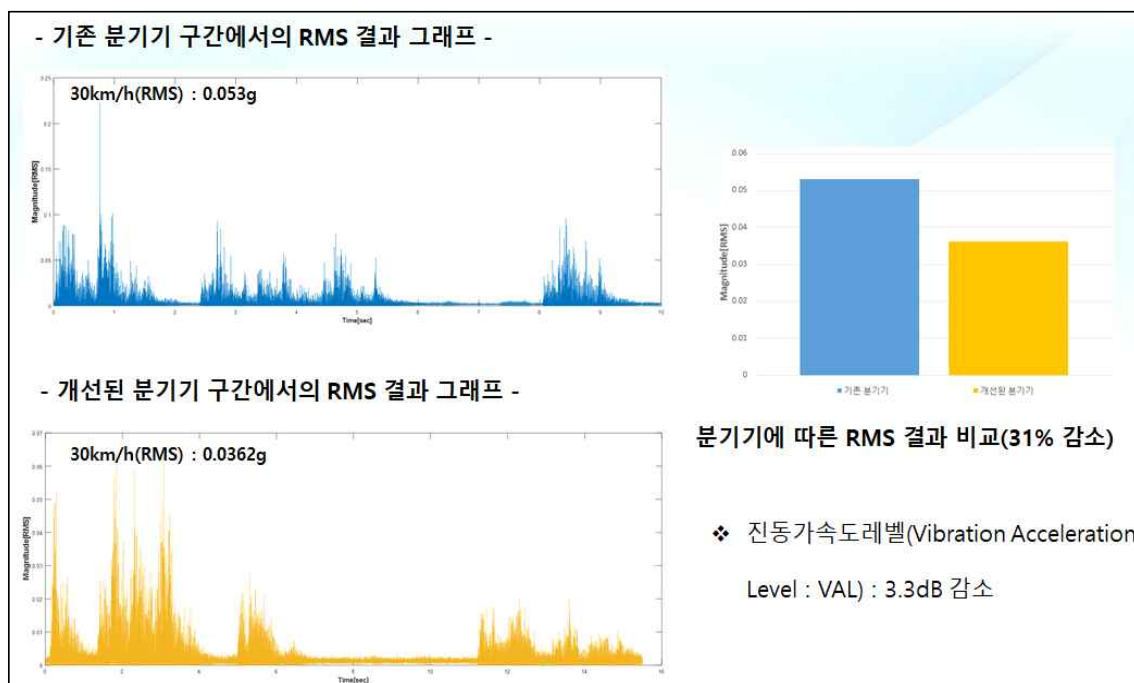
< 분기기 구간 측정위치 >

속도를 30km/h로 기존분기기 구간과 신설분기기 구간에서 진동측정 결과 신설 분기기에
서 진동이 18% 감소하는 것으로 나타났으며 진동가속도레벨은 1.7dB 감소하였다.



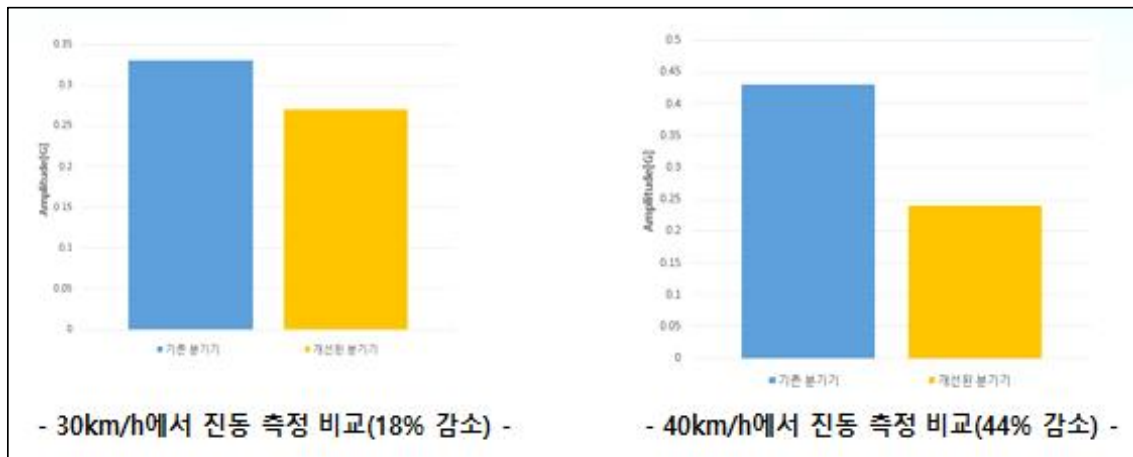
< 기존 분기기 및 개발 분기기 구간에서의 진동측정 결과(30km/h) >

속도를 40km/h로 기존분기기 구간과 신설분기기 구간에서 진동측정 결과 신설 분기기에
서 진동이 31% 감소하는 것으로 나타났으며 진동가속도레벨은 3.3dB 감소하였다.



< 기존 분기기 및 개발 분기기 구간에서의 진동측정 결과(40km/h) >

기존 분기기와 개발 분기기에서 속도대별로 진동시험을 실시한 결과 개발분기기가 30km/h에서 18%, 40km/h에서 44%개선효과를 나타냈다.



