19RTRP
-B12227
3-04

보안 과제( ), 일반 과제(○) / 공개(○), 비공개( ) 발간등록번호(11-B552989-000297-01)

철도기술연구 사업 제4차 연도 최종 보고서

R&D / 19RTRP-B122273-04

철도차량 일탈방호를 위한 시설 개발 및 성능기준 연구 최종보고서

2020.04.09.

주관연구기관 / 충남대학교
협동연구기관 / 한국철도기술연구원
공동연구기관 / 씨에스글로벌
공동연구기관 / 유비이엔씨
공동연구기관 / 한국철도시설공단
공동연구기관 / 로드키네마틱스

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

철도차량 일탈방호를 위한 시설 개발 및 성능기준 연구 최종보고서

2020
국토교통과학기술진흥원
국토교통부

제 출 문

국토교통과학기술진흥원장 귀하

'철도교량 열차 일탈방호시설 개발 최종보고서'(연구개발 기간 : 2016.11.10~ 2020.2.29) 과제의 최종보고서 15부를 제출합니다.

2020. 4. 9.

주관연구기관명 : 충남대학교 (대표자) 김 승 범 (인)

협동연구기관명 : 한국철도기술연구원 (대표자) 나 희 승 (인)

참여기관명 : 씨에스글로벌 (대표자) 진 충 한 (인)

유비이엔씨 (대표자) 김 회 진 (인)

주관연구기관책임자: 임남형
협동연구기관책임자: 강윤석
참여기관책임자: 진충한, 김회진

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

제 출 문

국토교통과학기술진흥원장 귀하

'열차 일탈방호 성능의 적정성 평가기법 및 설계지침 개발' (연구개발 기간 : 2016. 11. 10 ~ 2020. 02. 29) 과제의 최종보고서 15부를 제출합니다.

2020. 04. 09.

주관연구기관명 : 충남대학교 (대표자) 김 승 범 (인)

협동연구기관명 : 한국철도기술연구원 (대표자) 나 희 승 (인)

참여기관명 : 한국철도시설공단 (대표자) 박 상 구 (인)

로드키네마틱스 (대표자) 김 경 주 (인)

주관연구기관책임자: 충남대학교 임 남 형
협동연구기관책임자: 한국철도기술연구원 강 윤 석
참여기관책임자: 한국철도시설공단 박 상 구
참여기관책임자: 로드키네마틱스 김 경 주

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	19RTRP-B122273-04	해당 단계 연구 기간	2019.01.01.-2020.02.29.	단계구분	4단계/4단계
연구사업명	중사업명	철도기술연구사업			
	세부사업명	철도기술연구사업			
연구과제명	대과제명	철도차량 일탈방호를 위한 시설 개발 및 성능기준 연구			
	세부과제명	철도교량 궤간 내 열차 일탈방호시설 개발 (1세부) 열차 일탈방호 성능의 적정성 평가기법 및 설계지침 개발 (2세부)			
연구책임자	임남형	해당단계 참여연구원 수	총: 45 명 내부: 45 명 외부: 명	해당단계 연구비	정부:808,000천원 민간:355.667천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계:1,163,667천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 77 명 내부: 77 명 외부: 명	총 연구비	정부:5,255,000천원 민간:1,259,911천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계:6,514,911천원
연구기관명 및 소속 부서명	한국철도기술연구원 첨단궤도토목본부 철도구조연구팀 (1세부) 충남대학교 산학협력단 (2세부)			참여기업명 : 씨에스글로벌㈜, ㈜유비이엔씨 ㈜제영이엔씨, ㈜청우이엔씨, 로드키네마틱스, 광득종합건설	
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위탁연구	연구기관명:경남대학교, 고려대학교, 서울과학기술대학교, 강원대학교			연구책임자: 김정중, 공정식, 구정서, 문지호	

※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 갈음

연구개발성과의 보안등급 및 사유	

9대 성과 등록·기탁번호

구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설·장비	기술요약 정보	소프트웨어	화합물	생명자원		신품종	
								생명 정보	생물 자원	정보	실물
등록·기탁 번호	14	4	1	1							

국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황

구입기관	연구시설·장비명	규격 (모델명)	수량	구입연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	NTIS 등록번호
	차량 충돌 실험용 데이터 로거							NFEC-2018-02-242553

요약(연구개발성과를 중심으로 개조식으로 작성하되, 500자 이내로 작성합니다)	보고서 면수

요약문

연구의 목적 및 내용	○ 철도교량 궤간 내 열차 일탈방호시설 개발 및 설계지침/방호성능 적정성 평가 기법 개발 - 일탈방호시설에 대한 설계지침 개발 - 일탈방호 성능의 적정성 평가기법 개발 - 기존 철도교량 일탈방호시설 개량기술 개발 [1세부과제] 철도교량 궤간 내 열차 일탈방호시설 개발 ○ 기존 철도교량 일탈방호시설 개량기술 개발 - 일탈방호시설 설계/시공/유지보수 기술 개발 - 일탈방호시설 구조성능 평가 - 일탈방호시설과 철도시스템(궤도, 전기, 신호 등)간 인터페이스 검토 - 일탈방호시설 시방서(안) 제시 [2세부과제] 열차 일탈방호 성능의 적정성 평가기법 및 설계지침 개발 ○ 탈선/충돌 실험을 통한 방호 설계지침 개발 - 탈선 후 거동 분석 및 시설과의 충돌 메커니즘 규명 - 충돌하중 및 일탈방호 효과 평가 - 일탈방호 성능의 적정성 평가 ○ 시뮬레이션을 통한 방호성능 평가기법 개발 - 실대형 실험결과와의 시뮬레이션 검증 - 시뮬레이션을 통한 일탈방호 성능의 적정성 평가기법 제시 ○ 개발기술의 제도개선 및 실용화 - 일탈방호시설 관련 철도설계지침 및 편람(KR Code) 개정 - 국내외 철도건설사업 계획을 고려한 단계적 적용/수출 방안수립
연구개발성과	[1세부과제] 철도교량 궤간 내 열차 일탈방호시설 개발 ○ 철도교량 궤간 내 일탈방호시설 시제품 ○ 일탈방호시설 설계도서 및 시방서(안) [2세부과제] 열차 일탈방호 성능의 적정성 평가기법 및 설계지침 개발 ○ 일탈방호시설에 대한 설계지침 ○ 열차 일탈방호 성능의 적정성 평가기법 ○ 일탈방호시설 관련 철도설계지침 및 편람(KR Code) 개정
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	- 철도의 고속화 등 급격한 기술진보와 동시에 철도시설의 노후화도 동시에 진행되면서 열차탈선, 선로이탈에 의한 2차 피해 확대가 예상됨에 따라 대형인명사고를 예방할 수 있는 안전한 철도인프라기술을 확보하며, 안전성 확보 기술 개발 및 실용화를 통한 철도교통시스템의 국제 경쟁력 확보에 기여할 수 있음. - 탈선 후 열차의 거동을 예측하고 시설과의 충돌거동/하중을 평가할 수 있는 해석적 및 실험적 연구를 수행하여 그 결과물을 근거로 일탈방호시설에 관한 지침을 개정하는 것은 설계기준 선진화에 크게 기여할 것임. - 철도인프라 방호기술을 현업에 즉시 적용할 수 있는 급속일탈방호성능확보가 가능한 기반기술 확보와 관련 방호시설의 설계, 제작, 급속유지보수 기술연구를 통하여 열차지체시간 최소화 등의 실질적인 기술확보가 가능함.

국문핵심어 (5개 이내)	일탈방호	열차탈선	열차충돌	철도교량	안전방재
영문핵심어 (5개 이내)	Derailment Containment	Train Derailment	Train Collision	Railway Bridge	Safety Disaster Mitigation

※ 국문으로 작성(영문 핵심어 제외)

〈 목 차 〉

1. 연구개발과제의 개요 ····· 1

가. 배경 및 목적 ····· 1

나. 최종목표 ····· 2

2. 연구수행내용 및 성과 ····· 3

2.1 철도교량 궤간 내 열차 일탈방호시설 개발 ····· 3

가. 기존 교량 개량기술 개념설계(안) 및 기술사양 ····· 3

나. DCP 제원도출 궤간 내 DCP 적용에 따른 구조물 안정성 검토 ····· 39

다. 일탈방호시설의 매개변수 해석 및 인터페이스(궤도, 교량) 기술검토 ····· 62

라. 실험을 통한 성능도출 ····· 67

마. 일탈방호시설 현장성능평가 ····· 120

2.2 기존 철도교량 일탈방호시설 제작 및 시공 ····· 138

가. DCP 설계 및 제품개량 ····· 138

나. DCP 패널의 생산 메뉴얼 ····· 147

2.3 기존 철도교량 일탈방호시설 시공방법 및 유지보수(사고후 급속복구) 방법 개발 ····· 155

가. 일탈방호시설 시공방법 ····· 155

나. 일탈방호시설 급속복구 개요 ····· 179

다. 탈선사고 발생 후 일탈방호시설의 상태점검 ····· 180

라. 탈선사고 발생 후 응급복구를 위한 일탈방호시설의 등급별 급속복구 ····· 182

2.4 시험 및 검사 ····· 189

가. DCP패널 제작 ····· 189

2.5 탈선/충돌 실험기법 적정성 ····· 194

가. 실대형 철도차량의 탈선/충돌 실험기법 개발 ····· 194

나. 실대형 철도차량의 탈선/충돌 실험을 위한 계측시스템 설계 및 구현 ····· 196

다. 계측시스템으로부터 도출한 데이터처리 기법 연구 및 분석 기술 개발 ····· 216

2.6 탈선/충돌 시뮬레이션 기법 적정성 ····· 241

가. 단순화 모델 검증을 위한 탈선실험 ····· 241

나. 탈선거동(충돌하중 등) 매개변수 분석 및 DCP 설계 시 고려할 대표조건 도출 ····· 267

다. 자갈도상 모델링 및 해석기술연구 ····278
2.7 일탈사고 사고위험도 등급화 및 적정 충격도 모델을 활용한 일탈방호시설 적용 방안 제시 ····293
가. 철도차량 일탈사고 사례 조사 및 원인 분석 ····293
나. 철도차량 일탈사고 주요 영향인자간 상관관계 분석 ····302
다. 정량평가 기반 철도차량 일탈사고 위험도 등급화모델 제안 ····306
라. 철도차량 일탈사고 위험도 등급별 방호 대책 수립 ····320
마. 철도차량 일탈사고 방호대책 체계 수립에 따른 리스크 감소 효과 예상 ····324
2.8 탈선/충돌 시뮬레이션을 위한 단순화차량모델 및 해석의 타당성 ····329
가. 국내 외 차량 모델링 기법 및 선행연구 조사 ····329
나. 단순화 모델링 기법 ····331
다. 고속열차 단순화 모델 ····335
라. 다물체 동역학을 활용한 곡선구간 시뮬레이션 ····341
마. 탈선 초기조건 도출 ····345
바. 곡선 주행 중 탈선 시 DCP 충돌하중 및 내부에너지 추정 ····353
2.9 일탈방호시설에 대한 설계지침 개발 (철도설계지침 및 편람 개정) ····362
가. 철도설계지침 및 편람(KR C-02060, 본선부대 및 안전시설) 개정(안) 도출 ····362
3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도 ····372
가. 목표 달성도 ····372
나. 양적성과 달성 ····380
다. 목표 미달성 시 원인(사유) 및 차후대책(후속연구의 필요성 등) ····381
라. 관련 분야 기여도 ····381
4. 연구개발성과의 활용 계획 등 ····386
가. 활용계획 ····386
나. 추가연구필요성 ····387
붙임. 참고 문헌 ····388
<별첨> 주관연구기관의 자체평가 의견서

〈 표 목 차 〉

표 1.1 세부과제별 목표 ····· 2

표 2.1.1.1 기존철도교량 일탈방호시설 개발을 위한 핵심 요구사항 ····· 3
표 2.1.1.2 검토가 가능한 대안(Alternatives) ····· 7
표 2.1.1.3 각 대안개념에 대한 행렬비교평가표 ····· 8
표 2.1.1.4 주요 요구사항과 기술사양 ····· 9
표 2.1.1.5 1차년도에 수행되는 개념설계(안)과 기본설계 제시내용 비교 ····· 10
표 2.1.1.6 DCP설계시 고려인자 ····· 13
표 2.1.1.7 TCL규격별 DCP구성(안) ····· 14
표 2.1.1.8 패널형태별 재하위치 ····· 15
표 2.1.1.9 DCP패널 규격별 휨모멘트 및 전단력 ····· 16
표 2.1.1.10 재료물성치 ····· 16
표 2.1.1.11 3경간/1일 작업시 작업효율(호남선 2단계구간) ····· 23
표 2.1.1.12 DCP 손상정도에 따른 구분표 ····· 23
표 2.1.1.13 DCP 손상정도에 따른 유지보수시간 ····· 24
표 2.1.1.14 TCL길이 현황(호남고속선) ····· 26
표 2.1.1.15 패널수량 집계 ····· 26
표 2.1.1.16 고속철도 DCP설치대상 교량 개소 및 연장 ····· 27
표 2.1.1.17 KRS에 제시된 궤도회로 특성에 따른 요구조건 ····· 33
표 2.1.1.18 철도신호설비 물리적 지장설비 영향분석표 ····· 36
표 2.1.1.19 철도신호설비 전자적 지장설비 영향분석표 ····· 37
표 2.1.2.1 일탈방호시설(DCP)의 핵심기술사양(2차년도 기본설계시) ····· 41
표 2.1.2.2 콘크리트 DCP 변수해석 하중조건 ····· 43
표 2.1.2.3 콘크리트 재료 물성치 ····· 44
표 2.1.2.4 각 대안별 세부검토 ····· 47
표 2.1.2.5 총공사비 ····· 51
표 2.1.2.6 총공사비 궤도구조 안전성 검토시 하중조합 ····· 52
표 2.1.2.7 DCP 탈선하중 재하시 적용하중의 변화 ····· 54
표 2.1.3.1 철도교량 열차 일탈방호 시설 충격해석 조건 ····· 64
표 2.1.4.1 실험결과 정리 ····· 71

표 2.1.4.2 실험결과 정리 ····72
표 2.1.4.3 시험체 수량 ····74
표 2.1.4.4 실험결과 정리 ····77
표 2.1.4.5 라텍스 특성 및 성분 ····82
표 2.1.4.6 실리카퓸 특성 및 성분 ····82
표 2.1.4.7 시멘트 페이스트의 배합비 ····83
표 2.1.4.8 샤르피 충격실험 결과 (J/m2) ····86
표 2.1.4.9 샤르피 충격실험 결과와 압축강도 결과 ····88
표 2.1.4.10 충진용 모르타르의 특성 ····89
표 2.1.4.11 탄성폴리머의 특성 ····89
표 2.1.4.12 혼합비율 ····90
표 2.1.4.13 유한요소 모델 입력값 ····93
표 2.1.4.14 콘크리트 DCP 충돌모형실험 case ····97
표 2.1.4.15 DCP 모형시편의 계측 개요 ····99
표 2.1.4.16 각 시편별 발사체의 충돌 속도 ····101
표 2.1.4.17 각 시편별 충돌하중 배면에서의 최대변위 및 잔류변위 ····104
표 2.1.4.18 실내 시험 결과 요약 ····106
표 2.1.4.19 DCP설치 후 부적합 또는 부분적합결과에 대한 자체 원인분석결과 ····106
표 2.1.4.20 ATS 지상자 설치 기준 ····108
표 2.1.4.21 ATS 지상자의 성능 조건표(KRS SG 0059-14(R)) ····108
표 2.1.4.22 ATP 지상자 콘크리트도상 설치기준 검토 결과 ····109
표 2.1.4.23 ATP 지상자의 전기적 성능 ····109
표 2.1.4.24 도플러레이더 설치 검토 결과 ····111
표 2.1.4.25 도플러레이더 제품 상세 ····111
표 2.1.4.26 ATS지상자 시험기의 측정방법 ····112
표 2.1.4.27 공인기관 입회시험 개요 ····114
표 2.1.4.28 공인시험 결과 요약 ····117
표 2.1.4.29 공인시험 결과 분석 ····118
표 2.1.5.1 현장 실대형 실험 측정 ····120
표 2.1.5.2 낙하체 제원 ····121
표 2.1.5.3 실험체 정보 ····121
표 2.1.5.4 실험 결과 요약 ····122
표 2.1.5.5 탈선/충돌 시뮬레이션 조건 ····124
표 2.1.5.6 충돌에너지 3.5 kJ에 대한 시험케이스 ····125

표 2.2.1.1 DCP주요자재의 특성 ····143
표 2.2.1.2 DCP 최대전단력 및 최대휨모멘트 ····144
표 2.2.1.3 DCP 앵커 전단력 및 모멘트(4앵커) ····146

표 2.3.1.1 TCL 길이별 침목 및 Cam Plate 현황 ····156
표 2.3.1.2 일탈방호시설 패널 구성 ····156
표 2.3.1.3 일탈방호시설 결합부 특성 ····157
표 2.3.1.4 TCL길이 현황(호남고속선) ····161
표 2.3.1.5 패널수량 집계 ····161
표 2.3.1.6 3경간/1일 작업시 작업효율(호남선 2단계구간) ····162
표 2.3.1.7 고속철도 일탈방호시설설치대상 교량 개소 및 연장 ····162
표 2.3.1.8 1일 일탈방호시설 시공 예상시간 ····166
표 2.3.3.1 일탈방호시설 상태등급분류 ····180
표 2.3.4.1 일탈방호시설 상태등급별 급속복구 방법 ····182
표 2.3.4.2 일탈방호시설 상태등급별 급속복구 소요시간 ····183
표 2.3.4.3 에폭시모르터 도포공법(0.2mm 미만 균열) ····183
표 2.3.4.4 소손상 급속복구 순서(0.2mm 이상 균열) ····184
표 2.3.4.5 대손상 및 파괴 급속복구(인력) 순서 ····185
표 2.3.4.6 대손상 및 파괴 급속복구(장비) 순서 ····185

표 2.4.1.1 일탈방호시설의 제작 공차 ····190
표 2.4.1.2 혼합수 기준(상수돗물 이외의 물 기준) ····192

표 2.5.1 철도차량 방호시설의 실물충돌시험 업무편람 목차(실대형 탈선/충돌 실험기법) ····195
표 2.5.2 필터 기준의 비교 ····217
표 2.5.3 데이터 후처리에 따른 낙하실험 결과 ····219
표 2.5.4 실대형 탈선/충돌 실험 CASE ····221

표 2.6.1 탈선유도장치 시제품 ····242
표 2.6.2 탈선유도장치 재료 물성치 ····244
표 2.6.3 주강대차 제원 및 구성 ····248
표 2.6.4 주강대차 프레임 특성 ····249
표 2.6.5 콘크리트 침목 Dyna 물성 ····250
표 2.6.6 용접대차 현가장치 제원 ····257
표 2.6.7 차체프레임 회전관성모멘트 ····258

표 2.6.8 시뮬레이션 DCP 차륜 충격력 비교 ····264
표 2.6.9 실대형 충돌 실험 Cases ····274
표 2.6.10 제안 충돌 하중 비교 Cases에 대한 충돌 하중(실험결과) ····275
표 2.6.11 제안 충돌 하중 비교 cases에 대한 충돌 하중(실험결과) ····276
표 2.6.12 자갈층과 충돌한 자유낙하물체의 근입깊이 비교 ····285
표 2.6.13 해석 변수 개요 ····289

표 2.7.1 철도사고 분류체계 (2015, 국토교통부, 철도사고 등의 보고에 관한 지침) ····293
표 2.7.2 2006~2015 국내 철도 탈선사고 현황 ····294
표 2.7.3 열차탈선사고의 위험사건목록 표준코드 (2010, 한국철도공사) ····296
표 2.7.4 철도사고인명피해비용 산정방법 ····299
표 2.7.5 운영손실비용 산정방법 ····299
표 2.7.6 물적피해비용 산정방법 ····300
표 2.7.7 기타비용 산정방법 ····300
표 2.7.8 고장수목분석을 이용한 철도차량 일탈사고의 주요 영향 인자별 발생확률 ····305
표 2.7.9 열차탈선사고 심각도 및 위험도 평가 지표 ····306
표 2.7.10 차량 연결 구조에 따른, 궤도 구간 별 사고 심각도 영향 인자 분류 ····311
표 2.7.11 콘크리트 궤도 유지관리 비용 ····312
표 2.7.12 PSC-Box 거더교의 건설 및 해체 폐기 단가 ····313
표 2.7.13 국내 도심지 인구밀도(2015, 통계청) ····313
표 2.7.14 EU의 철도사고 물적 피해규모 기준과, 철도차량 일탈사고 위험군 분류 기준(안) ····314
표 2.7.15 항목별 피해규모 추산액 산정 기준 ····315
표 2.7.16 관절 대차 연결식 열차 구간의 위험군 분류 ····316
표 2.7.17 혼용 구간 및 일반 연결식 열차 구간의 위험군 분류 ····317
표 2.7.18 향후 운행환경에 따른 전체 궤도의 위험군 분류 ····317
표 2.7.19 국내 철도선로 구간 별 운행 빈도 수 (2018. 한국철도통계 연보 참고) ····318
표 2.7.20 관절 대차 연결식 열차 구간의 철도차량 일탈사고 위험도 등급(안) - 현행 ····319
표 2.7.21 혼용구간 및 일반 연결식 열차 구간의 철도차량 일탈사고 위험도 등급(안) - 현행 ····319
표 2.7.22 국내 전 구간의 철도차량 일탈사고 위험도 등급(안) - 향후 ····319
표 2.7.23 호남고속선의 위험군 분류 ····325

표 2.8.1 설계 단계별 충돌/타고오름 해석 모델의 장/단점 ····329
표 2.8.2 타고오름 탈선 조건 ····333
표 2.8.3 사용자 입력가능 항목 ····334
표 2.8.4 KTX-산천 동력대차 제원 ····338

표 2.8.5 KTX 동력차 현가장치 제원 및 구성 ····339
표 2.8.6 KTX 객차 현가장치 제원 및 구성 ····340
표 2.8.7 궤도 별 부설캔트 조건 ····342
표 2.8.8 곡선반경 별 전복탈선 속도 ····344
표 2.8.9 지역별 탈선 기준 평가방법 ····345
표 2.8.10 이론과 시뮬레이션으로 추정한 탈선계수 ····346
표 2.8.11 이론과 시뮬레이션으로 추정한 윤중감소율 ····347
표 2.8.12 이론과 시뮬레이션으로 추정한 윤중감소율 ····348
표 2.8.13 각 차륜 별 충돌하중 ····352
표 2.8.14 DCP 패널당 에너지 ····353
표 2.8.15 각 차륜 별 충돌하중 ····355
표 2.8.16 각 DCP 별 내부에너지 ····356
표 2.8.17 각 차륜 별 충돌하중 ····358
표 2.8.18 각 DCP 별 내부에너지 ····358
표 2.8.19 각 DCP 별 충돌하중 ····360
표 2.8.20 각 DCP 별 내부에너지 ····361

〈 그 림 목 차 〉

그림 1.1 연구배경 ····· 1
그림 1.2 연구 필요성 ····· 1
그림 1.3 연구단 최종 목적 ····· 2

그림 2.1.1.1 연구개발을 위한 개발 순서도(Flow Chart) ····· 4
그림 2.1.1.2 충분한 방호벽과 주행레일의 거리 확보시 주행레일의 일탈방호 역할
개념도 (기하조건) ····· 5
그림 2.1.1.3 궤간 내 일탈방호시설(DCP)를 설치한 경우 ····· 5
그림 2.1.1.4 DCP의 해외적용조사 ····· 6
그림 2.1.1.5 탈선시뮬레이션 및 DCP 충돌하중 ····· 12
그림 2.1.1.6 침목 사이의 DCP 공간을 통한 제원산정 (호남고속철도 교량구간 KCT-II, 직선구간) ·· 13
그림 2.1.1.7 캠플레이트(Cam plate)의 제원과 위치 ····· 14
그림 2.1.1.8 DCP 설치시 고려할 현장 캠플레이트의 형상 및 배치 ····· 14
그림 2.1.1.9 패널규격별 지점구성 ····· 15
그림 2.1.1.10 DCP, TCL 층, 캠플래이트의 단면 및 전단하중 ····· 17
그림 2.1.1.11 전단에 의한 파괴모드 ····· 17
그림 2.1.1.12 DCP 앵커의 배치 ····· 17
그림 2.1.1.13 해석연구흐름도 ····· 19
그림 2.1.1.14 유한요소해석 모델링 및 충돌하중 ····· 20
그림 2.1.1.15 DCP 콘크리트 모델의 거동 (좌: MAT_72R3, 우: MAT_159) ····· 21
그림 2.1.1.16 DCP 현장시공 흐름도(Flow Chart) 안 ····· 22
그림 2.1.1.17 침목 사이의 DCP 공간과 건축/차량한계 검토 ····· 25
그림 2.1.1.18 DCP, 차륜, 궤도의 인터페이스 검토 (평면도: Top View) ····· 25
그림 2.1.1.19 설계속도 200<V≤350㎞/h (표준도 365) ····· 27
그림 2.1.1.20 경부고속철도 2단계 (대구~부산간) KCT-II 콘크리트궤도 ····· 28
그림 2.1.1.21 호남고속철도 1단계 (오송역~ 광주송정역) (V=350㎞/h) Rheda2000 콘크리트 궤도 ·· 28
그림 2.1.1.22 원주~강릉 철도건설 (V=250㎞/h) Rheda2000 콘크리트 궤도 ····· 29
그림 2.1.1.23 도담~영천 복선철도 (V=250㎞/h) 콘크리트 궤도 (Bi-Block 침목 +KR형 체결장치) ·· 29
그림 2.1.1.24 교량상 시설물과 DCP의 인터페이스 검토(투상도) ····· 30
그림 2.1.1.25 교량상부구조 낙교검토 개념도 ····· 30
그림 2.1.1.26 발리스 설치(토공 및 교량) ····· 34
그림 2.1.1.27 ATS 지상자(속도조사기과 점제어식) ····· 34

그림 2.1.1.28 UM71 궤도회로 ·····35
그림 2.1.1.29 AF-ATC 궤도회로 ·····35
그림 2.1.1.30 전기선로전환기 NS-AM과 MJ81형 ·····35
그림 2.1.1.31 개념설계(안)이후 제시된 기술사양 ·····38
그림 2.1.2.1 하부공간 여유높이(mm) ·····39
그림 2.1.2.2 해석모델의 개요 ·····42
그림 2.1.2.3 콘크리트 DCP 모델링 및 해석조건 ·····44
그림 2.1.2.4 콘크리트 DCP의 충돌하중 위치에 따른 해석결과 ·····45
그림 2.1.2.5 탈선방지레일의 배치 ·····46
그림 2.1.2.6 탈선방지레일에 작용하는 탈선하중 ·····48
그림 2.1.2.7 교량상 콘크리트 궤도구조 평면도 -DCP 설치시 ·····53
그림 2.1.2.8 일탈방호시설(DCP)에 작용하는 탈선하중 ·····53
그림 2.1.2.9 캠 플레이트 완충재 배치형태 ·····55
그림 2.1.2.10 종방향 (TYPE A, B) 및 횡방향 (TYPE D) 완충재 ·····55
그림 2.1.2.11 캠 플레이트 스트럿-타이 모델 ·····57
그림 2.1.3.1 대안개념 3, 4안에 대한 상세 검토내역 ·····62
그림 2.1.3.2 DCP 형상과 내부 철근 ·····63
그림 2.1.3.3 DCP 앵커에 따른 모델링 조건 ·····64
그림 2.1.3.4 DCP설계변경에 따른 모델링 ·····65
그림 2.1.3.5 앵커에 따른 충돌해석 결과 분석 ·····66
그림 2.1.4.1 콘크CP 정적성능검증 시험 변형률.9m 세그먼트 ·····67
그림 2.1.4.2 실내 정적거동 평가 시험용 시험체 제작 과정 ·····68
그림 2.1.4.3 DCP-TCL 구조성능 평가 ·····69
그림 2.1.4.4 DCP 앵커 전단성능 평가 ·····69
그림 2.1.4.5 DCP-TCL 구조성능 평가 시험을 위한 시험 Setup ·····69
그림 2.1.4.6 시험 전경 (a) DCP-TCL 구조성능 평가, (b) DCP 앵커 전단성능 평가 ·····69
그림 2.1.4.7 DCP 정적성능검증 시험 변형률계/변위계 설치 위치도 (a) 구조성능, (b) 전단성능 ···70
그림 2.1.4.8 DCP-TCL 구조성능 하중-변위 그래프 ·····71
그림 2.1.4.9 DCP 앵커 전단성능 평가 하중-변위 그래프 ·····71
그림 2.1.4.10 DCP-TCL 구조성능 평가: 시험체 주요 파괴 형상 ·····71
그림 2.1.4.11 DCP 앵커 전단성능 평가: 시험체 주요 파괴 형상 ·····72
그림 2.1.4.12 DCP-TCL 앵커 설계 ·····72
그림 2.1.4.13 DCP-TCL 결합 실험체의 제원 ·····73
그림 2.1.4.14 DCP-TCL 결합체 구조성능 평가 시험 전경 ·····75
그림 2.1.4.15 DCP 정적성능검증 시험 변형률계/변위계 설치 위치도 (a) 구조성능, (b) 전단성능 ··76

그림 2.1.4.16 하중-변위(DCP 중앙) 관계 ····77
그림 2.1.4.17 앵커의 하중-변형률 관계(H25C-01) ····77
그림 2.1.4.18 대표적 파괴 형상 ····78
그림 2.1.4.19 하중-변위(앵커 연결부 DCP) 관계 ····79
그림 2.1.4.20 앵커의 하중-변형률 관계(H25A-01) ····79
그림 2.1.4.21 대표적 파괴 형상 ····80
그림 2.1.4.22 앵커의 콘크리트 파괴(ACI 2014, KCI 2012) ····80
그림 2.1.4.23 실험에 사용된 믹서 ····84
그림 2.1.4.24 샤르피 충격실험용 시편 크기 ····84
그림 2.1.4.25 압축강도 실험 시편 ····84
그림 2.1.4.26 직접인장강도 실험 시편 ····84
그림 2.1.4.27 샤르피 충격실험용 시편 (28일 양생) ····85
그림 2.1.4.28 압축강도 시험기(a), 인장강도 시험기(b) ····85
그림 2.1.4.29 샤르피 충격시험기와 시편의 위치 ····85
그림 2.1.4.30 LMC의 충격저항성 비교 ····86
그림 2.1.4.31 SFC의 충격저항성 비교 ····86
그림 2.1.4.32 28일 압축강도 실험 결과 ····87
그림 2.1.4.33 휨 인장강도 실험장치 및 실험 ····90
그림 2.1.4.34 압축강도 실험결과 ····91
그림 2.1.4.35 인장강도 실험결과 ····91
그림 2.1.4.36 샤르피 실험에 의한 내충격성 결과 ····91
그림 2.1.4.37 유한요소모델 ····92
그림 2.1.4.38 파괴후 재료 모델 ····92
그림 2.1.4.39 해석결과 ····93
그림 2.1.4.40 파괴 전과 후의 에너지 ····93
그림 2.1.4.41 가스건 실험장치 ····94
그림 2.1.4.42 기존 가스건 시험체 거치대 형상 ····94
그림 2.1.4.43 가스건 챔버 내 시편 거치 ····94
그림 2.1.4.44 제작된 이송장치 및 지그 ····95
그림 2.1.4.45 가스건 충돌실험 절차 ····95
그림 2.1.4.46 가스건 충돌실험 장비 ····96
그림 2.1.4.47 가스건 충돌실험 장비 모식도 ····96
그림 2.1.4.48 시험체 형상에 대한 하중 가력점 개념 ····96
그림 2.1.4.49 충돌모형 시험 case별 시험체 형상 ····97
그림 2.1.4.50 충돌모형 시편 제작모습 ····98

그림 2.1.4.51 충돌모형 시편의 계측 위치 및 충돌 가압판 ····99
그림 2.1.4.52 데이터로거 및 초고속 카메라 측정 ····99
그림 2.1.4.53 DC1 충돌 후 파괴형상 ····100
그림 2.1.4.54 SA1 충돌 후 파괴형상 및 지그 보완 ····100
그림 2.1.4.55 가스건에 의한 DCP 충돌 초고속카메라 ····101
그림 2.1.4.56 충돌 후 발사체 형상과 가압판 ····102
그림 2.1.4.57 본 시험(600psi)에 의한 충돌실험 이후의 균열 형상 ····102
그림 2.1.4.58 DCP 시편의 충돌 배면 중앙의 변위 그래프 ····103
그림 2.1.4.59 DA2 시편 앵커의 변형률 ····104
그림 2.1.4.60 ATS/ATP 지상자 설치를 위한 DCP 구조물간 이격거리 도출(안) ····107
그림 2.1.4.61 ATP 지상자 콘크리트도상 설치기준(단면도) ····109
그림 2.1.4.62 ETCS Subset-036 에 명시된 발리스와 일탈방지시설 간 최소거리 ····110
그림 2.1.4.63 도플러레이더 DRS05 ····110
그림 2.1.4.64 도플러레이더 전방 운행 기준 ····110
그림 2.1.5.1 Drop Weight Tower 및 실험체 ····121
그림 2.1.5.2 시간대별 거동(측면) ····123
그림 2.1.5.3 탈선/충돌 시뮬레이션 조건 ····124
그림 2.1.5.4 패널별 DCP 번호 ····124
그림 2.1.5.5 DCP 패널당 내부에너지 ····125
그림 2.1.5.6 충돌에너지 3.5 kJ에 대한 DCP패널의 건전도(case 5) ····126
그림 2.1.5.7 변형률 측정값 (Drop Test 하중) ····130
그림 2.1.5.8 게이지 취부된 앵커의 DCP패널 설치 전경 ····132
그림 2.1.5.9 열차탈선 시험 전 최종 셋팅 전경 ····132
그림 2.1.5.10 변형률 측정값 (열차탈선 하중) ····134

그림 2.2.1.1 대차하부 공간 검토 ····138
그림 2.2.1.2 탈선시 차륜과 접촉을 고려한 기하학적 검토 ····139
그림 2.2.1.3 LS-DYNA를 이용한 충돌해석 검토 ····139
그림 2.2.1.4 DCP패널 1.950m 외형도 ····140
그림 2.2.1.5 DCP패널 2.280m 외형도 ····140
그림 2.2.1.6 TCL 6m용 DCP패널 배치도 : DCP 1,950m×3EA ····140
그림 2.2.1.7 TCL 7m용 DCP패널 배치도 : DCP 2,280m×3EA ····141
그림 2.2.1.8 TCL 8m용 DCP패널 배치도 : DCP 1.950m×4EA ····141
그림 2.2.1.9 차량탈선시 충돌위치 및 횡력 ····142
그림 2.2.1.10 TCL과 DCP의 대표횡단면도 ····142

그림 2.2.1.11 이동하중에 의한 전단력 및 모멘트도 ·····144
그림 2.2.1.12 타입별 DCP모델링 ·····145
그림 2.2.1.13 DCP앵커부 전단력도 및 반력도 ·····146
그림 2.2.2.1 DCP패널 몰드사진 ·····148
그림 2.2.2.2 DCP패널 제작플로우 차트 ·····150
그림 2.2.2.3 철근가공 및 조립 ·····151
그림 2.2.2.4 철근조립 검측 ·····151
그림 2.2.2.5 콘크리트 타설 및 다짐 ·····152
그림 2.2.2.6 타설면 상부마감 ·····153
그림 2.2.2.7 양생실 투입 및 증기양생 ·····153
그림 2.2.2.8 탈형 및 적치 ·····154
그림 2.2.2.9 상차 및 현장반출 ·····154

그림 2.3.1.1 일탈방호시설 현장시공 흐름도(Flow Chart) ·····155
그림 2.3.1.2 일탈방호시설 설치단면 : 500×140 단면 ·····156
그림 2.3.1.3 설치 전 설치위치 표시(먹줄표시) ·····159
그림 2.3.1.4 설계속도 200<V≤350㎞/h (표준도 365) ·····163
그림 2.3.1.5 경부고속철도 2단계 (대구~부산간) KCT-II 콘크리트궤도 ·····163
그림 2.3.1.6 호남고속철도 1단계 (오송역~ 광주송정역) (V=350㎞/h) Rheda2000 콘크리트 궤도 ···163
그림 2.3.1.7 원주~강릉 철도건설 (V=250㎞/h) Rheda 2000 콘크리트 궤도 ·····164
그림 2.3.1.8 도담~영천 복선철도 (V=250㎞/h) 콘크리트 궤도(Bi-Block 침목 + KR형 체결장치) ·164
그림 2.3.1.9 장비인원 및 장비투입계획 ·····165
그림 2.3.1.10 TCL별 일탈방호시설 단위 시공공정 ·····165
그림 2.3.1.11 일탈방호시설 시공과정(1) ·····166
그림 2.3.1.12 일탈방호시설 시공과정(2) ·····167
그림 2.3.1.13 일탈방호시설 시공과정(3) ·····167
그림 2.3.1.14 일탈방호시설 시공과정(4) ·····168
그림 2.3.1.15 일탈방호시설 시공과정(5) ·····168
그림 2.3.1.16 일탈방호시설 시공과정(6) ·····169
그림 2.3.1.17 일탈방호시설 시공과정(7) ·····169
그림 2.3.1.18 일탈방호시설 시공과정(8) ·····170
그림 2.3.1.19 일탈방호시설 시제품 현장시공(1) ·····170
그림 2.3.1.20 일탈방호시설 시제품 현장시공(2) ·····170
그림 2.3.1.21 일탈방호시설 시제품 현장시공(3) ·····171
그림 2.3.1.22 일탈방호시설 시공 순서도 ·····172

그림 2.3.1.23 장비인원 및 장비투입계획 ····173
그림 2.3.1.24 작업공정표 ····174
그림 2.3.1.25 시공 공정 검증 사진(1) ····175
그림 2.3.1.26 시공 공정 검증 사진(2) ····175
그림 2.3.1.27 시공 공정 검증 사진(3) ····175
그림 2.3.1.28 시공 공정 검증 사진(4) ····176
그림 2.3.1.29 시공 공정 검증 사진(5) ····176
그림 2.3.1.30 시공 공정별 성적서 ····177
그림 2.3.1.31 시공 공정별 성적서 ····178
그림 2.3.4.1 TCL 6m용 DCP패널 배치도 : DCP 1,950m×3EA ····186
그림 2.3.4.2 TCL 7m용 DCP패널 배치도 : DCP 2,280m×3EA ····186
그림 2.3.4.3 TCL 8m용 DCP패널 배치도 : DCP 1.950m×4EA ····186
그림 2.3.4.4 대손상(전면교체시) 시간측정 증빙 ····187
그림 2.3.4.5 소손상(균열보수시) 시간측정 증빙 ····188

그림 2.4.1.1 일탈방호시설(DCP)의 일반도 ····189

그림 2.5.1 철도안전시설 성능시험장 부지 ····196
그림 2.5.2 국내 고속철도 교량상의 열차 탈선 후 기하조건 ····197
그림 2.5.3 시험장 열차 탈선 후 기하조건 ····198
그림 2.5.4 교량상 콘크리트 궤도 부설을 위한 Base Slab 및 방호벽 단면 ····198
그림 2.5.5 시험선로 안전시설 구축 및 선로점검 ····200
그림 2.5.6 실험차량의 대차형식 변경 및 화차단위 확장 ···· 202
그림 2.5.7 실험차량의 중량조건 변경 및 차량연결 효과 고려 ····203
그림 2.5.8 실험차량의 중량측정 ····204
그림 2.5.9 실험차량 후방가속시스템 및 측정 개요도 ····205
그림 2.5.10 견인동력차/실험차량 목표속도 테스트 개념 ····206
그림 2.5.11 견인동력차(모터카) 가속/제동거리 도출 ····206
그림 2.5.12 화차단위 실험차량의 목표속도 구현 실험 ···· 206
그림 2.5.13 탈선유도시스템에 의한 타고오름(Wheel-climbing) 탈선 모사 ···· 208
그림 2.5.14 각·가속도 센서 및 데이터로거 설치 ····209
그림 2.5.15 실험차량 주행속도 측정을 위한 포토센서 속도측정시스템 ····210
그림 2.5.16 고속카메라 설치 ···· 210
그림 2.5.17 영상분석(Tracking)을 위한 타깃마크 ····211
그림 2.5.18 고속카메라 및 데이터로거 동시 트리거 시스템 ····212

그림 2.5.19 각·가속도 데이터 및 영상 데이터 취득 설계 수행 및 구현 ·····215
그림 2.5.20 도로안전시설 실물차량 충돌시험 데이터 처리 체계 ····· 216
그림 2.5.21 충돌하중 산정방법 검증을 위한 자유낙하(Drop test) 실험 ·····218
그림 2.5.22 로드셀과 가속도 데이터 비교 ·····218
그림 2.5.23 로드셀 하중과 가속도 데이터에 의한 하중 비교 ·····219
그림 2.5.24 50 msec 이동평균법과 CFC 필터링 수준 비교 ·····220
그림 2.5.25 CFC 필터링 수준에 따른 데이터의 왜곡 ····· 220
그림 2.5.26 대차 하부의 제동장치 프레임과 레일의 접촉(CASE 1) ·····222
그림 2.5.27 대차 하부의 프레임의 횡방향 일탈 가이드 역할(CASE 2) ·····223
그림 2.5.28 실험대차의 탈선 후 궤광구성품과의 충돌거동 영상(CASE 3) ·····223
그림 2.5.29 가속도와 영상 데이터를 이용한 속도 및 이동거리 비교(CASE 3) ·····224
그림 2.5.30 가속도와 영상 데이터를 이용한 속도 및 이동거리 비교(CASE 4) ····· 225
그림 2.5.31 차륜과 레일의 충돌시점 영상 및 레일의 손상(CASE 4) ·····225
그림 2.5.32 대차일부와 벽체의 충돌시점 영상 및 벽체의 손상(CASE 4) ····· 225
그림 2.5.33 실험차량의 탈선 후 궤적 비교(CASE 3, 4) ····· 226
그림 2.5.34 실험차량과 레일 및 벽체와의 충돌시점에서의 가속도 데이터(CASE 4) ·····226
그림 2.5.35 실험차량의 횡방향 변위(CASE 5) ····· 227
그림 2.5.36 실험차량의 시간대별 거동-Top view(CASE 5) ·····228
그림 2.5.37 내측 차륜과 궤간 내 DCP의 충돌 ·····229
그림 2.5.38 내측 차륜과 궤간 내 DCP의 연속 충돌 ·····229
그림 2.5.39 궤간 내 DCP 종점 이후에도 진행방향 유지 ····· 230
그림 2.5.40 실험차량의 횡방향 변위(CASE 6) ·····230
그림 2.5.41 실험차량의 시간대별 거동-Top view(CASE 6) ·····231
그림 2.5.42 궤간 내 DCP 유무에 따른 충돌거동 비교(CASE 5, 6) ·····232
그림 2.5.43 충돌 후 DCP와 TCL층의 분리(들뜸) 현상 및 앵커부의 콘크리트(CASE 6) ·····233
그림 2.5.44 개선된 DCP 초도시작품의 일탈방호 성능(CASE 7) ·····233
그림 2.5.45 횡방향 가속도에 의해 산정된 횡방향 충돌하중(CASE 8) ·····234
그림 2.5.46 컨테이너화차의 탈선 후 충돌거동 비교(CASE 8, 9) ····· 235
그림 2.5.47 횡방향 가속도에 의해 산정된 횡방향 충돌하중(CASE 9) ·····235
그림 2.5.48 컨테이너화차의 탈선 후 충돌거동 비교(CASE 8, 9, 10) ·····236
그림 2.5.49 DCP 앵커부 전단응력게이지를 통한 최대 전단력 측정 ·····237
그림 2.5.50 횡방향 가속도에 의해 산정된 횡방향 충돌하중(CASE 10) ·····237
그림 2.5.51 DCP 미설치 시 탈선 후 거동(CASE 11) ·····238
그림 2.5.52 실험차량과의 충돌로 인한 방호벽의 파손(CASE 11) ·····238
그림 2.5.53 횡방향 가속도에 의해 산정된 횡방향 충돌하중(CASE 11) ·····239

그림 2.5.54 DCP 미설치시 실험차량의 거동2(CASE 11) ·····239
그림 2.5.55 연결화차의 탈선 후 충돌거동 비교(CASE 10, 11) ·····240

그림 2.6.1 유수역 탈선 시험장 ····· 241
그림 2.6.2 해외 탈선유도장치 특허품 ·····243
그림 2.6.3 탈선유도장치 설계안 ·····244
그림 2.6.4 탈선유도장치 경계조건 ·····245
그림 2.6.5 시뮬레이션 초기조건 ·····245
그림 2.6.6 탈선유도장치 1안 유한요소 해석결과(1) ·····245
그림 2.6.7 탈선유도장치 1안 체결볼트 해석결과 ·····245
그림 2.6.8 탈선유도장치 2안 해석결과 ·····246
그림 2.6.9 탈선유도장치 2안 체결볼트 해석결과 ·····246
그림 2.6.10 Ls-dyna와 RecurDyn 탈선거동 비교 ·····246
그림 2.6.11 시험 후 변형이 일어난 탈선유도장치 ·····247
그림 2.6.12 탈선실험 주강대차 ·····248
그림 2.6.13 3D 형상을 통한 주강대차 프레임 관성모멘트 및 무게중심 추정 ·····248
그림 2.6.14 충돌 침목만 Mat159로 구성한 시험장 모델 ·····250
그림 2.6.15 실험대차 충돌거동 비교 ·····251
그림 2.6.16 정면카메라 거동 비교 ·····252
그림 2.6.17 가속도센서로 측정된 진행방향 (Longitudinal) 속도 비교 ·····252
그림 2.6.18 가속도 센서로 측정한 진행거리 (Longitudinal) 비교 ·····252
그림 2.6.19 두 번째 충돌을 포함한 진행방향 (Longitudinal) 가속도 비교 ·····253
그림 2.6.20 두 번째 충돌을 포함한 횡방향 (Lateral) 가속도 비교 ·····253
그림 2.6.21 두 번째 충돌을 포함한 수직방향(Vertical) 가속도 비교 ·····253
그림 2.6.22 Concrete Sleeper Model 충돌 거동 비교 ·····254
그림 2.6.23 시뮬레이션&시험 파손 침목 비교 ·····254
그림 2.6.24 충돌 후 대차에 설치된 연결기 하중에 의한 볼스터 프레임 모멘트 발생 ·····255
그림 2.6.25 두 번째 충돌을 포함한 진행방향(Longitudinal) 가속도 비교(Mat159 모델) ·····256
그림 2.6.26 두 번째 충돌을 포함한 횡방향(Lateral) 가속도 비교(Mat159 모델) ·····256
그림 2.6.27 두 번째 충돌을 포함한 수직방향(Vertical) 가속도 비교(Mat159 모델) ·····256
그림 2.6.28 상세 용접대차 모델 ·····257
그림 2.6.29 단순화 용접대차 모델 ·····257
그림 2.6.30 탈선 실험용 차체 프레임 ·····258
그림 2.6.31 상세차량모델과 단순화차량모델 비교 ·····259
그림 2.6.32 새로 고안된 탈선유도레일 ·····259

그림 2.6.33 탈선유도레일 공격각 및 가공위치 ····259
그림 2.6.34 DCP 간략 치수 ····260
그림 2.6.35 콘크리트 궤도 모델링 ····260
그림 2.6.36 탈선실험과 시뮬레이션 첫 충돌 위치 비교 ····261
그림 2.6.37 탈선실험과 시뮬레이션 DCP 충돌 위치 비교 ····261
그림 2.6.38 탈선실험과 시뮬레이션 후 궤도 파손위치 비교 ····262
그림 2.6.39 실험차량 타겟마크 위치 ····262
그림 2.6.40 실험과 시뮬레이션 횡방향 변위 비교 (Center Point) ····262
그림 2.6.41 실험과 시뮬레이션 진행방향 변위 비교 ···· 263
그림 2.6.42 실험과 시뮬레이션 횡 방향 충돌가속도 비교 ····263
그림 2.6.43 시뮬레이션 차륜과 DCP 충격력 ····263
그림 2.6.44 필터링 후 차륜과 DCP 충격력 ····263
그림 2.6.45 컨테이너 실험 차량 및 모델 ···· 264
그림 2.6.46 탈선 후 첫 충돌 ····265
그림 2.6.47 침목 파손위치 비교 ····265
그림 2.6.48 DCP 파손위치 비교 ····266
그림 2.6.49 횡 가속도 비교 ····266
그림 2.6.50 열차의 탈선 Cases ····267
그림 2.6.51 속도=200km/h, θ=3° , 직선궤도: (a) 0.001sec; (b) 3sec; (c) 5sec; (d) 7sec ···· 269
그림 2.6.52 속도=200km/h, θ=1° , 직선궤도: (a) 0.001sec; (b) 3sec; (c) 5sec; (d) 7sec ····269
그림 2.6.53 속도=50km/h, θ=3° , 직선궤도: (a) 0.001sec; (b) 3sec; (c) 5sec; (d) 7sec ····271
그림 2.6.54 속도=50km/h, θ=1° , 직선궤도: (a) 0.001sec; (b) 3sec; (c) 5sec; (d) 7sec ····272
그림 2.6.55 속도=200km/h, θ=3° , R=1,000m: (a) 0.001sec; (b) 3sec; (c) 5sec; (d) 7sec ····272
그림 2.6.56 최초 충돌 발생 시점(실험결과): (a) Case 8; (b) Case 9; (c) Case 10. ····275
그림 2.6.57 실험결과와 이론식을 통한 하중 범위의 비교 ····276
그림 2.6.58 DEM 해석 절차 ····279
그림 2.6.59 DEM 해석 시 입자 간 접촉모델 ····279
그림 2.6.60 Random particle packing 절차 ····280
그림 2.6.61 자갈층-차륜 간 충돌해석 절차 ····281
그림 2.6.62 자갈층-중량체 충돌실험 ····282
그림 2.6.63 자갈층-중량체 충돌실험 ····283
그림 2.6.64 0.5m 높이 자유낙하실험-해석결과 비교 ····284
그림 2.6.65 1.0m 높이 자유낙하실험-해석결과 비교 ···· 285
그림 2.6.66 입자 간 마찰계수가 자갈층의 결속력 및 자갈층-자유낙하물체 간 충돌거동에
미치는 영향(낙하높이=0.5m, 자갈과 물체 간 마찰계수=0.6) ···· 286

그림 2.6.67 입자 간 마찰계수가 자갈층-자유낙하물체 충돌 시 마찰에 의한 에너지 소산에
미치는 영향(낙하높이=0.5m, 자갈과 물체 간 마찰계수=0.6) ····· 287
그림 2.6.68 입자-물체 간 마찰계수가 자갈층의 결속력 및 자갈층-자유낙하물체 간 충돌거동에
미치는 영향(낙하높이=0.5m, 자갈과 물체 간 마찰계수=0.6) ····· 288
그림 2.6.69 입자-물체 간 마찰계수가 자갈층-자유낙하물체 충돌 시 마찰에 의한 에너지 소산에
미치는 영향(낙하높이=0.5m, 자갈과 자갈 간 마찰계수=0.5) ····· 288
그림 2.6.70 자갈층-일탈차륜 상호작용해석 모델 개요 ····· 289
그림 2.6.71 자갈층-일탈차륜 상호작용해석 수치모델 ····· 289
그림 2.6.72 자갈층 진입 후 거동특성
(진입 속도=30km/h, 진입 각도=15° , 자갈 간 마찰 계수=0.7) ····· 290
그림 2.6.73 물체 진입 후 변위, 속도, 가속도
(자갈층 깊이=40.0cm, 자갈 밀도=1,680 kg/m3, 30km/hr 속도, 15° 진입) ····· 291
그림 2.6.74 물체 진입 후 수평경로 ····· 291
그림 2.6.75 물체 진입 후 에너지변화
(자갈층 깊이=40.0cm, 자갈 밀도=1,680 kg/m3, 30km/hr 속도, 15° 진입) ····· 291

그림 2.7.1 Breakdown of number of derailments (as share of total) into major categories ····· 297
그림 2.7.2 COCO-2의 사고발생 후 주변영향 발생 흐름 개략도 ····· 301
그림 2.7.3 NCHRP Report 755의 도로-철도 건널목 교통사고 비용 산정 계략도 ····· 301
그림 2.7.4 철도차량 일탈사고의 고장수목도 ····· 302
그림 2.7.5 해외 철도차량 일탈사고의 주요 영향인자 분포 ····· 303
그림 2.7.6 국내 철도차량 일탈사고의 주요 영향인자 분포 ····· 303
그림 2.7.7 철도 탈선사고 표준 사고시나리오 (2011, 철도기술연구원) ····· 306
그림 2.7.8 철도차량 일탈사고의 피해 유형 개요 ····· 307
그림 2.7.9 궤도 시설물에 따른 일탈 사고 사례 비교 ····· 308
그림 2.7.10 궤도 선형에 따른 일탈 사고 사례 비교 ····· 308
그림 2.7.11 주변 환경에 따른 일탈 사고 사례 비교 ····· 309
그림 2.7.12 현재 국내 운영 중인 열차의 연결상태 ····· 310
그림 2.7.13 국내 철도차량 일탈 사고 사례 비교 ····· 310
그림 2.7.14 열차 방호를 위한 Barrier 설계 ····· 320
그림 2.7.15 열차 차체 방호 개념 ····· 321
그림 2.7.16 DCP Type 1. 차륜 레벨에서의 일탈 방호 (레일 내부에 설치) ····· 321
그림 2.7.17 DCP Type 2. 차륜 레벨에서의 일탈 방호 (레일 외부에 설치) ····· 321
그림 2.7.18 DCP Type 3. 대차 레벨에서의 일탈 방호 ····· 322
그림 2.7.19 철도차량 일탈사고 방호대책 개요 ····· 322

그림 2.7.20 호남고속선 전체노선 조감도 ·····324
그림 2.7.21 대상 지역 위성지도 및 측면 사진 (충남 논산시) ·····325
그림 2.7.22 대상 지역 위성지도 및 측면 사진 (전북 정읍시) ·····327
그림 2.7.23 대상 지역 위성지도 및 측면 사진 (전남 장성군) ·····328

그림 2.8.1 선행연구 - 기어박스와 레일 접촉확인 ·····330
그림 2.8.2 선행연구 - 접촉력 비교분석 ·····330
그림 2.8.3 교량 위 콘크리트 궤도 실사 및 도면 ·····331
그림 2.8.4 이론식을 이용한 타고오름 탈선 조건 ·····332
그림 2.8.5 모델 검증을 위한 시뮬레이션 조건(횡력) ·····332
그림 2.8.6 모델 검증용 시뮬레이션 결과 ·····333
그림 2.8.7 타고오름 탈선 ·····333
그림 2.8.8 타고오름 탈선에 대한 이론식과 시뮬레이션 결과 비교 ·····334
그림 2.8.9 단순화 대차 모델 예시 ·····335
그림 2.8.10 선행연구과제 - 탈선열차 구조물 충돌 ·····336
그림 2.8.11 선행연구과제 - 모델 정면 ·····336
그림 2.8.12 선행연구과제 - 탈선열차 구조물 충돌 ·····336
그림 2.8.13 선행연구과제 - 대차 모델링 ·····336
그림 2.8.14 개선 차량 모델의 차륜 모델링 변경 ·····337
그림 2.8.15 개선 모델과 이전 모델의 구름접촉 결과 비교 ·····337
그림 2.8.16 KTX-산천 열차 편성도 ·····338
그림 2.8.17 KTX-산천 관절대차 ·····338
그림 2.8.18 KTX-산천 동력대차 현가장치 구성도 ·····339
그림 2.8.19 고속열차 단순화 모델링 ·····340
그림 2.8.20 고속열차 단순화 모델 ·····341
그림 2.8.21 궤도 및 속도에 따른 최소 곡선반경 ·····342
그림 2.8.22 곡선반경에 따른 완화곡선 및 캔트 조건 ·····343
그림 2.8.23 Simpack 곡선 모델링 조건 ·····343
그림 2.8.24 곡선구간 전복되는 동력차 ·····344
그림 2.8.25 곡선반경에 따른 전복 탈선속도 및 차륜/레일 접촉력 ·····344
그림 2.8.26 곡선반경에 따른 전복 탈선속도 및 차륜/레일 접촉력2 ·····344
그림 2.8.27 충격도 산정 방법 ·····349
그림 2.8.28 시뮬레이션 해석 조건 ·····349
그림 2.8.29 DCP 충돌하중 (좌-50ms 이동평균 전, 우-50ms이동평균 후) ·····350
그림 2.8.30 DCP 내부에너지 ·····350

그림 2.8.31 곡선에서 탈선 시 발생하는 충돌각도 ·····351
그림 2.8.32 곡선 주행 시 횡가속도 추정 공식 참고 그림 ·····351
그림 2.8.33 Case 1,2 궤도조건 ·····352
그림 2.8.34 R3500 곡선 탈선 조건 ·····354
그림 2.8.35 DCP 패널번호 ·····354
그림 2.8.36 12번 DCP 충돌하중 그래프 ·····355
그림 2.8.37 DCP 1~15 패널에 걸리는 내부에너지 비교 ·····356
그림 2.8.38 12번 DCP 충돌하중 그래프 ·····357
그림 2.8.39 DCP 1~15 패널에 걸리는 내부에너지 비교 ·····359
그림 2.8.40 17번 DCP 충돌하중 그래프 ·····359
그림 2.8.41 15번 DCP 충돌하중 그래프 ·····359
그림 2.8.42 DCP 1~20 패널에 걸리는 내부에너지 비교 ·····360

1. 연구개발과제의 개요

가. 배경 및 목적

▪ 열차 탈선 또는 충돌사고는 발생빈도는 낮으나 사고발생시 인적 물적 피해 정도가 높아 이를 최소화하기 위한 대비책 필요

▪ 국내 고속철도 도입 시 탈선방호시설을 교량상에 국한하여 일률적으로 도입(유럽 관행에 따라) 하였으나 방호 개념에 대한 안전성 확보 미흡 방호시설 설치 타당성 및 설치구간 선정을 위한 기준 및 평가기술 개발 필요

▪ 일탈방호시설의 설계지침/방호성능 적정성 평가기법과 철도교량 궤간 내 일탈방호시설을 개발하여 탈선열차에 의한 피해를 최소화함.



그림 1.1 연구배경



그림 1.2 연구 필요성

나. 최종목표

▪ 탈선사고 위험도 등급화 및 궤간 내 일탈방호시설의 소요 방호성능 적정성 평가기법 개발

▪ 철도교량상 탈선된 열차의 주행을 의도된 영역(선로영역) 내로 유도하기 위한 궤간 내 일탈방호시설 개발



그림 1.3 연구단 최종 목적

표 1.1 세부과제별 목표

구분	세부목표
[1세부] 철도교량상 탈선된 열차의 주행을 의도된 영역(선로영역) 내로 유도하기 위한 궤간 내 일탈방호시설 개발	[철도교량 궤간 내 열차 일탈방호시설 개발] ▪기존 철도교량 일탈방호시설 개량기술 개발 ▪설계/시공/유지보수 기술 및 구조성능 평가
[2세부] 궤간내 일탈방호시설의 소요방호성능 적정성 평가기법 및 설계지침 개발	[열차 일탈방호 성능의 적정성 평가기법 및 설계지침 개발] ▪탈선/충돌 실험을 통한 방호 설계지침 개발 ▪시뮬레이션을 통한 방호성능 평가기법 개발 ▪개발기술의 제도개선 및 실용화

2. 연구수행내용 및 성과

2.1 철도교량 궤간 내 열차 일탈방호시설 개발

가. 기존 교량 개량기술 개념설계(안) 및 기술사양

(1) 요구성능 및 목표사양 설정

(가) 핵심 요구성능 선정

▪ 기존철도교량 일탈방호시설의 요구성능을 표 2.1.1.1과 같이 정의하였다. 그림 2.1.1.1의 연구개발 순서도의 제품 요구사항 리스트업 단계에서 도출된 내용으로서 기획단계 및 연구단 기술자문회의, 연구진의 기술검토에서 초안이 도출되고 이를 근거로 대안(Alternatives) 개념을 개발 제시하고 여기에 대한 검토를 수행하여 최종안을 확정하였다.

표 2.1.1.1 기존철도교량 일탈방호시설 개발을 위한 핵심 요구사항

구 분	핵심요구성능
안전성능	◦ 방호성능 - 1차: 고속철도의 열차가 교량 상에서 탈선이후 차량이 일탈하였을 때 차량의 진로를 운행 선로 안에서 거동하도록 제어함. 반대편 교행 선로에 진입되지 않도록 진로를 제어함 - 2차: 방호벽에 충돌하더라도 보기레벨에서 방호벽 밖으로 나가지 않도록 진로를 제어함. - 3차: 방호벽에 충돌이후 차량이 교량에서 낙교하지 않도록 진로를 제어함.
내구성능	◦ 내구성능 - 설계공용기간 중의 일탈방호시설(DCP)의 충돌시 내구성 - 시공 이후 기타 환경하중의 영향에 대한 내구성능
시공성능	◦ 시공성 - 기존 철도교량 일탈방호시설의 급속시공이 가능해야 함. (1일 20m 이상 시공(운행차단시간 4시간 이내))
유지관리	◦ 유지관리성능 - 방호벽 탈선 이후에 기존 철도교량의 일탈방호시설의 급속 유지 보수가 가능
사용성능	◦ 차량, 시설물과 인터페이스 검토필요 - 일탈방호시설(DCP)와 차량과의 인터페이스 - 일탈방호시설(DCP)과 궤도,교량과의 인터페이스 - 일탈방호시설(DCP)과 신호,전기와의 인터페이스

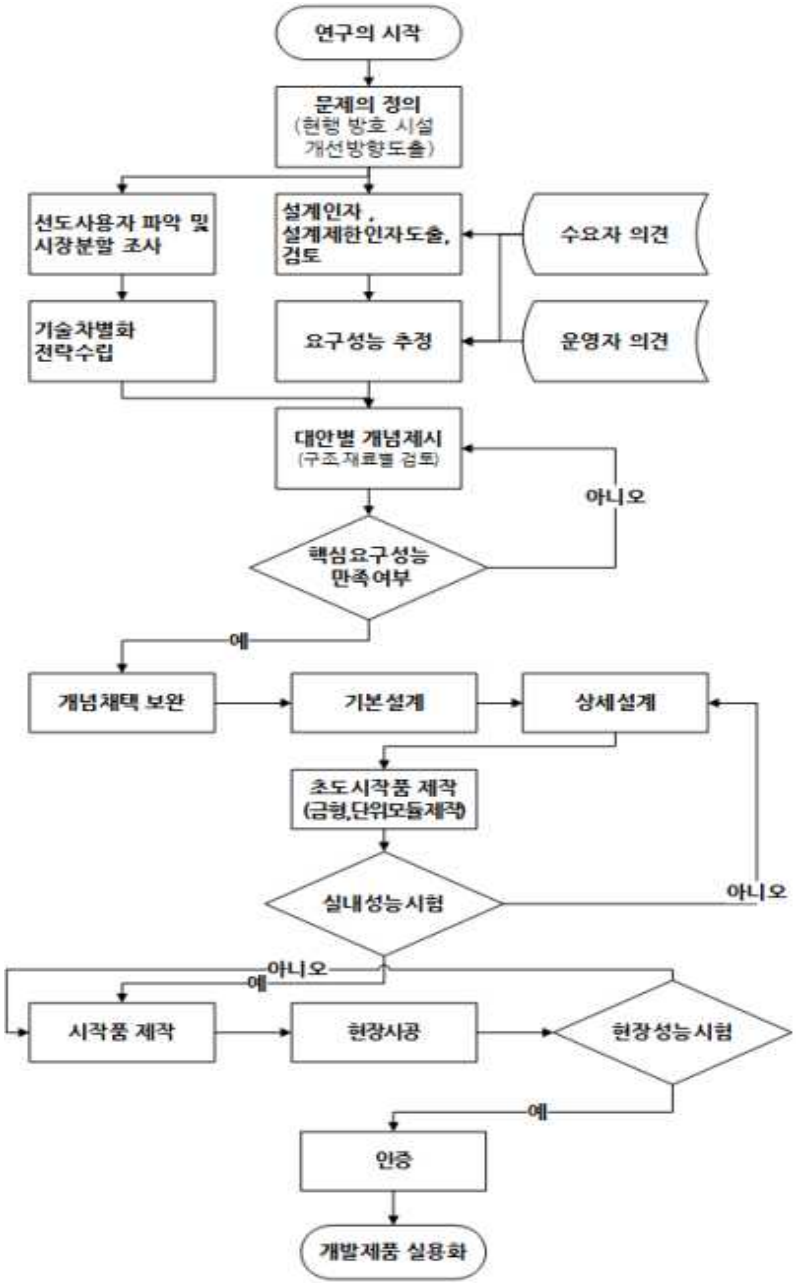


그림 2.1.1.1 연구개발을 위한 개발 순서도(Flow Chart)

(나) 요구성능에 따른 각 대안설정 및 예비평가

▪ 국외의 철도교량에 설치된 방호벽은 주행선로로부터 충분한 거리(궤도중심에서 2.3m이상)가 이격되어 있다. 이 경우는 그림 2.1.1.2와 같이 주행레일 방호시설의 탈선방향 외측 차륜이 벽체에 충돌하기 전, 반대방향 내측 차륜이 주행레일에 의해 가이드 되는 기하조건을 유지하여 1차적으로 레일과의 충돌로 궤도영역 외부로의 일탈방호 역할을 수행함과 동시에 충격이 흡수되며 2차적으로 벽체가 일탈방호 역할을 수행한다.

▪ 현행 철도교량에 설치된 방호벽은 궤도중심에서 2.3m이하로서 벽체의 충돌로 인한

방호성능을 확보가 필요하다. 주행레일이 일탈방호기능을 하지 못하고 차륜이 방호벽에 직접 충돌하기 때문에 이에 대한 보강이 필요하다. 기존 국내 현행 설계하중인 150 kN 이상(최대 1500kN)의 내구성능 확보가 필요하다. 이러한 경우에 방호 벽체의 폭을 증가시키고 하부 바닥판의 추가 구조검토가 필요하다.

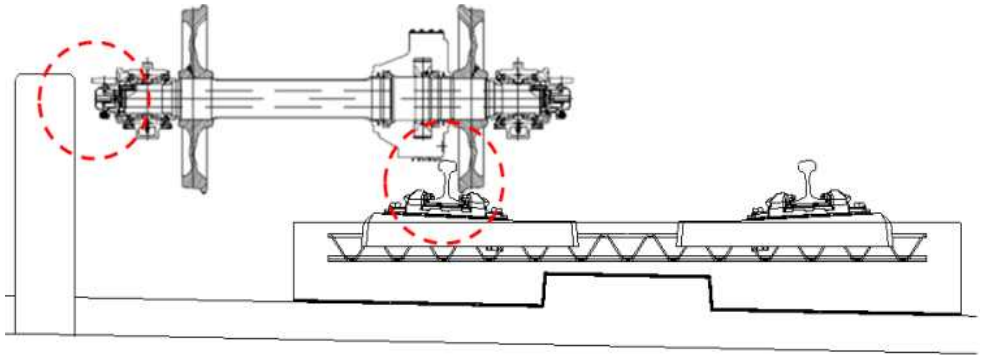


그림 2.1.1.2 충분한 방호벽과 주행레일의 거리 확보시 주행레일의 일탈방호 역할 개념도 (가하중)

▪ 따라서 기존철도 교량에서 일탈방호성능을 확보하기 위해서는 궤간 중앙에 일탈방호성능을 가진 일탈방호시설(Derailment Containment Provision, DCP)을 급속으로 설치하여 탈선열차의 이동거리가 줄여 관성력을 감소시키고 방호벽에 작용하는 충돌하중을 감소시켜야 한다. 콘크리트 벽체(Concrete Plinth)는 궤도 외측에 설치되는 기존 탈선방호벽에 비해 관성력이 작으므로 설계하중을 감소시킬 수 있는데다 주행선로의 좌,우 측으로의 진로제어가 가능하여 탈선열차의 교량 밖으로의 낙하와 반대편 선로의 침입을 최소화 시킬 수 있다. (그림 2.1.1.3 참조)

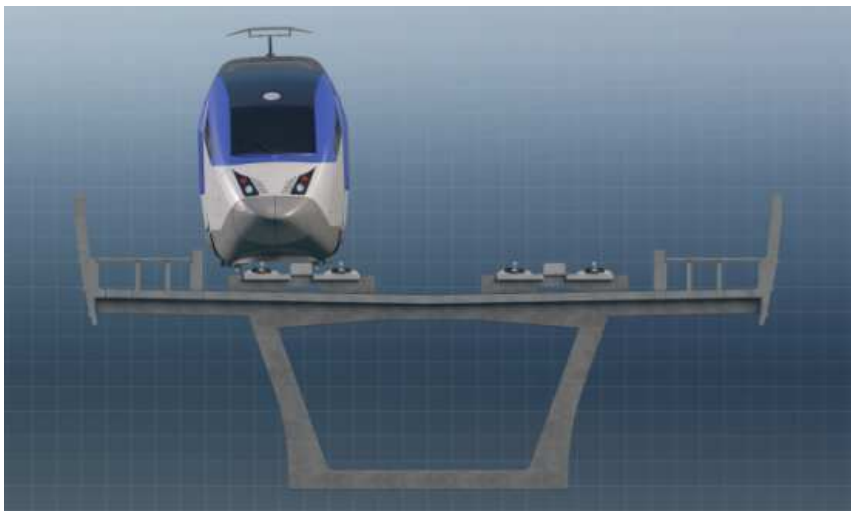


그림 2.1.1.3 궤간 내 일탈방호시설(DCP)를 설치한 경우

▪ 이러한 타입의 DCP는 선로에서 크게 벗어나(lateral movement)는 것을 방지하여 피해를 최소화 할 수 있는 시설물로 해외에서는 그림 2.1.1.4와 같은 사례가 있다.

- DCP Type 1: 주행레일 사이에 설치하며 차륜 높이(wheel level)에서 가이드
- DCP Type 2: 주행레일 외측에 설치하며 차륜 높이(wheel level)에서 가이드
- DCP Type 3: 주행레일 외측에 설치하며 차축 높이(bogie level)에서 가이드



Type 1 (일본) | Type -1침목용 (일본) | Type 1-슬래브궤도용 (일본) | Type 2 or 3 (홍콩)

그림 2.1.1.4 DCP의 해외적용조사

▪ 철도 이외에 교량상 방호시설물에 대하여서도 조사를 포함하여 방호구조에 대한 제원과 형상 및 관련 특허조사들이 이루어졌고 본 연구과제의 기획보고서의 3P 분석결과를 재검토하였다. 분석 결과 철도교량에 적용이 가능한 방호시설의 대안(Alternatives)은 크게 다음 표 2.1.1.2와 같이 분류 제시하였다. 설정된 대안에서 개발 시스템의 기능(function or worth)에 대한 비용(cost)의 적합성 정도를 평가한다.

▪ 1차년도(6개월) 기간 이내의 대안검토 및 개념설계를 수행하기 위해 평가지표(방호성능, 내구성능, 시공성능, 유지관리, 사용성능, 경제성)를 선정하여 이에 대한 비교 행렬평가를 실시한 것이 표 2.1.1.3이다. 종합적인 결과를 검토한 결과 3, 4안이 상대적으로 유리하였고, 본 과제의 개념설계 단계에서는 주로 3안에 대한 검토를 수행하였다.

▪ 검토 가능한 대안(Alternatives)을 선정하기 위해 기존철도교량 일탈방호시설 개발을 위하여 상세한 요구사항과 기술사양을 표 2.1.1.4와 같이 상세하게 제시하였다.

▪ 이에 따라 DCP Type 1의 Concrete Plinth를 대상으로 하였으며, 프리캐스트(Precast Concrete, PC) 구조로 제작하여 앵커를 이용해 기존철도교량 콘크리트 궤도의 중앙궤간 내에 정착하는 형식을 제안하여 이에 대한 검토를 실시하였다.

표 2.1.1.2 검토가 가능한 대안(Alternatives)

구 분	대안개념
양단 방호격벽 설치	· 궤도 TCL 양단부 L형 방호격벽 설치형(RC Precast Prefabricated Type) · 궤도 TCL 양단부 L형 방호격벽 설치형(Shock, Impact Absorbing Material) - Embedding Steel guidance, hock, Impact Absorbing Material,rubber, polyurethane · 궤도 TCL 양단부 Crashing hollowing Box형 - Steel, Metal, Forming Metal, Porus Material 등
궤간내 중앙부 방호격벽 설치	· 궤도 TCL 중앙 돌기형 충돌부설치(RC Precast Prefabricated Type) (LMC, UHPC) · 궤도 TCL 중앙 돌기형 충돌부설치(Shock, Impact Absorbing Material) · 궤도 TCL 중앙 돌기형 충돌부설치 - Steel, Metal, Forming Metal, Porus Material 등
궤간내 중앙부 홈생성	· Grooved TCL Type 등

표 2.1.1.3 각 대안개념에 대한 행렬비교평가표

구 분	1안	2안	3안	4안	5안	6안
	궤도 TCL 양단부 L형 방호격벽 설치형 (RC Type)	궤도 TCL 양단부 L형 방호격벽 설치형 (Steel Frame / Hollow Box)	궤도 TCL 궤간내 중앙 돌기형 충돌부설치 (RC Prefabricated)	궤도 TCL 궤간내 중앙 돌기형 충돌부설치 (Steel Frame / Hollow Box)	궤도 TCL 궤간내 중앙 돌기형 충돌부설치 (RC Prefabricated +Absorbing)	Grooved TCL
						
방호성	◎	◎	○	◎	◎	○
내구성	○	◎	○	◎	◎	△
시공성	○	△	◎	◎	○	○
유지관리성	◎	○	◎	○	○	×
사용성	◎	△	◎	○	○	△
경재성	△	×	◎	△	○	○

표 2.1.1.4 주요 요구사항과 기술사양

<table>
<tr><th>구 분</th><th>관련 요구사항</th></tr>
<tr><td>안전성능</td><td>·방호성능
- 1차: 고속철도의 열차가 교량 상에서 탈선이후 차량이 일탈하였을 때 차량의 진로를 운행 선로 안에서 거동하도록 제어함.
반대편 교행 선로에 진입되지 않도록 진로를 제어함
- 2차: 방호벽에 충돌하더라도 보기레벨에서 방호벽 밖으로 나가지 않도록 진로를 제어함.
- 3차: 방호벽에 충돌이후 차량이 교량에서 낙교하지 않도록 진로를 제어함.
·구조안정성
- DCP를 궤간내 TCL층에 설치한 경우 교량구간 - 탈선에 의한 차륜 DCP 충돌시 교량상판의 낙교검토필요
- DCP를 궤간내 TCL층에 설치한 경우 접속구간 - 탈선에 의한 차륜 DCP 충돌시 TCL층의 슬라이딩 검토
* DCP(Derailment Containment Provision: 일탈방지방호시설) * TCL(Track Concrete Layer: 콘크리트층)</td></tr>
<tr><td>내구성능</td><td>·내구성능
- 설계공용기간 중의 DCP의 충돌시 내구성 : 설계하중(충돌하중)에 의한 성능
- 시공 이후 기타영향에 대한 내구성능 : 장기간 사용시 환경인자(환경하중), 열화내구성능을 포함하는 의미
- 강도(Strength) 측면에서 손상크기(소손상,대손상,완파)를 고려한 설계, 내하성능 계층화 조건을 고려하여 설계</td></tr>
<tr><td>시공성능</td><td>·시공성
- 기존 철도교량 일탈방호시설의 급속시공이 가능해야 함. (1일 20m 이상 시공(운행차단시간 4시간 이내))
- 제작시방서 및 시공절차서 개발, DCP의 앵커삽입시 철근과의 간섭여부 확인</td></tr>
<tr><td>유지관리성능</td><td>·유지관리성능
- 교량상 탈선 이후에 차륜-DCP 충돌시 시설의 급속 유지 보수가 가능 (※ 구조물 파손에 따른 기존궤도의 복구방안 설정)
<table>
<tr><th>구분</th><th>복구성</th><th>비고</th></tr>
<tr><td>무손상</td><td>보수불필요</td><td>-</td></tr>
<tr><td>소손상</td><td>복구가 단기간 가능(복구기간 1주 이내, 보수만으로 복구)</td><td>용인가능</td></tr>
<tr><td>대손상</td><td>장기간의 보수보강이 필요
(복구기간 2주이내 보수, 재사용을 위해 보수보강 실시)</td><td>용인가능</td></tr>
<tr><td>완파</td><td>복구 불가능 하며 궤도철거 및 완전재시공</td><td>용인불가</td></tr>
</table></td></tr>
<tr><td>사용성능</td><td>·차량, 시설물과 인터페이스 검토필요
- 일탈방호시설(DCP)와 차량 궤도,교량, 신호,전기와의 인터페이스</td></tr>
</table>

(1) 개념설계

(가) 개요

▪ 본 연구에서는 기존철도교량의 일탈방호시설 설계를 위해 표 2.1.1.3의 3안과 같이 주행레일 궤간 중앙부에 설치하는 DCP Type 1의 콘크리트 플린스(Concrete Plinth)를 대상으로 하여 개념설계를 수행하였다. 1차년도에 수행되는 개념설계 단계에서는 수행되는 검토설계인자와 2차년도 상세설계 단계에서 표 2.1.1.5와 같이 기본설계를 추가수행하였다.

표 2.1.1.5 1차년도에 수행되는 개념설계(안)과 기본설계 제시내용 비교

검토요소 / 설계단계	구조설계기준	구조재료	충돌하중검토	부재단면	부재구조기능	인터페이스	재료배치(철근예)		부재력/재료상세확정	철근 및 접합부 상세
							철근비	배근		
개념설계 단계 (1차년도)	○	○	○	△	△	△	△			
실시설계 단계 (2차년도)	○	○	○	○	○	○	○		○	○

(나) 설계하중 산정

① 개요

▪ 한국철도시설공단의 「철도설계지침 및 편람-본선부대 및 안전시설」(KRC 02060)에는 교량 관련 부대시설로 상판에 부설해야 하는 시설물 중 하나로 '탈선방호벽'을 지정하고 있다. 이는 교량구간에서 열차가 탈선하였을 때 차량이 전복하거나 교량 하부로 낙하하는 것을 방지하기 위해 설치하는 시설물로 일반철도에서는 가드레일방식, 고속철도에서는 측면구조물방식을 정의한다.

▪ 고속철도의 측면구조물 방식의 탈선 방호벽의 설계는 탈선하중 교축 직각방향의 수평하중 150kN을 적용하여 단면설계를 수행한다. 150kN의 근거는 다음의 Prud'homme 공식에 의한 레일에 작용하는 열차 횡하중에 동적할증계수를 고려하여 산정된 크기이다.

▪ 그러나 이와 같이 산정된 수평하중은 레일에 작용하는 열차 횡하중으로부터

나온 것으로 탈선 후 충돌하중으로 보기는 어렵다. 또한 본 연구에서 제안하는 일탈방호시설은 궤도 영역 밖에 설치되는 기존의 탈선 방호벽과는 달리 궤도 내, 레일 사이에 설치되기 때문에(Plinth type) 위의 하중을 설계하중으로 사용하기에는 무리가 있다.

▪ 개발하고자 하는 Plinth type에 대한 기존 국내 혹은 국외에서의 별도의 기준은 존재하지 않기 때문에 적절한 설계하중의 산정이 필요하다. 설계하중의 산정은 1)기하학적 조건을 고려한 기본 물리법칙, 2) 실험, 3) 수치시뮬레이션을 통해 이루어질 수 있다. 그러나 Plinth type에 대한 충돌 양상 규명이 부족하고 또한 실험적으로 충돌 하중 산출이 이루어진 바가 없다. 이에 따라 본 연구에서는 수치 시뮬레이션을 통해 개념 설계를 위한 설계하중을 산정하고 차후 실내실험 및 체계적인 이론적 검토를 통해 설계하중의 값을 최종적으로 산정(2세부 연구결과)하였다.

② 1차년도 수치 시뮬레이션

㉮ 해석모델 및 기법

- 설계하중 산정을 위해서 유한요소 해석 프로그램 LS-DYNA를 이용한 3차원 Full scale 모델을 통해 탈선열차와 Plinth type DCP와의 충돌 시뮬레이션을 결과를 참 조하였다. 상세한 모델링 제원과 결과에 대한 내용은 2세부 보고서에 수록되었다.

▪ 열차모델링

- 해석을 위한 열차는 고속열차인 KTX를 대상으로 하였다. KTX는 동력차(Power car) 2량, 동력객차(Motorized Trailer) 2량, 객차(Trailer) 16량 등 1편성에 총 20량 으로 이루어져 있으며 두 객차 사이에 관절대차가 위치하고 있다.

▪ 궤도 및 플린스 모델링

- 궤도의 기하조건은 경부고속철도 1, 2단계 및 호남고속철도 조건을 준용하였다. 레 일은 쉘 요소를 사용하여 UIC 60 레일의 두부만 모델링하였다. 궤도슬래브는 Solid 요소를 사용하여 모델링하였으며 DCP 또한 Solid 요소를 사용하였다.

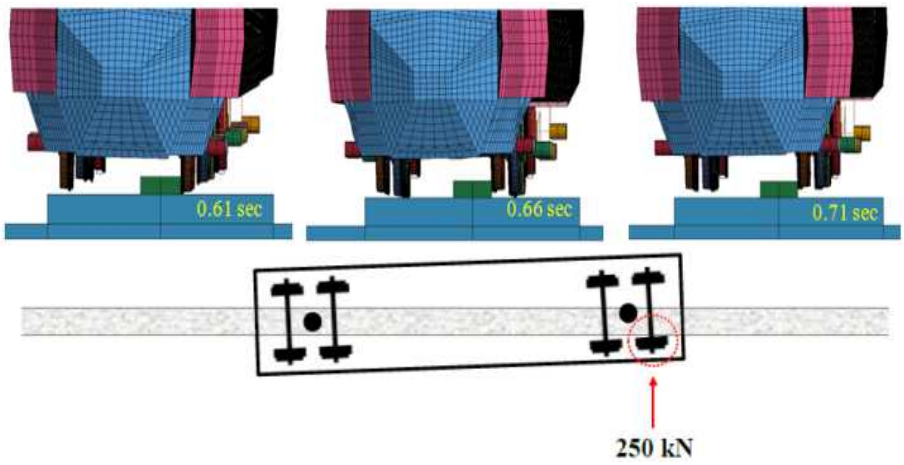


그림 2.1.1.5 탈선시뮬레이션 및 DCP 충돌하중(1차년도 개념설계시)

㉯ 해석결과

▪ 탈선-충돌 해석은 DCP에 차륜 충돌 시 충돌 높이에 따라 조건을 달리하며 수행하였다. 충돌 높이가 높아질수록 충돌하중 또한 커지며 243 kN의 충돌하중이 발생하였다. 구조해석시 탈선에 의해 발생되는 최대 충돌각도는 약 1.6°, 횡방향력은 40~250 kN이 발생 산정되어서, 1차년도 연구 당시에 Plinth type의 DCP의 개념설계를 위한 설계하중은 250 kN으로 결정하였다.

개념설계 단계 이후 2세부과제에서 곡선 주행(R=3500)시 고속열차의 속도별로 탈선시 DCP의 충돌하중과 내부에너지를 각각 비교 분석하고 충돌하중을 제시하였다. 열차의 각 차륜과 DCP의 충돌하중 값을 필터링하고 최대 Eroded 에너지를 고려하여 최종 충돌하중은 165.6 kN으로 제시되었고 이를 설계하중으로 반영하였다.

(다) DCP-Plinth의 제원(단면, 길이) 선정

① 개요

▪ DCP 구조는 충격 하중에 노출된 내민 받침구조는 작용 횡력에 의해 모멘트와 전단력이 조합된 하중조건에 대하여 저항하여야 한다. 그러므로 DCP와 TCL이 만나는 면을 따라 전단에 의한 파괴, 차륜 충돌 부근의 뚫림전단 파괴와 휨인장 파괴가 일어날 수도 있다. 따라서 DCP를 설계할 때는 해당하는 모든 파괴 가능성을 검토하여야 한다. 여기서 a는 전단지간으로서, 집중하중과 받침부 내면사이의 거리이고, d는 브래킷의 유효깊이이다.

표 2.1.1.6 DCP설계시 고려인자

구 분		적용수치	비 고
DCP	재질 및 형상	철근콘크리트(fck=35MPa/SD400)	사각단면
	적용치수	폭 = 400mm, 높이 = 180~200mm	L=VAR
열차	차체중량	68tonf(선두차량)	
	주행속도	300~350km일때	

② 단면제원 선정을 위한 인터페이스 검토

▪ 기존의 철도교량구간 콘크리트 궤도는 그림 2.1.1.7 (a)와 같이 6~8m 길이를 갖는 슬래브 세그먼트가 불연속으로 설치되어 있다.

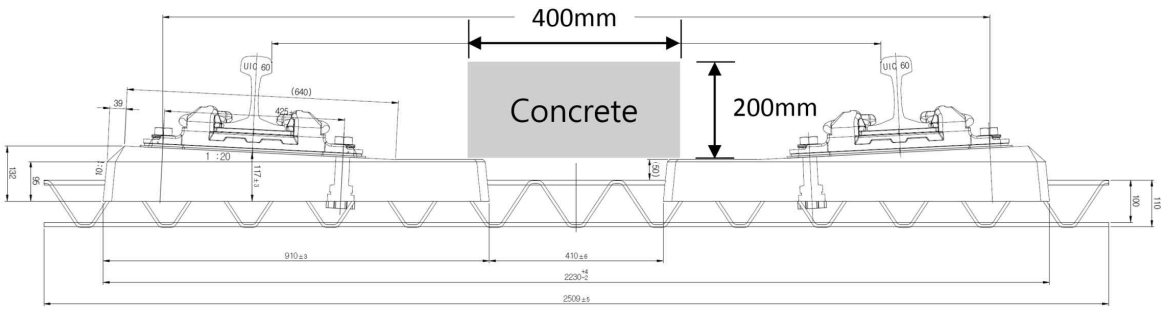
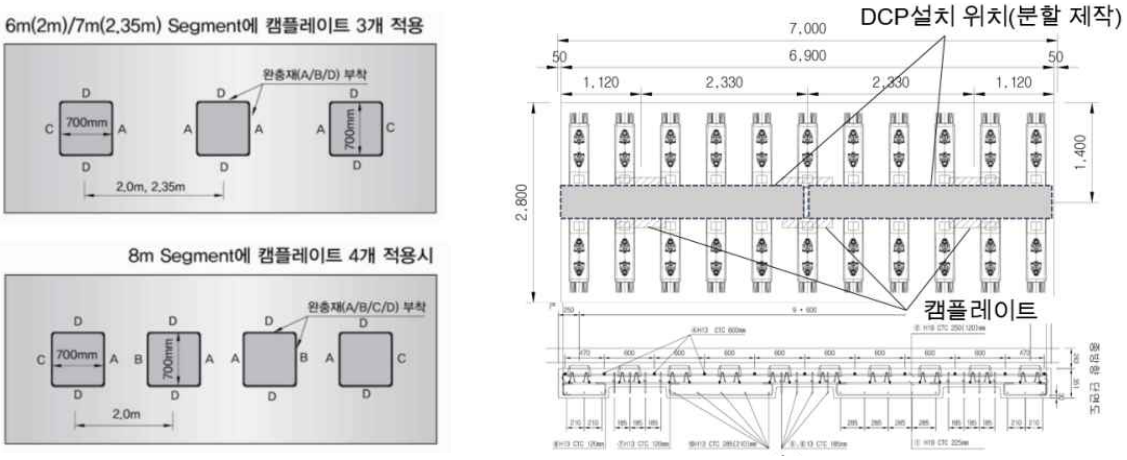


그림 2.1.1.6 침목 사이의 DCP 공간을 통한 제원산정 (호남고속철도 교량구간 KCT-II, 직선구간)

▪ 교량 콘크리트 궤도에서는 교량의 온도 신축에 따른 변위가 궤도에 미치는 영향을 최소화하기 위해, 각 세그먼트의 교량 바닥판과 궤도 슬래브 사이에 3~4개의 캠플레이트(Cam plate)가 일정 간격으로 설치되어 있다. 그러므로 그림 2.1.1.7 (b)와 같이 각 궤도 세그먼트를 대상으로 시공성 및 운반 시의 안전성을 고려하여 2등분으로 분할 제작하였으며, 선 제작되는 DCP의 앵커 묻힘깊이와 TCL 층의 앵커 묻힘깊이는 캠플레이트를 고려하여 결정하였다.



(a) 캠플레이트의 제원 (b) 캠플레이트의 위치와 캠플레이트 위치

그림 2.1.1.7 캠플레이트(Cam plate)의 제원과 위치

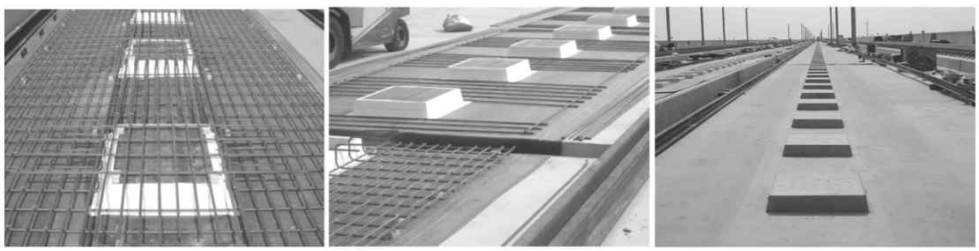


그림 2.1.1.8 DCP 설치시 고려할 현장 캠플레이트의 형상 및 배치

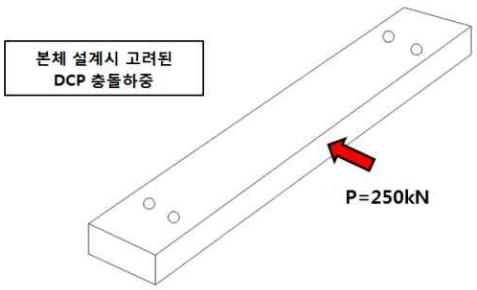
▪ 교량 PCL층 위해 놓여진 TCL층의 길이는 각각 6m, 7m, 8m로 나뉘어져 있다. 이를 고려하여 3.0, 3.5, 4.0 m 등 3종류의 프리캐스트 패널의 제작을 고려하였다. 그리고 각 규격별 전단키의 위치를 조정하여 TCL층과 서로 경합이 되는 것을 배제하였다.

표 2.1.1.7 TCL규격별 DCP구성(안)

구 분		DCP 구성	전단키 갯수
TCL	6.0m	3.0m + 3.0m	4EA + 4EA
	7.0m	3.5m + 3.5m	4EA + 4EA
	8.0m	4.0m + 4.0m	6EA + 6EA

③ 구조검토

▪ DCP 본체의 구조검토는 DCP 충돌하중의 횡방향력을 집중하중 재하로 가정 후 단순보 및 연속보로 고려하였으며, 프리캐스트 패널의 단부와 지점간 중앙부에 충돌하중이 각각 재하되는 CASE를 산정하여 검토하였다. 초기 개념설계 단계시에는 250 kN으로 검토하였다.

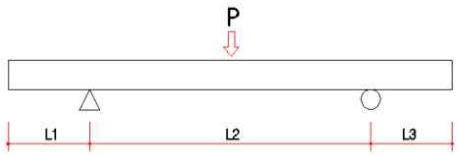
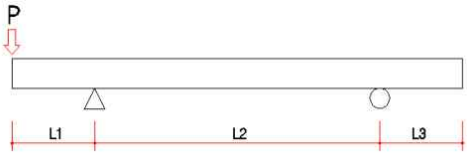
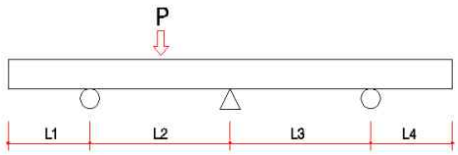
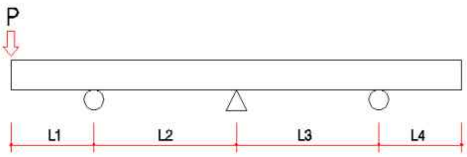


단순보	지점구성(L1+L2+L3)
L=3.0m	0.5m+2.0m+0.5m
L=3.5m	0.6m+2.3m+0.6m

연속보	지점구성(L1+L2+L3+L4)
L=4.0m	0.5m+1.5m+1.5m+0.5m

그림 2.1.1.9 패널규격별 지점구성

표 2.1.1.8 패널형태별 재하위치

중앙부 재하시	단부 재하시
	
	

▪ DCP본체에 대한 단부 및 중앙부에 횡방향 충격하중의 재하결과, 휨모멘트 최대치는 L=3.5m패널의 단부재하시에, 전단력의 최대치는 전 패널에 동일하게 발생하였으며 그 값은 각각 150kN.m와 250kN으로 나타났다.