< 기존 분기기 및 개발 분기기 진동측정 비교표 >

○ 차상진동가속도 측정

차량 진동가속도 계측 실험에서는 콘크리트 주행로에서의 주행에 대해 그림과 같이 총 3 곳의 측정지점을 선정하였다. 해당 지점은 고무차륜 AGT 시스템과의 거리와 위치를 고려하여 선정하였으며, 거리와 위치에 따른 수직 진동가속도를 분석하여 고무차륜이 이동하면서 발생하는 진동의 영향을 확인하고자 한다. 아래 그림은 대차의 수직 및 수평 진동 측정을 위한 계측 위치와 객차 내부의 진동가속도 계측 위치를 나타내고 있다. 진동 측정 센서는 그림 전면부 대차에 부착되었으며 1은 대차의 수직방향, 2는 대차의 수평방향 진동가속도 측정센서이다.

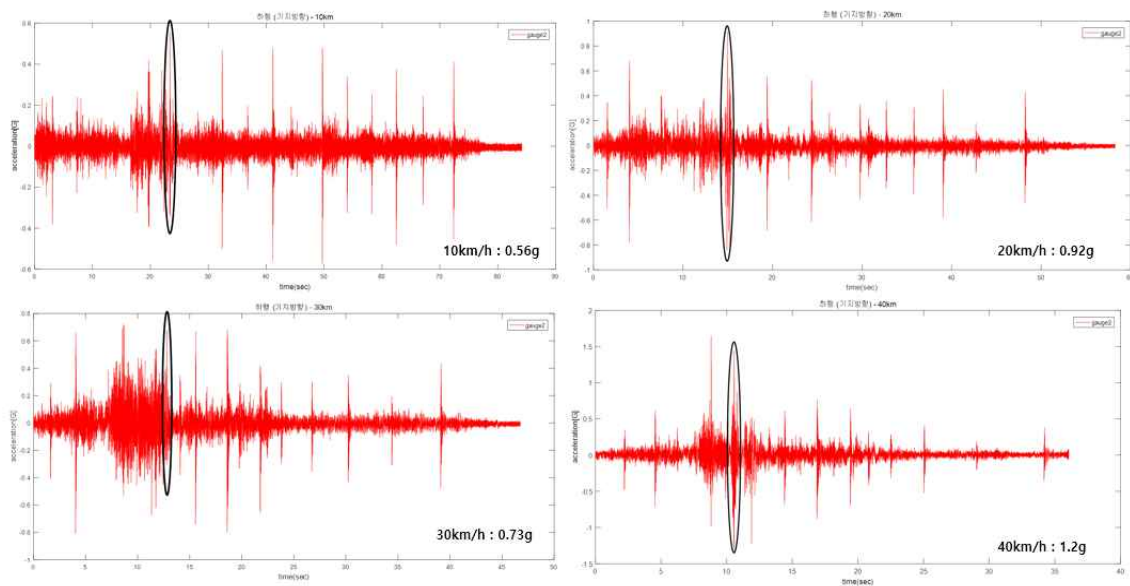


< 부산 4호선 진동가속도 현장계측 측정지점 (대차) >

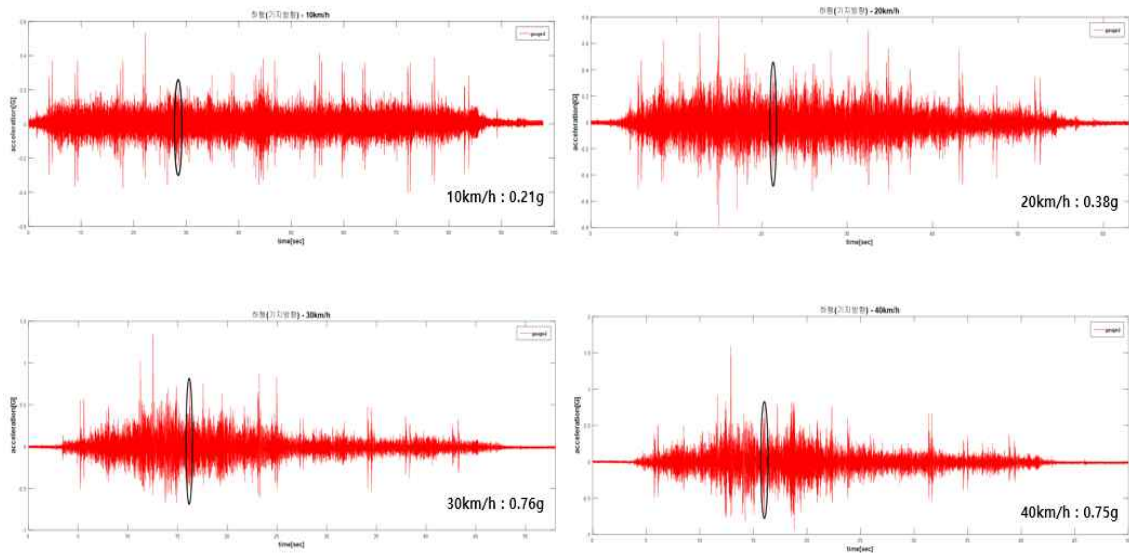


< 부산 4호선 진동가속도 현장계측 측정지점 (객차) >

아래 그림은 하행방향 주행중 발생하는 진동을 대차의 수직, 수평 및 객차 내부에서 측정
한 결과를 개선 전후로 나타낸 그림과 표이다. 그래프에 표시된 부분은 분기기를 지날 때
측정된 부분을 표시한 것이며 기록값은 중력가속도 $G(9.81m/s^2)$ 의 단위로 나타내었다.



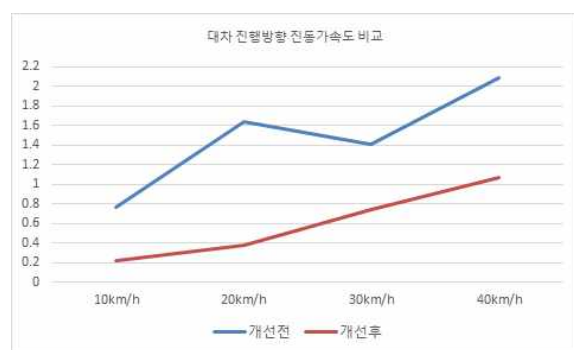
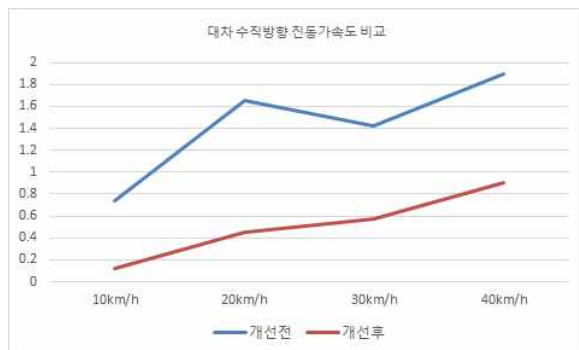
< 하행선 대차 수평 진동가속도 현장계측 결과 (개선전) >



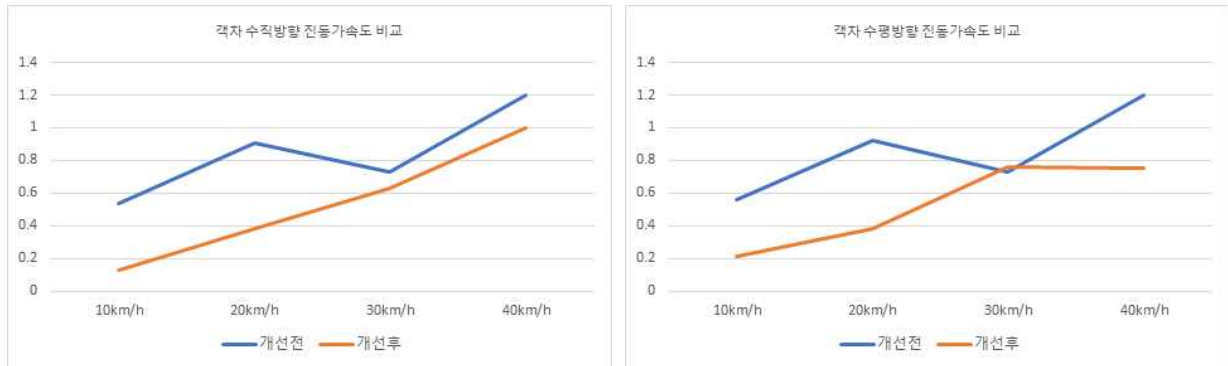
〈 하행선 대차 수평 진동가속도 현장계측 결과 (개선후) 〉

〈 개선 전후 최대 진동가속도 계측 결과 비교 〉

Case	상행선			하행선		
	Point 1 $A_{peak}(G)$	Point 2 $A_{peak}(G)$	Point 3 $A_{peak}(G)$	Point 1 $A_{peak}(G)$	Point 2 $A_{peak}(G)$	Point 3 $A_{peak}(G)$
개선전(10km/h)	0.74	0.76	0.11	0.54	0.56	0.13
개선후(10km/h)	0.12	0.22	0.03	0.13	0.21	0.03
개선전(20km/h)	1.65	1.64	0.17	0.91	0.92	0.13
개선후(20km/h)	0.45	0.38	0.07	0.38	0.38	0.038
개선전(30km/h)	1.42	1.41	0.22	0.73	0.73	0.06
개선후(30km/h)	0.57	0.74	0.08	0.63	0.76	0.08
개선전(40km/h)	1.90	2.09	0.22	1.20	1.20	0.14
개선후(40km/h)	0.90	1.07	0.10	1.00	0.75	0.11