표 2.1.1.9 DCP패널 규격별 휨모멘트 및 전단력

구분	휨모멘트 (kN.m)			전단력 (kN)		
	단부재하	중앙재하	최대치	단부재하	중앙재하	최대치
L=3.0m	125	125	125	250	250	250
L=3.5m	150	144	150	250	250	250
L=4.0m	125	78	125	250	250	250

▪ 위에서 산출된 휨모멘트와 전단력의 최대치인 150kN.m와 250kN으로 “도로교 설계기준 2012(LSD)” 를 적용하였으며 DCP 단면의 철근배근 한 이후에 단면검토를 실시하였다. 사용된 재료의 물성치는 다음과 같다.

표 2.1.1.10 재료물성치

재료	물성치	적용값
콘크리트	fck	35MPa
	Ec	35,680MPa
철근(SD400)	fy	400MPa
	E	210,000MPa

▪ 프리캐스트 DCP 패널의 구조검토결과는 부록에 수록되어있다.

④ 앵커설계

㉮ 개 요

▪ 프리캐스트 형식으로 제작된 DCP를 콘크리트 궤도에 정착하기 위해서는 후설치앵커의 사용이 요구되며, 각 구조요소간에 인장, 전단 및 인장과 전단의 조합에 의해 구조 하중을 전달하는데 사용되는 콘크리트용 앵커에 관한 설계를 수행하였다.

▪ 후설치앵커 적용 시에는 앵커 자체의 강도와 콘크리트의 저항능력에 대해서도 충분한 사전 검토가 필요하다. 최근 고하중용 후설치앵커는 하중 성능이 뛰어나 앵커파괴(강재, 뽑힘)보다 콘크리트파괴(쪼갬파괴 포함)가 발생할 수 있다. 따라서 콘크리트 균열 또는 파괴를 피하기 위해서는 DCP와 TCL 층의 앵커 설치 위치에서의 콘크리트 두께, 연단거리(앵커 중심에서 콘크리트 가장자리까지 거리), 앵커간격, 앵커 묻힘깊이, 콘크리트 강도에 대해서 사전검토했다.

▪ 프리캐스 DCP 구조물을 TCL 층에 정착하기 위해 후설치앵커는 그림 2.1.1.10과 같이 설치된다. 앵커에 작용하는 전단하중으로 인해 DCP(Part 2)와 TCL 층(Part 1)에 전단이 동시에 작용하므로 각 구조물에 대한 개별 검토가 고려되어야 한다.

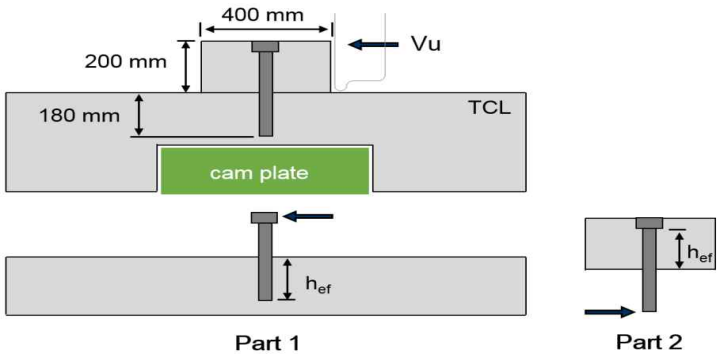
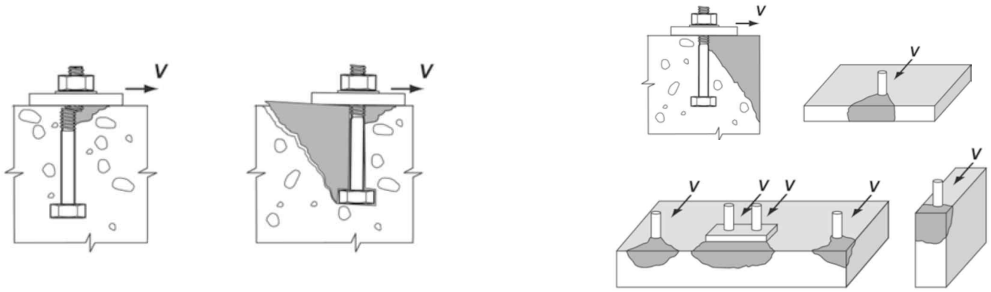


그림 2.1.1.10 DCP, TCL 층, 캠플래이트의 단면 및 전단하중

▪ 그림 2.1.1.11과 같이 DCP와 TCL 층에서 예상되는 파괴 모드는 (1) 앵커 강재의 전단 파괴 (2) 앵커의 뽑힘으로 인한 콘크리트 파괴 (3) 콘크리트의 지압 파괴 (4) 콘크리트의 전단 파괴 등이 있다.



(a) 강재파괴 (b) 콘크리트 프라이아웃 파괴 (c)콘크리트 파괴

그림 2.1.1.11 전단에 의한 파괴모드

▪ DCP 구조물에 작용하는 하중을 앵커를 통해 TCL 층에 전달하기 위해서는 그림 2.1.1.12와 같이 앵커의 설치 간격 및 배치 방식(Case 1~3)에 대한 검토가 필요하다.

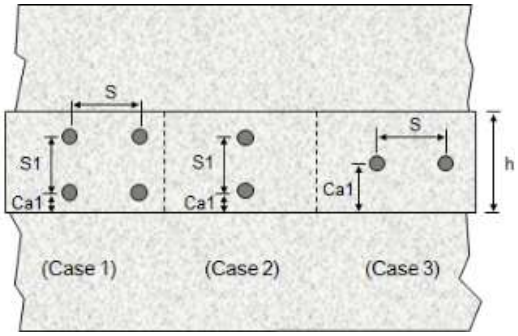


그림 2.1.1.12 DCP 앵커의 배치

▪ 본 장에서는 그림 2.1.1.10의 Part 2와 그림 2.1.1.12의 DCP 앵커의 배치에 대해 검토하였다. 상세한 설계내역은 부록편에 수록되어 있다.

㉯ 요약

▪ 그림 2.1.1.10의 Part 2와 그림 2.1.1.12의 DCP 앵커의 배치의 경우 연단거리 200mm인 후설치앵커는 콘크리트전단 파괴강도와 프라이아웃 강도가 부족하여 구조물 전체의 소요전단강도가 작게 된다. 이는 파괴면 확보를 위한 연단거리가 작고, 강성이 큰 앵커가 작은 묻힘깊이로 설치되어 있기 때문으로 판단되며, 콘크리트 전단파괴를 방지하기 위한 단면증가 및 보조/앵커철근을 사용하면 전단강도를 증가시킬 수 있다. 추후 검토를 통해 2차년도 최종확정하였다.

(라) DCP 예비해석검토

① 개요

▪ 본 연구에서 설계한 DCP에 대한 충돌저항성능을 검토하기 위하여, 호남고속철도 2공구 교량 직선구간에 적용된 Rheda 2000 콘크리트 궤도를 검토하였다. 충돌하중을 받는 콘크리트 구조물의 정밀해석을 위해 유한요소해석프로그램인 LS-Dyna를 이용하였으며, 해석 흐름도는 그림 2.1.1.13과 같다.

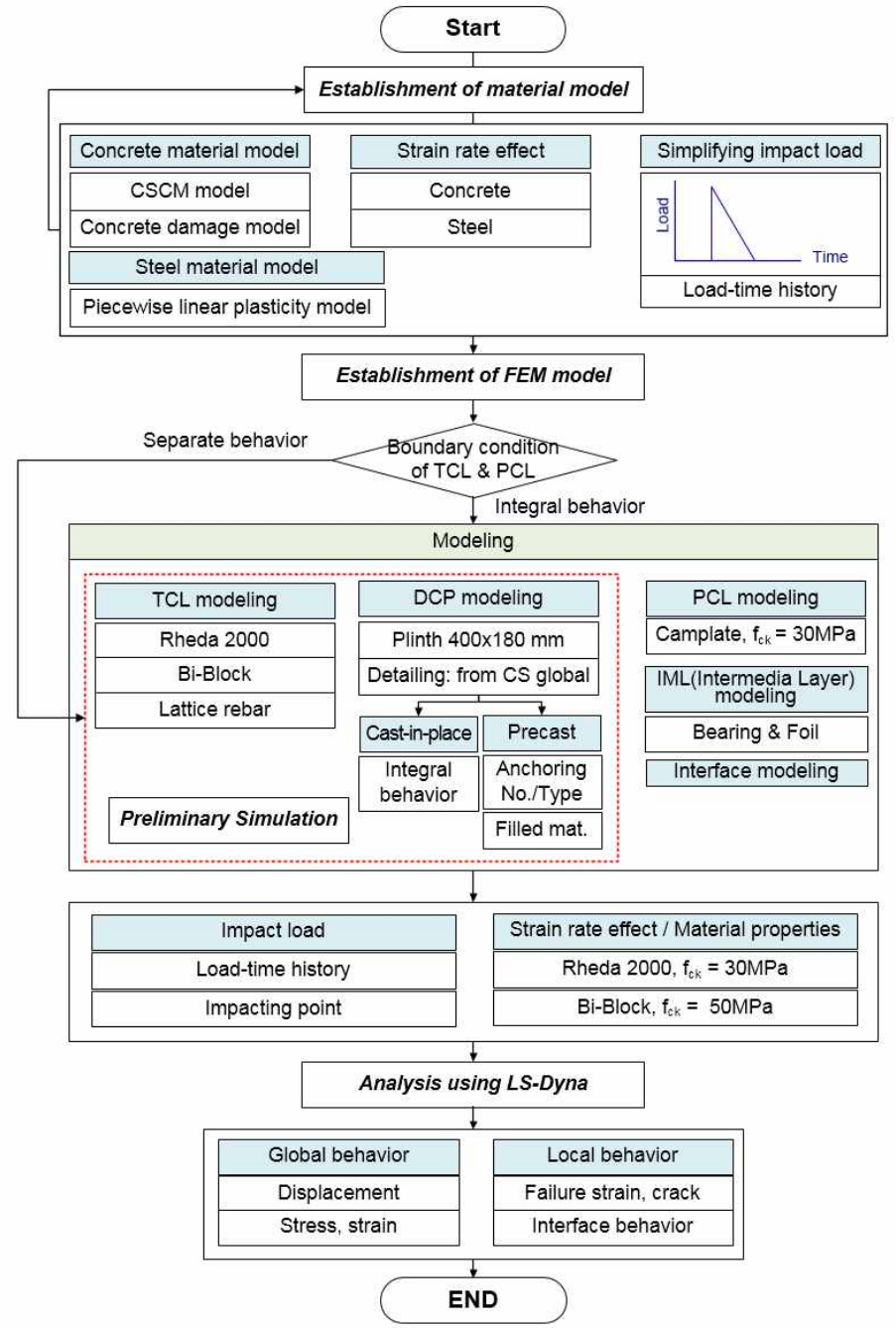
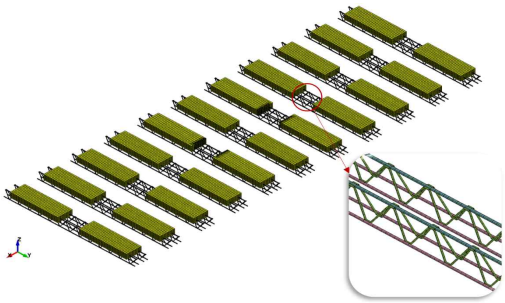


그림 2.1.1.13 해석연구흐름도

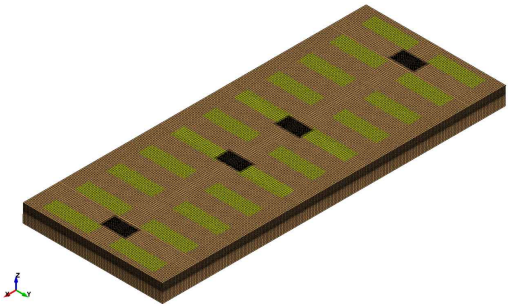
② 유한요소해석 모델의 구성

▪ 모델링을 위한 Bi-block은 직사각 형태로 고려하였으며, 레일 및 레일연결장치는 무시하였다. Bi-block에 사용된 콘크리트의 압축강도는 50MPa, 래티스근은 7mm의 540MPa의 인장강도를 가지는 SWM-P를 사용하였다. 호남고속철도 2공구의 교량에 적용된 TCL층은 7m 직선구간에 대해서 고려하였으며, 3.5m의 DCP 2개가 DCP 중앙에 완전 부착하였다고 가정하였다.

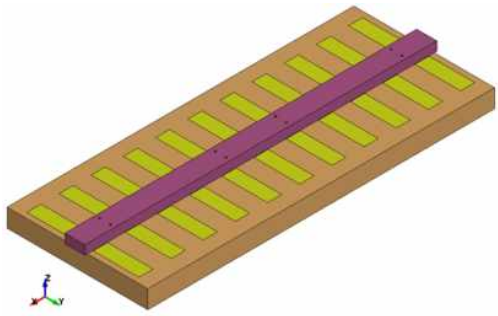
▪ 충돌하중이 가해지는 지점은 TCL층의 정중앙 지점에 하중이 가해진다고 가정하였으며, 접촉면적은 93,183mm2으로 가해지는 충돌하중은 과제 초기단계에 2세부에서 충돌시 사용된 하중(243kN)이 55.1msec동안 가해지는 것으로 가정하였다.



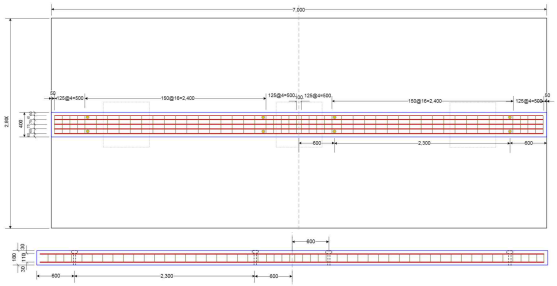
(a) 침목 모델링



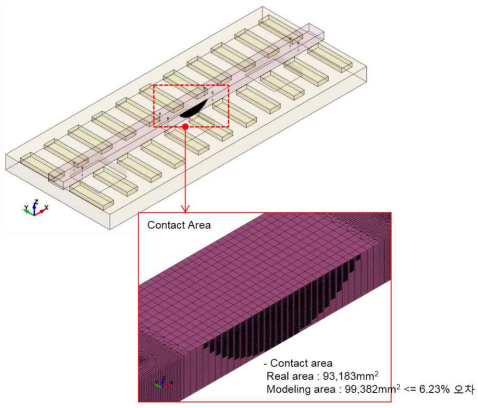
(b) TCL층의 콘크리트 모델



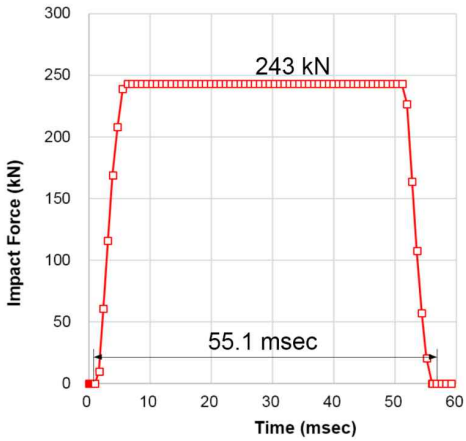
(c) DCP와 TCL이 체결된 콘크리트 모델



(d) DCP의 철근 배근도



(e) 충돌하중 해석시 적용된 면적



(f) 충돌 하중-시간 이력곡선

그림 2.1.1.14 유한요소해석 모델링 및 충돌하중

③ 충돌해석결과

▪ DCP에 가해지는 충돌하중 해석을 수행하였으며, MAT_72R3(Concrete Damage model)과 MAT_159(CSCM model)의 각 콘크리트 모델에 수행한 해석

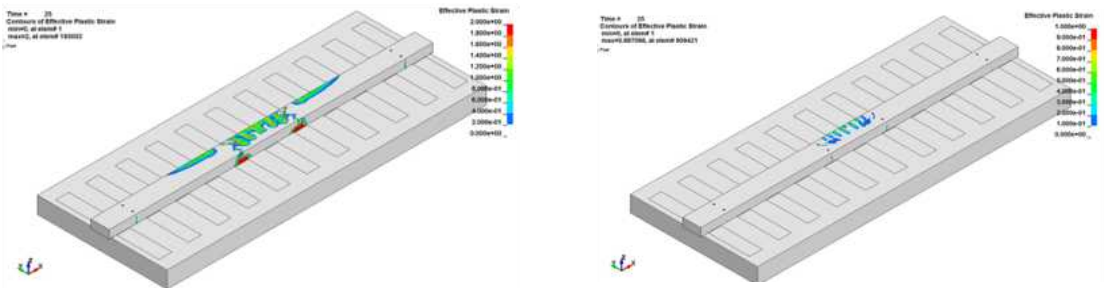
결과를 정리하면 다음과 같다.

▪ MAT_72R3모델의 경우, 충돌하중에 대해 시간 이력에 따른 effective plastic strain에 의하면, 균열이 중앙부와 사인장 균열이 진전되는 것을 확인할 수 있으나, MAT_159는 중앙에 집중적으로 발생함을 확인 가능하였다.

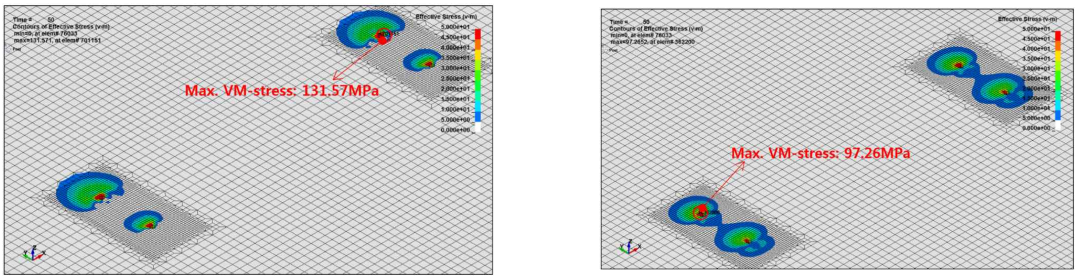
▪ DCP앵커와 연결된 TCL층의 von-Mises응력을 통해 MAT_72R3는 최대 131.57MPa, MAT_159에서는 최대 97.26MPa이 발생하였으며, 충돌하중 후면 앵커에서 집중하중이 발생하며, MAT_72R3모델에서 콘크리트가 앵커에 의해 프라이아웃 파괴가 발생함을 확인하였다.

▪ 앵커볼트에 가해지는 응력-시간곡선에 의하면 두 모델 모두 항복강도에 도달하였으나, 극한응력에 도달하지 않았음을 확인할 수 있었으며, 전반적으로 콘크리트 모델의 경우에는 실제 균열 및 파괴를 잘 모사하며, 보다 보수적으로 판단하기 위하여 MAT_72R3을 적용하는 것이 적절하다고 판단하였다.

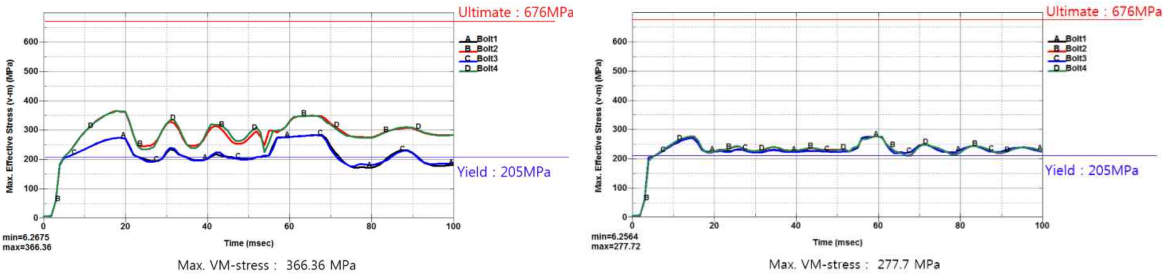
<MAT_72R3> <MAT_159>



(a) Effective plastic strain



(b) 앵커볼트위치의 TCL층의 von-Mises 응력



(c) 앵커볼트의 응력-시간곡선

그림 2.1.1.15 DCP 콘크리트 모델의 거동 (좌: MAT_72R3, 우: MAT_159)

(마) 시공성 및 유지보수 검토

① 시공성 검토

▪ 공장에서 프리캐스트로 제작된 DCP 패널은 현장설치 위치를 고려하여 사전에 1일 시공구간을 선정한 후, 길이별 TCL타입을 확인하여 소요 패널의 수량을 현장인근으로 운반하여 임시 야적하여야 하며, 현장 설치 시 아래와 같은 시공순서에 따라 설치하여야 한다.

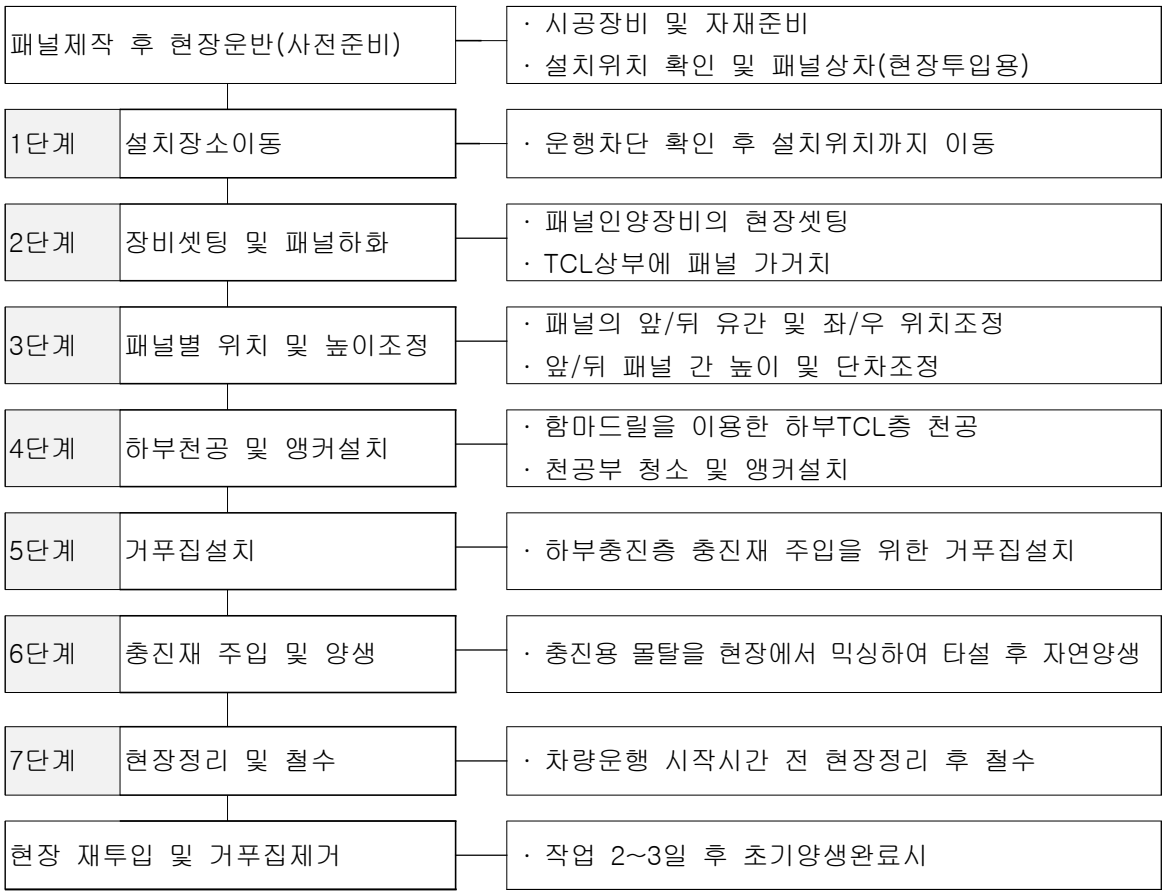


그림 2.1.1.16 DCP 현장시공 흐름도(Flow Chart) 안

② 시공목표 및 작업효율검토

▪ DCP의 시공목표치인 20 m/1일 시공(운행차단시간 4시간 기준)의 가능성 확인을 위해 호남선 2단계구간의 TCL타입 구성치를 기준으로 1회 투입시 TCL 3경간(패널 6본)의 시공을 가정할시 20.8 m/1일의 작업효율이 산출되었다.

표 2.1.1.11 3경간/1일 작업시 작업효율(호남선 2단계구간)

TCL 타입	1일 설치량	적용비율	전구간 대비 환산치
6.0m	18.0m	31.9%	18.0×31.9/100=5.7m
7.0m	21.0m	51.7%	21.0×51.7/100=10.9m
8.0m	24.0m	17.4%	24.0×17.4/100=4.2m
합계		100%	20.8m/1일

③ 유지보수

▪ 열차탈선에 의해 DCP에 충돌시 손상정도에 따라 유지보수방법을 구분하여 복구를 하게 된다. 아래의 표는 DCP의 파괴 정도에 따른 손상단계구분표로서 열차운행 재개전 복구계획수립을 위한 지표로 활용된다.

표 2.1.1.12 DCP 손상정도에 따른 구분표

손상단계	손 상 정 도			비고
	콘크리트 파괴정도	철근노출여부	전단앵커 파괴여부	
무손상	×	×	×	
소손상	콘크리트균열 박리박락	×	×	
대손상	콘크리트 부분 탈락	○	×	
완파	콘크리트파괴 (영구변형발생)	○	강재전단파괴 또는 Con'c 프라이아웃	

▪ 위와 같이 철근콘크리트 구조물인 DCP의 파괴는 손상정도에 따라 구조물 유지보수를 위한 공법을 선정하여야 하며, 각 단계별 손상복구 방법도 정의해야 한다.

④ 손상단계별 유지보수시간

▪ DCP의 단순균열 또는 박리박락은 소규모의 장비와 2~3인의 인력으로 단시간에 보수가 가능하나, 콘크리트 탈락 이상의 대손상에 의한 파괴는 거푸집설치 및 해체 등의 작업으로 인하여 장기간 보수시간이 소요된다.

▪ 열차의 운행을 고려할때 DCP충돌 발생 후 응급처치로 궤도의 복구와 충돌잔여물 및 차량건축 한계내에 존재하는 콘크리트 잔여물의 제거가 이루어질시, 열차의 즉각 운행재개 및 야간 운행차단시간을 이용한 DCP의 응급복구가 가능하

다.

표 2.1.1.13 DCP 손상정도에 따른 유지보수시간

구 분	복구방법	복구소요시간	작업효율	비고
무손상	보수불필요	×		
소손상	표면처리 및 균열보수	1시간/개소	작업팀 다수 투입시 40m/1일 가능	
대손상	단면복구공법	2~3시간/개소	〃	거푸집해체 고려 2일이상 작업
완파	DCP패널 철거 및 재설치	3~4시간/1본	1개소당 패널 1개복구	〃

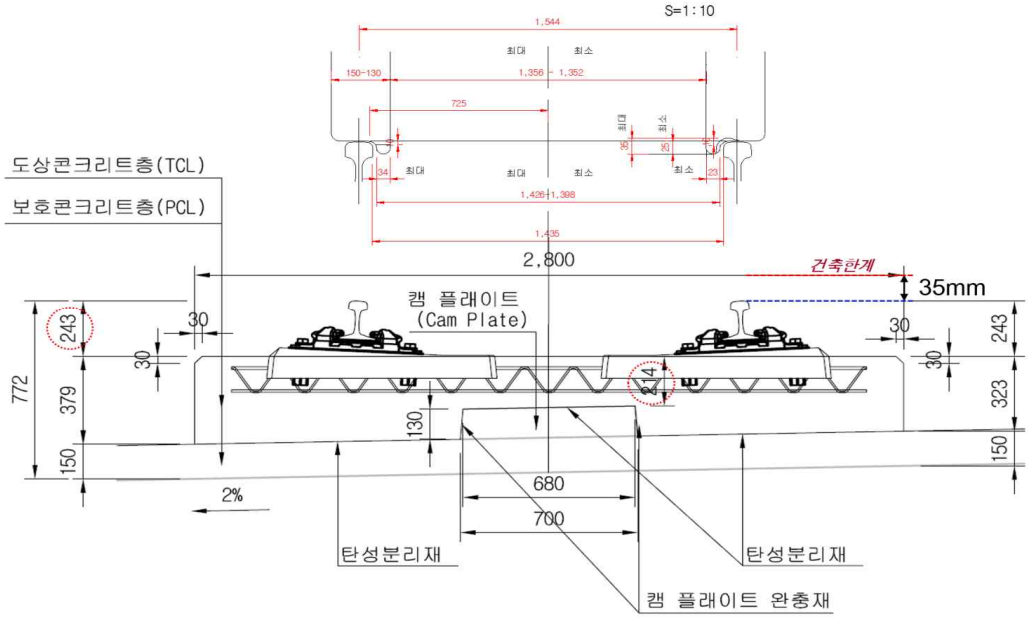
(3) 인터페이스 검토

(가) DCP와 궤도, 차륜과의 인터페이스 검토

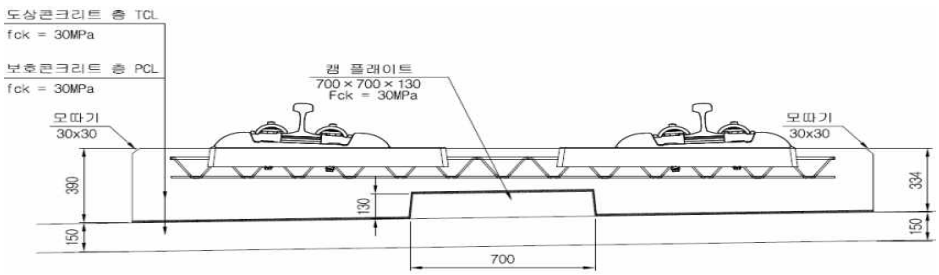
① 궤간 내 공간검토를 통한 DCP 단면산정

▪ 철도의 건설기준에 관한 규정(제13조) 건축한계 레일부(수직 및 수평방향) 및 차량한계 레일부(수직방향) 검토결과 고속선의 KCT-II와 Rheda 2000 궤도는 건축한계와 TCL 상면과의 여유 공간을 충분히 확보하고 있는 것으로 검토되었다.

▪ 추가로, 차륜(wheel set)과 교량,궤도와 DCP의 CAD도면을 실제 scale로 3D화하여 상호 구조물 사이의 간섭을 검토하였다. 그림 2.1.1.18의 DCP, 차륜, 궤도의 인터페이스 검토를 하였다. 차량운행시 교량상의 궤도, DCP 구조체 간의 상호간섭 및 구조적인 적성성 여부를 검토하였다.



(a) KCT-II



(b) Rheda 2000

그림 2.1.1.17 침목 사이의 DCP 공간과 건축/차량한계 검토

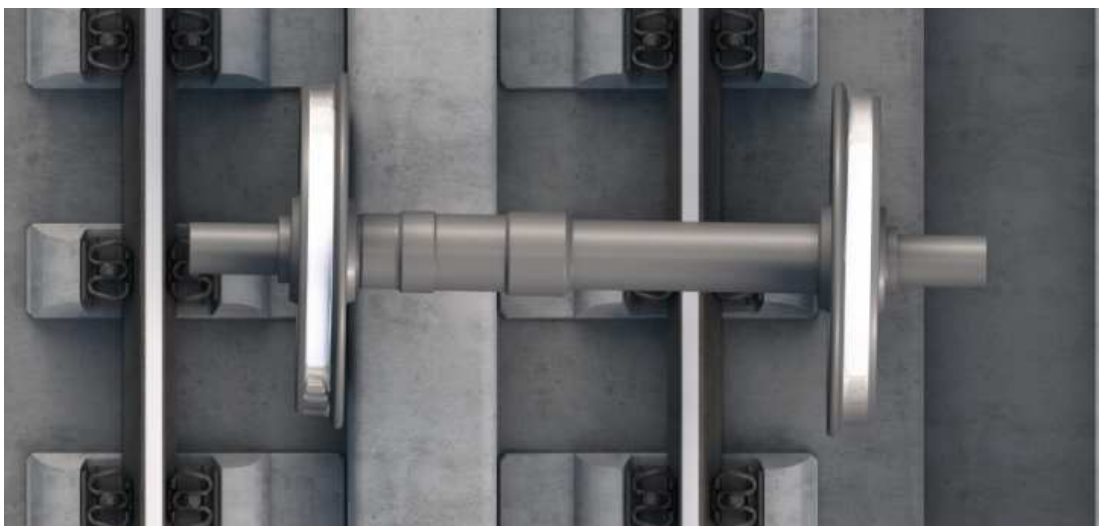


그림 2.1.1.18 DCP, 차륜, 궤도의 인터페이스 검토 (평면도: Top View)

② 고속철도 교량상 콘크리트도상(TCL) 길이 현황

▪ 현행 고속철도 교량상의 콘크리트도상(TCL)은 각각 6m, 7m, 8m의 길이로 서로 분리되어 시공되어있다. 개념 설계에서 설치할 때 조립시공 및 이동을 고려하여 3.0, 3.5, 4.0 m 등 3종류의 프리캐스트 패널의 제작을 고려하였다. DCP의 전체 수량을 집계하였다. 호남고속선 오송고가~송리교 구간 콘크리트도상(TCL)의 패널별 길이, 수량을 집계한 것이 표 2.1.1.14이다. 분리된 TCL의 길이는 7m이며 약 52%를 차지하고 있으며 6m (31%), 8m(17%) 순으로 나타났다.

표 2.1.1.14 TCL길이 현황(호남고속선)

길이	8m	7m	6m	합계
수량	449	1335	797	2581
비율(%)	17%	52%	31%	100%

표 2.1.1.15 패널수량 집계

구분	TCL(8m)	TCL(7m)	TCL(6m)	합계(%)
3.0m 패널	-	-	1594	31.9%
3.5m 패널	-	2670	-	51.7%
4.0m 패널	898	-	-	17.4%
합계	5162 (100%)			

(나) DCP와 교량 인터페이스 검토

① 설치대상 교량현황

▪ DCP가 설치대상 교량개소와 연장은 조사하였다. 고속철도 교량구간을 경부 1단계, 경부 2단계, 호남고속의 교량구간을 직선, 곡선반경($R \leq 5000$), 곡선반경($7000 \leq R \leq 15000$)별로 나누어 총 구간 수와 연장길이를 표 2.1.1.16에 나타내었다. 설치 대상개소는 총 184개소이며 콘크리트 궤도 설치구간은 96개소이다. 이 중 직선구간과 직선에 근접한 곡선반경($7000 \leq R \leq 15000$)구간의 총 개소 수는 96%에 이른다. 총연장은 151.3km이나 콘크리트 궤도 설치는 66.1km에 이른다. 직선구간과 직선에 근접한 곡선반경($7000 \leq R \leq 15000$)의 구간연장은 95%에 이르는 것으로 나타났다.

표 2.1.1.16 고속철도 DCP설치대상 교량 개소 및 연장

구 분	총 구간 수			구분	총 연장(m)			구분
교량유형	경부 1단계	경부 2단계	호남 고속		경부 1단계	경부 2단계	호남 고속	
직선	56	31	24	111 (60%)	43,640	14,505	17,320	75,465 (50%)
곡선 ($7000 \leq R \leq 15000$)	29	22	16	67 (36%)	39,855	7,641	21,340	68,836 (45%)
곡선 ($R \leq 5000$)	3	1	2	6 (3%)	1,695	1,283	4,000	6,978 (5%)
소계	88	54	42	184	85,190	23,429	42,660	151,279

② 기존 고속선 교량상 궤도시스템 설치 도면검토

▪ 기존 고속철도 노선에서의 교량상 궤도와 방호벽 설치현황을 각 도면을 통해 조사 비교하였다.

㉮ 콘크리트 도상 표준도

▪ 한국철도시설공단에서 제시한 설계속도 200<V≤350km/h (콘크리트도상 표준도 365)의 도면은 그림 2.1.1.19와 같다.

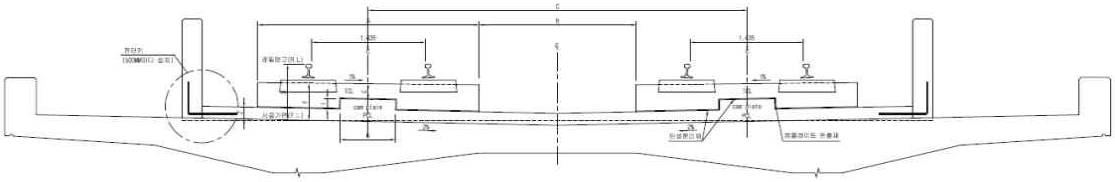


그림 2.1.1.19 설계속도 200<V≤350km/h (표준도 365)

㉯ 경부고속철도 2단계(대구～부산간)

▪ 2010년 11월 1일에 운행개시된 경부고속철도 2단계 콘크리트궤도의 설계도면은 그림 2.1.1.20과 같으며 방호벽까지는 궤간 중심선에서 2.0m 이격되어 있다.

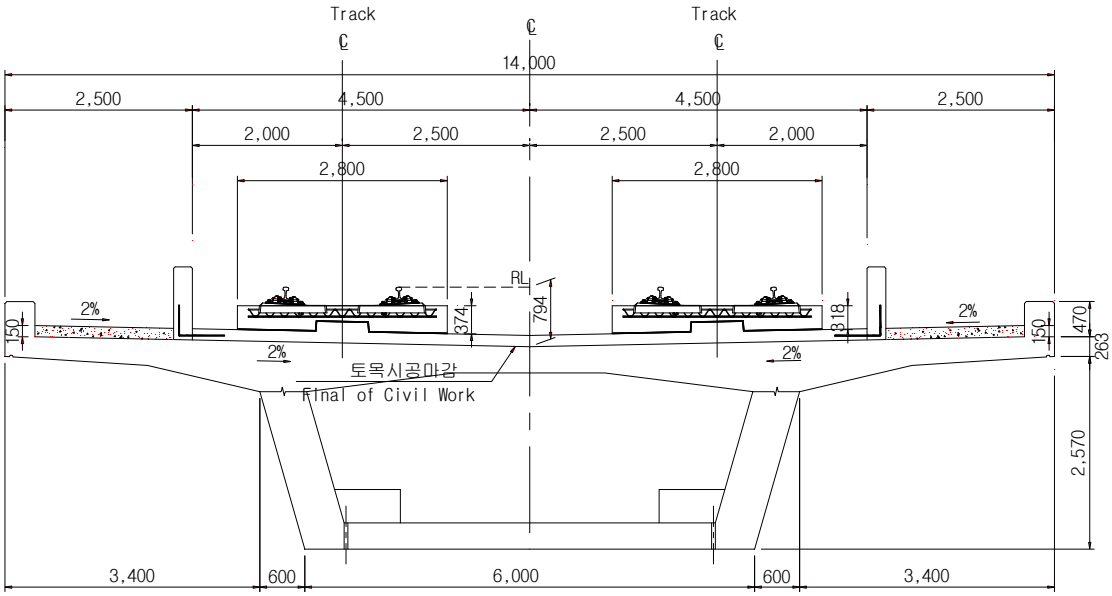


그림 2.1.1.20 경부고속철도 2단계 (대구~부산간) KCT-II 콘크리트궤도

㉰ 호남고속철도 1단계 (오송역~광주송정역) (V=350km/h)

▪ 호남고속철도 1단계 (오송역~광주송정역) Rheda 2000 콘크리트궤도의 도면은 그림 2.1.1.21과 같으며, 선로중심간격은 4,300mm(4800mm)이며 2015년 4월에 개통되었다.

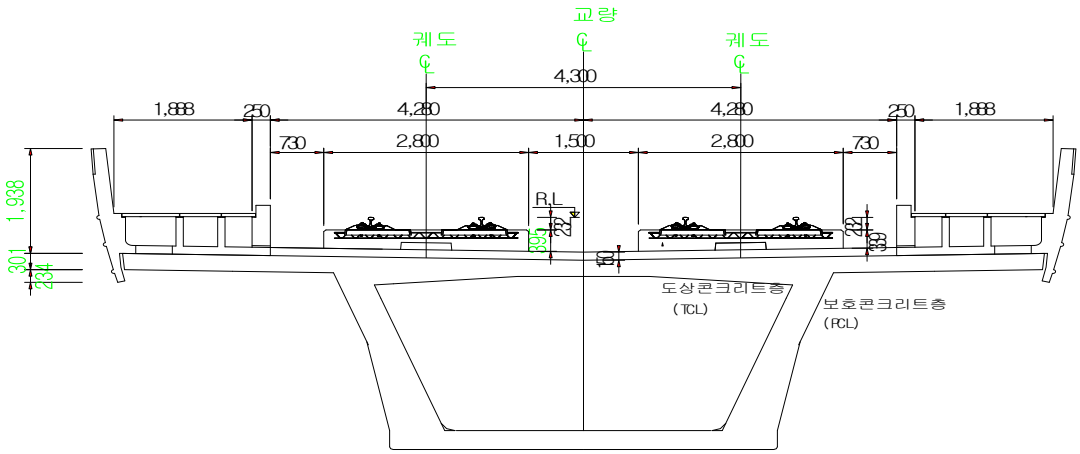


그림 2.1.1.21 호남고속철도 1단계 (오송역~ 광주송정역) (V=350km/h) Rheda2000 콘크리트 궤도

㉱ 원주~강릉 철도건설 (V=250km/h) Rheda2000 콘크리트 궤도

▪ 2014년 3월 31일부터 궤도 실시설계준공을 완료하여 2017년 12월 개통 및 영업개시 예정인 원주~강릉 철도건설 (V=250km/h) Rheda2000 콘크리트 궤도의 설계도면은 그림 2.1.1.22와 같다. 궤도형식은 설계속도 200km/h이상 콘크리트 궤

도이며 Rheda2000(Bi-Block침목 + system300) 및 (Bi-Block 침목+KR체결장치)의 구조 형식이다.

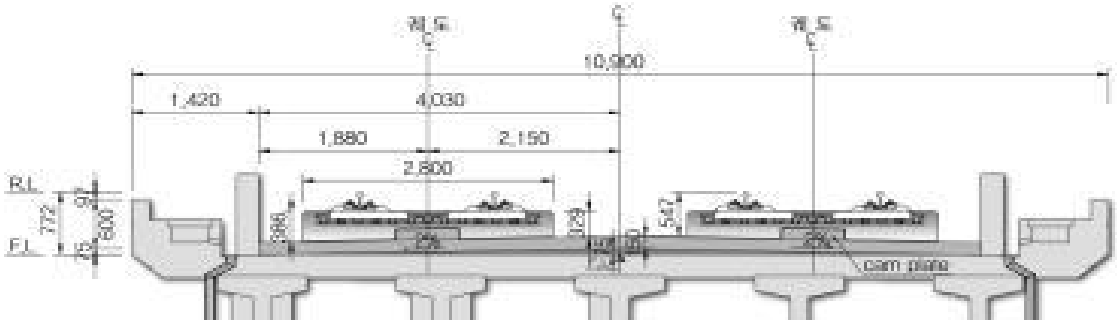


그림 2.1.1.22 원주~강릉 철도건설 (V=250km/h) Rheda2000 콘크리트 궤도

㈐ 도담~영천 복선철도 (V=250km/h)

▪ 2017년 11월 30일 실시설계준공 예정인 도담~영천 복선철도의 콘크리트궤도의 설계도면은 그림 2.1.1.23과 같으며, 설계속도는 250Km/h 이며, 교량구간 궤도형식은 자갈궤도 및 콘크리트 궤도 (Bi-Block 침목 + KR형 체결장치)이나 교량 탈선방호벽 미설치하는 것으로 계획 중으로 조사되었다.

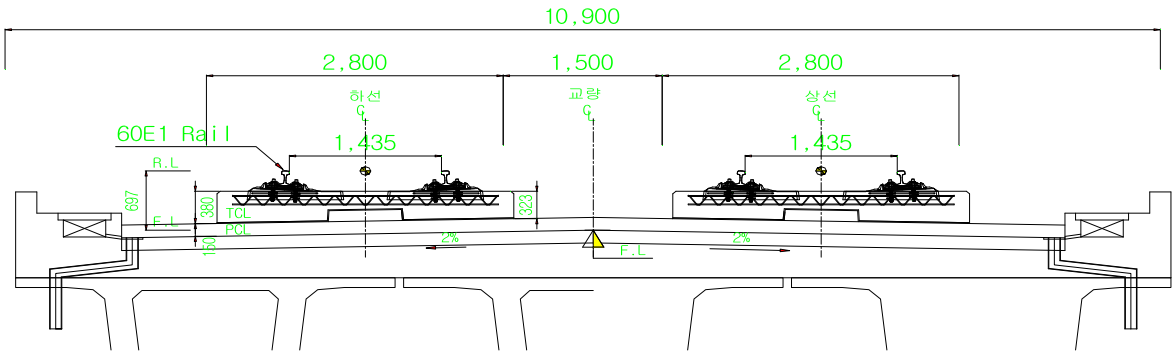


그림 2.1.1.23 도담~영천 복선철도 (V=250km/h) 콘크리트 궤도 (Bi-Block 침목 +KR형 체결장치)

㈑ 구조물 간의 3D 인터페이스 검토

▪ 차체(car-body), 차륜(wheel set)과 교량 방호벽, 궤도와 DCP의 CAD도면을 실제 scale로 3D화하여 상호 구조물 사이의 간섭을 검토하였다. 그림 2.1.1.24는 교량상 시설물과 DCP의 인터페이스 검토를 한 투상도이다.

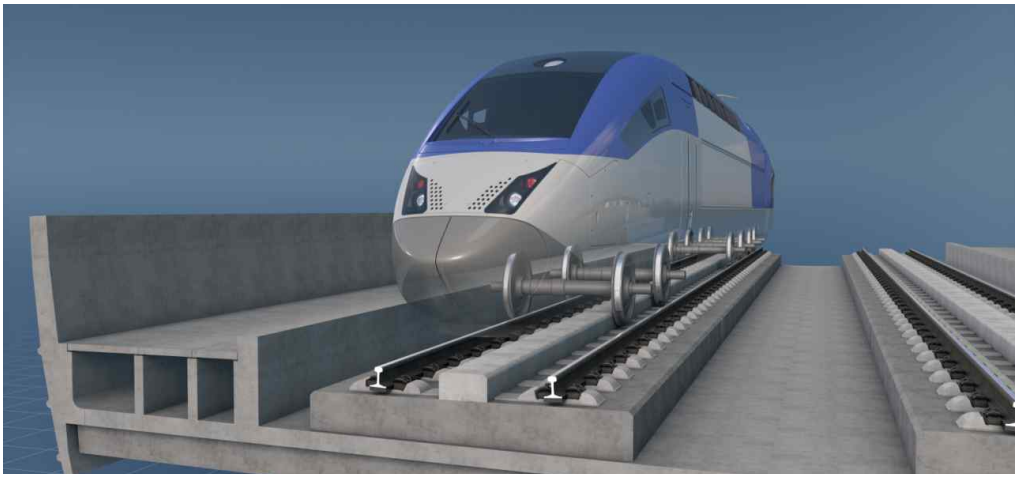


그림 2.1.1.24 교량상 시설물과 DCP의 인터페이스 검토(투상도)

③ 기존 고속선 교량상 DCP 충돌시 교량상부구조 낙교검토

▪ 열차가 탈선하여 DCP에 충돌하는 경우 충돌하중은 앵커를 통해 TCL층으로 전달이 이루어진다. 이 때 TCL층이 PCL층의 캠플레이트로 하중을 전달하게 되며 이는 교량상부구조 전체에 선로의 횡방향으로 하중이 전달된다. 따라서 교량상판의 낙교 또는 전도에 대해서 검토할 필요가 있다. 1차년도는 개념 설계단계로서 기초적인 가정과 도해도를 통한 예비 검토를 실시하였다.

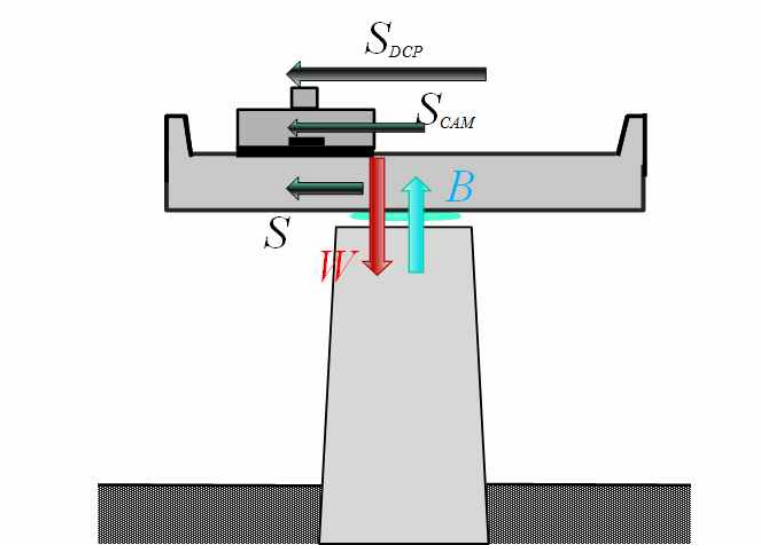


그림 2.1.1.25 교량상부구조 낙교검토 개념도

▪ DCP에 차량이 탈선하여 차륜이 충돌하는 경우에 상판에 전달되는 하중에 대해 만족하려면 다음 식을 만족해야 한다.

$$S < R_{stud} + R_{\mu}$$

▪ 여기서 S 는 DCP 충돌하중이 교량상 콘크리트 궤도 TCL층과 PCL층의 캠플레이트에 의해서 전달되어 교량상판에 전달되는 하중이고, R_{stud}는 교량받침의 볼트전단력이며, R_{μ}는 교량받침의 마찰력이다. 그림 2.1.1.25의 S_{DCP}와 S_{CAM}는 충돌하중과 캠플레이트를 전달되는 하중을 의미한다. 조사된 충돌하중은 250kN인데 일반 고속철도의 교량 Pot 받침의 교각부의 허용수평력은 600kN~800 kN에 이르는 것으로 조사되었다. 보다 자세한 구조검토는 2, 3차년도에 수행내용에 제시되었다.

(다) DCP 전기, 신호인터페이스

① DCP와 신호설비 인터페이스 분석

㉮ 적용대상 설비기준

▪ 현재 국내에서 운영되는 고속철도 및 일반철도의 신호시스템을 분석하고 각 시스템에 따라 현장에 구축되는 신호설비와 일탈방지방호 성능의 콘크리트 궤도 기술과 문제점을 분석하였다. 국내에 적용되어진 고속철도와 일반철도 및 안전설비까지도 검토하여 문제점을 분석하였다.

㉯ 관련근거 및 기준

▪ 국내 탈선열차의 방호와 관련된 기준은 가장 상위에 「철도안전법」이 있다. 철도 안전법 “제25조 철도시설의 기술기준”에 따르면, ‘탈선방지시설’로서 급곡선부(곡선반경 300 m 미만)와 탈선위험개소에 가드레일 등을 설치한다.

㉰ 관련 법규 및 기준

▪ 국토교통부 제정 각종 표준시방서 및 설계기준

▪ 철도시설공단 설계규정 및 관련규정

▪ 한국철도공사 제정 각종 시방서 및 설계기준

▪ 전력기술관리법, 철도건설규칙, 전기관련법령, 건설산업기본법등 본 과업과 관련이 있는 법률

▪ 한국산업규격(KS), 한국철도표준규격(KRS), 한국철도시설공단규격(KRSA), 한국철도공사규격(KRCS), 기타 공사의 안전, 교통, 환경 등에 관한 법령 및 규정 등

㉲ 인터페이스 검토결과

▪ 국내 철도에 적용되는 신호설비의 종류와 일탈방지방호설비와 인터페이스를 해야 되는 설비는 전선로설비와 신호설비로 구분할 수 있으며, 기본적인 전선로 설비는 횡단하는 케이블과 궤도회로에 적용되는 각종 잠바류가 해당이 된다. 또한 신호설비로는 선로의 중앙에 설치되는 각종 본드류 및 지상자와 LOOP류가 해당되며, 안전설비로는 차축검지장치와 끌림검지장치가 해당된다. 특히 일탈방호용으로 사용되는 재질이 철제일 경우는 지상자와의 전자파 간섭을 고려하여야 한다. 또한 궤도회로의 구성에 있어서 문제가 발생될 수 있을 것이다. 기본적인 궤도회로구성에 있어서 궤도분야와 노반분야의 절연저항의 요구조건이 있으며, 이를 충족하는 지는 시공기법 분석 및 현장시험을 통하여 확인이 가능할 것이다. 또한 지상자와의 전자파 간접은 지상자의 철제류 이격거리를 확인하고 충분한 이격거리를 분석하여 이를 일탈방지방호설비의 설계기준에 반영하여야 할 것이다.

▪ 설계편람(신호편)에 나와 있는 궤도회로 시공기준에서 제시하는 궤도분야와 노반분야의 요구조건은 레일의 절연저항을 각각의 궤도회로의 특성에 따라 요구사항을 만족하여야 하며, 기본적인 교량의 상판 시공에서부터 요구조건을 만족하도록 시공하고 궤도분야의 절연재시공 등을 수행하여야 할 것이다.

표 2.1.1.17 KRS에 제시된 궤도회로 특성에 따른 요구조건

구분	관련 페이지	내용
설계편람 KR S-04030 (궤도회로 종류)	P15	(2) AF궤도회로 장치의 누설저항 값은 특별히 지정하지 않는 한 날씨 또는 환경의 변화에 따라 장치에 지장이 없도록 다음 값 이상을 확보하여야 한다. 가. 자갈도상 : 3 Ω·㎞ 이상 나. 콘크리트도상 : 8 Ω·㎞ 이상
	p17	5.2 단락감도 어떤 조정상태에서 궤도계전기를 낙하시킬 수 있는 레일간 단락 저항의 최대값이 단락 감도이다. 단락감도는 궤도회로 기능의 양부를 판단할 목적으로 궤도회로내의 임의의 레일사이를 저항으로 단락하여 궤도계전기의 여자상태를 시험한다. 폐전로식에 있어서는 궤도계전기의 무여자접점이 떨어지려 할 때의 단락저항값을, 개전로식에 있어서는 무여자접점이 접촉하려할 때의 단락저항값을 나타낸다. 궤도의 단락감도는 직류궤도회로의 경우에는 송전단의 레일 위, 교류궤도회로의 경우에는 착전단의 레일 위, 병렬궤도회로의 경우에는 앞의 두 경우 이외의 병렬 부분의 끝 레일 위에서 측정하여, 임피던스본드 및 AF 사용구간에서는 맑은 날 0.06Ω 이상 그 밖의 구간에서는 맑은 날 0.1Ω 이상이 되어야 한다. 궤도회로 내의 임의의 점 X에 있어 단락감도(Rm)는 다음 식(1)로 표시한다.
	P34	1. 고전압임펄스궤도회로 (1) 고전압임펄스(High Voltage Impulse Type)궤도회로의 구성은 전압안정기, 송신기, 수신기, 궤도계전기를 1조로하여 랙에 설치한다. (2) 송·착전 기기는 역구내에서 원거리에 떨어져 있는 경우를 제외하고는 계전기실에 집중 설치함을 원칙으로 한다. (3) 임피던스본드는 매 궤도회로의 시점과 종점에 송신용 및 수신용을 다음과 같이 설치한다. ① 임피던스본드는 콘크리트 기초 위에 견고히 설치하고 배수에 유의하여야 한다. ② 임피던스본드와 레일간은 80㎟ 케이블로 접속한다. (4) 기기 상호간을 연결하는 선로저항은 다음에 의한다. ① 송신기와 송전용 임피던스본드간의 전원저항은 20Ω를 표준으로 한다.(전선로 최대 연장거리 2,000m) ② 착전용 임피던스본드의 콘덴서와 수신기간의 최대 선로저항은 60Ω으로 한다.(전선로 최대거리 2,000m) (5) 궤도회로의 최대연장은 1,000m 이내로 한다. (6) 궤도회로의 극성은 인접 궤도회로와는 이극으로 설치하는 것을 원칙으로 한다.
설계편람 KR S-07040 (열차자동 방호장치 (ATP))	p4	6. 취부위치 (1) 발리스 중심에서 ATS지상자 중심까지 간격 1.2m 이상 (2) 인접선로에서 통과하는 차량의 안테나 중심에서 발리스 중심과 간격 3m(선로전환기 내1.4m) 이상 (3) 선로전환기내 설치는 피하여야 한다.(단. 설치시 2호 적용) (4) 레일이음매와의 간격 1m이상 (5) 금속 물체와 발리스 중심의 간격 가로 410mm, 세로 315mm, 아래·위 각 210mm 이상 (6) 발리스 그룹과 발리스 그룹간 20m이상 이격

▪ 설계편람(신호편)에 나와 있는 발리스 및 ATS지상자의 철제류 이격거리는 아래와 같으며, 기본적인 이격거리는 지상자로부터 3m 이상을 이격하여 시공하여야 한다. 현재 설치되어 있는 철도신호설비는 그림 2.1.1.26과 같다.

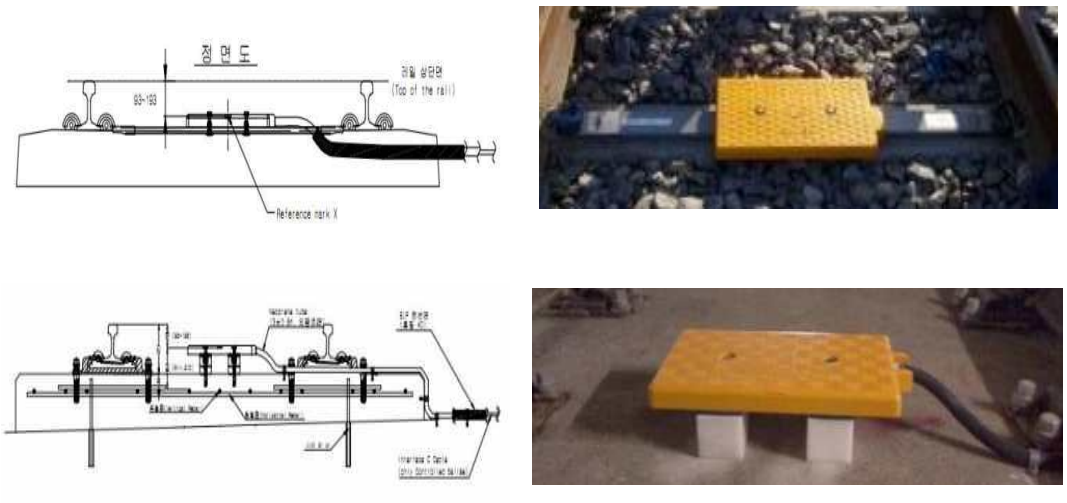


그림 2.1.1.27 발리스 설치(토공 및 교량)



그림 2.1.1.28 ATS 지상자(속도조사기과 점제어식)

② 궤도회로설비

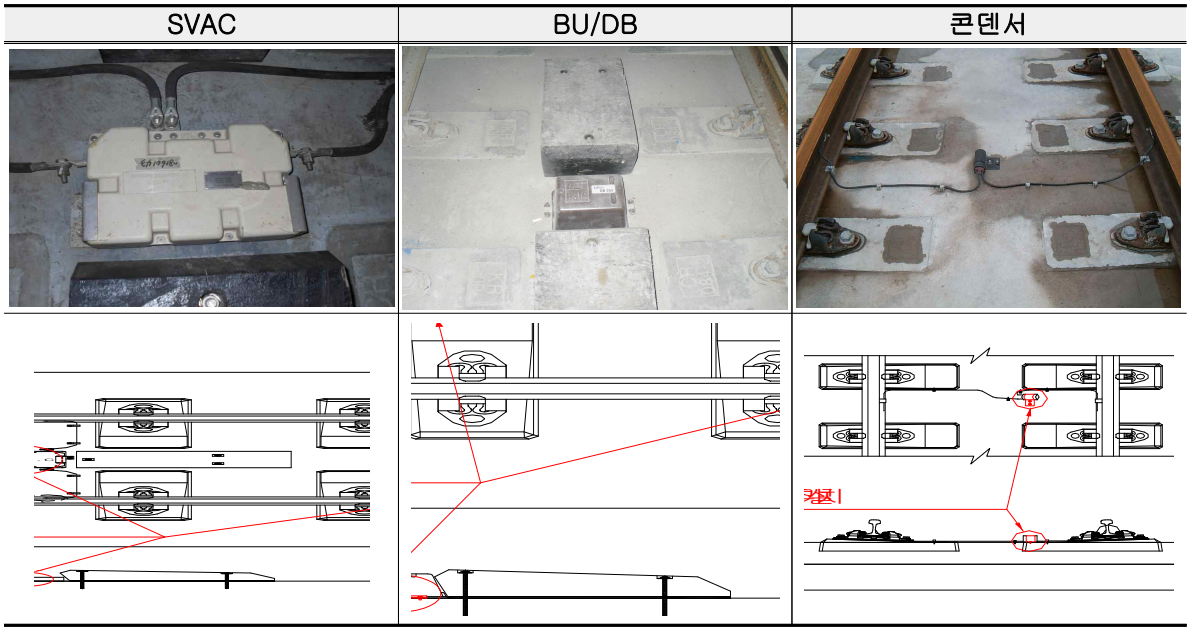


그림 2.1.1.29 UM71 궤도회로

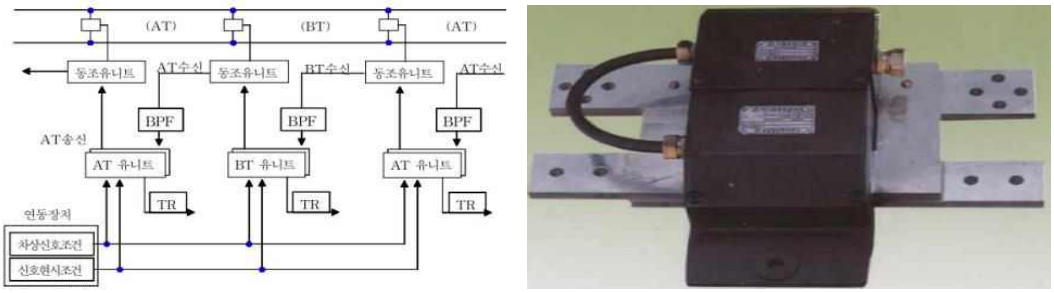


그림 2.1.1.30 AF-ATC 궤도회로

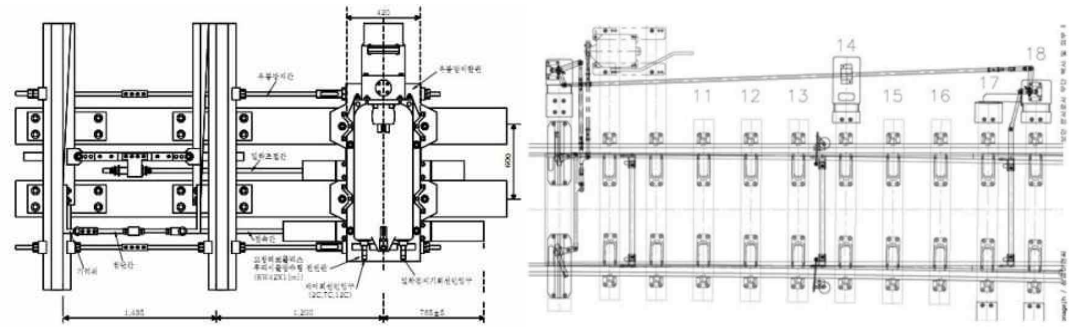


그림 2.1.1.31 전기선로전환기 NS-AM과 MJ81형

③ 철도신호설비 영향성 분석표

▪ 신호설비의 물리적 지장설비 분석표와 전자적 지장설비 영향분석표는 다음과 같다.

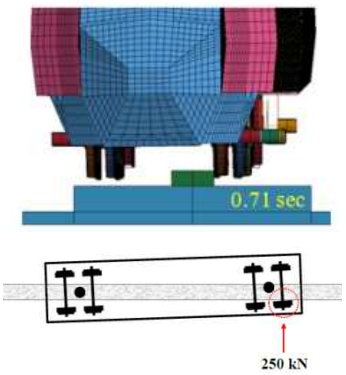
표 2.1.1.18 철도신호설비 물리적 지장설비 영향분석표

대분류	중분류	소분류	지장위치	
			횡단	중앙
선로전환기장치	전기선로전환기(NS형, MJ81형,하이드로스타)	간류, 쇄정장치		○
		유압장치		○
	차상전환장치	간류		○
	기계선로전환기	간류		○
궤도회로장치	ATC-AF궤도회로	AF본드		○
열차제어시스템	ATS지상장치	지상자		○
	절연구간예고장치	지상자		○
	ATP지상장치	발리스		○
	UM71 궤도회로 (JES, JIC)	동조유니트(BU)		○
		자기유도자(SVAC)		○
		양극자블록장치 (DB)		○
		보상콘덴서(C)		○
	불연속정보전송장치	루프(4m, 7m)		○
건널목보안장치	정시간제어기	검지부	○	
안전설비	차축온도검지장치	전자페달	○	
	끌림검지장치(DD)	끌림검지센서		○
	분기히팅장치	레일히터	○	
기타 설비	전선로	횡단 케이블	○	
		횡단 전선관로	○	
	각종쟘바류	송착잠바	○	
		첨단잠바	○	
		긍선잠바	○	
		크로씽잠바	○	
		중성선	○	
		Jumper Bond	○	

표 2.1.1.19 철도신호설비 전자적 지장설비 영향분석표

대분류	중분류	설치조건
궤도회로 장치	UM71 궤도회로 (JES, JIC)	사리누설저항(Ballast Insulation)은 8 Ω/km이상이고 레일사이의 단락저항은 0.25 Ω이하
	ATC-AF궤도회로	누설저항 값 3 또는 8 Ω·㎞이상
	고전압 입펄스궤도회로	누설저항 값
	AF 궤도회로	누설저항 값 3 또는 8 Ω·㎞이상
열차제어 시스템	ATS지상장치 지상자	지상자간 이격거리 3 m
	절연구간예고장치 지상자	지상자간 이격거리 3 m
	ATP지상장치 발리스	타 금속 물질의 제한 영역 : 가로 820 mm, 세로 630 mm, 수직 210 mm 레일 상부면 아래로의 발리스 수직 위치 : 93 mm ~ 193 mm

(1) 1차년도 개념설계로 도출된 핵심기술사양



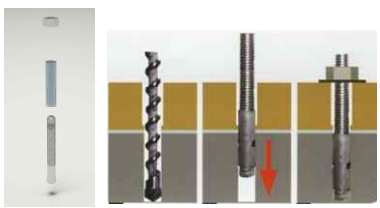
<열차탈선시 일탈방호시설에 가해지는 충격하중>



<일탈방호시설 상세개념도>

재료	물성치	적용값
콘크리트	fck	35MPa
	Ec	35,680MPa
철근(SD400)	fy	400MPa
	E	210,000MPa

<적용물성치>



<앵커분해도 및 설치순서>

■ 제품특징

- 프리캐스트패널(철근콘크리트)구조로 제작한 후 현장으로 운반하여 앵커를 이용해 기존철도교량의 콘크리트궤도에 급속 시공하는 형식
- 하부TCL층 앵커링 후 패널하부 충진 및 양생
- 볼트타입의 앵커를 이용한 너트체결구조 (설치 및 보수 작업시 시공성 향상)

모델명	일탈방호시설(DCP)
제작방법	프리캐스트방식 패널 (Precast Concrete)
형 상	직사각형 콘크리트 시설물
시공위치	철도교량 레일간 중앙부
단면형상	400mm(D)×200(h)mm
패널길이	3.0, 3.5, 4.0m (3-TYPE)
TCL 타입별 길이적용	구 분 / DCP 구성
	TCL 6.0m: 3.0m + 3.0m
	TCL 7.0m: 3.5m + 3.5m
	TCL 8.0m: 4.0m + 4.0m
기능	고속철도의 열차가 교량 상에서 탈선이후 차량이 일탈하였을 때 차량의 진로를 운행 선로 안에서 거동하도록 제어함.
성능기준	- 차량탈선 시 DCP에 가해지는 250kN의 충격량에 대해 저항 - 기존 철도교량 일탈방호시설의 급속시공이 가능 (20m/4시간) - 열차탈선이후 차륜-DCP 충돌시 시설의 급속유지보수 가능



<일탈방호시설 시공흐름도>

그림 2.1.1.32 개념설계(안)이후 제시된 기술사양

나. DCP 제원도출 궤간 내 DCP 적용에 따른 구조물 안전성 검토

(1) DCP 제원도출

(가) DCP 기술사양 검토

① 2차년도 설계변경사항

㉮ DCP 높이

▪ DCP를 설계 제작함에 있어 철도의 건설기준에 관한 규정(제13조)에 따라 건축한계 레일부(수직 및 수평방향) 및 차량한계 레일부(수직방향) 검토가 필요하며, 차량의 하부와의 여유 공간을 확보해야 한다. KTX - Power Car Motor Bogie와 Axle Gear Reduction Unit 사이의 공간을 검토한 결과 145mm로 확인되어 대차하부 공간과 DCP 높이의 인터페이스를 고려하여 패널의 점유단면 영역을 400mm(D)× 200(h)mm에서 500mm(D)×140(h)mm로 변경하였다. 충전층까지 포함한 높이는 140mm가 되어야 하므로 최종적으로 DCP 패널단면은 500mm×125mm, 충진층 15mm로 설정하였다.

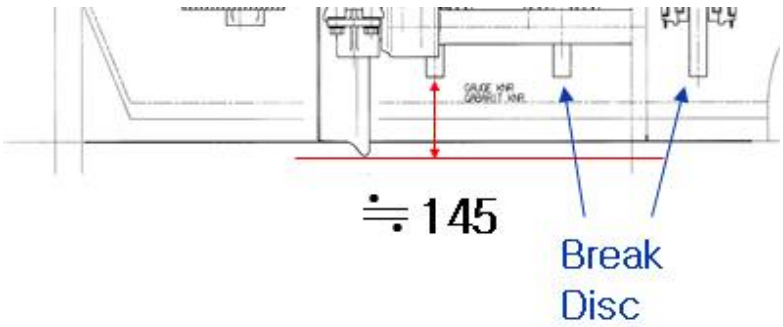


그림 2.1.2.1 하부공간 여유높이(mm)

㉯ DCP 설계 하중

▪ 탈선시 차륜과 접촉을 고려한 기하학적 검토 및 LS-DYNA를 이용한 충돌해석의 결과를 통하여 단면을 500×140mm으로 결정하였다. 1차년도 DCP의 높이가 200mm인 경우에는 최대 250kN의 충돌하중이 발생하여 이를 설계하중으로 하였다. DCP 높이를 140mm(패널 125mm, 하부충전층 15mm)로 줄인 경우, LS-DYNA 충돌해석 결과는 해석결과 165.6kN을 설계하중으로 고려하였다.

㉰ 패널 각 부분

▪ DCP의 길이는 3-4분할(3.0m, 3.5m, 4.0m) 제작하는 것으로 확정하였다. DCP 패널은 프리캐스트, TCL 연속부 위에 놓여진 각 DCP의 연결부는 모르타르 시공, TCL 분리부 위에 놓여진 각 DCP의 연결부는 탄성폴리머, TCL 분리부의 DCP의 연결부는 우레탄 폼시공을 하는 것으로 결정하였다.

▪ 일탈방호시설(DCP)의 핵심기술사양은 표 2.1.2.1과 같다.

표 2.1.2.1 일탈방호시설(DCP)의 핵심기술사양(2차년도 기본설계시)

<table>
<tr><td>모델명</td><td>프리캐스트 방식 일탈방호시설(Precasted Prefabricated DCP)</td></tr>
<tr><td>형상/시공위치</td><td>직사각형 콘크리트 시설물 / 철도교량 콘크리트 궤도 중앙부 급속시공</td></tr>
<tr><td>설계하중</td><td>165.6kN (DCP패널 설계하중)</td></tr>
<tr><td>단면형상</td><td>500mm(D)×125(h)mm, 충진층 15mm</td></tr>
<tr><td>TCL타입별
길이적용</td><td>
<table>
<tr><th>TCL 길이</th><th>DCP 구성</th></tr>
<tr><td>6.0m</td><td>1950mm + 1950mm + 1950mm (3피스)</td></tr>
<tr><td>7.0m</td><td>2280mm + 2280mm + 2280mm (3피스)</td></tr>
<tr><td>8.0m</td><td>1950mm + 1950mm + 1950mm + 1950mm (4피스)</td></tr>
</table>
</td></tr>
<tr><td>각 결합부
특성</td><td>
<table>
<tr><th rowspan="2">구분</th><th rowspan="2">DCP 구성</th><th rowspan="2">탄성계수
(GPa)</th><th rowspan="2">포아송비</th><th colspan="5">기타물성</th></tr>
<tr><th>압축강도
(MPa)</th><th>탄력성
(Resilience,%)</th><th>비중
(kg/m^3)</th><th>부착두께
(mm)</th><th>부착강도
(MPa)</th></tr>
<tr><td>DCP 패널</td><td></td><td>30</td><td>0.167</td><td>35</td><td>-</td><td>2300</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>DCP하면-TCL상면
충진부</td><td>충진용
모르타르
(마페그라우트)</td><td>30</td><td>0.25</td><td>>40</td><td>-</td><td>1900 ~
2000</td><td>15</td><td>>1</td></tr>
<tr><td>DCP-DCP연결부
(TCL 연속부)</td><td>모르타르
(마페그라우트)</td><td>30</td><td>0.25</td><td>>40</td><td>-</td><td>1900 ~
2000</td><td>30</td><td>>1</td></tr>
<tr><td>DCP-DCP 연결부
(TCL 분리부)</td><td>탄성폴리머</td><td>20</td><td>0.4</td><td>15</td><td>90</td><td>1100</td><td>100</td><td>2(slant
shear)</td></tr>
<tr><td>DCP-DCP
연결부하부충진
(TCL 분리부)</td><td>우레탄 폼</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
</table>
</td></tr>
<tr><td>요구성능</td><td>- 기존 철도교량 일탈방호시설의 급속시공이 가능 (20m/4시간)
- 열차탈선이후 차륜-DCP 충돌시 시설의 급속유지보수 가능</td></tr>
</table>

(나) DCP 충돌해석모델 구축 및 해석검증

① 충돌 해석변수

▪ 프리캐스트로 제작된 철근 콘크리트 DCP는 TCL층에 앵커볼트에 체결력을 유지한 상태로 그림 2.1.2.2와 같이 결속되어 있으며, 본 연구에서는 1차년도의 예비해석과 달리, 실제 콘크리트의 궤도에서의 거동을 검토하기 위하여, hump를 포함한 침목, TCL, camplate, PCL의 모델을 모두 포함하여, DCP와 DCP의 연결부(TCL연속부-마페그라우트, TCL분리부-탄성폴리머)와 DCP와 TCL의 접합 충진층(마페그라우트)을 모델링하였다. 충돌하중의 위치 및 contact조건에 따라, 변수연구를 표 2.1.2.2와 같이 수행하였으며, 앵커볼트의 응력결과 및 축력과 TCL 앵커주위 콘크리트의 응력 및 변형된 형상을 검토하여 충격하중에서 취약한 부분과 구조물의 충격하중 상태에서의 구조적 성능을 검토하고자 한다.

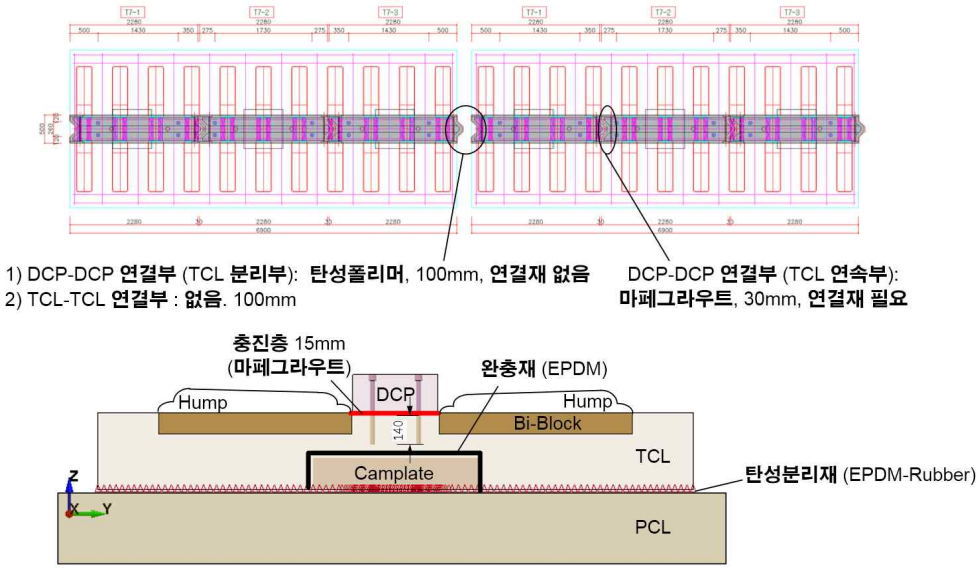


그림 2.1.2.2 해석모델의 개요

표 2.1.2.2 콘크리트 DCP 변수해석 하중조건

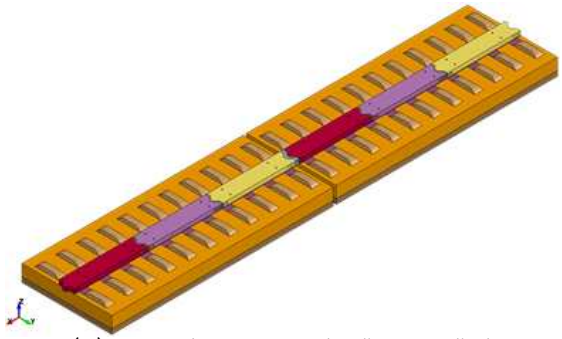
	하중 가력점	Contact 조건	하중
Case1	T7-2 좌측앵커 (275)	DCP-TCL 완전부착 가정	182 kN (165.6 kN을 약 10% 증가시킨 보수적 조건)
Case2	DCP-DCP 연결접합부 (TCL연속부)		
Case3	T7-3 좌측앵커 (350)		
Case4	T7-1 좌측앵커 (500)		
Case5	DCP-DCP 연결접합부 (TCL분리부)		
Case6	DCP 중앙		
Case1-no tied	T7-2 좌측앵커 (275)	Contact조건 없을 경우	
Case6-no tied	DCP 중앙		

② 유한요소해석 모델 구축

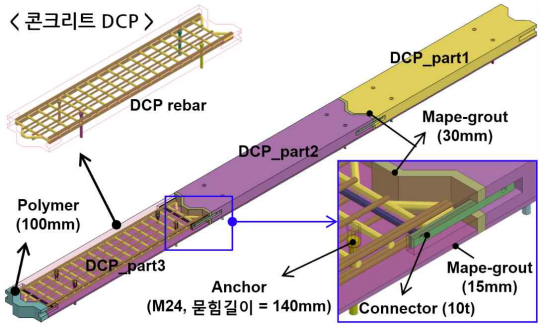
▪ 재료모델은 1차년도에서 수행한 결과를 바탕으로 하여, Mat_72R3 재료모델을 이용하여 콘크리트 재료의 특성 값을 Bi-Block, hump, DCP, TCL, PCL에 적용하였으며, DCP-TCL와 DCP-DCP를 연결하기 위해서 사용한 마페그라우트와 탄성폴리머는 탄성 특성을 고려할 수 있는 Mat_1의 탄성재료모델을 사용하였다.

▪ DCP모델에 적용한 Contact 조건은 아래 그림과 같이 DCP-TCL의 접합부(마페그라우트), DCP-DCP(마페그라우 및 탄성폴리머)에 적용되는 마페그라우트와 탄성폴리머가 같은 거동을 할 수 있게 *CONTACT_TIED_NODES_TO_SURFACE을 사용하여 contact 조건을 적용하였으며, 함께 거동하도록 완전부착으로 가정하였다.

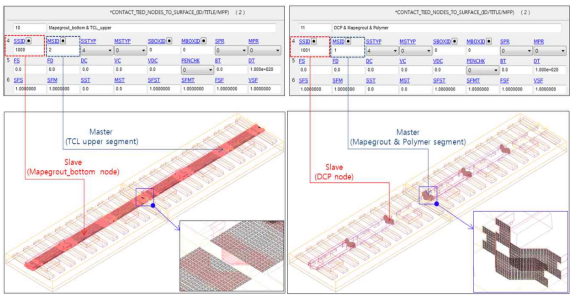
▪ 앵커 체결력은 LS-DYNA에 있는 *INITIAL_STRESS_SECTION을 사용하여 DCP모델 앵커의 pretension을 동적 이완해석기법을 사용하여 앵커의 체결력을 반영하였으며, 이때 체결력을 통해서 발생하는 앵커와 앵커 주위 부재에서 발생하는 응력 및 변형 데이터들을 충격해석(transient)의 초기 값으로 적용하여 해석을 진행하였다.



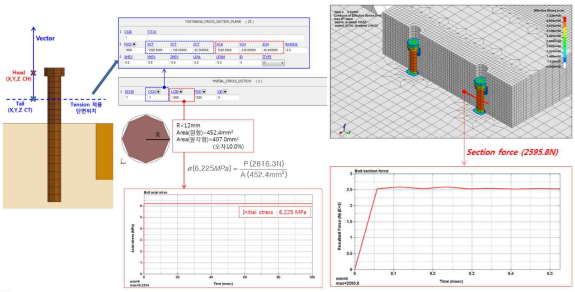
(a) 콘크리트 DCP 및 궤도 모델링



(b) DCP 상세 모델링



(c) DCP-TCL / DCP-DCP Contact 조건



(d) 앵커볼트의 pre-tension 조건 및 초기 축응력

그림 2.1.2.3 콘크리트 DCP 모델링 및 해석조건

표 2.1.2.3 콘크리트 재료 물성치

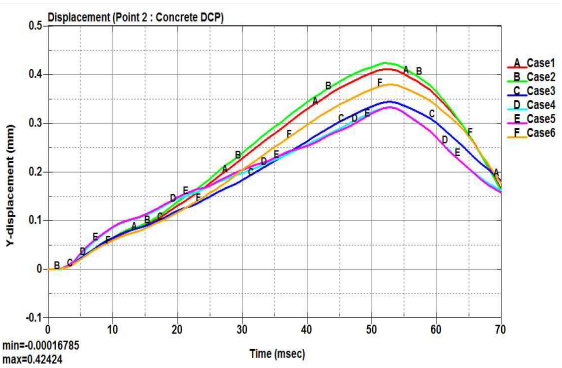
순번	종류	물성치			재료 모델
		압축강도(MPa)	탄성계수(MPa)	프아송비	
1	DCP	35	3.0E+04	0.167	MAT_72R3
2	Bi-Block, Hump	50	3.3E+04	0.167	
3	TCL	30	2.9E+04	0.167	
4	PCL	30	2.9E+04	0.167	
5	마페 그라우트	40	3.0E+04	0.25	MAT_1
6	탄성폴리머	15	2.0E+04	0.4	

③ 콘크리트 DCP의 충돌해석 결과

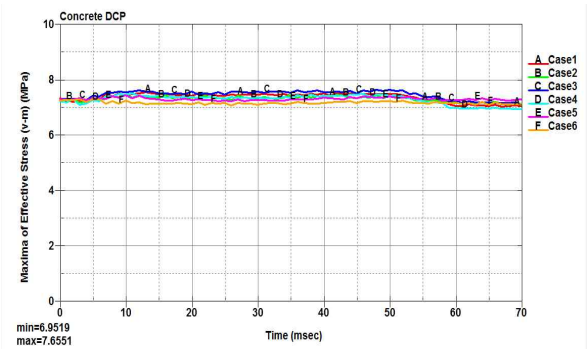
▪ DCP 충돌하중이 가해지는 배면에서의 변위량을 검토한 결과 가장 큰 변위가 발생한 것은 CASE 2(TCL연속부에서의 DCP-DCP 연결접합부)에서 0.424mm가 발생한 것을 확인할 수 있었으며, DCP앵커의 거동을 검토한 결과, 충격위치에 상관없이 구조적 안정성을 보장하는 것으로 판단되었다.

▪ 그러나, CASE 6과 CASE 6-no tied 해석조건에서도 보는 것과 같이, 접합조건에 따라 앵커 및 변형에 크게 영향을 받는 것을 확인할 수 있었다. 즉, 설계된 대로 제대로 시공이 된다는 조건하에 검토를 하는 경우에는 구조적 안정성이 확보되나, 실제 시공성능의 오차, 노후화 등에 의해서는 큰 변형이 발생가능 함을 확인하였다.

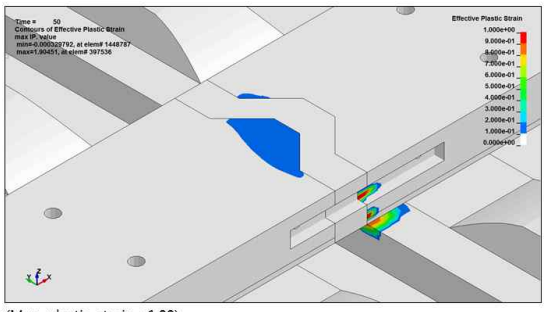
▪ CASE 2(TCL연속부에서의 DCP-DCP 연결접합부)와 CASE 5(TCL분리부에서의 DCP-DCP 연결접합부) 발생 가능한 최대 소성변형을 확인한 결과 CASE 2의 경우라 할지라도, 가장 취약한 TCL분리부와 DCP가 접합하는 곳에서 큰 변형이 발생함을 확인하였다.



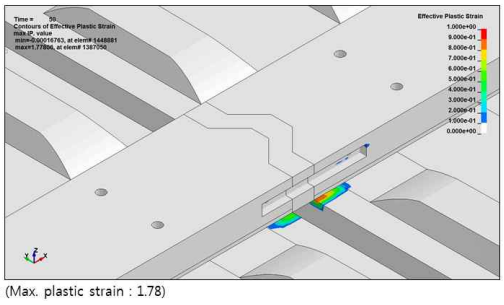
(a) DCP 충돌하중 배면에서의 변위량



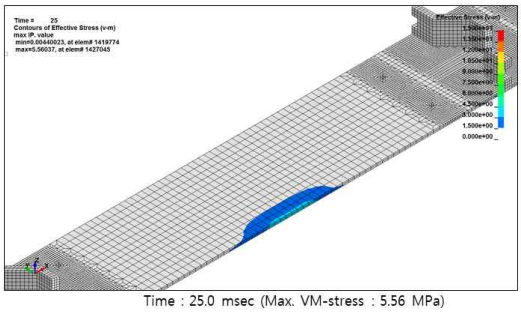
(b) DCP 앵커의 최대응력-시간 이력곡선



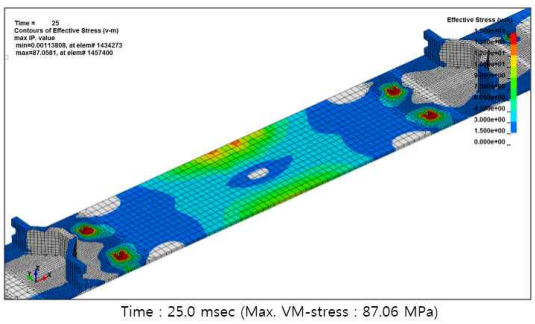
(c) CASE 2에 대한 소성변형



(d) CASE 5에 대한 소성변형



(e) CASE 6에 대한 마페 그라우트 응력 변형



(f) CASE6-no tied 마페 그라우트 응력 변형

그림 2.1.2.4 콘크리트 DCP의 충돌하중 위치에 따른 해석결과

(다) 각 대안별 기술검토사항

① 각 대안별 비교

▪ 2차년도에는 1차년도에 각 대안개념에 대한 행렬비교평가표 표 2.1.1.3에서 제시한 3, 4안 중에서 궤도 TCL 궤간내 중앙 돌기형 충돌부 설치구조 중 RC 프리

캐스트 타입(RC Prefabricated), 스틸프레임(Steel Frame), 철골콘크리트구조(SRC구조) 및 궤간 내에 탈선방지레일을 설치한 경우 등 4가지에 대해서 비교검토를 수행하였다. 각 대안별로 검토한 행렬비교평가표는 표 2.1.2.4와 같다. 각 대안의 공사비 산출근거는 증빙보고서에 수록되어 있다.

▪ 2차년도에는 1차년도에 각 대안개념에 대한 스틸프레임 DCP 충돌해석 검토하였다. Rheda 2000 콘크리트 궤도의 교량구간 TCL 7m를 해석 대상으로 선정하였다.

② 탈선방지레일의 방호시설 적합성 검토

㉮ 검토내용

▪ 철도일탈방호시설(DCP)의 설치와 비교를 위해 궤간 내에 케미컬앵커를 사용하여 탈선방지레일을 설치하는 경우에 대한 구조적인 안전성 및 경제성 검토를 수행하고 그 적합성을 검토하였다.

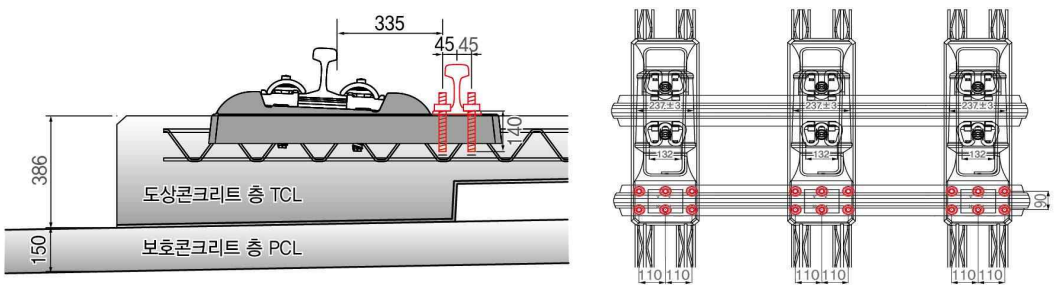
㉯ 관련기준

▪ 탈선방지레일 관련 기준은 선로유지관리지침(철도시설공단, 2015.03.19) '제7절 가드레일 (제81조 ~ 제85조)' 에 다음과 명시되어 있다.

㉰ 구조검토

▪ 탈선방지레일 및 케미컬앵커의 배치

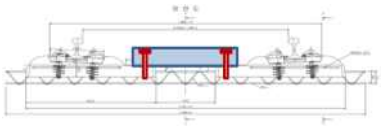
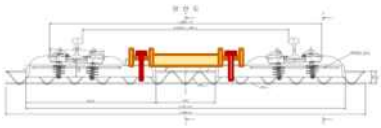
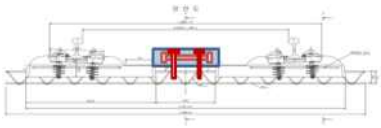
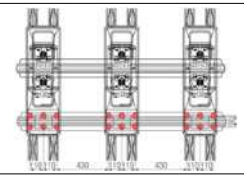
-탈선방지레일(60E1 레일)을 두 본선레일(60E1 레일)의 궤간 내측에 배치한 후 레일 저면을 일정간격(선로방향 : 2@110mm, 선로직각방향 : 90mm)으로 천공하여 Bi-block 침목상면에 개소당 6EA 씩 케미컬 앵커로 고정하도록 한다.



(a) 단면 (b) 평면

그림 2.1.2.5 탈선방지레일의 배치

표 2.1.2.4 각 대안별 세부검토

종류	1안	2안	3안	4안
단면도				
형 상				
재 질	철근+콘크리트	스틸프레임	강합성콘크리트(SRC)	탈선방지레일+케미컬앵커
에너지흡수	우수	우수	낮음	중간
인터페이스	전기신호 저항감소 우려없음	전기신호 저항감소 우려됨	전기신호 저항감소 우려없음	전기신호 저항감소 우려됨
제작비용	낮음	중간	높음	높음
설치비비용	높음	낮음	중간	높음
시공성	낮음	높음	중간	중간
개략공사비/M	513,000	633,000	844,000	1,009,934
단면선정	○	△	×	×

▪ 검토조건

-케미컬 앵커의 유효천공깊이는 140mm 이며, 탈선하중은 궤간 측정의 기준이 되는 점인 레일정부 하면 14mm 지점에서 수평으로 작용하는 것으로 하였다. 초기 충돌값 114 kN 으로 2차년도 초반에 검토되었다. 하지만 이후 충돌하중이 165.6 kN으로 상향되면서 실제 수평력과 모멘트는 증가한다.