〈대차 수직 진동가속도 현장계측 결과 비교〉 〈대차 수평 진동가속도 현장계측 결과 비교〉



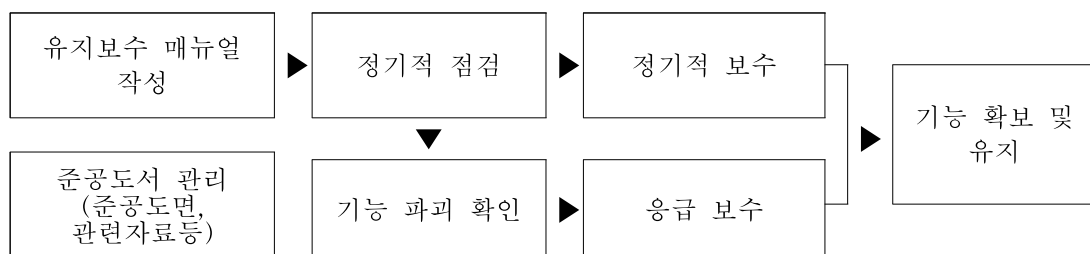
〈대차 수직 진동가속도 현장계측 결과 비교〉 〈대차 수평 진동가속도 현장계측 결과 비교〉

현장계측 결과를 비교해보면, 분기기를 지날 때 기존 설치품과 개선품의 속도별로 차이가 존재하는 것을 확인할 수 있다. 상행선의 경우 각 측정지점에 따라 비교해보면 대차 수직방향일 때 평균 53.8%의 진동감소율을 보였으며, 수평방향일 때 48.8%, 객차 수직방향일 때 49.9%의 감소율을 보였다. 특히 고무차륜이 시속 20km/h로 분기기를 통과할 때 대차에서 큰 감소율을 보였으며 객차의 수직 진동가속도는 30km/h 이상에서 크게 감소하였다. 하행선의 경우 대차 수직방향일 때 13.7%~최대 75.9%, 대차 수평방향일 때 37.5%~62.5%, 객차 수직방향일 때 21.4%~76.9%의 감소율을 보였다. 하행선 속도가 증가함에 따라 진동 감소효과가 크게 줄어드는 것을 확인하였으며, 30km/h이상의 일부 경우에 대해 큰 개선효과가 없는 것으로 나타났다.

② 개량형 분기기 유지관리

유지관리는 안정적인 열차운행을 위하여 주행로의 기능을 유지하고 설비 이상시 원형상태로 복구시키는 것이 목적이며, 이러한 일련의 과정을 수행하기 위해서는 기술, 행정 및 관리운영을 조합해야만 한다. 공익성이 매우 높은 철도구조물에 관한 본 신청기술은 체계적이며 적절한 유지보수로 공공의 편의와 안전성을 확보할 수 있다.

궤도구조물의 기능성 확보를 위하여 유지관리 단계에서는 먼저 정확한 준공도서의 작성과 관리가 필요하며, 이것은 구조물의 이력관리를 통한 유지보수의 방향과 체계적인 관리를 수행하기 위함이다. 체계적인 관리를 위해 유지관리 매뉴얼을 작성하였으며, 유지관리 작업은 유지관리 매뉴얼에 따라 수행하여야 한다



바. 논문 및 지적재산권 성과

(1) 논문 게재

순번	제목	날짜	학회지	저자
1	A study on an equivalent model of the threaded fasteners in complex structures through tightening and loosening analysis	2019.06	Journal of Mechanical Science and Technology	Heerok Hong, Hoyong Lee, Naktak Jeong, Keonhee Baek, Myungwon Suh
2	유한요소해석을 이용한 고무차륜 주행로 진동 저감구조 개발	2020.03	한국도시철도학회	김재식, 이호용, 이일화, 홍희록, 이강산, 이다솜, 서명원

(2) 특허 출원

순번	제목	날짜	발명자
1	고무차륜 경량전철용 가이드스레일과 주행로 검측장치 및 검측방법	2018.11	이일화, 윤현석, 홍승표, 강세훈
2	고무차륜 AGT 분기기의 진동소음감소를 위한 가동안내판 고정장치 및 고정방식	2018.11	이일화, 홍승표, 최지호, 전선규, 강창훈, 강세훈
3	고무차륜 경전철 분기기용 W형 후크를 구비한 가동안내판 구속장치	2019.09	이일화, 이호용, 최규문, 윤현석, 홍승표, 채주병, 장문섭
4	고무차륜 경전철용 주행로 색판 및 그 유지보수 방법	2019.09	이일화, 최규문, 이초령, 윤현석, 홍승표, 조은석
5	고무차륜 AGT 주행로	2020.05	엄주환, 이일화, 이호용, 배영훈,
6	고무차륜 AGT 주행로	2020.06	엄주환, 이일화, 이호용, 최규문, 오상근, 나정민, 문영주

(3) 특허 등록

순번	제목	날짜	발명자
1	고무차륜 경량전철용 가이드스레일과 주행로 검측장치 및 검측방법	2019.06	이일화, 윤현석, 홍승표, 강세훈
2	고무차륜 경전철 분기기의 진동소음 감소를 위한 가동안내판 구속장치	2019.09	이일화, 이호용, 최규문, 윤현석, 홍승표, 채주병, 장문섭

(4) 기타 (분기기 견적서 2019.02.)

見 積 書

No. : 2019 - 06

광주도시철도 2호선 1단계 賁下
(Tel : 02-6211-7847, FAX : 02-6211-7561)

천 윤 궤 도 (주)
대표이사 강훈, 장혜진 (인)
대구시 동구 효신로 51(산현동)
대표전화 : 053) 744 - 8373
팩 스 : 053) 751 - 7764

下記 内容과 같이 見積하나다. 感謝합니다.