□ 작용하중

수평력, Fy = 165.6 kN

모멘트, Mx = 165.6 × (0.172 - 0.014) = 26.16 kN · m

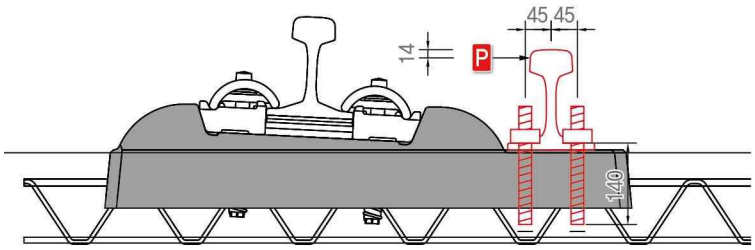
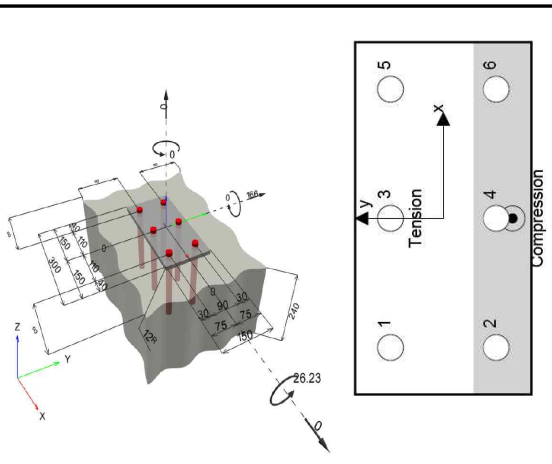


그림 2.1.2.6 탈선방지레일에 작용하는 탈선하중

▪ 검토결과

□ 앵커합력 (반력)

앵커	축력1) (kN)	전단력 (kN)
1	84.172	27.667
2	0.000	27.667
3	84.172	27.667
4	0.000	27.667
5	84.172	27.667
6	0.000	27.667



1) + : 인장력, - : 압축력

□ 축력 검토

구 분	하중 (kN)	저항력 (kN)	사용률 βN (%)	판정
앵커강의 강도	84.172	130.667	64	O.K
풀아웃-쐐기파괴의 조합	252.517	183.654	138	N.G
콘크리트 Breakout 강도	252.517	178.405	142	N.G

□ 전단력 검토

구 분	하중 (kN)	저항력 (kN)	사용률 βv (%)	판정
앵커강의 강도	27.667	78.400	36	O.K
Pryout 강도	166.000	411.704	41	O.K.

□ 축력과 전단력의 조합하중에 대한 검토

fib (07/2010) 에 의거 $\beta_N^{\alpha}+\beta_v^{\alpha} \leq 1$ 만족여부 검토

구 분	β_N	β_V	α	사용률 $\beta_{N,V}$ (%)	판정
앵커강	1.551	0.403	1.000	164	N.G

□ 검토결과

▪ 탈선하중에 대한 케미컬앵커의 안전성은 전단력에 대해서는 만족하나 축력 / 축력과 전단력의 조합하중에 대하여 만족하지 못하는 것으로 검토되었다.

㉮ 경제성 검토

▪ 케미컬앵커 공사비

□ 순공사비

사용자재 : 케미컬앵커 HY200 + HIT-C(8.8) M20 × 235

작업조건 : 1일 실작업시간 8시간, 3인 1조, 롯드직경 20mm, 구멍직경 22mm,삽입깊이 140mm, 56공 / 일

km당 공수는 6공×양측레일 / 65 cm = 12 / 0.00065 km = 18,462공 / km

km당 순공사비는 22,620 원 × 18,462 공 = 417,610,440 원 / km

작업의 특성상 야간 열차차단 시간내 작업이므로 야간할증 (25%) 을 고려하면 km당 순공사비는 417,610,440 × 1.25 = 522,013,050 원 / km (야간할증)

□ 총공사비

간접비, 각종보험료, 일반관리비, 이윤 및 부가가치세 등을 감안 1.4배하여 총공사비를 구함.

km당 총공사비는 522,013,050 ×1.4 = 730,818,270원 / km

▪ 레일 자재비 및 운송비

□ 순공사비

자재비 (60E1 레일, L=25m, 80 EA (양측 km당)) 1,917,939 원 × 80

= 153,435,120 원

레일운반비 (80 EA, 육로운송) : 5,309,920 원

레일하화 (80EA) : 749,760 원

순공사비 합계 : 159,494,800 원 / km

작업의 특성상 야간 열차차단 시간내 작업이므로 야간할증 (25%) 을 고려하면km당 순공사비는 159,494,800 × 1.25 = 199,368,500 원 / km (야간할증)

□ 총공사비

간접비, 각종보험료, 일반관리비, 이윤 및 부가가치세 등을 감안 1.4배하여 총공사비를 구하면 총공사비를 구함.

km당 총공사비는 199,368,500 원 × 1.4 = 279,115,900 원 /km

▪ 전체공사비

-레일 자재비 및 운반비와 케미컬앵커 시공비를 포함한 전체 탈선방지레일 km당 총공사비는 다음과 같다.

표 2.1.2.5 총공사비

구 분	순공사비 (원)	순공사비 (원) (야간할증)	총공사비 (원)	비 고
케미컬앵커 시공비	417,610,440	522,013,050	730,818,270	
레일 자재비 및 운반비	159,494,800	199,368,500	279,115,900	
합 계	639,105,240	721,381,550	**1,009,934,170**	km 당

㈐ 소결

▪ 탈선방지레일을 본선레일 내측에 케미컬앵커를 이용하여 배치하는 방안은 케미컬앵커의 구조적 안전성을 확보하지 못하며, 공사비도 10.1 억원 / km 정도 소요되어 시공비 측면의 경제성도 낮은 것으로 검토되었다.

(1) 궤간 내 DCP 적용에 따른 구조물 안정성검토

(가) 개요

▪ 궤간 내에 돌출부로 설치된 벽체에 의해 탈선된 열차의 차륜이 가이드 되도록 하는 일탈방호시설(Derailment Containment Provisions; DCP)적용시 열차 충돌하중에 의한 궤도구조물과 교량에 대한 안전성 검토를 수행하여 설치 이전의 안전성 검토를 하였다.

(나) 방호시설 설치시 궤도구조물 안정성 검토

① DCP 열차 충돌하중에 의한 궤도 안전성검토

㉮ 교량상 Bi-Block 콘크리트 궤도

▪ 교량상 Bi-Block 콘크리트궤도의 해석은 각 구성부재의 단면가정, 캠플레이트 측면에 부착되는 캠플레이트용 완충재의 설계, 각 구성부재의 철근량 산정으로 구성된다. 일탈방호시설(DCP)은 궤도구조인 TCL 상부에 부착되는데, 이 경우 열차탈선하중에 의한 궤도구조의 안전성 검토를 수행한다. 일탈방호시설(DCP) 설치 전후 궤도구조의 안전성 검토는 TCL 길이 7.0m에 대하여 검토하였다.

㉯ 콘크리트궤도 안전성검토 시 적용하중

▪ 수직하중

▪ 종방향 하중

▪ 횡방향 하중

▪ 구속하중

▪ 하중조합

-궤도구조 안전성 검토에서 단면검토 시 하중조합은 철도설계지침 및 편람'KR C-08020 하중'의 하중조합을 적용하며, 이는 국가건설기준 'KDS 24 12 10 : 2016교량 설계 하중조합(일반설계법)'과 동일하다.

◦ $U = 1.35D + 1.4(L + I) + 1.35\,CF(LF) + 1.35(0.5\,W + WL) + 1.4(SB + LR) + 1.35G$

◦ 여기서,

◦ D : 고정하중

◦ L : 활하중

◦ I : 충격

◦ CF : 원심하중

◦ LF : 차량 횡하중

◦ G : 크리프, 건조수축, 온도변화

◦ W : 풍하중

◦ WL : 차량하중에 작용하는 풍하중

◦ SB : 시동 또는 제동하중

◦ LR : 장대레일 종하중

표 2.1.2.6 총공사비 궤도구조 안전성 검토시 하중조합

구 분	직선궤도	곡선궤도	단면검토시	사용성검토시
수직하중	고정하중	좌동	1.35	1.00
	활하중	좌동	1.4	1.00
	원심하중 증가분	좌동	1.35	1.00
	풍하중 증가분	좌동	1.35	1.00
종방향 하중	시/제동하중	좌동	1.4	1.00
	궤도저항력	좌동	1.4	1.00
	기울기 하중	좌동	1.4	1.00
횡방향 하중	사행하중	좌동	1.35	1.00
	원심하중	좌동	1.35	1.00
	풍하중	좌동	1.35	1.00
	-	레일온도하중	1.35	1.00
	DCP 탈선하중	좌동	1.35	1.00
구속하중	온도하중	좌동	1.35	1.00
	건조수축	좌동	1.35	1.00

㉰ DCP에 열차탈선하중 작용시 TCL 안전성

▪ DCP 탈선하중 작용시 가정

-일탈방호시설(DCP)의 제원은 7.0m 길이의 TCL 세그먼트에 대하여 폭×높이×길이= 500 × 125 × 2,280 mm 이며, 165.6kN 탈선하중은 7m TCL 세그먼트의 경우 일탈방호시설(DCP) 1개소의 중앙에 작용하고 2.28m DCP 전장에 대해 TCL에 등분포하중으로 균등하게 작용한다고 가정한다.

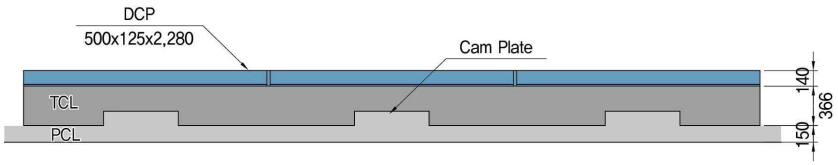


그림 2.1.2.7 교량상 콘크리트 궤도구조 평면도 -DCP 설치시

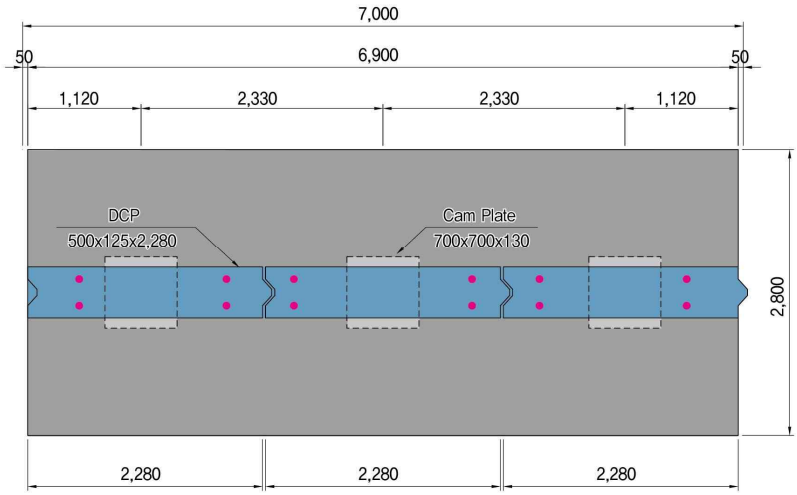


그림 2.1.2.8 일탈방호시설(DCP)에 작용하는 탈선하중

▪ 하중의 증감

-일탈방호시설(DCP)에 탈선하중 165.6kN 재하 시에 추가하중으로는 일탈방호시설(DCP)의 자중 및 이에 따른 기울기하중이며, 사행하중, 원심력 및 활하중 재하시 풍하중의 경우 열차의 주행에 따른 하중이므로 일탈방호시설(DCP) 1개소 중앙 측면에 작용하는 탈선하중 165.6 kN으로 대체 하도록 한다.

표 2.1.2.7 DCP 탈선하중 재하시 적용하중의 변화

하중조합	수직하중		종하중		횡하중				구속하중	
	고정하중	활하중	기울기	궤도저항력	사행하중	원심력	풍하중	온도하중	온도변화	건조수축
궤도구조 검토시	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
DCP집중하중 재하시	O	O	O	O	×	×	×	O	O	O
추가하중 (증감)	DCP 고정하중	–	DCP 영향	–	탈선하중 165.6 kN		–	–	–	–

주) O : 고려, × : 비고려

□ 고정하중의 변화

구 분	하중산정값		비고
	기존	DCP설치	
궤도 슬래브	25.1 kN/m	25.1 kN/m	
레일 및 침목	1.5 kN/m	1.5 kN/m	
DCP 하중	-	1.7 kN/m	추가
합 계	26.6 kN/m	28.3 kN/m	6.4% 증가

□ 종방향 하중의 변화

구 분	하중산정값		비 고
	기존	DCP설치	
열차하중 재하시	5.07 kN/m	5.11 kN/m	0.8% 증가
열차하중 비재하시	0.67 kN/m	0.71 kN/m	6.0% 증가

□ 횡방향 하중의 변화

구 분	하중산정값		비 고
	기존	DCP설치	
사행하중	25 kN/m		4m 재하
원심력	21.43 kN/m		
풍하중	6.0 kN/m		
레일온도하중	0.443 kN/m	0.443 kN/m	
열차탈선하중		72.807 kN/m	2.28m 재하
합 계	52.873 kN/m	73.250 kN/m	38.5% 증가

▪ 캠플레이트 및 주변 슬래브 설계

□ 캠플레이트 완충재 배치

-캠플레이트의 완충재 배치는 다음과 같다.

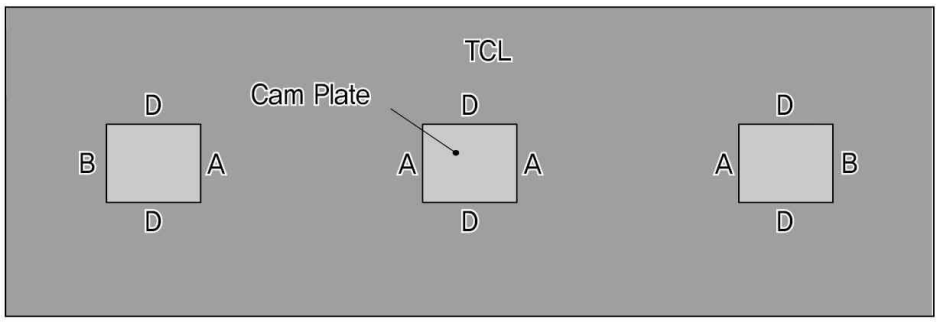


그림 2.1.2.9 캠 플레이트 완충재 배치형태

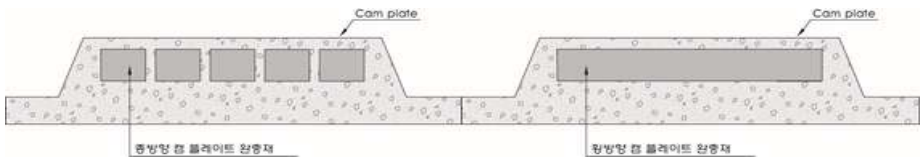


그림 2.1.2.10 종방향 (TYPE A, B) 및 횡방향 (TYPE D) 완충재

□ 캠플레이트 반력(하중계수 적용)의 변화

-각 TYPE별 캠플레이트에 발생하는 반력은 다음과 같다.

종방향

구 분	하중산정값	
	기존	DCP설치
$Q_{l,A}$ (A Type)	267.6 kN	267.7 kN
$Q_{l,B}$ (B Type)	96.3 kN	96.4 kN

-횡방향 캠플레이트에 발생하는 반력은 다음과 같다.

횡방향

구 분	하중산정값		비 고
	기존	DCP설치	
Q_{tr} (D Type)	197.8 kN / CamPlate	268.2 kN / CamPlate	36% 증가

□ DCP 설치 전후 캠플레이트 반력 산정 및 완충재 응력검토

-TYPE A (2 Camplate 외측부, TCL 수축시) (예-상세내용 증빙보고서참조)

기존

완충재 물성치	b	h	t	A	S	ED	σm
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm2)	-	(MPa)	(MPa)
	120	120	10	72,000	3.0	50.7	15.0
응력 검토	ΔL	σC	Qc	Qload	Qt	σt	판정
	(mm)	(MPa)	(kN)	(kN)	(kN)	(MPa)	σm≥σm
	0.095	0.5	36	267.6	303.6	4.2	O.K.

DCP 설치 후 (탈선하중 작용시)

완충재 물성치	b	h	t	A	S	ED	σm
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm2)	-	(MPa)	(MPa)
	120	120	10	72,000	3.0	50.7	15.0
응력 검토	ΔL	σC	Qc	Qload	Qt	σt	판정
	(mm)	(MPa)	(kN)	(kN)	(kN)	(MPa)	σm≥σm
	0.095	0.5	36	267.7	303.7	4.2	O.K.

□ DCP 설치 전후 캠 플레이트 주변 슬래브 설계

-캠플레이트 주변의 TCL 슬래브는 스트럿-타이 모델을 사용하여 검토한다.

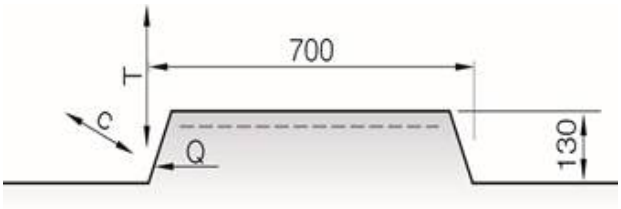


그림 2.1.2.11 캠 플레이트 스트럿-타이 모델

-종방향 설계

구 분	하중산정값	
	기존	DCP설치
$Q_{l,\max}$ (kN)	303.6	303.7
T = Q / 2.5 (kN)	121.4	121.5
As,req (cm^2)	3.6	3.6
As,use	H13×6EA = 7.6 cm^2	

- 횡방향 설계

구 분	하중산정값	
	기존	DCP설치
$Q_{t,\max}$ (kN)	200.5	268.2
T = Q / 2.5 (kN)	80.2	107.3
As,req (cm2)	2.4	3.2
As,use	H13×4EA = 5.1 cm^2	

㉮ 소결

▪ 검토 결과, 캠플레이트 완충재의 응력은 DCP 설치 전후 모두 허용기준을 만족하며, 궤도콘크리트층 (TCL)에 설치된 철근량도 DCP 설치 전후 요구철근량을 모두 만족하는 것으로 검토되었다.

▪ DCP의 설치 후 열차탈선하중이 작용하는 경우 횡방향 캠 플레이트 반력 최대값이 36% 증가되며, DCP 설치 후 열차탈선하중의 작용에 따른 캠플레이트 완충재에 발생하는 응력값은 허용응력값의 18.0 % (4.2MPa / 15MPa) 로 기준을 만족하는 것으로 검토되었다.

▪ 또한 궤도콘크리트층 (TCL) 요구철근량은 DCP 설치 및 열차탈선하중의 적용으로 크게 증가하지 않으며, 기존 철근량에 여유가 있으므로 DCP 설치 및 열차탈선하중의 작용에 의한 요구 철근량은 기존의 철근량 이내임을 알 수 있었다.

(다) 방호시설 설치시 교량구조물 안정성 검토

① 교량 안전성 검토시 횡방향 하중

▪ 교량 안정성 검토시 횡방향하중은 다음과 같다.

㉮ 원심하중

▪ 철도설계 지침 및 편람 'KR C - 08020 하중' 편 (한국철도시설공단)

㉯ 차량횡하중

▪ 철도설계 지침 및 편람 'KR C - 08020 하중' 편 (한국철도시설공단)

㉰ 풍하중

▪ 철도설계 지침 및 편람 'KR C - 08020 하중' 편 (한국철도시설공단)

㉱ 지진하중

▪ 철도설계 지침 및 편람 'KR C - 08020 하중' 편 (한국철도시설공단)

② 교량전도 및 낙교

㉮ 교량 전도에 대한 안전성 검토

▪ 교량의 전복(뒤집힘)은 차량의 탈선 또는 바람의 상향력으로 교량이 뒤집히는 현상을 말한다. 교량상 Bi-Block 콘크리트궤도에 DCP 구조물을 설치하는 경우 열차가 교량상에서 탈선할 때 차량의 진로를 1차적으로 주행선로 안에서 제어(차축의 차륜이 DCP 구조물에 1차적으로 접촉) 하고, 2차적으로 탈선방호벽에 충돌하더라도 차량이 방호벽 밖으로 나가지 않도록 제어하는 것이 목표이다.

▪ 철도설계기준(노반편) (2015)에는 방호벽 검토와 더불어 탈선 사고로 인한 교량 손상이 최소가 되도록 설계하도록 하고 있으며, 특히 교량의 전복이나 구조물의 파괴가 방지되도록 다음과 같이 규정 하고 있다.

▪ 교량상부구조 전도에 대한 검토는 열차일탈방호시설(DCP)의 설치에 의해 1차적으로 탈선하중의 크기가 감소된 상황에서 탈선하중 II 에 대해 검토하는 것이며, 탈선하중 II에 대한 검토는 상기와 같이 철도설계기준(노반편)에 이미 제시되어 있으므

로, 열차일탈방호시설(DCP)을 설치하는 경우에 검토를 생략할 수 있다.

㈏ 낙교에 대한 안전성 검토

▪ 일반적으로 지진하중 작용시 낙교에 대한 안전성 검토를 수행하며, 열차일탈방호시설(DCP) 설치시 추가적인 탈선하중 (114kN)에 대한 낙교 안전성 검토는 교량 받침이 추가적인 수평하중에 대해서도 안전한지 검토하는 것으로 한다.

-P.S.C BOX GIRDER교 L=25m

□ 설계조건

설계속도 : V=350 km/h

활하중 : KRL 2012 표준열차하중 (복선)

□ 교량받침 검토 (단위 : kN)

기존

구 분	연직력	수 평 력		허용 연직력	허용 수평력		상시SF
		상시	지진시		상시	지진시	
교축직각	4687.1	197.6	684.1	6000	1846.2	2400	9.43
교축방향	4687.1	900	2048.7	6000	1846.2	2400	2.05

DCP 설치 후 (탈선하중 고려)

구 분	연직력	수 평 력		허용 연직력	허용 수평력		상시SF
		상시	지진시		상시	지진시	
교축직각	4687.1	280.6	684.1	6000	1846.2	2400	6.58
교축방향	4687.1	900	2048.7	6000	1846.2	2400	2.05

-Bicon beam L=35m

□ 설계조건

설계속도 : V=200km/h

활하중 : KRL 2012 표준열차하중 (복선)

□ 교량받침 검토 (단위 : kN)

기존

구 분	연직력	수 평 력		허용	허용 수평력		상시SF
		상시	지진시	연직력	상시	지진시	
교축직각	2507.5	79.6	449.7	3000	768	1075.2	9.65
교축방향	2314.8	527.3	757.9	3000	768	1075.2	1.46

DCP 탈선하중 고려

구 분	연직력	수 평 력		허용	허용 수평력		상시SF
		상시	지진시	연직력	상시	지진시	
교축직각	2507.5	112.8	449.7	3000	768	1075.2	6.81
교축방향	2314.8	527.3	757.9	3000	768	1075.2	1.46

-P.S.C BOX GIRDER교 L=40m

□ 설계조건

설계속도 : V=350km/h

활하중 : KRL 2012 표준열차하중 (복선)

□ 교량받침 검토 (단위 : kN)

기존

구 분	연직력	수 평 력		허용	허용 수평력		상시SF
		상시	지진시	연직력	상시	지진시	
교축직각	6697.9	618.8	1404.7	8000	3076.9	4000	4.97
교축방향	6697.9	1280	3571.9	8000	3076.9	4000	2.4

DCP 탈선하중 고려

구 분	연직력	수 평 력		허용	허용 수평력		상시SF
		상시	지진시	연직력	상시	지진시	
교축직각	6697.9	701.8	1404.7	8000	3076.9	4000	4.37
교축방향	6697.9	1280	3571.9	8000	3076.9	4000	2.4

-하로형 아치교 L=80m

□ 설계조건

설계속도 : V=350km/h

활하중 : KRL 2012 표준열차하중 (복선)

□ 교량받침 검토 (단위 : kN)

기존

구 분	연직력	수 평 력		허용 연직력	허용 수평력		상시SF
		상시	지진시		상시	지진시	
교축직각 방향	10538.5	730	1280.1	12000	2769.2	3600	3.79
교축방향	10538.5	1349.3	2437.8	12000	2769.2	3600	2.05

DCP 탈선하중 고려

구 분	연직력	수 평 력		허용 연직력	허용 수평력		상시SF
		상시	지진시		상시	지진시	
교축직각	10538.5	813	1280.1	12000	2769.2	3600	3.41
교축방향	10538.5	1349.3	2437.8	12000	2769.2	3600	2.05

- 소결

▪ DCP 에 작용하는 탈선하중에 상시 교축직각방향 하중은 증가하지만, 받침의 수평방향 용량 (허용수평력)은 지진하중에 의해 결정되며 상시의 수평력은 여유가 많아 DCP 설치 후 추가적인 탈선하중을 고려하더라도 교량받침에 작용하는 직각방향 수평력은 허용수평력 이내임을 알 수 있었다.

다. 일탈방호시설의 매개변수 해석 및 인터페이스(궤도, 교량) 기술검토

(1) 3차년도 연구수행 방향

(가) 기술요구사항

▪ 궤간 내 설치하는 일탈방호시설 방식 아래 그림과 같이 다시 철근콘크리트 방식(1안), 스틸프레임방식(2안), 강합성콘크리트(SRC)(3안), 그리고 탈선방지레일과 케미컬앵커방식(4안)으로 나눌 수 있고 그림 2.1.3.1과 같이 세부검토를 하였다. 3차년도 연구에서는 1안에 대해 설계, 구조안정성 검토, 경제성검토, 정밀구조해석, 기본 및 상세설계와 시작품 성능시험을 완료하였다.

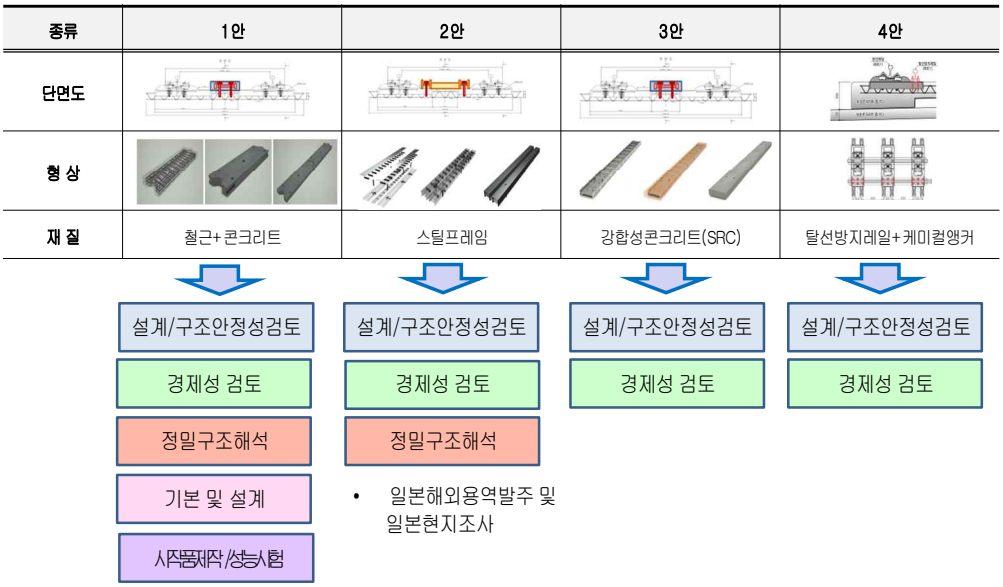


그림 2.1.3.1 대안개념 3, 4안에 대한 상세 검토내역

(나) DCP 기술사양

① 주요검토요건

㉮ DCP 설계 하중

▪ 탈선시 차륜과 접촉을 고려한 기하학적 검토 및 LS-DYNA를 이용한 충돌해석의 결과를 통하여 단면을 500×140mm으로 결정하였다. 2차년도와 3차년도 연구에서 높이 140mm(패널 125mm, 하부충전층 15mm)의 DCP와 차륜과의 LS-DYNA 충돌해석 결과를 재검토하여 열차의 각 차륜과 DCP의 충돌하중 값을 필터링하고 최대 Eroded 에너지를 고려하여 최종 충돌하중은 165.6kN으로 설계하중이 제시되었다.

㉯ DCP 높이

▪ DCP를 설계 제작함에 있어 철도의 건설기준에 관한 규정(제13조)에 따라 건축한계 레일부(수직 및 수평방향) 및 차량한계 레일부(수직방향) 검토가 필요하며, 차량의 하부와의 여유 공간을 확보해야 한다. KTX의 Power Car Motor Bogie와 Axle Gear Reduction Unit 사이의 공간을 검토한 결과 145mm로 확인되었고 대차하부 공간과 DCP 높이의 인터페이스를 고려하여 패널의 점유단면 영역을 400mm(D)×200(h)mm에서 500mm(D)×140(h)mm로 변경하였다. 충전층까지 포함한 높이는 140mm가 되어야 하므로 최종적으로 DCP 패널단면은 500mm×125mm, 충진층 15mm로 설정하였다. 이 높이는 DCP 설치에 따른 신호설비 ATP, ATS, 도플러 레이더의 인터페이스에 대한 영향에 신호간섭의 영향에 영향을 미쳐서는 안 된다.

㉰ 패널 전체 형상 및 연결부

▪ 기존 교량에 급속 시공과 유지보수의 편의를 위해 DCP는 사전 제작형 콘크리트 구조물로 철도교량의 TCL에 설치되도록 하였다. 사전 제작된 DCP는 TCL에 후설치 앵커를 이용하여 설치되며, DCP를 TCL에 설치함에 있어 철근 간섭, 운반 등 시공성과 구조적 안전성을 고려하여 앵커 설치 위치의 결정이 필요하다. 국내 철도교량 구간 콘크리트 궤도가 6~8m 길이를 갖는 슬래브 세그먼트가 불연속으로 설치되어 있는 것을 고려하여 DCP의 길이는 3분할(3.0m, 3.5m, 4.0m) 제작하는 것으로 확정하였다. DCP 패널은 프리캐스트, TCL 연속부 위에 놓여진 각 DCP의 연결부는 모르타르 시공, TCL 분리부 위에 놓여진 각 DCP의 연결부는 탄성폴리머, TCL 분리부의 DCP의 연결부는 우레탄 폼시공을 하는 것으로 최종 확정했다.



그림 2.1.3.2 DCP 형상과 내부 철근

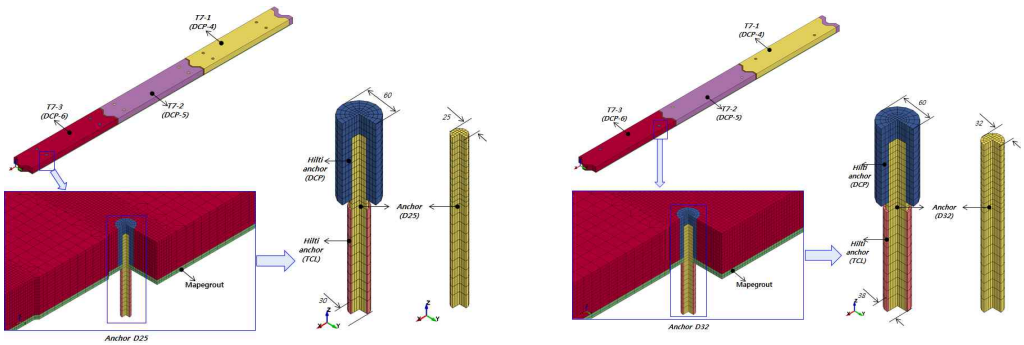
(2) DCP 설계변경에 따른 매개변수 해석

(가) 해석개요

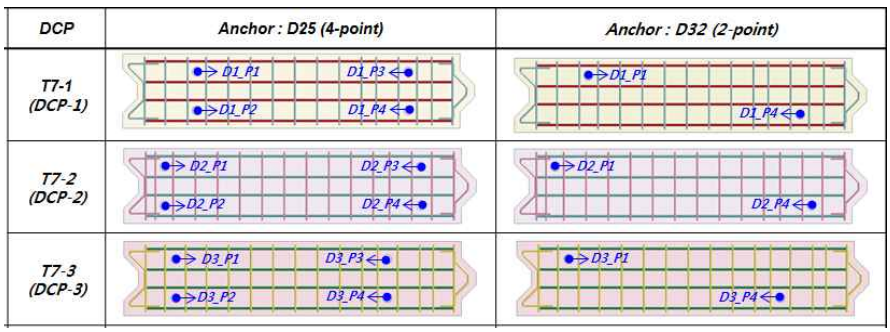
▪ 열차 및 콘크리트 궤도와의 인터페이스로 인해 변경된 최종 DCP설계변경안에 대한 검토를 수행하기 위하여, TCL층에 앵커 2개(D32)와 앵커 4개(D25)으로 나눠진 앵커모델에 대해 검토하였으며, 평균화된 182kN(165.6kN의 1.1배)의 충격하중이 6개 지점의 가력 하중 면에 동일하게 가해질 수 있는 압력을 계산하여 충격하중으로 적용하여 해석을 수행하였다. 각 충돌위치에 따른 취약한 부분을 검토하여, 두 가지 종류의 앵커조건에서 구조적 성능을 알아보고자 한다.

표 2.1.3.1 철도교량 열차 일탈방호 시설 충격해석 조건

	앵커 모델	하중 가력점	충격하중
Case1	D25 & D32	T7-2 좌측앵커 (275)	182 kN (165.6 kN의 10% 할증)
Case2		DCP-DCP 연결접합부 (TCL연속부)	
Case3		T7-3 좌측앵커 (350)	
Case4		T7-1 좌측앵커 (500)	
Case5		DCP-DCP 연결접합부 (TCL분리부)	
Case6		DCP 중앙	



(a) 앵커(D25) DCP 유한요소 모델 (b) 앵커(D32) DCP 유한요소 모델



(c) 앵커별 DCP의 형상

그림 2.1.3.3 DCP 앵커에 따른 모델링 조건

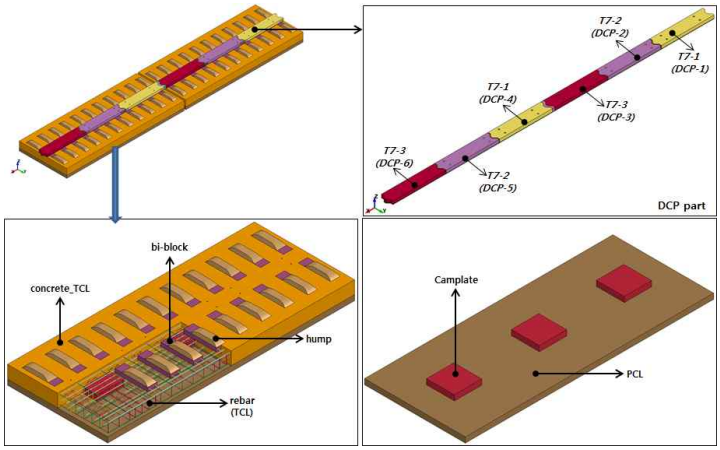
(나) DCP 설계변경에 따른 해석 모델링

▪ 본 연구에 사용되는 유한요소 모델은 Rheda 2000 콘크리트 궤도의 교량구간 TCL과 PCL의 7m 제원을 바탕으로 Bi-block, hump, TCL, PCL, 마페그라우트, 철근 콘크리트 DCP, 4개의 앵커(D25) 또는 2개의 앵커(D32) 및 힐티 케미컬앵커를 3D 요소

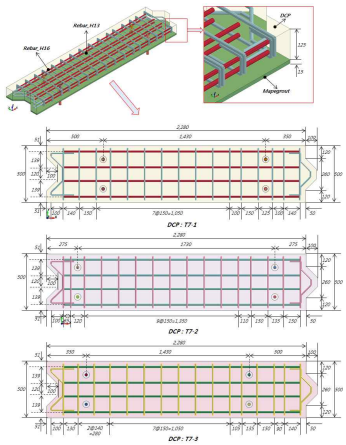
로 모델을 구성하였다.

▪ 본 연구에 사용되는 두 가지 종류의 앵커(D25, D32)가 적용된 DCP들 간의 연결이나 또는 DCP와 TCL을 연결하기 위해 사용되는 마페그라우트와 탄성폴리머의 경계면에서 같은 거동을 하다가 특정한 설계하중 이상으로 하중이 발생할 때 접합조건이 풀린 후에 구조물 간에 접촉이 될 수 있는 조건을 정의하기 위해서 *CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_ TIEBREAK을 사용하였으며, 접합이 풀리는 조건은 경계 면에서 발생하는 수직방향의 항복응력과 수평방향의 항복응력으로, 본 해석에서는 각각 1.0 MPa과 0.2 MPa의 조건을 적용하였다.

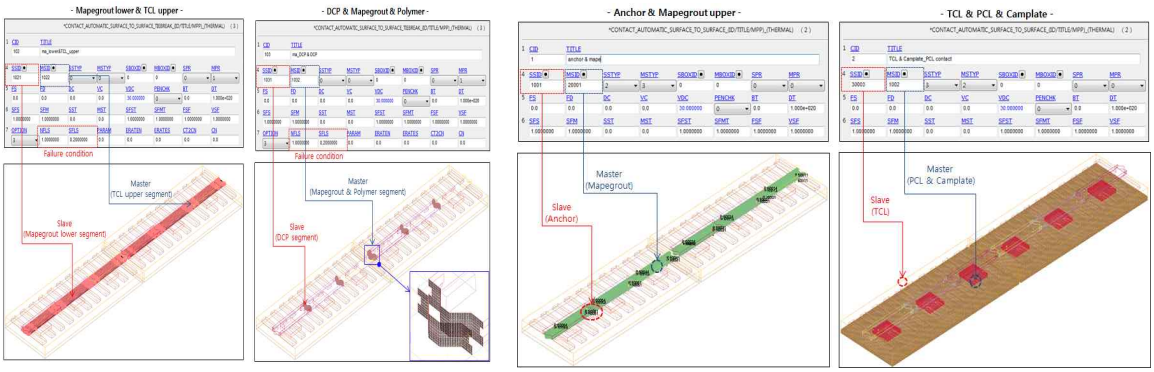
▪ TCL 상부에 있는 마페그라우트 간의 접촉조건을 *CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE을 사용하여 상호간의 접촉을 적용하였으며, PCL, camplate와 TCL간에 접촉조건도 *CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE을 사용하여 상호간의 접촉을 적용하였다.



(a) 철근 콘크리트 DCP 유한요소 모델



(b) DCP 유한요소 모델



(c) 콘크리트 DCP모델의 접합조건

그림 2.1.3.4 DCP설계변경에 따른 모델링

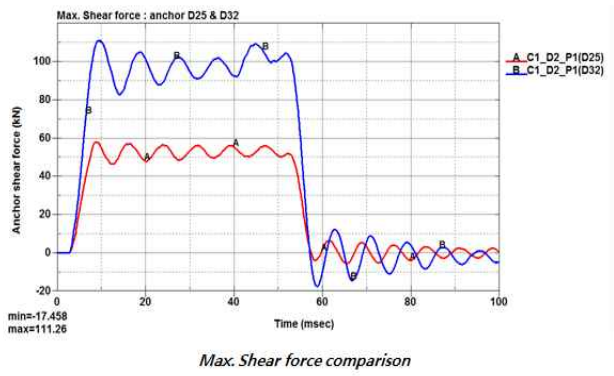
(다) DCP 충돌위치 및 앵커 변수해석 결과

▪ 두 종류의 앵커를 갖고 있는 일탈방호 시설에 6개의 하중 가력점에 충격하중을 적용했을 때 DCP모델의 앵커의 최대 전단하중을 검토한 결과, 앵커에 작용하는 가장

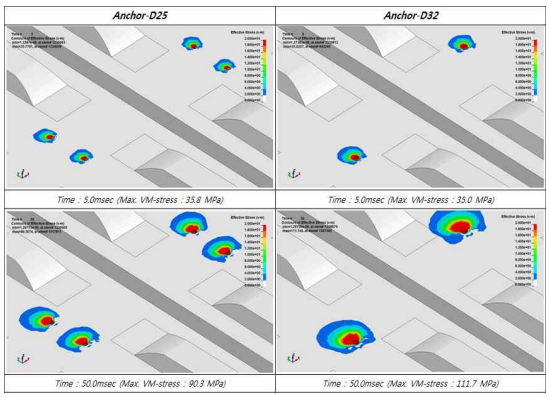
큰 전단하중이 발생하는 앵커는 DCP(T7-2)구조물의 좌측앵커(275)부분에 하중을 적용한 Case 1에서 두 가지 종류의 DCP모델에서 동일하게 최대 전단하중 및 최대 응력이 발생하였다. 최대 전단 하중 결과를 비교해 봤을 때 4개의 앵커(D25)모델에 비해서 2개의 앵커(D32)로 결박되어 있는 DCP모델에서 2배정도 큰 값의 전단하중이 발생하는 것을 확인하였다.

▪ DCP-DCP연결접합부(TCL분리부)에 적용한 CASE 5의 경우, TCL 콘크리트 주변에 가장 큰 응력이 발생하였으며, 2개의 앵커(D32)에 비해 4개의 앵커(D25)에서 응력이 분산됨을 확인할 수 있으나, 이 또한 콘크리트가 파괴되는 것을 확인하였다.

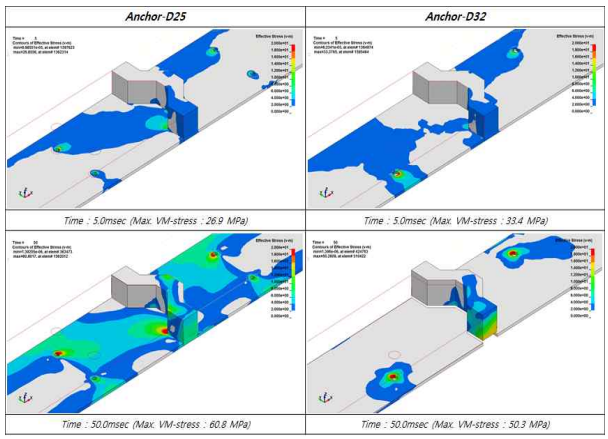
▪ CASE 5의 경우, 마페그라우트와 폴리머에 가해지는 응력이 제일 크게 발생하였으며, 4개의 앵커(D25)의 경우에는 2개의 앵커(D32)에 비해 응력이 크게 분산되나, 파괴되는 것을 확인할 수 있으며, 소성변형의 경우에는 2개의 앵커(D32)에서 보다 앵커에 집중적으로 변형되는 것을 확인하였다.



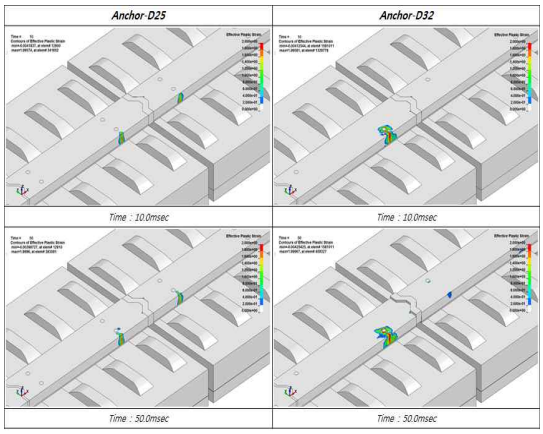
(a) DCP 모델 앵커의 최대 전단하중시간이력



(b) CASE 5 -TCL앵커주변 응력



(c) CASE 5의 마페그라우-폴리머 응력



(d) CASE 5 소성변형

그림 2.1.3.5 앵커에 따른 충돌해석 결과 분석

라. 실험을 통한 성능도출

(1) DCP 구조성능실험

(가) 2차년도 DCP 구조성능시험

① 실험 개요

▪ 본 실험의 대상이 되는 DCP는 기존 철도교량의 콘크리트 궤도 슬래브(track concrete layer, 이하 TCL)에 적용하기 위해 개발된 프리캐스트 콘크리트 구조 형식이다. 사전 제작형 프리캐스트 콘크리트 DCP는 교량의 TCL에 후 설치 앵커(post-installed anchor)를 이용하여 연결된다. 이러한 형식의 구조물은 DCP-TCL 간 연결부의 일체성 확보가 무엇보다 중요하다. 그러므로 본 연구에서는 철도교량 콘크리트 궤도 슬래브와 연결된 프리캐스트 콘크리트 DCP-TCL 결합 시험체의 구조적 건전성 및 내력을 평가하고자 정적 실험을 수행하였다.

② 실험체 설계 및 제작

▪ 본 실험에서 사용된 프리캐스트 콘크리트 DCP는 호남고속철도 2공구 교량 직선 구간에 적용된 Rheda 2000 콘크리트 궤도 슬래브 TCL 6.9m 세그먼트를 적용 대상으로 시공·운반을 고려하여 2.1.4.1과 같이 3개로 분할 제작되었다.

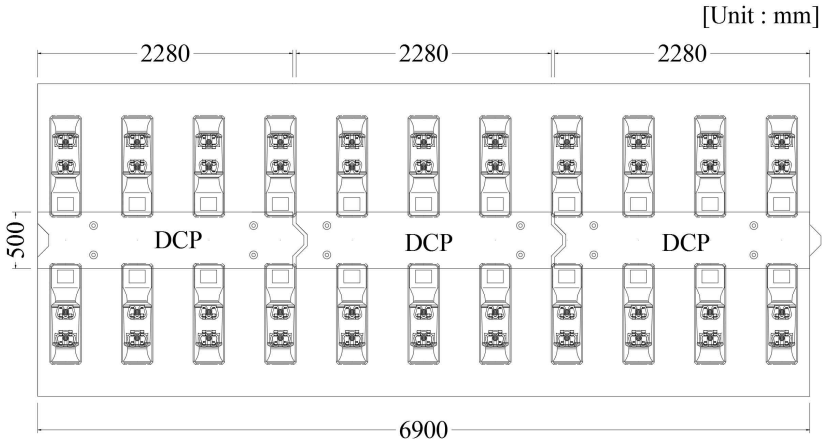
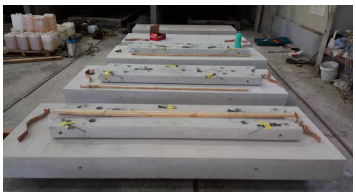


그림 2.1.4.1 콘크리트 궤도 슬래브 TCL 6.9m 세그먼트

▪ 실험을 위해 DCP는 실제 교량에 적용되는 크기로 제작하였으며, TCL은 길이 3,000m, 폭 1,000mm, 두께 250mm로 제작하였다. 그림 2.1.4.2는 시험을 위한 DCP, TCL의 시험체 제작 과정을 보여주고 있다. DCP와 TCL은 결합시 DCP하부 충진재로 유동성 및 동절기 조기강도발현, 수축량과 충진층 15mm을 고려하여 무수축 그라우트를 적용하였다. 실험을 위해 DCP-TCL 결합 시험체는 각 시험별 각각 3개씩 제작하였다.


TCL패널 위 DCP 거치


TCL 앵커 홀 천공 및 청소


앵커부 게이지 부착


앵커 삽입 및 케미컬 주입


DCP+TCL
모르타르 타설 및 마감


DCP+TCL 측면 거푸집
제거와 시험체 제작 완료

그림 2.1.4.2 실내 정적거동 평가 시험용 시험체 제작 과정

③ 시험 방법

▪ 고속철도의 열차가 교량상에서 탈선 이후 차륜충돌 시 DCP와 TCL-DCP 경계면 앵커의 전단 저항 능력이 설계에 의한 하중을 충분히 버틸 수 있는지 검토하기 위해 다음과 같은 실험을 수행하였다.

- DCP-TCL 결합체 구조성능 평가 시험: DCP-TCL 결합 시험체의 전단과 모멘트에 대한 구조성능 평가 필요, 개발 DCP는 양단 고정의 순경간이 깊이의 4배 이하인 부재로 강도는 전단에 지배, 전단성능 평가 수행 필요, DCP를 TCL에 앵커 연결(양단 고정), TCL은 실험실 바닥면에 고정, 패널의 수평방향에 대한 전단성능을 파악하기 위해 그림 2.1.4.3과 같이 DCP의 중앙부 직각 방향으로 가력

- 후설치 앵커를 적용한 DCP 앵커 전단성능 평가 시험: TCL와 후설치 앵커를 적용한 DCP의 앵커 전단실험 수행 필요, DCP를 TCL에 앵커 연결(양단 고정), TCL은 실험실 바닥면에 고정, 앵커의 수평방향에 대한 순수 전단성능을 파악하기 위해 그림 2.1.4.4과 같이 DCP(앵커 매립부)의 직각 방향으로 가력

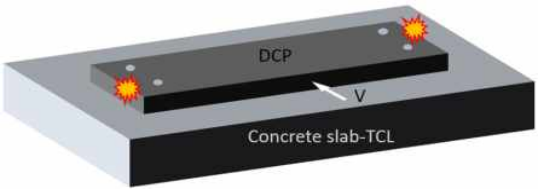


그림 2.1.4.3 DCP-TCL 구조성능 평가

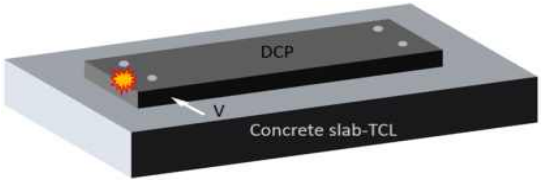


그림 2.1.4.4 DCP 앵커 전단성능 평가

▪ 그림 2.1.4.5는 DCP 전단성능 평가 시험을 위한 시험 set-up이다. 하중 재하는 2,000kN 용량의 hydraulic actuator를 사용하였다. 현장과 동일한 방법으로 연결된 DCP-TCL 결합 시험체의 TCL 부는 실험실 바닥에 고정되었다. 탈선시 열차의 차륜이 DCP에 접촉하여 하중이 가해지는 것을 묘사하기 위해 강재 가력지그(jig)를 제작하여 실험을 수행하였다. 지그는 하중에 의해 변형이 발생되지 않도록 충분한 강성을 갖도록 제작하였다. 그림 2.1.4.6은 각각 DCP-TCL 구조성능 평가와 DCP 앵커 전단성능 평가 전경이다.

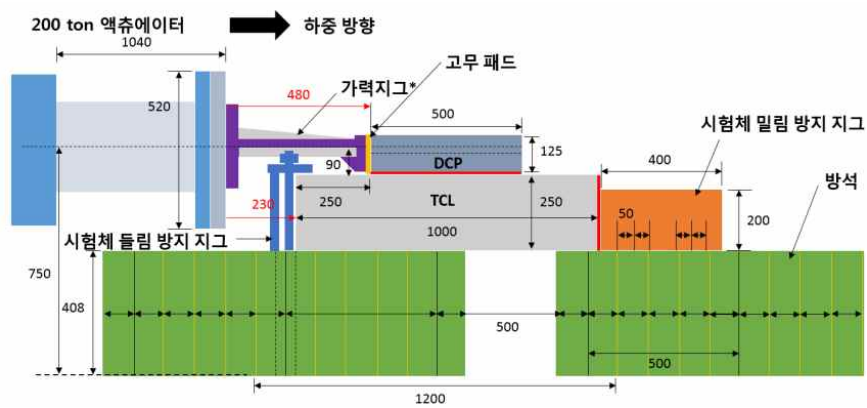


그림 2.1.4.5 DCP-TCL 구조성능 평가 시험을 위한 시험 Setup



(a) (b)

그림 2.1.4.6 시험 전경 (a) DCP-TCL 구조성능 평가, (b) DCP 앵커 전단성능 평가

▪ 두 시험 모두 분당 2mm의 변위 제어(displacement control) 방식으로 하중을 가하였고, DCP가 파괴될 때까지 하중을 재하하여 시험체에 가해지는 최대 하중-변위를 측정하고 DCP, TCL-DCP 경계면, 앵커의 파괴모드를 기록하였다. 시험시 수평방향의 변위로 인해 TCL의 밀림과 들림을 방지하기 위하여 그림처럼 지그를 사용하여 고정하여 시험을 수행하였다.

▪ DCP-TCL 결합 시험체에 가해지는 하중으로 인한 정적 성능을 평가하기 위해 그림 5와 같이 DCP, TCL 시험체에 변형률계 및 변위계를 설치하였다. 계측 항목은 아래와 같다.

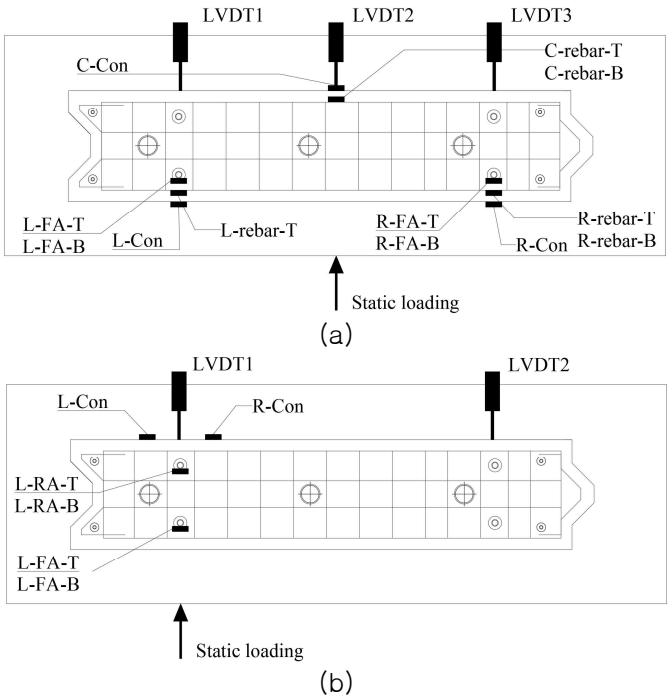


그림 2.1.4.7 DCP 정적성능검증 시험 변형률계/변위계 설치 위치도 (a) 구조성능, (b) 전단성능

④ 실험 결과 및 분석

㉮ DCP-TCL 구조성능 평가

▪ 그림 2.1.4.8은 DCP-TCL 구조성능 평가 시험체 3개의 하중-변위 그래프를 비교하고 있다. 실험 결과 시험체-02(C-02)를 제외하고는 설계 요구성능(165.6kN)을 만족하는 것으로 나타났다. DCP와 TCL 경계면 분리 후 그림과 같이 하중의 증가량이 감소하였다. DCP 중앙에 설치된 strain gauge 데이터를 확인한 결과 초기에 DCP 중앙에서 휨인장 응력을 받다가 양쪽 고정단의 앵커 변형이 발생함에 따라 그 값은 점차적으로 하중의 크기와 비례하게 감소하는 추세를 보였다. 이후 앵커부 측면에 설치한 변형률이 크게 측정되었으며, 그림 2.1.4.10과 같이 요구성능을 만족하기 전에 DCP 양쪽 앵커부 주변의 콘크리트와 철근이 버티지 못하면서 최종적으로 모멘트로

인한 휨파괴가 일어났다. 표 2.1.4.1에는 실험 결과를 정리하였다.

표 2.1.4.1 실험결과 정리

No.	최대 하중 [kN]	최대하중 변위(LVDT-1) [mm]
시험체-01 [C-01]	203.1	6.11
시험체-02 [C-02]	162.4	9.40
시험체-03 [C-03]	198.4	8.15

※ 변형률 부호 규약 : + 인장력, - 압축력

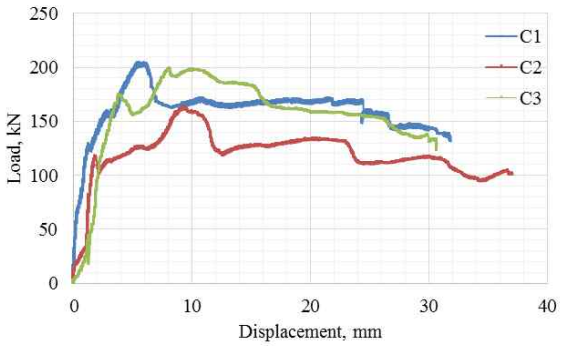


그림 2.1.4.8 DCP-TCL 구조성능 하중-변위 그래프

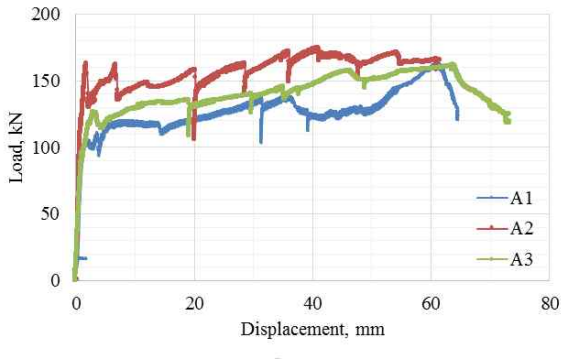


그림 2.1.4.9 DCP 앵커 전단성능 평가 하중-변위 그래프



그림 2.1.4.10 DCP-TCL 구조성능 평가: 시험체 주요 파괴 형상

㈏ DCP 앵커 전단성능 평가

▪ 그림 2.1.4.9는 DCP 앵커 전단성능 평가 시험체 3개의 하중-변위 그래프를 비교하고 있다. 실험 결과 그림 2.1.4.9와 같이 시험체 - 02(A-02)를 제외하고는 모두 설계요구성능(165.6kN)을 만족하지 못하는 것으로 나타났다. 초기 하중-변위 곡선은 선형으로 증가하였으며, DCP와 TCL 경계면이 분리되면서 하중의 증가량이 감소하였다. 앵커에 힘을 받으면서 TCL층에 힘이 전달됨을 strain gauge를 통해서 확인할 수 있었다. 전달된 힘은 앵커의 변형 증가와 앵커 주변 콘크리트와 철근의 파괴가 일어나면서 더 이상 커지지 않음을 확인할 수 있었다(그림 2.1.4.11). 표 2.1.4.2에는 실험 결과를 정리하였다.



그림 2.1.4.11 DCP 앵커 전단성능 평가: 시험체 주요 파괴 형상

표 2.1.4.2 실험결과 정리

No.	최대 하중 [kN]	최대하중 변위(LVDT-1) [mm]
시험체-01 [A-01]	164.8	60.84
시험체-02 [A-02]	174.1	41.01
시험체-03 [A-03]	161.4	63.98

※ 변형률 부호 규약 : + 인장력, - 압축력

⑤ 결론

▪ 본 연구에서는 개발된 일탈방호시설의 정적 거동 성능을 시험적으로 평가하였다. 이를 위해 DCP와 TCL을 각각 제작하여 후설치 앵커를 이용하여 DCP를 TCL에 결합하였으며, DCP와 TCL-DCP 경계면 앵커의 전단 저항 능력이 설계에 의한 하중을 충분히 버틸 수 있는지 검토하였다. 연구 결과로 부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

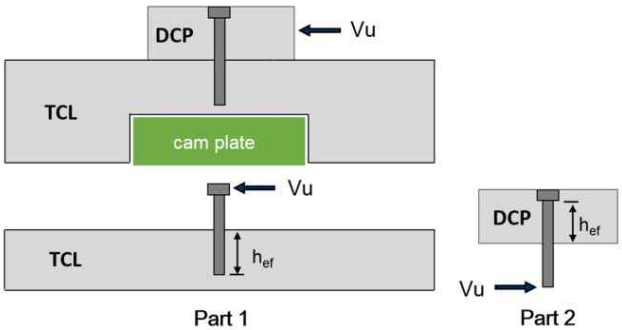


그림 2.1.4.12 DCP-TCL 앵커 설계

▪ 개발된 시험체의 두 시험에 대해 개발된 DCP와 DCP-TCL 결합체는 요구성능을 만족하지 못하는 것으로 나타났다. DCP 앵커 전단성능 평가에서 요구성능을 만족하기 전에 앵커 주변의 콘크리트와 철근이 충분히 저항하지 못하는 것으로 나타났다. 특히, DCP 구조성능 평가에서 TCL에 앵커로 양단 고정된 DCP는 앵커부에서 모멘

트로 인한 휨파괴가 발생하였다. 이에 대한 DCP의 구조 성능 보강으로 앵커 연단거리 확보 및 주철근 보강이 필요하며, 이를 통해 앵커에서 파괴가 선행되어 연성적인(ductile) 거동을 확보할 수 있도록 설계 수정이 필요하다. DCP-TCL의 결합을 위한 앵커 설계 시 그림 2.1.4.12와 같이 DCP(Part 2), TCL(Part 1) 모두 검토 하여야 하고, DCP 제작과 DCP를 TCL에 설치 시 결함과 파손에 대한 주의가 요구된다.

(나) 3차년도 DCP 구조성능시험

① 실험 개요

▪ 2차년도 정적 거동 성능 평가 결과 기존의 DCP와 후설치 앵커를 사용하여 연결된 DCP-TCL 결합체는 설계하중을 충분히 버티지 못하는 것으로 나타났다. 3차년도 DCP 설계의 수정 보완으로 DCP의 구조성72능과 DCP-TCL 결합체의 앵커 성능이 보강되었으며, 이에 본 연구에서는 콘크리트 DCP-TCL 결합 시험체의 구조적 건전성 및 내력을 평가하고자 정적 실험을 수행하였다.

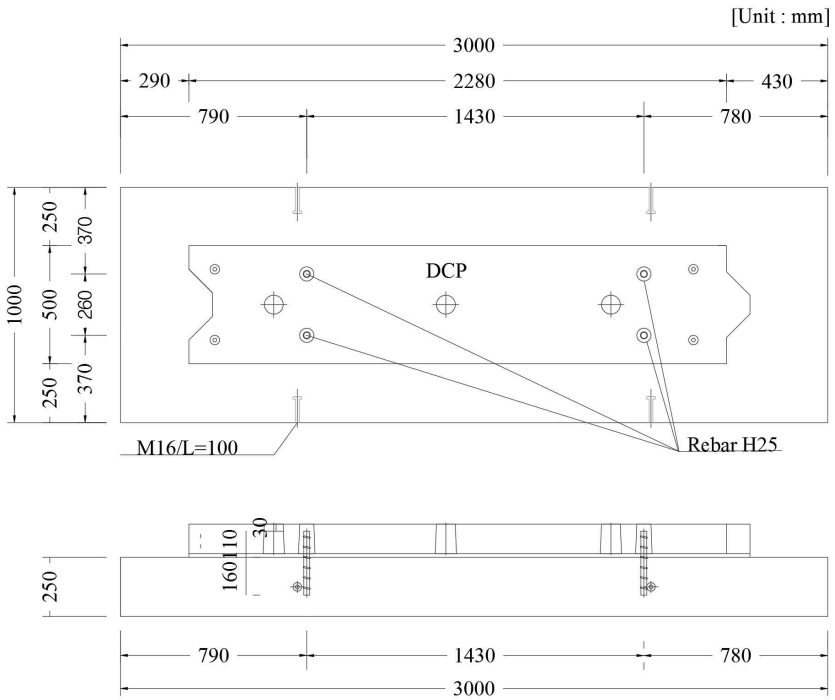


그림 2.1.4.13 DCP-TCL 결합 실험체의 제원

② 실험체 설계 및 제작

▪ 철도교량에서 열차 탈선 시 차륜의 DCP 충돌로 인해 TCL에 전달되는 하중 시스템을 고려하여 프리캐스트 DCP와 TCL 간 접합은 앵커, 케미컬앵커, 무수축 모르타르를 이용하여 시공하였다. DCP는 실제 교량에 적용되는 크기인 길이 2,280mm, 너비 500mm, 두께 125mm로 패널 형태로 제작하였다. TCL은 실제 교량에 적용된 것과 동일한 길이 3,000mm와 두께 250mm를 적용하였으며, 운반과 실험환경을 고려하여 너비는 1,000mm로 제작하였다. 정적 실험에서 사용된 DCP-TCL 결합 실험체의 제원은 그림 2.1.4.13과 같다.

▪ DCP는 TCL에 H25 앵커 4개를 이용하여 고정될 수 있도록 설계·제작되었으며, DCP와 TCL의 앵커 매입 깊이는 각각 110mm, 160mm이며, DCP, TCL 콘크리트의 설계압축강도(fck)는 각각 35MPa, 30MPa이다. DCP와 TCL은 결합 시 DCP 하부 충진재로 유동성 및 동절기 조기 강도 발현, 수축량과 충진층 15mm을 고려하여 무수축 그라우트(28일 압축강도 60MPa)를 적용하였다. 후설치 앵커 시공에는 고강도 이형철근(H25, SD400)과 케미컬앵커를 사용하였다.

③ 실험 방법

▪ DCP-TCL 결합 실험체의 휨과 전단에 대한 구조성능을 평가하고자 DCP-TCL 결합 시험체를 대상으로 최대 휨모멘트가 작용하는 DCP의 중앙점(DCP loaded at center point, C)과 앵커 연결부(DCP loaded at anchor connection, A)에 정적하중을 가하는 실험을 수행하였다. Table 1에는 각 실험 별 수량과 명칭을 나타내었다. H25-a-No, 여기서 a는 가력 위치(Center, Anchor), No는 시험체 수를 나타낸다.

표 2.1.4.3 시험체 수량

Test method	Specimen	Number of specimens
DCP loaded at center point(C)	H25C-01	3
	H25C-02	
	H25C-03	
DCP loaded at anchor connection(A)	H25A-01	4
	H25A-02	
	H25A-03	
	H25A-04	



그림 2.1.4.14 DCP-TCL 결합체 구조성능 평가 시험 전경

▪ 철도에서 열차 차륜의 DCP 충돌에 대한 재하 형태의 관련 규정이 없다. Yi et al. (2018)은 열차 충돌하중에 대한 DCP의 해석적 거동 검토를 위해 탈선으로 TCL 상부에 위치한 차륜이 DCP에 접촉할 수 있는 면적(55,408mm2)을 환산하여 시험체에 하중을 재하 하였다. 그러나 이러한 접촉 면적을 본 실험에 적용할 경우 DCP-TCL 사이 그라우트 높이 10mm와 DCP 높이 125mm로 인해 차륜이 DCP에 접촉하는 너비는 약 410mm로, 이러한 하중 재하 폭은 너무 넓어 DCP의 휨거동을 구속할 가능성이 있다. 그러므로 본 실험의 목적은 휨과 전단에 대한 DCP-TCL 결합 시험체의 구조적 건전성 및 내력을 평가하는 것이다. 이 때문에 휨 거동을 구속하지 않도록 DCP와 동일한 높이와 DCP 높이의 2배의 폭을 가지는 강재 지그를 제작하여 실험을 수행하였다.

▪ 지그는 설계하중 하에서 항복에 도달하지는 않는 상태에서 DCP에 밀착되어 하중을 전달할 수 있도록 충분한 강성을 갖도록 제작되었다. 실험 중에는 지그를 통한 실험체의 균일한 하중 전달을 위해 지그와 시험체 사이에 15mm 고무를 사용하였다.

▪ 두 시험 모두 하중이 DCT과 TCL 면으로 작용하기 때문에 DCP-TCL 결합 시험체의 TCL은 앵커의 거동에 영향을 미치지 않게 실험실 바닥에 고정하여 밀림을 방지하였다. 또한, DCP의 들림으로 인해 연직 방향으로 앵커에 인장을 발생시킬 수 있어 특수 제작된 브라켓을 이용하여 시험체의 들림을 최소화할 수 있도록 하였다. 그림 2.1.4.14는 DCP-TCL 결합 시험체의 구조성능을 평가하기 위한 실험 전경이다.

▪ 시험체의 정적하중에 대한 거동 특성 분석을 위해 앵커와 DCP 주요부위에 철근과 콘크리트 변형률 게이지 그리고 변위계(LVDT)를 설치하였다. 변위계와 변형률 게이지의 상세 위치는 그림 2.1.4.15와 같다. 총 7개의 시험체를 제작하여 실험을 수행하였다. 모든 시험은 분당 2mm의 변위 제어(displacement control) 방식으로 하중을 가하였고, DCP가 파괴될 때까지 정적하중을 가하여 시험체에 가해지는 최대 하중과 변위를 측정하였다. 각 시험체의 파괴형태를 파악하기 위하여 하중 단계에 따라 균열 진전 상태를 관찰하였다.

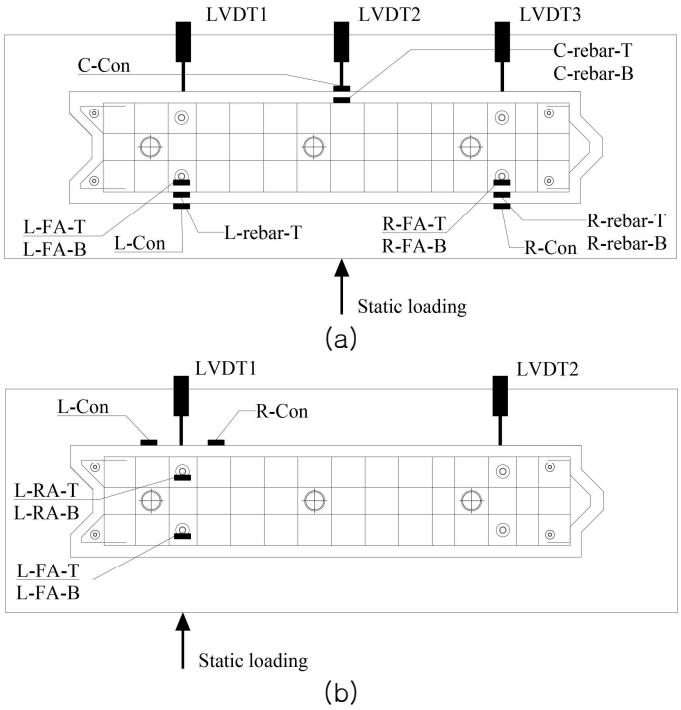


그림 2.1.4.15 DCP 정적성능검증 시험 변형률계/변위계 설치 위치도 (a) 구조성능, (b) 전단성능

▪ 시험에 사용된 가력장비는 MTS사의 500kN Dynamic Actuator를 사용하였고 데이터 취득은 일본 동경측기사 제품인 TDS-601 데이터로거가 사용되었다. 변위측정 장비로는 50mm, 100mm 용량의 LVDT가 사용되었으며, 철근과 콘크리트의 변형률을 계측할 수 있는 변형률 게이지(Strain Gauge)를 사용하였다.

④ 실험 결과 및 분석

㉮ DCP-TCL 구조성능 실험(DCP 중앙점 가력)

▪ 하중-변위

- 그림 2.1.4.16은 DCP-TCL 실험체의 구조성능 평가를 위해 DCP의 중앙에 가력한 각 시험체의 하중-변위 곡선이다. 여기에서 변위는 각 DCP의 중앙에서 측정된 변위이다. 표 2.1.4.4에는 각 실험체의 최대 하중 값인 극한하중을 정리하였다. 시험체의 평균 최대하중은 352.7kN으로 나타나 모든 실험체가 설계하중(165.6kN)을 만족하는 것으로 나타났다.

표 2.1.4.4 실험결과 정리

Test method	Specimen	Ultimate strength(kN)	Mean ultimate strength(kN)
DCP loaded at center point	H25C-01	322.3	352.7
	H25C-02	349.1	
	H25C-03	386.9	
DCP loaded at anchor connection	H25A-01	391.1	368.2
	H25A-02	342.1	
	H25A-03	452.9	
	H25A-04	286.6	

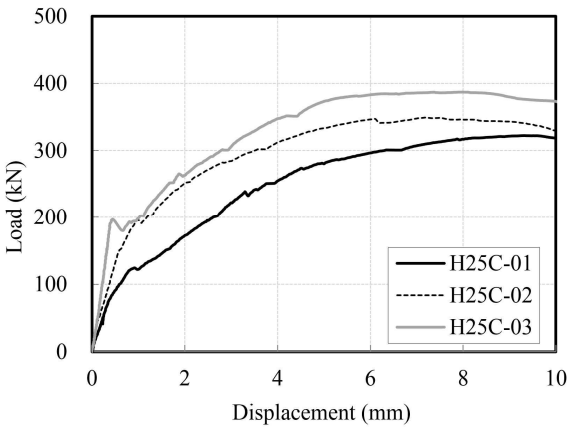


그림 2.1.4.16 하중-변위(DCP 중앙) 관계

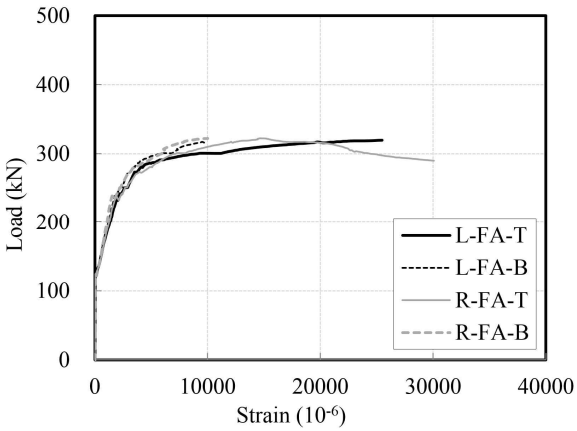


그림 2.1.4.17 앵커의 하중-변형률 관계(H25C-01)

- 그림에서 보는 바와 같이 모든 시험체가 하중이 증가함에 따라 변위가 증가하는 것으로 나타났으며, 설계하중(165.6kN) 상태에서의 DCP 중앙점의 변위는 모두 1.8mm 이내로 나타났다. 앵커 설치 시 그라우트의 재료 상태와 크라우트 채움, 그리고 앵커홀 크기 등을 최적화할 경우 철도 차량의 충돌로 인한 DCP의 횡방향 변위를 최소화할 수 있을 것으로 판단된다.

▪ 앵커의 하중-변형률

- DCP-TCL 결합체의 구성 요소 중 결합 구조성능 확보를 위해 가장 큰 역할을 담당하는 요소는 앵커이다. 따라서 하중 증가에 따른 앵커의 변형률 이력을 바탕으로 결합 시험체의 거동 특성을 분석하였다. 그림 2.1.4.17은 H25C-01 시험체의 양단 고정부 전면 앵커의 접합면 위/아래에서 각각 측정된 하중-앵커 변형률 관계 곡선이다. 그림으로부터 양쪽 앵커에서 측정된 초기 하중-앵커 변형률이 거의 유사한 것으로 나타났다. 또한, 121.4kN 까지는 앵커의 변형이 거의 발생하지 않았지만, 121.4kN 이후 SD400 철근 앵커의 변형률은 항복변형률인 0.002를 초과하여 계속해서 변형률이 증가하였다. 이러한 앵커의 변형률 결과로 볼 때, 121.4kN의 하중

에서 DCP-TCL 경계면이 분리된 후 DCP에 작용하는 하중이 앵커를 통해 TCL로 전달하는 것으로 판단할 수 있으며, 앵커의 항복 전에 목표 성능(165.6kN)을 만족하는 것으로 나타났다.

▪ 균열형상

- 그림 2.1.4.18은 극한하중 상태에서 DCP-TCL 결합 실험체(H25C-01)에 발생한 균열의 양상을 보여주고 있다. 초기 균열은 DCP-TCL 접합면에서 발생되었으며, 하중이 증가됨에 따라 DCP와 TCL 접합면이 분리되었다. 이후 DCP 중앙부 재하점의 최대 휨모멘트가 작용되는 구간의 휨인장측 연단에서 균열이 발생하였으며, 이러한 휨인장균열들은 하중 증가와 함께 사인장균열로 발전되어 진전되었다. 최대내력에 이르러 DCP 양단 앵커 고정부의 휨모멘트가 발생하는 인장부 연단 콘크리트 단부에서 파괴가 발생하였으며, 이후 작용 하중이 증가됨에 따라 연결부 앵커의 항복으로 인한 변위 증가로 실험이 종료되었다. 이러한 파괴양상으로 볼 때, 차륜 충돌로 인해 DCP 콘크리트 연결부의 앵커에 큰 전단력이 작용하기 때문에 앵커 시공에 주의가 요구된다.



그림 2.1.4.18 대표적 파괴 형상

㈏ DCP-TCL 연결부 앵커의 전단 실험

▪ 하중-변위

- 그림 2.1.4.19는 DCP-TCL 연결부 앵커의 구조성능 평가를 위해 DCP-TCL 시험체 연결부에 가력한 각 시험체의 하중-변위 곡선이다. 여기에서 변위는 각 DCP의 가력점 앵커 연결부에서 측정된 변위이다. 각 실험체의 DCP-TCL 최대 하중값인 극한하중은 표 3에 정리하였다. 시험체의 평균 최대하중은 368.2kN으로 나타나 모든 실험체가 설계하중(165.6kN)을 만족하는 것으로 나타났다.

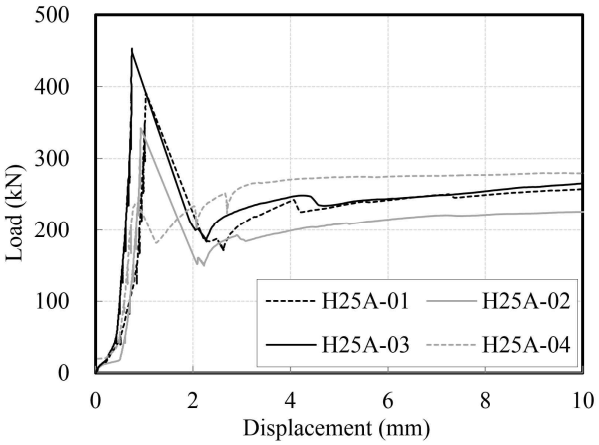


그림 2.1.4.19 하중-변위(앵커 연결부 DCP) 관계

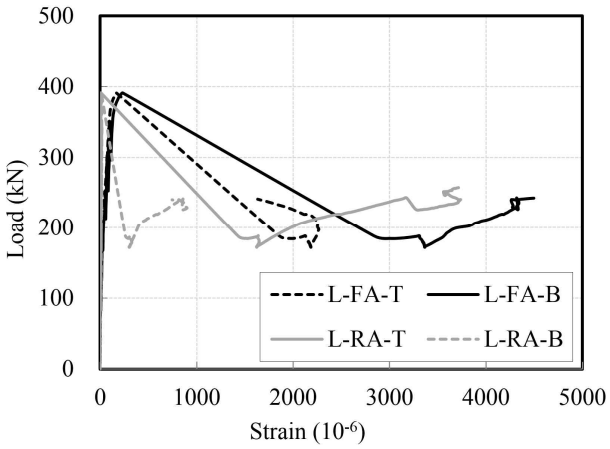


그림 2.1.4.20 앵커의 하중-변형률 관계(H25A-01)

- 그림 2.1.4.19에서 보는 바와 같이 하중 초기부터 극한하중에 이르기까지 하중이 증가함에 따라 변위가 선형으로 증가하는 것으로 나타났으며, 모든 시험체가 극한하중에서 급격히 감소하는 것을 알 수 있다. 또한, 하중 초기 시험체의 밀림과 DCP 앵커홀 채움재 일부의 지압파괴 등으로 인한 슬립 등을 제외한다면 시험체 대부분이 극한하중 상태에서의 DCP-TCL 연결부 변위가 1mm 이내로 나타났다. 이는 앵커와 DCP 앵커홀 주변의 그라우트 접촉면에서 국부적인 그라우트 지압파괴에 의한 것으로 판단된다.

▪ 앵커의 하중-변형률

- 그림 2.1.4.20은 H25A-01 시험체 양단 고정 앵커(전면/후면)의 DCP-DCP 접합면을 중심으로 한 위치(위/아래)에서 각각 측정된 하중-앵커 변형률 관계 곡선이다. 그림으로부터 앵커의 항복 전에 목표 성능의 10% 할증인 182 kN을 만족하는 것으로 나타났으며, 앵커에 발생한 변형률은 극한하중 상태에서도 항복변형률에는 훨씬 못 미치는 비교적 작은 범위였다. 하중 초기에는 전면/후면 앵커에 하중이 유사하게 분산되었지만, 하중이 증가함에 따라 가력점과 가까운 앵커의 변형이 더 크게 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 전면 앵커의 경우 180kN 이후 앵커의 변형률은 하중에 비례하여 선형으로 급격히 증가하였다. 이러한 앵커의 변형률 결과로부터, 180kN의 하중에서 DCP-TCL 접합면이 분리되어 하중이 증가함에 따라 가력점과 가까운 앵커에 변형이 집중되었고, 가장자리와 가까운 모르타르와 콘크리트에 지압 파괴가 발생한 것으로 판단된다. 그러므로 후설치앵커 적용 시에는 앵커 자체의 강도뿐만이 아니라 앵커와 콘크리트를 일체화시키는 그라우트의 저항능력에 대해서도 충분한 사전 검토 및 시공에 주의가 요구된다.

▪ 균열형상

- 그림 2.1.4.21에는 극한하중 상태에서 DCP에 발생한 대표적 균열의 양상을 보여주고 있다. 실험결과 하중 초기 DCP와 TCL 접합면 분리로 인한 균열이 발생하였으며, 하중이 증가함에 따라 앵커 주변 그라우트이 손상으로 인한 슬립이 발생하였다. 이후 DCP에서 휨과 전단에 의한 균열과 앵커 연결부 콘크리트 단부에서 균열이 발생하였다.



그림 2.1.4.21 대표적 파괴 형상

- 전단을 받는 앵커의 파괴는 일반적으로 강재 파괴, 콘크리트 파괴, 콘크리트 프라이아웃(pryout) 파괴로 구분된다(ACI 2014, KCI 2012). 본 실험과 같이 콘크리트 가장자리에 대하여 직각 방향으로 앵커에 전단력이 작용할 경우, 앵커파괴보다는 그림 2.1.4.22와 같은 콘크리트 파괴에 취약하다. 본 실험 결과에서도 극한하중 상태에서 SD400 앵커의 파괴는 발생하지 않았고 최대 하중에 다다른 이후 취성적인(brittle) 콘크리트 단부파괴로 인해 갑자기 강도가 대폭 감소하는 것으로 나타나, 전단하중에 대해 앵커의 파괴보다 콘크리트 단부의 파괴가 선행하는 것으로 나타났다.

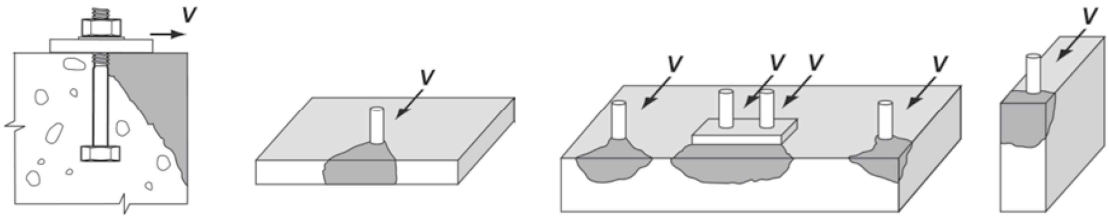


그림 2.1.4.22 앵커의 콘크리트 파괴(ACI 2014, KCI 2012)

- 이러한 결과로부터 열차 탈선으로 인해 열차 차륜이 DCP에 충돌할 경우 연성적인(ductile) 거동을 확보하기 위해서는 앵커의 파괴가 선행되도록 하는 설계와 시공 시 추가적인 연단 거리 확보 및 앵커 그라우트의 충분한 저항성능확보가 필요

하겠다.

⑤ 결론

▪ 본 연구에서는 철도교량 콘크리트 궤도 슬래브(TCL)와 연결된 프리캐스트 콘크리트 일탈방호시설(DCP)의 구조성능의 검증을 위해 정적 실험을 수행하였다. DCP는 TCL에 후 설치 앵커를 이용하여 설치되기 때문에 DCP-TCL 결합 시험체의 휨과 전단에 대한 내하 성능을 평가하였다. 실험 결과로부터 다음과 같은 결론을 도출하였다.

㉮ DCP를 H25 앵커 4개로 TCL에 시공한 DCP-TCL 결합 시험체의 구조성능과 앵커전단성능은 모두 설계 요구성능(165.6kN)을 만족하였으며, 충분한 안전성을 확보하는 것으로 나타났다.

㉯ DCP-TCL 결합 시험체의 중앙점(DCP loaded at center point, C) 재하 정적실험에서 시험체의 최종 파괴 유형은 앵커의 항복에 의한 것으로 나타났다. DCP-TCL 경계면이 분리된 후 DCP에 작용하는 하중이 앵커를 통해 TCL로 전달되는 것으로 나타났고, 앵커의 항복 전에 목표 성능을 만족하였다. DCP의 휨에 의한 파괴보다는 DCP-TCL 간 연결부 앵커 파괴가 우선하는 것으로 나타났다.

㉰ DCP-TCL 결합 시험체의 앵커 연결부(DCP loaded at anchor connection, A) 재하 정적실험에서는 앵커 연단 콘크리트 단부의 취성적 파괴가 발생하였다. DCP-TCL 경계면이 분리된 후 DCP에 작용하는 하중이 앵커를 통해 TCL로 전달하는 것으로 판단할 수 있으며, 앵커의 항복 전에 목표 성능을 만족하는 것으로 나타났다. 또한, 하중 초기에는 전면/후면 앵커에 하중이 유사하게 분산되었지만, 하중이 증가함에 따라 가력점과 가까운 앵커의 변형이 더 크게 증가하는 것으로 나타났으며, DCP-TCL 접합면 분리 후 하중이 집중되어 모르타르와 콘크리트에 파괴가 발생한 것으로 판단된다.

▪ 실험 결과로부터 열차의 차륜이 DCP에 충돌할 경우 프리캐스트 DCP와 TCL 간의 일체성이 확보될수록 내력이 증가할 것으로 판단된다. 그러므로 후 설치 앵커를 이용한 DCP 시공 시에는 앵커 자체의 강도뿐만이 아니라 앵커가 설치되는 콘크리트의 연단 거리 확보, 앵커와 콘크리트를 일체화시키는 그라우트의 저항능력에 대해서도 충분한 사전 검토가 필요하다.

▪ 앞으로 철도 차륜의 실제 충돌 속도와 차륜과 DCP의 접촉 면적을 고려한 적절한 재하 형태에 대한 실험 및 해석적 요구가 추가적으로 수행되어야 할 것으로 사료된다.

(2) DCP 재료시험

(가) 2차년도 DCP 재료시험

▪ 본 연구의 목적은 라텍스 폴리머와 실리카퓸을 혼합한 시멘트 페이스트의 충격저항력(impact resistance, IR)을 샤르피 충격실험기로 실험하고, 첨가물이 충격저항력에 미치는 영향을 조사하는 것이다.

① 실험재료

▪ 본 연구에 사용된 재료는 보통 포틀랜드 시멘트(KSL5201, 쌍용제품), 라텍스(JAPT15/20폴리머, 중앙 폴리스텍), 실리카퓸(ElkemMicrosila, Grade940)이다. 표 2.1.4.5와 표 2.1.4.6은 라텍스와 실리카퓸의 물리적 특성과 화학적 구성 성분을 보여준다.

표 2.1.4.5 라텍스 특성 및 성분

특성	단위	값
TSC	%	47.0
pH		9-11
Sp.gr	Kg/m2	1,090
Viscosity	Cps	Below 500
Average Particle size	Å	1,600
Tg	℃	5
MFT	℃	5

표 2.1.4.6 실리카퓸 특성 및 성분

특성	단위	값
SiO2	%	> 90
Retention on 45 sieve	%	< 1.5*
H2O(whenpacked)	%	< 1.0
Bulk Density (U)	Kg/m3	200 - 350
Bulk Density (D)	Kg/m3	500 - 700

② 배합설계

▪ 물-시멘트 비 0.5의 시멘트 페이스트를 기준으로, 실리카퓸과 라텍스를 첨가하여, 샤르피 충격실험 결과를 양생기간에 따라 비교하였다. 실리카퓸은 시멘트의 대체재로써 사용된 양만큼 배합에서 시멘트의 양을 줄였다. 바인더(시멘트와 실리카퓸) 대비 실리카퓸 혼합량 5%, 10%의 배합이 사용되었다.

▪ 라텍스를 사용하여 개질을 개선한 콘크리트의 경우에 콘크리트의 슬럼프가 크게 증가한다. 그러므로 유사한 슬럼프와 강도가 발현되게 하기 위해서는 라텍스 혼합량의 2배의 물을 배합량에서 줄여줘야 한다, 시멘트 중량 대비 라텍스 혼합량 5%, 10%의 배합이 사용되었다. 본 실험에서 사용된 시멘트페이스트의 배합비는 표 2.1.4.7과 같다.

표 2.1.4.7 시멘트 페이스트의 배합비

번호	시멘트	물	라텍스	실리카퓸	비고
1	1000	500			PC
2	1000	400	50		5% LMC
3	1000	300	100		10% LMC
4	950	500		50	5% SFC
5	900	500		100	10% SFC

③ 시편준비

▪ 시멘트페이스트의 베합은 ASTMC305-14에 의해 수행되었다. 물을 그림 2.1.4.23의 건조한 그릇에 담고, 시멘트를 물에 혼합하여 30초 동안 물이 흡수되도록 기다린다. ASTMC0505-14에 따른 믹서의 속도와 시간으로 배합한다. 압축강도 실험(50mm x 50mm x 50mm), 인장강도 실험, 샤르피 충격실험(그림 2.1.4.24, 10mm x 10mm x 50mm)을 위한 시편을 준비하였다. 24시간 후 틀에서 빼내어 수중양생 하였다 (20±2℃). 샤르피 충격 시험의 경우, 배합 종류에 따라 15개의 시편이 준비되었다. 3일, 7일, 28일 양생 후에 각각 5개의 시편으로 샤르피 실험을 수행하였다. 시멘트 페이스트는 28일 압축 강도만을 측정하였다. 라텍스 폴리머는 물에 혼합하여 배합하였고, 실리카퓸은 시멘트와 혼합하여 배합하였다.



그림 2.1.4.23 실험에 사용된 믹서

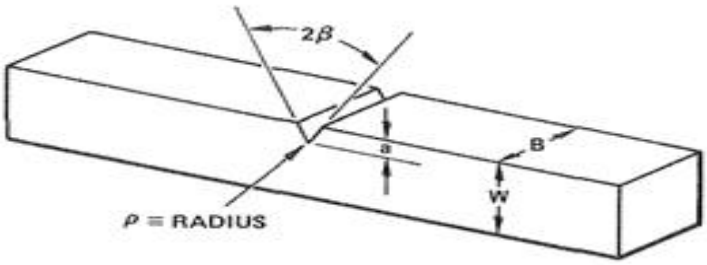


그림 2.1.4.24 샤르피 충격실험용 시편 크기



그림 2.1.4.25 압축강도 실험 시편



그림 2.1.4.26 직접인장강도 실험 시편



PC 5% LMC 10% LMC 5% SFC 10% SFC

그림 2.1.4.27 그샤르피 충격실험용 시편 (28일 양생)

▪ 그림 2.1.4.24는 샤르피 실험을 위한 시편의 규격 및 V노치의 크기를 보여준다. 실험에 사용된 시편의 일부를 그림 2.1.4.25부터 그림 2.1.4.27까지 보였다.

④ 실험결과 및 토의

▪ 충격 실험은 디지털 샤르피 충격 기기에 의해 동일한 속도(2.92 m/s)로 수행되었다. 시편이 완전히 두 부분으로 나누어질 경우 V노치 시편에 의한 에너지 흡수 또는 순수 차단 에너지의 결과는 신뢰할 수 있다. 충격 저항(J/m2)은 파괴 면적당 에너지 흡수에 의해 파악되었다. V노치 시편은 수평의 단순보 상태로 배치되었으며, 노치는 충격면의 반대 방향에 위치하게 설치되었다. 각각의 배합에 대하여 실험이 수행되었다.

▪ 압축강도실험은 28일 양생 시편에 대해서만 수행하였다. 압축강도와 인장강도 실험에 사용된 장비를 그림 2.1.4.28에 보였고, 샤르피 충격시험기와 시편의 설치 위치를 그림 2.1.4.29에 보였다.



(a) (b)

그림 2.1.4.28 압축강도 시험기(a), 인장강도 시험기(b)



그림 2.1.4.29 샤르피 충격시험기와 시편의 위치

▪ 샤르피 충격실험 결과 모든 시편이 두 조각으로 분리되었다. 표 2.1.4.8은 각각의 배합에 대한 샤르피 충격 시험의 평균값을 보여 준다.

표 2.1.4.8 샤르피 충격실험 결과 (J/m2)

배합	3일 양생	7일 양생	28일 양생
PC	7299.53	11207.78	10657.55
5% LMC	6950.36	11357.32	14797.59
10% LMC	7284.74	11918.42	15111.03
5% SFC	3614.18	13547.98	15320.60
10% SFC	6565.44	16705.43	18211.37

▪ 그림 2.1.4.30과 같이 라텍스 혼합 시멘트의 결과를 일반시멘트 페이스트의 결과와 비교해 보면, 7일까지는 라텍스의 효과가 크지 않은 반면에, 28일 결과에서는 충격저항성이 현저히 늘어남을 볼 수 있다. 5%와 10% 혼합비율의 라텍스 폴리머 시멘트 페이스트의 충격 저항성은 큰 차이가 없으며, 이는 시편의 단면적의 크기에 영향을 받을 것으로 판단 된다 (본 실험에 사용된 시편의 파괴면은 10mm x 10 mm).

▪ 그림 2.1.4.31은 실리카퓸 혼합 시멘트의 결과와 일반시멘트 페이스트의 결과를 비교하였다. 실리카퓸 혼합 시멘트의 경우, 양생 초기에는 강도의 발현이 상대적으로 낮다. 하지만, 시간이 지나면서 강도가 증가한다. 이는 시멘트의 양생과정에서 생성되는 수산화칼슘을 칼슘-실리케이트-수화물로 변환해 주는 실리카퓸의 포졸란 반응에 의한 것이다. 충격저항성 실험결과를 살펴보면 이론적인 포졸란 시멘트의 강도 증가와 유사함(초기에는 일반시멘트의 강도보다 낮다가 증가하는 양상)을 볼 수 있다. 이러한 결과는 충격저항력의 증가가 시멘트페이스트의 연성의 증가가 아닌 강도의 증가에 기인한 것으로 볼 수 있다. 충격저항력의 증가 매커니즘은 LMC는 연성의 증가, SFC는 압축강도의 증가로 볼 수 있다.

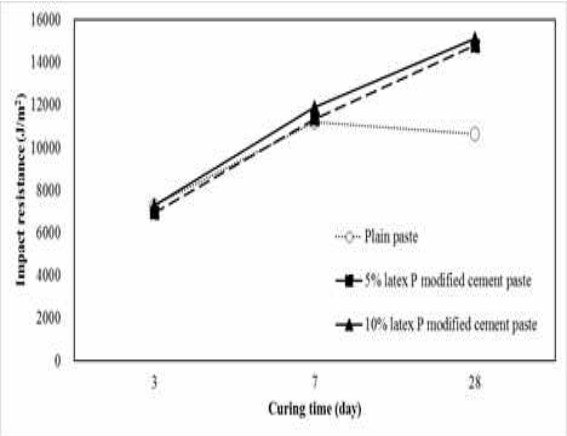


그림 2.1.4.30 LMC의 충격저항성 비교

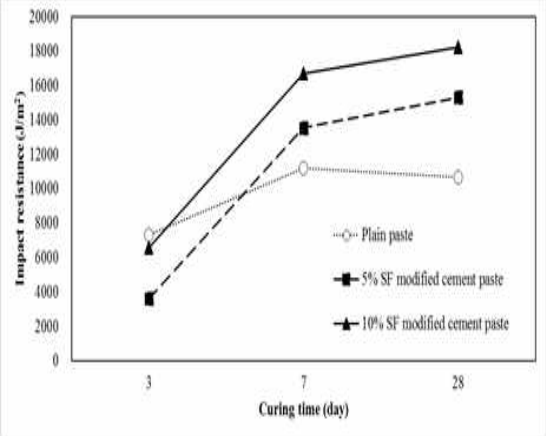


그림 2.1.4.31 SFC의 충격저항성 비교

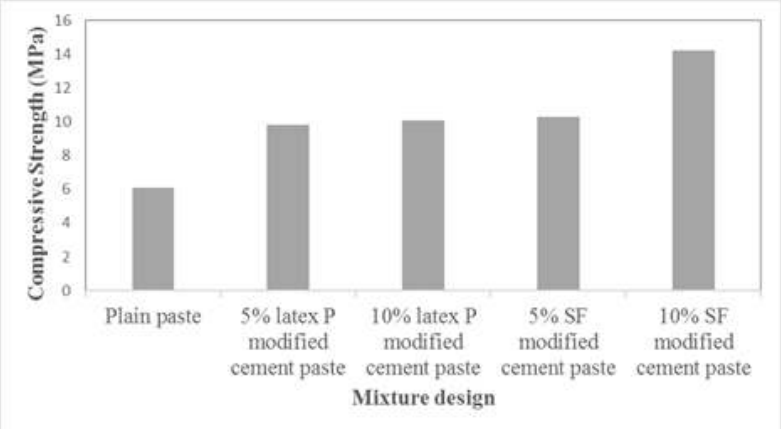


그림 2.1.4.32 28일 압축강도 실험 결과

▪ 그림 2.1.4.32는 28일 압축강도의 실험결과를 보여준다. 예상대로 10% SFC가 가장 높은 압축강도를 보였다. 유사한 압축강도를 보이는 5%LMC, 10%LMC, 5%SFC의 충격저항력이 유사함을 보인 점은 흥미로운 결과이다. 이는 라텍스에 의해 시멘트의 연성이 증가하기는 했지만, 상당히 큰 충격량에 대해서는 충격저항력에 큰 영향을 미치지 못함을 알 수 있다. 비록 다른 종류의 시멘트 페이스트이지만, 압축강도f_{ck}와 충격흡수량IR을 콘크리트 분야에서 주로 사용하는 고전적인 함수의 형태로 나타내면 다음과 같은 식을 도출할 수 있다.

$$IR = 4754\sqrt{f_{ck}}$$

▪ 식(2.1.4.1)은 표 2.1.4.9의 결과를 $IR = k\sqrt{f_{ck}}$의 함수로 회귀분석하여 k값을 4754로 결정하였다.

표 2.1.4.9 샤르피 충격실험 결과와 압축강도 결과

Mixture design	Impact resistance (J/m2)	Compressive strength (MPa)
PC	10657.55	6.1
5% LMC	14797.59	9.8
10% LMC	15111.03	10.1
5% SFC	15320.60	10.3
10% SFC	18211.37	14.2

▪ 라텍스 폴리머와 실리카퓸 첨가 후 시멘트 페이스트의 압축 강도와 충격저항력은 증가하였다. 10%실리카퓸 페이스트의 경우 충격흡수량은 71%, 압축 강도는 133% 증가하였다. 시멘트페이스트와 같이 취성거동을 하는 재료의 경우, 충격저항력(에너지흡수력, 인성)은 압축강도와 비례함을 볼 수 있다.

(나) 3차년도 DCP 재료시험

① DCP 재료시험

▪ 충격 강도는 구조물이 갑작스러운 하중을 받을 때 재료가 가지는 중요한 기계적 성질이다. 다양한 동적 실험 방법이 파단이나 파괴에 대한 충격 에너지와 재료의 에너지 흡수 능력을 측정하기 위해 개발되었다. 샤르피 충격 시험은 진자의 원리에 기초한 표준화된 에너지 측정법이다. 실험에 대한 준비, 수행 및 결과를 얻기가 쉽기 때문에 널리 사용되는 측정법이다. 일반적으로 샤르피 실험은 금속, 플라스틱 (ISO 148-1, ASTM E23, ASTM D6110)에 대해 개발되었다. 최근 복합 재료의 충격 강도를 평가하기 위해 많은 연구자들이 사용하는 실험 방법이기도 하다. 샤르피 충격 시험의 V 노치 시험편을 기반으로 유리 섬유 강화 (SGFR) 및 탄소 섬유 강화 (SCFR) 폴리 프로필렌 복합체를 연구하기도 한다.

▪ 최근 들어, 건설 재료의 사용 중 화학적, 물리적 영향을 최소하하기 위하여 미리 혼합된 상태로 재료가 공급되기도 한다. 제조업체의 지침에 따라 사용할 때 함께 혼합 될 많은 개별 구성 요소로 이루어져 있기도 한다. 본 연구에서는 DCP 제작에 사용되는 상업용으로 제공되는 충진 모르타르와 탄성폴리머에 대한 압축강도, 인장강도, 내충격량을 측정할 것이다.

② 실험

㉮ 실험재료

▪ 충진용 모르타르의 성질은 표 2.1.4.10에 주어져 있다.

표 2.1.4.10 충진용 모르타르의 특성

Product identity		Requirements
Maximum diamerter of aggregate [mm]		1
Chloride ion content [%]		>0.3
Flowability [mm]		270
Density of the mix [kg/m³]		2200-2300
pH of mix		>11.5
Setting time	Initial setting time (hour)	>1
	Final setting time (hour)	<10
Compressive strength(MPa)	3 days	>35
	7 days	>50
	28 days	>60

▪ 탄성폴리머의 성분은 경화제, 수지, 모래이다. 표 2.1.4.11에 탄성폴리머의 특성을 나타냈다.

표 2.1.4.11 탄성폴리머의 특성

Parmeters	Binder Only
Tensile strength [MPa]	>5
Elongation at break [%]	>150
Hardness (shore D)	30-49
Compression Set [%]	<50
Tear resistance [N/mm]	>14
Water absorption (by weight) [%]	<3
Heat shrinkage [%]	<1.6
Parameters	Binder and aggregate
Density [kg/m³] at 20℃	1750
Resilience @ 5% deflection [%]	>90
Stress @ 5% delfection [MPa]	>5.5
Impact resistance [N.mm]	>950, no cracks
Setting time at 30℃ [minute]	20
Adhesion to concrete [MPa]	
Dry bond	>2.7
Wet bond	>1.7
Compressive strength [MPa]	
-20℃	17
0℃	22
+20℃	15

▪ 표 2.1.4.12는 충진용 모르타르와 탄성폴리머의 혼합 비율이다.

표 2.1.4.12 혼합비율

Materials		Value [kg/m^3]
Filling Mortar	Binder	991
	Fine aggregate	932
	Water	327
Elastic polymer	Hardener	90
	Resin	175
	Crystalline Silica aggregate	1325

▪ 혼합 공정은 다음과 같다.

▪ 충진 모르타르는 혼합 용기에 필요한 물의 80 % 넣고 시멘트질 그라우트 분말을 천천히 첨가한 후 나머지 20%의 물을 넣어야한다. 느린 속도로 1분 동안 혼합한다. 시편 제작 후 시편은 열 경화 및 수축으로 인한 표면 균열이 발생할 수 있는 수분 증발을 막기 위해 적절히 보호되어야 한다.

▪ 탄성폴리머의 경우, 수지를 통에 넣고, 모래를 담는다. 혼합 패들이 장착 된 저속 믹서를 사용하여 30초 동안 혼합한다. 골재와 수지가 완전히 혼합되도록 한다. 경화재를 붓고 1분간 혼합한다. 실내 조건에서 보관한다.

㈏ 실험방법

▪ 압축 강도

- 충진용 모르타르와 탄성폴리머의 압축 강도는 ASTM C109 (2016) 시험 절차에 따라 수행 하였다. 50mm x 50mm x 50mm 크기의 시편에 대하여 수행하였다.

▪ 휨 인장 강도

- 탄성폴리머 시편은 40mm x 40mm x 160mm 크기의 보로 제작되어 그림 2.1.4.33과 같이 휨 실험을 수행하였다. 경간 길이가 150mm 인 3점 휨 실험으로 파괴 시까지 실험하였다.



그림 2.1.4.33 휨 인장강도 실험장치 및 실험

▪ 직접 인장 강도

- 충진용 모르타르에 대해서는 직접인장강도 실험을 수행하였다.

▪ 내충격성 강도

- 샤르피 시험기를 사용하여 내충격성을 산정하였다. 시편의 파괴에 의해 소진된 해머의 위치 에너지를 파괴면으로 나눈 값(J/m2)을 산정하여 내충격성으로 사용하였다. 시험편의 크기는 너비와 높이가 10±0.5mm, 길이가 50±1mm 인 막대 모양으로 만들었다. 시험편의 중앙에 2±0.3mm의 깊이를 가진 V 자 모양의 notch를 만들어 파괴를 유도하였다.

③ 실험결과 및 토의

▪ 양생기간 3일, 7일, 28일에 대한 충진모르타르와 탄성폴리머의 압축강도 실험결과를 그림 2.1.4.34에 보였고, 인장강도 실험결과를 그림 2.1.4.35에 보였다.

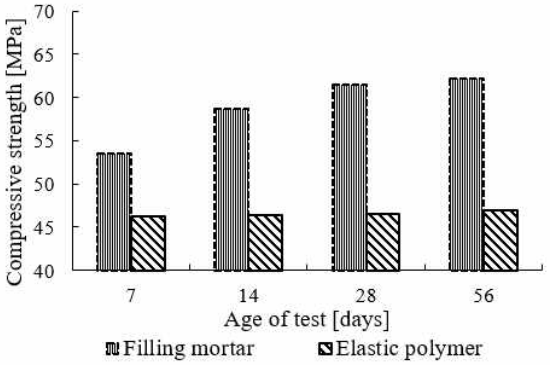


그림 2.1.4.34 압축강도 실험결과

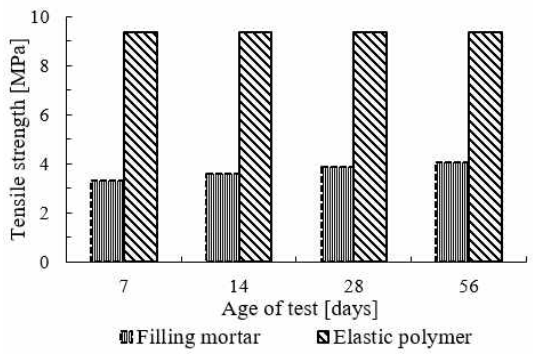


그림 2.1.4.35 인장강도 실험결과

▪ 그림 2.1.4.34와 그림 2.1.4.35를 보면, 충진 모르타르의 압축강도와 인장강도는 시간에 따라 점차 증가하였고, 탄성폴리머는 그렇지 않았다. 충진 모르타르의 압축 강도는 탄성폴리머의 1.3배 정도 높았으며, 탄성폴리머의 인장 강도는 충진 모르타르의 2.2배로 나타났다.

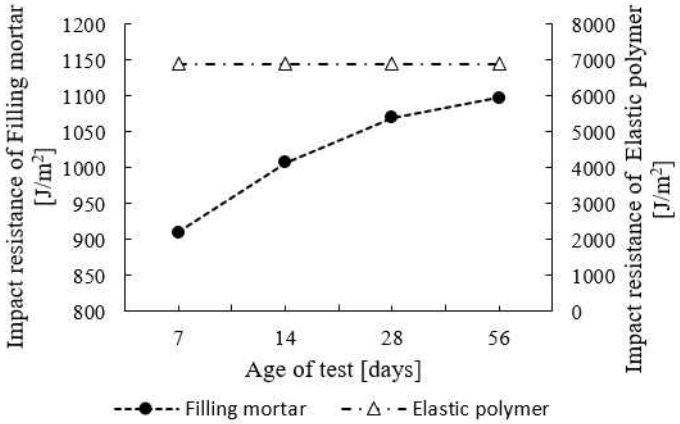


그림 2.1.4.36 샤르피 실험에 의한 내충격성 결과

▪ 샤르피 실험 결과, 탄성폴리머의 내충격성은 6900J/m^2의 값을 나타냈다. 충진 모르타르의 경우 56일에 1100J/m^2의 값을 나타내고 있다.

▪ 그림 2.1.4.36은 샤르피 시험 후의 시편의 파단을 보여준다. 충진 모르타르의 경우에는 시편이 두 조각으로 완전히 분리된 반면, 탄성폴리머의 경우에는 시편이 완전히 절단되지 않았다. 이러한 결과로부터 탄성폴리머의 에너지 흡수량이 더 큼을 확인할 수 있다.

(다) 4차년도 탈선충돌 시뮬레이션에 필요한 험프재료모델 연구

▪ 샤르피 충격실험에 대한 유한요소해석 모형을 개발하였다.

① 유한요소 모델

▪ 그림 2.1.4.37과 같은 유한요소 해석 모형을 개발하였다. 그림 2.1.4.38에서 보인 파괴 후 거동을 사용하여 시편의 분리를 시뮬레이션하였다.

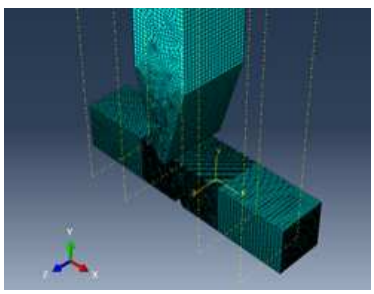


그림 2.1.4.37 유한요소모델

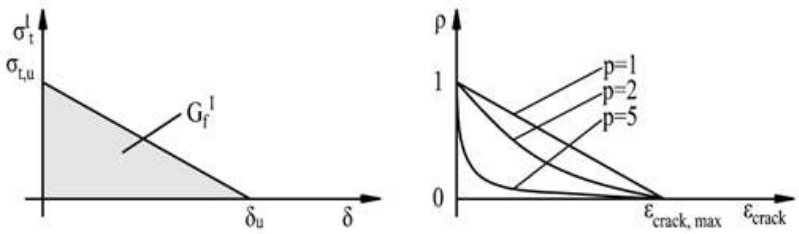


그림 2.1.4.38 파괴후 재료 모델

표 2.1.4.13 유한요소 모델 입력값

Input		Value
Brittle cracking	Failure stress (MPa)	3.24
	Mode I fracture energy (N/mm)	0.152
Brittle shear	Crack opening strain	0.7
	the exponenet	5

② 해석결과

▪ 해석 결과 시편은 그림 2.1.4.39와 같이 분리되었으며, 파괴에 필요한 에너지는 0.02J로 샤르피 충격 실험 결과와 유사한 값으로 결정되었다.

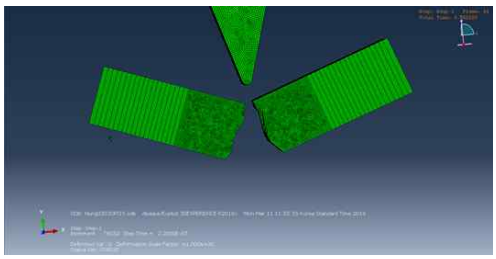


그림 2.1.4.39 해석결과

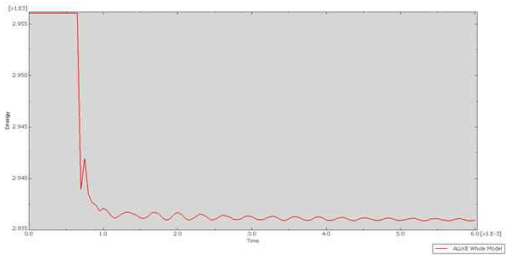


그림 2.1.4.40 파괴 전과 후의 에너지

(1) DCP 가스건에 의한 충돌시험

(가) 2차년도 DCP 충돌성능시험

① 개요

▪ 본 연구에서 설계한 콘크리트 DCP의 충돌저항성능 검토 및 TCL-DCP 연결 앵커 및 접속연결부, 마페그라우트 및 탄성폴리머의 충돌하중에 대한 거동을 검토하기 위하여, 그림 2.1.4.41과 같은 한국건설기술연구원에 보유하고 있는 가스건 충돌실험장치를 통해 충돌실험을 수행하고자 한다.

▪ 가스건 실험장치는 가스압충 방식의 비상체 충격파괴 시험장비로, 충돌모사실험을 통해 자재단위의 내충격 성능을 평가하기 위한 실험장치이며, 직경 40mm 또는 50mm의 비상체를 음속의 최대 1.5배(최대 450m/s)까지 발사할 수 있으며, 시험평가용 자재의 최대 사이즈는 500x500mm가 가능한 진공챔버로 구성되어 있다. 최대 가스압력은 6000psi까지 가능하나, 안정적인 압력은 2000psi 이내로 시험을 수행할 수 있으며, 음속의 1.5배는 1200~1500psi에서 발생된다.

▪ 본 연구에서 개발된 콘크리트 DCP가 받는 최대 충격량은 1.1223×104N·s (181kN

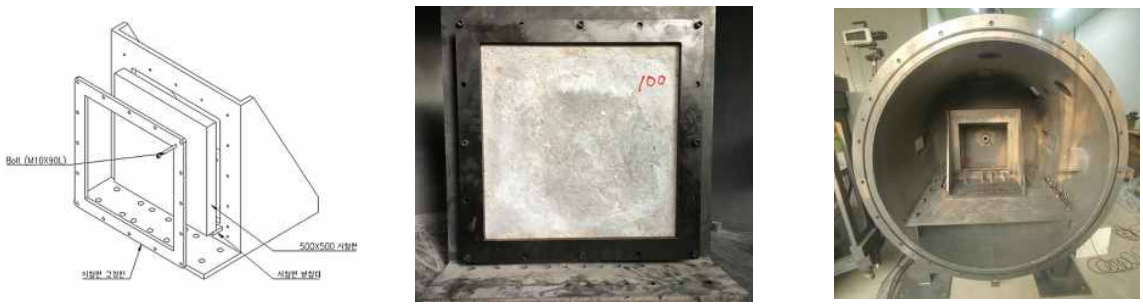
× 62.04ms)으로 실제 가스건에서 발생시킬 수 있는 충격량(5.313×102N·s, 0.118kg×450m/s)에 비해 21배의 충격량이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 본 연구에서는 상사법칙에 의한 축소모형 시편을 제작하여 충돌성능을 평가하는 것이 아니라, 실제 사용되는 앵커 및 재료의 내충격 저항성능실험을 통해 해석적 검증을 하고자 실험을 수행한다.



그림 2.1.4.41 가스건 실험장치

② 가스건 시험챔버 내 이송장치 및 지그 제작

▪ 실제 가스건 시험은 시편을 그림 2.1.4.42와 같이 보는 것과 같이 시험 챔버 내부에 지면의 지각방향으로 설치하여 발사체에 의한 충돌저항성능을 검토하는 시험이나, 본 시험은 시험체의 측면에 가해지는 충돌하중의 거동을 검토하기 위함이며, 그에 따라 구조물의 크기가 증가하였으며, 가스건 시험 챔버는 직경 1,400mm으로 사람 및 크레인 등의 이송장치가 들어갈 수 없는 형태이다. 그러므로, 아래 그림과 같이 시험체를 가스건 시험챔버 내에서 이송하고, 이송장치가 up / down을 하여 원하는 위치에 쉽게 거치되도록 이송장치 및 지그를 제작하였다.



(a) 거치대 (b) 시험체 셋팅 (c) 가스건 챔버 후면

그림 2.1.4.42 기존 가스건 시험체 거치대 형상

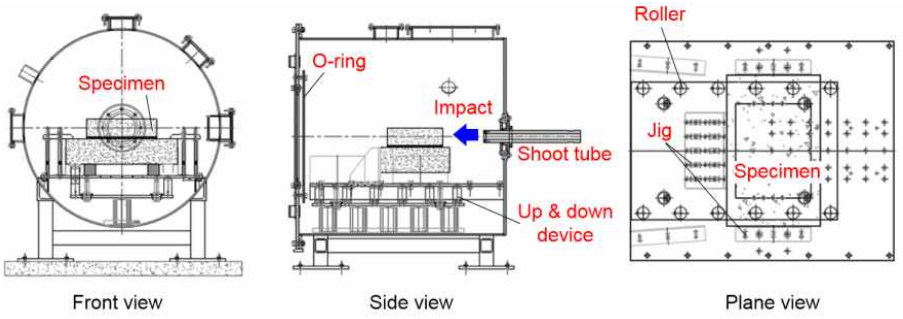


그림 2.1.4.43 가스건 챔버 내 시편 거치



그림 2.1.4.44 제작된 이송장치 및 지그

③ 충돌실험 절차

▪ 가스건 충돌실험을 위해, 그림 2.1.4.45의 시험절차에 따라 시험을 수행하도록 하며, 상세 절차에 대해서는 별도의 절차를 수립하였다.

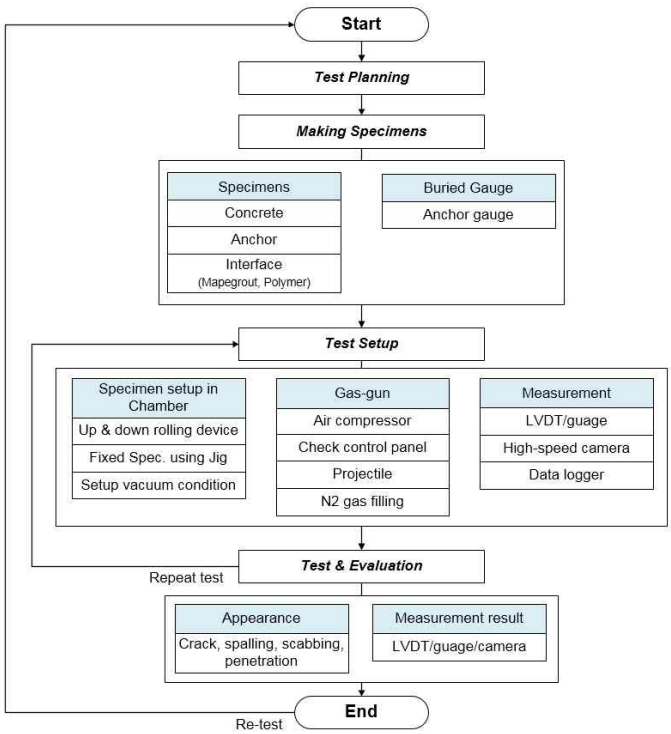


그림 2.1.4.45 가스건 충돌실험 절차

▪ 가스건 시험장비는 고압 충격하중을 모사하기 위해 개발된 시험장비로, 압력탱크, 포신과 프레임, 가스 부스팅 시스템(N2 가스 or Air), 시험 챔버, 진공 펌프, 컨트롤 시스템으로 구성된다.



그림 2.1.4.46 가스건 충돌실험 장비

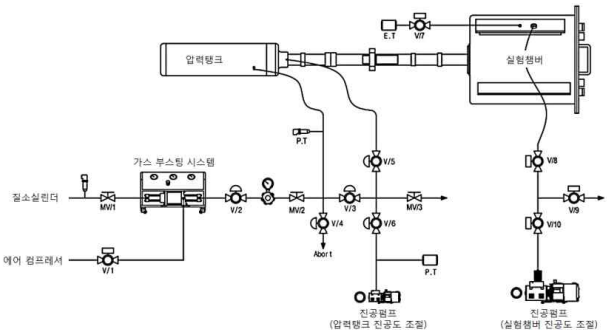
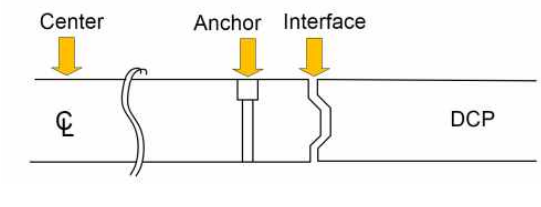


그림 2.1.4.47 가스건 충돌실험 장비 모식도

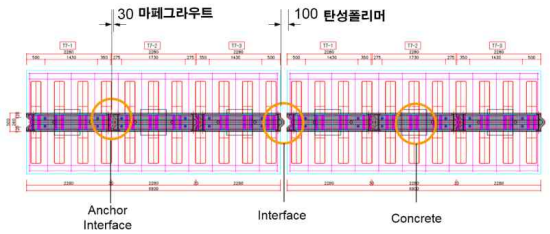
(나) 3차년도 DCP 충돌성능시험

① DCP충돌모형 실험계획

▪ 2차년도에 구성한 건기연의 가스건 시험장치를 이용하여, 충돌실험을 수행하였으며, 본 연구에서는 DCP에 가해지는 충돌하중 위치에 따른 거동이 상이할 것으로 판단하여, 아래 그림과 같이 DCP의 중앙부, 앵커 설치부, DCP-DCP연결부 (TCL연속부/TCL 분리부)에 대해서 검토하고자 한다. 그에 따라 실험 case를 검토하면 표 2.1.4.14와 같다.



(a) DCP에 가해지는 충돌하중 가력포인트 (측면도)

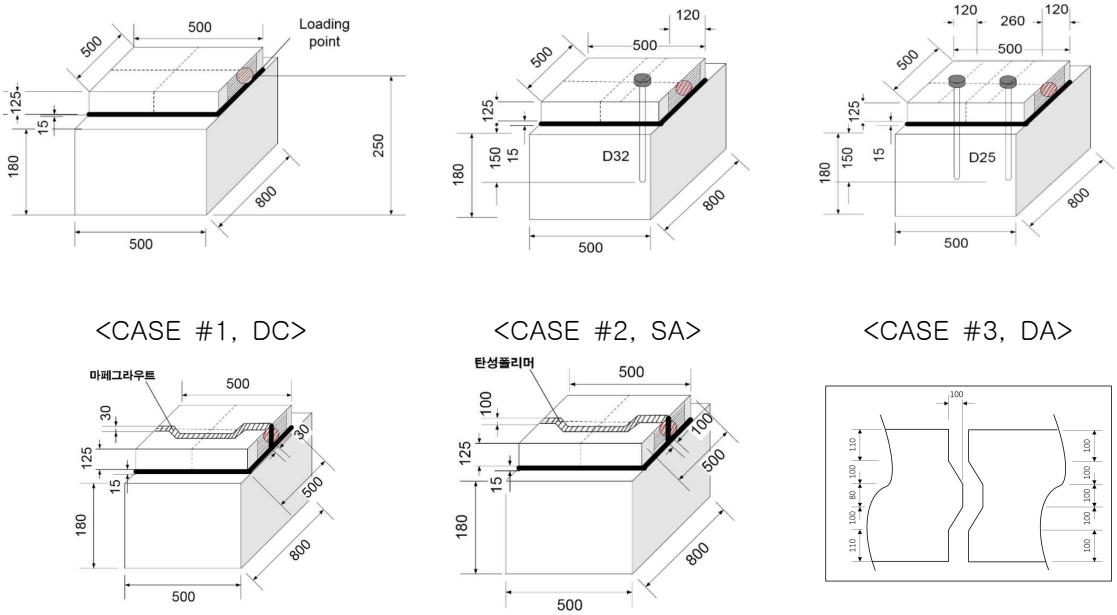


(b) DCP에 가해지는 충돌하중 가력포인트 (정면도)

그림 2.1.4.48 시험체 형상에 대한 하중 가력점 개념

표 2.1.4.14 콘크리트 DCP 충돌모형실험 case

CASE	시험체 종류	하중 가력점	가력하중면	시험체 번호
#1	콘크리트	DCP 중앙	DCP의 측면 (차량충돌면)	DC -1, -2, -3
#2	콘크리트 + 단일 앵커	앵커		SA -1, -2
#3	콘크리트 + 이중 앵커	앵커		DA -1, -2
#4	콘크리트 + 마페그라우트	접합부		GI -1, -2
#5	콘크리트 + 탄성폴리머	접합부		EI -1, -2



<CASE #1, DC> <CASE #2, SA> <CASE #3, DA>

<CASE #4, GI> <CASE #5, EI> <접합부 상세>

그림 2.1.4.49 충돌모형 시험 case별 시험체 형상

② DCP충돌모형 시편제작

▪ 측면에 작용하는 충돌하중에 대한 가스건 실험장치 시험 챔버 안에 들어갈 수 있는 시편의 형상을 만들기 위하여, 500×800×180mm의 TCL 모형체와 500×500×125mm의 DCP 모형체에 대하여 그림 2.1.4.49와 같이 충돌시험체를 제작하였다. TCL 모형체는 실제 구조물과 동일하게 제작하기 위하여 30MPa의 콘크리트로 제작하였으며, DCP 모형체는 35MPa의 콘크리트로 제작하였다. 각 모형체는 철근에 의한 구속효과를 배제하기 위하여 콘크리트 블록으로만 제작하였다.



(a) TCL 모형 제작



(b) DCP 모형 제작



(c) 케미컬 앵커 시공



(d) 탄성폴리머 시공



(e) 충돌모형실험 시편 완성

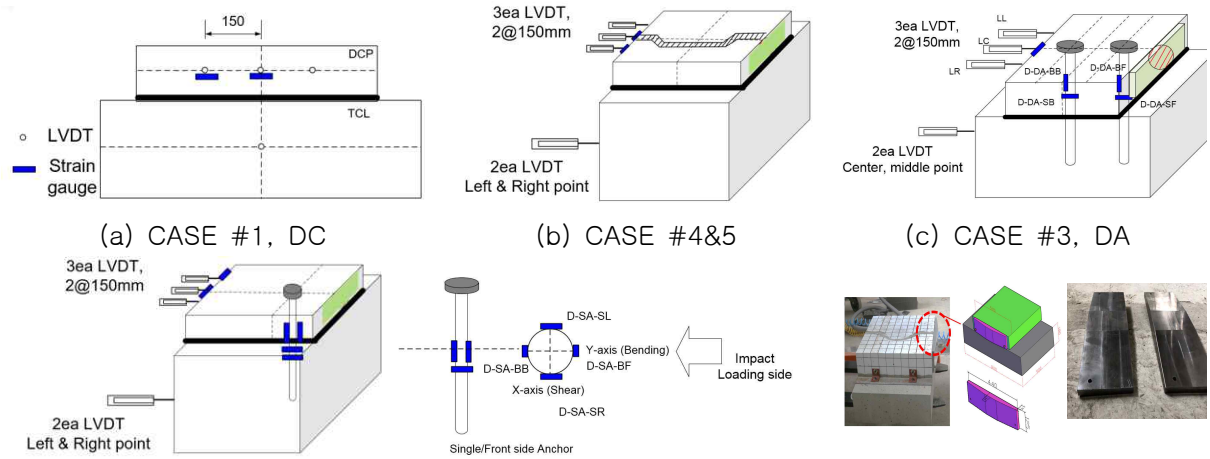
그림 2.1.4.50 충돌모형 시편 제작모습

③ DCP 충돌모형 실험 계측

▪ 가스건 충돌하중에 대한 앵커 및 콘크리트에 가해지는 변위 및 변형률 등을 계측하기 위하여, 표 2.1.4.15와 그림 2.1.4.51과 같은 위치에서 시편 변위 및 변형률을 계측하였다. LVDT는 RDP사의 Unguide type을 선택하여, 충돌하중에 대한 시편의 거동을 계측하였다. LVDT는 각 시편마다 중앙부를 중심으로 150mm 떨어진 위치에서 변위를 계측하였으며, 충돌하중이 가해지는 동안 TCL(Base)의 변형을 검토하기 위하여, Spring type의 포텐셔미터를 거치하여 변형 여부를 확인하였다. 또한 충돌하중 면적과 동일한 면적으로 가압판을 제작하여, DCP 전면으로 충돌하중이 가해질 수 있도록 하였다.

표 2.1.4.15 DCP 모형시편의 계측 개요

CASE	시험체 종류	하중가력점	LVDT	Strain gauge/시편당	
#1	콘크리트 (DC)	DCP 중앙	5개	Con'c	2개
				–	–
#2	콘크리트 + 단일 앵커 (D-SA)	앵커	5개	Con'c	2개
				Anchor	4개 (전단2, 휨2)
#3	콘크리트 + 이중 앵커 (D-DA)	앵커	5개	Con'c	2개
				Anchor	4개 (전단2, 휨2)
#4	콘크리트 + 마페그라우트 (D-GI)	접합부	5개	Con'c	2개
				–	–
#5	콘크리트 + 탄성폴리머 (D-EI)	접합부	5개	Con'c	2개
				–	–



(a) CASE #1, DC (b) CASE #4&5 (c) CASE #3, DA

(d) CASE #2, SA (e) 충돌 가압판 형상

그림 2.1.4.51 충돌모형 시편의 계측 위치 및 충돌 가압판

▪ 가스건 충돌하중과 같이 짧은 시간에 큰 하중이 가해지는 경우, 정적하중에서 사용하는 것과는 다른 데이터로거가 필요하다. 본 연구에서는 그림 2.1.4.52와 같이, 한국건설기술연구원에서 보유하고 있는 HGL 데이터로거를 사용하였으며, 데이터는 200kHz의 샘플링속도로 계측하였다. 또한, 초고속카메라는 Phantom사의 V711으로, 탄두 속도를 측정하기 위해 설치하였으며, 10,000fps으로 촬영하였다.



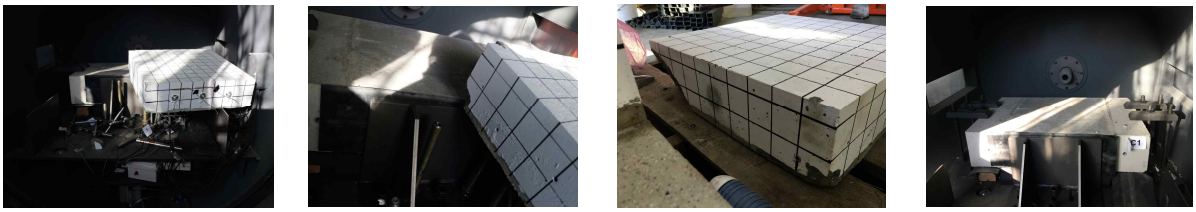
(a) LVDT 설치 및 셋팅 전경 (b) 동적 데이터로거 (c) 초고속카메라 설치전경

그림 2.1.4.52 데이터로거 및 초고속 카메라 측정

④ 예비시험 수행 (DC1, SA1)

㉮ DC1 시편

▪ 가스건 충돌실험의 안전을 고려하여 가스압력을 1500psi으로 가스건을 발사하고자 하였다. DC1시편에 대해 시험을 수행하였으나, DCP가 TCL-DCP 접합부에서 완전 분리하여 파괴되는 것을 확인할 수 있다. 이는 실제 DCP시편의 경우에는 앵커 및 접합면에 의해 구속되는 것에 비해, 본 연구에서의 DCP 모형시편의 경우에는 앵커에 의한 구속효과가 없기 때문이다. 그림 2.1.4.53은 충돌 이후의 DC1의 파괴형상을 나타내며, 본 실험을 통해 LVDT가 모두 파괴되었다.

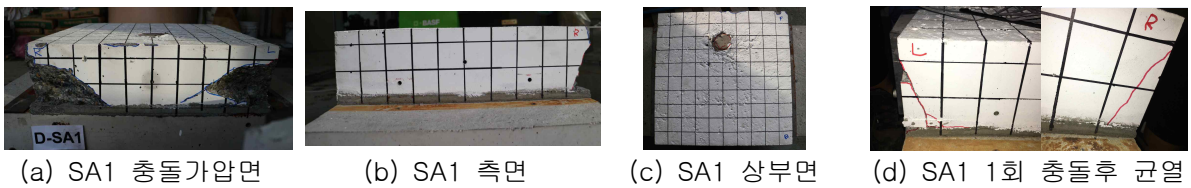


(a) 충돌 직후 DC1 DCP 거동 (b) 충돌직후 DCP 파괴형태 (c) DCP 가압면의 파괴형상 (c) DCP가 제거된 TCL면의 형상

그림 2.1.4.53 DC1 충돌 후 파괴형상

㉯ SA1 시편

▪ SA1시편은 가스압력을 300psi으로 낮춰 실험을 수행하였으며, 초고속카메라로 속도를 측정한 결과 225m/s의 속도가 측정되었다. SA1시편은 1개의 앵커가 충돌면에 배치되는 것으로, 충돌하중에 대해 앵커를 기준으로 앞 부분이 들리는 것을 확인 할 수 있었다. 그림 2.1.4.54는 동일한 속도로 2회 실험을 한 이후의 DCP 파괴형상이다. 측면의 경우에는 일부 구속조건 모사와 접합면 분리파괴 방지 및 접합편 파괴를 유도하기 위하여 모든 시편에 고장력볼트와 철판 및 앵글를 이용하여 고정지그를 부착하였다.



(a) SA1 충돌가압면 (b) SA1 측면 (c) SA1 상부면 (d) SA1 1회 충돌후 균열

(e) 측면 고정지그 및 TCL 고정지그 보완

그림 2.1.4.54 SA1 충돌 후 파괴형상 및 지그 보완

⑤ 충돌 실험 결과

▪ 예비시험을 통해, 측면의 고정지그를 추가로 부착하여 접합면의 분리파괴를 방지하고 접합면 파괴를 유도하고자 하였으며, 본 실험에서의 가스압력은 600psi으로 실험을 수행하였다. 앵커가 들어간 SA시편과 DA시편의 경우에는 2회씩 실험을 수행하였으나, 본 보고서에서는 1회씩 수행한 실험결과에 대해 언급하고자 한다. 본 실험에서 수행한 대표적인 초고속 카메라의 영상은 다음 그림 2.1.4.55와 같으며, 충돌 이후에 DCP시편에 균열이 발생하는 것을 확인할 수 있다.

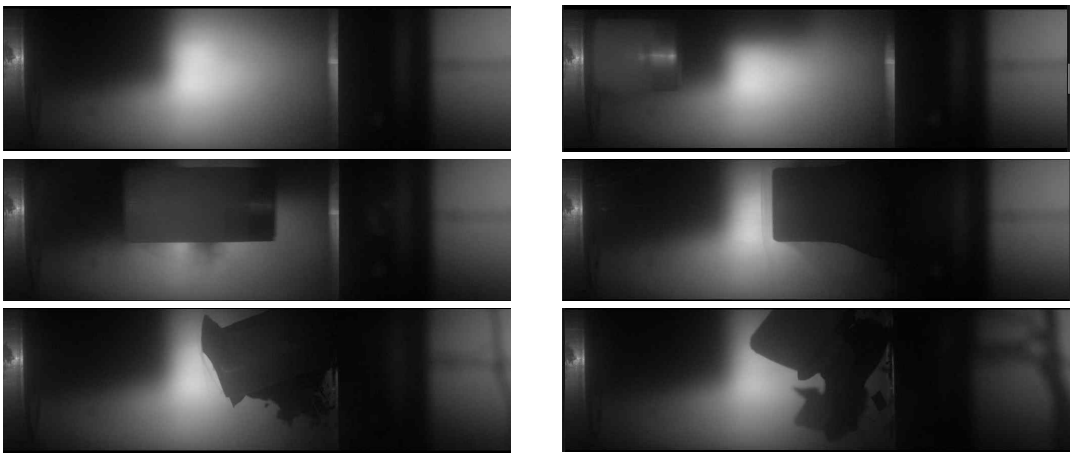


그림 2.1.4.55 가스건에 의한 DCP 충돌 초고속카메라

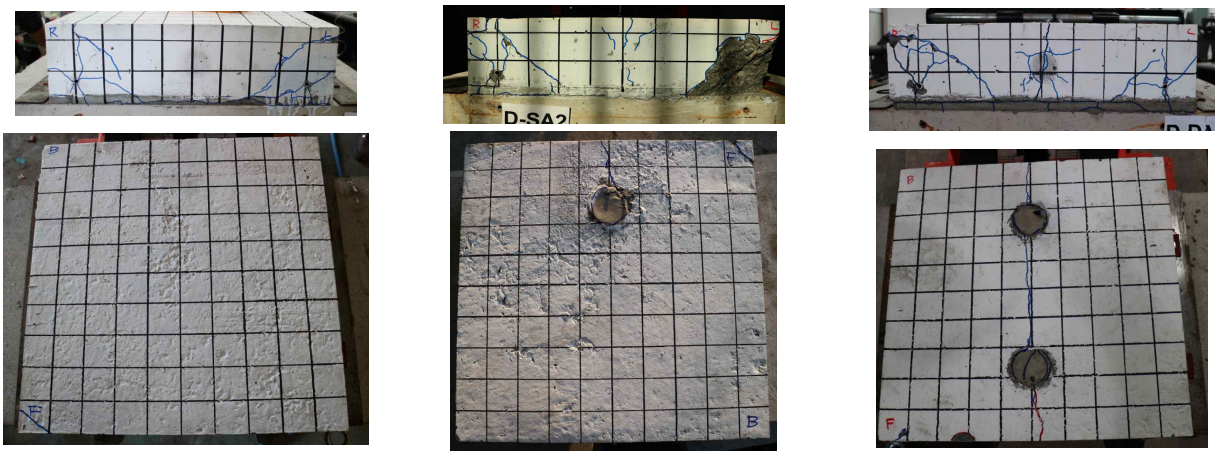
▪ 초고속카메라로 측정한 발사체의 충돌 속도는 표 2.1.4.16과 같으며, 같은 압력으로 실험을 수행했다 하더라도 습도, 온도 등 환경적인 요인에 의해 상이하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 여기서, DC1과 SA1시편의 경우에는 예비실험으로 각 1500psi와 300psi으로 실험이 수행되었으며, 본 실험은 600psi로 실험하였다.

표 2.1.4.16 각 시편별 발사체의 충돌 속도

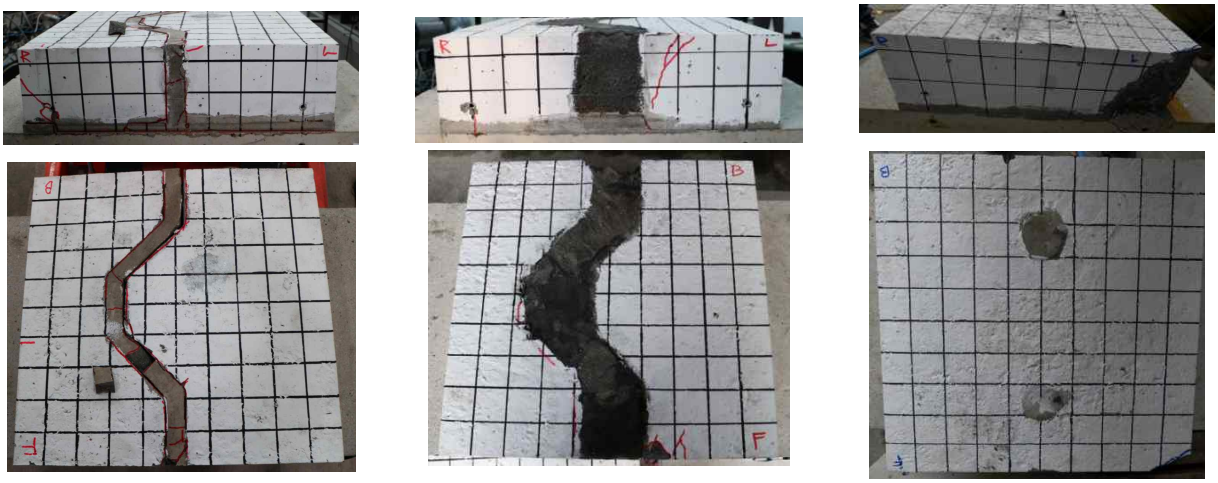
속도	DC			SA		DA		GI		EI	
	DC1	DC2	DC3	SA1	SA2	DA1	DA2	GI1	GI2	EI1	EI2
m/s	430	290	280	225	290	280	285	290	275	285	-
km/h	1548	1044	1008	810	1044	1008	1026	1044	990	1026	-
비 고	1500psi	600psi		300psi	2회시 280m/s		2회시 280m/s				미수행



그림 2.1.4.56 충돌 후 발사체 형상과 가압판



(a) DC2 시편 (b) SA2 시편(2회 충돌) (c) DA2 시편(2회 충돌)



(d) GI2 시편 (e) EI1 시편 (f) DA1 시편 (1회 충돌)

그림 2.1.4.57 본 시험(600psi)에 의한 충돌실험 이후의 균열 형상

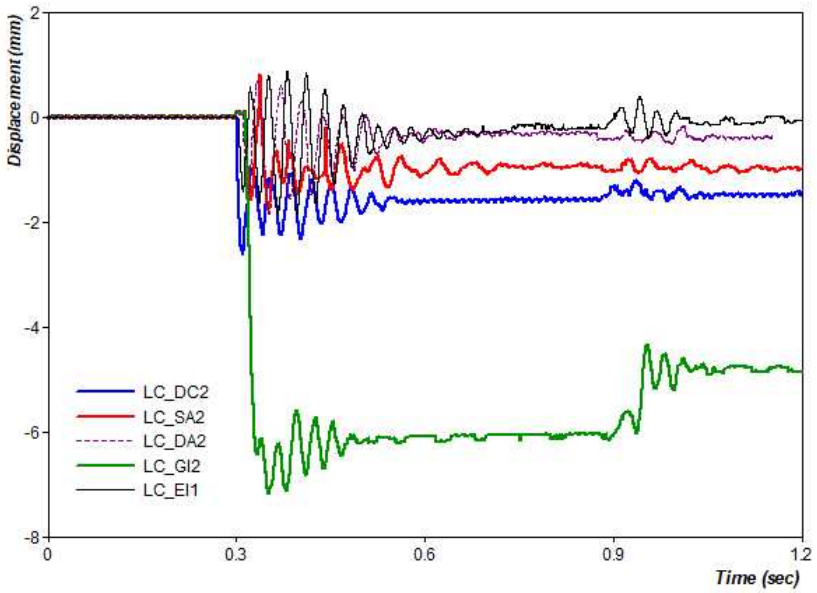


그림 2.1.4.58 DCP 시편의 충돌 배면 중앙의 변위 그래프

▪ DCP 모형충돌실험의 시편들의 거동은 그림 2.1.4.58에서 보는 것과 같다. 가스건에 의한 발사체에 의한 첫 충돌하중이 가해진 다음 진공챔버내에서 발사체에 의해추가적인 충돌이 가해짐에 따라 시험체가 일정시간 텀을 두고 두 번의 충돌하중을 받는 것과 같이 거동하는 것을 확인할 수 있다. 최대처짐이 보이는 것은 GI시편으로 마페그라우트 인터페이스의 균열 및 파괴거동에 의해 최대 잔류변위가 발생하였다. DC시편 또한 GI시편 다음으로 최대 처짐이 발생하였으며, 잔류변위가 1.48mm 발생하였다.

▪ 각 시편의 충돌하중 배면 중앙점에서의 변위 및 변위의 상대비교 하기 위하여, 표 2.1.4.17과 같이 DC2시편의 최대 변위 및 잔류변위를 기준으로 하여 normalized 하였다. 그 결과 최대 변위와 잔류변위 값에 대해 GI>DC>SA>DA>EI 시편 순으로 변형된 것을 확인할 수 있다. 여기에서 마페그라우트 인터페이스의 경우에는 시편 인터페이스에 의한 시편간의 오차가 크게 발생하였으나, 인터페이스의 균열 및 파괴에 의한 것이라고 판단된다. EI시편의 경우에는 탄성폴리머에 의해 충격에너지가 소산되는 것이라고 판단되며, 탄성회복율이 높은 것으로 확인되었다.

▪ 그림 2.1.4.59에서 확인할 수 있는 것과 같이, DA2시편의 앵커의 변형률을 확인하였으며, 모든 변형률이 항복하지는 않았으나, 충돌하중면의 균열이 발생한 것과 같이 충돌하중면의 전단변형률에서 거동이 다르게 발생하는 것을 확인할 수 있다.

표 2.1.4.17 각 시편별 충돌하중 배면에서의 최대변위 및 잔류변위

(mm)		DC			SA		DA		GI		EI	
		DC1	DC2	DC3	SA1	SA2	DA1	DA2	GI1	GI2	EI1	EI2
최대 변위	계측값	-	2.62	2.34	5.33	1.59	1.55	1.47	2.19	7.18	1.43	1.19
	Normalized Value	-	1.0	0.893	2.034	0.607	0.592	0.561	0.836	2.740	0.546	0.454
잔류 변위	계측값	-	1.48	1.2	0.0143	0.996	0.149	0.41	0.43	4.85	0.081	0.451
	Normalized Value	-	1.0	0.811	0.010	0.673	0.101	0.277	0.291	3.277	0.055	0.305
비 고		예비실험 1500psi	본실험 600psi		예비실험 300psi							

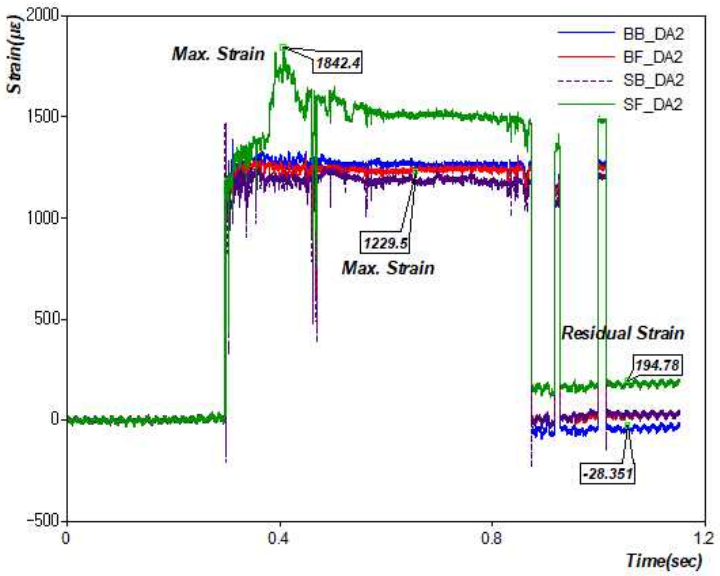


그림 2.1.4.59 DA2 시편 앵커의 변형률

(4) 신호인터페이스

(가) 2차년도 신호인터페이스 검토

① 개요

▪ 레일과 레일 사이 선로 내부에 구축되어 열차를 제어하는 신호설비로는 ATS 지상자와 ATP 지상자(발리스)가 설치된다. 특히, ATP 지상자의 경우 금속 물질의 이격거리에 대한 규정이 있으므로 설치 전 주변 환경에 분포된 금속 재질 및 질량을 고려하여야만 한다. 일탈방호설비는 기본적으로 다량의 철재 골조를 포함한다. 이는 선로변에 구축되어 열차를 제어하는 신호설비에 전기적 응동에 영향을 줄 수 있으며 열차의 정지 또는 오동작을 유발 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 실제 현장과 유사한 환경으로 시험용 선로를 사내에 설치하고 일탈방호설비의 설치 유/무에 따른 ATP/ATS 지상자의 응동 결과를 도출 및 비교·분석하였다.

② 신호설비 지상자 관련 구조 및 기준 검토

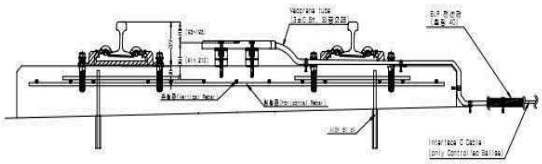
㉮ ATS 지상자

㉯ ATP 지상자

㉰ ATS 및 ATP 지상자 시공 현황

▪ ATS 지상자(속도조사식과 점제어식)

▪ 발리스 설치(토공 및 콘도상)





③ 실내시험 환경구축

□ ATS 지상자 측정 장비

▪ ATS 시험기(ATS 지상자 측정 장비)는 ATS 지상자의 정상 동작을 시험하는 장치로서 발진주파수(78kHz)를 출력하여 ATS 지상자와 전자기결합 시키고 지상자로부터 유도되어 나오는 공진주파수를 분석하여 공진주파수와 해당 공진주파수의 Q factor를 제공한다.

□ ATP 지상자 측정장비 및 OBA 측정 항목

▪ ATP 지상자 시험기(발리스검증장비)는 유럽의 ETCS SUBSET-085(유로발리스 기능인터페이스에 대한 시험사양)에 기반하여 발리스의 응동 결과를 분석하는 장비이다. 발리스검증장비는 표준 BTM(Balise Transmission Module)장비의 기능을 구현하여 발리스에 27㎒ 주파수의 텔레파워링을 송출하므로 발리스를 응동시키며, 발리스로부터 4㎒ 주파수의 출력신호를 실시간으로 저장하여 SUBSET-085 요구사항의 기준으로 텔레그램 디코딩, 중심 주파수, 주파수 편이, MTIE, 증폭 위상변위, 평균 데이터 속도 분석을 제공한다.

④ 신호설비 ATS 지상자 및 ATP 지상자 시험

㉮ 시험결과 분석

▪ 수행한 DCP구조물 설치 전, DCP구조물 설치 후, DCP구조물 이격 설치 시의 ATS 및 ATP 지상자 각각의 측정항목에 대한 측정결과의 요약은 다음 표와 같다.

표 2.1.4.18 실내 시험 결과 요약

장치명	측정항목	측정 결과		
		DCP구조물 설치 전	DCP구조물 설치 후	DCP구조물간 이격 설치
ATS 지상자	공진주파수	적합	부적합	적합
	공진주파수에 대한 Q	적합	부적합	적합
ATP 지상자 (A社)	텔레그램 디코딩	적합	부적합	적합
	중심주파수	적합	부분적합	적합
	주파수편이	적합	부분적합	적합
ATP 지상자 (B社)	텔레그램 디코딩	적합	부적합	적합
	중심주파수	적합	부분적합	적합
	주파수편이	적합	부분적합	적합

▪ 위 표에서와 같이 DCP구조물 설치 후 ATS 지상자 및 ATP 지상자 각각의 측정항목은 부적합 및 부분적합의 측정 결과로 도출되었으며, 도출된 측정 결과에 자체 원인분석 결과는 다음 표와 같다.

표 2.1.4.19 DCP설치 후 부적합 또는 부분적합결과에 대한 자체 원인분석결과

구분	ATS 지상자	ATP 지상자
원인 분석 결과	DCP구조물이 설치됨에 따라 내부에 배치되는 철근배열에 의한 유도현상 및 누설컨덕턴스의 증가로 인하여 간섭을 받아 공진주파수 및 Q factor가 기준값 범위 내에 포함되지 않으므로 열차운행 시 정상동작을 보장할 수 없다.	DCP 구조물이 설치됨에 따라 내부에 배치되는 철근의 영향으로 인한 발리스 안테나의 특성 저하와 신호전류의 감쇠 현상이 발생하였다. 차상 신호장치는 발리스의 응동 결과 텔레그램 디코딩 불가하여 열차운행 시 정상동작을 보장할 수 없다.

㉯ 결론

▪ 향후 DCP 구조물 구축에 따라 기존 선로 내에 설치되어 있는 ATS 지상자 및 ATP 지상자의 영향에 대한 실내시험을 수행하였으며, DCP 구조물 설치 후 ATS 및 ATP 지상자의 성능 저하로 이어지는 시험 결과를 발생하였다.

▪ 이러한 성능저하에 대한 대안으로 DCP 구조물 간을 일정 간격 이상을 이격하고 그 사이에 ATS 지상자 및 ATP 지상자를 설치하여 실내시험을 수행하였으며 그 결과 ATS 및 ATP 지상자의 측정결과가 적합함을 도출하였다.

▪ 따라서. 아래의 그림과 같이 DCP 구조물이 설치 예정인 선로에서 ATS 지상자를

설치하기 위해서 DCP 구조물 간 이격거리를 750mm 이상으로 설치되어야 하고, ATP 지상자를 설치하기 위해서는 DCP 구조물 간 이격거리를 300mm 이상으로 설치되어야 할 것이다.

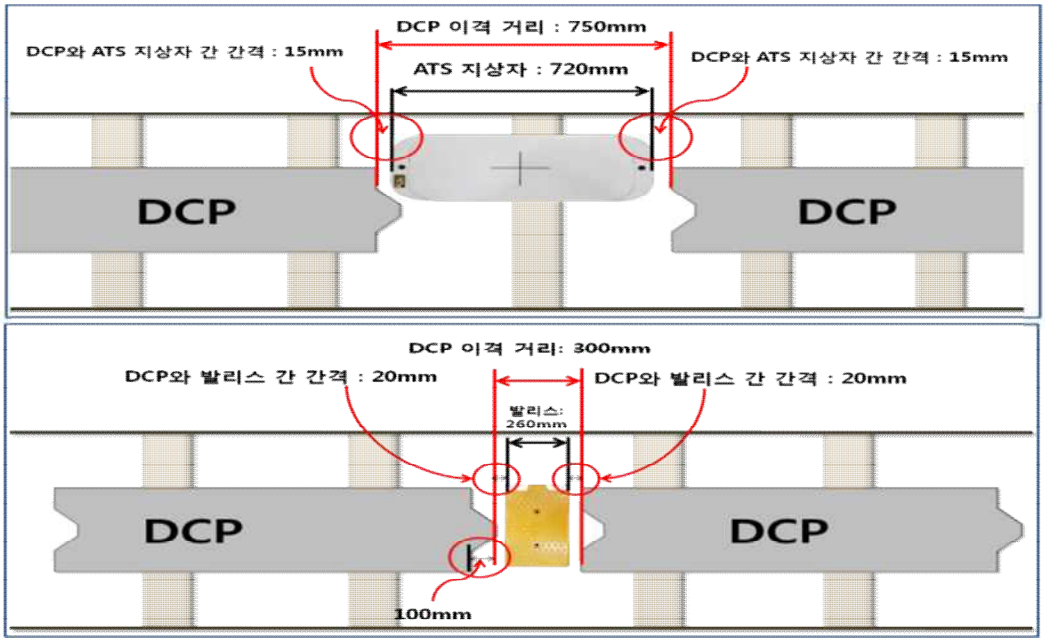


그림 2.1.4.60 ATS/ATP 지상자 설치를 위한 DCP 구조물간 이격거리 도출(안)

▪ 그러나, 향후 실제 DCP 구조물이 설치된 현장에서 ATS 및 ATP 지상자의 현장 시험을 통해 도출된 실제 측정값을 토대로 DCP 구조물 간의 간 이격 거리의 증명시험이 필요할 것이다.

(나) 3차년도 신호인터페이스 검토

① 실내 시험설비 구성품 개요

㉮ ATS 지상자

▪ ATS장치는 차상장치와 지상장치로 구성되어 있으며 동력차 하부에 설치된 차상자가 궤도 내에 설치되어 있는 지상자를 통과할 때 제한속도 정보를 차상자에서 반응하여 열차의 안전운행이 되도록 하는 장치이다.

표 2.1.4.20 ATS 지상자 설치 기준

항목	검토내용
레일상단과 ATS 지상자 간 거리	50mm ~ 80mm
궤도중심과 ATS 지상자 간 거리	300mm ± 10mm

▪ ATS 지상자와 ATS 지상자 제어함은 한국철도표준규격 KRS SG 0059-14(R)의 요구사항에 부합하도록 제작되었으며, 국내 선로에 적용된 ATS 지상자는 다음 표와 같이 KRS SG 0059-14(R)의 3.4절 성능 요구사항에 부합하도록 설치되었다.

표 2.1.4.21 ATS 지상자의 성능 조건표(KRS SG 0059-14(R))

종류	공진주파수(kHz)		공진주파수에 대한 Q		비고
	개방	콘덴서부가	개방	콘덴서부가	
점제어식	130±0.5	-	170±20	-	표준온도는 20℃로 한다.
차상속도 조사식	130±0.5	122±1.0 114±1.0 106±1.0 98±1.0	150 +40 -20	140 +40 -20	

▪ 또한, ATS 지상자의 공진주파수와 Q값의 측정을 위하여 ATS 지상자와 ATS 지상자 제어함을 연결, 회로를 구성하여야 한다. 본 시험에서는 개방회로를 구성하여 시험을 진행하였다.

㉯ ATP 지상자(발리스)

▪ 발리스는 ETCS 표준사양에 적합한 지리적 정보, 신호 정보 등을 주행 중인 열차로 무선을 사용하여 전송하는 장치로서, 500km/h 속도까지 적용 가능한 표준 규격 장치로서 발리스의 구조 및 설치도는 다음과 같다.

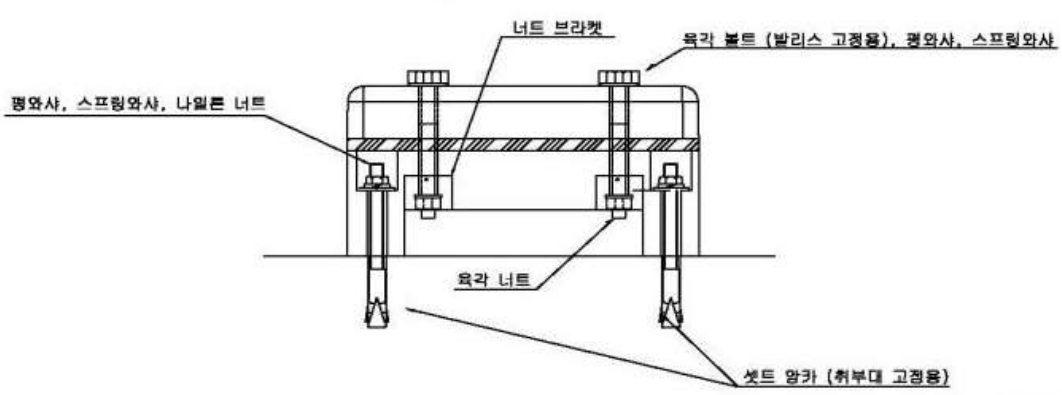


그림 2.1.4.61 ATP 지상자 콘크리트도상 설치기준(단면도)

표 2.1.4.22 ATP 지상자 콘크리트도상 설치기준 검토 결과

항목	검토내용
레일 상부와 ATP 지상자 간 거리	717.5mm

▪ ATP 지상자는 유럽표준사양 ETCS Subset 036의 요구사항에 부합하여 제작되었으며, 전기적 성능 및 은 다음 표와 같다.

표 2.1.4.23 ATP 지상자의 전기적 성능

항목	사양
중심주파수	4.234MHz ±175kHz
변조방식	FSK
주파수 편차	±282.24 kHz ±7%
전송률	564.48 kbit/s ±2.5%
텔레그램 길이	1023 or 341 bits

타 금속 물질의 제한 영역 : 가로 820mm, 세로 630mm, 수직 210mm

레일 상부면 아래로의 발리스 수직 위치 : 93mm~193mm

타 케이블 제한 영역 : 가로 1,200mm, 세로 1,200mm, 수직 400mm

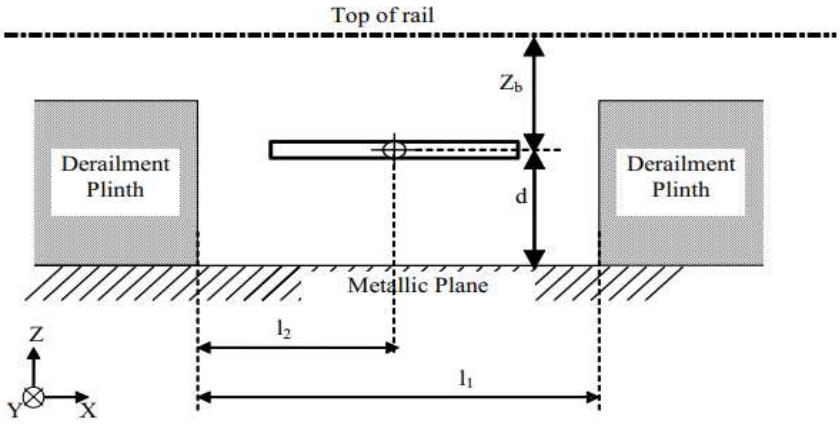


그림 2.1.4.62 ETCS Subset-036 에 명시된 발리스와 일탈방지시설 간 최소거리

▪ 발리스 중심 ~ 일탈방지시설까지의 거리 (l2) : 0.5m

▪ 위의 요구사항에 따라 ATP 지상자를 DCP에서 이격후 ATP 지상자의 길이를 제외하면 발리스 중심으로부터 DCP 까지 이격거리는 최소 370mm이다. 안전거리를 고려하고 보다 정확한 작동을 위해 본 시험에서는 DCP와 ATP지상자간의 이격거리를 400mm로 설정하여 시험을 진행하였다.

㉰ 도플러레이더

▪ 도플러 레이더(Doppler radar)는 차량 하부에 설치되어 도플러 효과를 이용해 출된 극초단파와 수신된 극초단파 간의 주파수(펄스) 차이에 의한 속도 분석 및 주파수(펄스) 당 주행 거리를 측정하는 장비이다.



그림 2.1.4.63 도플러레이더 DRS05

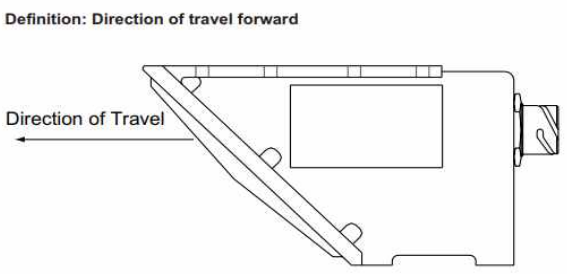


그림 2.1.4.64 도플러레이더 전방 운행 기준

표 2.1.4.24 도플러레이더 설치 검토 결과

항목	검토내용
레일 옆면부터 도플러레이더 최외곽까지의 거리	170 mm
레일 상면부터 도플러레이더 상면까지의 높이	500 mm

표 2.1.4.25 도플러레이더 제품 상세

제조사	품명	관련사진	시리얼넘버
DEUTA-WERKE	DRS05a		1401667

② 시험 준비 및 시험환경 구성

㉮ DCP 시험환경 구성

▪ DCP 제작업체와의 사전업무 협의에 따라 DCP 종별 수량을 확인하여 입고를 완료하여 기설치된 시험선로에 DCP 시험환경 구성을 다음과 같이 수행하였다.

㉯ 트로리 구성품 설치

▪ 사전 설계 작업에 따라 제작된 트로리 상에는 도플러레이더 및 발리스 검증을 위한 안테나가 설치된다. 도플러레이더 및 발리스검증장비 용 안테나 설치, 그에 따른 인터페이스 결선 작업을 다음과 같이 수행하였다.

㉰ ATP 및 ATS 지상자 설치

▪ ATP 지상자는 동적시험 조건을 고려하고, ATS 지상자는 정적시험 조건을 고려하여 다음과 같이 설치 작업을 수행하였다.

㉮ 발리스검증장비 설치 및 사전 동작 검증

▪ 발리스검증장비는 발리스 응동 상태 및 도플러레이더의 동작상태 등을 검증할 수 있는 장비로써 설치 및 사전 동작 검증 작업을 다음과 같이 수행하였다.

㉯ 트로리

▪ 트로리는 ATP지상자 및 도플러레이더의 동적시험을 수행하기 위한 설비로써 사내 시험선로에서 시험 열차를 대신하여 사용된다.

㉰ 발리스 검증장비(도플러레이더 측정 포함)

▪ 발리스 검증장비는 유럽의 ETCS SUBSET-085(유로발리스 기능인터페이스에 대한 시험사양)에 기반하여 발리스의 응동 결과를 분석하는 장비이다. 발리스검증장비는 표준 BTM(Balise Transmission Module)장비의 기능을 구현하여 발리스에 27㎒ 주파수의 텔레파워링을 송출하므로 발리스를 응동시키며, 발리스로부터 4㎒ 주파수의 출력신호를 실시간으로 저장하여 SUBSET-085 요구사항의 기준으로 텔레그램 디코딩, 중심 주파수, 주파수 편이, MTIE, 증폭 위상변위, 평균 데이터 속도 분석 및 타코미터, 도플러레이더의 신호를 수신하여 발리스 수신시마다의 이동거리 및 속도 정보를 제공한다.

㉱ ATS 지상자 시험기

▪ ATS 지상자 시험기는 정적시험장비로서, 측정장비를 ATS 지상자 상단에 고정하여 발진주파수(78kHz)를 출력하여 ATS 지상자와 전자기를 결합시키고 지상자로 부터 유도되어 나오는 공진주파수를 분석하여 공진주파수와 해당 공진주파수의 Q fator를 제공한다.

표 2.1.4.26 ATS지상자 시험기의 측정방법

이미지	번호	측정항목
	①	공진주파수[kHz]
	②	공진주파수에 대한 Q factor

③ 사전 실내시험

㉮ ATP지상자 사전시험

▪ ATP지상자의 사전시험을 위해 6m용 DCP 패널 2개를 사용하여 총 4가지 방안으로 ATP지상자를 설치하여 사전시험을 수행하였다.

㉯ ATS지상자 사전시험

▪ ATS지상자의 사전시험을 위해 6m용 DCP 패널을 설치하여 ATS지상자를 DCP와 100mm 이격하고 정방향 및 역방향 시험을 수행하였다. 시험 수행 결과는 다음과 같다.

㉰ 도플러레이더 사전시험

▪ 도플러레이더의 사전시험을 위해 6m용 DCP 패널을 설치하여 ATP지상자를 DCP 패널 양 끝단에 ATP 지상자 간 5m, 7m 간격으로 이격 설치하고 트로리를 주행함으로써 주행거리를 측정하였다. 시험 수행 결과는 다음과 같다.

④ 공인기관 입회 시험

㉮ 시험개요

▪ 유경제어(주) 사내에서의 DCP 설치에 따른 신호설비(ATP/ATS지상자, 도플러레이더) 인터페이스 시험에 대한 제3자 적합성 평가를 달성하기 위해 다음과 같은 내용으로 공인기관 입회 시험을 실시하였다.

표 2.1.4.27 공인기관 입회시험 개요

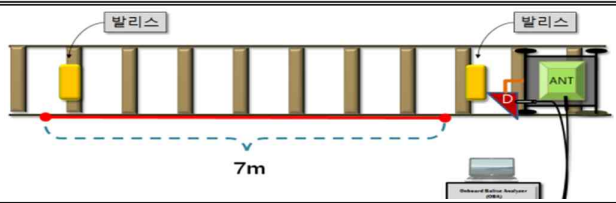
순번	구분	내용
1	공인기관	㈜디엔브이지엘 비즈니스어슈어런스코리아(DNV GL)
2	시험일자	2018년 10월 16일(火) 10:00 ~ 18:00
3	시험장소	유경제어(주) 사내 시험선로
4	시험 참여자	입회: DNV GL 코리아 제품보증실 엄정규 부장 시험: 유경제어(주) 기술연구소 지정근 팀장 외 3명 감독: 한국철도기술연구원 전철전력연구팀 신승권 박사
5	공인기관 역할	시험절차 및 시험설비 검토 시험 입회 및 시험 결과서 발급

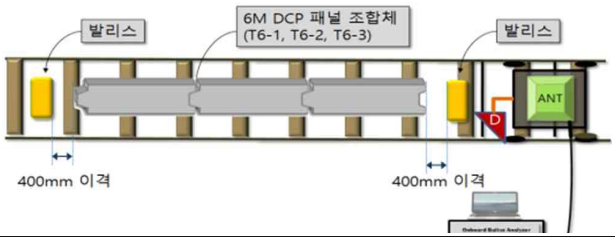
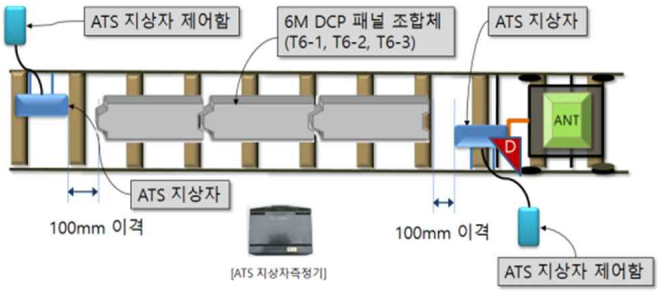
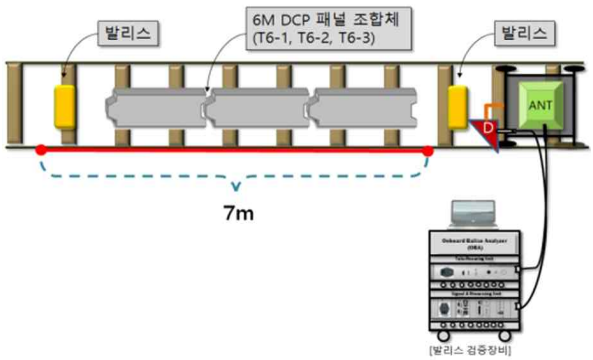
※ DNV GL 소개

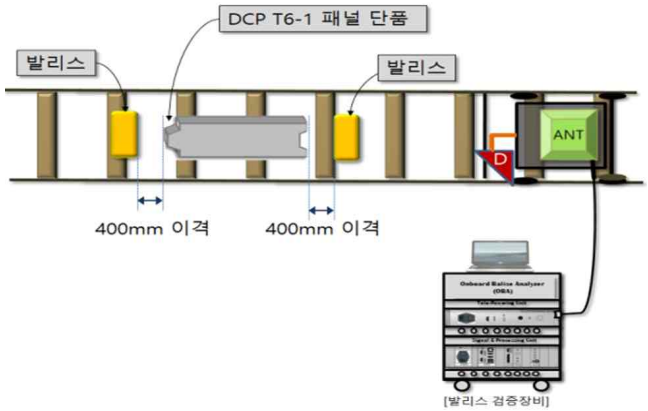
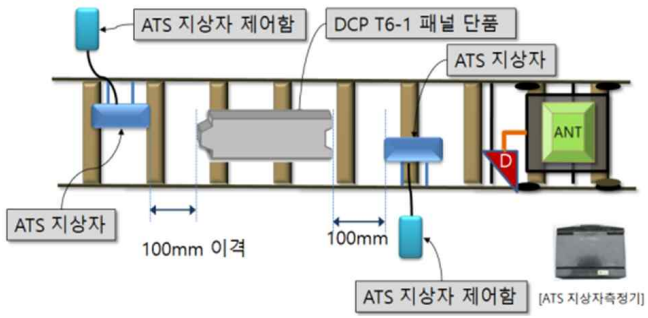
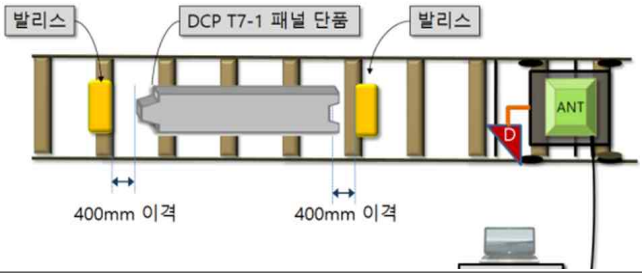
DNV GL은 노르웨이의 호빅(Høvik)에 본사를 둔 국제인증기관

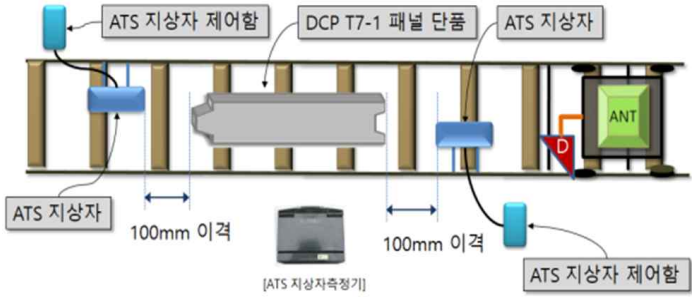
㈏ 총괄 시험 현황

▪ 공인기관 시험은 사전 협의된 내용에 따라 크게 「DCP 설치 전 시험」, 「6m DCP 3개 설치 후 시험」, 「6m DCP 1개 설치 후 시험」, 「7m DCP 1개 설치 후 시험」으로 구분되며, 시험대상 장비 별 세부 시험 항목은 다음과 같이 총 8가지 시험으로 구분된다.

순번	시험명	시험 구성 및 절차	
①	DCP 설치 전 시험 (도플러 레이더)	구성	
		절차	① 레일 위에 7m를 측정하여 출발점과 도착점을 표시 ② 트로리를 정확히 이동 ③ 측정장비 결과값을 실제 이동거리와 비교, 오차를 산정 ④ 3회 반복

②	6m DCP 3개 설치 후 시험 (ATP 지상자)	구성	
		절차	① DCP 6m 조합체 설치 ② DCP 전후로 각각 400mm를 이격하여 발리스를 설치 ③ 트로리를 정방향으로 이동시켜 ATP 지상자를 응동 ④ 발리스 검증장비를 통해 표시되는 측정항목 확인 ⑤ 역방향으로 ① ~ ④ 반복
③	6m DCP 3개 설치 후 시험 (ATS 지상자)	구성	
		절차	① DCP 6m 조합체 설치 ② DCP 로부터 100mm 이격 후 ATS 지상자 설치 ③ ATS 지상자 측정장비를 이용하여 측정 ④ 역방향으로 ① ~ ③반복
④	6m DCP 3개 설치 후 시험 (도플러 레이더)	구성	
		절차	① DCP 6m 조합체 설치 ② 레일 위에 7m를 측정하여 출발점과 도착점을 표시 ③ 트로리를 정확히 이동 ④ 측정장비 결과값을 실제 이동거리와 비교, 오차를 산정 ⑤ 3회 반복

⑤	6m DCP 1개 설치 후 시험 (ATP 지상자)	구성	
		절차	① DCP T6-1 패널 설치 ② DCP 전후로 각각 400mm를 이격하여 발리스를 설치 ③ 트로리를 정방향으로 이동시켜 ATP 지상자를 응동 ④ 발리스 검증장비를 통해 표시되는 측정항목 확인 ⑤ 역방향으로 ① ~ ④ 반복
⑥	6m DCP 1개 설치 후 시험 (ATS 지상자)	구성	
		절차	① DCP T6-1 패널 설치 ② DCP 로부터 100mm 이격 후 ATS 지상자 설치 ③ ATS 지상자 측정장비를 이용하여 측정 ④ 역방향으로 ① ~ ③반복
⑦	7m DCP 1개 설치 후 시험 (ATP 지상자)	구성	
		절차	① DCP T7-1 패널 설치 ② DCP 전후로 각각 400mm를 이격하여 발리스를 설치 ③ 트로리를 정방향으로 이동시켜 ATP 지상자를 응동 ④ 발리스 검증장비를 통해 표시되는 측정항목 확인 ⑤ 역방향으로 ① ~ ④ 반복

⑧	7m DCP 1개 설치 후 시험 (ATS 지상자)	구성	
		절차	① DCP T7-1 패널 설치 ② DCP 로부터 100mm 이격 후 ATS 지상자 설치 ③ ATS 지상자 측정장비를 이용하여 측정 ④ 역방향으로 ① ~ ③반복

㉰ 시험결과

▪ 총 8가지 세부 시험 항목에 따라 공인기관의 입회 하에 사내 시험이 수행되었다. 상세한 시험결과 증빙보고서의 부록에서 제2절 공인시험 결과 기록지를 참조한다.

㉱ 시험결과 요약 및 분석

▪ 수행한 DCP 설치에 따른 신호설비(ATP, ATS, 도플러레이더) 인터페이스 공인시험의 측정결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

표 2.1.4.28 공인시험 결과 요약

구분	장치명	측정 결과
DCP 설치 전 시험	도플러레이더	적합
6m DCP 3개 설치 후 시험	ATP 지상자(발리스)	적합
	ATS 지상자	적합
	도플러레이더	적합
6m DCP 1개 설치 후 시험	ATP 지상자(발리스)	적합
	ATS 지상자	적합
7m DCP 1개 설치 후 시험	ATP 지상자(발리스)	적합
	ATS 지상자	적합

▪ 이와 같이 DCP 설치에 따른 ATS 지상자(발리스)는 일탈방호시설로부터 400mm, ATS 지상자는 일탈방호시설로부터 100mm를 이격하여 설치한다면 정상적으로 작동함을 확인하였고, 도플러레이더의 작동도 DCP 설치에 따른 영향을 받지 않는 것으로 확인하였다.

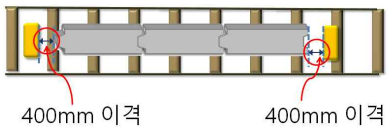
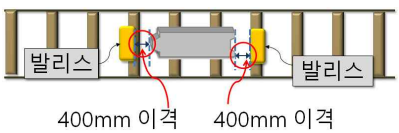
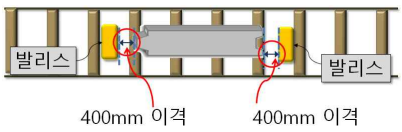
표 2.1.4.29 공인시험 결과 분석

구분	ATP 지상자	ATS 지상자	도플러레이더
결과	일탈방호시설로부터 400mm 이격하여 ATP 지상자(발리스)를 설치하였을 경우 정상적으로 작동한다.	일탈방호시설로부터 100mm 이격하여 ATS 지상자를 설치하였을 경우 정상적으로 작동한다.	도플러레이더의 동작은 ATP 지상자를 400mm 이격하여 설치할 경우 일탈방호시설 설치에 영향을 받지 않는다.

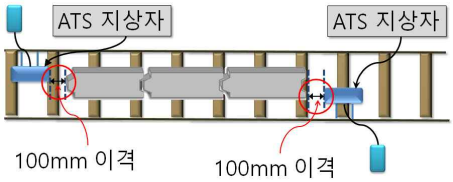
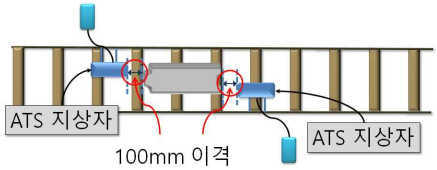
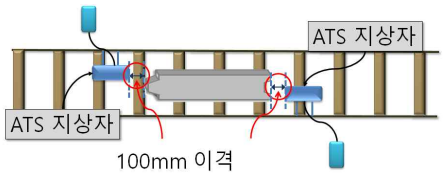
㈐ 결론

▪ DCP 구조물 구축에 따라 기존 선로 내에 설치되어 있는 ATP 지상자 및 ATS 지상자의 영향에 대한 실내시험 및 공인시험을 수행하였다.

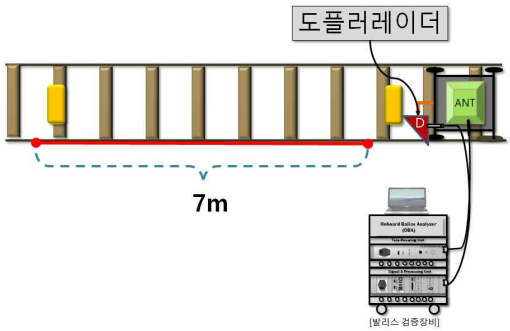
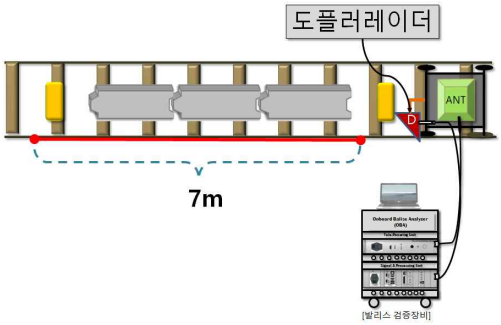
▪ 실내시험 및 공인시험을 통하여 아래 표와 같이 ATP 지상자를 설치된 DCP로부터 400mm 이격 설치 시 ATP 지상자가 정상적으로 작동함을 확인하였다.

시험 분류	시험 개요	시험 조건
6m DCP 3개 설치 후 시험		DCP로부터 400mm 이격 설치
6m DCP 1개 설치 후 시험		DCP로부터 400mm 이격 설치
7m DCP 1개 설치 후 시험		DCP로부터 400mm 이격 설치

▪ 실내시험 및 공인시험을 통하여 아래 표와 같이 ATS 지상자를 설치된 DCP로부터 100mm 이격 설치 시 ATS 지상자가 정상적으로 작동함을 확인하였다.

시험 분류	시험 개요	시험 조건
6m DCP 3개 설치 후 시험		DCP로부터 100mm 이격 설치
6m DCP 1개 설치 후 시험		DCP로부터 100mm 이격 설치
7m DCP 1개 설치 후 시험		DCP로부터 100mm 이격 설치

▪ 실내시험 및 공인시험을 통하여 아래의 표와 같이 DCP 설치 전, 설치 후 환경에서 도플러레이더가 정상적으로 작동함을 확인하였다.

시험 분류	시험 개요	시험 조건
DCP 설치 전		도플러레이더의 감지 거리와 실제 이동거리 비교
DCP 6m 패널 조합체		도플러레이더의 감지 거리와 실제 이동거리 비교

▪ 그러나, 향후 DCP 구조물이 설치된 현장에서 ATP 지상자, ATS 지상자, 도플러레이더의 현장시험을 통해 보다 실제 현장에 가까운 환경에서의 증명시험이 필요하다.

마. 일탈방호시설 현장성능평가

▪ 본 보고서에서는 개발된 DCP의 열차하중 충돌에 의한 내구 안정성에 대하여 실험 및 계측을 통해 검토하고자 한다. DCP 본체의 내충격성 평가를 통해 열차가 탈선한 경우의 열차탈선하중에 의한 DCP의 건전도를 실대형 실험을 통해 분석하고자 한다. 또한 TCL층과 연결된 앵커 부위를 실대형 실험을 통하여 얻어진 계측값으로 정량화된 수치값을 얻고자 한다. 낙하하중에서 앵커 부위에 설치된 센서로 측정값의 정확성을 확인하고, 이를 통하여 실제 현장(유수역)에 조성된 DCP 설치 구간에 계측장지를 설치하여 열차의 탈선에 의한 앵커 전단력을 계측하고자 한다. 이를 통해 정량적인 평가 분석으로 DCP의 내구 안정성에 대한 상태평가 분석을 하고자 한다. 이를 위하여 수행한 실대형 실험의 내용을 다음의 표와 같이 2가지로 나누어 정리하였다.

표 2.1.5.1 현장 실대형 실험 측정

연번	시험종류	시험목표	상세내용
1	낙하충돌 시험평가	- 낙하하중에 의한 DCP 패널의 건전도 평가 - 앵커의 전단력 평가	- 낙하충격체 매개변수에 따른 충돌에너지 변화에 대한 DCP 패널의 내충격성 상태평가 - 고속열차 동력차의 탈선에 의한 하중에너지 상호비교 분석
2	DCP 현장충돌 시험	- 열차하중의 충돌에 의한 DCP 패널의 앵커 전단력 평가	- 열차의 탈선에 의한 TCL과 연결된 DCP의 앵커 전단력 평가

(1) DCP의 내충격성 실험

(가) 내충격성 실험 개요

① 실험방법

▪ 본 연구는 탈선차량의 일탈방호를 위해 설치되는 DCP 구조에 대한 충격시 거동을 관찰하기 위한 것으로 그림 2.1.5.1과 같은 Drop Weight Tower를 이용하였다. 낙하체의 제원은 표 2.1.5.2와 같으며, 총 718kg의 질량으로 중력에 의해 위치에너지가 운동에너지로 변환되는 것을 이용하여 실험체를 가격한다.



그림 2.1.5.1 Drop Weight Tower 및 실험체

표 2.1.5.2 낙하체 제원

구 분	중량(kgf)
낙하추(Mass)	430
로드셀	14
충격체(Head)	274
합계	718

② 실험체

▪ 본 실험에서는 표 2.1.5.3과 같은 실험체를 대상으로 실험하였다.

표 2.1.5.3 실험체 정보

No	앵커 제원	앵커 개수	재하 위치	비고
#1-1	H25	4	중심부	
#1-2	H25	4	중심부	
#2-1	H25	4	앵커부	
#2-2	H25	4	앵커부	
#3-1	H32	2	중심부	
#3-2	H32	2	중심부	

(나) 내충격성 실험 결과

▪ DCP 패널에 대한 Drop Weight 충격실험 결과를 정리하면, 표 2.1.5.4와 같으며, 세부적인 실험 결과는 세부 실험 결과에서 확인할 수 있다.

표 2.1.5.4 실험 결과 요약

Case	시험체		낙하높이 (m)	위치에너지 (kJ)	충돌속도(m/sec)		비고
					이론	측정	
1	#3-2	H32-2ea 중앙부	2.158	15.20	6.51	6.38	철근, 앵커 노출
2	#3-1	H32-2ea 중앙부	1.004	7.07	4.44	4.35	피복 파손
3	#2-2	H25-4ea 앵커부	0.504	3.55	3.14	2.99	피복 균열
4	#2-1	H25-4ea 앵커부	0.508	3.58	3.16	3.02	피복 균열
5	#1-2 (1차 낙하)	H25-4ea 중앙부	0.499	3.51 (3.51)	3.13	3.01	피복 균열
6	#1-2 (2차 낙하)	H25-4ea 중앙부	1.003	7.06 (10.57)	4.44	4.35	피복 파손
7	#1-2 (3차 낙하)	H25-4ea 중앙부	0.506	3.56 (14.13)	3.15	3.04	철근, 앵커 노출
8	#1-1 (1차 낙하)	H25-4ea 중앙부	1.007	7.09 (7.09)	4.44	4.37	피복 파손
9	#1-1 (2차 낙하)	H25-4ea 중앙부	1.009	7.11 (14.20)	4.45	4.38	철근, 앵커 노출
10	#1-1 (3차 낙하)	H25-4ea 중앙부	2.138	15.06 (29.26)	6.48	6.29	DCP 완전 분리

① 세부 실험 결과 (Test 01 (#3-2, 2.16m))

<table>
<tr><td>Case No.</td><td colspan="2">1</td><td>낙하높이(m)</td><td colspan="2">2.158</td><td>위치에너지</td><td>15.2kJ</td></tr>
<tr><td rowspan="2">실험체</td><td colspan="3">No.</td><td colspan="2">앵커</td><td colspan="2">재하위치</td></tr>
<tr><td colspan="3">#3-2</td><td colspan="2">H32-2ea</td><td colspan="2">중앙</td></tr>
<tr><td rowspan="2">속도
(m/sec)</td><td colspan="3">이론</td><td colspan="2">속도계</td><td colspan="2">영상분석</td></tr>
<tr><td colspan="3">6.50</td><td colspan="2">6.58</td><td colspan="2">6.38</td></tr>
<tr><td>최대가속도(g)</td><td colspan="7">71.12</td></tr>
<tr><td rowspan="2">낙하체 변위
(mm)</td><td colspan="3">최 대</td><td colspan="4">67.78</td></tr>
<tr><td colspan="3">잔 류</td><td colspan="4">66.26</td></tr>
<tr><td>단부변위 (mm)</td><td colspan="7">최대 : - , 잔류 : - (좌측 단부)</td></tr>
<tr><td rowspan="3">앵커부 변위
(mm)</td><td></td><td colspan="2">Left Up</td><td>Left Down</td><td>Right Up</td><td colspan="2">Right Down</td></tr>
<tr><td>최대</td><td colspan="2">83.94</td><td>-</td><td>-</td><td colspan="2">21.48</td></tr>
<tr><td>잔류</td><td colspan="2">81.69</td><td>-</td><td>-</td><td colspan="2">17.99</td></tr>
<tr><td colspan="8">실험 사진</td></tr>
<tr><td colspan="8">  
<실험 전> <실험 후></td></tr>
<tr><td>비고</td><td colspan="7">· 좌측 앵커부(상부 배치) 철근 및 앵커 노출, DCP측 앵커 인발
· 우측 단부 파손
· DCP와 TCL층 분리</td></tr>
</table>

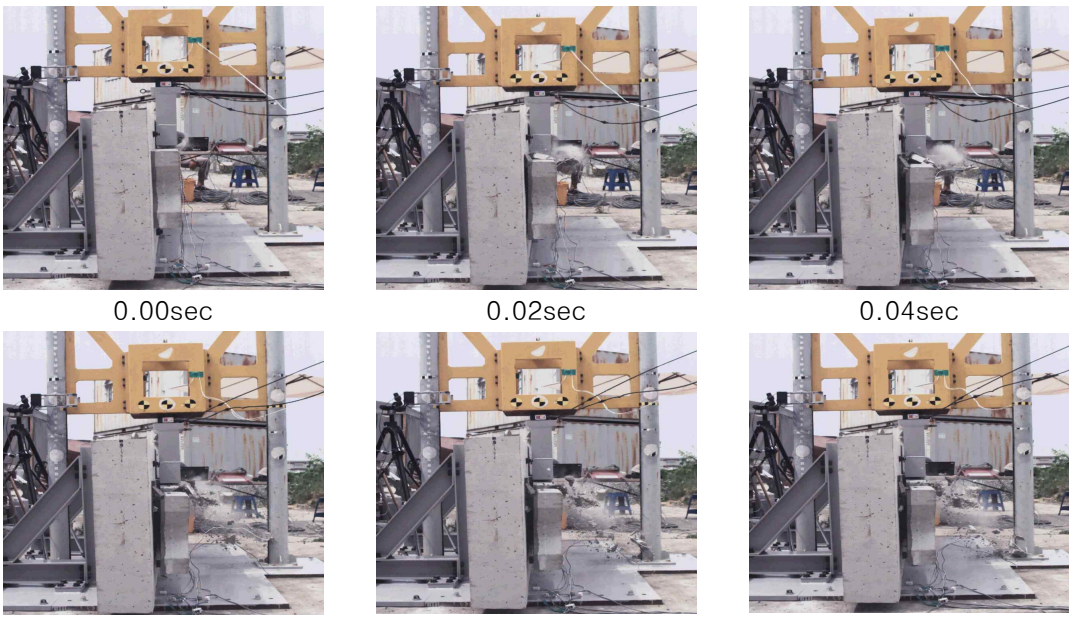


그림 2.1.5.2 시간대별 거동(측면)

(다) DCP의 내충격성 평가

▪ 본 연구에서는 DCP에 가해지는 충격하중에 대한 내충격성을 검토하기 위한 시험을 수행한 것으로, 설계하중 등의 특정 하중크기에 대한 정적 내하력 검토와 달리 충돌에 의한 내부에너지(Internal Energy)를 이용하여 분석하고자 하였다.