2019년 2월 7일

名 稱 / 規 格	數 量	單 位	單 價	金 額	備 考
1. 고무차륜AGT 분기기 2도	1	통	68,000,000	68,000,000	(수명식)
2. 고무차륜AGT 분기기 3도	1	통	47,000,000	47,000,000	(수명식)
3. 주행로 색판, 내공폭 : 500mm	1	set	2,500,000	2,500,000	
4. 주행로 색판, 내공폭 : 1,000mm	1	set	5,000,000	5,000,000	
5. 주행로 색판, 내공폭 : 1,200mm	1	set	6,000,000	6,000,000	
6. 안내레일, 직선:H-형강-150*150*7*10, L=12m	1	m	100,800	100,800	
7. 안내레일, 곡선:H-형강-150*150*7*10, L=10.8m	1	m	168,000	168,000	벤딩가공,폴단
8. 안내레일, L-형강-175*175*15(목내용)	1	m	130,000	130,000	
9. 안내레일, L-형강-200*200*15(PIT)	1	m	180,000	180,000	
10. 고정안내판, 200(B)*230(H)*15(t), L=12m	1	m	250,000	250,000	
11. 안내레일채결구-1	1	set	99,500	99,500	
12. 안내레일채결구-1제3계조 취부판, SS400	1	set	187,500	187,500	
13. 안내레일 강제지주, H-125*125*6.5*9, L=575mm	1	set	104,000	104,000	볼트,너트포함
14. 안내레일 강제지주, H-125*125*6.5*9, L=455mm	1	set	92,800	92,800	볼트,너트포함
15. 이음매판 (이음매판,육각볼트, 이음매판 클립,클립방지너트, 원형와셔등)	1	set	70,200	70,200	
1. 부가세 별도 금액임. 2. 본 견적서는 발행일로부터 30일간 유효함.					

3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

가. 목표 달성도

(1) 과제 목표

- 고무차륜 경전철 주행로의 환경소음진동을 저감시키기 위한 방진주행로와 분기기의 재료, 구조, 시공법 개발 및 성능검증
 - 방진주행로의 설계기술
 - 고무차륜 AGT 분기기 설계기술
 - 방진주행로의 재료기술
 - 고무차륜 AGT 분기기 시스템엔지니어링 기술
 - 성능목표 설정 및 설계/성능요구조건, 인터페이스 기술요건 정립
 - 고무차륜 AGT용 분기기 및 방진주행로 시공공법개발
 - 고무차륜 AGT 분기기 시제품 개발/방진주행로 시제품 개발
 - 개발 분기기, 방진주행로 설계지침

(2) 세부과제 성과목표

최종 성과목표	세부 목표
방진주행로의 설계기술	◆ 고무차륜 AGT주행로의 소음진동 특성 확보 ◆ 고무차륜 방진주행로의 차량주행, 건설환경, 방진성능을 고려한 단면 선정 ◆ 횡방향 전단저항력 확보를 위한 전단검토
고무차륜 AGT분기기 설계기술	◆ 가동안내판, 고정블럭, 스톱퍼의 기능저하 원인 검토 ◆ AGT 분기기 설계기술 확보
방진주행로의 재료기술	◆ 주행로 활동저항성을 확보할 수 있는 앵커 구조검토 및 앵커 제작기술 ◆ 방진주행로의 고무 물성에 따른 진동 특성 해석 수행
고무차륜 AGT 분기기 시스템엔지니어링기술	◆ 분기기 시공과 관련한 급전, 신호설비, 차량 등과의 인터페이스 기술 분석 ◆ 부산교통공사 안평차량기지 분기기 시제품 시험부설 ◆ 시험부설 분기기 구간에서의 지상/차상 진동계측 및 분석을 통해 개선 사항 분석
성능목표 설정 및 설계/성능요구조건,	- 고무차륜 AGT용 설계하중을 적용하여 설계속도 60km/h를 선정하고 고무차륜 AGT 차량을 대상으로 하는 하중조합 선정하여 성능 검증

인터페이스 기술요건 정립	- 차량, 신호 및 전차선 궤도의 영향을 검토하기 위하여 각 조건별 이론적 실험적 연구를 수행하여 최종 인터페이스 조건 결정 - 방진주행로 설계최적화를 위하여 온도응력, 휨응력, 균열에 대한 이론적 검토 수행 - 방진주행로 패널에 대한 성능시험을 해석적, 실험적으로 규명 - 방진주행로 패널의 표준단면 제시(단면폭, 두께, 구조, 시공연장 등) - 방진주행로에서 가장 취약한 충전부, 접속부 등에서의 성능확보를 위하여 이론적 검토를 바탕으로 모형, 실물시험을 수행하여 최종 보강안을 제시
고무차륜 AGT용 분기기 및 방진주행로 시공공법개발	- 신설되는 고무차륜 AGT용 분기기 시공공정 및 향후 교체수요에 대비해 야간 교체 시공정정별 소요시간 및 인력투입을 산출하고 시공방법 및 순서 등의 매뉴얼 작성 - 방진주행로의 진동저감을 위한 앵커 설치방법 개발
고무차륜 AGT 분기기 시작품 개발/ 방진주행로 시작품 개발	- 고무차륜 AGT 분기기의 설계요구 조건 등을 분석하여 시제품 제작하고 실내 성능시험을 통한 성능 검증 - 방진주행로 시작품 제작해 방진충진재 및 앵커의 실내 성능시험을 통한 성능검증 - 실내 성능시험이 완료된 고무차륜 AGT분기기와 방진주행로 패널을 현장 시험부설을 통한 성능 검증 및 개선
개발 분기기, 방진주행로 설계지침	- 국내 고무차륜 AGT용 분기기 및 방진주행로 기술을 기반으로 하는 고무차륜 AGT용 분기기 및 방진주행로 설계지침 및 시방서 마련

(3) 연차별 성과목표 달성도

목표한 성과를 100% 이상 달성하였으며, 1~2차년도 성과에 대해서는 중간 평가 및 모니터링을 통해 우수한 평가를 받았으며, 3차년도에도 질적 및 양적 목표를 달성하였음

(가) 1차년도

	핵심성과		성과목표		성과지표		성과검증 기준				가중치
							목표수준		측정방법	검증 방법	
							목표치	달성치			
성과 질적 목표 점검	1	시스템 설계	1-1	방진주행로 설계및검증	①	방진주행로 설계방안	3dB(v) 저감	3dB(v) 저감	저감 성능	발표 (보고서)	4
			1-2	분기기 설계및검증	①	분기기 설계방안	제작비 10%절감	제작비 10%절감	절감 비율	발표 (보고서)	4
	2	요소기술 개발	2-1	방진재료의 선정	①	재료의 방진 성능	현장 적용성 확보	현장 적용성 확보	목표치 달성여부	발표 (보고서)	4
			2-2	분기기 구성품 개발	①	구성품의 성능	시방서 만족여부	시방서 만족여부	목표치 달성여부	발표 (보고서)	4
	3	시제품 제작 및 현장시험부설	3-1	시제품 제작	①	분기기 시제품 제작	1틀 제작	1틀 제작	목표치 달성여부	발표 및 현장조사	4
	종합점수 = ∑ (성과목표별 달성평점 ×가중치)										20
	환산점수										
양적 지표 점검	사업연계지표				목표	목표건수	달성건수	증빙	인정건수	달성율	가중치
					특허출원	2	2	출원명세서			40
					특허등록	0	0	-			0
					시제품제작	1	1	시제품여부			40
					논문발표	1	2	논문실적			20
					논문게재	0	0	-			0
	종합점수 = ∑ (성과목표별 달성평점 ×가중치)										100
환산점수											

(나) 2차년도

	핵심성과		성과목표		성과지표		성과검증 기준				가중치	
							목표수준		측정방법	검증 방법		
							목표치	달성치				
성과 질적 목표 점검	1	시스템 설계	1-1	방진주행로 설계 및 검증	①	방진주행로 설계방안	3dB(V) 저감	3dB(V) 저감	저감 성능	발표 (보고서)	3	
			1-2	분기기 설계 및 검증	①	분기기 설계 방안	제작비 10% 저감	제작비 10% 저감	절감 비율	발표 (보고서)	3	
			1-3	인터페이스 기술요건 정립	③	취약부 설계기술확보	선형관리 기준이내	선형관리 기준이내	목표치 달성여부	발표 (보고서)	2	
	2	요소기술 개발	2-1	방진재료의 선정	①	재료의 방진 성능	현장 적용성 확보	현장 적용성 확보	목표치 달성여부	발표 (보고서)	3	
	3	시제품 제작 및 현장시험부설	3-1	시제품 제작	①	분기기 시제품 제작	2틀 제작	2틀 제작	목표치 달성여부	발표 및 현장조사	2	
			②		방진주행로 시제품 제작	1식 제작	1식 제작	목표치 달성여부	발표 및 현장조사	3		
			3-3	성능검증을 위한 시험부설	①	분기기 시험부설	현장부설	현장부설	목표치 달성여부	발표 및 현장조사	4	
	종합점수 = ∑ (성과목표별 달성평점 ×가중치)											20
	환산점수											
	양적 지표 점검	사업연계지표				목표	목표건수	달성건수	증빙	인정건수	달성율	가중치
특허출원						1	2	출원명세서			20	
특허등록						0	1	-			35	
시제품제작						1	1	시제품여부			0	
논문발표						1	1	논문실적			45	
논문게재						1	1	-			0	
종합점수 = ∑ (성과목표별 달성평점 ×가중치)											100	
환산점수												