▪ 고속열차의 탈선 후 DCP 패널당 작용하는 내부에너지는 실대형 탈선/충돌 실험을 통해 검증된 시뮬레이션 모델(LS-DYNA)을 활용하여 도출하였으며 낙하충격시험에 의한 위치에너지(Potential energy)와 비교를 통해 DCP 패널의 내충격성을 검토하였다.

① DCP 패널의 내부에너지

▪ 충돌해석에 특화된 범용 유한요소해석 프로그램 LS-DYNA를 활용한 고속열차(KTX-동력차 1량)의 탈선/충돌 시뮬레이션 결과를 통해 DCP 패널당 내부에너지를 도출한 결과를 이용하여 본 충격시험 결과와 비교하였다. 시뮬레이션 조건은 다음과 같이 대표적 탈선상황을 가정하였다.

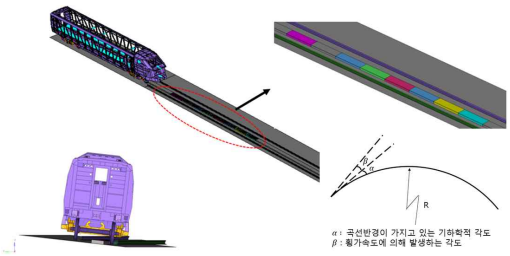


그림 2.1.5.3 탈선/충돌 시뮬레이션 조건

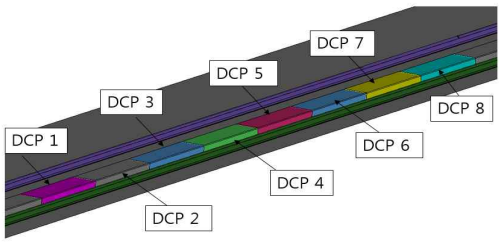


그림 2.1.5.4 패널별 DCP 번호

표 2.1.5.5 탈선/충돌 시뮬레이션 조건

궤도 및 열차 조건		DCP 물성 조건	
곡선반경	3,500 m	밀도	2.35e-9 t/mm3
초기 탈선각도(β)	0.58467 deg.	탄성계수	31,000 MPa
주행속도(1량)	300 km/h	푸아송비	0.2

▪ 시뮬레이션 결과 DCP 패널 당 내부에너지를 그림 2.1.5.5와 표 2.1.5.5에 나타내었다. 각 패널마다 차륜과 2회 이상 충돌하며, 차륜과 DCP 패널이 충돌할 때마다 충돌 접촉면적에 따라 약 0.08~1.82 kJ(평균 0.57 kJ)의 충돌에너지가 발생한다. 그리고 앞대차의 차륜들과의 충돌 및 뒷대차의 차륜들까지 충돌하면서 패널당 누적 충돌에너

지는 0.64~3.57 kJ가 축적된 것으로 나타났다. 본 시뮬레이션 결과를 통해 동력차(66 tonf) 1량 기준으로 DCP 패널이 받는 최대 누적 충돌에너지를 3.5 kJ로 결정하였다.

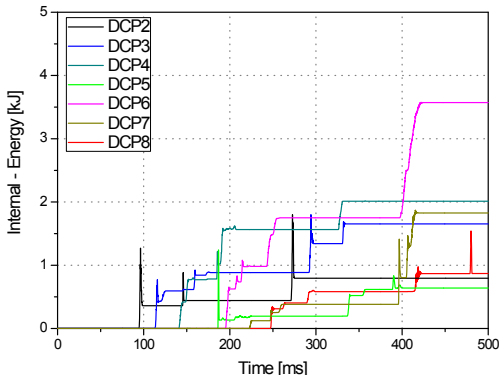


그림 2.1.5.5 DCP 패널당 내부에너지

② DCP 패널의 내충격성 평가

▪ 충돌시뮬레이션 결과를 통해 300 km/h의 속도로 주행하는 고속열차(KTX) 동력차의 탈선에 의한 DCP 패널에 작용하는 최대 누적 충돌에너지 3.5 kJ을 기준으로 하였다. 이 충돌에너지는 본 시험의 낙하충격체(718 kg)가 0.5 m에서 낙하할 때 동일한 수준의 에너지 크기(이론값=3.52 kJ)로 간주할 수 있다.

▪ 표 2.1.5.6은 충돌에너지 3.5 kJ에 대한 시험케이스로 DCP 패널의 앵커부와 중앙부에 충돌했을 때 모두 앵커상단 피복부에 균열이 발생하였고 TCL층과 DCP 패널접합부에 미세한 들뜸 현상이 나타났다. 그러나 DCP 패널을 횡방향으로 지지하는 앵커는 모두 건전하여 DCP의 목적상 일탈방호성능 확보에는 문제가 없는 상태이다(그림 2.1.5.6).

표 2.1.5.6 충돌에너지 3.5 kJ에 대한 시험케이스

Case	시험체		낙하높이(m)	위치에너지(kJ)	DCP 상태
3	#2-2	H25-4ea 앵커부	0.504	3.55	피복 균열
4	#2-1	H25-4ea 앵커부	0.508	3.58	피복 균열
5	#1-2	H25-4ea 중앙부	0.499	3.51	피복 균열



그림 2.1.5.6 충돌에너지 3.5 kJ에 대한 DCP패널의 건전도(case 5)

(2) DCP의 앵커 전단력 측정실험

▪ 본 장에서는 DCP 패널의 내구 안정성 평가를 위해 TCL(도상콘크리트 층)과 연결된 앵커의 전단 거동을 측정하고자 한다. 이를 위하여 먼저 앞 장에서 기술한 낙하하중의 충격하중 기법으로 앵커의 전단 거동을 계측을 통해 분석하고자 한다. 그리고 결과 분석을 통해 앵커의 전단거동을 확인 후 현장 실대형 실험으로 열차하중 탈선 실험으로 실제 부설된 유수역의 폐선부지에서 실대형 실험을 수행하여 DCP의 앵커에 대한 내구 안정성을 평가하고자 한다.

(가) 계측시스템 구축

① 계측항목

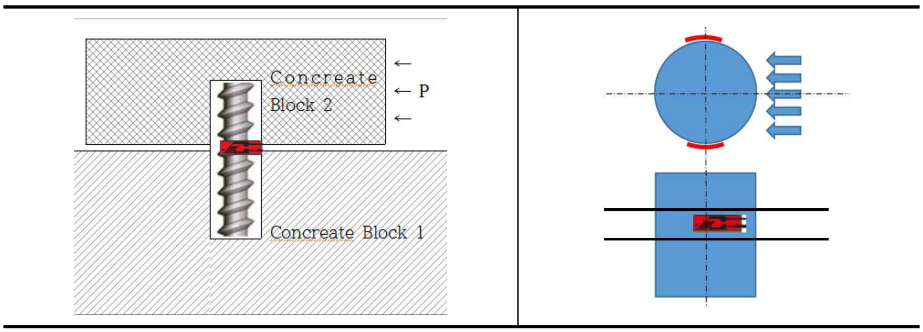
계측항목	계측센서	내 용	수량(ea)
DCP 앵커 전단응력	전단 변형률계	열차 충돌시 TCL-DCP 앵커 전단변형률 측정	32

② 계측센서 및 장비 사양

계측센서	항 목	사 양	수량(ea)	사 진
전단 변형률계	모델명	FCT-05A	32	
	측정범위	50000με		
	형 식	전기저항식		
	입출력저항	120Ω		
	제조사	TML 사(일본)		

계측센서	항 목	사 양	수량(ea)	이미지 정보
동적 데이터로거	모 델	DRA-30A	1	
	제 조 사	TML 사(일본)		
	측정센서	전기 저항식, 전압, 온도계		
	측정속도	Max 10K/sec		
	저장용량	4Mbyte		
	사용온도범위	-25 ~ 50℃		

③ 전단변형률 게이지 설치 모식도



(나) 낙하하중에 의한 앵커 전단력 측정

▪ 여기서는 DCP 패널을 설치한 폐역 유수역의 일탈방호시설(DCP, Derailment Containment Provision)의 내충격성을 평가하기 위한 충격력(충격에너지) 재하시험 수행중 TCL(도상콘크리트층)과 DCP 구조물의 앵커 전단거동에 따른 전단력을 측정하는데 목적이 있다. 이를 위하여 DCP 내충격성 평가시험(Drop weight test)에서 앵커에 작용하는 전단거동을 평가하기 위해 계측 시스템 구축하여 분석하였다.

① Drop test 실험의 센서배치 계획

▪ 드롭 테스트 실험에 의해 앵커의 거동을 분석하기 위한 센서의 취부와 앵커의 위치등을 다음 표에 나타내었다. 앞 장에서 설명한 바와 같이 타격 높이는 고속열차가 300km/h로 주행할 때 탈선하중에 의한 에너지값을 환산한 값으로 산정하였다. 실험의 경우는 모두 6가지로 하였다.

시험 순서	Case	Sensor ID.	Anchor Size	Load Position	타격 높이
1차	#3-2	ST1, ST2 17A, 17B / ST1, ST2 18A, 18B	H32	Center	2.158m
2차	#3-1	19A, 19B / 20A, 20B	H32	Center	1.000m
3차	#2-2	13A, 13B / 15A, 15B	H25	Anchor	0.504m
4차	#2-1	9A, 9B / 11A, 11B	H25	Anchor	0.508m
5차	#1-2	5A, 5B / 6A, 6B / 7A, 7B / 8A, 8B	H25	Center	0.499m 1.003m
6차	#1-1	ST1, ST2 1A, 1B / ST1, ST2 2A, 2B / 3A, 3B / 4A, 4B	H25	Center	1.000m 1.003m

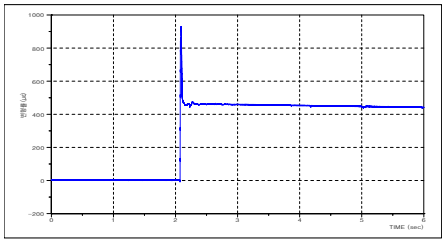
② 실험전경 및 계측데이터 수집

▪ 앞 장에서 기술한 Drop Weight Tower를 이용하여 하중을 가하였으며, 앵커에 취부된 전단변형게이지를 DCP설치에 사용하여 실험체를 설정하였다.

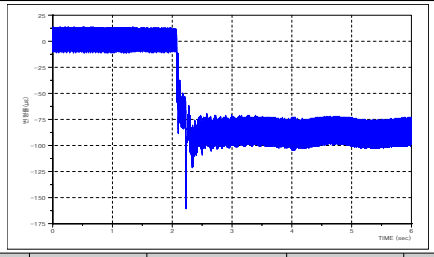
㉮ 측정변형률 값

▪ DCP 패널에 대한 Drop Weight 충격실험으로 앵커의 전단력 계측 결과를 정리하면 다음과 같으며, 세부적인 실험 결과는 세부 실험 결과에서 확인할 수 있다.

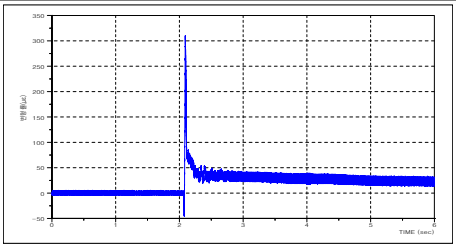
측정 Case.	Sensor ID.	측정변형률(με)	순수 전단변형률(ν)	전단응력 (km/cm^2)	전단력(kgf)
1차 3-2	17A	-	-	-	-
	17B	-	-	-	-
	18A	-	-	-	-
	18B	-	-	-	-
2차 3-1	19A	-	-	-	-
	19B	-	-	-	-
	20A	-	-		
	20B	-596.915	-1193.83	-925.450	-7349.921
3차 2-2	13A	-169.158	-338.316	-262.260	-1328.874
	13B	-116.822	-233.644	-181.119	-917.732
	15A	-333.644	-667.288	-517.278	-2621.045
	15B	-608.411	-1216.822	-943.273	-4779.564
4차 2-1	9A	-	-	-	-
	9B	-	-	-	-
	11A	1512.149	3024.298	2344.417	11879.161
	11B	-222.429	-444.858	-344.851	-1747.361
5차 1-2	5A	930.84	1861.68	1443.163	7312.506
	5B	-160.747	-321.494	-249.220	-1262.799
	7A	-694.392	-1388.784	-1076.577	-5455.014
	7B	-376.635	-753.27	-583.930	-2958.774
	6A	310.28	620.56	481.054	2437.502
	6B	1164.485	2328.97	1805.403	9147.978
	8A	-638.317	-1276.634	-989.639	-5014.500
	8B	-243.925	-487.85	-378.178	-1916.229
6차 1-1	1A	-	-	-	-
	1B	-162.616	-325.232	-252.118	-1277.481
	2A	-	-	-	-
	2B	-	-	-	-
	3A	-	-	-	-
	3B	-	-	-	-
	4A	-	-	-	-
	4B	-	-	-	-



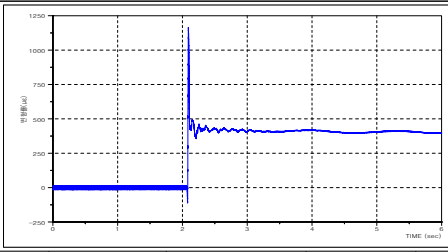
Case.	Sensor ID.	측정변형률 (με)	전단력 (kgf)	비 고
5차 #1-2	5A	930.84	7312.506	



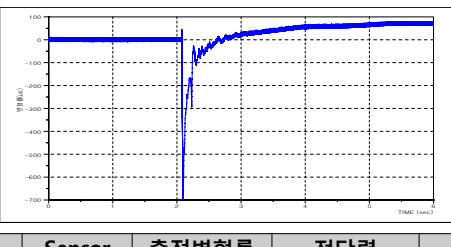
Case.	Sensor ID.	측정변형률 (με)	전단력 (kgf)	비 고
5차 # 1-2	5B	-160.747	-1262.799	



Case.	Sensor ID.	측정변형률 (με)	전단력 (kgf)	비 고
5차 # 1-2	6A	310.28	2437.502	



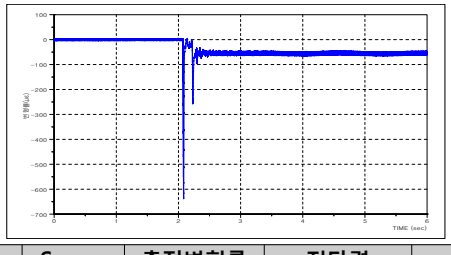
Case.	Sensor ID.	측정변형률 (με)	전단력 (kgf)	비 고
5차 #1 -2	6B	1164.485	9147.978	



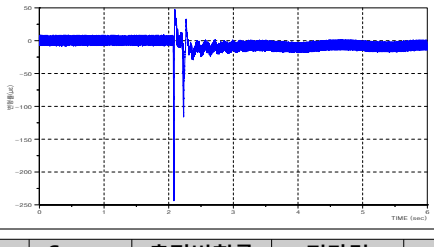
Case.	Sensor ID.	측정변형률 (με)	전단력 (kgf)	비 고
5차 # 1-2	7A	-694.392	-5455.014	



Case.	Sensor ID.	측정변형률 (με)	전단력 (kgf)	비 고
5차 # 1-2	7B	-376.635	-2958.774	



Case.	Sensor ID.	측정변형률 (με)	전단력 (kgf)	비 고
5차 # 1-2	8A	-638.317	-5014.500	



Case.	Sensor ID.	측정변형률 (με)	전단력 (kgf)	비 고
5차 # 1-2	8B	-243.925	-1916.229	

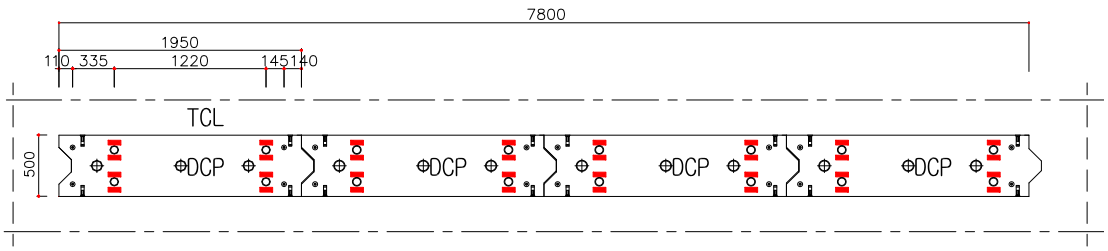
그림 2.1.5.7 변형률 측정값 (Drop Test 하중)

(다) 열차 충돌하중에 의한 DCP 앵커 전단력 측정

▪ 다음은 유수역에 설치된 DCP 패널의 조립을 위한 앵커 위치 및 평면도를 나타내고 있다. TCL 층과 DCP 패널의 앵커 구속된 상태는 종단면도를 살펴보면 알 수 있다.

① 배치도 상세

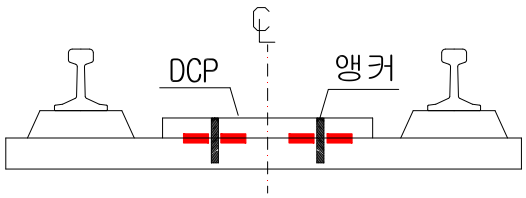
평 면 도



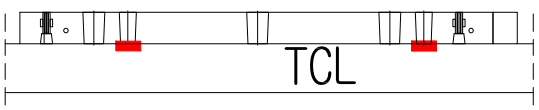
평면도(DCP 단면 상세)



횡단면도(DCP 단면 상세)



종단면도(DCP 단면 상세)



범 례

표 시	계측기기	수량(ea)
▬	전단 변형률계	32

② 게이지 취부된 앵커 및 현장 설치



그림 2.1.5.8 게이지 취부된 앵커의 DCP패널 설치 전경

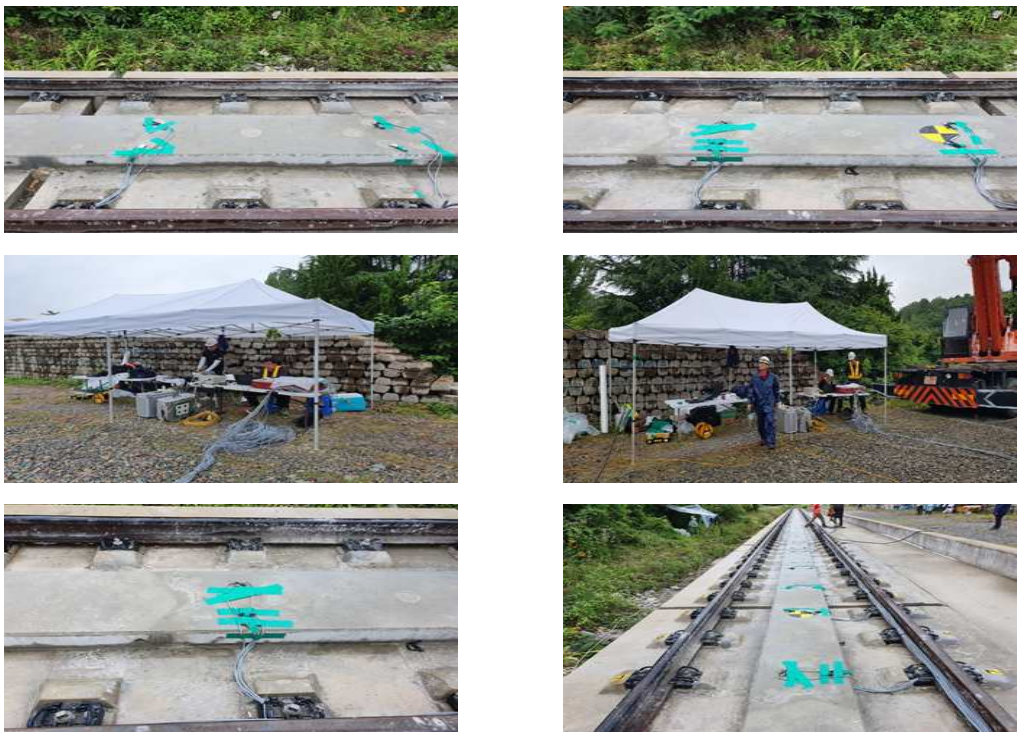
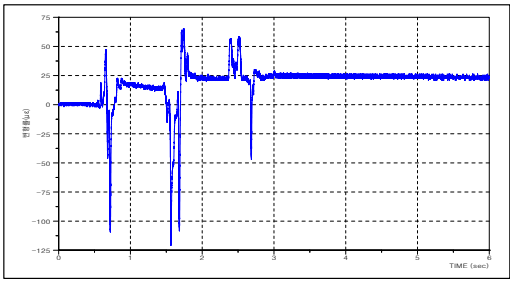


그림 2.1.5.9 열차탈선 시험 전 최종 셋팅 전경

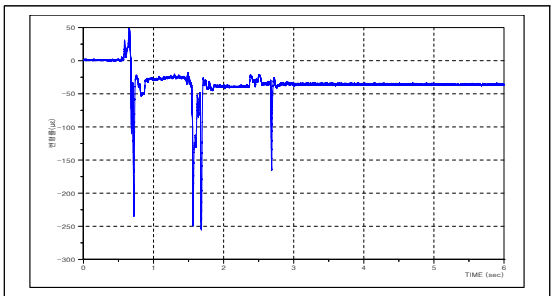
③ DCP 실차량 일탈 실험 측정결과

▪ DCP 패널에 설치된 앵커의 전단력을 실차량 일탈 실험 결과를 정리하면 다음과 같으며, 세부적인 실험 결과는 세부 실험 결과에서 확인할 수 있다.

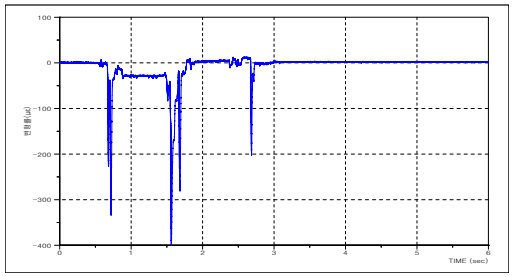
Sensor ID.	측정변형률(με)	순수 전단변형률(ν)	전단응력 (km/cm^2)	전단력(kgf)	비 고
1A	63.181	126.362	97.955	496.338	
1B	-65.067	-130.134	-100.879	-511.154	
2A	-35.663	-71.326	-55.291	-280.162	
2B	-	-	-	-	망 실
3A	-97.129	-194.258	-150.588	-763.027	
3B	-247.066	-494.132	-383.048	-1940.905	
4A	-237.636	-475.272	-368.428	-1866.824	
4B	38.663	77.326	59.943	303.729	
5A	-	-	-	-	망 실
5B	-223.491	-446.982	-346.498	-1755.704	
6A	-47.15	-94.3	-73.101	-370.402	
6B	-318.734	-637.468	-494.161	-2503.915	
7A	202.745	405.49	314.333	1592.727	
7B	-341.366	-682.732	-529.250	-2681.708	
8A	-348.91	-697.82	-540.946	-2740.972	
8B	221.605	443.21	343.574	1740.888	
9A	-120.704	-241.408	-187.138	-948.228	
9B	-255.553	-511.106	-396.206	-2007.577	
10A	-399.832	-799.664	-619.895	-3141.006	
10B	-318.734	-637.468	-494.161	-2503.915	
11A	-171.626	-343.252	-266.087	-1348.262	
11B	-156.538	-313.076	-242.695	-1229.733	
12A	-264.04	-528.08	-409.364	-2074.249	
12B	-269.698	-539.396	-418.136	-2118.697	
13A	-	-	-	-	망 실
13B	129.191	258.382	200.296	1014.900	
14A	-	-	-	-	망 실
14B	-	-	-	-	망 실
15A	-22.632	-45.264	-35.088	-177.793	
15B	33.948	67.896	52.633	266.689	
16A	-16.031	-32.062	-24.854	-125.937	
16B	-3.772	-7.544	-5.848	-29.632	



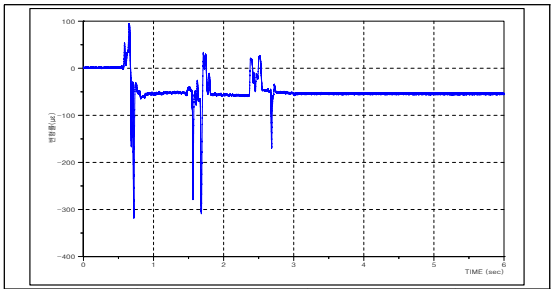
Sensor ID.	측정변형률(με)	전단력(kgf)	비 고
9A	-120.704	-948.228	



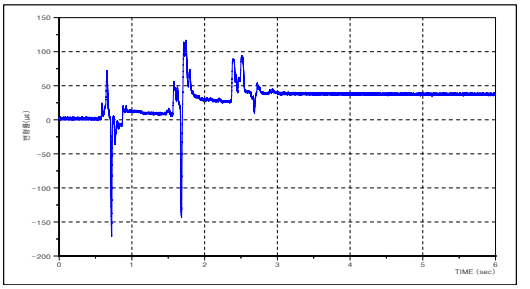
Sensor ID.	측정변형률(με)	전단력(kgf)	비 고
9B	-255.553	-2007.577	



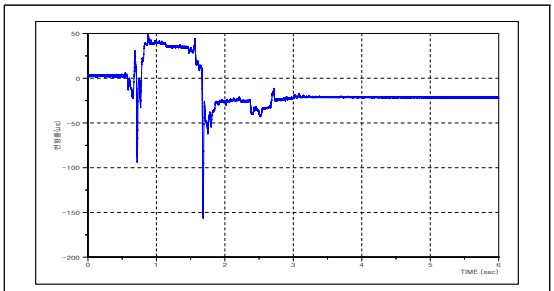
Sensor ID.	측정변형률(με)	전단력(kgf)	비 고
10A	-399.832	-3141.006	



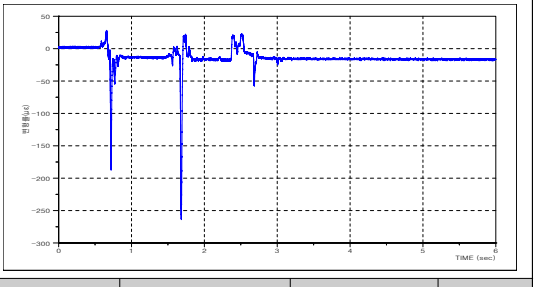
Sensor ID.	측정변형률(με)	전단력(kgf)	비 고
10B	-318.734	-2503.915	



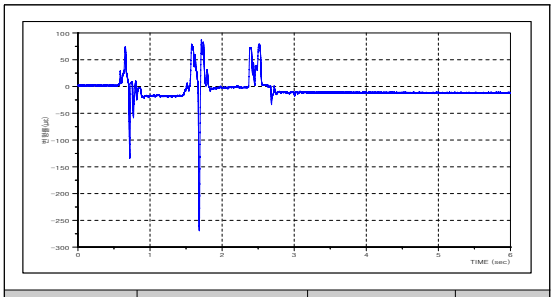
Sensor ID.	측정변형률(με)	전단력(kgf)	비 고
11A	-171.626	-1348.262	



Sensor ID.	측정변형률(με)	전단력(kgf)	비 고
11B	-156.538	-1229.733	



Sensor ID.	측정변형률(με)	전단력(kgf)	비 고
12A	-264.04	-2074.249	



Sensor ID.	측정변형률(με)	전단력(kgf)	비 고
12B	-269.698	-2118.697	

그림 2.1.5.10 변형률 측정값 (열차탈선 하중)

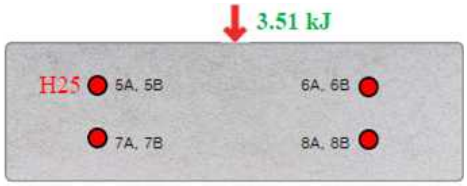
(라) DCP의 앵커 전단력 평가

▪ Drop Weight Test 결과 및 실대형 철도차량 탈선/충돌 실험 결과에 의한 앵커의 전단력을 계측하고 분석한 결과 다음과 같다. 유수역에 설치된 실대형 철도차량 충돌실험에서는 센서가 망실되어 있는 상태가 있어서 전체 패널이 모두 측정된 패널에 대해서 검토하였다.

① Drop Weight Test (718kg/0.5m)



< CASE 3 (#2-2) >

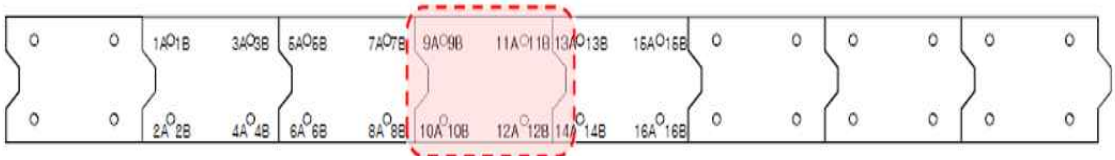


< CASE 5 (#1-2) >

Case.	Sensor ID.	전단력(kN)		합 력(Kn)
Case 3 #2-2	13A	-13.95	Abs. 11.80 (Mean)	Abs. 50.66 (Mean)
	13B	-9.64		
	15A	-27.52	Abs. 38.86 (Mean)	
	15B	-50.19		

Case.	Sensor ID.	전단력(kN)		합 력(Kn)	합 력(Kn)
Case 5 #1-2	5A	+76.78	Abs. 45.02 (Mean)	Abs. 89.21 (Sum)	Abs. 186.42 (Sum)
	5B	-13.26			
	7A	-57.28	Abs. 44.19 (Mean)		
	7B	-31.09			
	6A	+25.59	Abs. 60.82 (Mean)	Abs. 97.21 (Sum)	
	6B	+96.05			
	8A	-52.65	Abs. 36.39 (Mean)		
	8B	-20.12			

② 실대형 철도차량 탈선/충돌 실험(17.32t + 13.03t /45km/h)



Sensor ID.	전단력(kN)		합 력(kN)	합 력(kN)
9A	-9.30	Abs. 14.45 (Mean)	Abs. 42.14 (Sum)	Abs. 75.36 (Sum)
9B	-19.60			
10A	-30.81	Abs. 27.69 (Mean)		
10B	-24.56			
11A	-13.23	Abs. 12.65 (Mean)	Abs. 33.22 (Sum)	
11B	-12.06			
12A	-20.35	Abs. 20.57 (Mean)		
12B	-20.78			

(3) 현장성능평가 결과

(가) 내충격성 평가

▪ 최종적으로, 300 km/h의 속도로 주행하는 고속열차(KTX) 동력차의 탈선에 의한 DCP 패널에 작용하는 최대 충돌에너지 3.3 kJ과 유사한 3.5 kJ에 대한 내충격성 시험을 통해 앵커 상단 일부 균열이 발생하지만 DCP 패널을 횡방향으로 지지하는 앵커가 모두 건전하여 일탈방호성능을 충분히 확보하고 있다는 결론을 도출하였다.

▪ 다만, 실제 고속열차는 20량에 해당하는 대차의 차륜들이(KTX 기준-총 46개) 연속적으로 충돌할 가능성이 있으나 DCP 한 패널에 모든 차륜들이 최대의 충돌에너지로 충돌할 가능성은 매우 희박하다(차륜당 평균 충돌에너지 0.57 kJ 고려시 누적 26.22 kJ; DCP 1패널에 모든 차륜 충돌 가정).

▪ 또한, 실제 차륜은 DCP와 충돌시 특정 각도를 가지고 차륜의 일부 면적만이 접촉하나 본 시험에서는 차륜전면이 DCP 측면에 접촉하는 조건이므로 악조건의 평가가 될 수 있으며, 각 차륜의 연속 충돌에 의한 최대 충돌에너지를 기준으로 상정하였고 (3.3 kJ) DCP 패널의 충돌 단면 내에서도 한 지점에 특정하여 재하한 조건이므로 실제 현상보다 보수적으로 평가될 수 있다.

▪ DCP의 목표성능은 최대 충돌에너지 3.3kJ이고, 시험한 위치에너지의 측정결과는 7.07kJ과 7.09kJ까지 측정하였을 때 DCP의 조사결과, 성능을 확보하였다. 따라서 시험측정결과와 목표성능의 비를 구하면, 소손상 기준(피복 균열, 교체 필요없음) 3.5 kJ을 확보하여, 3.5/3.3 = 106%의 성능을 확보하였으며, 대손상 기준(피복 파손, 철근 또는 앵커 노출, 성능 확보는 하였으나 교체 필요) 7.09 kJ을 확보하여 7.09/3.3 = 215%의 성능을 확보하였다.

(나) 앵커 전단거동 평가

▪ 일탈방호시설(DCP)과 TCL층 사이를 연결하는 전단앵커 철근에 전단응력 게이지를 설치하여 측정을 하였으나 계측된 결과를 분석한 DCP 패널이 열차 바퀴와 충돌하면서 결과 전단응력만 발생한 것이 아니라 철근앵커에 인장압축 응력이 발생한 값들이 혼합하여 측정된 것으로 파악되었다.

▪ 측정전 초기변형률 값 “zero (0)”에서 최종 측정이 종료된 후에 “0” 로 돌아오지 않고 철근이 탄성회복 하지 않고 변형된 단계에 있는 것을 알 수 있었다. 따라서, 전단앵커 철근에 인장압축 데이터보다 전단응력이 더 지배적이다 라고 가정하고 결과분석에 적용하였다.

▪ DCP의 목표성능은 시속 300km/h 운행시 R=3500곡선에서 결정된 최대 탈선충돌하중이 165.6kN이고, 시험편의 측정결과(최대발생 충돌에너지 3.5kJ의 에너지로 DCP를 충돌시키는 시험)는 186.4kN까지 성능을 확보하였다. 따라서 시험측정결과와 목표성능의 비를 구하면, 186.4/165.6 = 113%가 되어 목표수준을 달성하였다.

▪ 실제 유수역에 설치된 일탈방호시설에서 열차가 탈선했을 때 차륜과 DCP의 충돌하중에 의해 발생하는 전단저항력을 계측하였다. 측정결과, 화차 시속 45km/h에서 최대 75.36kN으로 추정되는 앵커의 전단저항력을 측정하였다. 이 충돌하중에 대해서는 앵커의 전단저항력은 충분히 성능을 확보한 것으로 분석되었다. ϕ25 4EA 앵커를 사용하여 TCL 층에 DCP를 체결하여 설치할 경우 열차탈선 하중에 안정적으로 지지할 수 있다고 판단된다.

2.2 기존 철도교량 일탈방호시설 제작 및 시공

가. DCP 설계 및 제품개량

▪ DCP는 콘크리트 침목 사이에 놓이는 구조물로 철도차량이 레일을 벗어나 일탈할 경우 차량이 주행면을 벗어나는 것을 방지하는 것은 물론 차량의 일탈로 인한 레일 및 차량의 피해를 줄이고자 설치하는 구조물로 아래와 같은 과정을 거쳐 기술적합성 및 안정성을 검토를 실시하였다.

(1) 대차하부 공간검토

▪ 본 검토에서 대차하부 공간 결정을 위해 선정한 차량은 KTX - Power Car Motor Bogie로서 Axle Gear Reduction Unit으로 인하여 하부 공간은 ≒145㎜가 확보되는 것으로 확인되며 형상은 아래 그림과 같다.

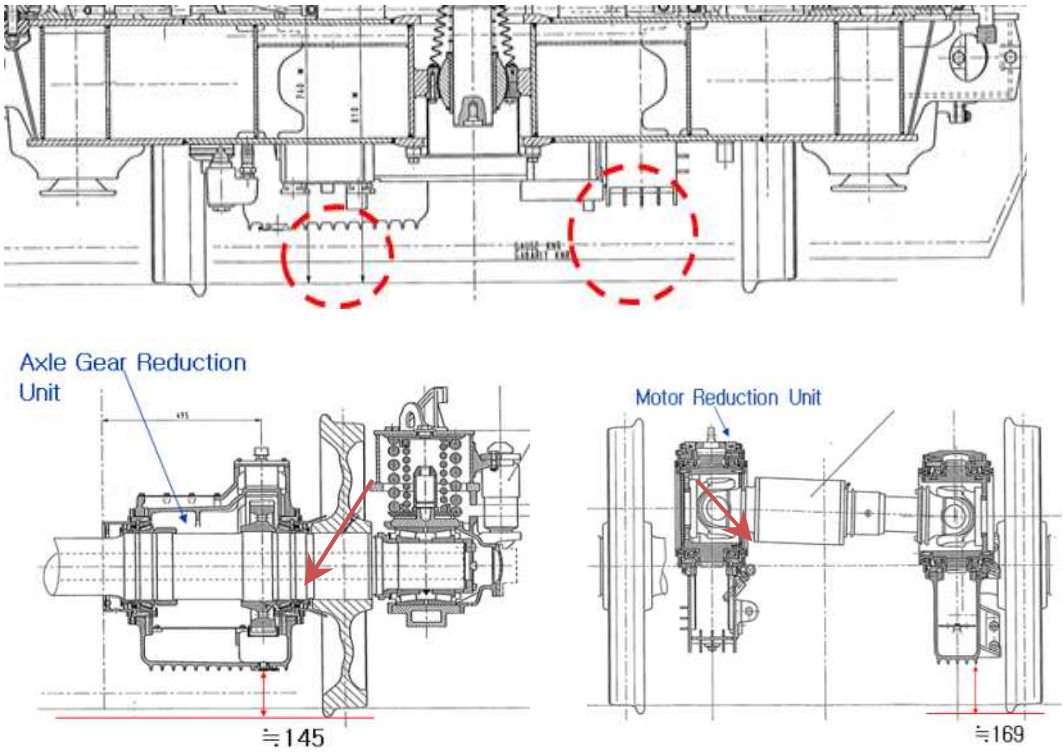
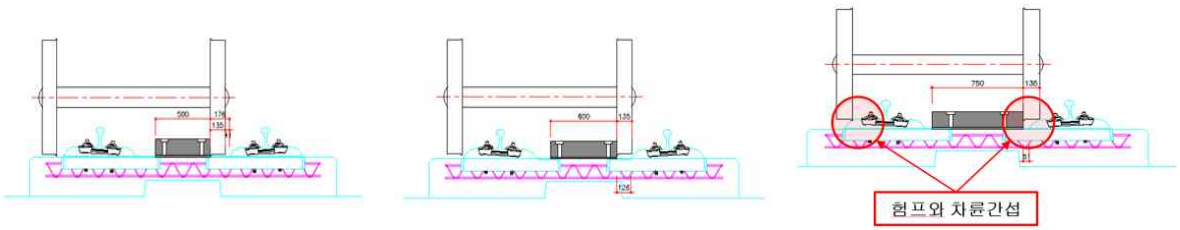


그림 2.2.1.1 대차하부 공간 검토

(2) DCP 구조물 단면 및 형상

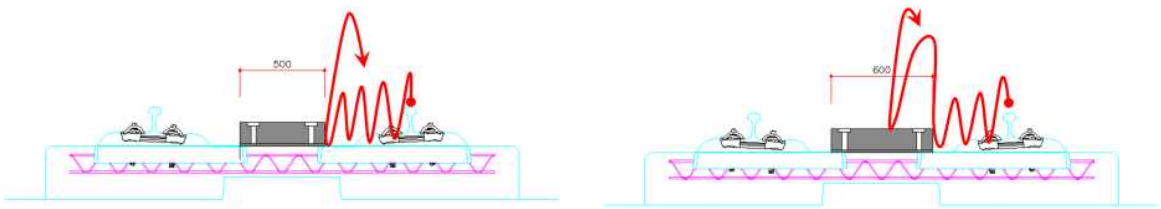
(가) 단면형상 및 충돌해석 검토

▪ 일탈방호시설물(DCP)의 단면은 KTX차량 최저 형하고(145㎜)를 기준으로 5㎜의 여유를 두고 140㎜로 가정, 하부 충전층 15㎜를 감안하여 DCP의 높이를 125㎜로 설정하였으며, 탈선시 차륜과 접촉을 고려한 기하학적 검토 및 충남대에서 실시한충돌해석의 결과(LS-DYNA)를 참조하여 단면을 500×140으로 결정하였다.



(a) 500×140 단면 충돌시 (b) 600×140 단면 충돌시 (c) 700×140 단면 충돌시

그림 2.2.1.2 탈선시 차륜과 접촉을 고려한 기하학적 검토



(a) 500×140 단면 차륜이동경로 (b) 차륜이동경로

그림 2.2.1.3 LS-DYNA를 이용한 충돌해석 검토

▪ 500×140 단면의 경우 DCP측면 중앙에 부딪혀 레일과 DCP사이로 회귀 (횡방향 충돌력 165.6kN, 충돌높이 바닥면에서 약 67mm), 600×140 단면은 DCP측면상부 충격후 DCP상부 추가 충돌후 회귀 (DCP에 가해지는 횡방향 충돌력 31kN, 방호효과 미비)

(나) DCP패널 외형 및 배치

▪ 일탈방호시설물(DCP)의 단면은 위의 검토항목을 통하여 500×140 단면으로 가정하였으며, 기존의 철도교량구간 콘크리트 궤도가 6~8m 길이를 갖는 슬래브 세그먼트 불연속으로 설치되어 이를 감안하여 단면을 결정하였다.

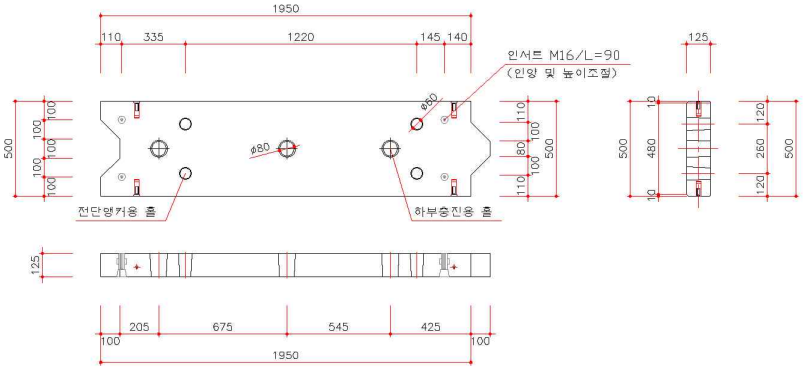


그림 2.2.1.4 DCP패널 1.950m 외형도

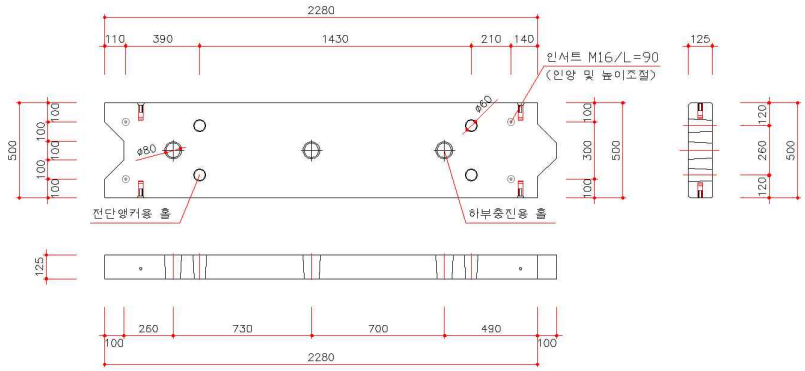


그림 2.2.1.5 DCP패널 2.280m 외형도

▪ 일탈방호시설물(DCP)타입은 TCL(6m,7m,8m) 길이에 따라 다음과 같이 배치되며, 각 DCP의 앵커 위치는 하부 TCL의 철근간섭을 피하기 위해 위치별로 길이가 변경되었다.

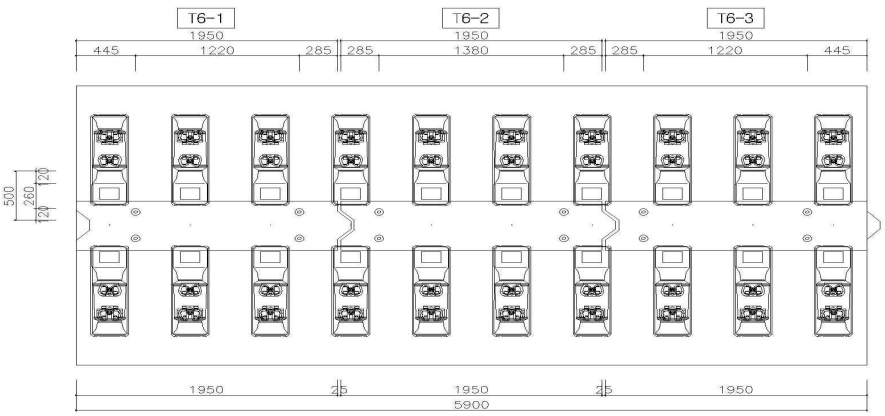


그림 2.2.1.6 TCL 6m용 DCP패널 배치도 : DCP 1,950m×3EA

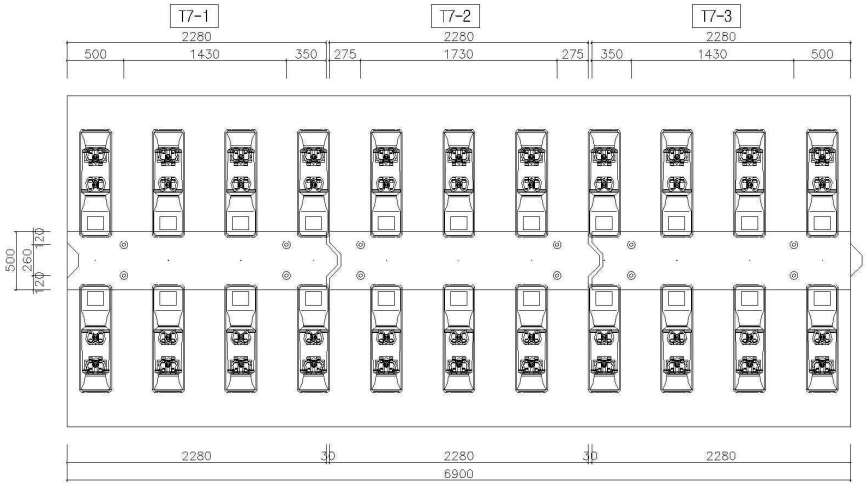


그림 2.2.1.7 TCL 7m용 DCP패널 배치도 : DCP 2,280m×3EA

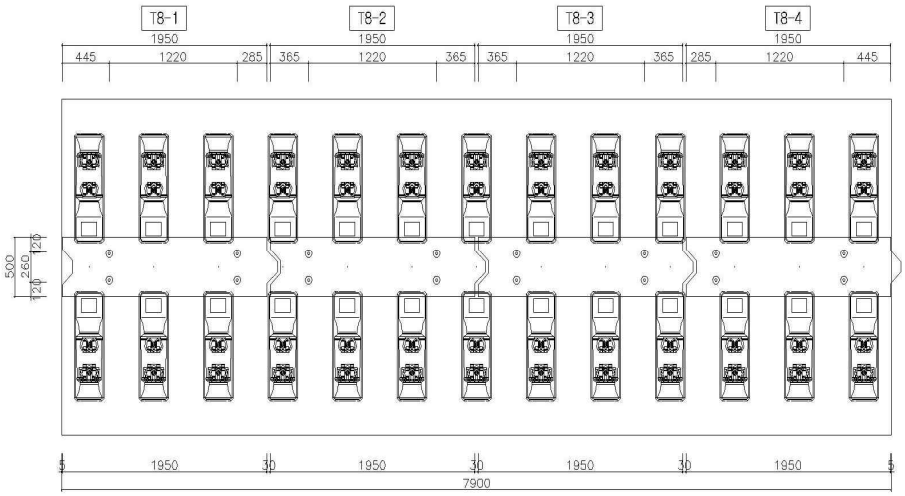


그림 2.2.1.8 TCL 8m용 DCP패널 배치도 : DCP 1.950m×4EA

(3) 구조검토

(가) 충돌하중 산정

▪ 구조해석 프로그램(LS-DYNA)을 통한 DCP패널에 발생하는 횡방향 충돌력은 165.6kN, 바닥면에서 67㎜높이에서 검토되었으며, 재하위치는 아래 그림과 같다.

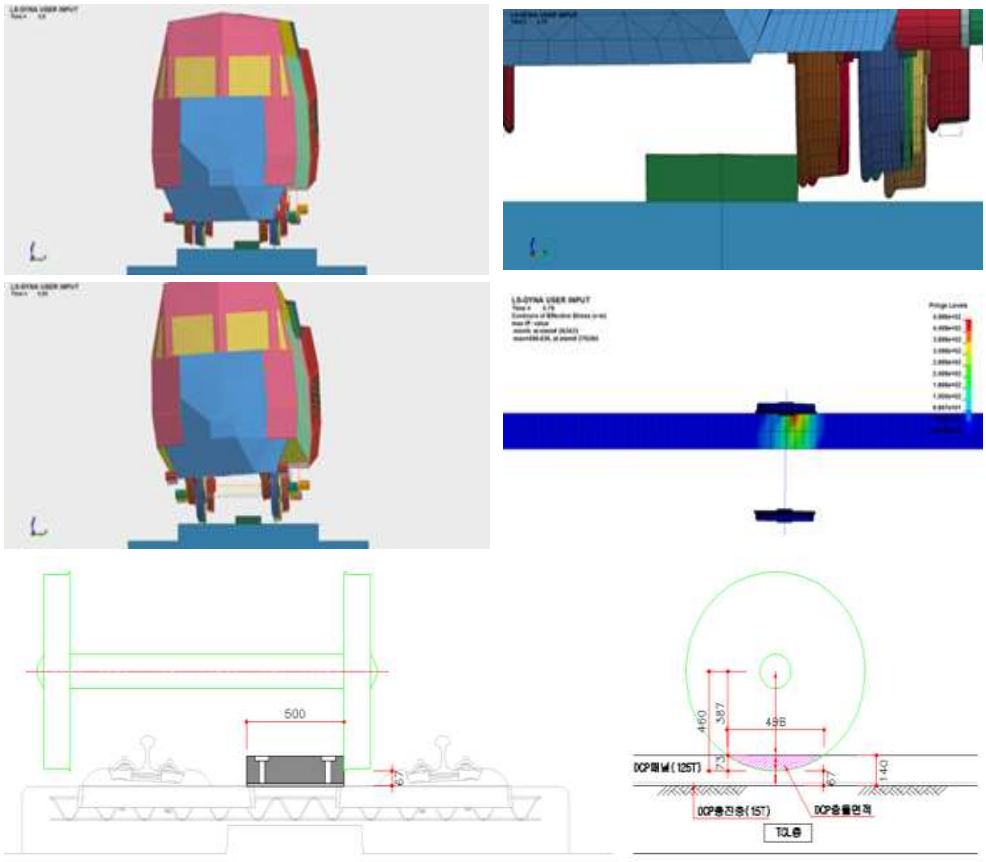


그림 2.2.1.9 차량탈선시 충돌위치 및 횡력

▪ 위와 같은 모델에서 충돌시 작용하중 165.6kN을 충돌하중으로 선정하였다.

(나) 구조해석 제원설정

▪ 구조물은 크게 DCP와 TCL, 그리고 앵커로 연결된 구조이다. TCL은 지반위에 놓이는 구조물이며, 구조물의 기초를 구성하며, 상부로부터 오는 하중을 지반에 전달하는 역할을 한다.

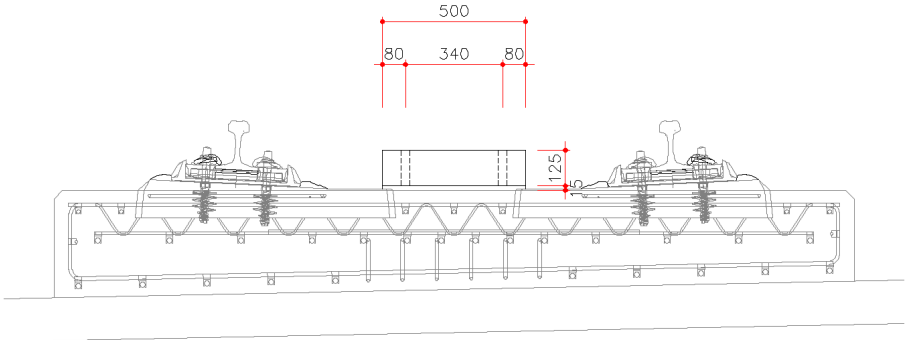


그림 2.2.1.10 TCL과 DCP의 대표횡단면도

▪ DCP의 구조검토시 적용한 세부사항은 아래와 같이 나열하였다.

▪ 구조검토에서는 철도차량 일탈시 DCP와의 충돌을 모델링하여 각 부재의 안전성을 확인하기 위해서 3차원 해석을 수행하였으며, TCL을 제외한 DCP 본체와 앵커를 3차원요소로 모델링하였다.

▪ TCL 부재는 직접적인 충격하중을 받는 구조가 아니고 DCP와 연결된 앵커로 하중이 전달되므로 TCL부 앵커의 검토로 안전성을 확인한다.

▪ DCP와 앵커는 3차원 솔리드 모델과 BEAM 요소로 각각 모델링 하였으며, 앵커의 하단부는 TCL와 연결부로 강결 조건으로 모델링하였다.

▪ DCP와 철도차량의 충돌하중은 182kN(목표성능 165.6kN에서 10% 할증)으로 가정하여 재하 하였으며, 차량이 부재에 가장 불리한 영향을 주는 지점을 확인하고자 구조해석 프로그램의 MOVING LOAD 기능을 이용하였다.

▪ 하중은 열차바퀴가 DCP와 접촉되는 길이를 330㎜로 가정하여 TCL과 DCP의 경계면에서 111㎜ 높이에 등분포 하중으로 재하하였다.

▪ 해석을 위한 3차원 해석 프로그램은 설계에서 많이 사용되어지는 MIDAS CIVIL을 사용하였다.

▪ DCP는 길이에 따라 크게 1.950m와 2.280m의 2가지 타입로 이루어져 있으며, 각 타입별 앵커의 위치에 따라 3~4가지 종류로 이루어져 있다. 길이에 따른 DCP의 각 타입별 일반도 및 배근도는 증빙보고서에 표시하였다.

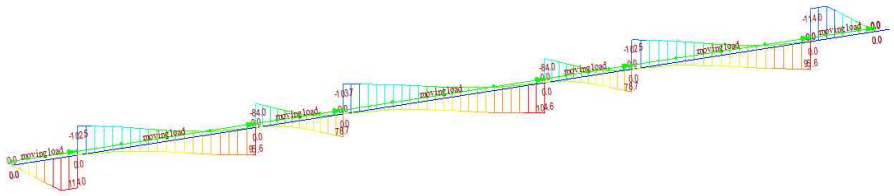
▪ 일탈방호시설물(DCP)을 제작하기 위한 재료의 물성치는 아래와 같다.

표 2.2.1.1 DCP주요자재의 특성

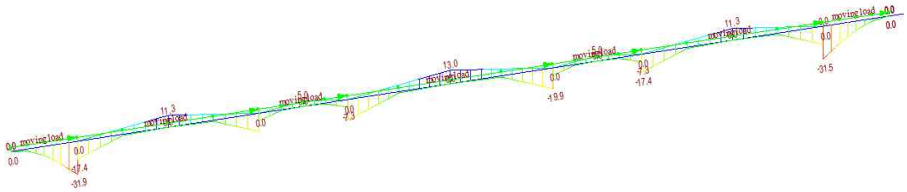
구 분		적 용	비 고
DCP	재질 및 형상	철근콘크리트(fck=35MPa/SD400)	사각단면
	적용치수	폭 = 500mm, 높이 = 125mm	L=VAR
앵커	종류	철 근	SD400
	길이	DCP구조물두께에서 피복 제외 (철근H25 (앵커4개) / L=270mm) (철근H32 (앵커2개) / L=270mm)	

(다) DCP본체 부재력 산정

▪ DCP 구조물은 차량이 탈선시 차량의 일탈을 방지하기 위한 구조물로 탈선시의 충돌하중을 견디도록 설계되어야 한다. 3차원 솔리드형상으로는 전단력 및 휨모멘트등 단면력을 산출하기 어려우므로, 구조물을 빔요소로 단순화하여 모델링하였으며, 앵커 위치 부분을 지점조건으로 결속하였고, 하중은 최대하중 165.6kN을 이동하중으로 재하하여 부재에 가장 크게 발생하는 전단력 및 모멘트를 산출하여 부재의 안전성을 검토하였다.



(a) 전단력도



(b) 모멘트도

그림 2.2.1.10 이동하중에 의한 전단력 및 모멘트도

표 2.2.1.2 DCP 최대전단력 및 최대휨모멘트

구 분		전단력(kN)	휨모멘트(kN)	비 고
6M DCP	단부	165.6	29.0	
	중앙	58.8	11.8	
7M DCP	단부	165.6	34.7	
	중앙	72.6	19.2	
8M DCP	단부	165.6	29.0	
	중앙	54.8	10.3	

(라) DCP본체 구조검토

▪ 6M DCP가 하중 165.6kN을 저항할 수 있도록 구조검토를 수행하였다. 하중은 단부 또는 중앙부에 작용하는 두 가지의 경우에 대해 검토를 수행하였으며, 검토 결과 문제가 없음을 확인하였다. 자세한 결과는 증빙보고서로 대체한다.

(마) 앵커부 부재력 산정

▪ DCP에 충돌하중이 재하시 DCP 본체의 충돌하중은 앵커를 통하여 TCL로 하중이 전달된다. 이러한 연결부재인 앵커는 DCP와 TCL에 결속되어 있으며 충돌하중으로 하중을 받을 시 부재의 안전성이 확보되어야 한다. 이에 본 파트에서는 앵커 본체의 안전성 및 앵커와 연결된 DCP와 TCL에서의 콘크리트 안전성에 대하여 확인하고자 한다.

▪ 3D모델링을 통하여 충돌하중시 앵커에 재하되는 전단력을 토대로 DCP와 앵커부분의 안전성을 검토하였으며, TCL 앵커는 지점에 걸리는 반력을 통하여 안전성을 검토하였다.

▪ 본 파트에서는 앵커가 4개(H25) 삽입된 구조물의 안전성 검토를 예시로 나타내었으며, 아래에 보이는 그림은 모델링한 그림과 DCP부 앵커에 걸리는 전단력도 및 TCL앵커의 반력에 대한 값을 정리한 후 상세검토를 시행하였다.



(a) 6m DCP

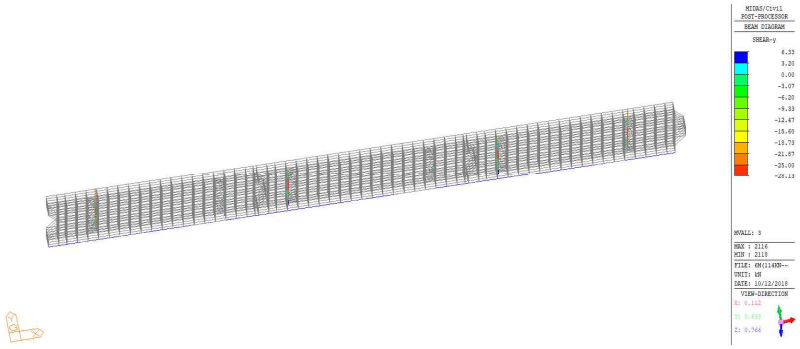


(b) 7m DCP

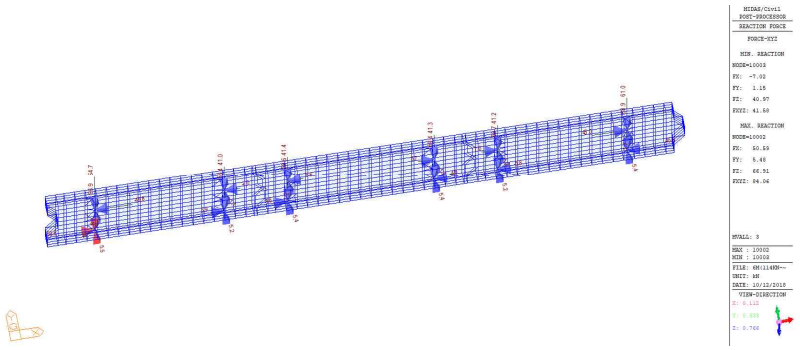


(c) 8m DCP

그림 2.2.1.11 타입별 DCP모델링



(a) 전단력도



(a) 반력도

그림 2.2.1.12 DCP앵커부 전단력도 및 반력도

표 2.2.1.3 DCP 앵커 전단력 및 모멘트(4앵커)

구 분	DCP전단력(kN)	TCL반력(kN)	비 고
6M DCP	40.9	100.1	
7M DCP	37.3	110.6	
8M DCP	34.3	110.4	

(바) DCP앵커부 구조검토

▪ 6M DCP의 앵커와 콘크리트가 하중 165.6kN을 저항할 수 있도록 구조검토를 수행하였으며, 검토 결과 문제가 없음을 확인하였다. 자세한 결과는 증빙보고서로 대체한다.

나. DCP 패널의 생산 메뉴얼

▪ 패널 제조에 소요되는 설비는 품질에 영향을 끼치는 사항을 확인할 수 있는 설비를 갖춘 상태에서 소정의 정밀도로 제작할 수 있어야 하며, 계측에 필요한 설비는 정확하게 교정하고, 제조공장에는 제조 후 완제품을 검사 및 시험을 할 수 있는 설비를 갖추어야 한다.

(1) 일반사항

▪ DCP패널은 증기양생을 통해 공장에서 대량으로 생산되며, 이를 위한 몰드 및 제조공장의 구비요건은 다음과 같다.

▪ 패널 제작설비는 패널 제작에 적합하여야 하며, 콘크리트의 제조설비는 재료의 계량, 투입, 비비기, 타설, 다지기 및 양생 등 전 공정이 패널 생산에 적합하여야 한다.

▪ 패널 제작에 소요되는 재료 및 완제품을 검사할 수 있는 시험설비를 갖추어야 하며, 제작은 반드시 실내온도가 5℃이상을 유지할 수 있는 옥내에서 제작될 수 있도록 설비를 하여야 한다.

▪ 형틀은 고정시킨 콘크리트의 매립재료가 작업과정 중에 움직이지 않도록 프레스가공 또는 용접 제작한 견고한 구조를 사용하여야 한다.

▪ 콘크리트 매립재료의 위치, 제품의 외형치수 및 형상이 정확히 유지되도록 하고 반복 사용 시 변형이 없도록 제작하여야 한다.

▪ 콘크리트를 치기 전에 내면을 청소하고 탈형이 용이하도록 적당한 박리제를 발라야 하며, 탈형 시 제품에 흠, 균열, 손상 등이 발생하지 않도록 하여야 한다.

(2) 주요장비 및 자재

(가) 몰드

▪ DCP(derailment containment provision) 제작을 위해서는 몰드가 제작이 선행되어야 하고, DCP는 철근, 앵커 및 각종 홀등이 간섭되지 않게 도면에 표기된 상태대로 제작되는지 확인하여야하며, DCP제작 후 에는 깨끗하게 청소하여 다음제작에 영향이 없도록 하여야 한다.

- 강판을 제작도면에 맞게 절단
- 강판을 도면에 맞게 용접하여 몰드 제작

- 각 위치에 각종 홀 설치



((a) 몰드 셋팅전



(b) 각종 홀 설치



(c) 인서트 볼트 및 매입강관 설치



(d) 몰드설치완료

그림 2.2.2.1 DCP패널 몰드사진

(나) 콘크리트

▪ DCP패널 제작에 사용하는 레미콘은 품질의 적합 여부를 확인한 후 사용하며, 관련 배합표 및 성적서 등을 기록으로 남겨두어야 하며 콘크리트의 개량 및 배합 등의 관리방법은 아래와 같다.

① 콘크리트 재료의 계량

▪ 콘크리트 재료의 계량방법 및 계량장치는 패널 제작에 적합하고 콘크리트 표준시방서의 계량 오차 내에서 정확하게 계량할 수 있는 자동화된 계량장치이어야 한다.

▪ 각 재료의 계량장치는 최초 작업개시 전 공인교정기관에서 검교정을 필하고, 제작 중 정기적으로 점검하여 정확하게 조정되어야 한다.

② 콘크리트의 배합

▪ 콘크리트의 배합은 소정의 워커빌리티, 공기량, 압축강도, 내구성을 갖도록 하여야 하며 작업에 적합한 범위 내에서 단위수량을 가능한 적게 하여야 한다.

▪ 콘크리트의 배합은 설계기준강도 및 콘크리트의 품질변동 등을 고려하여 결정하고 시방 배합표 및 현장 배합표 등을 작성하여 제작 검사자에게 제출하여 승인을 받아야 한다.

▪ 작업 전에 반드시 함수량, 입도 등의 골재시험을 하여 현장배합으로 수정한 후 작업을 하여야 하며 작업초기에는 1일 1회 타설시 마다 시험을 실시하여 배합을 수정하고 품질이 안정되었다고 판단되는 경우는 횟수를 줄일 수 있다.

▪ 콘크리트의 단위 시멘트량은 소요의 워커빌리티 및 강도를 얻을 수 있는 범위 내에서 가능한 한 적게 되도록 단위수량과 물-시멘트비로 정하고, 물-시멘트(W/C)비는 35%를 초과하지 못하며, 연행공기량은 3.5±1.5%를 표준으로 한다.

③ 콘크리트 비비기

▪ 콘크리트 비비기는 배치믹서로 하여야 하며, 반죽된 콘크리트가 성형성이 있고 균등한 품질이 되도록 충분히 비비고, 비비기가 완료될 때까지 다른 용도의 콘크리트 비비기를 하지 않아야 한다.

▪ 믹서는 KS F 2455(믹서로 비빈 콘크리트 중의 모르터와 굵은 골재량의 변화율 시험방법)에 의한 비비기 성능시험을 하여 소요의 비비기 성능을 갖고 있는지 확인하고 콘크리트 배출시 재료의 분리가 일어나지 않도록 하여야 한다.

▪ 재료 투입순서 및 비비기 시간은 시험에 의하여 정하고 별도의 물을 첨가해서는 안된다.

(다) 철근

▪ 철근은 일괄 조립하여 거푸집 내 소정의 위치에 설치되며, 콘크리트를 타설할 때 배치형상이 변하지 않도록 간격재, 강재 등으로 견고하게 지지하여야 한다.

▪ 이를 위해 철근의 배치가 끝난 후 반드시 검사를 하여 파손이나 위치의 변동 등이 있으면 보수, 수정하여야 하며 철근의 재료특성은 아래와 같다.

▪ 철근은 KS D 3504(철근콘크리트 봉강)에 적합한 것으로 용접 가능하여야 한다.

▪ 항복강도는 400MPa이상(SD400) 또는, 이와 동등 이상품 이어야 한다.

(라) 앵커

▪ DCP구조물두께(패널+충전층)와 근입가능 깊이를 고려한 앵커소켓 길이를 선정하여야한다.

▪ 앵커소켓은 자재수급 및 시공단가 등을 고려하여 철근을 사용하였으며, SD400재질의 H25 혹은 H32로 길이는 L=270㎜의 제품을 사용하여야 한다.

(3) DCP 패널의 제작

(가) 제작 플로우

▪ DCP 패널의 제작공정은 콘크리트 타설 및 양생을 기준으로 매일 반복하여 작업할 수 있으며, 아래와 같은 플로우를 따라 진행된다.

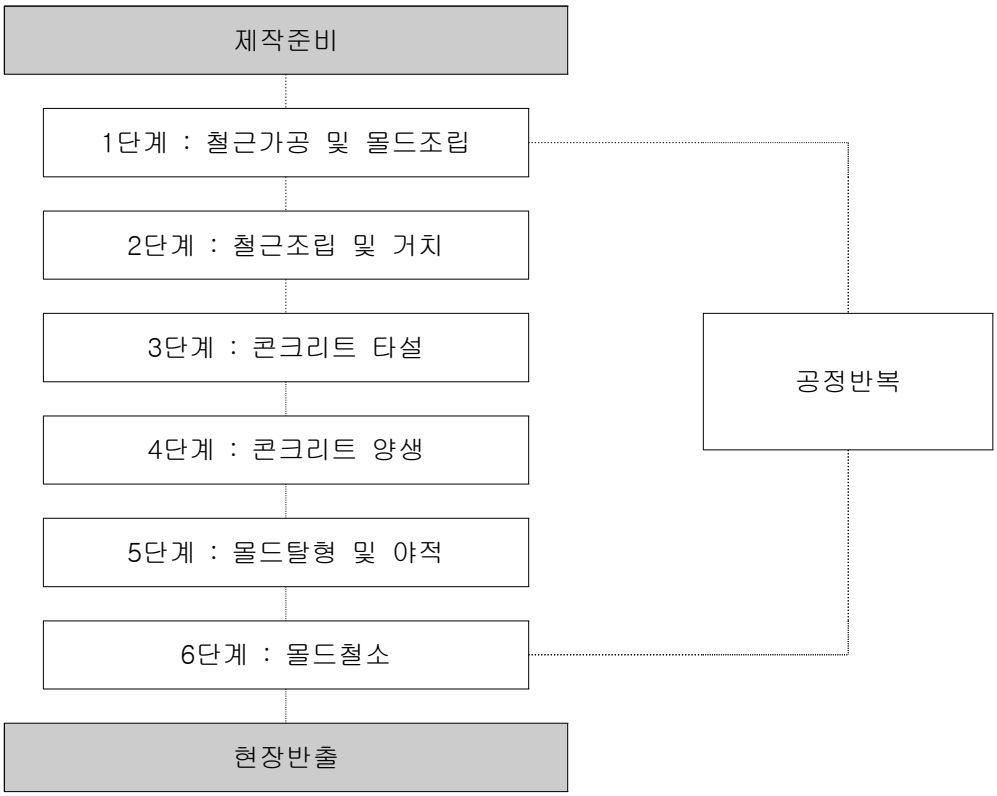


그림 2.2.2.2 DCP패널 제작플로우 차트

(나) 제작준비

▪ DCP패널의 제작은 시공구간의 투입될 패널의 수량 및 종류를 타입별로 파악하여 제작한다. 이때 사전에 각종 인터페이스 사항을 고려하여 작성된 현장의 패널배치도를 비교·검토 후 이상이 없을시 제작 및 생산에 들어간다.

▪ 사전검토 결과와 도면의 차이가 발생시에는 인터페이스 회의를 거쳐 협의 후 패널제작을 실시하여야 한다.

▪ 패널제작전 몰드를 셋팅하고 각 치수를 체크하여 제작시 발생할 수 있는 오차를 소거하여야 하며, 패널별 기작성된 제작지시서에 따라 단부몰드 및 각종인서트의 위

치 등을 사전에 체크한다.

(다) 철근가공 및 조립

▪ 철근은 설계도에 나타난 형상치수를 가공해 조립하며, 보관 또는 가공 후 장기간 방치되어 녹이 발생된 철근은 사용하지 아니하여야 한다.

▪ 조립시에는 콘크리트를 타설할 때 배치형상이 변하지 않도록 간격재, 강재 등으로 견고하게 지지 하여야 하며, 철근의 배치가 끝난 후 반드시 검사를 하여 파손이나 위치의 변동 등이 있으면 보수, 수정하여야 한다.



(a) 철근가공



(b) 철근배열



(c) 상하부 철근결합



(d) 철근망 삽입

그림 2.2.2.3 철근가공 및 조립



(a) 전체길이 검측



(b) 피복두께 검측

그림 2.2.2.4 철근조립 검측

(라) 콘크리트 타설 및 다지기

▪ 콘크리트는 충분히 비빈 후 1시간 이내에 타설 완료하여야 하며 타설시 콘크리트의 온도는 10~30℃ 범위 내에 있어야 한다. 이 온도범위 이외의 경우에는 특별한 조치를 취하여 타설 하여야 한다.

▪ 콘크리트 다지기는 배합 특성과 제작설비 시스템에 적합한 몰드 진동기 또는 진동테이블 및 기계적인 봉다짐 등으로 실시하여야 하며 다지기 장비는 배합특성에 맞는 진동수로 진동을 지속할 수 있는 것이어야 한다.

▪ 재료분리가 일어나지 않는 범위 내에서 치밀한 콘크리트가 되도록 충분히 다져야 한다.

▪ 타설 및 다짐 시에는 콘크리트에 매립되는 재료의 위치가 이동되지 않도록 주의하여야 하며, 내부 진동기가 거푸집이나 매립재료에 닿지 않도록 하여야 한다.



(a) 콘크리트 타설



(b) 바이브레이터 다짐

그림 2.2.2.5 콘크리트 타설 및 다짐

(마) 타설면 마무리

▪ 탈형 시 콘크리트에 처짐, 균열 등이 발생하지 않도록 충격을 가하지 말아야 한다.

▪ 매립전이 삽입되는 패널의 경우에는 탈형 직후 구멍에 이물질이 들어가지 않도록 조치를 하여야 한다.

▪ 패널의 저면과 거푸집에 접하는 면은 매끈하게 마무리 하여야 한다.



(a) 면고르기



(b) 작업완료후(양생전)

그림 2.2.2.6 타설면 상부마감

(바) 콘크리트의 양생

▪ 다지기 작업이 완료된 제품은 즉시 양생용 덮개를 덮어 직사광선을 피하고 표면이 건조되지 않도록 하며, 급격한 온도변화가 일어나지 않도록 보호하여야 한다.

▪ 콘크리트를 타설한 후 상온에서 2시간 이상 경과한 후 증기양생 또는 열양생을 시작하여야 하며, 양생온도의 상승속도는 매 시간 15℃ 이하로, 하강속도는 매시간 10℃이하로 하며 50℃ 이하를 넘어서는 안된다.



(a) 양생실 투입구



(b) 증기양생

그림 2.2.2.7 양생실 투입 및 증기양생

(사) 몰드 탈형 및 적치

▪ 탈형은 상온에서 2시간 이상 방치한 후 실시하여야 한다.

▪ 보일러는 적정한 온도상승과 유지를 위한 충분한 용량이어야 하며, 양생공간은 급격한 온도변화 및 국부적인 온도차나 온도변화가 일어나지 않도록 설비되어야 한다.

▪ 패널은 탈형 후 표면이 급격한 온도 변화나 건조 등에 노출되지 않도록 조치하여야 하며, 동절기 양생 시에는 기건상태 이전에 패널이 외기에 노출되지 않도록 한다.



(a) 패널탈형 및 뒤집기



(b) 패널적치

그림 2.2.2.8 탈형 및 적치

(아) 현장반출

▪ 패널반출을 위해 지게차 또는 크레인을 이용시 목재나 고무패드 등을 이용하여 충격에 의해 패널이 파손되지 않도록 주의하여야 한다.

▪ 패널의 적재는 운반차량의 진동 및 충격을 고려해 다단적재시 목재를 이용하여 충격으로부터 보호할 수 있도록 하여야 한다.

▪ 또한 벨트를 이용하여 패널과 차량을 단단히 고정하여 운행중 충격에 의해움직이지 않도록 한다.



(a) 트럭상차



(b) 패널운반

그림 2.2.2.9 상차 및 현장반출

2.3 기존 철도교량 일탈방호시설 시공방법 및 유지보수(사고후 급속복구) 방법 개발

가. 일탈방호시설 시공방법

(1) 일탈방호시설 패널 시공

(가) 시공성 검토

▪ 공장에서 프리캐스트로 제작된 일탈방호시설패널은 현장설치 위치를 고려하여 사전에 1일 시공구간을 선정한 후, 길이별 TCL타입을 확인하여 소요패널의 수량을 현장인근으로 운반하여 암시 야적하여야 하며, 현장 설치시 아래와 같은 시공순서에 따라 설치하여야 한다.



그림 2.3.1.1 일탈방호시설 현장시공 흐름도(Flow Chart)

(나) 일탈방호시설패널 시공방법

① 일탈방호시설패널 단면선정 기준

▪ KTX차량 최저 형하고(145mm)를 기준으로 5mm 여유를 두고 일탈방호시설 높이 설정(140mm)

▪ 하부 충전층 15mm를 감안하여 프리캐스트 본체의 높이를 125mm로 설정

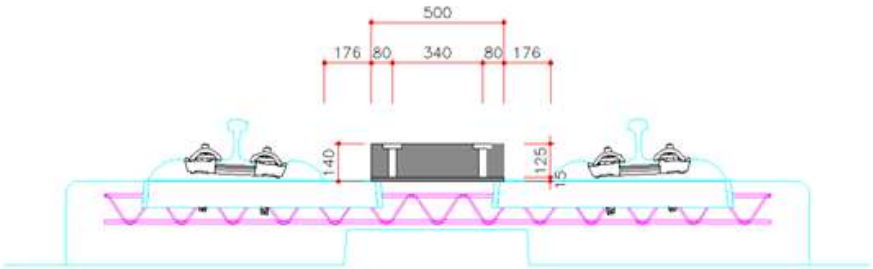


그림 2.3.1.2 일탈방호시설 설치단면 : 500×140 단면

② 일탈방호시설패널의 배치

▪ TCL타입(6,7,8M)의 길이에 따른 패널의 길이 및 개수설정

표 2.3.1.1 TCL 길이별 침목 및 Cam Plate 현황

구 분		길 이	침 목		Cam Plat	
			간격	개수	간격	개수
6.0m	C-TYPE	5.90m	600mm	10 개	2.00m	3 개
7.0m	B-TYPE	6.90m	640mm	11 개	2.35m	3 개
8.0m	A-TYPE	7.90m	615mm	13 개	2.00m	4 개

표 2.3.1.2 일탈방호시설 패널 구성

TCL 길이 및 타입		일탈방호시설 구성
6.0m	C-TYPE	1950mm + 1950mm +1950mm (3 Peace)
7.0m	B-TYPE	2280mm + 2280mm + 2280mm (3 Peace)
8.0m	A-TYPE	1950mm + 1950mm + 1950mm + 1950mm (4 Peace)

▪ 기능 : 고속철도의 열차가에서 탈선이후 차량이 일탈하였을 때 차량의 진로를 운행선로 안에서 거동하도록 제어함

▪ 요구성능

차량탈선시 일탈방호시설에 가해지는 165.6kN의 충격량에 대한 저항

기존 철도교량 일탈방호시설의 급속시공이 가능 (20m/4시간)

열차 탈선이후 차륜-일탈방호시설 충돌시 시설의 급속 유지보수가 가능

일탈방호시설 결합부 특성 : 일탈방호시설과 콘크리트 도상(TCL) 충진층, 일탈방호시설간 연결부. 콘크리트 도상(TCL) 분리부에서의 일탈방호시설 연결부의 충진재 특성은 다음 표 2.3.1.3과 같다.

표 2.3.1.3 일탈방호시설 결합부 특성

구 분	충진재	부착두께 (mm)	탄성계수 (GPa)	압축강도 (MPa)	탄력성 (%)	부착강도 (MPa)
일탈방호시설 패널	-		30	35		
일탈방호시설 -TCL 충진부	충진용 모르타르 (마페모르타르)	15	30	>40		>1
일탈방호시설 연결부 (TCL 연속부)	모르타르 (마페모르타르)	30	30	>40		>1
일탈방호시설 연결부 (TCL 분리부)	탄성폴리머	100		15	90	2 (Slant Shear)
일탈방호시설 연결부 하부충진 (TCL 분리부)	우레탄 폼		-	-	-	-

▪ 일탈방호시설 연결재 : 일탈방호시설 패널간 위해서 측면에 강재연결재와 관통타이를 이용한 너트 체결

▪ TCL 앵커

앵커위치 설정조건 : 침목과 캠플레이트와 간섭 배재, TCL층 철근과 간섭배제

TCL에 배근되는 앵커는 일탈방호시설 구조물두께(패널+충전층)와 근입가능 깊이를 고려

자재수급 및 시공단가를 고려하여 M20 혹은 M24 L=250mm이상으로 선정하였다.

③ 일탈방호시설 패널 설치

▪ 패널 설치 준비작업

- 시공 전 패널 설치개소의 구조물 콘크리트층 시공 상면상태를 확인한다.

- 패널설치 전 시공에 필요한 장비, 재료, 공기구등을 점검하여 이상 유무를 확인한 후 시공에 착수해야 한다.

- 패널의 파손 및 Bending 등 상태를 점검한 후 양호한 패널에 대해서만 공사감독자의 승인을 받은 후 시공한다.

▪ 패널 설치용 장비조건 및 확인

- 패널 운반 및 설치는 패널 운반용 화물차와 문형크레인 또는 굴삭기 등 패널에 파손이 가지 않으며 정확한 위치에 설치할 수 있는 장비를 사용하여야 한다.

- 패널 설치 장비는 패널 운반용 차량에 의해 운반되어온 패널을 설치 위치에 설치하는 역할을 수행한다.

- 패널을 안전하게 취급 할 수 있는 양중량을 확보한 장비이어야 한다.

- 패널을 매달고도 전후로 이동할 수 있는 주행능력이 있어야 한다.

- 패널 설치 시 전후·좌우로 미세한 조정이 가능하여야 한다.

- 토목구조물과 전차선 등의 간섭을 피할 수 있어야 한다.

▪ 패널 설치용 측량

- 패널을 정확한 위치에 설치하기 위한 평면측량을 실시한다.

- 패널설치위치 표시 및 선형 확인을 위해 패널간 간격을 맞춰 중심측량을 하고 측점을 설치한다.

표시된 중심점 못을 이용 직자 등을 사용하여 패널의 측면 모서리부에 패널의 설

치위치를 표시한다.

▪ 패널 설치

- 패널설치 시에는 콘크리트 상면에 미리 표시해 놓은 패널 설치위치(먹줄표시)에 맞 추어 설치하여야 한다.



그림 2.3.1.3 설치 전 설치위치 표시(먹줄표시)

- 받침목을 패널의 모서리부(패널길이의 1/4, 3/4 지점) 좌・우 4개소에 설치한다.

- 패널을 설치위치에 맞추어 받침목 위에 올려놓는다. 이때 콘크리트 상면과 패널 하면 사이의 간격은 작키 작업이 가능한 공간을 확보한다.

- 패널을 받침목 위에 내려놓을 때 미리 표시해둔 위치에 최대한 근접하게 설치하여야 한다

▪ 패널정정 준비작업

- 패널정정시 일반 측량기를 이용하여 시행할 수 있다. 패널을 정확하게 정정하기 위해서는 측량 전 측량기준점의 정확도를 확인한 후 시행하여야 한다. 패널정정 전 사전에 필요한 장비, 재료, 공기구등을 점검하여 이상 유무를 확인한 후 시공에 착수해야 한다.

- 패널의 하중을 고려하여 1ton이상의 크레인 장비를 사용하여야 하며, 시공 전 장비 기능을 검토한 후 사용한다.

- 패널의 하중을 인상할 수 있는 1ton이상의 크레인 장비로, ±20mm 내에서 미세한 좌우조절 및 고저조절이 가능한 기능을 갖추어야 한다.

▪ 패널정정

- 레일면고와 선형을 검측할 수 있는 전용 측량게이지를 설치하여 다음의 내용과 같이 작업을 시행한다.

▪ 고저정정

- 패널의 모서리쪽 4곳에 높이 조절공을 통해 설치하고, 측량기기(Level, Staff)를 이용하여 패널의 고저정정을 시행한다.(그림 2.2.1.4 참고)

- 패널 위치를 정정한 후, 미세정정을 시행한다.

- 시공정밀도 : ± 2mm

- 패널과 패널 간 단차기준은 직자를 이용하여 1mm 이내로 하여야 한다.

▪ 방향정정

- 패널의 방향정정은 측량기기(Transit)를 이용하여 패널의 방향정정을 시행한다.

- 시공정밀도 : ± 2mm

④ 일탈방호시설 시공시 유의사항

▪ 우수유입 방지

- 일탈방호시설의 시공시 몰탈 주입구,앵커홀, 패널하면에 별도의 우수유입이 되지 않도록 무수축몰탈 타설 후 우천시 시공부의 우수유입을 방지하기 위해 상부면인 주입구 및 앵커홀 마감부에 테이핑처리와 패널측면 거푸집 시공부에 실리콘마감 등을 실시하여 밀실 시공한다.

▪ 패널시공시 콘크리트 등 상면의 평탄성 확보

- 패널하부의 거치전에 DCP패널 하부의 무수축몰탈 충전층(15mm)의 소요두께를 확보하기 위해 그라인더를 사용하여 기존 시공된 콘크리트층(TCL층) 상면의 국부적인 돌출부를 제거하여 평탄성을 유지하고 패널의 평탄시공이 되도록 한다.

(다) 시공목표 및 작업효율 검토

▪ 현행 고속철도 교량상의 콘크리트도상(TCL)은 각각 6m, 7m, 8m의 길이로 서로 분리되어 시공되어 있다. 호남고속철도 오송고가~송리교 구간 콘크리트 도상(TCL)의 패널별 길이, 수량은 집계한 것이 표 2.3.1.4이다. 분리된 TCL의 길이가 7m이며 약 52%를 차지하고 있으며 6m(31%), 8m(17%) 순으로 나타났다.

표 2.3.1.4 TCL길이 현황(호남고속선)

길이	8m	7m	6m	합계
수량	449	1,335	797	2,581
비율(%)	17%	52%	31%	100%

▪ 기본설계에서는 각 일탈방호시설의 앵커위치가 하부 TCL의 철근간섭을 피하기 위해 TCL(6m, 7m, 8m) 길이에 따라 각각 일탈방호시설패널을 제작하였다. 호남고속선 오송고가~송리교 구간 콘크리트 도상(TCL)의 일탈방호시설 전체수량을 집계하였다.

표 2.3.1.5 패널수량 집계

구분		TCL(8m)	TCL(7m)	TCL(6m)	합계(%)
TCL 6m	T6-1	-	-	797	
	T6-2	-	-	797	
	T6-3	-	-	797	
	소 계			2,391	29.2%
TCL 7m	T7-1	-	1,335	-	
	T7-2	-	1,335	-	
	T7-3	-	1,335	-	
	소 계		4,005		48.9%
TCL 8m	T8-1	449	-	-	
	T8-2	449	-	-	
	T8-3	449	-	-	
	T8-4	449			
	소 계	1,796			21.9%
합계		8,192 (100%)			

▪ 일탈방호시설의 시공목표치인 20m/1일 시공(운행차단시간 4시간)의 가능성 확인을 위해 호남선 2단계구간의 TCL타입 구성치를 기준으로 TCL 3경간(패널 9본)의 시공

을 가정할 시 20.8m/1일의 작업효율이 산출되었다.

표 2.3.1.6 3경간/1일 작업시 작업효율(호남선 2단계구간)

TCL 타입	1일 설치량	구간적용비율	전구간 대비 환산치
6.0m	18.0m	31.9%	18.0×31.9/100 = 5.7m
7.0m	21.0m	51.7%	21.0×51.7/100 = 10.9m
8.0m	24.0m	17.4%	24.0×17.4/100 = 4.2m
합계		100%	20.8m/1일

(라) 일탈방호시설과 교량 시공 인터페이스 검토

① 설치대상 교량현황

▪ 일탈방호시설이 설치대상 교량개소와 연장은 조사하였다. 고속철도 교량구간을 경부 1단계, 경부 2단계, 호남고속의 교량구간을 직선, 곡선반경($R \leq 5000$), 곡선반경($7000 \leq R \leq 15000$)별로 나누어 총 구간 수와 연장길이를 표 2.3.1.7에 나타내었다. 설치대상 개소는 총 184개소이며, 콘크리트 궤도 설치구간은 96개소이다. 이중 직선구간과 직선에 근접한 곡선반경($7000 \leq R \leq 15000$)구간의 총 개소 수는 96%에 이른다. 총연장은 151.3km이나 콘크리트 궤도 설치는 66.1km에 이른다. 직선구간과 직선에 근접한 곡선반경($7000 \leq R \leq 15000$)의 구간연장은 95%에 이르는 것으로 나타났다.

표 2.3.1.7 고속철도 일탈방호시설설치대상 교량 개소 및 연장

구 분	총 구간 수			구분	총 연장(m)			구분
교량유형	경부 1단계	경부 2단계	호남 고속		경부 1단계	경부 2단계	호남 고속	
직선	56	31	24	111 (60%)	43,640	14,505	17,320	75,465 (50%)
곡선 (7000≤R≤15000)	29	22	16	67 (36%)	39,855	7,641	21,340	68,836 (45%)
곡선 (R≤5000)	3	1	2	6 (3%)	1,695	1,283	4,000	6,978 (5%)
소계	88	54	42	184	85,190	23,429	42,660	151,279

② 기존 고속선 교량상 궤도시스템 설치 도면 검토

▪ 기존 고속철도 노선에서의 교량상 궤도와 방호벽 설치현황을 각 도면을 통해 조사 비교하여 일탈방호시설 설치시 패널 운반 및 작업공간을 검토하였다.

㉮ 콘크리트 도상 표준도

▪ 한국철도시설공단에서 제시한 설계속도 200<V≤350km/h (콘크리트도상 표준도 365)의 도면은 그림 2.3.1.4와 같다.

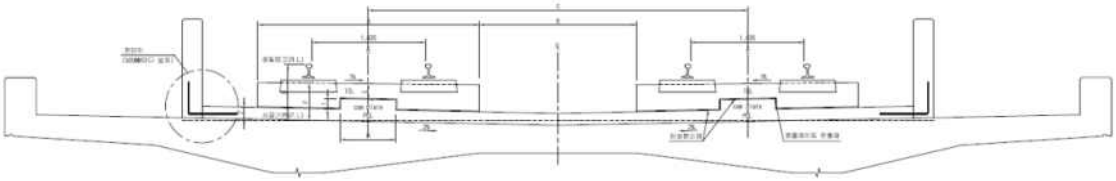


그림 2.3.1.4 설계속도 200<V≤350km/h (표준도 365)

㉯ 경부고속철도 2단계(대구～부산간)

▪ 2010년 11월 1일에 운행 개시된 경부고속철도 2단계 콘크리트궤도의 설계도면은 그림 2.3.1.5와 같으며 방호벽까지는 궤간 중심선에서 4.5m 이격되어 있다.