(다) 3차년도

	핵심성과		성과목표		성과지표		성과검증 기준				가중치
							목표수준		측정방법	검증 방법	
							목표치	달성치			
성과 질적 목표 점검	1	시스템 설계	1-1	방진주행로 설계및검증	①	방진주행로 설계방안	3dB(V) 저감	3dB(V) 저감	저감성능	발표 (보고서)	3
			1-2	분기기 설계및검증	①	분기기 설계 방안	제작비 10%저감	제작비 10%저감	저감비율	발표 (보고서)	3
			1-3	인터페이스 기술요건 정립	①	취약부 설계기술확보	선형관리 기준이내	선형관리 기준이내	목표치 달성여부	발표 (보고서)	2
			1-4	설계지침 제정	①	지침의 타당성	건설 기준 동등	건설 기준 동등	목표치 달성여부	발표 (보고서)	2
	2	요소기술 개발	2-1	분기기 구성품 개발	①	구성품의 성능	시방서 만족여부	시방서 만족여부	목표치 달성여부	발표 (보고서)	2
	3	시제품 제작 및 현장시험부설	3-1	시제품 제작	①	분기기 시제품 제작	1틀 제작	2틀 제작	목표치 달성여부	발표 및 현장조사	2
			3-2		②	방진주행로 시제품 제작	1식 제작	1식 제작	목표치 달성여부	발표 (보고서)	2
			3-3	성능검증을 위한 시험부설	①	분기기 시험부설	현장부설	현장부설	목표치 달성여부	발표 및 현장조사	2
			3-4		②	방진주행로 시험부설	시험선부설	시험선부설	목표치 달성여부	발표 및 현장조사	2
	종합점수 = ∑ (성과목표별 달성평점 ×가중치)										
환산점수											
양적 지표 점검	사업연계지표				목표	목표건수	달성건수	증빙	인정건수	달성율	가중치
					특허출원	1	2	출원명세서			25
					기술이전	2	1	이전요청서			10
					시제품제작	0	2	보고서			20
					논문발표	1	1	논문실적			15
					논문게재	0	1	논문실적			15
	신기술신청	1	1	신청서			15				
종합점수 = ∑ (성과목표별 달성평점 ×가중치)											100
환산점수											

나. 관련 분야 기여도

(1) 기술적 기여도

- 기존 고무차륜 AGT 분기기의 원인해소로 인한 진동3dB(V) 저감
- 기존 프리캐스트 고무차륜 주행로의 정온구간 통과시 대안자재 생산가능
- 철도연변 소음진동에 대한 선제적 조치로 국민복지 확보, 민원 저감
- 새로운 경전철 시스템에 대한 기술선도
- 한국형 분기기 설계 및 시공 기술 확보를 통한 고무차륜주행로 기술 선도

(2) 경제, 산업적 기여도

- 기존 고무차륜 AGT 분기기 대비 제작비용 10% 이상 절감
- 개발되는 고무차륜 AGT 분기기 사용시 광주지하철 2호선 기준으로 분기기 신설시 소요되는 예상금액은 2도분기기(842백만), 3도분기기(2,152백만원)의 10%가 절감가능할 것으로 판단됨
- 방진주행로 구간은 기존 터널을 방진처리할 경우 1m당 약 1억원의 추가비용이 발생하게 되나 주행로를 방진처리할 경우 1m당 약 1천만원의 추가비용이 소요됨
- 향후 고무차륜 AGT분기기와 방진주행로 시장은 연간 100억원 정도로 추정됨
- 또한 해외시장 진출시 추가시장 확보 가능

(3) 사회적 기여도

- 국내 고무차륜 경전철 계획노선에 적용
 - 현재 부산도시철도 4호선 약 20km와 의정부 경전철 22km외 인천공항철도 3km구간을 포함해서 약 47km구간에서 고무차륜 AGT가 운행되고 있음
- 고무차륜 AGT 주행로 및 분기기 개발 활성화에 따른 해외 경쟁력 향상

4. 연구개발성과의 활용 계획 등

가. 연구성과의 활용방안

- 고무차륜 경전철 기술수요처인 부산교통공사, 광주교통공사, 의정부경전철 적용을 위한 상용화 추진
- 철도교통의 소음진동민원은 개통 후에 발생하고 발생 후 조치는 현실적으로 매우 어렵기 때문에 설계단계에서 정온 및 민원예상 구간에 선제적인 소음진동저감대책으로 적용
- 방진주행로는 저토피 저심도구간에서 소음진동이 예상되는 구간에 방진대책으로 적용하며, 분기기는 기존 구조를 개선하여 신설 및 개량용으로 적용
- 향후 발주예정인 각 지자체 및 국가 발주공사에 적용(주행로 확정예산 3,400억원)
- 고무차륜 AGT 주행로 및 분기기 기반기술 확보 및 실용화 준비
- K-AGT(국산화 차량)과의 시스템기술 확보로 향후 해외시장 진출 기술지원

나. 연구개발 성과에 따른 파급효과

- 개발제품은 건설단계를 포함하여 개량 또는 교체시 적용
 - 주행로는 예상수명이 30년으로서 개량이 필요하며, 특히 정온지역에서는 방진주행로 부설이 필수적인 항목으로 채택될 필요가 있음. 현재 일반철도 부설시에도 주거지, 병원 및 학교 근처는 부유궤도 및 방진매트를 이용한 소음진동 감소를 필요하는 시스템으로 궤도를 부설하고 있음
 - 분기기는 설계수명이 30년으로서 향후 교체수요가 발생하게 되며 교체시는 순차적으로 전구간의 분기기를 교체하게 됨으로써 건설 당시보다 많은 비용이 소요되는 단점이 있으나 개발 분기기를 적용시 생산비용 10% 저감과 더불어 현장 부설시 교체작업을 단순화하여 시간 및 경비를 절감할 수 있도록 개량