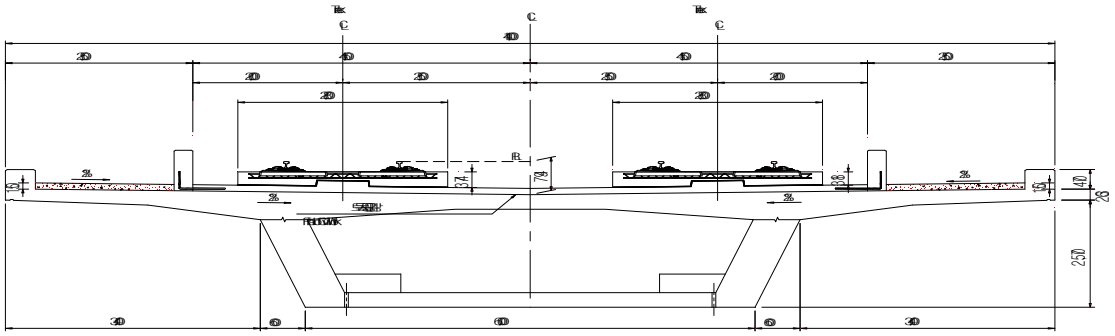


그림 2.3.1.5 경부고속철도 2단계 (대구~부산간) KCT-II 콘크리트궤도

③ 호남고속철도 1단계 (오송역~광주송정역) (V=350km/h)

▪ 호남고속철도 1단계 (오송역~광주송정역) Rheda 2000 콘크리트궤도의 도면은 그림 2.3.1.6과 같으며, 선로중심간격은 4,300mm(4800mm)이며 2015년 4월에 개통되었다.

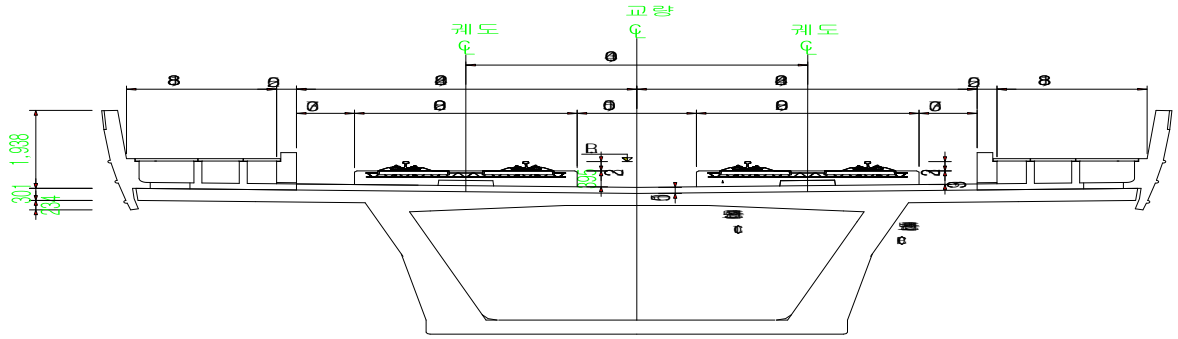


그림 2.3.1.6 호남고속철도 1단계 (오송역~ 광주송정역) (V=350km/h) Rheda2000 콘크리트 궤도

④ 원주~강릉 철도건설 (V=250km/h) Rheda2000 콘크리트 궤도

▪ 2014년 3월 31일부터 궤도 실시설계준공을 완료하여 2017년 12월 개통된 원주~강릉 철도건설 (V=250km/h) Rheda2000 콘크리트 궤도의 설계도면은 그림 2.3.1.7과 같다. 궤도형식은 설계속도 200km/h이상 콘크리트 궤도이며 Rheda2000(Bi-Block침목 + system300) 및 (Bi-Block 침목+KR체결장치) 의 구조 형식이다.

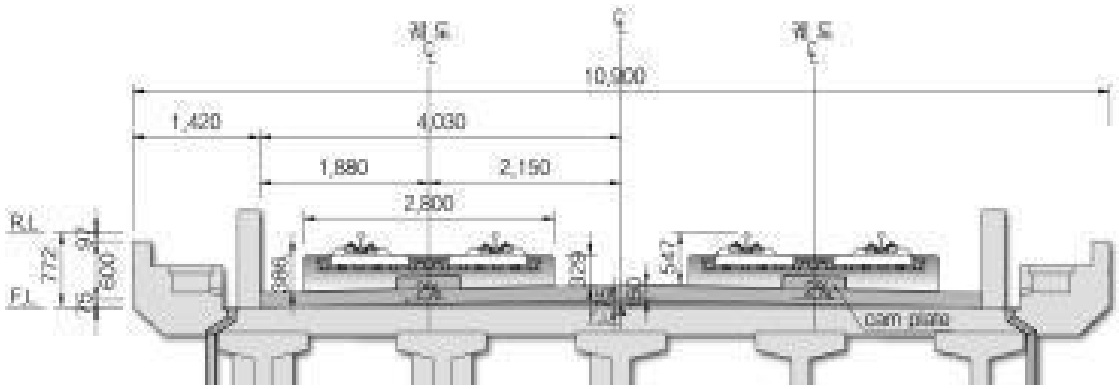


그림 2.3.1.7 원주~강릉 철도건설 (V=250km/h) Rheda 2000 콘크리트 궤도

⑤ 도담~영천 복선철도 (V=250km/h)

▪ 2017년 11월 30일 실시설계준공 예정인 도담~영천 복선철도의 콘크리트궤도의 설계도면은 그림 2.3.1.8과 같으며, 설계속도는 250Km/h 이며, 교량구간 궤도형식은 자갈궤도 및 콘크리트 궤도 (Bi-Block 침목 + KR형 체결장치)이나 교량 탈선방호벽 미설치하는 것으로 계획 중으로 조사되었다.

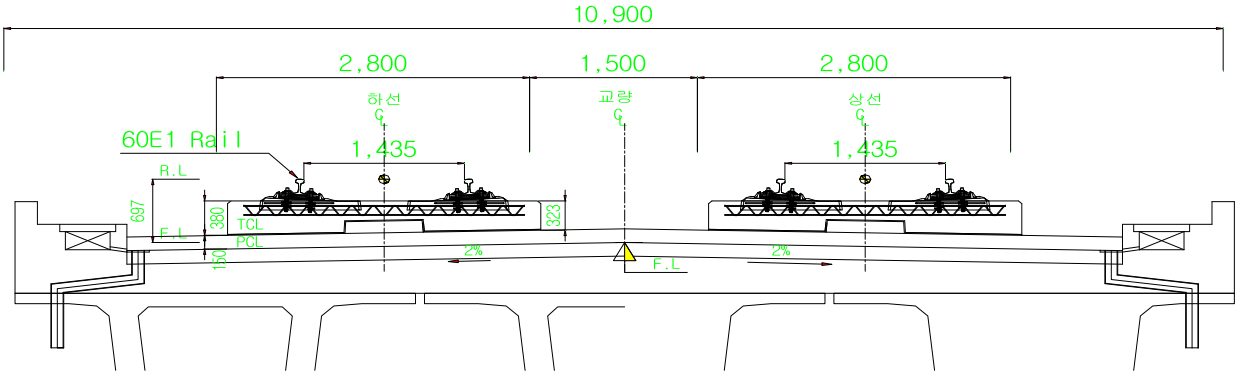


그림 2.3.1.8 도담~영천 복선철도 (V=250km/h) 콘크리트 궤도(Bi-Block 침목 + KR형 체결장치)

(마) 일탈방호시설 시공방법

① 일탈방호시설 시공 작업인원 및 장비투입계획

▪ 일탈방호시설의 시공목표치인 20m/1일 시공(운행차단시간 4시간)의 작업효율에 따른 작업인원 및 장비투입계획은 그림 2.3.1.9와 같이 수립하였다.



그림 2.3.1.9 장비인원 및 장비투입계획

② 일탈방호시설 시공 공정 예상시간

▪ 일탈방호시설의 시공목표치인 20m/1일(운행차단시간 4시간)은 호남고속선 TCL타입 구성치를 기준으로 TCL 3경간(패널 9본 또는 10본)의 시공하여야 하며, 시공공정은 그림 2.3.1.10과 같다.

▪ 또한 그림 2.3.1.9의 작업인원 및 장비투입계획에 따른 1일 일탈방호시설 시공 예상시간을 산정하면 표 2.3.1.8과 같다.



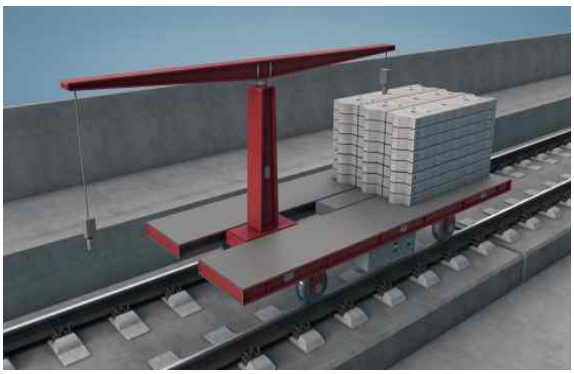
그림 2.3.1.10 TCL별 일탈방호시설 단위 시공공정

표 2.3.1.8 1일 일탈방호시설 시공 예상시간

구 분			작업시간(분)	총 작업시각	비고
TCL-1	1단계	운반 및 패널하화	20	20	
	2단계	앵커천공 및 설치	40	60	
	3단계	거푸집 설치	15	75	
	4단계	하부충진	45	120	
TCL-2	1단계	운반 및 패널하화	20	80	TCL-1 앵커 천공 및 설치완료후 시공시작
	2단계	앵커천공 및 설치	40	120	
	3단계	거푸집 설치	15	135	
	4단계	하부충진	45	180	
TCL-3	1단계	운반 및 패널하화	20	140	TCL-2 앵커 천공 및 설치완료후 시공시작
	2단계	앵커천공 및 설치	40	180	
	3단계	거푸집 설치	15	195	
	4단계	하부충진	45	240	

(바) 일탈방호시설 시공과정

① 패널상차 및 설치장소 이동



- 일탈방호시설을 상차하여 시공할 현장으로 이동

그림 2.3.1.11 일탈방호시설 시공과정(1)

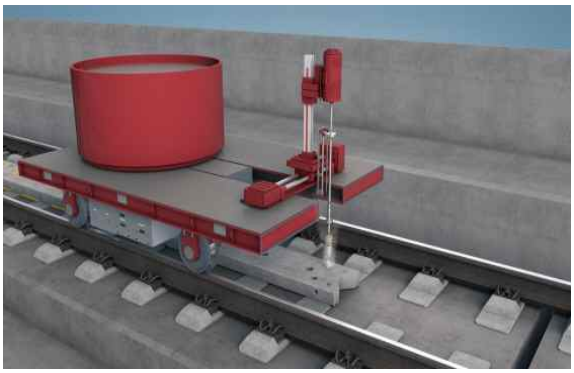
② 패널하화



- 장비를 이용하여 빠른이동 및 안전하고 정확한 하화 작업
- 일탈방호시설을 시공구간에 하화

그림 2.3.1.12 일탈방호시설 시공과정(2)

③ 하부천공, 캐미컬 앵커 및 높이 조절공 설치



- TCL과 일탈방호시설 일체화를 위해 높이 조절공 설치후 TCL을 천공하여 캐미컬 앵커설치

그림 2.3.1.13 일탈방호시설 시공과정(3)

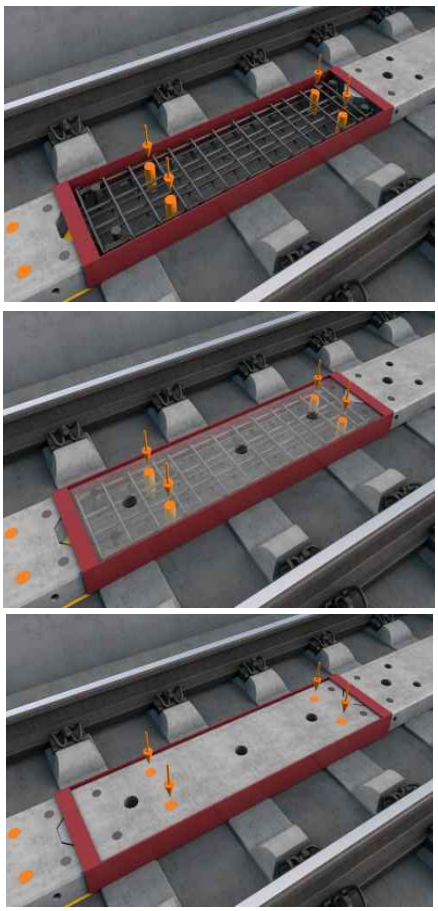
④ 거푸집설치



- TCL과 일탈방호시설 사이 캐미컬 앵커 몰탈 주입과 높이 조절공 몰탈주입을 위한 거푸집설치
- 일체형 거푸집으로 작업속도 향상 및 품질개선

그림 2.3.1.14 일탈방호시설 시공과정(4)

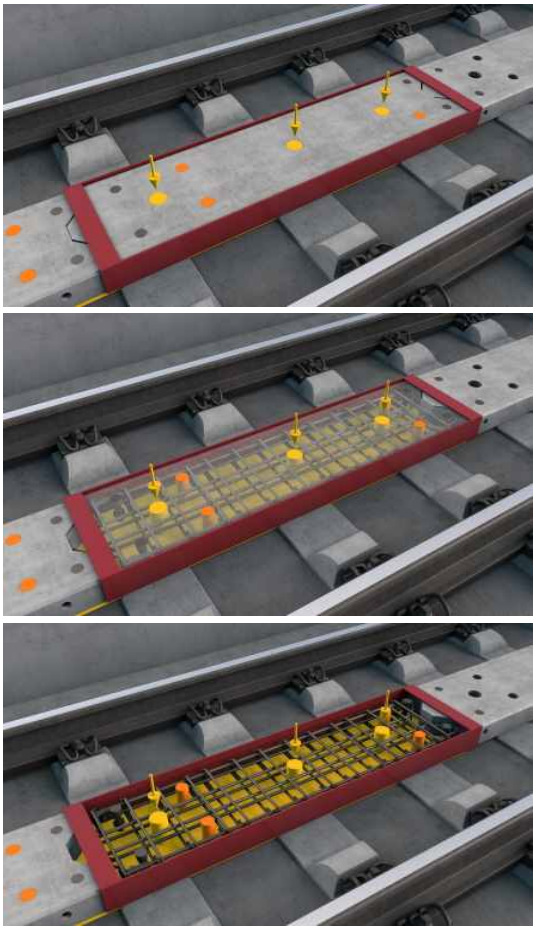
⑤ 캐미컬 앵커 몰탈주입



- TCL과 일탈방호시설의 일체화를 위한 캐미컬 앵커 몰탈주입

그림 2.3.1.15 일탈방호시설 시공과정(5)

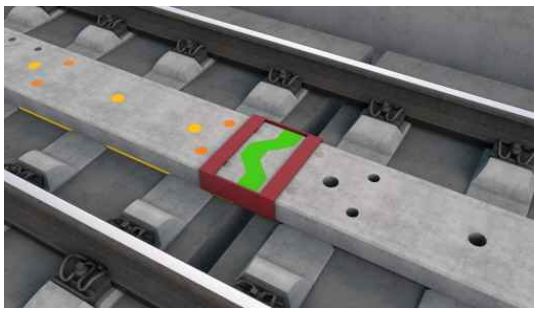
⑥ 높이 조절공 사이 몰탈주입



- TCL과 일탈방호시설 사이 높이 조절공 사이 몰탈주입
- TCL과 일탈방호시설 일체화

그림 2.3.1.16 일탈방호시설 시공과정(6)

⑦ 일탈방호시설 이음부 거푸집 설치 및 에폭시주입

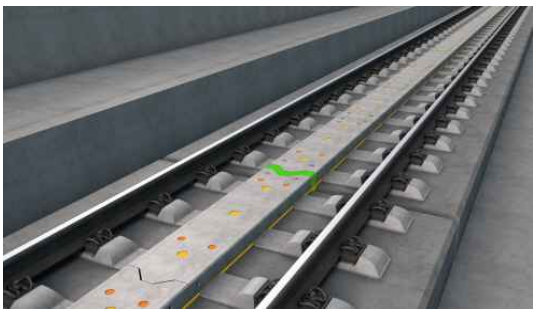


- 일탈방호시설의 일체화를 위한 이음부에 거푸집설치 및 에폭시주입

그림 2.3.1.17 일탈방호시설 시공과정(7)

※ 철도교 교량신축이음구간의 유간 변화를 수용하기 위해 동일 TCL층의 DCP는 연결하되 서로 다른 TCL층에 있는 DCP는 분리시공을 실시할 수 있음.

⑧ 현장정리



- 현장정리 및 일일작업구간 체크

그림 2.3.1.18 일탈방호시설 시공과정(8)

(사) 일탈방호시설 시제품 현장시공

① 패널운반 및 하부천공





그림 2.3.1.19 일탈방호시설 시제품 현장시공(1)

② 거푸집 설치 및 앵커설치





그림 2.3.1.20 일탈방호시설 시제품 현장시공(2)

③ 현장정리




그림 2.3.1.21 일탈방호시설 시제품 현장시공(3)

(2) 현장시공 공정검증

(가) 목적

▪ 철도용 일탈방호시설(Derailment Containment Provision: 일탈방호시설)의 급속시공을 위한 공정별 최적의 시간과 인원·장비 조합을 구하고, 작업시간(밤12시~새벽4시)에 작업으로 인한 안전과 효율성을 구하고자 함.

(나) 시공 순서도



그림 2.3.1.22 일탈방호시설 시공 순서도

(다) 작업편성도

기존 철도교량 일탈방호시설 시공방법 및 유지보수방안 개발

- 작업조 구성

DCP 사전 제작	설치현장 이동	장비셋팅	앵커천공
재투입/거푸집제거	하부충진 /양생	거푸집설치	패널 하화

– 작업인원 및 장비투입계획 공정 및 작업관리자

현장책임자 1인

시공팀 A (앵커천공 및 설치)	시공팀 B (장비 및 패널세팅)	시공팀 C (거푸집 설치)	시공팀 D (충진재 주입)
▶ 투입인원 : 2명	▶ 투입인원 : 3명	▶ 투입인원 : 2명	▶ 투입인원 : 3명
▶ 장비/자재 코어드릴 : 2대 앵커 및 잡자재	▶ 장비/자재 이동크레인 : 1대 패널운반차 : 1대	▶ 장비/자재 거푸집 및 잡자재	▶ 장비/자재 몰탈 믹서 : 1대 몰탈주입기 : 1대

그림 2.3.1.23 장비인원 및 장비투입계획

(라) 작업공정표

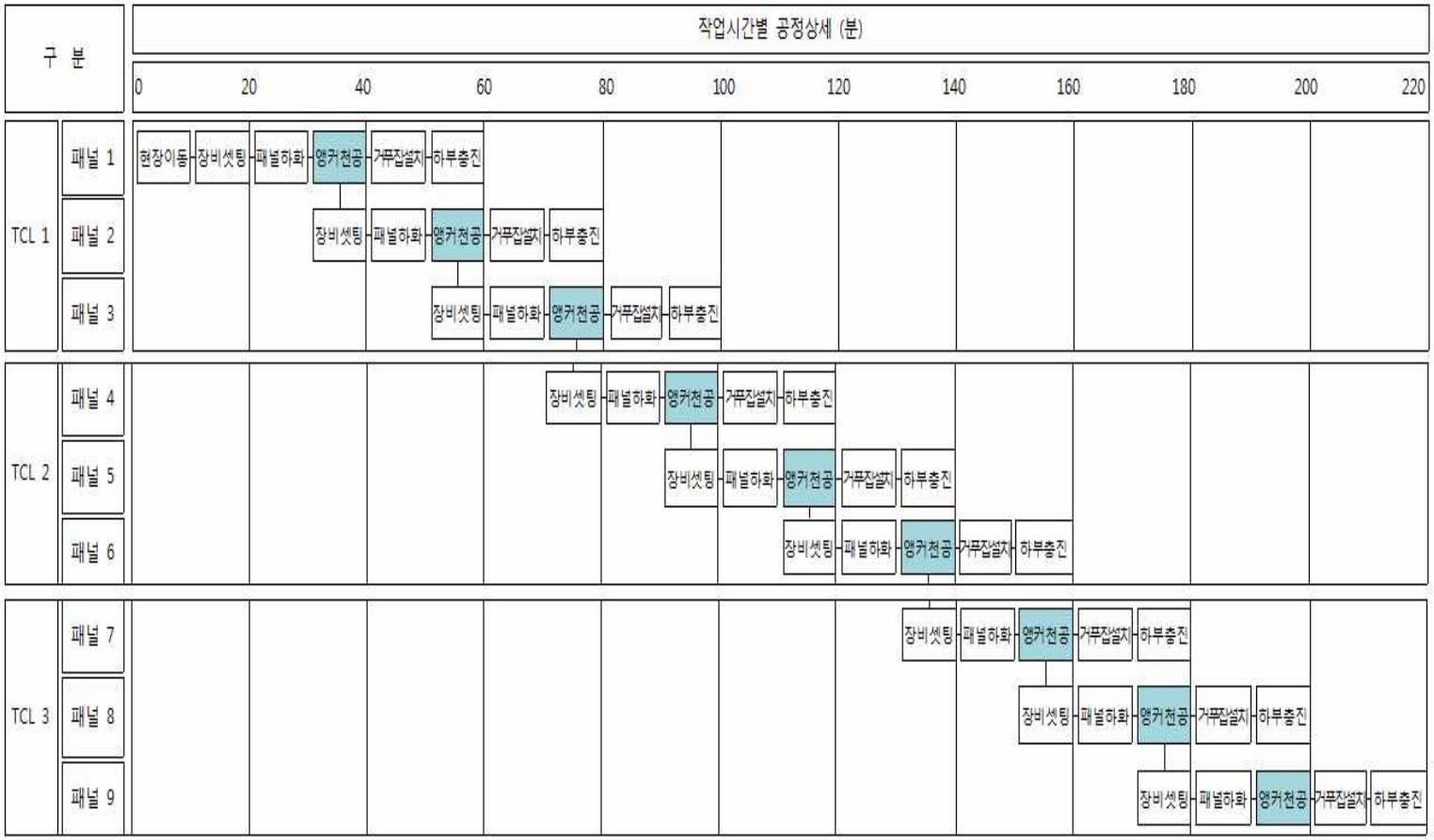


그림 2.3.1.24 작업공정표

(마) 시공 공정 검증 사진

① 이동 및 장비세팅



그림 2.3.1.25 시공 공정 검증 사진(1)

② 패널하화 및 앵커천공



그림 2.3.1.26 시공 공정 검증 사진(2)

③ 거푸집 설치 및 충진재 주입



그림 2.3.1.27 시공 공정 검증 사진(3)

④ 청소 및 철수





그림 2.3.1.28 시공 공정 검증 사진(4)

⑤ TCL 천공 시 철근손상 없음

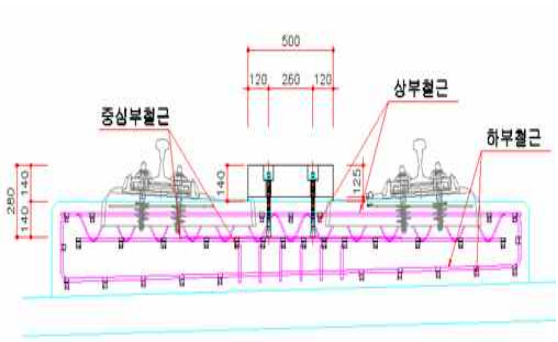




그림 2.3.1.29 시공 공정 검증 사진(5)

(바) 시공 공정별 성적서

- 대상구간(경전선(완사-유수-진주) 탈선방호시험장 4km구간)
  - TCL 6m 1개(3개 DCP 패널) + TCL 7m 2개(6개 DCP 패널)= 20m

시험 시공 공정 결과

1. 주 소 : 경상남도 진주시 유수역 (일탈방호 시험 시공 현장)

2. 일 시 : 2018년 11월 16일 14시~18시

3. 결 과

공정	기준시간(분)	실시간(분)	투입 인원 및 장비		비고
			인원	장비	
이동 및 장비세팅	30분	30	3	크레인1 운반차1	
패널하 및 앵커천공	80분	70	3	천공기1	
거푸집설치 및 충진재 주입	80분	72	2	믹스기1 주입기1	
청소 및 철수	30분	30	3	크레인1 운반차1	
합 계	220분	206			

4. 검증단

상기 내용에 대해 확인함.

구조전문가	상명대학교 교수	박 종 섭	(인)
구조기술사	㈜코비코리아	김 성 찬	(인)
시공기술사	주식회사 로템	김 민 성	(인)
철도기술자	한국철도공사	이 의 규	(인)
VE기술자	주식회사 유신	조 성 진	(인)

그림 2.3.1.30 시공 공정별 성적서

(사) 시공 공정별 성적서

- 대상구간(경전선(완사-유수-진주) 탈선방호시험장 4km구간)
  - TCL 6m 1개(3개 DCP 패널) + TCL 7m 2개(6개 DCP 패널)= 20m

시험 시공 공정 결과

1. 주 소 : 경상남도 진주시 유수역 (일탈방호 시험 시공 현장)

2. 일 시 : 2019년 6월 13일 08시~12시

3. 결 과

공정	기준시간(분)	실시간(분)	투입 인원 및 장비		비고
			인원	장비	
이동 및 장비세팅	30분	28	3	크레인1 운반차1	
패널하 및 앵커천공	80분	75	3	천공기1	
거푸집설치 및 충진재 주입	80분	71	2	믹스기1 주입기1	
청소 및 철수	30분	27	3	크레인1 운반차1	
합 계	220분	201			

4. 검증단

상기 내용에 대해 확인함.

구조전문가	상명대학교 교수	박 종 섭	(인)
구조기술사	㈜동명기술공단	오 민 수	(인)
시공기술사	주식회사 로템	김 민 성	(인)
철도기술자	철도시설공사	이 의 규	(인)
VE기술자	주식회사 유신	조 성 진	(인)

그림 2.3.1.31 시공 공정별 성적서(2019년 추가시험)

나. 일탈방호시설 급속복구 개요

(1) 일탈방호시설의 정의

▪ 일탈방호시설(Derailment Containment Provision; DCP)은 철도차량이 탈선하였을 때, 차량의 진로를 운행 선로 안에서 거동하도록 제어하고, 반대편 교행 선로로 진입하거나 선로 바깥으로 나가지 않도록 진로를 제어하는 시설을 말한다.

(2) 급속복구의 목적

▪ 열차의 탈선사고가 발생한 경우 급속복구를 통해 단시간 내에 일탈방호시설의 성능을 유지하기 위함이다.

(3) 급속복구의 적용범위

▪ 열차의 탈선으로 인해 차량과 충돌이 발생한 일탈방호시설이 급속복구의 대상이다.

다. 탈선사고 발생 후 일탈방호시설의 상태점검

(1) 상태점검

▪ 열차의 탈선사고가 발생한 경우, 단시간 내에 차량과 충돌이 발생한 일탈방호시설의 상태를 육안과 장비를 통해 점검하고, 점검 결과를 통해 최종상태등급을 판정하는 절차가 필요하다.

(가) 육안점검

▪ 콘크리트 표면의 균열 발생 여부, 콘크리트 부분 탈락 여부, 박리박락 발생 여부, 콘크리트 파괴 여부, 철근 노출 여부, 전단 앵커 파괴 여부, 유격 발생 여부 등을 육안으로 점검한다.

(나) 정밀점검

▪ SASW 기법을 활용한 평균 표면파속도 측정법을 사용하여 표면파 속도 비를 계산한다. 자세한 방법은 [별첨 1]을 참조한다.

(2) 상태등급분류

▪ 육안점검과 정밀점검의 결과를 통해 열차와 충돌한 일탈방호시설의 상태를 표 2.3.3.1과 같이 4가지 등급으로 분류한다.

표 2.3.3.1 일탈방호시설 상태등급분류

상태 등급	육안점검 결과			정밀점검 결과*
	콘크리트 파괴	철근노출	전단앵커 파괴	표면파 속도 비 [%]**
무손상	×	×	×	50 이상
소손상	표면균열 또는 박리박락	×	×	
대손상	콘크리트 부분 탈락	○	×	50 이하
파괴	콘크리트파괴 (영구변형발생)	○	강재전단파괴 또는 콘크리트 탈락	측정 불가

*제시된 정밀점검에 의한 상태등급분류 기준은 [별첨 1]의 표 A에 기술된 일탈방호시설의 중량체 낙하시험 결과에 근거한 값이다. [별첨 1]의 표 B는 국토부의 콘크리트 압축강도 상태평가 기준에 근거한 값이다. 본 매뉴얼을 사용하는 공학자의 공학적인 판단에 따라 두 기준 중 하나를 선택하여 사용하도록 한다. 다만, 표 2.3.3.1의 정밀점검 기준 또는 표 A를 사용할 경우, 추가적인 다량의 시험을 통해 통계적으로 접근하여 상태등급분류 기준을 수정하여 사용하는 것을 추천한다.

**표면파 속도 비 = 사고발생 후 표면파 속도 / 사고발생 전 표면파 속도 [%]

(가) 상태등급분류 순서

▪ 표 2.3.3.1에 따라 육안점검을 통해 콘크리트 부분 탈락 또는 콘크리트 파괴, 철근 노출, 전단앵커 파괴 등이 확인된 일탈방호시설은 ‘대손상’과 ‘파괴’로 분류하고 장비를 사용한 정밀점검을 수행하지 않는다. 육안점검 결과 ‘무손상’ 또는 ‘소손상’으로 분류된 경우에는 장비를 사용한 SASW 기법을 통해 표면파 속도비를 계산하여 최종 상태등급을 분류한다.

라. 탈선사고 발생 후 응급복구를 위한 일탈방호시설의 등급별 급속복구

(1) 일탈방호시설의 등급별 급속복구 대책

▪ 육안점검과 정밀점검을 통해 '무손상'으로 분류된 일탈방호시설은 별다른 보수를 하지 않고 재사용한다. '소손상'으로 분류된 일탈방호시설은 콘크리트 균열 보수와 피복 복구 등의 손상복구 방법을 사용하여 표 2.3.4.1과 같이 급속복구를 수행한다. '대손상'과 '파괴'로 분류된 일탈방호시설은 복구가 불가능한 것으로 판단하고, 해체 후 신규 일탈방호시설로 재설치한다.

표 2.3.4.1 일탈방호시설 상태등급별 급속복구 방법

구 분	손상복구 방법	
무손상	보수불필요	
소손상	콘크리트 균열	① 0.2mm 미만균열 → 표면처리공법 ② 0.2mm 이상균열 → 균열 보수제 사용
	박리박락	콘크리트 표면피복 복구
대손상 파괴	복구불가능, 일탈방호시설 해체 후 신규 일탈방호시설로 재설치	

※ 「주택건설 전문시방서, 2008(대한주택공사)」, p267

※ 전기철도 유지보수 매뉴얼, p30

(2) 일탈방호시설의 등급별 급속복구 방법

(가) 소손상 급속복구 방법

▪ 일반적으로 일탈방호시설의 패널 표면에 발생한 0.2㎜ 미만의 균열에 대하여는 합성수지 재료(보수제) 또는 동등 이상의 재료를 이용하여 표면처리를 통해 보수한다. 0.2㎜를 초과하는 균열에 대하여는 균열의 상태를 파악하여 보수제 또는 V 컷팅 후 그라우팅제 주입의 방법을 사용한다. 단, 보수제의 지속적인 누수가 예상될 때는 별도의 방법을 강구하여야 한다. 패널의 일부 탈락, 훼손(박리박락)과 같은 손상은 무수축 콘크리트를 사용하여 보수한다. 복구에 소요되는 시간은 표 2.3.4.2를 참조한다.

※ 「주택건설 전문시방서, 2008(대한주택공사)」, p267

※ 전기철도 유지보수 매뉴얼, p30

(2) 대손상 및 파괴 급속복구 방법

▪ 대손상 및 파괴된 일탈방호시설은 제거하고 TCL을 정리하여 재시공 한다. 시공 순서는 표 2.3.4.5, 표 2.3.4.6과 같다. 복구에 소요되는 시간은 표 2.3.4.2를 참조한다.

표 2.3.4.2 일탈방호시설 상태등급별 급속복구 소요시간

구 분	복구방법	복구소요시간/TCL	비 고
무손상	보수불필요	×	
소손상	표면처리 및 균열보수	1시간/TCL 1개	2팀 동시작업 시, 4개소/일 가능
대손상	일탈방호시설 철거 및 재설치	2시간/TCL 1개	2팀 동시작업 시, 2개소/일 가능
파괴			

* 개소 = 20m

(3) 일탈방호시설의 등급별 급속복구 순서

(가) 소손상 급속복구 순서

표 2.3.4.3 에폭시모르터 도포공법(0.2mm 미만 균열)

① 보수 범위의 확인
↓
② 균열부 및 보수면처리
↓
③ 프라이머 도포
↓
④ 에폭시 수지 모르터 도포
↓
⑤ 표면마감
↓
⑥ 보수부위 확인

표 2.3.4.4 소손상 급속복구 순서(0.2mm 이상 균열)

① 보수 범위의 확인	균열상태, 균열폭, 길이 등 사전조사
↓	
② 균열부의 청소	균열부를 중심으로 폭 50cm정도를 와이어브러시 등으로 표면 청소
↓	
③ 주입구의 위치 결정	균열 상태에 따라 주입구 설치 위치(20~30cm)를 결정
↓	
④ 균열부 메움재 설치	균열부를 메움재로 폭 30mm, 두께 2mm 정도로 도포
↓	
⑤ 메움재 양생	메움재 도포 후 24시간 양생(경화)
↓	
⑥ 보수용 보수제 계량과 비빔	주입할 재료를 정확하게 계량하여 균일하게 비빔
↓	
⑦ 보수제 주입	보수제를 주입기구에 넣고 고무압, 스프링압, 공기압 (고압 10kg/㎠, 저압 8kg/㎠ 이하)으로 주입
↓	
⑧ 양 생	주입한 보수제를 24시간 양생(경화)
↓	
⑨ 마무리	주입기구와 메움재를 제거하고 핸드그라인더로 깨끗이 면처리
↓	
⑩ 검 사	수지의 충진상태 및 표면처리 상태를 확인

(나) 대손상 및 파괴 급속복구 순서

▪ '대손상' 및 '파괴'로 분류된 일탈방호시설의 경우 해체 후 신규 일탈방호시설로 재설치하는데, 대손상 및 파괴 범위가 40m 이상인 경우 급속복구 장비를 활용하고, 대손상 및 파괴 범위가 40m 이하인 경우 인력으로 교체한다. 급속복구 시 장비는 이동시간 및 준비시간이 많이 소요되므로 대손상 및 파괴 범위가 40m 이하인 경우는 현장에 빠른 접근이 가능한 인력으로 교체한다.

표 2.3.4.5 대손상 및 파괴 급속복구(인력) 순서

① 일탈방호시설 이음부 절단 및 일탈방호시설 제거

↓

② 앵커부 및 접속부 정리

↓

③ 코어링, 거푸집 설치 및 에폭시 충진

↓

④ 일탈방호시설 재설치 및 거푸집 설치

↓

⑤ 모르타르 충진 및 케미컬 앵커 설치(충진재)

↓

⑥ 현장정리

표 2.3.4.6 대손상 및 파괴 급속복구(장비) 순서

① 패널상차 및 설치장소 이동

↓

② 패널하화 및 하부천공

↓

③ 캐미컬 앵커 및 높이 조절공 설치

↓

④ 거푸집 설치 및 몰탈주입

↓

⑤ 이음부 거푸집 설치 및 에폭시 주입

↓

⑥ 현장정리

(4) 일탈방호시설 현장급속복구

(가) 대손상 현장급속복구

▪ 일탈방호시설의 대손상시 목표는 TCL 1개 최대길이 8m를 2시간내 교체하는 것이 목표이다. 아래는 일반적인 TCL 8m에 DCP 1.950m가 설치되어 있는 일반도를 나타낸다. 본 급속복구에서는 유수역 일탈방호시험 현장에서 관련 현장급속복구를 위한 급속교체 시간측정을 통한 검증을 실시하였다. 아래 표는 DCP 패널의 표준 배치도이다.

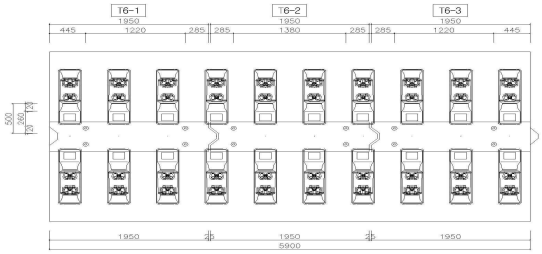


그림 2.3.4.1 TCL 6m용 DCP패널 배치도:
DCP 1,950m×3EA

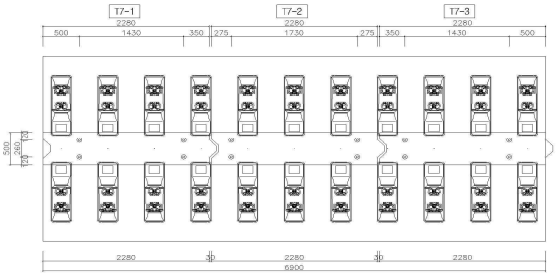


그림 2.3.4.2 TCL 7m용 DCP패널 배치도 :
DCP 2,280m×3EA

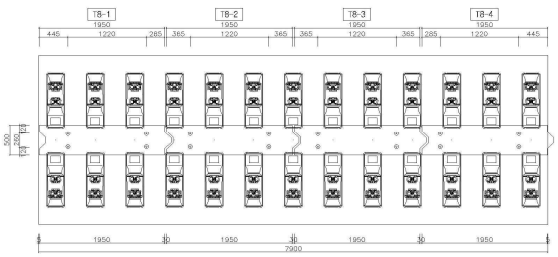


그림 2.3.4.3 TCL 8m용 DCP패널 배치도:
DCP 1.950m×4EA

▪ 일탈방호시설의 대손상(전면교체)을 해야 하는 최대 TCL 급속교체 목표는 4시간당 2개의 TCL층의 보수가 가능해야 한다. 최대 8m 길이의 TCL 2개소를 대상으로 하면 길이는 16m 이며, DCP 패널은 8개 이상 교체가 목표수준이다. 실제 교체시 시간을 측정한 대상 TCL은 TCL 6m 3개(9개 DCP 패널), TCL 7m 2개(6개 DCP 패널)로 18m + 14m = 32m > 16m 이상 , DCP 패널은 15개 이상에 대하여 긴급복구 시간 측정을 실시하였다. 주간측정 시간은 총 233분이 소요되었고 0.97hr/ TCL 1개(8m)를 달성하였다.

유지보수 성적서(대손상)

1. 주 소 : 경상남도 진주시 유수역 (일탈방호 시험 시공 현장)

2. 일 시 : 2020년 02월 3일 1시~16시30분

3. 대 상 : 총 3개소 32m (TCL 6m 3개소, TCL 7m 2개소)

4. 결 과

공정	기준시간(분)	실시간(분)	투입 인원 및 장비		비고
			인원	장비	
기존DCP제거	60분	60분	3	크레인1 운반차1	
장비세팅 및 패널하화	50분	49분	3	크레인1 운반차1	
천공 및 앵커천공	60분	58분	2	믹스기1 주입기1	
거푸집설치 및 충진재 주입	60분	57분	3	믹스기1 주입기1	
청소 및 철수	10분	9분	3	크레인1 운반차1	
합 계	240분	233분			

5. 검증단

상기 내용에 대해 확인함.

구조전문가	동명기술공단	오 민 수	
구조기술사	㈜코비코리아	김 성 찬	
시공기술사	주식회사 로템	김 민 성	
철도기술자	주식회사 유신	조 성 진	

그림 2.3.4.4 대손상(전면교체시) 시간측정 증빙

(나) 소손상 현장급속복구

▪ 일탈방호시설의 소손상(균열보수)를 해야 하는 최대 TCL 급속보수 목표는 4시간당 4개의 TCL층의 보수가 가능해야 한다. 최대 8m 길이의 TCL 2개소를 대상으로 하면 길이는 16m 이며, DCP 패널은 8개 이상 균열보수가 목표수준이다. 실제 교체시 시간을 측정한 대상 TCL은 TCL 6m 3개(9개 DCP 패널), TCL 7m 2개(6개 DCP 패널)로 18m + 14m = 32m > 16m 이상 , DCP 패널은 15개 이상에 대하여 긴급 균열보수 시간 측정을 실시하였다. 주간측정 시간은 총 196분이 소요되었고 0.82hr/ TCL 1개(8m)를 달성하였다.

유지보수 성적서(소손상)

1. 주 소 : 경상남도 진주시 유수역 (일탈방호 시험 시공 현장)

2. 일 시 : 2020년 02월 4일 9시~1시30분

3. 대 상 : 총 3개소 32m (TCL 6m 3개소, TCL 7m 2개소)

4. 결 과

공정	기준시간(분)	실시간(분)	투입 인원 및 장비		비고
			인원	장비	
보수범위확인	15분	12분	3	운반차1	
균열부 보수면처리	165분	134분	3	믹스기1 주입기1	
양 생	45분	37분	2		
검 사	15분	13분	3		
합 계	240분	196분			

5. 검증단

상기 내용에 대해 확인함.

구조전문가	동명기술공단	오 민 수	(인)
구조기술사	㈜코비코리아	김 성 찬	(인)
시공기술사	주식회사 로템	김 민 성	(인)
철도기술자	주식회사 유신	조 성 진	(인)

그림 2.3.4.5 소손상(균열보수시) 시간측정 증빙

2.4 시험 및 검사

가. DCP패널 제작

(1) 기본사양 및 도면

(가) 기본사양

▪ DCP는 콘크리트 침목 사이에 놓이는 구조물로 철도차량이 레일을 벗어나 일탈할 경우 차량이 주행면을 벗어나는 것을 방지하는 것은 물론 차량의 일탈로 인한 레일 및 차량의 피해를 줄이고자 설치하는 구조물로 아래와 같은 단면을 가진다.

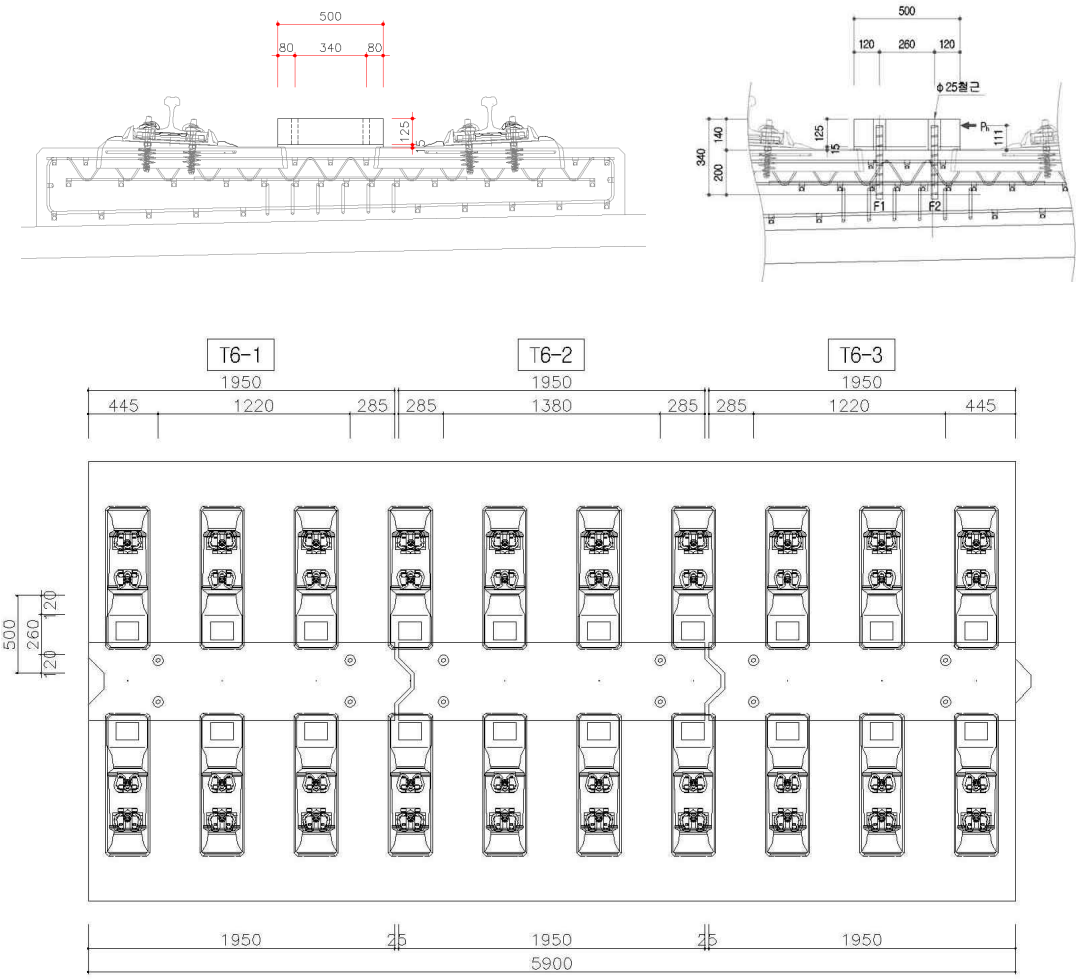


그림 2.4.1.1 일탈방호시설(DCP)의 일반도

(나) 제품의 도면

▪ DCP는 아래의 그림과 같이 각종 인서트 및 무수축그라우트 충진용 홀로 이루어져 있으며, 각 타입별 앵커의 위치에 따라 3~4가지 종류로 이루어져 있다. 상세도면은 일반도 및 구조도로 표기하였고 상세 제품도에 제시하였다.

(2) 시험 및 검사방법

(가) 형태

▪ 형상, 치수 및 허용차는 설계도면에 의하고, 허용차가 없는 치수에 대해서는 표준치수로 하되 KS 일반 공차에 의한다. 다만 주요부의 허용차는 다음 표 에 적합하여야 한다.

표 2.4.1.1 일탈방호시설의 제작 공차

항 목	허 용 차
패널길이	+10㎜, -5㎜
단면의 외형(폭)	±10㎜
좌면요철	1.0㎜ 이하
좌면경사 틀림	1.0㎜ 이하
평탄도 (종방향)	±2㎜
인써트 홈 위치	±2㎜
상면 모서리 코떨어짐, 면깨짐	허용없음
측면 콘크리트 면깨짐	깊이 0.5㎝이하, 최대길이 2㎝이하, 2개이하
하면 모서리 코 떨어짐	탈락면 폭 2㎝이하, 길이 5㎝이하, 2개이하

(나) 성능 및 외관

▪ 성능

① 콘크리트의 재령 28일 압축강도는 KS F 2405(콘크리트의 압축강도 시험방법)의 시험결과 설계도면에 표기된 소정강도(fck=45MPa) 이상이어야 한다.

② 콘크리트중의 허용 염화물량은 0.3㎏/㎥(염소이온중량) 이하이어야 한다.

③ 패널의 휨 강도는 별도 시험방법에 의한 하중에서 이상이 없어야 한다.

▪ 외관

① 패널은 그 질이 치밀하고 해로운 흠, 균열 등의 결점이 없어야 하고, 겉모양, 치수 및 콘크리트에 매립되는 재료의 위치가 정확하여야 하며, 어떠한 경우라도 구체를 보수하여서는 안된다.

② 패널은 상면 및 측면이 평활하고 비틀림이 없어야 한다.

(다) 검사 및 시험

▪ 검사

① 겉모양 검사

패널의 표면은 매끈하고 그 질이 치밀하여야 하며 비틀림, 요철, 표면불량, 균열 등의 결함이나 레일 좌면의 비틀림이 없어야 한다.

② 치수 검사

패널 형상 및 치수는 설계도면에 의하여 검사하되, 정확을 요하는 주요부의 측정에는 별도의 측정 기구를 제작하여 검사를 하여야 한다.

▪ 원재료 시험

- 패널 제작에 소요되는 원재료의 선정 및 관리 시험은 제작 검사자 입회하에 시험을 실시하고 확인을 받아야 한다.

① 시멘트 시험

- 3개월 이상 또는 품질에 이상이 생겼다고 판단되는 시멘트는 사용 전에 KS L 5201(포틀랜드 시멘트)에 규정된 품질시험을 실시하여 적합여부를 확인하고 사용하여야 한다.

② 골재 시험

- 소요강도 적합여부 및 소정의 골재 사용여부를 확인하기 위하여 골재의 안정성, 마모율, 입도, 함수율 등을 시험하여야 하며 필요시에는 콘크리트의 배합을 조정하여야 한다.

- 알칼리 골재반응에 의한 패널의 성능저하를 방지하기 위해 골재의 잠재반응성 시험을 실시하여 품질을 확인한 후 사용하여야 한다.

- 골재는 생산지가 변경되거나 품질이 변동되는 경우에는 반드시 시험을 실시하여 적합여부를 확인하여야 한다.

③ 혼합수

- 상수돗물은 시험을 하지 않아도 사용할 수 있다.

- 상수돗물 이외의 물은 아래에 표시하는 기준에 적합하여야 한다.

표 2.4.1.2 혼합수 기준(상수돗물 이외의 물 기준)

항 목	품 질
현탁물질의 양	2g/l 이하
용해성 증발 잔류물의 양	1g/l 이하
염소 이온량	150ppm 이하
시멘트 응결시간의 차	초결은 30분 이내, 종결은 60분 이내
모르타르의 압축강도비	재령 7일 및 재령 28일에서 90% 이상

④ 혼화재료

▪ 혼화재료는 사용 전에 품질, 성능, 화학성분 등에 대한 시험을 실시하여야 한다.

▪ 장기간 보관, 이물질 혼입 및 기타 사유에 의해 변질 가능성이 있는 혼화재료는 반드시 시험하여 품질을 확인한 후 사용하여야 한다.

▪ AE제, 감수제, AE 감수제는 KSF 2560에 적합하고 또한 유동화제와 병용할 경우에 유동화 콘크리트에 나쁜 영향을 미치지 않아야 한다.

▪ 콘크리트 시험

- 제작 검사자는 제작 개시 전에 필요한 재료의 시험 및 콘크리트 배합을 정하기 위한 시험을 실시함과 아울러 기계 및 설비의 성능을 확인하여야 한다.

▪ 슬럼프 및 슬럼프 플로 시험

- 콘크리트 타설 전 KS F 2402(포틀랜드 시멘트 콘크리트 슬럼프 시험방법)에 의한 슬럼프 시험 및 KS F 2594(굳지 않은 콘크리트의 슬럼프 플로 시험방법)에 의한 슬럼프 플로 시험을 하여 적합여부를 확인하여야 한다.

▪ 공기량 시험

- 공기량 시험은 KS F 2409{굳지 않은 콘크리트의 용적중량 및 공기량 시험방법(중량방법)}, KS F 2421{굳지 않는 콘크리트의 압력법에 의한 공기함유량 시험방법(공기실 압력방법)} 등에 의하여 공기량의 변동 유무를 시험 확인하고 필요시 콘크리트 배합을 조정하여야 한다.

▪ 염화물 시험

- 타설 전 굳지 않은 콘크리트(fresh concrete)에 대하여 실시하며 굳지 않은 콘크리트의 이온 농도와 시방배합에 나타난 단위수량의 곱으로 구한다. 염화물량 측정시험의 빈도는 매일 타설하는 콘크리트 마다 1회 이상, 배합 변경 시 마다 실시하여야 한다.

- 염소 이온농도의 측정에 사용하는 염분함유량 측정기는 사용 시 교정을 시행한 후 사용하여야 한다.

▪ 압축강도 시험

- 콘크리트의 압축강도 시험은 KS F 2405(콘크리트 압축강도 시험방법)에 의하며 공시체의 제작은 KS F 2403(콘크리트 압축강도용 공시체 제작방법)에 의한다.

- 콘크리트 압축강도 시험용 공시체는 매일 생산 시 타설하는 배치중의 콘크리트 원주형 공시체(∮100×200㎜) 12개를 제작하고 패널과 동일 조건으로 제작 및 양생한 공시체 중 탈형 시기 결정을 위한 압축강도 시험은 3개로 실시하고 또한, 설계기준강도를 확인하는 경우, 공시체의 양생은 표준양생으로 하여야 한다.

- 압축강도 시험결과 시편 3개 각각의 시험치가 설계기준강도의 85% 이상, 3개의 시험치의 평균치가 설계기준강도 이상이면 합격으로 하며 그렇지 않은 경우 그 배치의 콘크리트로 제작한 패널은 모두 불합격으로 한다.

2.5 탈선/충돌 실험기법 적정성

가. 실대형 철도차량의 탈선/충돌 실험기법 개발

▪ 열차의 탈선, 충돌과 같은 큰 재난에 의한 피해를 최소화하기 위한 기술을 확보하기 위해서는 합리적이고 효율적인 탈선방호시설의 설계 및 개발이 필요하며, 개발된 탈선방호시설의 성능을 검증·평가할 수 있는 기준 및 평가 방법·체계가 필요하다. 국내 도로분야에서는 '도로 안전시설 설치 및 관리 지침'을 마련하고 차량방호 안전시설(방호울타리, 충격흡수시설 등)에 대해 국가인증 성능시험기관에 의해 성능평가시험(실물충돌시험)을 수행하거나, 실물충돌시험에 의해 검증된 컴퓨터 시뮬레이션에 의해 성능이 평가되도록 체계화 되어있다. 그러나 철도분야에서 방호 관련 안전시설에 대한 성능등급 규격화 및 기준/평가 기술·체계(원천기술 및 검증인프라) 등은 전무한 실정이다.

▪ 이에 본 연구에서는 탈선열차에 대한 철도안전시설의 성능을 평가하기 위한 실대형 철도차량의 탈선/충돌 실험기법을 개발하고자 하였다. 본 연구의 최종 목적을 성공적으로 완수하고 연구결과의 신뢰성 확보를 위해서는 열차의 탈선 후 거동 규명 및 일탈방호시설의 소요 방호성능의 적정성을 평가하기 위한 실대형 열차 탈선/충돌 실험이 매우 중요한 부분이라 할 수 있다.

▪ 실대형 열차 탈선/충돌 실험을 수행하기 위한 실험인프라 구축을 위해서는 첫 번째, 실험을 수행할 수 있는 부지를 확보해야하며, 두 번째, 열차주행을 위한 선로(궤도)가 부설되어야하며, 세 번째, 실험결과에 대한 데이터・정보 등을 수집할 수 있는 시설・장비 등이 구축되어야 한다.

▪ 본 연구에서는 실대형 철도차량의 탈선 후 충돌거동 및 방호시설 성능의 적정성을 평가하기 위한 실험기법을 개발하기 위해, 1차 연도 연구부터 지속적인 실험설계와 실험수행을 통해 기법을 검증해왔으며, 최종 4차 연도의 연구수행까지 지속적으로 수정·보완되어 향후 범용적인 실물충돌시험 업무편람[철도차량 방호시설의 실물충돌시험 업무편람(안)]에 수록될 내용 측면에서의 구체적인 장비·시설 등의 구비조건, 적정사양, 세부적인 방법에 대해 기술하였다. 아래의 표 2.5.1에 실대형 철도차량 탈선/충돌 실험기법의 목차를 나타내었으며 이에 대한 세부내용은 보고서 별권에 수록되어 있다.

표 2.5.1 철도차량 방호시설의 실물충돌시험 업무편람 목차(실대형 탈선/충돌 실험기법)

(1) 실험시스템 구성 및 규격
(2) 실험부지 및 시험선로
(3) 실험차량의 가속 및 분리
(가) 차량 가속 방법 (나) 차량 분리 방법 (다) 차량 목표속도 구현 ① 차량 가속 ② 동력차량 감속 ③ 실험차량 제동 ④ 실험차량 자체 감속 ⑤ 차량 가속 주행거리 산정
(4) 실험차량의 탈선유도
(5) 계측 및 실험시스템
(가) 가속도/각속도 계측 장비(센서 및 데이터로거) (나) 실험차량 속도 계측 장비 (다) 고속카메라(실험차량 탈선/충돌 거동 측정) (라) 기타 계측/측정 사항 ① 실험차량의 주행시험 ② 차량 및 시설물 주위의 표시 ③ 실험 전·후 차량 및 시설물의 일반사진 촬영 ④ 충돌순간 섬광전구 설치
(6) 실험 수행
(가) 실험 절차 ① 준비 단계 ② 실험 단계 ③ 정리/분석 단계 (나) 실험 인원 배치 (다) 실험 데이터 수집 ① 측정 ② 촬영(영상에 의한 실험 기록) (라) 실험 데이터 분석 ① 가속도 및 각속도 데이터 ② 고속카메라 데이터 (마) 시험보고서 작성

나. 실대형 철도차량의 탈선/충돌 실험을 위한 계측시스템 설계 및 구현

(1) 실험부지 및 시험선로

(가) 실험부지

▪ 실험차량 운행구간은 최대속도를 고려하여 가속구간 및 제동구간을 확보하였다. 탈선/충돌 실험 수행 위치(폐유수역 부지)의 전·후로 가속구간 약 1,200 m, 제동구간 약 400 m 선로를 확보하였으며, 유수역 시험장 부지(연장 약 400 m) 내에는 실험시설·장비 구축, 실험용 콘크리트 궤도 및 방호시설 시공(100 m), 실험차량/중장비/폐기물 등을 위한 공간을 조성하였다(그림 2.5.1).



그림 2.5.1 철도안전시설 성능시험장 부지

(나) 시험선로

▪ 본 연구에서 수행되는 실대형 열차 탈선/충돌 실험은 크게 두 가지 목적으로 한다. 첫째는 열차의 탈선 후 거동 규명이며, 둘째는 궤간 내 일탈방호시설(DCP)의 방호성능 적정성 평가이다. 가속 주행목적의 선로는 기존 존치된 궤도구간을 활용하고(필요에 따라 자갈 보강), 본 연구에서 최종적으로 개발하고자 하는 궤간 내 일탈방호시설은 고속철도 교량상 콘크리트 궤도에 대한 것이므로 실험용 콘크리트 궤도는 기존 궤도의 일부구간 철거를 통해 새로 부설(100 m)하였다.

▪ 실험용 콘크리트 궤도는 고속철도 교량상 콘크리트 궤도 조건과 동일하게 시공하기 위해 실제 시공되고 있는 대표적인 콘크리트 궤도 'Rheda 2000' 구조를 준용하였다. Rheda 2000 콘크리트 궤도는 2000년 독일의 신노선(Erfut~Halle-Leipzig) 시범사업에서 처음 적용되었으며 국내 고속철도에도 적용되었다.

▪ 국내 고속철도 교량의 기하조건에서는 그림 2.5.2와 같이 열차의 탈선 후 기존 방호시설과 직접적으로 충돌하기 때문에 탈선 후 궤광 구성품(체결장치, 침목, 레일 등)과의 충돌거동을 규명할 수 없다(궤도 중심으로부터 방호시설까지의 이격거리 1,880 mm). 시험장에 부설되는 콘크리트 궤도 기하조건에서는 열차의 탈선 이후 궤광 구성품과의 충돌거동을 규명할 수 있도록 설계하였으며, 최종적으로 차륜과 레일 접촉/충돌 후에도 유사시 궤도 외측으로 과도하게 벗어나는 상황에 대비하여 방호벽을 설계하였다(그림 2.5.3). 이를 위한 방호시설의 위치는 열차의 차륜/차축 조건을 고려하여 궤도 중심으로부터 이격거리 2.7 m이다.

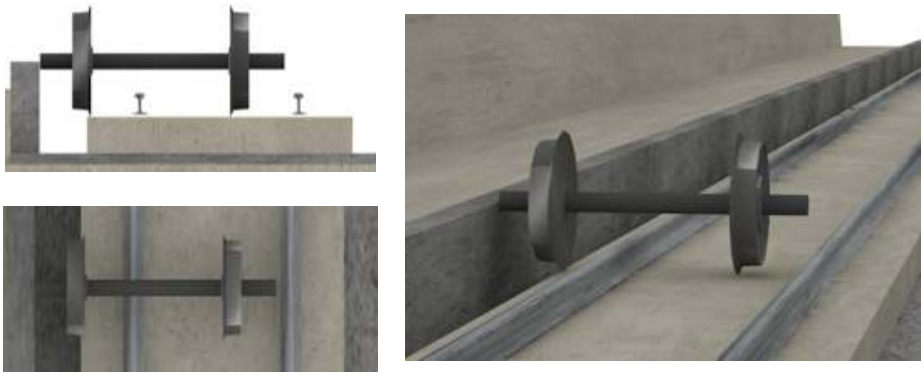


그림 2.5.2 국내 고속철도 교량상의 열차 탈선 후 기하조건

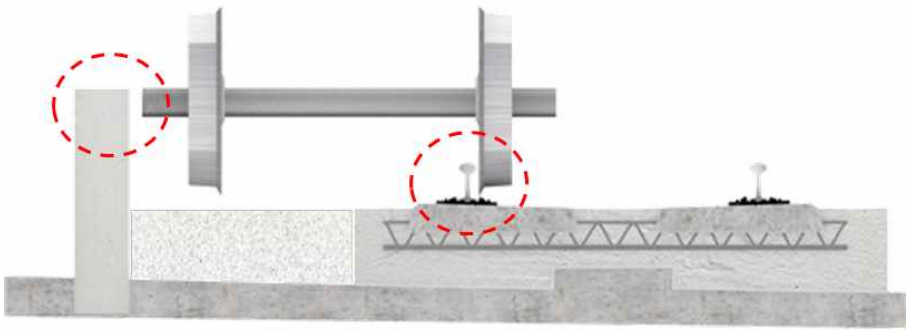


그림 2.5.3 시험장 열차 탈선 후 기하조건

▪ 시험장에 부설되는 방호벽은 국내 고속철도에 실제 적용되고 있는 단면으로 설계하였으며, 실제 교량구조물에 설치되는 탈선방호벽 하부는 고정지점으로 설계되므로 이를 Base Slab 강성에 반영하였다. Base Slab 설계시 방호벽에 작용되는 횡방향 하중은 동일한 방호개념을 적용하고 있는 영국(RSSB, NR, CTRL Project)의 사례를 참고로 하여 300 kN에 대해 설계하였다. 만약 설계하중보다 큰 충돌하중이 작용된다면, Base Slab의 파괴가 아닌 복구가 용이한 방호벽이 파괴되도록 유도하였다. 또한, 방호벽에 작용하는 횡방향 충돌하중에 대해 Base Slab의 전도와 활동 안정성을 검토하였다.

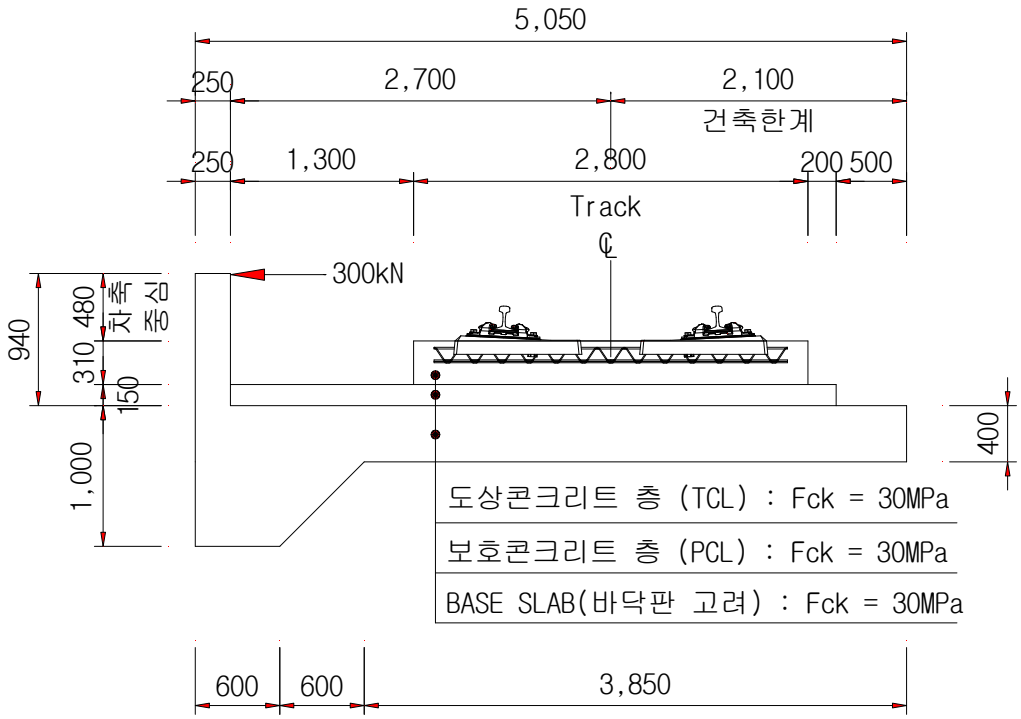


그림 2.5.4 교량상 콘크리트 궤도 부설을 위한 Base Slab 및 방호벽 단면

▪ 또한, 성능시험장 주변에는 농경지 및 주거지역이 있어 인근주민들을 대상으로 한 안전시설을 갖추어야하는 것이 매우 중요한 부분이다. 실험수행시 실험차량 및 동력차의 가속을 위한 시험선로 전 구간에 걸쳐 안전펜스를 설치하였

으며, 주민들이 선로를 가로질러 통행하는 곳은 건널목 및 안내표지를 설치하였다(실험수행시에는 건널목 위치에 안전요원 배치). 또한, 시험선로 끝단에는 유사시 실험차량의 이탈을 방호하기 위한 자갈더미를 실제 설치기준을 준용하여 구축하였다. 탈선/충돌 실험대상인 콘크리트 궤도 구간에는 유사시 실험차량을 방호하기 위한 방호벽과 과도한 주행시 차륜의 완충작용을 위해 자갈을 부설하였다.

▪ 시험선로는 폐선된 구간으로써 시험운행 및 본실험 수행에 앞서 궤도의 안전성 확보를 위한 선로상태 점검, 궤도검측 및 궤도보강을 실시하였다. 궤도검측 결과, 고저틀림/방향틀림/수평틀림/궤간틀림 측정치가 보수기준 이내로써 80 km/h까지의 운행에 지장 없음을 확인하였다(일부구간은 도상어깨 보강). 그러나 열차운행을 1년 이상 하지 않은 선로이므로 실험수행 전 선로 순회 및 차량 운행점검을 시행하여 별도 이상 유무에 대한 점검은 필요하다. 그리고 성능시험장 내부에 실험수행시 필요한 상시 전기시설과 각종 부대장비 보관 및 실험 컨트롤을 위해 실험 준비/컨트롤실을 구축하였다.



그림 2.5.5 시험선로 안전시설 구축 및 선로점검

(2) 실험차량 목표속도 구현 실험 및 탈선유도 모사

(가) 실험차량

▪ 2차 연도 연구에서의 실험차량은 대차모듈단위(주강대차)로 선정하여 실험을 수행하였고, 3차 연도 연구에서는 용접대차 2대를 연결한 평판화차 실험차량을 제작하여 실험을 수행하였다. 4차 연도 연구에서는 실험차량의 중량확보 및 중량중심 조건 변경을 위한 컨테이터화차를 제작하였으며, 차량연결 효과를 고려하기 위한 평판화차와의 연결제작을 수행하였다.

▪ 실험차량의 주행연습 및 본실험을 위한 릴리즈/브레이크 시스템을 제작하였다. 릴리즈 시스템은 공압 장치을 이용하여 연결 핀을 제거하면 차량이 분리되는 시스템으로 원활한 차량의 분리가 가능한 장치를 설계/제작(공압장치, 펌프 및 스위치, 전원공급장치, 무선작동 리모컨 등)하였다. 브레이크 시스템은 공압장치을 이용하여 차륜에 마찰력을 가해 차량이 정지되는 시스템으로 실제대차의 제동장치를 그대로 활용하였으며, 제동을 위한 동력시스템 및 무선 리모컨을 통한 원격 제어가 가능도록 하였다. 또한, 제동시 차량의 안전한 제동 보장 및 과도한 제동거리를 갖지 않도록 제동력을 조절할 수 있도록 설계/제작하였다.



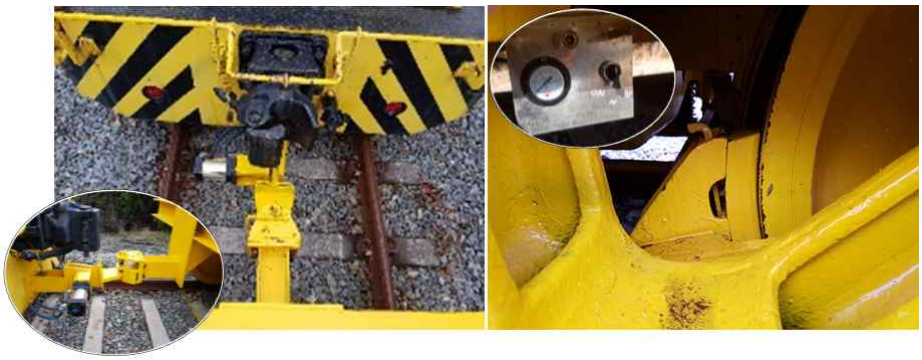
(a) 당초 대차모듈단위의 실험차량(주강대차)



(b) 화차단위 실험차량의 대차(용접대차)



(c) 화차단위 실험차량의 대차와 평판 연결



(d) 화차단위 실험차량의 견인/릴리즈 및 브레이크 시스템

그림 2.5.6 실험차량의 대차형식 변경 및 화차단위 확장

▪ 실험차량의 중량은 구조물과의 충돌시 충돌하중을 추정하는데 주요인자로서 최대한 정확히 측정할 필요가 있다. 유압잭 및 로드셀을 이용한 차량 중량측정 시스템을 제작하여 실험차량의 앞·뒤 대차프레임 중앙부를 인상하는 방법으로 중량을 측정하였다.



(a) 컨테이너화차 실험차량(중량증가 및 중량중심 조건 변경)



(b) 컨테이너화차+평판화차 실험차량(차량연결 효과 고려)

그림 2.5.7 실험차량의 중량조건 변경 및 차량연결 효과 고려

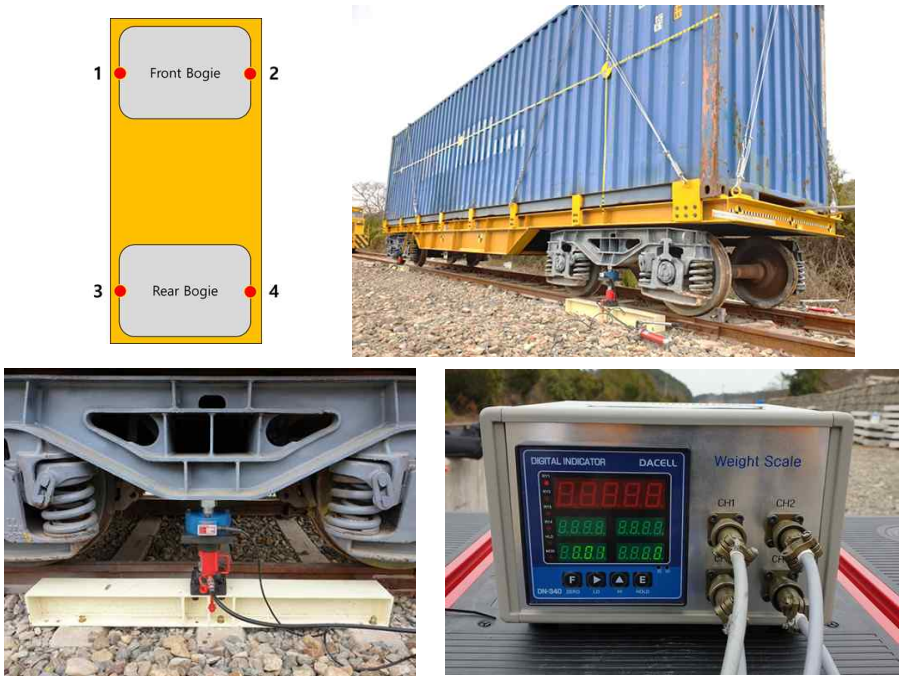


그림 2.5.8 실험차량의 중량측정

(나) 실험차량의 목표속도 구현

▪ 실험차량의 가속 방법은 본 실험에서는 구축할 수 있는 시험장 조건 및 비용 등의 여건을 고려하여 후방 가속(Push system) 방법을 채택하였다(모터카를 이용하여 실험차량의 후방에서 가속하고 목표속도에 도달하면 차량을 분리하여 실험차량이 관성 주행하는 방법).

▪ 후방 가속 방법은 그림 2.5.9와 같이 실험차량의 후방에서 동력차량을 이용하여 목표속도까지 가속하는 방법으로 가속/감속을 위한 충분한 주로가 필요하지만 다른 시스템에 비해 구축비용이 저렴하고 선로 선형의 영향 없이 활용이 가능한 방법이다. 후방 가속(Push system)에 의한 실험을 수행하기 위해서는 실험차량 및 동력차량의 가속시간 동안 일체화된 거동을 유도하고 목표속도 도달 시 분리시키기 위한 연결시스템(견인/해방)과 주행연습 및 실험·계측 구간의 통과 후 정지시키기 위한 제동시스템이 필요하다.

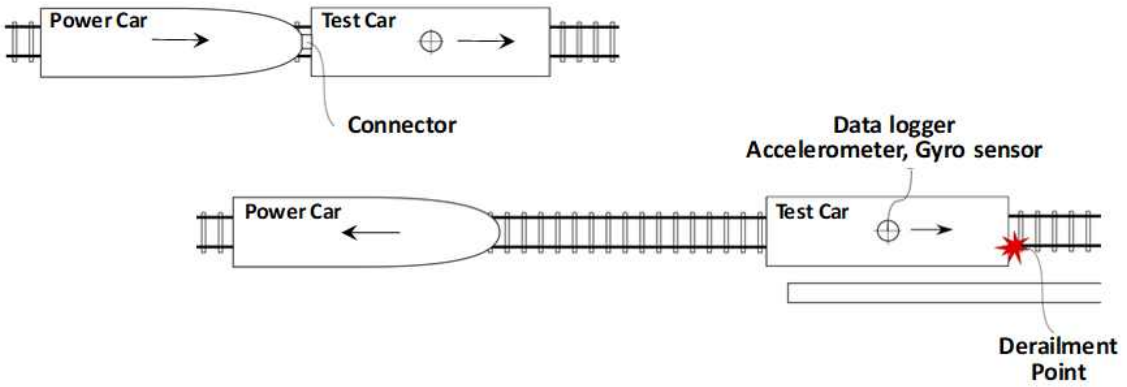


그림 2.5.9 실험차량 후방가속시스템 및 측정 개요도

▪ 가속구간은 가속연습을 통하여 목표속도 도달에 필요한 구간을 산정하며, 등속구간은 실험차량의 일정한 주행속도 확보 및 가속차량과 실험차량의 분리소요시간(작동인력의 인지반응시간 등 고려) 확보를 위해 필요한 구간을 산정한다. 또한, 감속구간은 동력차가 단독으로 정지하는데 필요한 구간으로 반복적인 연습을 통하여 목표속도별 구간을 선정한다. 여기서, 차량 분리 후 실험차량의 자체 감속으로 인해 분리지점에서의 속도와 탈선 목표지점의 속도가 차이를 보이게 되므로 탈선지점에서의 속도확보를 위해서는 목표 가속속도를 연습 실험으로부터 산정하였다.

▪ 동력차량(모터카)이 정지로부터 약 56 km/h의 가속을 하기 위해 필요한 가속거리는 약 480 m가 필요하였으며, 이후 정지하기까지 필요한 제동거리는 약 150 m로 산정되었다. 실험차량이 분리된 후 탈선지점까지 약 1~2 km/h가 감속된다. 이에 따라 50~55 km/h 목표속도의 실험을 위한 동력차량의 주행거리는 안전거리 등을 고려하여 650 m로 설정하였다. 또한, 32 km/h의 가속을 하기 위해 필요한 거리는 약 140 m, 제동거리는 90 m로 산정되었다. 실험차량이 분리된 후 탈선지점까지 약 2~3 km/h가 감속되었으며, 이에 따라 25~30 km/h 목표속도 의 실험을 위한 동력차량의 주행거리는 250 m로 설정하였다.

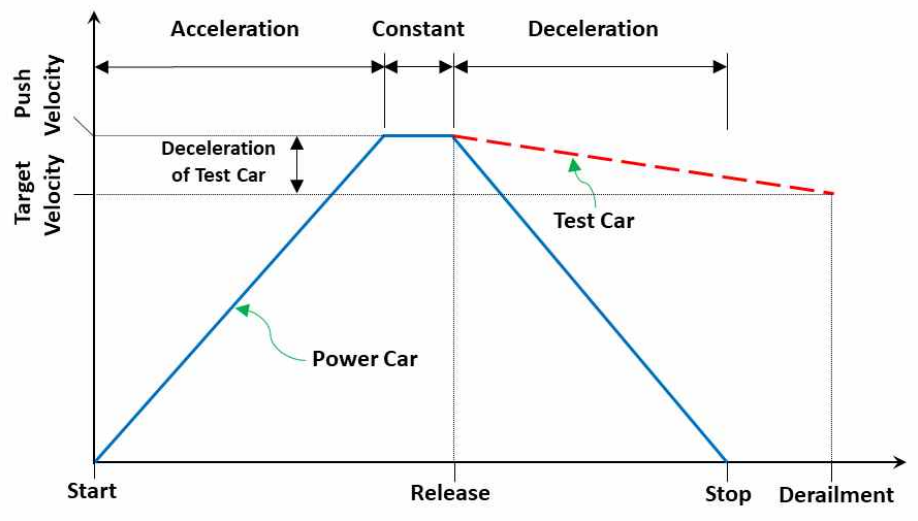


그림 2.5.10 견인동력차/실험차량 목표속도 테스트 개념

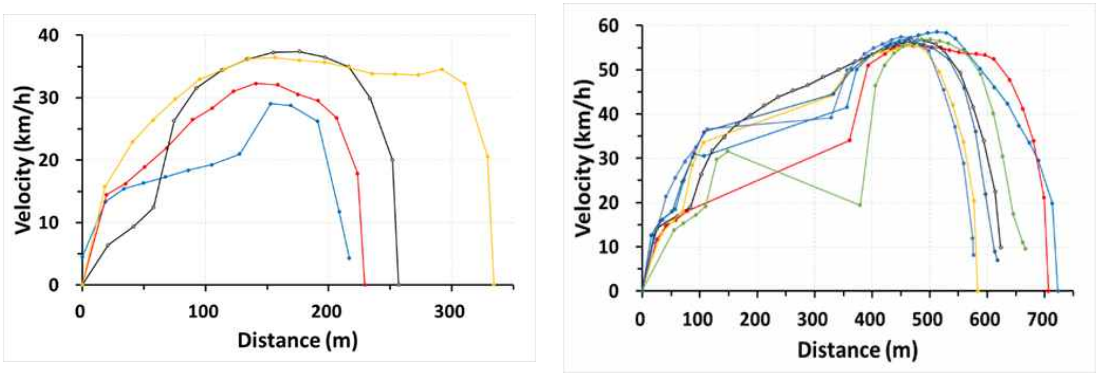


그림 2.5.11 견인동력차(모터카) 가속/제동거리 도출



그림 2.5.12 화차단위 실험차량의 목표속도 구현 실험

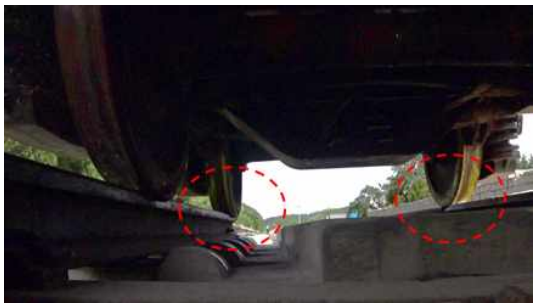
(다) 실험차량의 탈선유도 모사

▪ 본 탈선/충돌 실험을 위해서는 실험차량이 목표속도에 도달하고 동력차량(모터카)과 분리 후, 계측지점(콘크리트 궤도)을 통과할 때 실험차량이 의도된 위치에서 탈선되도록 유도해야한다. 철도차량 탈선사고 유형 중 빈번하게 일어나는 타고오름(Wheel-climbing) 탈선을 구현하기 위해 탈선유도장치를 사용하여 정상 주행하는 실험차량을 탈선시키고자 하였다.

▪ 본 연구에서는 궤간 축소 형식의 탈선유도시스템 적용을 통해 탈선 시 불필요한 동적거동을 최소화하고 타고오름 탈선의 재현성을 확보하였다. 그림 2.5.13은 화차단위 실험차량이 궤간축소 형식에 의한 탈선유도시스템을 통해 타고오름(Wheel-climbing) 탈선이 발생하는 영상을 보여준다. 좌측의 궤간축소 레일에 의해 좌측 차륜이 궤도 내측으로 가이드되며, 이에 따라 우측 차륜의 플랜지가 우측 레일에 저항받지 않고 삭정된 우측 레일의 두부를 타고오르며 탈선이 발생된다. 앞대차와 뒷대차의 차륜(4개) 모두 동일한 위치까지 가이드되며 탈선이 발생하여 탈선유도 재현성이 확보되었다.



(a) 궤간축소 탈선유도시스템



(b) 앞대차 전륜(1st Wheel-Front bogie)



(c) 앞대차 후륜(2nd Wheel-Front bogie)



(d) 뒷대차 전륜(3rd Wheel-Rear bogie)



(e) 뒷대차 후륜(4th Wheel-Rear bogie)

그림 2.5.13 탈선유도시스템에 의한 타고오름(Wheel-climbing) 탈선 모사

(3) 각·가속도 데이터 및 영상 데이터 취득 설계

▪ 본 실험에서 가장 중요한 계측 항목은 차량의 가속도·각속도 데이터 및 영상 데이터라고 할 수 있다. 차량 가속도 데이터를 통해 차량과 구조물 간의 충돌 하중을 산정할 수 있으며, 영상 데이터를 통해 차량의 거동 파악 및 각도, 변위 등을 산정할 수 있다. 궁극적으로 이 데이터를 통해 컴퓨터 시뮬레이션과의 검증자료로써 활용된다.

(가) 가속도 및 각속도 데이터

▪ 가속도 및 각속도 데이터를 취득하기 위한 실험장비로 3축 방향으로 구성된 가속도 및 각속도 센서와 이를 기록하기 위한 충돌시험용 데이터 로거를 구축

하였다. 본 실험에서 각·가속도 센서는 한 지점에서 종·횡·수직 3축에 대한 병진 및 회전 6자유도에 대해 측정할 수 있도록 별도의 센서마운트를 제작하였다. 센서마운트는 실험대차 기하중심 지점(센터프레임 상면)에 설치하였으며, 각·가속도의 계측을 위한 데이터로거는 실험차량의 적당한 위치에 고정되도록 탑재시켰다.

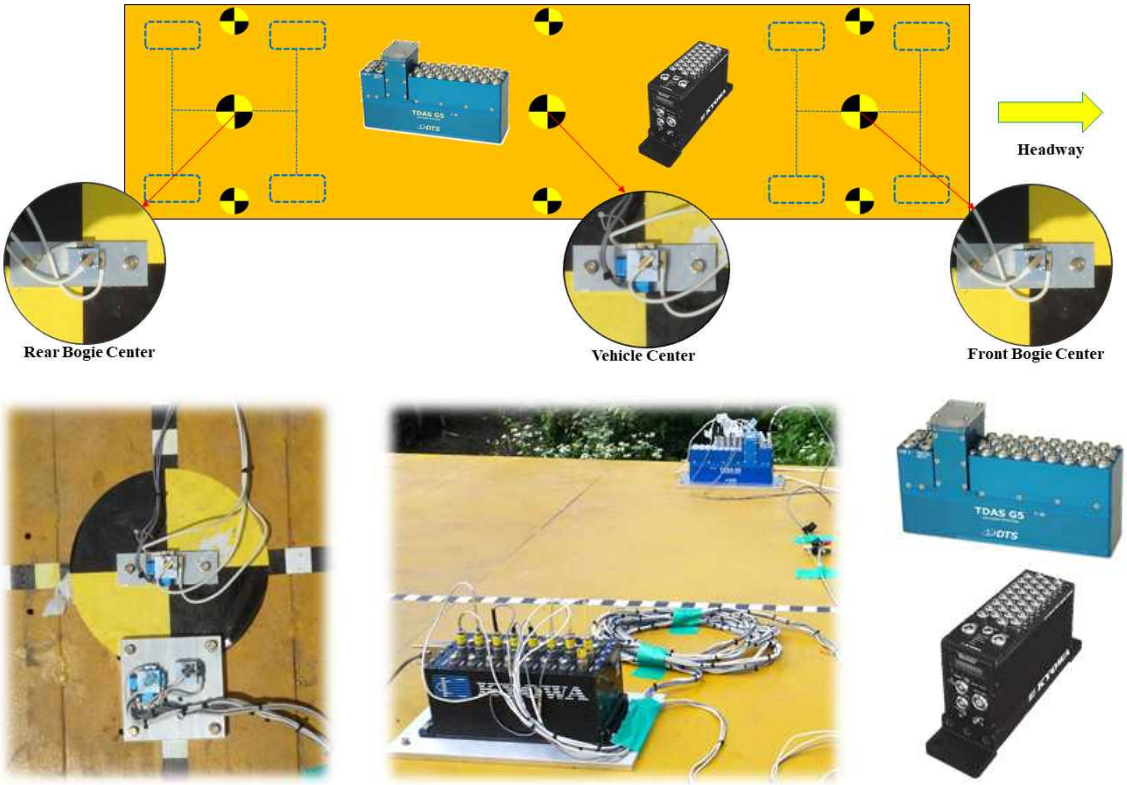


그림 2.5.14 각·가속도 센서 및 데이터로거 설치

(나) 속도 데이터

▪ 본 실험에서 사용된 속도측정시스템은 2쌍(4개)의 포토센서(Photosensor)를 1 m 간격으로 배치 후 실험차량에 부착한 막대가 통과하도록 그림 2.5.15와 같이 구축하였다. 센서로 측정된 데이터는 디스플레이 장치를 통하여 통과 속도로 변환되어 나타내도록 하였고, 데이터의 보존이 가능하여 데이터의 손실을 방지도록 하였다.

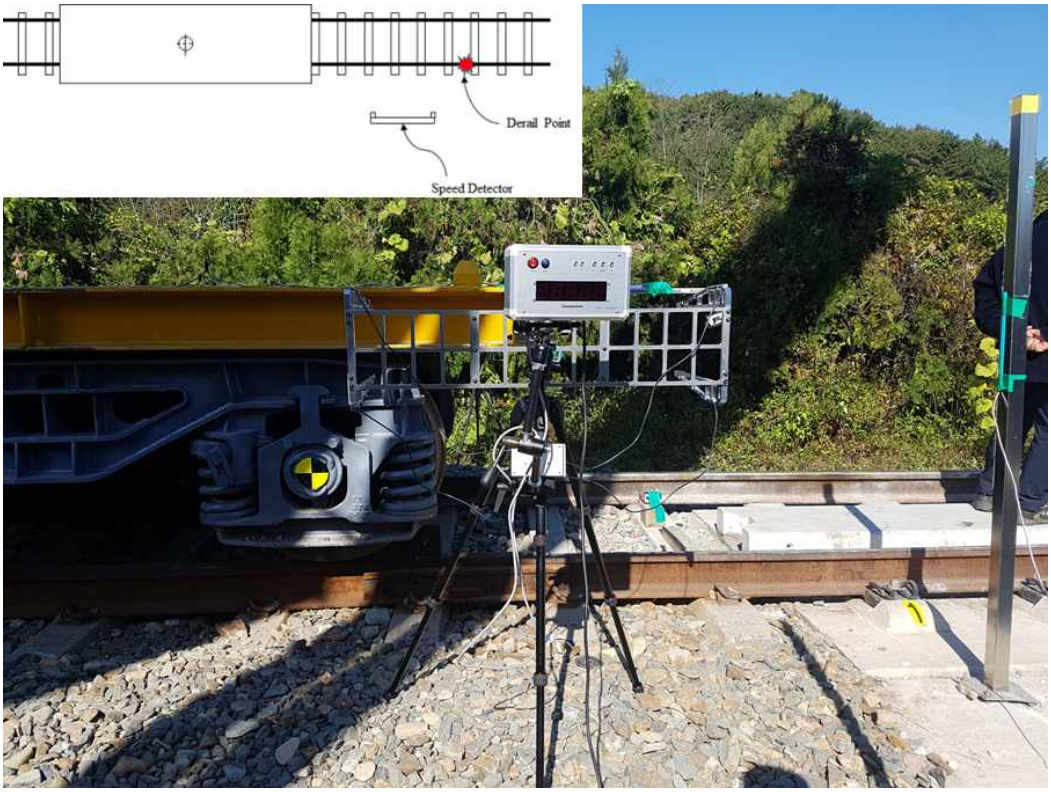


그림 2.5.15 실험차량 주행속도 측정을 위한 포토센서 속도측정시스템

(다) 영상 데이터



그림 2.5.16 고속카메라 설치

▪ 본 연구에서 고속카메라는 총 3대 구축되어 사실상 최소한으로 필수위치에만 설치하고, 고속카메라로 촬영이 어려운 위치는 일반캠이나 액션캠(Action Cam)을 활용하였다. 적정위치를 사전에 면밀히 검토하여 선정하였으며

500~1,000 fps의 촬영속도로 데이터를 취득하였다. 또한, 상부(Top view)에서의 거동 촬영을 위해 Pan-Tilt-Focus 컨트롤시스템을 구축하였다.

(라) 영상분석을 위한 마크

▪ 실험차량의 속도 등을 고속카메라로 측정시 차량 움직임을 측정할 수 있는 표시를 실험차량의 상부, 전면, 측면, 후면 등에 일정한 간격으로 표시하고 타깃마크를 차량에 부착한다. 이 마크를 통해 영상 후처리 시 실험차량 트래킹(Tracking) 분석이 이루어진다. 그리고 실험 전·후 차량의 거동, 시설물의 변형 정도를 확인·측정하기 위해 시설물 주위에 페인트나 락카, 테이프 등으로 표시할 수 있다.



그림 2.5.17 영상분석(Tracking)을 위한 타깃마크

(마) 고속카메라 및 데이터로거의 동시 트리거(Trigger)

▪ 여러 각도의 고속카메라를 동시에 구동할 때는 시간적 동기화가 필요하므로 허브(Hub) 및 동시 계측 신호를 위한 트리거(Trigger) 장치가 필요하다. 본 실험에서는 데이터로거에 의한 각·가속도 계측 시작 시간과 고속카메라 영상 데이터의 계측 시작 시간을 동일하게 하여 사후 분석을 용이하게 하기위해 고속카메라뿐만 아니라 데이터로거와의 동시 트리거를 구현하였다.

▪ 기술적으로 무선신호를 통한 동시 트리거의 구현이 가능하나 1회의 실험에 많은 비용과 노력이 소요되는 본 실험의 특성상 무선시스템의 오작동 가능성을 최대한 배제하고 물리적으로 확실한 테잎스위치(Tape switch)를 활용하였다. 고속카메라 3대에 대한 동시 트리거는 허브를 통해 연결된 테잎스위치를 궤도 측면에 설치된 지주에 설치하였고(그림 2.5.18-a), 실험차량에 탑재된 데이터로거에 대한 트리거는 실험차량 전면부에 봉을 고정하여 설치하였다(그림 2.5.18-b). 이 봉은 또한 속도측정시스템을 통과하는 역할을 한다. 실험차량이 탈선되기 직전에 지주와 봉이 물리적으로 접촉하여 테잎스위치 신호로 동시

트리거를 구현하도록 하였다. 이때 실험차량의 트리거 봉을 상당히 강하게 고정할 경우 대차의 탈선거동에 영향을 줄 수 있으므로 지주와 접촉 시 꺾어질 정도로 고정하였다.



(a) 고속카메라 트리거



(b) 데이터로거 트리거



그림 2.5.18 고속카메라 및 데이터로거 동시 트리거 시스템

(바) 데이터 취득 설계/구현

▪ 본 실험의 특수성으로 실험수행 사전에 필수적인 데이터 취득 설계가 면밀히 이루어져야하며, 이에 따른 필요 장비 및 시설, 각종설비, 소요인력 등의 구체적인 설계를 통해 실험수행 시 데이터 취득 실패의 가능성 및 안전사고의 발생 가능성을 최소화해야한다. 특히, 본 실험의 특성상 철도차량의 사고상황

을 재현하므로 실험인력에 대한 안전사고 발생 가능성을 최소화하는 측면이 데이터 취득 성공/실패에 대한 부분보다 중요할 수 있다.

▪ 본 실험의 데이터 취득 설계 및 구현을 그림 2.5.19에 도식화하여 나타내었다. 이에 대한 주요 설계사항을 아래에 설명하였으며, 이와 같은 설계에 의해 본 실험이 안전하고 적절히 구현되었으며 필요 데이터의 취득 또한 성공적으로 수행되었다.