다. 연구개발 성과 홍보실적

(1) 연구성과 홍보

- 개발 주행로에 대하여 2020년도 한국철도학회 10대 기술상 선정

붙임. 참고문헌

- 1) 건설비 절감을 위한 고무차륜 경량전철 상하식 분기기 개발(철도학회)
- 2) 부산지하철 3호선 궤도 실시설계
- 3) 부산지하철 3호선 자재 시방서
- 4) 부산지하철 3호선 유지관리 지침서
- 5) 의정부 경전철 궤도 실시설계
- 6) 분기기용 가변단차식 무도유 롤러상판 개발에 관한 연구
- 7) 양신추 (2002) 콘크리트 궤도 유형별 진동성능평가에 대한 연구, 한국소음진동공학회 춘계 학술대회논문집, pp. 911-916.
- 8) 김정훈 (2012) 철도 궤도의 진동 해석에 대한 연구, 한국철도학회 춘계학술대회 논문집
- 9) 김정훈 (2012) 매립형 궤도의 소음/진동 해석에 대한 연구, 한국철도학회 추계학술대회 논문집
- 10) 김종민 (2007) 장대레일과 교량의 상호작용 해석을 통한 교량제원 매개변수 분석, 한국철도학회 학술발표대회논문집
- 11) 대한교통학회(2010), ‘노면전차 활성화를 위한 한·일 공동세미나’
- 12) 서사범, 「선로공학」, 삶과 꿈, 1999.
- 13) 국토해양부, (2010) 콘크리트 궤도 경쟁력 평가 및 향상 방안 연구 결과보고서
- 14) 한국철도기술연구원, (2007) 고속철도선로구축물 시스템안정화기술개발 최종보고서
- 15) 한국철도기술연구원, (2006) 도시철도 표준화 연구개발사업 2006년도 연구결과보고서
- 16) M.H. Heo, (2000) A Study on the Laterally Dynamic Characteristics and the Finite Element of Concrete Slab Track, Master’ s Thesis, HanYang University
- 17) D.W. Lee, (2007) A Behavior Analysis of HSR Concrete Slab Track under Variety of Rail Pad Stiffness on Fatigue Effect, Master’ s Thesis, Seoul National University of Science and Technology
- 18) S.Ch. Kim, (2005) Experimental Study to fatigue performance of steel fiber RC slab track, Master’ s Thesis, Seoul National University of Science and Technology
- 19) S.J. Kim, (2011) Parametric Study for the Vibration Reduction of Concrete Track and Adjacent Structure, Master’ s Thesis, Seoul National University of Science and Technology
- 20) Huan Feng, (2011) 3D-models of Railway Track for Dynamic Analysis, PhD Thesis, Depar

tment of Transport Science School of Architecture and the Built Environment Royal Institute of Technology

- 21) MINGFEI LU, (2008) Discrete Element Modelling of Railway Ballast, PhD Thesis, The University of Nottingham
- 22) LOUIS LE PEN, (2008) Track Behaviour: The Importance of the Sleeper to Ballast Interface, PhD Thesis, School of Civil Engineering and the Environment, University of Southampton
- 23) OSCARSSON J, (2001) Dynamic train-track interaction: linear and non-linear track models with property scatter, PhD Thesis, Chalmers University of Technology
- 24) Ir. Ph.H. van den Dool and Ir. R.B. van Aken, “Practical experience with rail dampers”, railway noise knowledge centre, July 2006.
- 25) Andrew Parker and Conrad Weber, “Rail Dampers–The First Australian Field Trial”, ICA 2010, August 2010, Sydney, Australia.
- 26) David Thompson and Chris Jones “Noise and vibration from railway vehicles”, Handbook of railway vehicle dynamics, Chemical Rubber Company Press, 279–325, London, UK
- 27) M. Wirnsberger (SC), M.G. Dittrich (TNO), J. Lub (NSTO) et al, “Methodologies and Actions for Rail Noise and Vibration Control”, METARAIL Project Final Report for Publication, December 1999.
- 28) Tesi di dottorato, “Mechanical behaviour of traditional and antivibration railway tracks with recycled rubber materials”, CONCETTA ONORII, May 2008.
- 29) Dr-Ing. J.Eisenmann, Feste Fahrbahn für Schienenbahnen, Ernst & Sohn, 2000
- 30) Dr-Ing, Dieter Hilliges and Walter Bittner, “Festex Fahrbahn” Sonderdruck aus Edition ET R, 1990.
- 31) Esveld, C. (1989), “Modern Railway Track“, Head of quality Control and Rail Technology NS Permanent Way Department.
- 32) Coenraad Esveld (2001) Modern Railway Track, Second Edition.
- 33) ABAQUS Version 6.10, Finite Element Analysis (FEA) software, 2010
- 34) Paul J. Remington (1987) Wheel/rail rolling noise, I: Theoretical analysis, Journal of the Acoustical Society of America
- 35) Sato, Yoshihiko. (1976) Railway technical research report – Study on high frequency vibrations in track, The Railway Technical Research Institute (Japan)

주 의

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