① 전기설비 컨트롤실로부터 각종 장비 운용을 위한 구역(실험차량 데이터로거, 고속카메라 등)에 전기 공급 배선 - 실험영역이 100 m 이상이므로 임시컨트롤실 활용

② 실험차량 운행속도를 고려한 가속구간 및 제동구간 확보, 운행 시 해당 선로 주변 인근주민의 출입금지를 위한 안전시설 설치 및 안전요원 배치

③ 필요시 실험차량이 데이터 계측 영역 및 실험영역을 벗어나는 지점에 자갈더미, 차막이 등의 긴급 안전설비 설치

④ 실험차량의 각·가속도 데이터 취득을 위한 각·가속도 센서 및 내충격성이 확보된 데이터로거(Data logger)를 준비된 실험차량에 탑재

⑤ 실험차량에 탑재된 데이터로거의 데이터 저장 시점 신호를 발생시키기 위한 테이프스위치(Tape switch) 연결 및 실험차량 전면부에 설치(물리적 접촉에 의한 스위치 형식이 데이터 취득 실패의 가능성이 가장 적음)

⑥ 실험차량의 영상 데이터 취득을 위한 고속카메라 및 액션캠(Action cam)을 촬영목표, 초점, 화각 등을 고려하여 적정 위치(측면, 전면, 후면, 상면 등)에 설치

⑦ 여러 대의 고속카메라를 동시 구동하기 위한 허브(Hub) 연결 및 고속카메라의 데이터 저장 시점 신호를 발생시키기 위한 테이프스위치 연결, 실험차량의 스위치와 접촉하는 지주에 설치(시간적 동기화 - 동시트리거 구현)

⑧ 의도된 실험차량의 탈선지점에 탈선유도장치 또는 탈선유도시스템 설치

⑨ 실험차량의 탈선직전 주행속도를 측정하기 위한 속도측정시스템 설치(일정 거리를 갖는 센서가 물체의 통과시간을 측정하는 방식)

⑩ 동력차량과 실험차량의 연결을 통해 가속구간 출발지점에 위치 및 대기

⑪ 동력차량 운전사와 안전요원, 실험인력 간의 의사소통 후 출발 및 가속

⑫ 동력차량의 목표속도 도달 및 등속구간 위치 확인 후 동력차량과 실험차

량의 분리, 이와 동시에 동력차량은 제동

⑬ 실험차량이 정지한 후 데이터로거 및 고속카메라 등의 데이터 저장

⑭ 안전 확인 및 장비·시설 등 철수



그림 2.5.19 각·가속도 데이터 및 영상 데이터 취득 설계 수행 및 구현

다. 계측시스템으로부터 도출한 데이터처리 기법 연구 및 분석 기술 개발

(1) 데이터 처리 기법

(가) 실물차량 충돌시험 데이터 후처리 관련 연구 및 기준

▪ 차량과 충돌하는 방호시설의 설계를 위해서는 적정 설계 충돌하중을 산정해야한다. 실대형 차량 충돌실험을 통한 충돌하중 산정 연구는 자동차 충돌분야(도로안전시설 설계)에서 주로 이루어져왔으며, 1989년 미국(TTI, Texas Transportation Institute)에서 수행한 실물 자동차와 방호벽 충돌실험을 통해 실물차량 질량중심 위치에서의 가속도(Acceleration)와 차량질량(Mass)의 곱이 로드셀(Load cell)에 의한 하중과 유사함을 밝혔다. 또한 실험에 의해 취득한 가속도 원시데이터(Raw data)를 50 msec 간격의 이동평균법(Moving Average Method)을 적용하여 데이터 평활화 과정을 거치면 구조물 설계에 필요한 유사적정하중으로 간주된다고 제시하고 있다. 그러나 트레일러와 같이 차량길이가 길 경우 질량 참여율의 변동으로 가속도 데이터에 의한 충돌하중 크기에 차이가 발생하여 과대평가될 수 있다.

▪ 현재 철도차량과 구조물과의 충돌시험에 대한 기준은 정립되지 않은 상황이므로, 국내·외에서 적용하는 도로안전시설의 실물차량 충돌시험에 대한 기준을 참고하였다. 우리나라의 도로안전시설의 성능평가기준인 도로안전시설 설치 및 관리지침의 탑승자 보호성능 평가기준은 유럽 CEN 기준을 준용하였으나 필터링 기준은 미국 NCHRP 350 및 MESH에서 적용하는 SAE J211을 준용하고 있다.

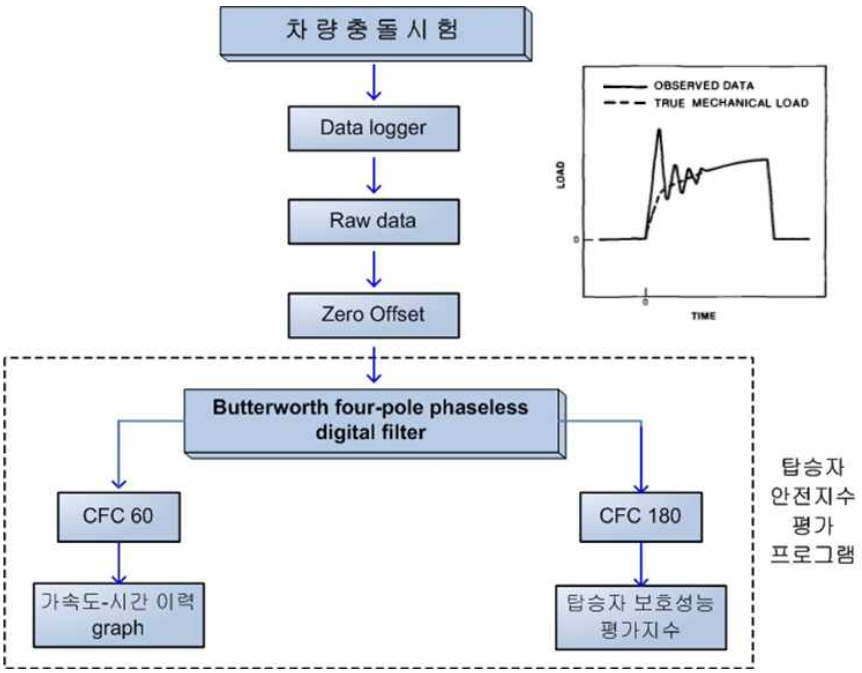


그림 2.5.20 도로안전시설 실물차량 충돌시험 데이터 처리 체계

▪ 유럽(ISO 6487)과 미국(SAE J211) 기준 모두 CFC 필터를 사용하고 필터링 알고리즘으로 데이터 채널 성능요건을 만족하는 어떤 것도 가능하다고 규정하고 있으며 Butterworth four-pole phaseless digital filter를 권장하고 있다. 미국의 신차성능평가기준(NCAP)의 경우 또한 SAE 211을 권장하고 있으며, 차량 가속도, 로드셀 벽체에 대한 하중과 안전벨트 하중에 대한 필터링은 CFC60으로 한다. 또한, 차량 충돌실험 데이터의 영점보정은 차량과 시설과의 충돌 전에 계측된 데이터와 그 평균값을 활용하여 이루어지고 있으나 영점보정에 사용되는 충돌전의 데이터 수에 대한 명확한 정의는 없다. SAE J211에는 영점보정에 대하여 소프트웨어를 사용하여 조정 하도록 언급되어있지만 구체적인 방법은 제시되어 있지 않다.

표 2.5.2 필터 기준의 비교

필터링기준 / 항목	SAE J211 [w_d= 2π·CFC·(2.0833)]	ISO 6487 [w_d= 2π·CFC·(2.0775)]
데이터 처리	CFC 180	CFC 180
데이터 기록	CFC 60	CFC 60
필터링 알고리즘	데이터 채널 성능요건 부합하는 것	데이터 채널 성능요건 부합하는 것
	Butterworth four-pole phaseless digital filter 권장	Butterworth four-pole phaseless digital filter 권장

(나) 자유낙하(Drop weight test) 실험을 통한 충돌하중 산정방법 검증

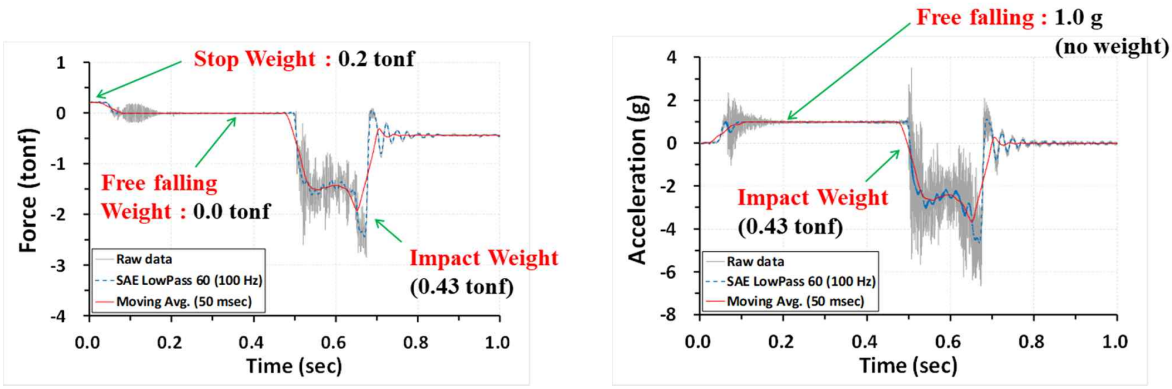
▪ 본 연구에서는 실물차량 충돌시험 데이터 후처리 관련 연구 및 기준 분석을 수행하여, 질량을 갖는 움직이는 물체의 가속도 데이터를 이용하여 하중을 산정하고 이를 로드셀에 의한 하중과 비교 · 검증하기 위해 다른 영향인자가 최대한 반영되지 않는 자유낙하(Drop test) 실험을 수행하였다.

▪ 그림 2.5.21과 같이 430 kg의 질량을 갖는 낙하 추를 제작하였으며 중심위치에 가속도 센서를 설치하였다. 낙하 추 하부의 충돌 위치에는 200 kg의 질량을 갖는 직경 920 mm의 차륜일부 형상을 모형화한 강재를 부착하였으며, 낙하추와 차륜모형 사이에 로드셀(Load cell, 2ea)을 설치하였다. 차륜모형과 충돌하는 부재가 단단할(Rigid) 경우 데이터가 매우 짧은 시간에 취득되므로 완충효과가 있는 퀘도자갈을 사용하였다. 실험 케이스는 낙하높이 0.5 m에 대해 2회, 1 m에 대해 8회 수행하였으며 충돌부 자갈을 재배치 또는 교체하여 실험을 수행하였다.

▪ 그림 2.5.22는 낙하높이 1.0 m일 때의 대표적인 경우로, 로드셀에 의한 시간-하중 데이터와 가속도 센서에 의한 시간-가속도 데이터를 나타낸 것이다. 필터링은 CFC60 (100Hz)과 이동평균법(Moving avg.-50msec)을 적용한 것을 비교하였다.



그림 2.5.21 충돌하중 산정방법 검증을 위한 자유낙하(Drop test) 실험



(a) 로드셀 데이터 (b) 가속도 센서 데이터

그림 2.5.22 로드셀과 가속도 데이터 비교

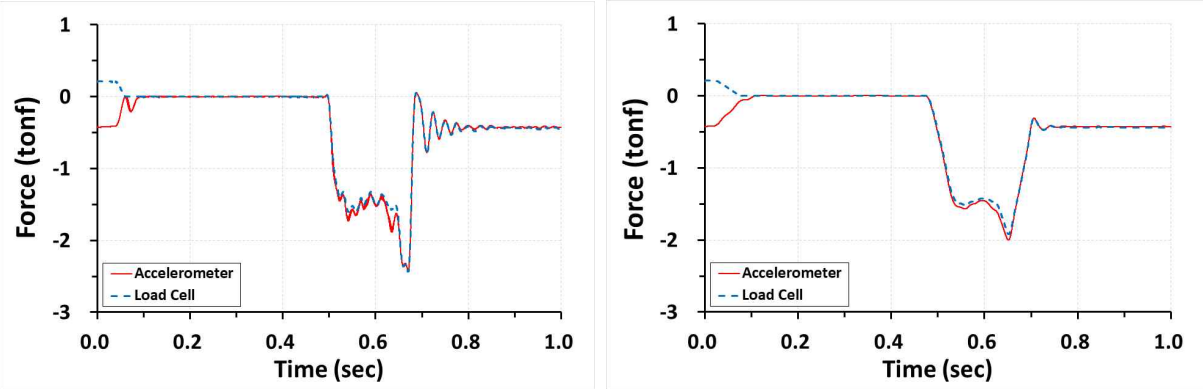
▪ 로드셀의 하중 데이터의 경우, 낙하 추가 낙하대기 상태일 때(0.0 sec) 로드셀에 매달려있는 차륜모형(200 kg)에 의해 0.2 tonf의 하중이 계측된 것을 볼 수 있고 자유낙하 시점에는 하중이 0.0 tonf으로 수렴한다. 약 0.45 sec에 낙하 추의 모형과 자갈의 충돌이 발생되며 정지상태(0.8 sec 이후)에서는 로드셀이 연결된 상부 낙하 추(430 kg)의 중량 0.45 tonf의 하중이 계측되고 있는 것을 볼 수 있다.

▪ 충돌하중 최대 Peak값은 필터링 방법에 따라 차이를 보이며, CFC60 필터링에 비해 50 msec 이동평균법에 의한 데이터가 평활화 정도가 크게 나타났다. 총 중량 0.656 tonf(낙하 추+로드셀+차륜모형)의 1.0 높이 낙하에 의해 발생된 로드셀의 최대 충돌하중은, CFC60 필터링을 적용했을 때 2.44 tonf, 50 msec 이동평균법을 적용했을 때 1.92 tonf로 약 0.52 tonf의 차이가 발생한다.

▪ 가속도 데이터의 경우, 낙하 추가 낙하대기 상태일 때(0.0 sec) 정지해 있으므로 0.0g의 가속도가 계측된 것을 볼 수 있고 자유낙하 시점에는 중력가속도인 1.0g가 계측되었다. 약 0.45 sec에 낙하 추의 모형과 자갈의 충돌이 발생되어 가속도가 발생되고 정

지상태(0.8 sec 이후)에서는 다시 0.0g의 가속도로 수렴하고 있는 것을 볼 수 있다.

▪ 충돌가속도 최대 Peak값 또한 필터링 방법에 따라 차이를 보이며, CFC60 필터링을 적용했을 때 4.64g, 50 msec 이동평균법을 적용했을 때 3.67g로 약 0.97g의 가속도 차이가 발생한다.



(a) CFC60 필터링 적용 (b) 50 msec 이동평균법 적용

그림 2.5.23 로드셀 하중과 가속도 데이터에 의한 하중 비교

▪ 그림 2.5.23은 가속도 데이터에 낙하물체의 총 질량 656 kg(낙하 추+로드셀+차륜모형)을 고려하여 하중으로 나타내고 로드셀 하중과 비교하여 나타낸 것이다. 가속도 데이터에 의한 충돌하중 산정이 로드셀 충돌하중과 상당히 유사한 것으로 확인할 수 있다. 최대 충돌하중 값의 차이는 CFC60 필터링 적용 시 약 0.02 tonf(0.78%), 50 msec 이동평균법 적용 시 약 0.08 tonf(4.3%)로 미미하게 나타났다. 표 2.5.3에 각 실험케이스별 로드셀 및 가속도 데이터의 후처리에 따른 최댓값을 나타내었다.

▪ 본 낙하실험을 통해 모든 CASE에 대한 가속도 데이터로부터 산정한 충돌하중과 로드셀에 의한 충돌하중을 비교하여 총 10개의 CASE로부터 가속도 데이터에 의한 충돌하중 산정방법이 타당함을 검증하였다.

표 2.5.3 데이터 후처리에 따른 낙하실험 결과

CASE	Drop Height (m)	Load Cell (Max. Impact Force, kN)			Accelerometer (Max. Acceleration, g)		
		Raw data	CFC60	M.A.(50ms)	Raw data	CFC60	M.A.(50ms)
1	0.5	24.46	21.55	16.62	4.55	4.03	2.88
2	0.5	25.02	19.20	16.47	5.89	3.58	2.88
3	1.0	28.03	23.89	18.80	6.67	4.64	3.67
4	1.0	35.04	27.00	23.99	8.62	5.37	4.67
5	1.0	28.09	22.55	19.14	6.54	4.40	3.72
6	1.0	32.02	24.59	22.46	8.10	4.79	4.28
7	1.0	37.17	27.51	23.89	10.26	5.68	4.71
8	1.0	39.74	31.51	22.70	9.94	6.71	5.17
9	1.0	32.61	23.83	22.25	7.81	4.66	4.28
10	1.0	39.26	26.27	22.49	9.43	5.25	4.32

▪ 따라서, 계측된 차량 가속도 데이터를 통해 방호시설과의 충돌하중을 산정해낼 수 있으나, 필터링 적용방법에 따라 충돌하중 Peak값의 차이가 발생하므로 설계하중 측면에서 어떠한 필터링 기준을 적용할 것인지에 따라 방호시설의 설계단면에 차이가 발생될 수 있다. 1989년 미국에서 수행된 실물차량 충돌실험 연구를 통해 제시된 50 msec 이동평균법에 비해 도로안전시설 실물차량 충돌시험 기준인 CFC60 필터링 방법이 Peak값이 상대적으로 크게 산정되어 보수적인 설계가 될 수는 있다.

▪ 그림 2.5.24는 CFC 필터링 방법에서 Limit 주파수 변화에 따른 50 msec 이동평균법에 의한 데이터 평활화 수준을 파악한 그래프이다. CFC 필터링 방법에서 Limit 주파수 10~20 Hz수준에서 50 msec 이동평균법 수준과 유사한 것을 볼 수 있으며, Peak값은 10 Hz의 경우와 유사하다. 그러나 필터링에 의한 평활화가 과도할수록 데이터의 시간적 왜곡이 발생하게 되는데, 이동평균법에 비해 CFC 필터링방법에 의한 왜곡이 다소 적은 것을 확인할 수 있다(그림 2.5.25).

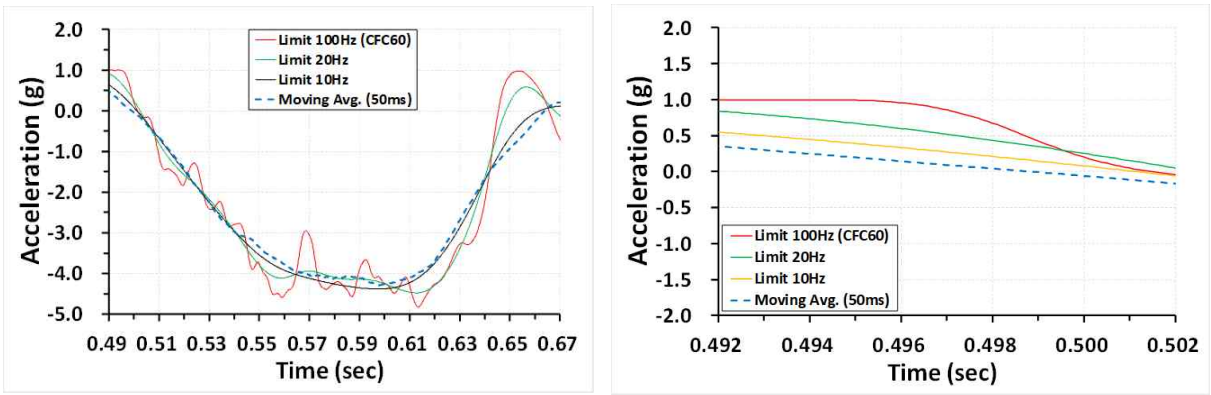


그림 2.5.24 50 msec 이동평균법과 CFC 필터링 수준 비교

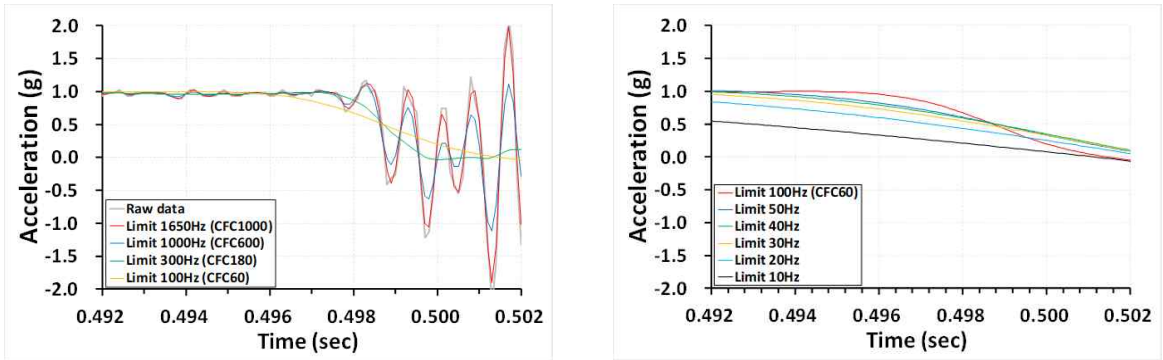


그림 2.5.25 CFC 필터링 수준에 따른 데이터의 왜곡

(2) 데이터 분석 기술

▪ 열차의 탈선이 발생되면 일반적인 차륜과 레일 간의 상호작용(Wheel/Rail interaction)이 사라지고 다양한 접촉/충돌(기어박스-레일, 차륜-체결장치, 차륜-침목, 차륜-레일 등)에 의해 탈선 후 차량의 거동에 영향을 미친다. 탈선 후 또는 1차 접촉/충돌 후 열차 거동에 미치는 영향을 분석하는 것은 방호시설 측면에서 최대 충돌하중을 산정하고 방호 효과를 평가하기 위해 매우 중요한 사항이라 할 수 있다.

▪ 본 연구의 실대형 탈선/충돌 실험을 통해 탈선 후 차륜의 초기 충돌거동(체결장치, 콘크리트 험프) 분석 및 궤간 내 일탈방호시설의 영향 분석을 취득된 각·가속도 데이터와 고속카메라 등의 영상 데이터를 이용하여 수행하였다. 수행한 실험케이스는 다음 표 2.5.4와 같다.

표 2.5.4 실대형 탈선/충돌 실험 CASE

연번	실험일자	실험차량	실험속도(km/h)	실험조건
CASE 1	17.09.19.	주강대차 [4.70 tonf]	13.88	· No DCP · 탈선유도장치
CASE 2			27.07	
CASE 3	17.11.07.	주강대차 [4.17 tonf]	28.08	· No DCP · 탈선유도장치
CASE 4			55.05	
CASE 5	18.09.18.	평판화차(용접대차) [13.03 tonf]	52.96	· No DCP · 탈선유도시스템(궤간축소)
CASE 6	18.06.15.	평판화차(용접대차) [13.03 tonf]	51.16	· DCP(초도시작품) · 탈선유도시스템(궤간축소)
CASE 7	18.10.30.	평판화차(용접대차) [13.03 tonf]	48.28	· DCP(개선품) · 탈선유도시스템(궤간축소)
CASE 8	19.03.19.	컨테이너화차 [17.32 tonf]	46.69	· DCP(시제품) · 탈선유도시스템(궤간축소)
CASE 9	19.06.19.	컨테이너화차 [17.32 tonf]	47.48	· DCP(시제품) · 탈선유도시스템(궤간축소)
CASE 10	19.07.10.	컨테이너화차+평판화차 [17.32+13.03 tonf]	45.03	· DCP(시제품) · 탈선유도시스템(궤간축소)
CASE 11	19.11.12.	컨테이너화차+평판화차 [17.32+13.03 tonf]	48.89	· No DCP · 탈선유도시스템(궤간축소) · TCL층 측면 공간 실제화

(가) 대차모듈 실험

① 대차 하부 브레이크 장치의 영향

▪ CASE 1의 목표속도는 10~15 km/h로 계획하였으며 실제 탈선직전의 속도는 13.88 km/h로 계측되었다. 개발된 탈선유도장치에 의해 차륜 플랜지가 레일두부 상면을 타고오르며 횡력이 작용하여 탈선이 유발되었다. 낙하 후 첫 번째 충돌은 전륜 차륜과 레일 저면의 충돌이었으며, 이후 레일 체결장치 클램프와 충돌하면서 후륜 차륜이 레일 체결장치 앵커부와 충돌하였다. 이후 콘크리트 궤도의 침목부 Hump와 충돌하면서 콘크리트의 파손이 발생하고 궤도 외측으로 점점 벗어나는 거동을 나타내었다. 화차대차 하부의 제동장치 프레임 구조상 탈선된 이후 주행레일의 두부 측면과 접촉하면서 정지하는 상황이 발생하였다.



그림 2.5.26 대차 하부의 제동장치 프레임과 레일의 접촉(CASE 1)

▪ CASE 2의 목표속도는 25~30 km/h로 계획하였으며 실제 탈선직전의 속도는 27.07 km/h로 계측되었다. 개발된 탈선유도장치에 의해 차륜 플랜지가 레일두부 상면을 타고오르며 횡력이 작용하여 탈선이 유발되었다. CASE 1(13.88 km/h)의 경우와 비교하여 탈선유도장치에 의해 다소 Jumping 현상이 발생하였다. 낙하 후 첫 번째 충돌은 전륜 차륜과 레일 체결장치의 클램프 및 레일 저면과의 발생하였으며 13.88 km/h 속도일 때에 비해 다소 큰 Bounding 현상을 보인다. 이후 콘크리트 궤도의 침목부 Hump와 충돌하면서 콘크리트의 파손을 유발시키며 궤도 외측으로 점점 벗어나는 거동을 나타내었다.

▪ 또한, 마찬가지로 실험대차 하부의 제동장치 프레임이 주행레일의 두부 측면과 접촉하였으며, 13.88 km/h의 속도와 비교하여 상당한 거리를 진행하면서 정지하였다(탈선지점으로부터 약 20 m). 만약 고속주행시 횡방향 가속도 및 차량 중량이 클 경우에는 대차 하부 프레임의 파손으로 가이드 효과가 미미할 수도 있으나, 본 실험조건 하에서 탈선된 실험차량이 대차 하부 프레임에 의해 횡방향으로의 과도한 일탈을 제어해주는 역할을 하는 것으로 나타났다(그림 2.5.27).



그림 2.5.27 대차 하부의 프레임의 횡방향 일탈 가이드 역할(CASE 2)

② 침목 험프부와 주행레일의 구속 효과

▪ 영국의 Network Rail에서는 궤도 외측 벽 형태의 일탈방호시설(DCP type 3, 현재 국내에도 적용)을 적용할 때, 탈선된 열차의 내측 차륜이 주행레일에 의해 1차적으로 가이드(1차 충격완화)된 이후 벗어나는 열차를 벽체가 차축높이에서 방호하는 개념으로 설계·설치하도록 제시하고 있다.

▪ CASE 3에서는 이와 같은 개념의 현상을 모사하기 위해서 대차 하부 프레임을 제거하고 실험을 수행하였다. 목표속도는 CASE 2와 유사한 조건으로 25~30 km/h로 계획하였으며 실제 탈선직전의 속도는 28.08 km/h로 계측되었다. 탈선 이후 내측 차륜이 궤도 외측 횡방향으로 진행하나 콘크리트 궤도 침목부 Hump와 연속적으로 충돌하며 진행하며, 레일과 차륜이 접촉하지 않고 궤도 내측으로 복귀하는 거동을 보였다(그림 2.5.28)

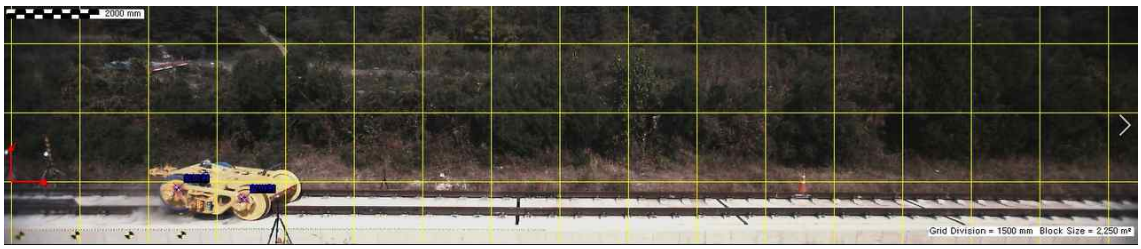


그림 2.5.28 실험대차의 탈선 후 궤광구성품과의 충돌거동 영상(CASE 3)

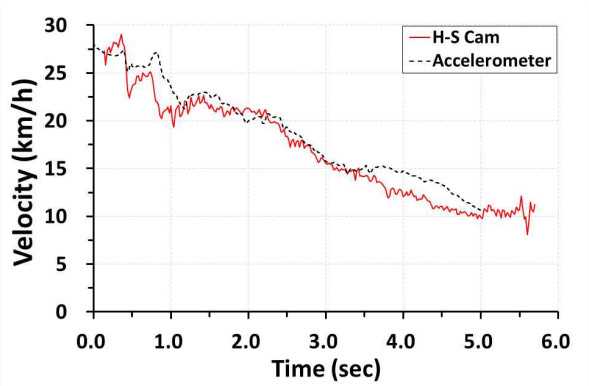
▪ 계측된 실험차량의 가속도 데이터를 분석하기 위하여 원시데이터(Raw data)에 50 msec 이동평균법(Moving average method)을 적용하였으며, 취득된 가속도 데이터의 신뢰성을 검증하기 위하여 고속카메라의 측면 Wide 영상 데이터로부터 추출한 시간에 따른 실험차량의 속도 및 이동거리 데이터와 비교하였다.

▪ 그림 2.5.29와 같이 시간에 따른 속도 및 이동거리 데이터가 전반적으로 매우 유사한 것을 볼 수 있다. 영상 데이터에서 평면 영상의 왜곡(Wide Lens)과 실험차량의 3차원 거동오차(원근) 등의 원인으로 다소 차이가 나타날 수 있으며, 가속도 데이터 또한 제거되지 않은 미미한 노이즈(Noise) 값이 적분에 의해 무시할 수 없는 오차 값으로 누적되어 상대적으로 짧은 구간의 시간이 아닌 지속되는 충돌 이후의 시간 영역(약 2 sec 이후)에서는 속도(1차 적분) 및 변위(2차 적분) 데이터의 누적 오차가 커질 수 있다.

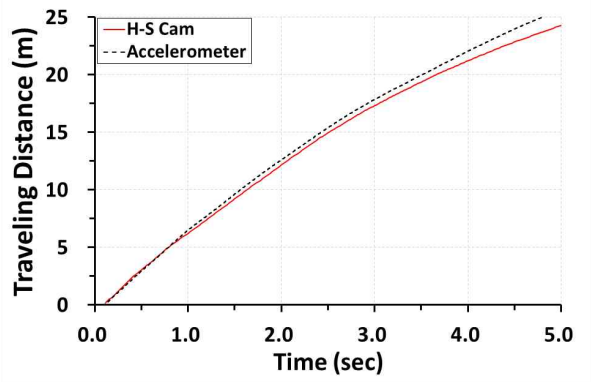
▪ 그러나 본 실험데이터의 비교·분석을 통해 영상 데이터의 분석만으로도 실험차량의 거동을 충분한 정확도로 예측할 수 있음을 보였다.



(a) 영상 Trace 분석



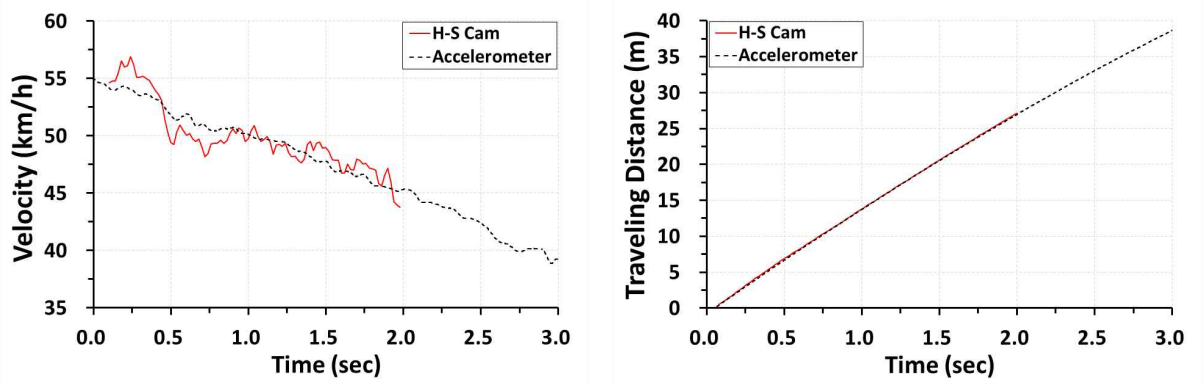
(b) Velocity



(c) Distance

그림 2.5.29 가속도와 영상 데이터를 이용한 속도 및 이동거리 비교(CASE 3)

▪ CASE 4에서는 탈선된 열차의 내측 차륜이 주행레일에 의해 가이드되는 거동을 모사하기 위해 목표속도를 50~55 km/h로 계획하였으며 실제 탈선직전의 속도는 55.05 km/h로 계측되었다. 그림 2.5.30은 취득된 가속도 데이터와 고속카메라 영상 데이터로부터 추출한 시간에 따른 실험차량의 속도 및 이동거리를 비교한 것으로, 시간에 따른 속도 및 이동거리 데이터가 매우 유사한 경향을 나타내고 있다.



(a) Velocity (b) Distance

그림 2.5.30 가속도와 영상 데이터를 이용한 속도 및 이동거리 비교(CASE 4)

▪ 탈선 후 최초 충돌 이후에 실험차량은 궤도 횡방향의 외측으로 이동하여 차륜이 침목부 Hump 상으로 주행하여 연속적으로 충돌한다. Hump와의 충돌로 인한 Bounding 현상은 28.08 km/h(CASE 3)의 속도보다 크며, 1.780 sec에 차륜 플랜지가 주행레일 두부측면과 충돌한다(그림 2.5.31). 이후 실험차량의 Rolling(진행방향 축에 대한 회전)이 과도해지면서 1.910 sec에 대차의 일부분이 벽체와 충돌한다(그림 2.5.32). 그림 2.5.33은 CASE 3과 탈선 후 거동 궤적을 비교하여 나타낸 것이다.

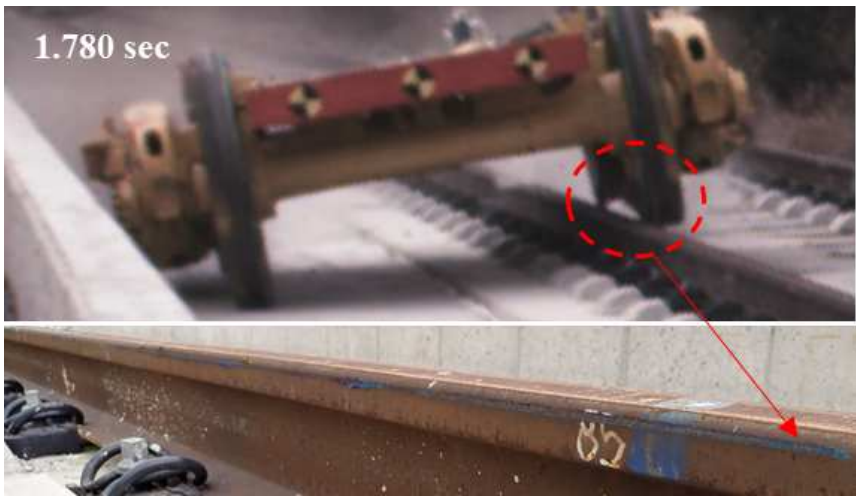
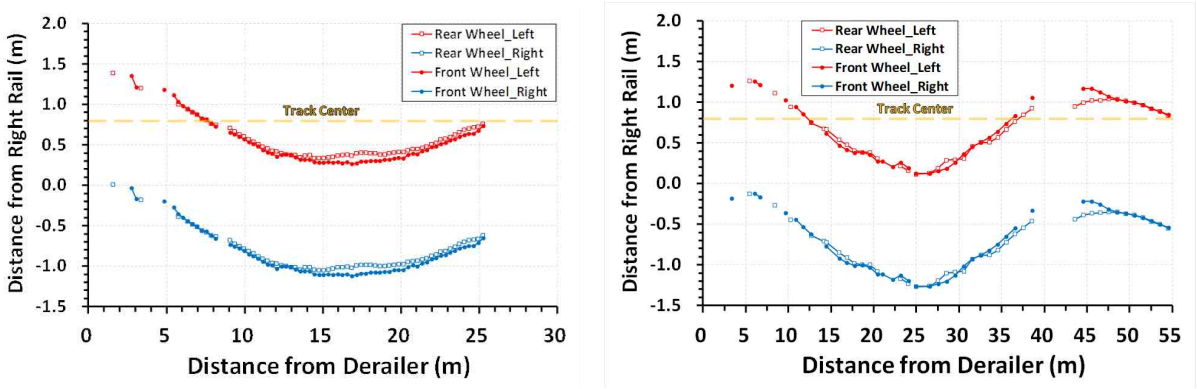


그림 2.5.31 차륜과 레일의 충돌시점 영상 및 레일의 손상(CASE 4)



그림 2.5.32 대차일부와 벽체의 충돌시점 영상 및 벽체의 손상(CASE 4)



(a) CASE 3(28.08 km/h) (b) CASE 4(55.05 km/h)

그림 2.5.33 실험차량의 탈선 후 궤적 비교(CASE 3, 4)

▪ 그림 2.5.34는 레일과 벽체와의 충돌시점에서의 가속도 데이터를 나타낸 것으로, 종방향과 수직방향 가속도에 비해 횡방향 가속도가 크게 나타난 것으로 보아 횡방향으로의 관성력이 지배적인 시점이었던 것으로 판단된다.

▪ 영국의 일탈방호시설 개념과 같이 차륜과 레일이 1차적으로 충돌한 것으로 볼 때 횡방향 가속도는 약 1.17g(11.51 m/s^2)로써 횡방향 충돌하중을 23~48 kN(0.5mass~1.0mass 반영 가정)로 유추해볼 수 있으며, 이후 벽체와 충돌할 때의 횡방향 가속도는 약 0.75g(7.36 m/s^2)로써 충돌하중을 15~31 kN(0.5mass~1.0mass 반영 가정)로 유추해 볼 수 있다. 따라서, 주행레일에 의해 1차 가이드된 후 벽체에 작용하는 충돌하중은 약 36% 감소되는 것으로 분석되었다.

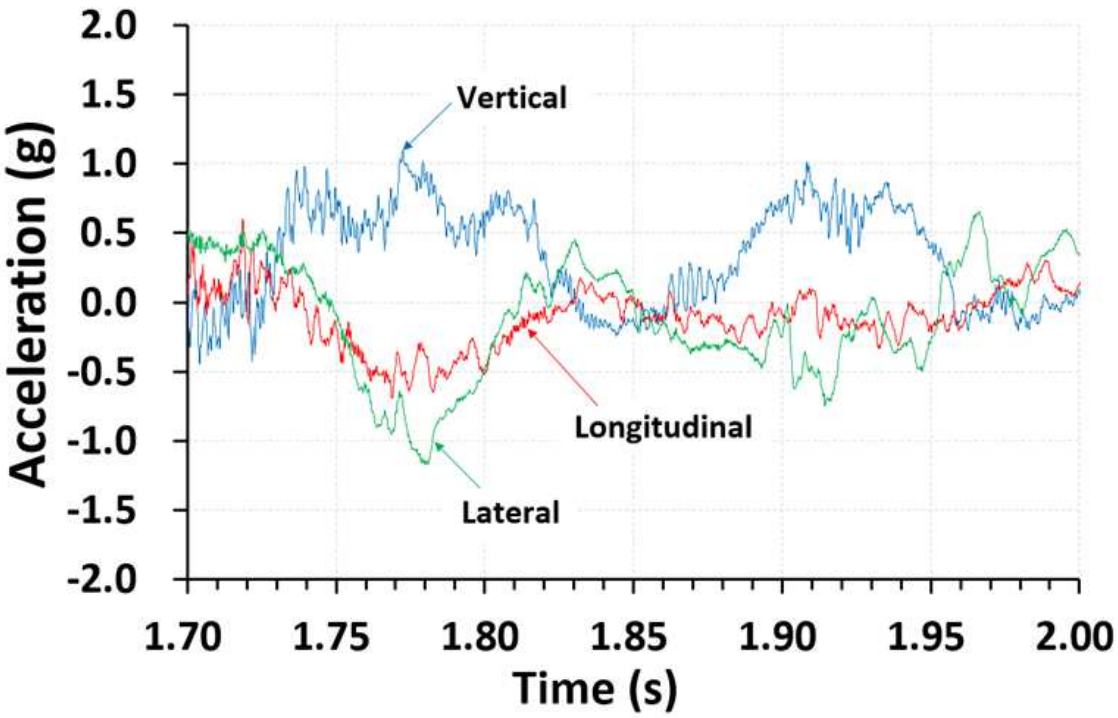


그림 2.5.34 실험차량과 레일 및 벽체와의 충돌시점에서의 가속도 데이터(CASE 4)

(나) 평판화차 실험

▪ 대차모듈 실험결과의 분석을 통해 대차모듈단위의 추가적 실험보다는 실험케이스의 축소를 감안하더라도 화차단위의 실험이 더 의미 있는 실험결과를 도출할 수 있을 것으로 판단되었다. 이에 이후 실대형 탈선/충돌 실험에서는 화차단위의 실험차량과 방호시설간의 충돌실험을 수행하였다.

① 궤간 내 일탈방호시설(DCP) 미설치 시 거동 분석

▪ CASE 5는 일탈방호시설(DCP)이 없는 조건에서의 탈선/충돌 실험을 수행하였으며, 실제 탈선직전의 주행속도는 52.96 km/h로 측정되었다. 개발된 궤간 축소에 의한 탈선 유도시스템에 의해 차륜 플랜지가 레일두부 상면을 타고오르는 타고오름(Wheel-climbing) 탈선이 유발되었다.

▪ 낙하 후 첫 번째 충돌은 차륜(우)이 콘크리트 궤도의 외측 침목부 험프(Hump)와 충돌하면서 콘크리트의 파손이 발생하고 궤도 외측으로 점점 벗어나는 거동을 나타내었다. 이후 내측(좌) 차륜이 우측 주행레일 위치로 접근하면서 내측 험프와 연속적인 충돌이 발생하며 횡방향 거동이 억제된다. 내측 차륜과 내측 험프와 연속적으로 충돌하며 주행레일과도 일부분 접촉하여 차륜이 가이드되는 거동을 보이며 궤도 내측으로 복귀하나, 또다시 외측차륜은 외측 험프와 내측차륜은 반대편 내측 험프와 충돌하면서 궤도 외측으로 벗어나는 거동을 보여 비교적 넓은 영역(선로중심으로부터 약 2.7 m)에서의 동적인 일탈거동이 내·외측으로 반복되어 나타난다).

▪ 그림 2.5.35는 실험차량의 중심선의 횡방향 변위를 나타낸 것이며, 그림 2.5.36은 상부 고속카메라(Top view)에서 촬영한 영상으로 실험차량의 시간대별 거동을 나타낸다.

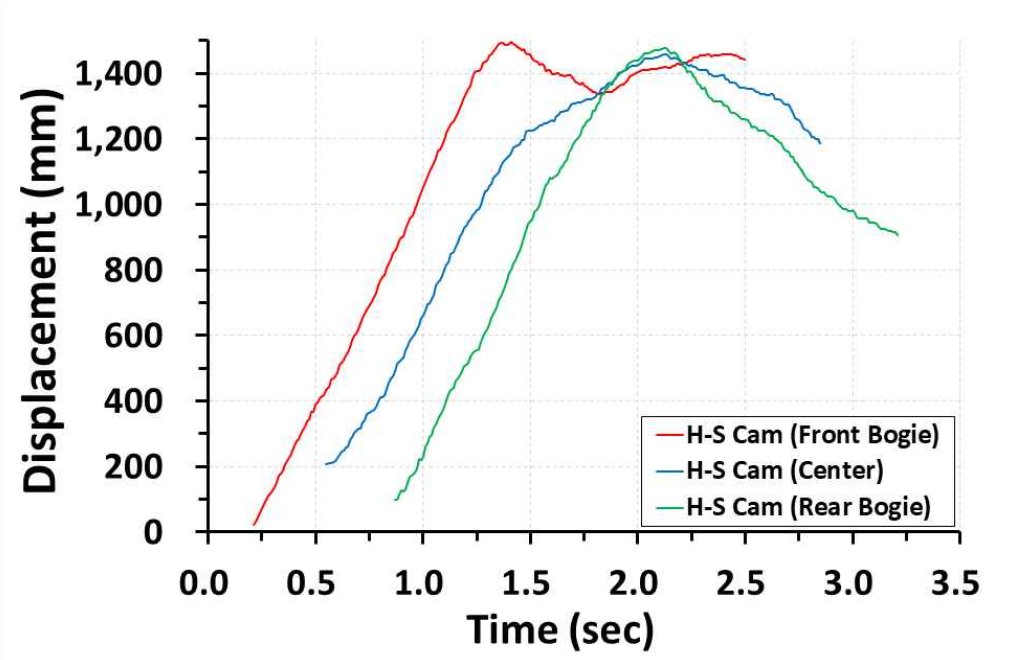


그림 2.5.35 실험차량의 횡방향 변위(CASE 5)

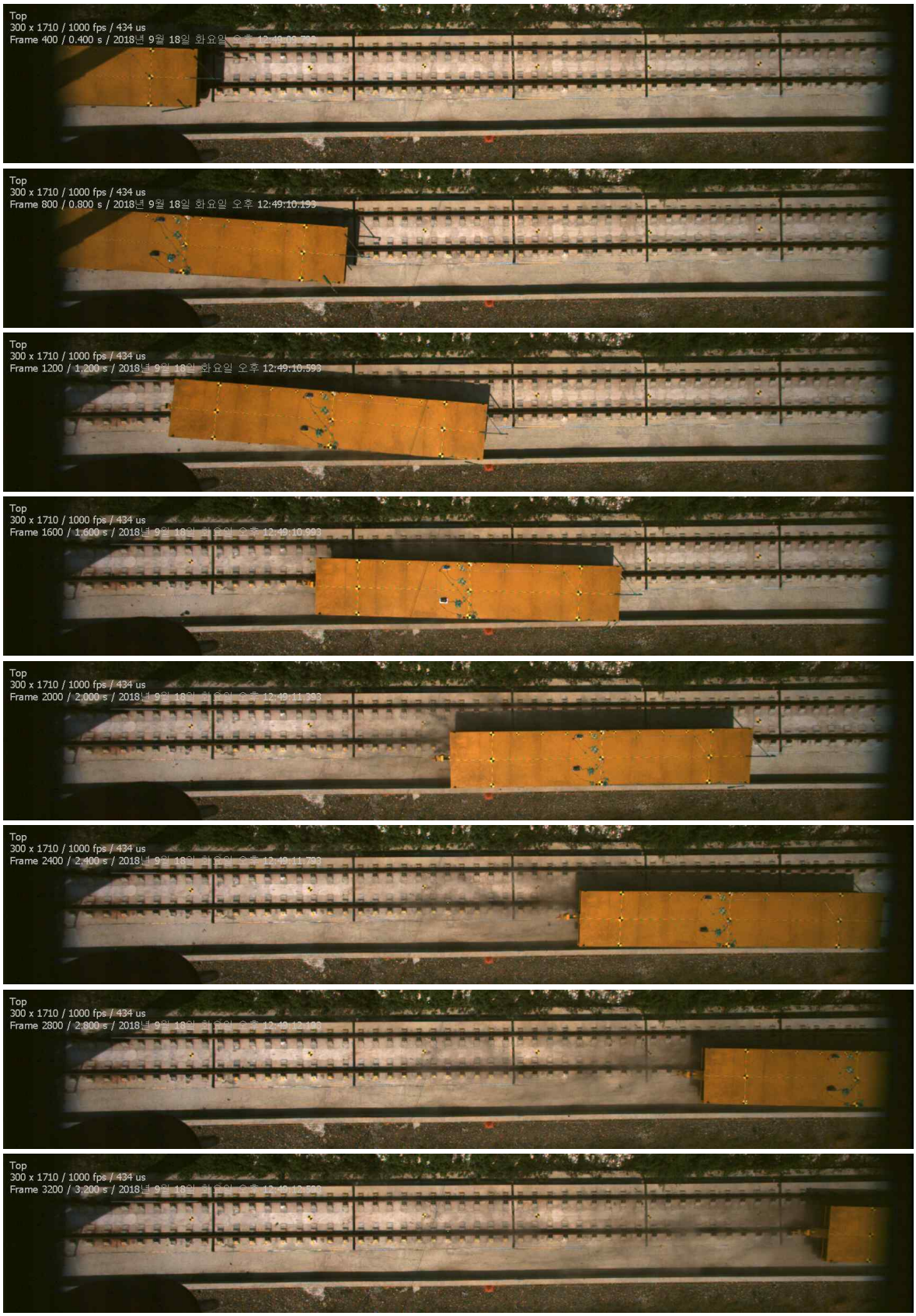


그림 2.5.36 실험차량의 시간대별 거동-Top view(CASE 5)

② DCP 초도시작품에 대한 충돌거동 및 충돌하중 분석

▪ CASE 6은 3차 연도에 1세부에서 개발한 궤간 내 일탈방호시설(DCP) 초도시작품 설치 조건에서의 탈선/충돌 실험을 수행하였으며, 실제 탈선직전의 주행속도는 51.16 km/h로 측정되었다. 개발된 탈선유도시스템에 의해 차륜 플랜지가 레일두부 상면을 타고오르는 타고오름(Wheel-climbing) 탈선이 유발되었다.

▪ 낙하 후 첫 번째 충돌은 약 0.35 sec에 차륜(우)이 콘크리트 궤도의 외측 침목부 7번 험프(Hump)와 충돌하면서 콘크리트의 파손이 발생하고, 약 0.46 sec에 두 번째 차륜이 첫 번째 충돌된 7번 험프와 동일하게 충돌한다. 그리고 동시에 내측(좌) 차륜이 DCP 측면과 최초로 충돌한다(그림 2.5.37). 이후 약 0.60 sec에는 2번째 차륜과 DCP가 충돌하게 된다.

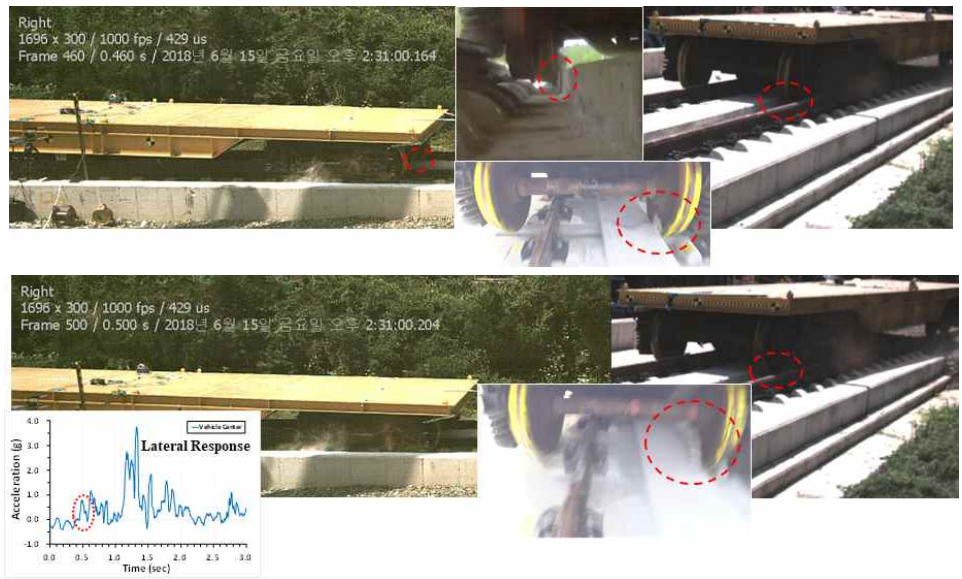


그림 2.5.37 내측 차륜과 궤간 내 DCP의 충돌

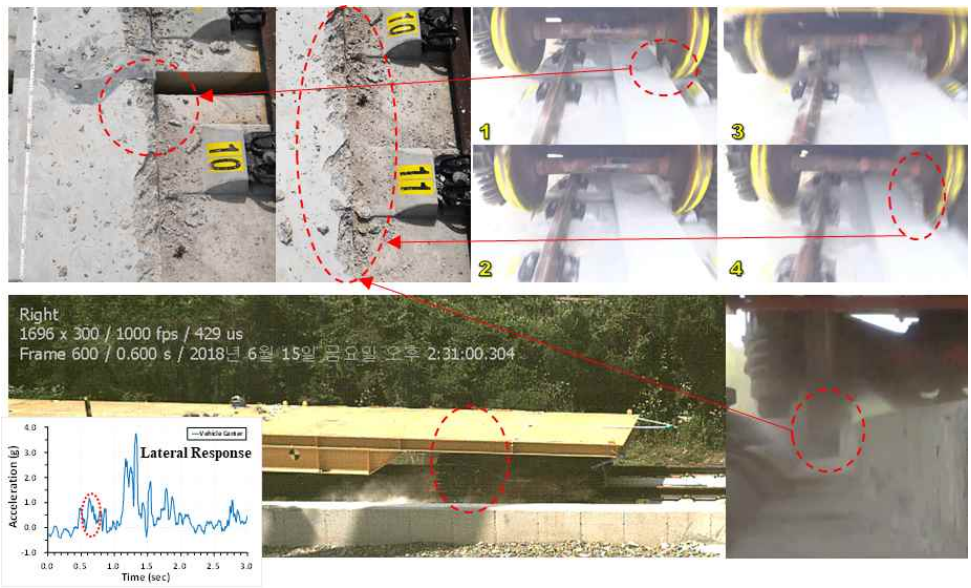


그림 2.5.38 내측 차륜과 궤간 내 DCP의 연속 충돌

▪ 뒷 대차가 탈선하면서 약 1.14 sec에 세 번째 차륜은 DCP와 충돌하고, 약 1.24 sec에 네 번째 차륜과 DCP가 충돌한다. 약 1.30 sec에부터는 첫 번째 차륜부터 네 번째 차륜까지 모두 궤간 내 DCP에 의해 가이드되어 더 이상 궤도 외측으로 진행하지 않고 직진방향으로 진행하게 된다.

▪ 궤간 내 일탈방호시설 초도시작품은 콘크리트 궤도 100 m 중에서 50 m만 시공되었으며, DCP 종점부 이후에도 진행방향을 어느 정도 유지하며 진행한다(그림 2.5.39). 계속적인 진행 중에는 차륜과 험프나 침목부 등과 접촉하며 방향이 틀어지게 된다.

▪ 그림 2.5.40은 실험차량의 중심선의 횡방향 변위를 나타낸 것이며, 그림 2.5.41은 상부 고속카메라(Top view)에서 촬영한 영상으로 실험차량의 시간대별 거동을 나타낸다. DCP가 없는 조건(CASE 5)과 비교하여 실험차량의 횡방향 변위 감소 및 가이드 효과가 탁월한 것으로 나타났다.

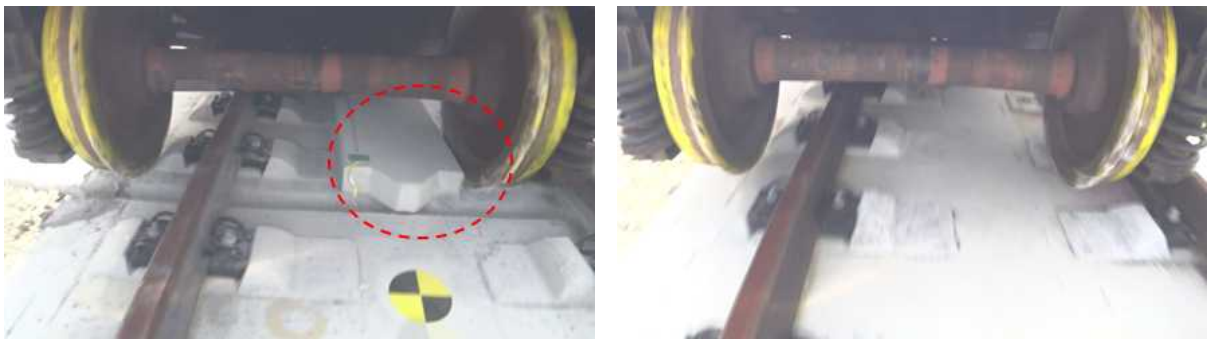


그림 2.5.39 궤간 내 DCP 종점 이후에도 진행방향 유지

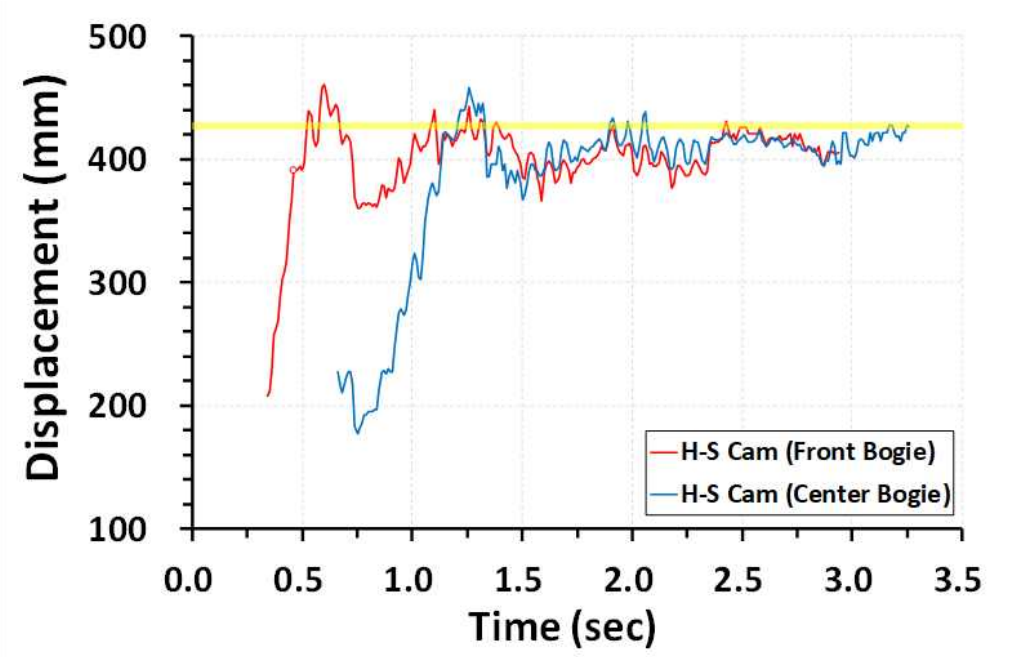


그림 2.5.40 실험차량의 횡방향 변위(CASE 6)

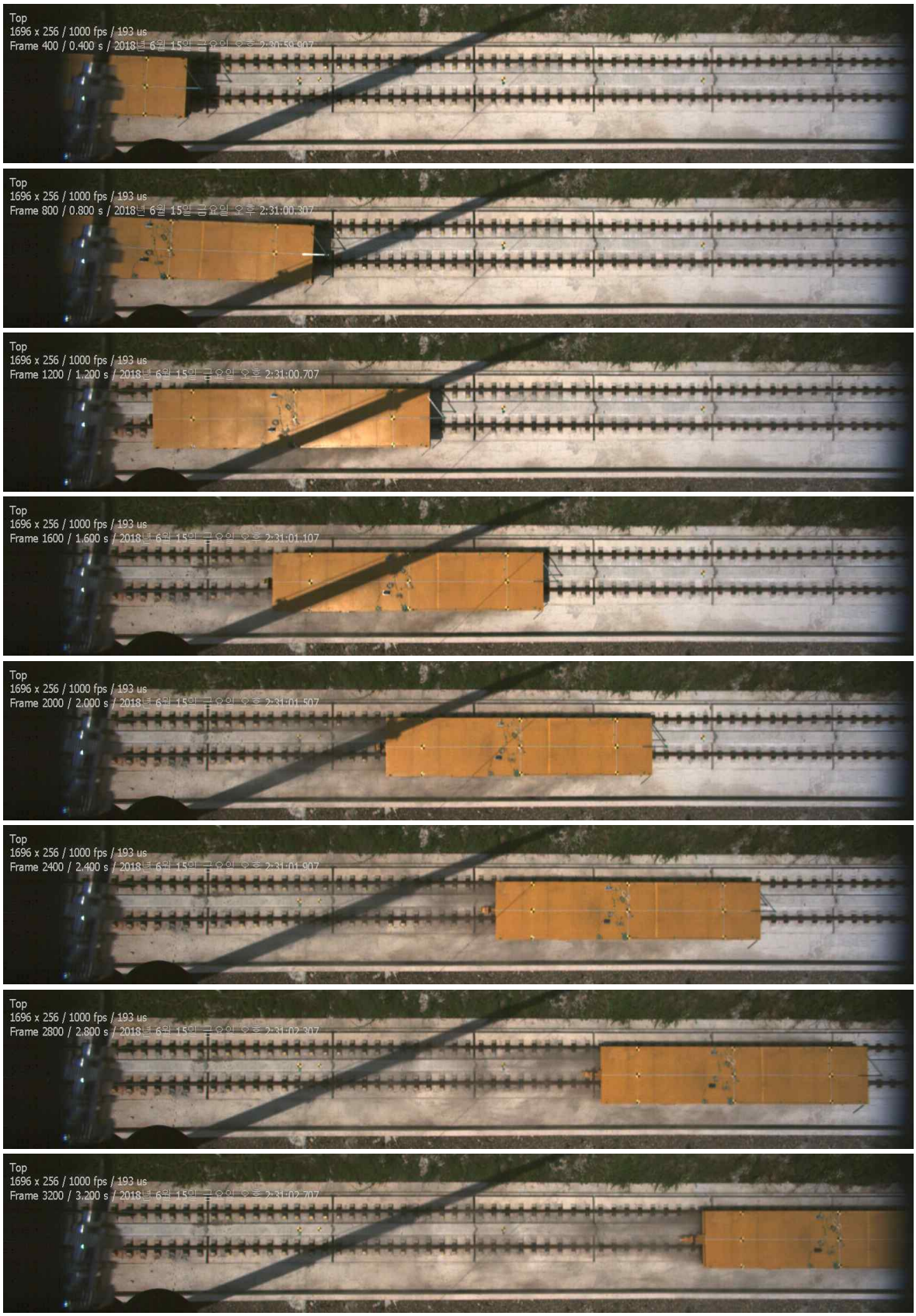


그림 2.5.41 실험차량의 시간대별 거동-Top view(CASE 6)

▪ 앞서 보인 열차의 탈선 후 궤간 내 일탈방호시설의 영향 분석을 통해 DCP 미설치 조건과 설치 조건에서의 큰 거동차이를 보였다. 본 연구과제의 목표인 탈선된 열차를 의도된 영역 내로 가이드시킬 수 있는 성능을 확인하였으며, 이를 통해 개발된 궤간 내 일탈방호시설 초도시작품의 일탈방호 성능의 적정성을 확인하였다. 차륜과 충돌한 DCP 모서리부의 일부파손이 발생되었으나 차륜의 가이드 성능에는 문제가 없는 것으로 판단된다.



그림 2.5.42 궤간 내 DCP 유무에 따른 충돌거동 비교(CASE 5, 6)

▪ 한편, 궤간 내 DCP 1차 초도시작품의 충돌실험(CASE 6)을 통해 앵커부 콘크리트 채움시(그라우팅 개념) 시공성 문제로 콘크리트 궤도 TCL층과 DCP 패널이 완전 고정 상태가 되지 않았음을 발견하였다(그림 2.5.43). 초도시작품의 앵커부 Hole은 단차가 있는 형태로 콘크리트 채움에 상당한 어려움이 있으며 채움 되더라도 공극 등에 의해 충분한 강도발현이 되지 않을 가능성이 높다.

▪ 이러한 충돌실험에 의한 일부 문제로 1세부와의 피드백을 통해 설계 개선이 이루어졌으며, CASE 7의 실험을 통해 개선된 초도시작품(설계 및 시공 수정, 세부사항은 1세부 보고서 수록)의 일탈방호 성능의 적정성 확인 및 충분한 내구성을 확인하였다(그림 2.5.44).

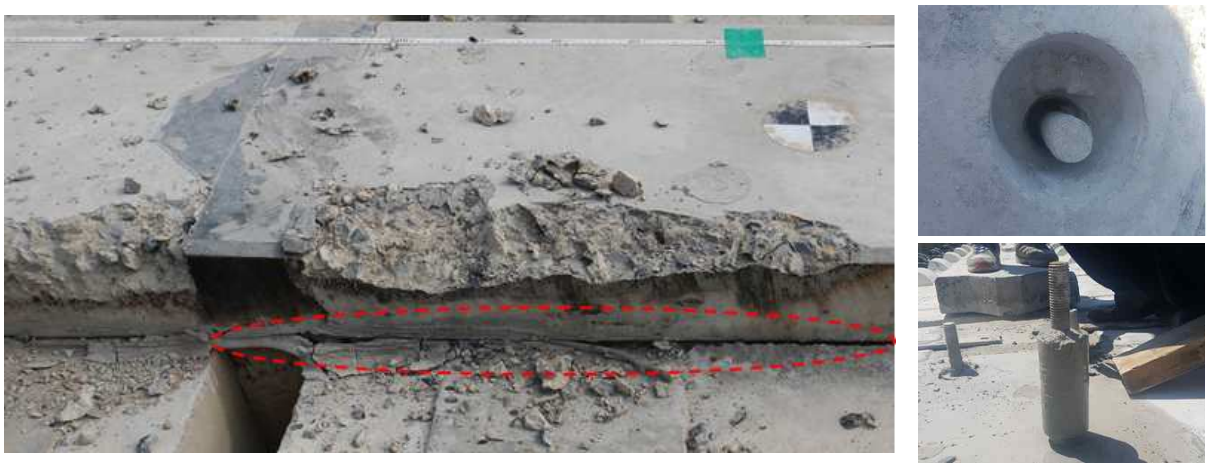


그림 2.5.43 충돌 후 DCP와 TCL층의 분리(들뜸) 현상 및 앵커부의 콘크리트(CASE 6)



(a) DCP 종점 통과(50m 지점)　　(b) 진행방향 유지(90m 지점)



(c) 파손 상태 및 앵커부 분리현상 개선

그림 2.5.44 개선된 DCP 초도시작품의 일탈방호 성능(CASE 7)

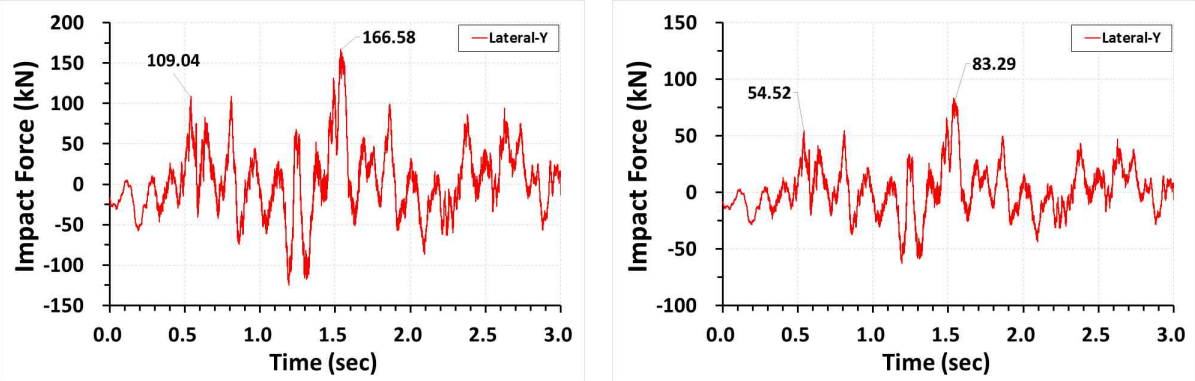
(다) 컨테이너화차 실험

① DCP 시제품에 대한 충돌거동 및 충돌하중 분석

▪ CASE 8에서는 실험차량의 중량 증가 및 중량중심 조건을 변경하기 위해 컨테이너화차로 개조하였으며, 최종성과물이 될 DCP 시제품의 성능을 평가하고자하는 실험을 수행하였다. 실험차량의 주행속도는 46.69 km/h로 측정되었다.

▪ 탈선 후 궤간 내 DCP 시제품에 의해 차륜이 가이드 되어 궤도 영역 내에서 주행하였으며, 차륜과 충돌한 DCP 모서리부의 일부파손이 발생되었으나 차륜의 가이드 성능에는 문제가 없는 것으로 판단되었다.

▪ 그림 2.5.45는 차량 횡방향 가속도 데이터를 통해 산정한 횡방향 충돌하중으로 실험차량(컨테이너화차, 17.32 tonf)의 총 질량을 고려한 경우와 질량참여율을 50% 고려한 경우 모두 나타내었다. 충돌 시뮬레이션에 의해 철도차량의 대차간 거리 영향이 반영되어 총 질량이 참여하지 않고 약 50%의 질량이 참여하는 것으로 분석되었다. 뒷 대차와 DCP의 충돌시 최댓값 83.29 kN이 발생되었다.

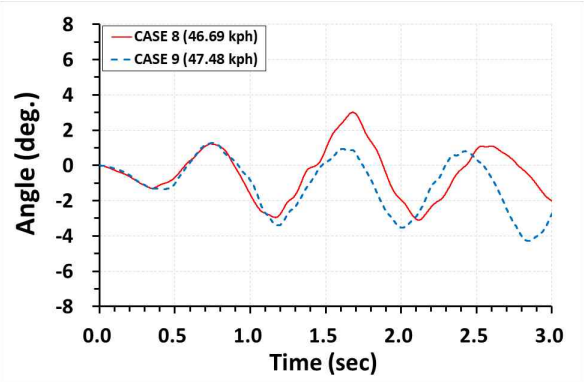


(a) Full mass 고려 (b) 1/2 mass 고려

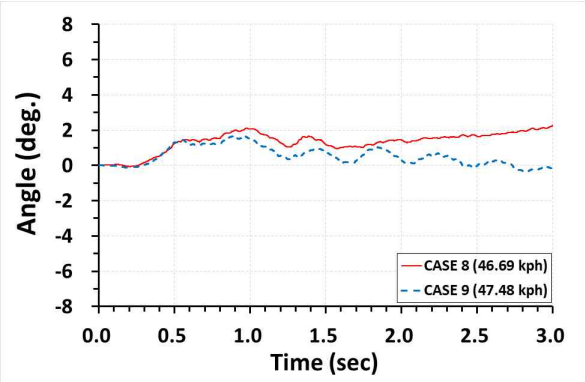
그림 2.5.45 횡방향 가속도에 의해 산정된 횡방향 충돌하중(CASE 8)

▪ 그림 2.5.46은 탈선 후 DCP와 충돌거동을 CASE 8(46.69 km/h)과 CASE 9(47.48 km/h)의 차량 각도(각가속도 데이터 적분을 통해 도출)로 비교한 것으로 전반적인 거동이 유사하게 나타났음을 볼 수 있다.

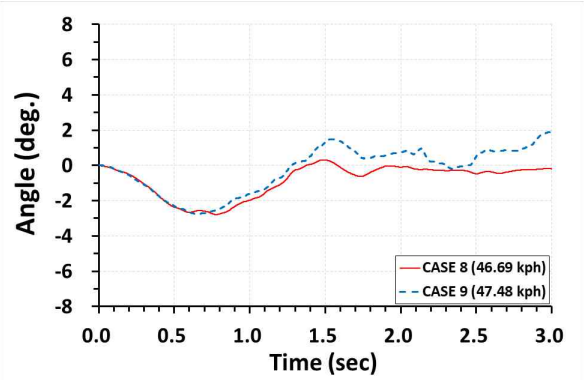
▪ 그림 2.5.47은 CASE 8(46.69 km/h)과 거의 유사한 조건의 실험인 CASE 9(47.48 km/h)의 차량 횡방향 가속도 데이터를 통해 산정한 횡방향 충돌하중이다. 실험차량(컨테이너화차, 17.32 tonf)의 총 질량을 고려한 경우와 질량참여율을 50% 고려한 경우에 DCP와의 최대 충돌하중은 각각 146 kN, 73 kN이 발생되는 것으로 나타났다.



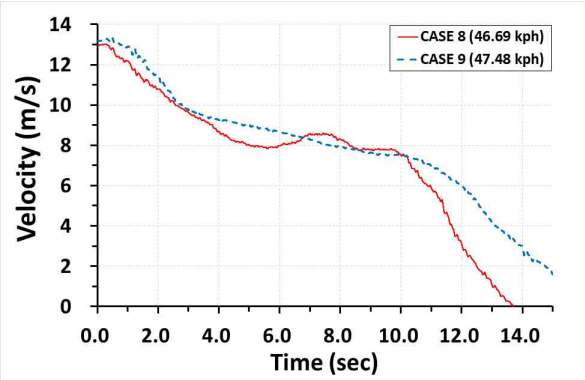
(a) Roll (Rotation-X)



(b) Pitch (Rotation-Y)

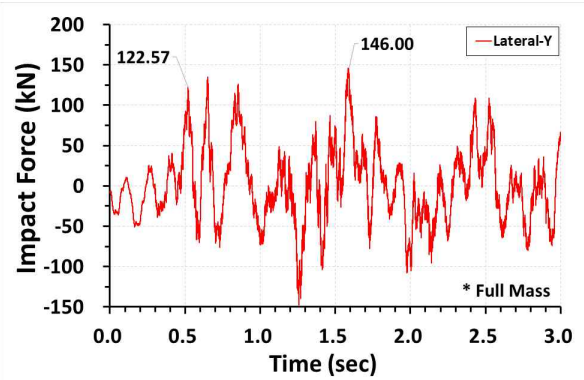


(c) Yaw (Rotation-Z)

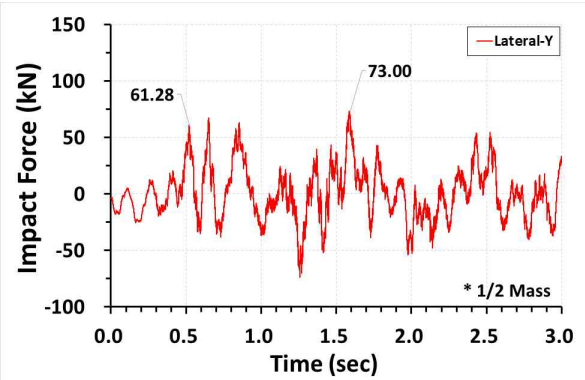


(d) Velocity

그림 2.5.46 컨테이너화차의 탈선 후 충돌거동 비교(CASE 8, 9)



(a) Full mass 고려



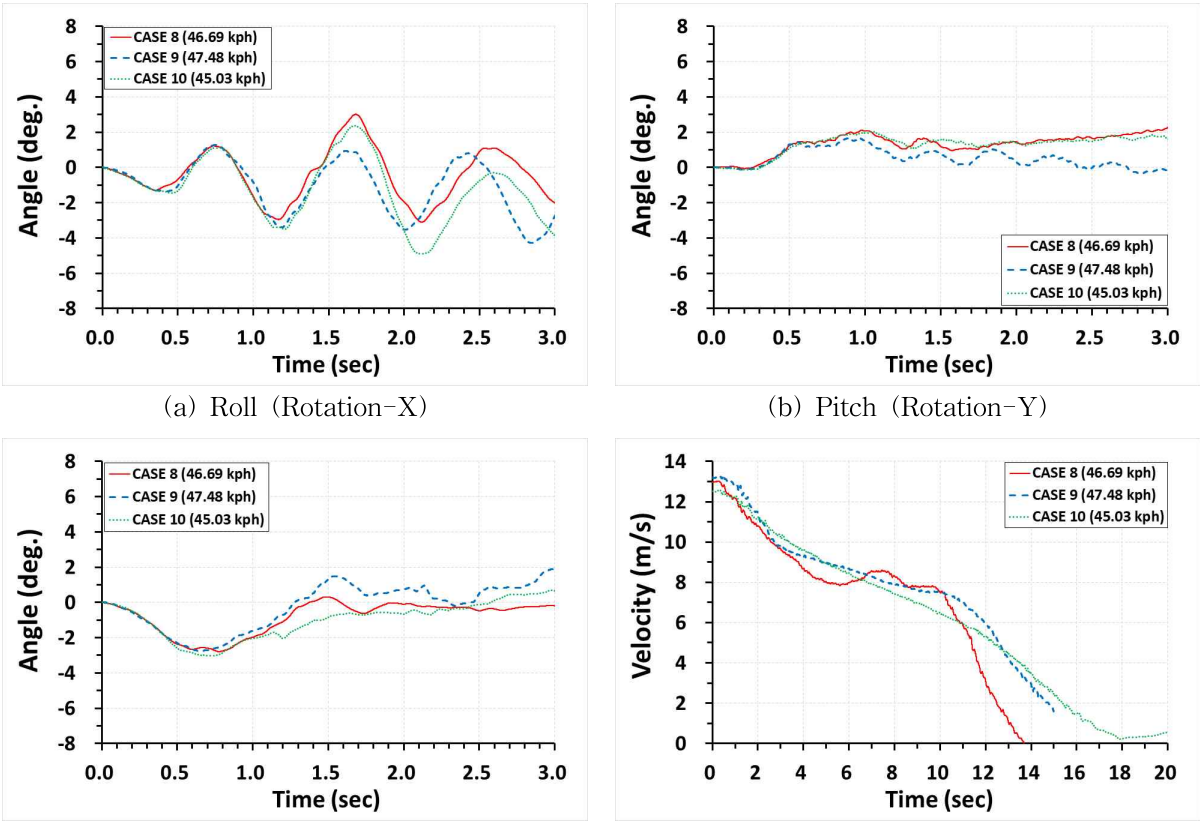
(b) 1/2 mass 고려

그림 2.5.47 횡방향 가속도에 의해 산정된 횡방향 충돌하중(CASE 9)

② 평판화차와의 연결 실험을 통한 DCP 성능 검증

▪ CASE 10에서는 철도차량의 연결조건을 반영하기 위해 컨테이너화차에 평판화차를 연결하였으며, 최종성과물이 될 DCP 시제품의 성능을 평가하고자하는 실험을 수행하였다. 실험차량의 주행속도는 45.03 km/h로 측정되었다. 연결 실험차량의 경우에서도 탈선 후 궤간 내 DCP 시제품에 의해 차륜이 가이드 되어 궤도 영역 내에서 주행하는 방호성능을 보였다.

▪ 그림 2.5.48은 컨테이너화차 실험인 CASE 8, 9와 CASE 10 컨테이너화차의 탈선 후 DCP와의 충돌거동을 비교한 것으로 전반적 거동이 모두 유사하게 나타난 것을 볼 수 있어 유사한 속도 영역 대에서 타고오름 탈선 구현의 재현성을 검증할 수 있었다.



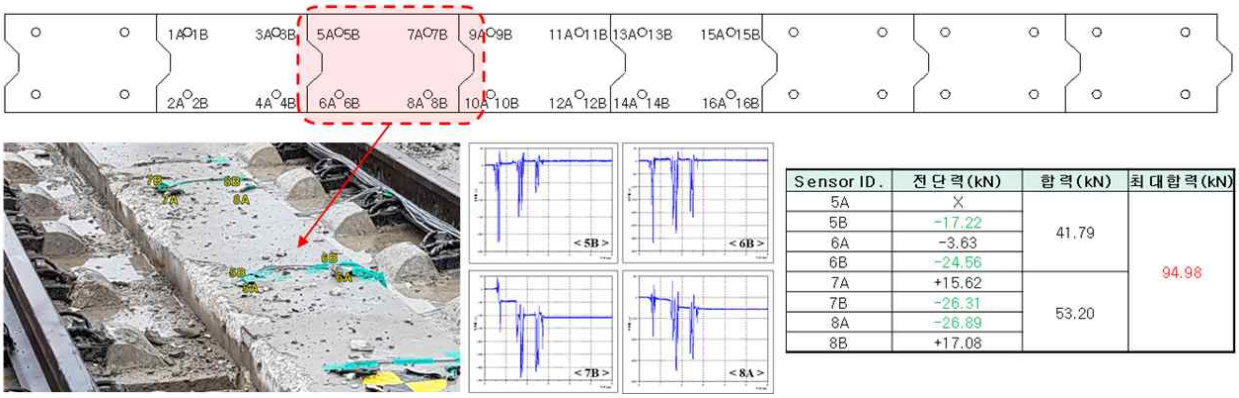
(a) Roll (Rotation-X)　(b) Pitch (Rotation-Y)

(c) Yaw (Rotation-Z)　(d) Velocity

그림 2.5.48 컨테이너화차의 탈선 후 충돌거동 비교(CASE 8, 9, 10)

▪ 그림 2.5.49는 DCP 패널에 재하되는 충격하중을 추정하기 위하여 패널 앵커부(4개)에 전단응력게이지를 설치하였다. 주요 충돌위치로 파악되는 4개의 DCP 패널에 설치하였으며 그중 3번째 DCP에서 94.98 kN의 최대 전단력이 측정되었다. 그림 2.5.50은 차량 횡방향가속도로부터 산정한 충돌하중으로 차량중량의 50%를 고려했을 때 앵커부에서 측정된 최대 전단력 값과 유사하게 나타났다.

▪ 따라서, 철도차량의 충돌실험을 통해 계측된 차량가속도 Raw data를 50 msec 이동평균법을 사용하여 후처리를 거친 후 차량 총질량의 50%를 고려한 충돌하중을 설계하중으로 추정하는 기법의 타당성이 검증되었다.



Sensor ID.	전단력(kN)	합력(kN)	최대합력(kN)
5A	X	41.79	94.98
5B	-17.22		
6A	-3.63		
6B	-24.56		
7A	+15.62	53.20	
7B	-26.31		
8A	-26.89		
8B	+17.08		

그림 2.5.49 DCP 앵커부 전단응력게이지를 통한 최대 전단력 측정

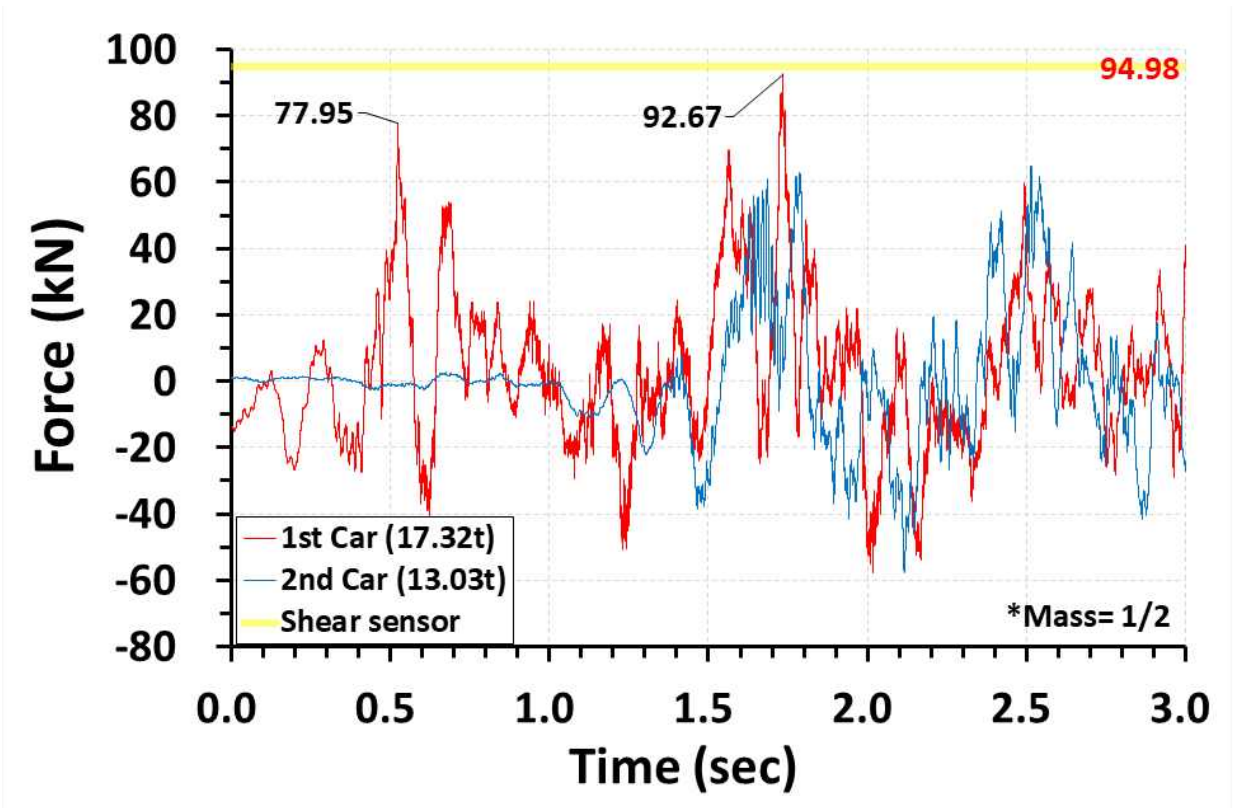


그림 2.5.50 횡방향 가속도에 의해 산정된 횡방향 충돌하중(CASE 10)

③ DCP 미설치 시 거동 분석

▪ CASE 11은 일탈방호시설(DCP)이 없는 조건에서의 연결화차 탈선/충돌 실험을 수행하였으며, 실제 탈선직전의 주행속도는 48.89 km/h로 측정되었다.

▪ 그림 2.5.51처럼 탈선 후 콘크리트 궤도(TCL) 층 측면과 방호벽 사이 공간으로 차륜이 빠지면서 기울어진 채(Rolling) 주행하게 된다. 영상에서 TCL 층 측면에 세워진 봉(Pole) 라인은 실제 국내 고속철도 교량상에 설치되어 있는 방호벽의 위치이다. 탈선 후 차륜이 주행레일에 의해 1차적으로 충돌하기 전에 봉 라인과 충돌하는 것을 볼 수 있으며, 이는 실제 탈선된 열차와 방호벽이 직접적으로 충돌하게 되는 것을 보여준다. 차륜과 주행레일이 1차적으로 충돌한 후 실험차량의 과도한 Rolling으로 컨테이너화차(1st car)의 뒷 대차 부분과 평판화차(2nd car)의 앞대차 부분이 방호벽과 충돌하여 방호벽의 일부가 파손되었다(그림 2.5.52). 방호벽은 150 kN 횡방향 하중에 대해 설계된 것으로 차량 횡방향 가속도데이터로부터 추정한 충돌하중을 검토해보고자 한다.



그림 2.5.51 DCP 미설치 시 탈선 후 거동(CASE 11)



(a) 선로 내측 (b) 선로 외측

그림 2.5.52 실험차량과의 충돌로 인한 방호벽의 파손(CASE 11)

▪ 그림 2.5.53은 차량 횡방향 가속도를 통해 산정한 충돌하중을 나타낸 것으로, 차륜과 주행레일에 의한 1차적 충돌로 약 98.27 kN, 이후 방호벽과의 충돌로 약 208.22 kN의 하중이 발생된 것으로 추정된다. 이는 실제 고속열차보다 중량이 작고 속도가 낮은 조건임에도 불구하고 방호벽 설계하중인 150 kN을 상회하는 충돌하중으로 현 국내 방호벽의 내충격성이 확보되지 않고 있음을 알 수 있다.

▪ 또한, 궤간 내 DCP를 설치한 경우에 비해 탈선열차가 궤도 외측으로 과도하게 벗어나면서 횡방향가속도가 증가하여 궤도 외측에 설치하는 DCP type 3 형태의 방호시설에 대한 설계하중이 상당히 커질 수 있음을 알 수 있다.

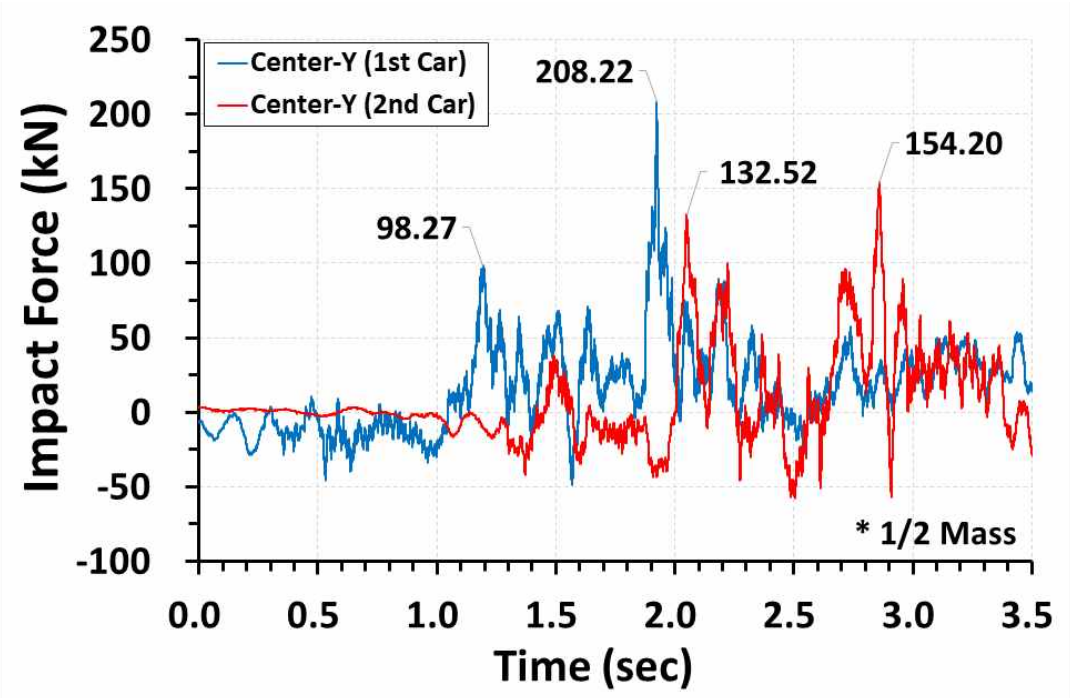


그림 2.5.53 횡방향 가속도에 의해 산정된 횡방향 충돌하중(CASE 11)

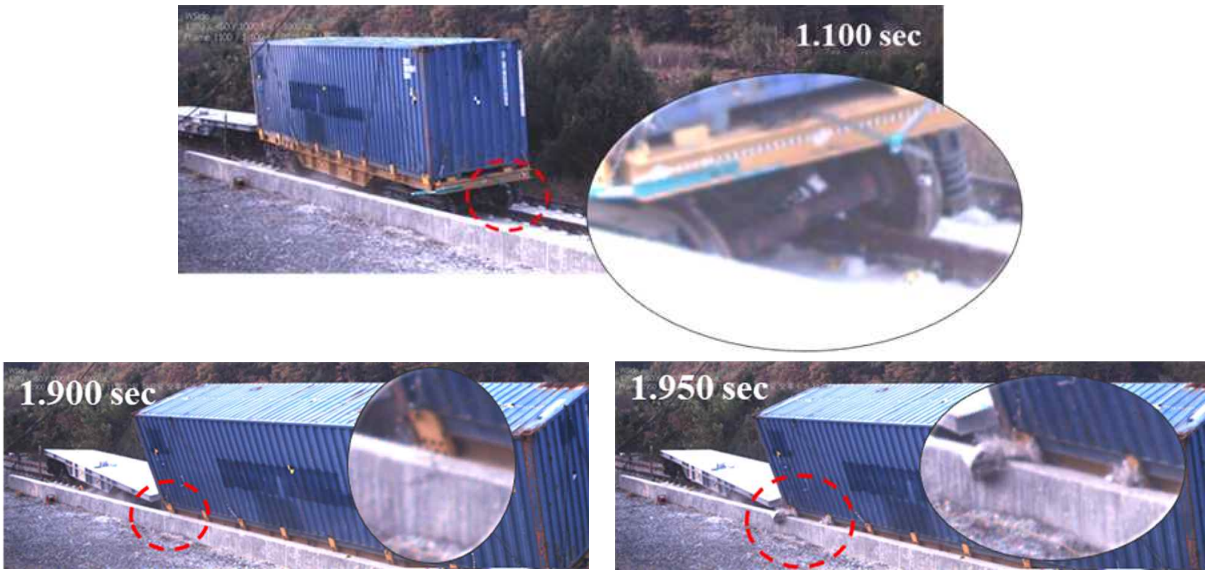
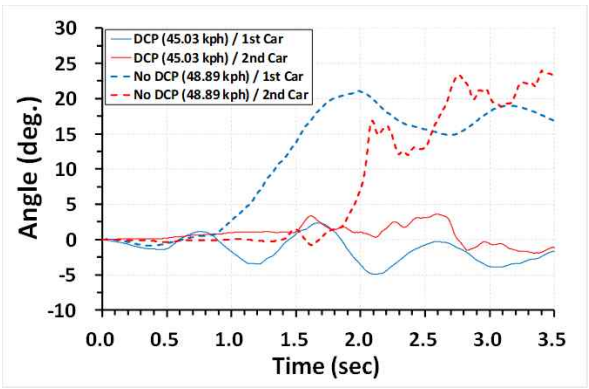


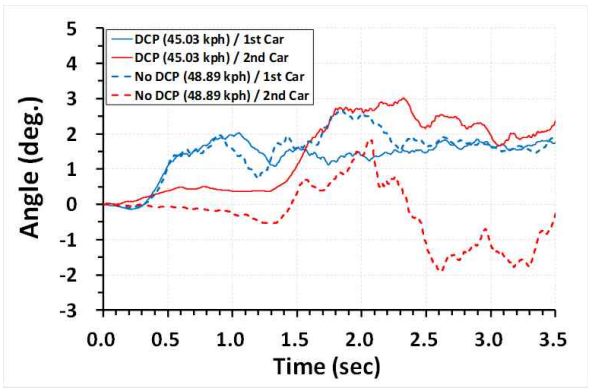
그림 2.5.54 DCP 미설치시 실험차량의 거동2(CASE 11)

▪ 그림 2.5.55는 회전축에 대한 차량의 각도를 DCP가 설치된 조건(CASE 10)과 비교한 것으로, 탈선 후 콘크리트 궤도(TCL) 층 측면과 방호벽 사이 공간으로 차륜이 빠지면서 Roll 각도가 DCP 설치 조건에 비해 크게 나타났다. 특히, Yaw 각도를 보면 탈선 직후 차륜이 DCP와 충돌했을 때 약 3.03 deg의 탈선각도가 나타났으나 DCP가 없는 조건의 경우 약 6.63 deg의 큰 탈선각도를 보인다.

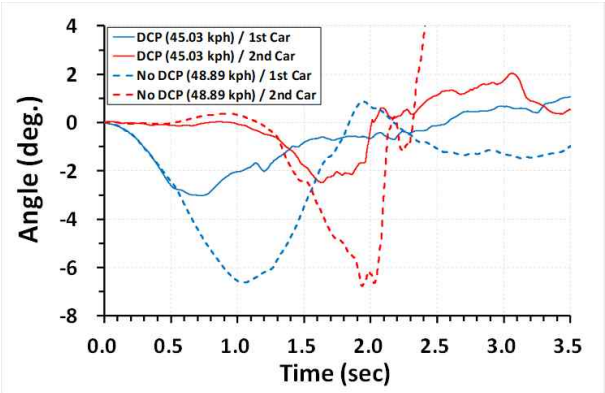
▪ CASE 11의 경우 시험선로 50 m 지점에서 TCL층 측면에 안전장치로 자갈더미를 부설하여 약 4 sec 이후에 급격히 속도가 저감되는 것을 볼 수 있다. 약 70 m 지점에서 정지하였으며 상대적으로 중량이 가벼워 차량진동이 크게 유발되는 후속 평판화차(2nd car)의 가속도데이터 누적오차(적분)가 크게 나타났다.



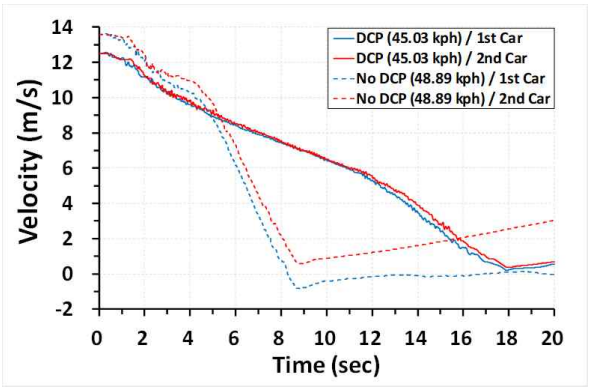
(a) Roll (Rotation-X)



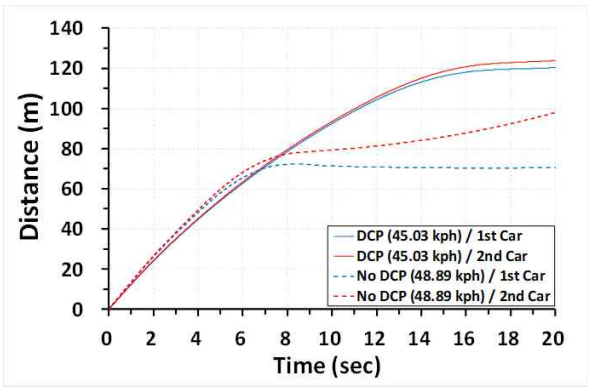
(b) Pitch (Rotation-Y)



(c) Yaw (Rotation-Z)



(d) Velocity



(e) Distance

그림 2.5.55 연결화차의 탈선 후 충돌거동 비교(CASE 10, 11)

2.6 탈선/충돌 시뮬레이션 기법 적정성

가. 단순화 모델 검증을 위한 탈선실험

(1) 탈선실험 환경

(가) 탈선실험장



그림 2.6.1 유수역 탈선 시험장

▪ 탈선시험장은 경전선(광양~진주)폐선/폐역 구간에서 완사역과 진주역 사이의 구간으로 유수역(폐역부지)을 포함하며 약 3.8km 구간에 위치하고 있음. 시험차량의 최대 80km 속도를 고려하여 가속, 제동 구간을 확보하였다.

▪ 탈선시험의 목적은 고속철도 교량상 콘크리트 궤도에 대한 일탈방호시설 개발이 목적이므로 기존 자갈궤도는 걷어내고 콘크리트 궤도를 부설하였다. 시험장의 콘크리트 궤도는 고속철도 교량 콘크리트와 동일하게 시공하기 위해 대표적인 Rheda2000로 시공함. 또한 열차 탈선 이후 차륜이 레일과 충돌 후에도 궤도를 벗어나는 상황이 대비하여 방호벽을 설치하였다.

(2) 탈선유도장치

▪ 본 연구의 실험의 목적은 시뮬레이션 모델 검증을 위한 탈선 실험이므로 실험 대차를 적절하게 탈선을 시켜야한다. 실험대차의 탈선을 일으키기 위해 탈선 유도장치 설계를 실시하였으며 유도장치 시스템 및 적용사례를 먼저 조사하였다.

▪ 탈선유도장치는 특수상황에서 진입하는 열차에 의한 2차 피해를 예방하기 위해 특정 지점에서 일정거리 후방의 레일에 설치하여 진입하는 열차를 고의로 탈선시키기 위해 설치하게 된다.

▪ 탈선유도장치는 현재 국내에서 사용되는지 여부는 확인 할 수 없었으나, 미국에서는 1958년 Newark Bay rail accident에서 사용되어 정상적으로 작동된 이력이 있으며, 캐나다 알버타 주정부 교통부에서는 철도차량에서 위험물을 적재하거나 내릴 때, 또는 궤도 주변에서 작업하는 인원을 보호하기 위해 사용하도록 하고 있다.

▪ 탈선유도장치가 적용되는 상황은 다음과 같다.

- 같은 선로에 다른 차가 진입하였을 때

- 허가되지 않은 동력차가 정지해있는 다른 차량의 선로로 진입하였을 때

- 주행차량에서 차량 일부가 분리되었을 때

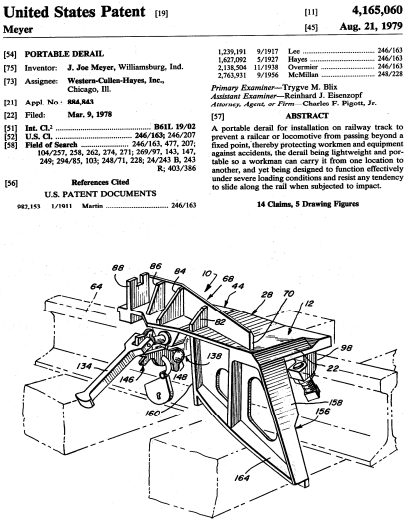
표 2.6.1 탈선유도장치 시제품

회사명	The NOLAN Company	The NOLAN Company
제품사진		
제품명	Low-Profile Portable Derails: PD-4, PD-5 (Single-End)	Low-Profile Sliding Derails: SD-3, SD-4, SD-5, SD-6
적용열차	기관차, 화차	기관차
속도	5 mph (8km/h)	5 mph (8km/h)
무게	19~21kg (42~46lbs)	118~129kg (260~285lbs)
방향	양쪽방향	양쪽방향
기타	높은 속도로 충돌 시 탈선 실패가 일어날 수 있음.	높은 속도로 충돌 시 탈선 실패가 일어날 수 있음.

▪ 시제품에 대해 조사를 진행한 결과 아래와 같은 사유로 본 연구과제에는 사용할 수 없다. 본 연구과제에서 철도차량의 주행속도는 최소 50km/h로 시제품들의 권장속도와는 맞지 않다.

▪ 조사된 시제품은 자갈궤도의 나무침목에 설치되는 제품이나, 본 연구과제에서는 실험환경이 교량 위 콘크리트 궤도로 설치가 불가능한 점이 있다.

▪ “Portable derail ”, Meyer; J. Joe [5]. 본 특허는 철도차량 또는 기관차가 특정 점을 넘어서 발생할 수 있는 사고로부터 작업자와 장비를 보호하는 것을 목적으로 발명 되었으며, 철도 트랙에 설치하기 위한 휴대용 장치로 되어있다. 경량으로 제작되어 휴대성이 좋아 작업자가 한 위치에서 다른 위치로 옮길 수 있으며, 철도차량과 충돌하였을 때 레일을 따라 미끄러지는 경향에 저항하도록 설계되어있다. 현재 시제품의 대부분이 이 특허의 모양을 모방하여 발명된 것을 유추할 수 있다.



United States Patent [19]
Meyer
[11] 4,165,060
[45] Aug. 21, 1979

[54] PORTABLE DERAIL
[75] Inventor: J. Joe Meyer, Williamsburg, Ind.
[73] Assignee: Western-Cullen-Hayes, Inc., Chicago, Ill.
[21] Appl. No.: 884,843
[22] Filed: Mar. 9, 1978
[51] Int. Cl.[2] B61L 19/02
[52] U.S. Cl. 246/163; 246/207
[58] Field of Search ..... 246/163, 477, 207; 104/257, 258, 262, 274, 271; 269/97, 143, 147, 249; 294/85, 103; 248/71, 228; 24/243 B, 243 R; 403/386

[56] References Cited
U.S. PATENT DOCUMENTS

982,153	1/1911	Martin	246/163
1,239,191	9/1917	Lee	246/163
1,627,092	5/1927	Hayes	246/163
2,138,504	11/1938	Overmier	246/163
2,763,931	9/1956	McMillan	246/228

Primary Examiner—Trygve M. Blix
Assistant Examiner—Reinhard J. Eisenzopf
Attorney, Agent, or Firm—Charles F. Pigott, Jr.

[57] ABSTRACT

A portable derail for installation on railway track to prevent a railcar or locomotive from passing beyond a fixed point, thereby protecting workmen and equipment against accidents, the derail being lightweight and portable so a workman can carry it from one location to another, and yet being designed to function effectively under severe loading conditions and resist any tendency to slide along the rail when subjected to impact.

14 Claims, 5 Drawing Figures

그림 2.6.2 해외 탈선유도장치 특허품

(3) 탈선유도장치 설계지원

(가) 탈선유도장치 설계고려사항

▪ 시제품의 조사와 관련 특허를 조사해본 결과 모든 장치들이 저속으로 진입하는 철도차량에 대한 탈선을 전제로 하고 있기 때문에 시속 50km 이상으로 진입하는 철도차량의 실험에서는 그 설계가 적합하지 않다.

▪ 탈선-충돌 실험 대차는 주강대차로 무게가 4.6ton으로 실험의 최저속도인 50km/h의 속도로 충돌 시 초기 충격으로 탈선유도장치가 파손될 우려가 있다.

▪ 탈선유도장치를 설치하는 궤도는 Rheda 2000 궤도로 콘크리트 침목(침목)을 사용하게 된다. 궤도내의 레일 체결장치와 침목으로 인해 탈선유도장치 설치 시 간섭을 발생할 수 있기 때문에 설계 시 궤도의 구성품의 간섭을 피해 설계해야한다.

▪ 탈선유도장치에는 차륜의 접촉으로 인해 큰 충격량이 전해지게 된다. 레일 밖으로 탈선시키기 전에 탈선유도장치가 충격에 의해 완전 파손되어 유도할 수 없는 상황을 방지하기 위해 강도가 높은 재료를 선정하여야 한다.

▪ 그러나 완전파손이 되지는 않아도, 구조에 영구 변형이 발생할 경우 반복적 실험에는 사용이 불가능 하다. 따라서 여러 개의 탈선유도장치를 제작해야하는 상황으로 재료의 가격, 제작의 용이성, 일정 이상의 강도를 만족하는 재료를 선정하였다.[6,7]

표 2.6.2 탈선유도장치 재료 물성치

Component	Feature			Unit
	Derailment device		Bolt	
	SM15C	SS400	SCM435	
Young's modulus	200	200	200	[GPa]
Poisson's ratio	0.3	0.3	0.3	
Yield stress	680	245	902	[MPa]
Tensile stress	700	400	991	[MPa]

(나) 탈선유도장치 유한요소해석

▪ 탈선유도장치는 2가지 안으로 설계되었으며 여러 가지 부품으로 구성되어있다, 이것들은 모두 하나로 용접되며 궤도와 레일에 볼트로 결합되는 형식으로 제작된다.

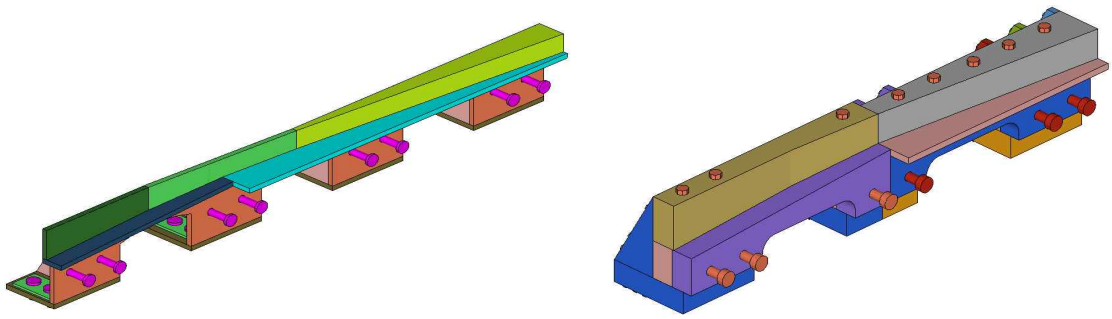


그림 2.6.3 탈선유도장치 설계안

▪ 시중에 사용되는 제품의 경우 저속으로 진입하여 탈선유도장치와 차륜이 접촉하는 가해지는 힘이 적지만, 본 연구에서는 고속으로 진입하여 탈선선유도장치에 가해지는 힘이 크다. 따라서 탈선유도장치가 실험용 대차를 레일 밖으로 밀어 낼 때까지 파손되지 않고 제 기능을 할 수 있는지 확인해야한다.

▪ 탈선유도장치를 유한요소모델로 구성하였고, 실제 실험에 사용되는 주강대차 모델에 50 km/h 초기속도를 부여하였다. 유한요소 모델의 구속조건은 (그림 2.6.4)와 같이 실제 실험환경과 유사하게하기 위해 탈선유도장치의 바닥면 Node에는 수직방향만 구속시키고, Anchor Bolt는 바닥에 고정되는 부분만 모든 자유도를 구속하였다. 또한 탈선유도장치와 볼트, 와셔, 레일 간에 대한 접촉을 모두 표현하였다.

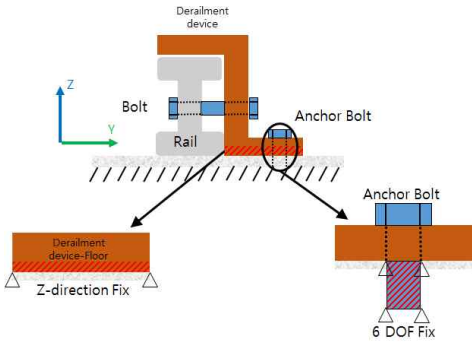


그림 2.6.4 탈선유도장치 경계조건

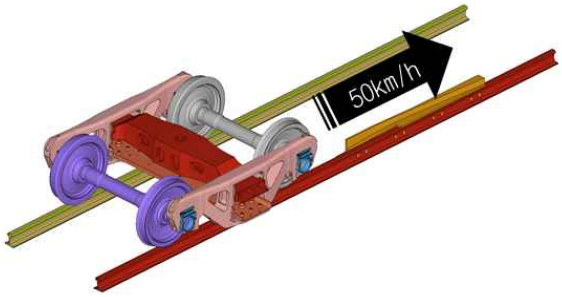


그림 2.6.5 시뮬레이션 초기조건

▪ 탈선유도장치 1안 유한요소 해석 결과 (그림 2.6.6)을 보면 탈선유도장치 중 차륜을 유도하는 바닥면과 옆면에서 재료의 인장강도에 가까운 응력이 발생하여 표면이 파손되는 경향을 보이지만 실제로는 압축응력으로 인해 탈선유도장치는 가공경화가 발생할 것으로 예상되어, 부분적인 소성변형이나 파손이 발생할 것이라 예측된다.

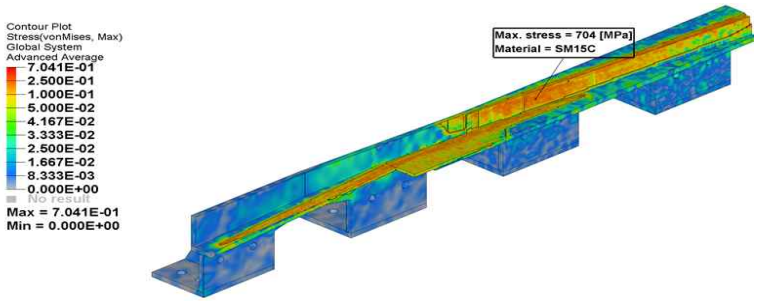


그림 2.6.6 탈선유도장치 1안 유한요소 해석결과(1)

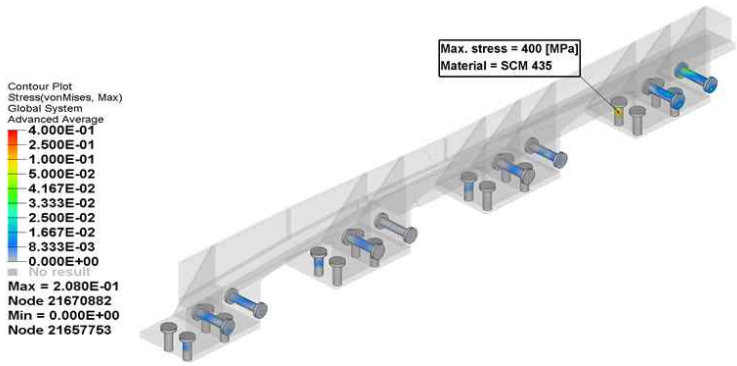


그림 2.6.7 탈선유도장치 1안 체결볼트 해석결과

▪ 탈선유도장치 2안 해석결과 차륜이 유도창치에 처음으로 충돌하는 부분과 대차에 횡력을 발생시키는 옆면에서 최대 442Mpa의 응력이 발생한 것을 확인할 수 있다. 대차의 차륜과 충돌하는 부분에서 항복응력을 초과하여 충돌부분의 부분적인 소성변형이 일어날 것으로 예측되지만 구조적인 변형은 발생하지 않아 유도 장치의 역할을 할 수 있을 것으로 판단된다.

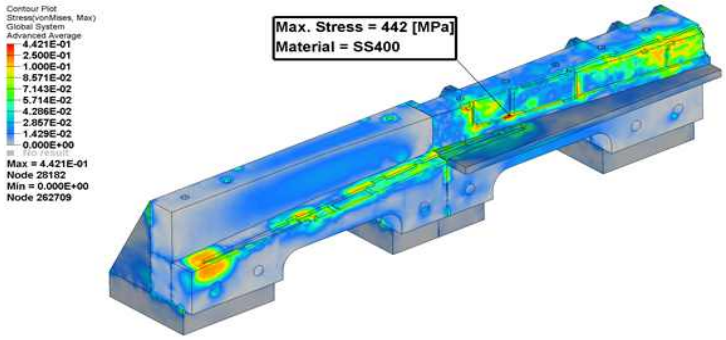


그림 2.6.8 탈선유도장치 2안 해석결과

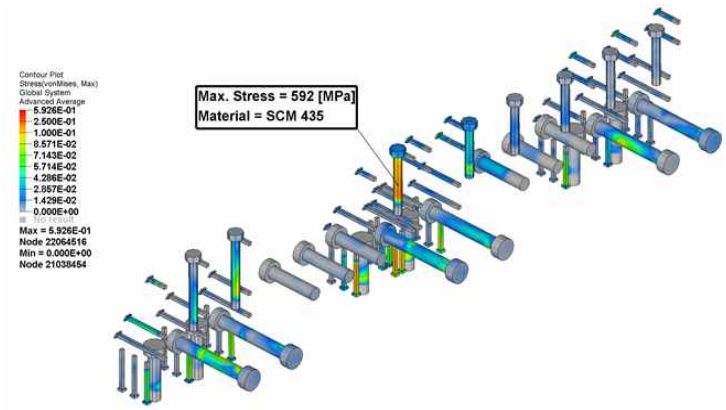


그림 2.6.9 탈선유도장치 2안 체결볼트 해석결과

▪ 탈선유도장치 1안과 2안 해석 비교결과 여러 번의 탈선실험을 실시해야하므로 변형이 상대적으로 작게 발생하는 2안을 적용하기로 하였다.

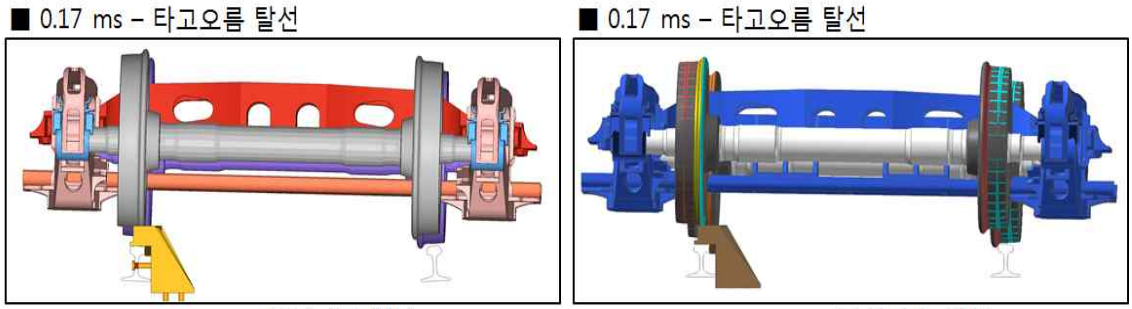


그림 2.6.10 Ls-dyna와 RecurDyn 탈선거동 비교

▪ 탈선유도장치가 대차의 적절한 탈선을 유도할 수 있는지 확인하기 위해 평션베이(주)社의 동역학 상용소프트웨어인 RecurDyn을 이용하여 다물체 동역학 모델링을 구성하고 해석을 진행하였음. Ls-dyna와 다물체 동역학 소프트웨어인 RecurDyn의 해석결과가 (그림 2.6.10)와 같이 동일한 형태의 거동이 발생하는 것을 확인하였다.

(다) 탈선유도장치 실제 실험결과

▪ 실제 27km/h 탈선시험을 진행한 후 파손된 탈선유도장치 사진으로 유한요소 해석결과에서 예상한 처음 차륜이 부딪히는 부품과 횡력을 발생시키는 부품에서 부분적인 소성변형이 발생한 것을 확인할 수 있다. 해석을 통해 예측한대로 부분적인 소성변형은 발생하나 구조적인 변형은 발생하지 않아 유도장치의 역할을 할 수 있는 것으로 확인하였다.

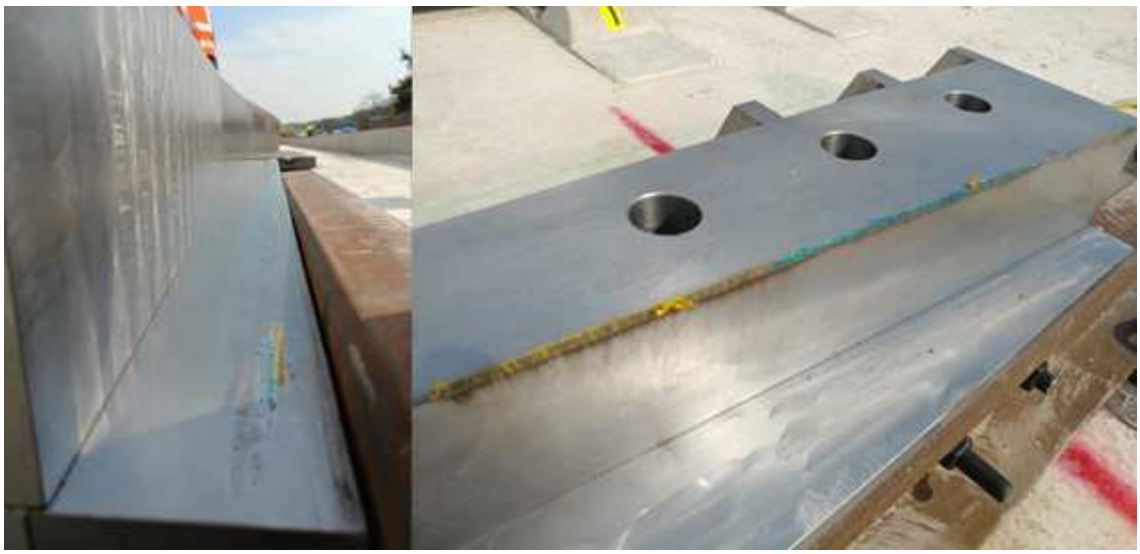


그림 2.6.11 시험 후 변형이 일어난 탈선유도장치

(3) 대차 단위 탈선 실험.

(가) 실험대차 모델링

▪ 차량 단위 실험에 앞서 단순화 대차 모델을 검증하기 위해 대차 단위 탈선실험을 먼저 실시하였다.

▪ 탈선/충동 시험용 대차는 주강대차 중 볼스터 대차 종류이며 화차 대차로써 하중 변화에 따른 변위를 최소화 할 수 있는 BARBER S-2 BOGIE를 적용하였으며, 이중 코일 스프링과 스너버스프링을 조합하여 운행 성능의 향상과 제동 로드를 볼스터에 관통 조립하여 주행 안정성이 향상됨. 주강대차에 대한 제원은 아래와 같다.

표 2.6.3 주강대차 제원 및 구성

Feature	Type
Bogie type	Bolster
Bogie weight (added Wheelset)	4.6 tons
Track gauge	1,435 mm
Wheel diameter	860mm
suspension	Double spring (Bolster+Axis)



그림 2.6.12 탈선실험 주강대차

▪ 2.2절에서 언급한 것 같이 단순화 모델링에 필요한 절차는 3D 형상모델에서 무게중심, 현가장치 취부, 연결조인트 위치 좌표를 구하는 것이다.

▪ 실제 실험대차의 경우 약 40년 전 제작된 것으로 3D 모델 정보를 구할 수 없어 자료 조사를 통해 구한 유사한 형상의 주강대차 모델을 사용하였다.

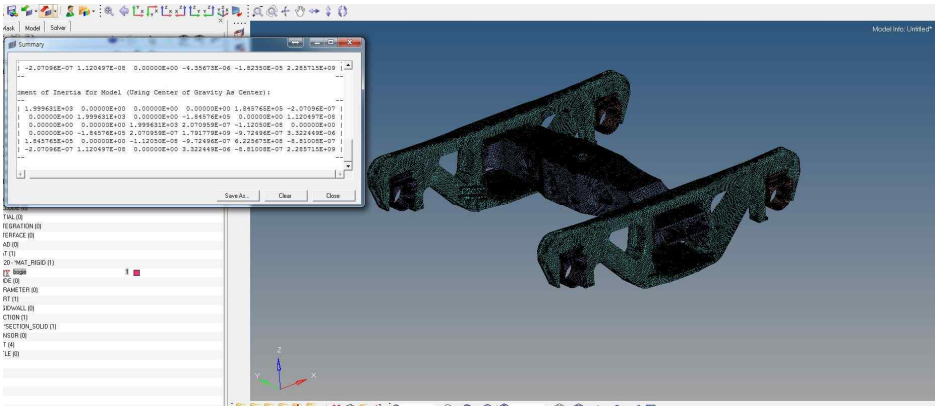


그림 2.6.13 3D 형상을 통한 주강대차 프레임 관성모멘트 및 무게중심 추정

표 2.6.4 주강대차 프레임 특성

Parameters		Values
Gauge	(mm)	1,435
Wheelbase	(mm)	1,676
Wheel Size	(mm)	860
Length	(mm)	2,600
Width	(mm)	2,350
Weight	(kg)	3,800
Frame Weight	(kg)	1,585
Frame Ixx	(Kgm2)	1,420.6
Frame Iyy	(Kgm2)	493.6
Frame Izz	(Kgm2)	1,812.2
Primary suspens ion stiffness	(kN/mm)	160

▪ 3D 형상과 자료조사를 통해 추정한 프레임 질량과 회전관성모멘트와 1차 현가장치 특성은 (표 2.6.4)에 정리하였으며 표의 추정 값을 토대로 1D 강체요소에 질량과 관성모멘트 특성을 대입하였다.

▪ 3피스 주강대차의 구조는 1D로 단순화시키기 어려움이 있고 대차실험은 차체가 연결되지 않았기 때문에 차체와 연결되어 진동을 감소시키는 역할을 하는 2차 현가장치의 볼스터부 스프링은 생략하였으며 1차 현가장치만 모델링하였다.

(나) 콘크리트 궤도 모델링

▪ 콘크리트 침목은 실제 호남 고속철도에 설치되는 레일과 동일한 치수로 모델링 하였으며 나사스파이크 및 텐션클램프 등 궤도 구성품을 모델링할 경우 과도한 해석시간이 소요되므로 단순화하여 모델링하였다.

▪ 본 연구에서 콘크리트 모델은 MAT159_MAT_CSCM_CONCRETE를 적용하여 모델링 하였음. MAT159 콘크리트 모델은 1990년대에 개발되어 많은 연구에 적용되어왔으며 Ls-dyna에서는 2005년부터 적용되었다.

▪ Continuous Surface Cap Material(CSCM) 모델은 콘크리트의 손상을 효과적으로 모델링 할 수 있는 장점이 있지만, Strain rate에 대한 효과는 보정을 거쳐야 비교적 정확한 결과를 얻을 수 있다. 하지만 간단한 몇 가지 파라메터만 입력하면 자동으로 관련 요소를 산출하는 방식의 모델로 널리 적용되는 모델 중 하나이다.

▪ 콘크리트 도상과 레일은 강체로 모델링하였으며 침목의 경우 모두 강체로 구성된 시험장과 시험대차가 탈선 후 충돌하는 침목만 Mat159 를 사용하여 모델링한 시험장 각각 구성하여 시뮬레이션을 진행하였다.

표 2.6.5 콘크리트 침목 Dyna 물성

Parameters	Values
RO	2.35e-6 kg/mm^3
NOPLOT	1
IRATE	1
ERODE	1.05
FPC	0.045 GPa
DAGG	25 mm
UNITS	0

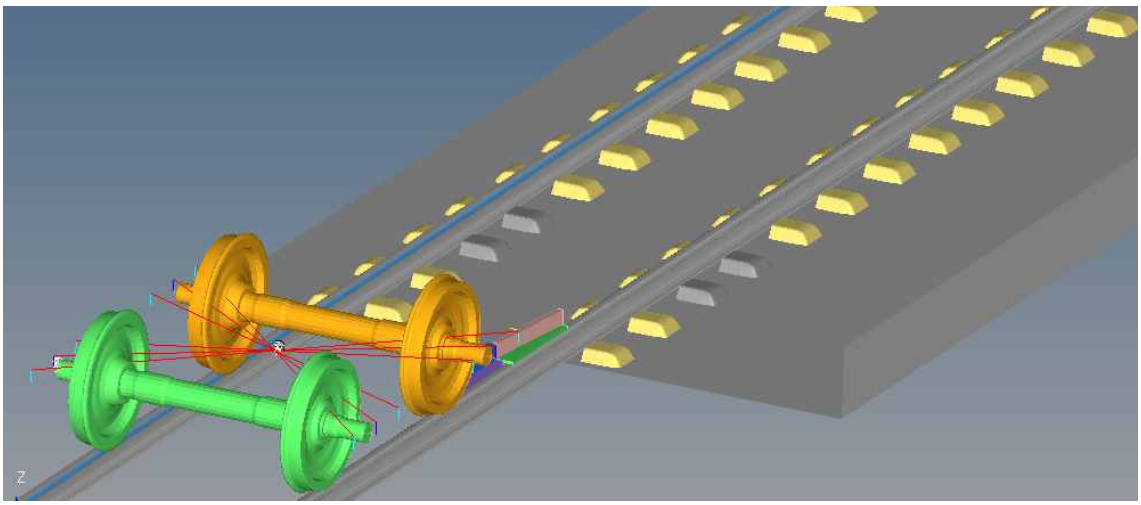


그림 2.6.14 충돌 침목만 Mat159로 구성한 시험장 모델

▪ 콘크리트 도상과 레일은 강체로 모델링하였으며 침목의 경우 모두 강체로 구성된 시험장과 시험대차가 탈선 후 충돌하는 침목만 LS-Dyna Mat159 를 사용하여 모델링한 시험장 각각 구성하여 시뮬레이션을 진행하였다.

(다) 실제 시험과 시뮬레이션 비교

▪ 시험은 목표속도 25km/h로 실행되었으며 대차는 모터카에 의해 가속되어 탈선유도장치에 의해 탈선하였다. 속도 센서에 의해 계측된 속도는 27km/h이며 시뮬레이션 속도도 실제 측정된 시험속도와 동일하게 27km/h를 초기속도로 대입하였다.

▪ 실제 탈선시험은 400ms에서 앞 차륜과 왼쪽 3번 침목이 처음으로 충돌 후 반력에 의해 튕겨나가 일정거리를 진행한 후 뒷 차륜이 4번 침목과 충돌하게 된다.

▪ 시뮬레이션도 동일하게 400ms 부근 앞 차륜과 왼쪽 3번 침목이 첫 충돌을 하게 되고 반력에 의해 튕겨나가 일정거리를 진행하지만 그림 2.6.15과 같이 뒷 차륜이 4번이 아닌 3번 침목에 먼저 충돌하게 된다.

▪ 주강대차의 볼스터 스프링이 시뮬레이션 상 생략하여 모델링 하였고 레일체결장치들로 이루어진 실제 침목과 달리 시뮬레이션은 형상이 단순한 강체로 표현하여 충돌거동

의 차이가 약간 발생한 것으로 판단된다.

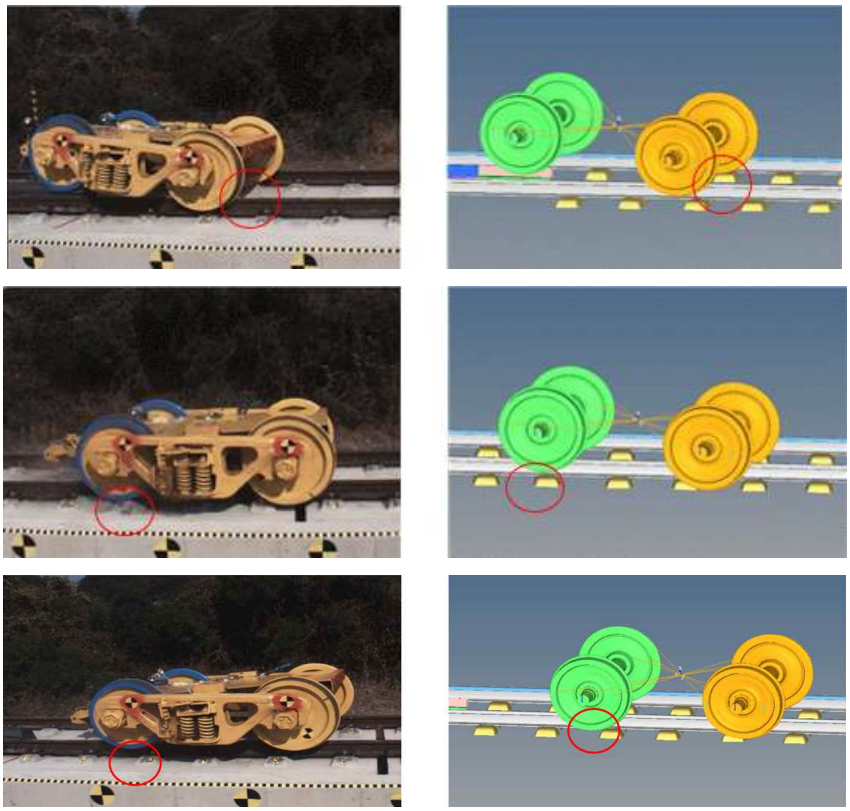


그림 2.6.15 실험대차 충돌거동 비교

▪ 정면에서 본 대차의 거동은 (그림 2.6.16) 에 나타냈으며 일정거리 이동 후 왼쪽 차륜이 레일 안쪽 15번 침목과의 충돌을 시작으로 30번 침목까지 충돌하며 진행하다가 침목 빗면에 의해 다시 방향이 바뀌고 궤도 높이차에 의해 가이드 되어 진행하다 정지하게 된다.

▪ 실제 시험에서는 대차의 차륜이 레일에 닿지 않고 침목 위를 지나가게 되나, 시뮬레이션에서는 차륜과 레일이 부딪히는 현상을 확인 할 수 있음. 이는 레일 구성품인 고정볼트와 클램프가 레일 쪽으로 진행하는 차륜을 막아 실제 시험과 시뮬레이션이 차이가 발생한 것으로 판단된다.

▪ (그림 2.6.17)은 가속도 센서에 의해 계측된 가속도를 적분하여 얻은 속도와 시뮬레이션의 속도 그래프를 비교한 것으로 탈선시험과 시뮬레이션 모두 유사한 감속곡선이 나온 것을 확인할 수 있다.

▪ 가속도 계측을 통한 진행거리 그래프는 (그림 2.6.18)에 나타냈으며 시뮬레이션과 실제 탈선시험 모두 매우 유사한 곡선이 나온 것을 확인할 수 있다. 이는 시뮬레이션이 실제 탈선시험과 유사한 거동을 보임을 그래프를 통해 확인할 수 있으며 대표모델을 통한 탈선 시뮬레이션이 탈선거동을 잘 모사하고 있는 것으로 판단된다.

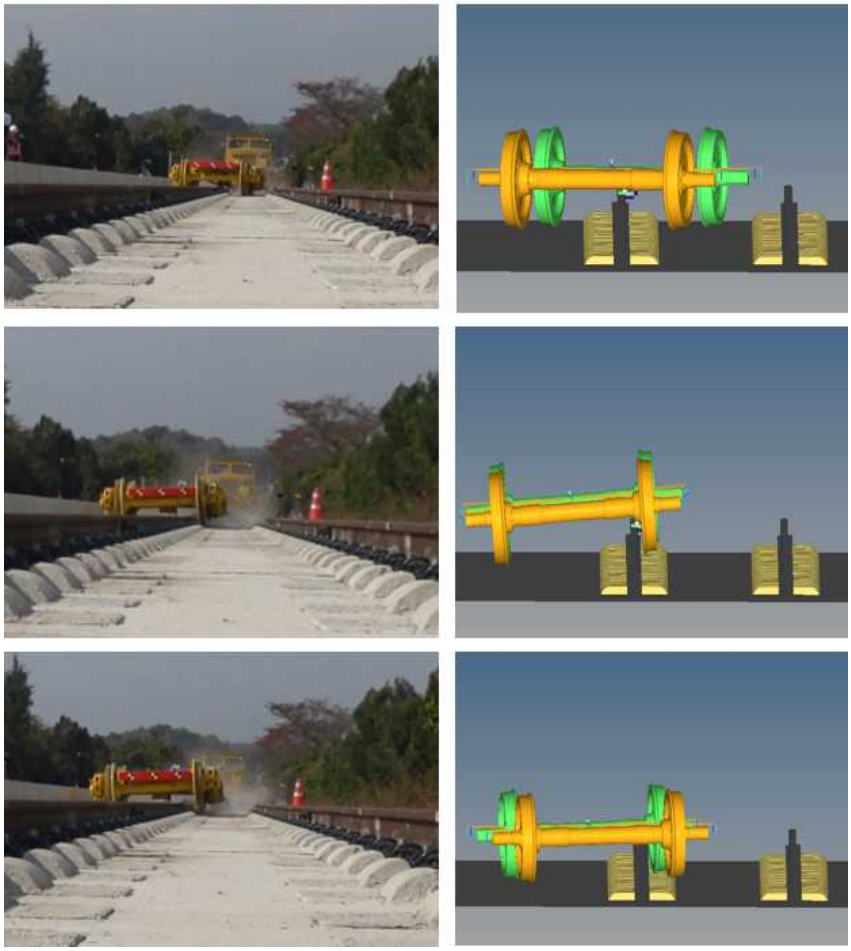


그림 2.6.16 정면카메라 거동 비교

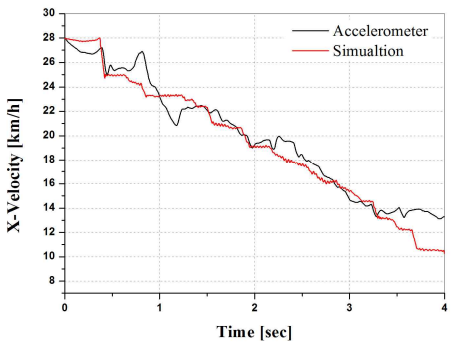


그림 2.6.17 가속도센서로 측정된 진행방향 (Longitudinal) 속도 비교

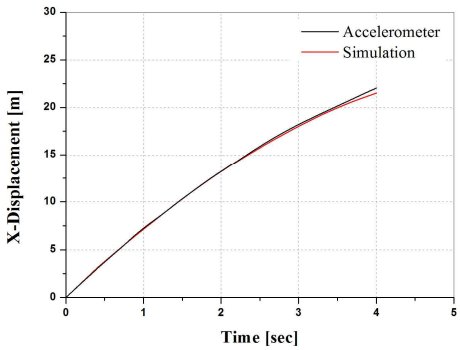


그림 2.6.18 가속도 센서로 측정한 진행거리 (Longitudinal) 비교

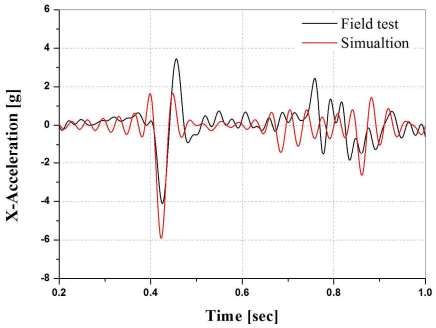


그림 2.6.19 두 번째 충돌을 포함한 진행방향 (Longitudinal) 가속도 비교

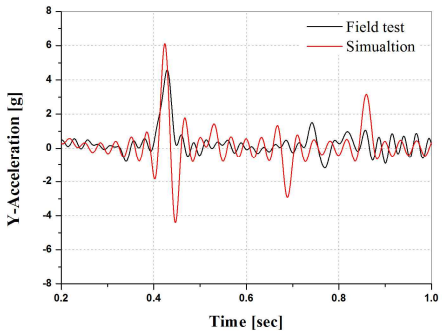


그림 2.6.20 두 번째 충돌을 포함한 횡방향 (Lateral) 가속도 비교

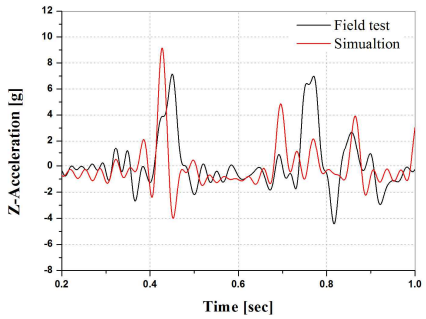


그림 2.6.21 두 번째 충돌을 포함한 수직방향(Vertical) 가속도 비교

▪ 실제 탈선시험과 시뮬레이션 모두 400~450ms 부근에서 첫 충돌이 발생함을 가속도 비교를 통해 확인할 수 있다. 첫 충돌가속도 크기를 보면 실제 시험이 시뮬레이션보다 가속도가 큰 것을 확인할 수 있는데 실제 궤도 구성품은 대차와 충돌 시 변형, 파손이 일어나 에너지를 흡수하지만 시뮬레이션에서는 궤도 구성품을 강체로 모델링하여 에너지가 흡수 되지 않기 때문으로 판단된다.

▪ 첫 번째 충돌 부근에서는 시뮬레이션이 실제 탈선시험과 유사한 경향성을 보이는 것을 확인할 수 있다. 두 번째 충돌의 경우 탈선시험은 뒷 차륜이 4번 침목에 충돌하게 된다. 하지만 시뮬레이션은 뒷 차륜이 3번 침목에 먼저 충돌한다. 이 차이는 대표모델과 시험대차의 현가장치 구조 차이와 첫 번째 충돌 시 실제 탈선시험은 침목의 파손이 일어나지만 시뮬레이션은 강체로 표현하여 파손이 발생하지 않아 거동에 영향을 미친 것으로 판단된다.

▪ 궤도 구성품인 침목을 강체로 표현할 경우 충돌 시 파손이 일어나지 않기 때문에 대차의 차륜이 충돌하는 3번과 4번 침목만 Ls-Dyna가 제공하는 콘크리트 모델인 159 Mat_CSCM_CONCRETE 물성을 사용하여 해석을 진행하여 비교하였다.

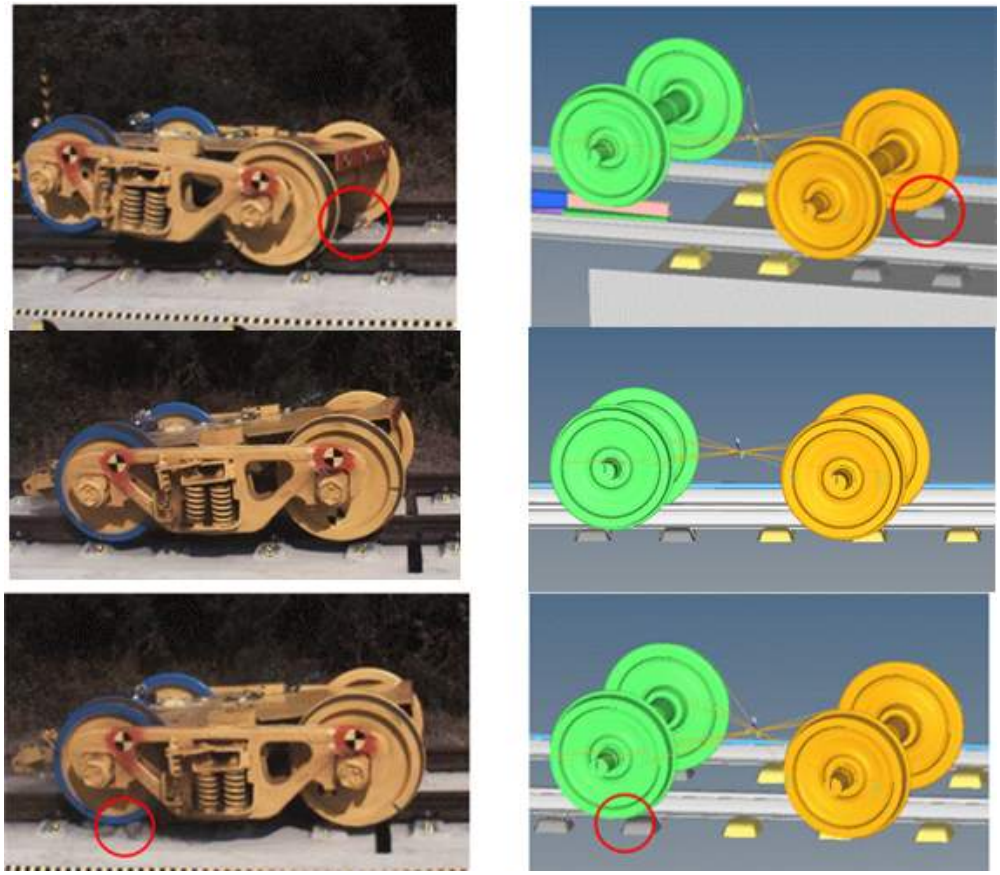


그림 2.6.22 Concrete Sleeper Model 충돌 거동 비교

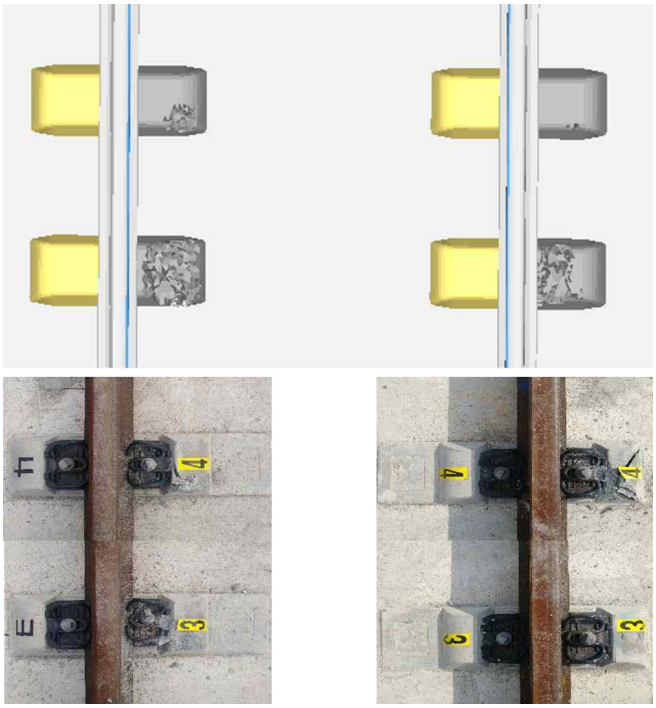


그림 2.6.23 시뮬레이션&시험 파손 침목 비교

▪ 콘크리트 물성을 대입한 후 해석결과 첫 충돌거동은 (그림 2.6.22)에 나타냈으며 강체 모델과 동일하게 3번 침목에 충돌한 후 일정거리를 진행하고 뒷 차륜이 3번과 4번 침목과 충돌하게 된다. 실제 시험에서 두 번째 충돌은 뒷 차륜이 3번 침목을 스치듯 지나가며 4번 침목에 충돌하게 된다.

▪ 시뮬레이션의 경우 3번 침목에 충돌하며 진행 후 4번 침목에 충돌하게 됨. 이는 클램프와 고정볼트로 구성되어있는 실제 침목과 단순형상으로 표현한 시뮬레이션의 모델링 높이 차이에서 발생하는 문제로 판단된다.

▪ (그림 2.6.25~2.6.27)는 대차와 충돌하게 되는 3,4번 침목만 Ls-Dyna에서 제공하는 콘크리트 재료인 Mat159를 대입하여 해석한 결과 가속도 비교이다. 가속도 그래프를 보면 강체로 표현한 모델보다 실제 가속도와 유사한 크기의 가속도가 발생하는 것을 확인할 수 있다.

▪ 충돌 순간과 가속도 크기는 유사하나 가속도의 경향이 약간의 차이가 발생한 것을 확인할 수 있는데 이는 가속도 계측과 모터카와 연결을 위해 설치한 플레이트가 영향을 미쳤을 것으로 보인다. 또한 가속도 센서가 볼스터 프레임 위에 부착이 되어있어 현가장치의 특성의 영향을 받게 되기 때문에 단순화 모델과의 완충, 감쇠 특성 차이에 의한 가속도 차이가 발생할 수 있다.

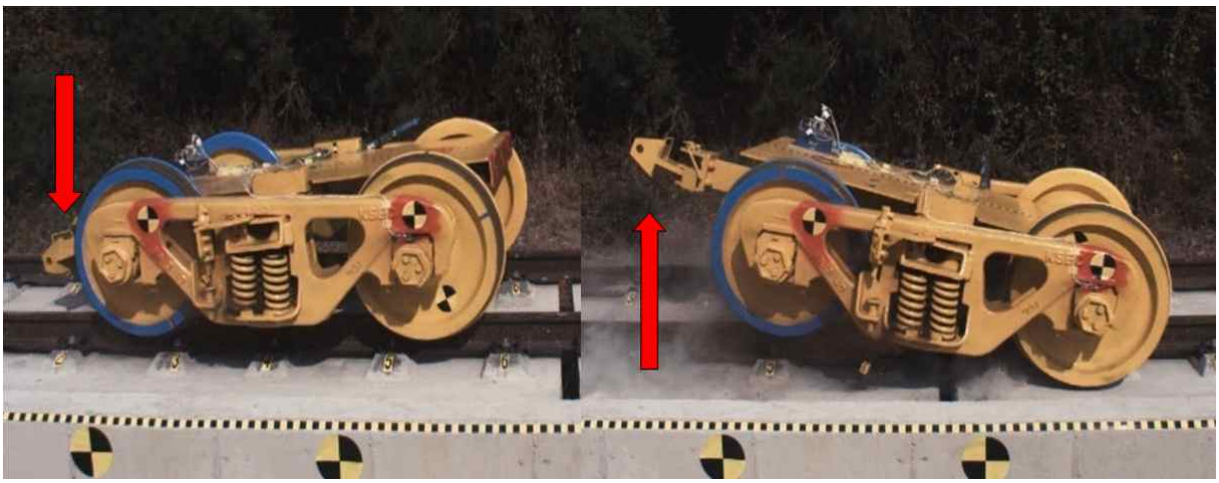


그림 2.6.24 충돌 후 대차에 설치된 연결기 하중에 의한 볼스터 프레임 모멘트 발생

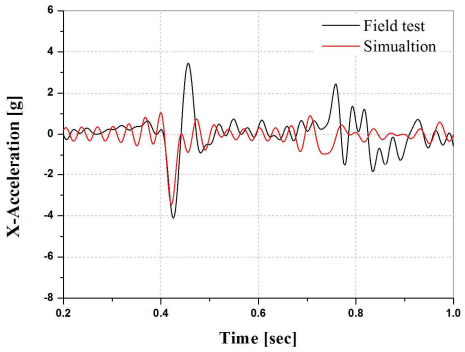


그림 2.6.25 두 번째 충돌을 포함한 진행방향 (Longitudinal) 가속도 비교(Mat159 모델)

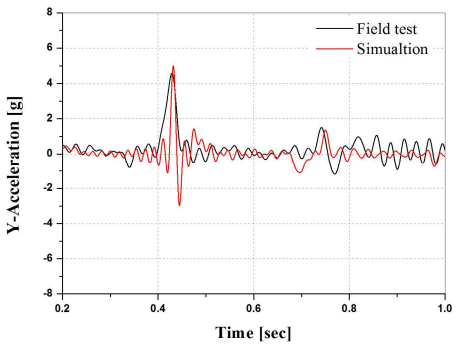


그림 2.6.26 두 번째 충돌을 포함한 횡방향 (Lateral) 가속도 비교(Mat159 모델)

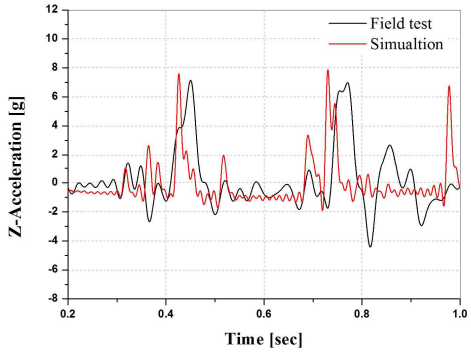


그림 2.6.27 두 번째 충돌을 포함한 수직방향 (Vertical) 가속도 비교(Mat159 모델)

▪ 시험대차 구매 문제로 인한 대표모델과의 현가장치 구조차이, 시험대차 연결기 부착 등으로 인해 시뮬레이션과 시험을 완전하게 일치시키기에는 무리가 있지만 침목을 강체로 표현한 모델보다 Mat159를 사용하여 콘크리트 특성을 대입할 경우 실제와 유사한 충돌거동이 발생함을 시뮬레이션 비교를 통해 확인할 수 있었다.

(4) 차량 단위 탈선 실험.

(가) 실험화차 모델링

▪ 이전 연구에서는 barber형 주강대차를 사용하였으나 단순화에 어려움이 있기 때문에 본 연구에서 고속열차대차와 같은 구조를 가지고 있는 용접대차로 변경하여 단순화 차량모델을 검증하였다. 용접대차는 고속화에 어려움이 있는 기존 barber형 주강대차의 주행성능을 보완하기 위하여 개발되었으며 1996년부터 적용되고 있다.

▪ 용접대차의 현가스프링 특성은 한국철도기술연구원의 대차 메카니즘 설계 최적화 분야 [8] 연구보고서를 참고하였으며 표 2.6.6은 용접대차 현가장치 제원을 나타낸다.

▪ 시뮬레이션 모델링 시 Inner coil spring과 Outer coil spring을 1개의 Beam element

로 모델링 하였으며 일정 하중이 들어오면 Inner coil spring 작용하도록 등가스프링 모델로 구성하였다.

표 2.6.6 용접대차 현가장치 제원

Specification of Coil Spring (스프링 제원)		
	외측	**내측**
스프링 상수	42.35kg/mm	76.38kg/mm
밀착고	155mm	138mm
자유고	270.1mm	228mm

▪ 실험대차의 정확한 형상 모델 구하는데 어려움이 있어 Y25 대차모델을 사용하여 대차의 동역학적 특성을 추정하였다. 그림 2.6.28 은 동역학적 특성을 추정하는데 사용한 대차모델이며 실험대차의 기본 모델인 유럽의 Y25대차에서 실험대차에 맞게 구조를 약간 수정한 모델이다.

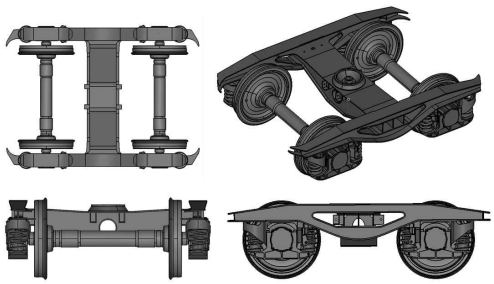


그림 2.6.28 상세 용접대차 모델

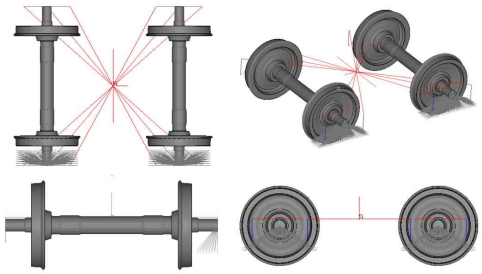


그림 2.6.29 단순화 용접대차 모델

▪ 그림 2.6.29 은 단순화된 용접화차대차이며 대차의 프레임이 레일과 충돌하여 탈선 거동에 영향을 받기 때문에 프레임위치에 절점을 생성하여 프레임과 레일의 접촉이 발생하도록 모델링하였다.

▪ 실험에 사용한 화차는 컨테이너를 운송하는 화차로 기존 사용되는 화차 차체 프레임이 아닌 실험을 위해 따로 제작한 화차 차체 프레임을 사용하였다. 프레임의 기본 철골 구조는 200mm H빔을 사용하여 제작하였다. 그림 2.6.30은 실험을 위해 제작된 화차 프레임이며 크레인으로 무게를 측정한 결과 약 5톤으로 확인되었다.



그림 2.6.30 탈선 실험용 차체 프레임

▪ 현장 측정과 업체 간략도를 참고로 유한요소로 모델링 하였으며 모델링을 토대로 회전관성모멘트 및 무게중심을 추정하였으며 회전관성모멘트는 표 2.6.7 에 나타내었다.

표 2.6.7 차체프레임 회전관성모멘트

moment of inertia of freight car body frame (화차 차체 프레임 관성모멘트)	
무게(kg)	약 5000
Ixx(kg • m^2)	4166
Iyy((kg • m^2)	58835
Izz(kg • m^2)	62610

▪ 차체 프레임은 탈선 후 궤도나 주변 구조물과 충돌하지 않으므로 단순화 모델로 구성 시 따로 형상을 추가 모델링 하지 않아도 된다. 차체 프레임의 대차와 동일한 개념으로 형상정보로 추정한 무게중심 위치에 질량, 회전관성모멘트를 대입하여 1개의 강체 Beam으로 모델링하였다.

▪ 단순화 모델 연결을 위해서는 실제 열차의 대차, 차체 간 연결 구조를 파악해야한다. 본 연구에서 사용한 화물열차는 2차 현가장치가 없으며 대차프레임과 차체간의 지지는 구면형 센터피폿과 접촉식 사이드베어러를 사용한다.

▪ 차체 대차 연결 시 회전운동 자유도를 허용하였으며 직선운동 자유도는 구속하여 모델링하였다. 사이드베어러는 Beam을 사용하여 모델링하였으며 차체가 심한 롤 운동 시 일정 변위를 넘어서면 변위를 제한해야하므로 일정길이 이상 압축되면 더 이상 압축되지 않도록 강체처럼 강성을 강하게 대입하여 모델링하였다.

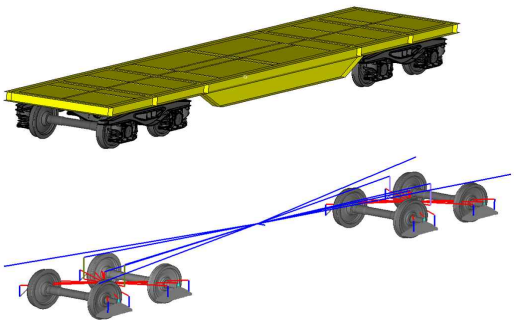


그림 2.6.31 상세차량모델과 단순화차량모델 비교

(나) 콘크리트 궤도 모델

▪ 이전에 진행된 연구에서는 탈선유도장치를 사용하여 차량을 탈선 시켰으나 속도가 증가함에 따라 대차의 차륜이 유도장치와 충돌 후 수직방향으로 튀어 오르는 현상이 발생하여 탈선 방법을 새롭게 고안하였다.

▪ (그림 2.6.32) 은 강제로 탈선을 일으키기 위해 고안된 탈선유도 레일 사진이다. 왼쪽 곡선 레일이 궤도 안쪽으로 진행되며 왼쪽 차륜에서 횡력을 발생시켜 오른쪽으로 차량을 탈선 시키게 된다.



그림 2.6.32 새로 고안된 탈선유도레일

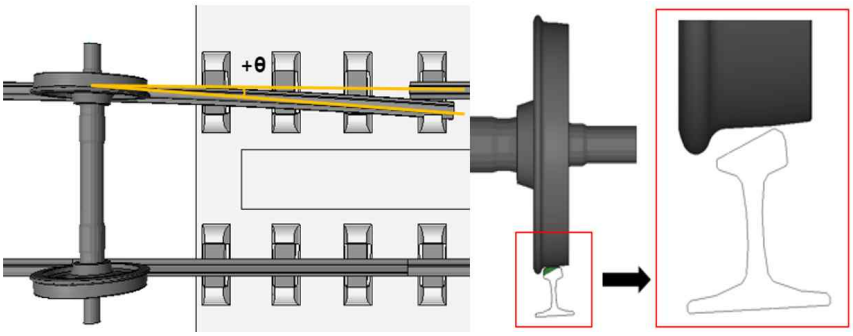


그림 2.6.33 탈선유도레일 공격각 및 가공위치

▪ 타고오름 탈선은 차륜이 +공격각에 의해 발생하는 탈선임. 고안된 탈선유도레일은

차륜이 곡선 레일에 진입 시 진행하는 왼쪽 차륜에서 (그림 2.6.33)처럼 왼쪽 차륜의 + 공격각이 발생하여 차륜이 왼쪽 곡선레일을 타고올라 횡 방향으로 탈선하지 않고 관성에 의해 운동하던 방향으로 탈선하여 진행할 가능성이 높다.

▪ 진행하는 차륜이 곡선레일에 의해 횡력이 발생했을 때 오른쪽 차륜과 레일이 접촉하여 반력이 생기게 되며 횡방향 저항력이 생길 경우 곡선에 의해 생긴 공격각에 의해 왼쪽 레일로 타고오를 가능성이 높기 때문에 오른쪽 레일을 (그림 2.6.33)처럼 가공하여 플렌지와 레일에 반력이 발생하지 않고 차륜의 플랜지가 레일을 부드럽게 타고올라 탈선하도록 유도하였다.

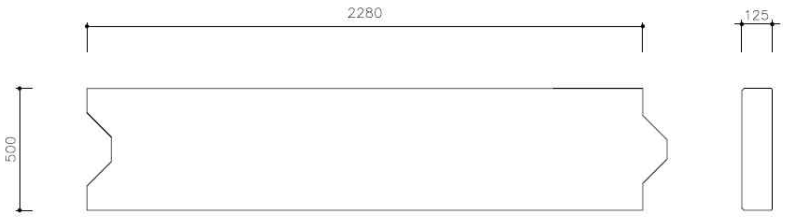


그림 2.6.34 DCP 간략 치수

▪ 대차실험과 다르게 차량단위 실험에서는 일탈방호시설이 설치된 상태로 실험이 진행되며 궤도에 설치되는 Type1 DCP는 현재 연구 중인 일탈방호시설로 본 실험에서는 일탈방호효과를 알아보기 위해 설치하였다. DCP 자체 높이는 125mm 이지만 궤도에 설치될 경우 TCL 층을 포함하여 140mm의 높이를 갖는다.

▪ (그림 2.6.35)은 모델링된 탈선실험장 궤도를 나타내며 불필요한 해석 시간을 단축하기 위해 탈선 실험 후 결과를 토대로 차량이 실제로 충돌하는 침목과 그 주변 침목만 CSCM_CONCRETE_콘크리트 물성을 적용하였고 충돌이 발생하지 않는 부분들은 강체로 모델링 하였다. DCP도 충돌이 발생하는 구간을 포함한 약 7.2m 길이만 철근 보강 콘트리트를 적용하였으며 나머지 구간은 강체로 모델링하였다.

▪ 탈선 후 거동을 파악하기 위해서는 충분한 길이와 시간이 필요하기 때문에 궤도는 약 25m 길이로 모델링 하였다.

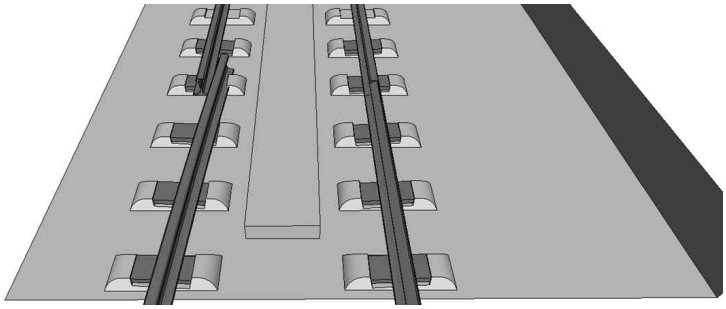


그림 2.6.35 콘크리트 궤도 모델링

(다) 실제 시험과 시뮬레이션 비교

▪ 시뮬레이션은 탈선 직전 시작하여 2000ms 동안 진행하였으며 측정된 51.16km/h를 초기 속도로 대입하였다. 탈선 후 첫 번째 충돌은 약 350ms에 발생하였으며 전두부 대차 앞차륜과 7번 오른쪽 침목과 충돌한다.

▪ (그림 2.6.36)은 고속카메라와 실험대차에 설치한 액션카메라로 촬영한 영상으로 충돌 위치를 비교한 결과 7번 침목에서 동일한 위치에서 충돌이 발생하는 것을 확인하였다.

▪ 두 번째 충돌은 앞 차륜이 7번 침목과 충돌한 후 진행하며 8번 침목과 충돌함. 그 후 차륜이 진행하며 설치된 DCP와 충돌하게 된다.

▪ 차륜은 탈선 후 횡방향으로 진행하다 DCP에 의해 횡방향 변위가 제한되어 일정거리 이상 궤도에서 벗어나지 않게 된다. DCP와 충돌 순간은 (그림 2.6.37)에 나타냈으며 동일한 위치에서 DCP 충돌이 발생함을 확인하였다.

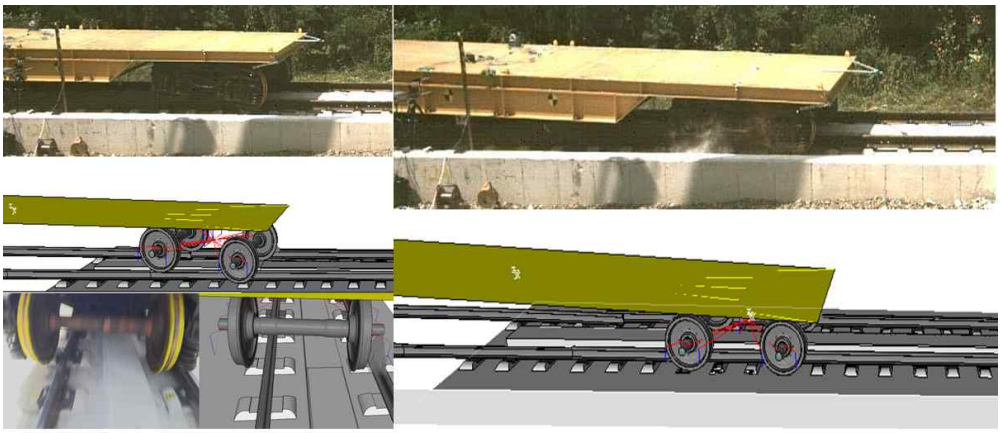


그림 2.6.36 탈선실험과 시뮬레이션 첫 충돌 위치 비교

▪ 뒷 차륜도 동일한 거동을 보이며 7번 침목과 충돌 후 8번 침목으로 진행한 뒤 DCP와 충돌함. 충돌 후 DCP에 가이드 되어 일정거리를 진행하며 후미 대차가 탈선한다.

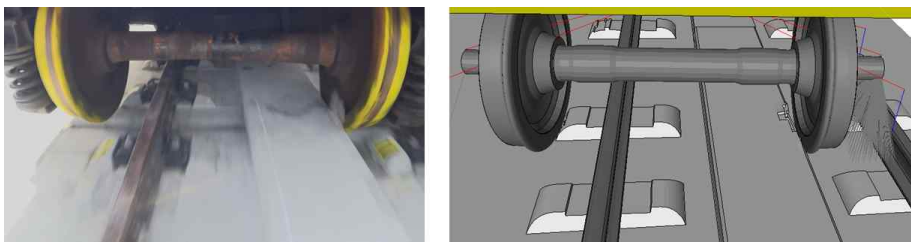


그림 2.6.37 탈선실험과 시뮬레이션 DCP 충돌 위치 비교

▪ 실제 탈선실험에서는 차륜이 충돌한 7번 8번 침목에서 파손이 발생하였음. DCP 파

손은 9-12번 침목 앞 탈선 후 차륜과 충돌하는 과정에서 대부분의 파손이 발생하였으며 시뮬레이션에서도 차륜과 충돌하는 9-12번 침목 앞에서 파손이 발생하였다.

▪ 실제 실험과 시뮬레이션 사이에 파손 정도의 차이는 있으나 유사한 위치에 파손이 발생한 것으로 보아 실험과 시뮬레이션의 충돌 위치가 잘 재현되었음을 확인하였다.

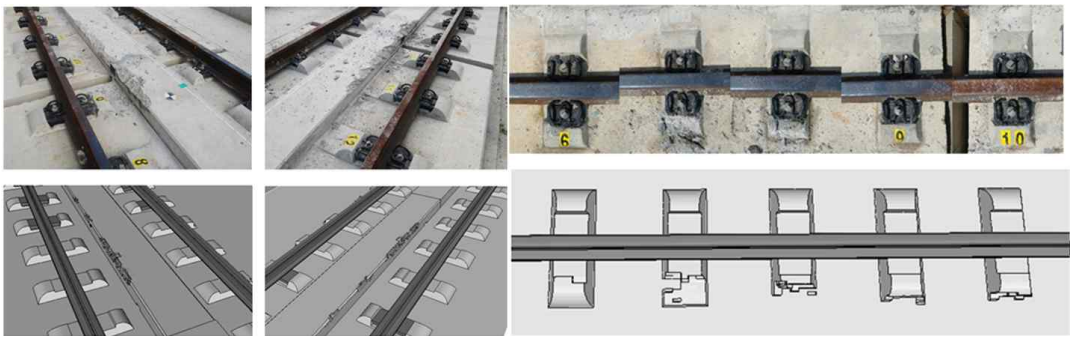


그림 2.6.38 탈선실험과 시뮬레이션 후 궤도 파손위치 비교



그림 2.6.39 실험차량 타겟마크 위치

▪ (그림 2.6.39) 은 상면 고속카메라 영상 촬영 사진이며 고속카메라 영상분석을 통해 탈선하는 열차의 횡변위와 진행거리를 추적하였다. 타겟마크는 차체 프레임 중앙과 전두부 대차 위에 부착을 하였으며 타겟마크를 기준으로 추적을 하였다.

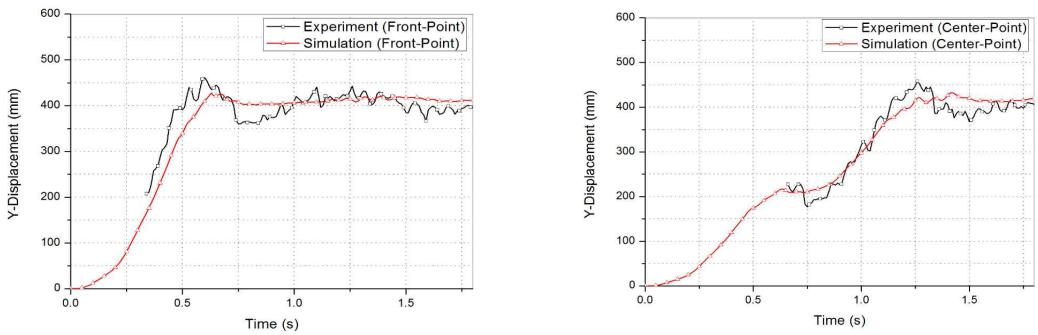


그림 2.6.40 실험과 시뮬레이션 횡방향 변위 비교 (Center Point)

▪ 시뮬레이션과 탈선실험의 횡변위를 비교한 사진은 그림 2.6.41~2.6.42 에 나타냈으며 초기 고속카메라의 횡변위가 측정되지 않은 것은 고속카메라에 케이블이 오른쪽 시야

를 가렸기 때문이다. 이후 그래프의 경향을 볼 경우 시뮬레이션과 탈선실험이 동일한 경향의 횡변위가 발생했음을 확인 할 수 있다.

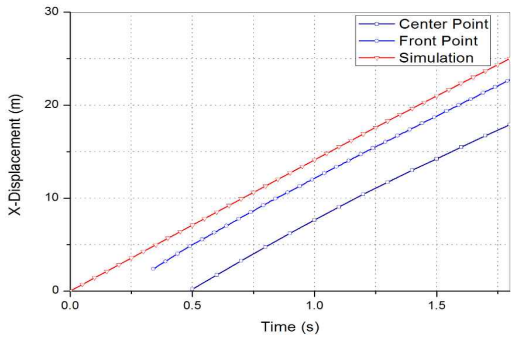


그림 2.6.41 실험과 시뮬레이션 진행방향 변위 비교

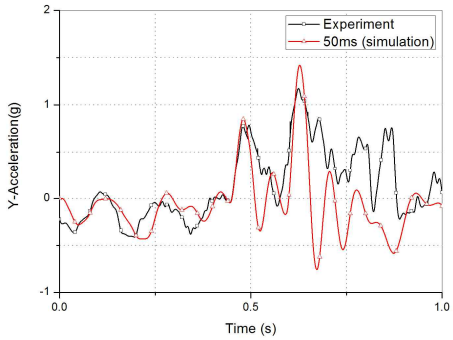


그림 2.6.42 실험과 시뮬레이션 횡방향 충돌가속도 비교

▪ (그림 2.6.41)은 진행방향 변위를 나타낸 그래프로 고속카메라의 추적이 시작되는 시점부터 측정이 되어 3개의 곡선이 쉬프트되어 나타났으나 동일한 기울기를 가지며 진행함을 확인하였다.

▪ 모델의 충돌가속도 비교는 초기 충돌 구간인 약 1s간 계측된 데이터를 비교하여 실제 실험과 시뮬레이션의 경향성을 비교하였다. 비교 결과 차륜과 DCP 충돌 순간 가속도의 경향은 동일하게 발생하였으며 시뮬레이션이 실험과 비교하여 동일한 시간대에 충돌이 발생함을 확인할 수 있다.

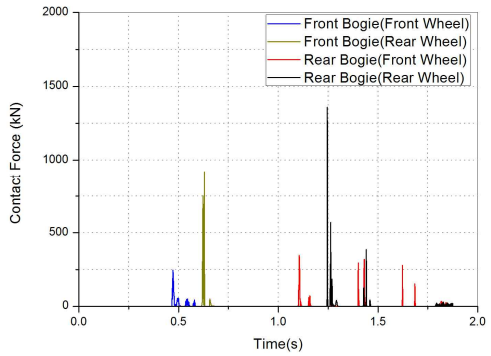


그림 2.6.43 시뮬레이션 차륜과 DCP 충격력

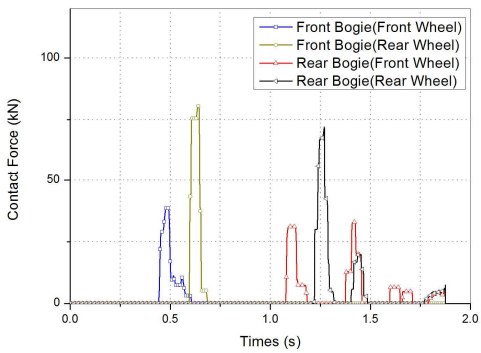


그림 2.6.44 필터링 후 차륜과 DCP 충격력

▪ 시뮬레이션을 통해 추정한 DCP 충격력은 (그림 2.6.43~2.6.44)에 나타냈으며 각 차륜의 최대 충격력을 나타낸 표로 4 번째 차륜과 DCP 충돌에서 1359 kN의 순간 최대 충격력이 나왔고 필터링 후 는 2번째 차륜과 충돌이 80 kN으로 가장 높은 충격력을 보였다. 따라서 4번째 차륜과의 충돌에서 순간적인 충격력으로 인해 DCP의 콘크리트 표

면에서 파손이 많이 발생할 것으로 판단되며 실제 탈선 실험 시에도 4번째 차륜에서 DCP 표면 파손이 가장 많이 발생하였다. 또한 필터링 후 충격력이 가장 높은 2번째 충돌에서는 DCP 구조에 영향을 가장 크게 미칠 것으로 판단된다.

표 2.6.8 시뮬레이션 DCP 차륜 충격력 비교

항 목	필터링 전	필터링 후
1차 충돌	245 kN	38 kN
2차 충돌	921 kN	80 kN
3차 충돌	346 kN	31 kN
4차 충돌	1359 kN	71 kN

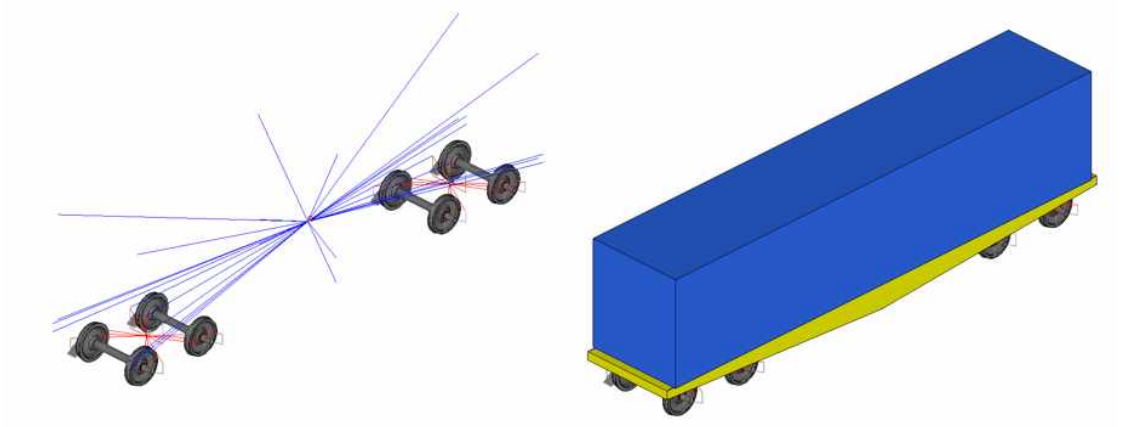
▪ 차량단위 탈선실험을 통해 단순화 기법을 적용한 차량 모델이 실제 탈선거동을 경향과 방호시설에 가해지는 충격력을 추정할 수 있음을 확인하였다.

▪ 4차 년도 탈선실험에서는 기존 차량 1량에 컨테이너를 추가하여 무게를 증가시켰다. 컨테이너 올린 실험차량은 그림2.2.45(a)와 같다.

▪ 실험차량의 특성이 변경되었으므로 단순화 모델의 특성치도 그에 맞게 변경해주어야 한다. 컨테이너를 추가한 특성치는 3D 형상 모델을 통해 추정하였으며 화물열차 프레임을 포함한 프레임은 그림 2.6.45(b)와 같으며 질량은 약 8500 kg으로 가정하였다.



(a) 컨테이너 실험 차량



(b) 컨테이너 차량 모델

그림 2.6.45 컨테이너 실험 차량 및 모델

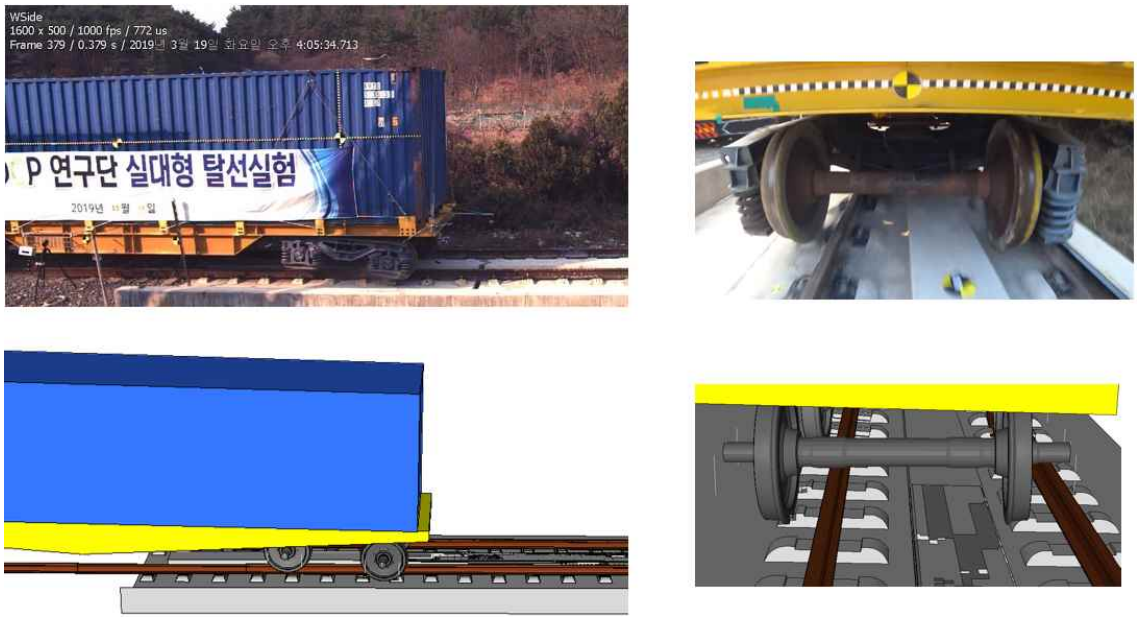


그림 2.6.46 탈선 후 첫 충돌

▪ 탈선 후 첫 충돌은 약 370 ms 시점에서 7번 침목과 발생하였다. 첫 충돌 순간은 (그림 2.6.46)에 나타냈으며 시뮬레이션과 비교하였다. 시뮬레이션에서도 동일하게 7번 침목과 첫 충돌이 발생하였으며 그 후 진행하며 뒷 차륜은 6번 침목과 충돌이 발생하게 된다.

▪ 6번 침목과 충돌하는 비슷한 시점에 진행하던 앞 차륜은 DCP에 충돌하게 된다. 충돌 위치는 9번 침목 앞이며 실제 차량이 시뮬레이션 보다 먼저 DCP 충돌이 발생하였다. 시뮬레이션의 경우 10번~11번 침목 인근에서 DCP와 첫 충돌이 발생하였다.

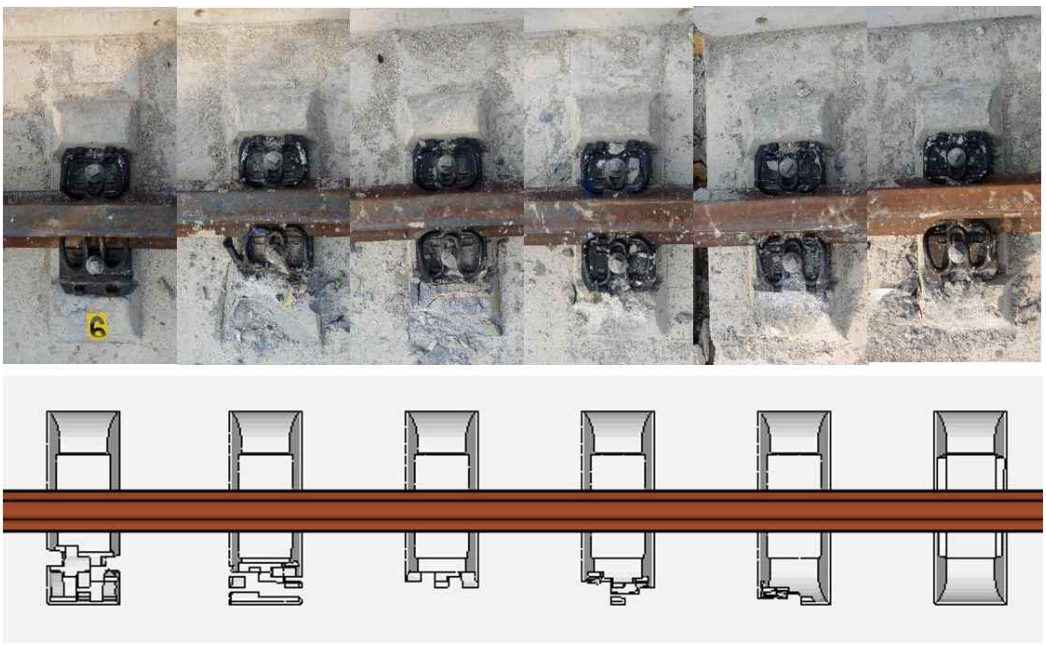


그림 2.6.47 침목 파손위치 비교

▪ 침목의 파손위치를 비교한 사진은 (그림 2.6.47)에 비교하였다. 실제 실험은 마지막 11번 침목에서 파손이 발생하였으나 시뮬레이션에서는 파손이 발생하지 않았다. 11번 침목을 제외하면 파손 경향은 거의 동일하게 나타난 것을 확인하였으며 차륜의 최초 충돌위치는 4개의 차륜 모두 잘 재현되었다. DCP의 파손을 비교한 사진은 (그림 2.6.48)에 나타냈다. 실제 실험은 9,10 번 침목 앞에서 발생한 것으로 확인할 수 있으나 시뮬레이션은 실험보다 약간 앞인 8번 침목 앞부터 파손이 발생하였다.

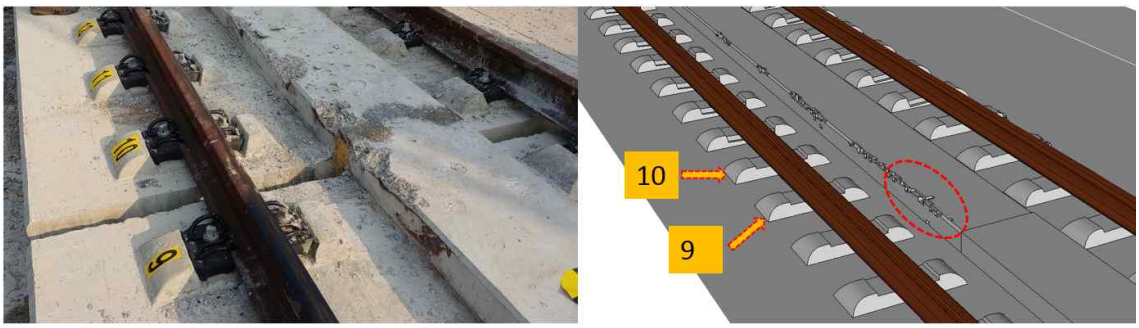


그림 2.6.48 DCP 파손위치 비교

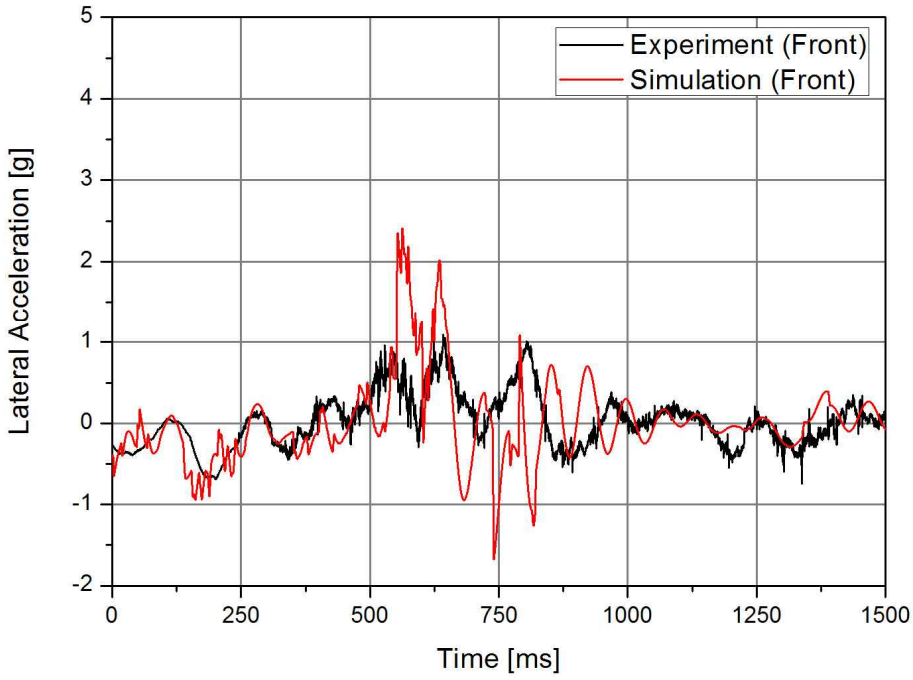


그림 2.6.49 횡 가속도 비교

○ (그림 2.6.49)는 컨테이너 내부 앞 대차의 중심위치에 계측된 가속도를 시뮬레이션과 비교한 것이다. 시뮬레이션에서는 대차 중심에서의 가속도를 추출하였다. 초반 500 ms까지는 실험과 시뮬레이션 비슷한 파형으로 진행하다 충돌이 발생하였다. 이때 시뮬레이션 가속도가 실제보다 큰 가속도가 발생하였으나 최대 가속도를 제외한 전반적인 가속도 경향은 매우 유사하게 나타난 것을 확인할 수 있다.

나. 탈선거동(충돌하중 등) 매개변수 분석 및 DCP 설계 시 고려할 대표조건 도출

(1) 연구 목표 및 필요성

▪ 열차에 탈선이 발생하는 경우 방호벽에 작용하는 충돌 하중은 실물실험을 통하여 산정하는 것이 가장 바람직하다. 하지만, 현실적으로 열차의 실물실험을 고속에서 수행하는 것은 어려우며 상세해석의 경우도 모든 연결된 열차를 모사하는 것은 상당한 노력이 필요하다. 따라서, 제한된 실험결과 혹은 해석결과를 사용하여 실물 열차의 충격하중을 합리적으로 산정할 필요가 있다. 이를 위하여 본 연구에서는 단순화된 '방호시설에 작용하는 탈선 열차 충돌 하중 산정을 위한 이론해석 기법'을 연구하였다.

▪ 이를 위하여 먼저 기존연구를 참고하여 열차의 탈선 거동을 모사할 수 있는 2차원 모델을 정립하고 탈선 후 거동에 대하여 연구를 수행한다. 이러한 연구를 통하여 탈선 거동에 미칠 수 있는 인자를 도출하고 탈선 후 거동 분석을 통하여 방호시설 설치 전·후의 영향을 간접적으로 파악할 수 있다. 또한, 단순화된 모델을 정립하여 탈선실험 및 3차원 시뮬레이션 전에 충돌 하중의 범위를 산정하고 방호시설의 초기 설계 시 활용할 수 있는 충돌 하중 산정식을 개발하는 것에 본 연구의 목표가 있다.

(2) 2차원 강체 시뮬레이션을 이용한 탈선 거동 분석

(가) 시뮬레이션 모델 정립

▪ 본 연구에서는 열차의 탈선 후 거동을 모사할 수 있는 강체 동역학 모델을 작성하였다. Coppens et al. [1]의 모델을 기반으로 2차원 탈선 후 거동을 모사할 수 있는 Fortran 프로그램을 작성하고 KTX 열차의 제원을 사용하여 탈선 후 거동을 살펴보고 탈선 거동에 영향을 미치는 인자에 대하여 변수해석을 수행하였다.

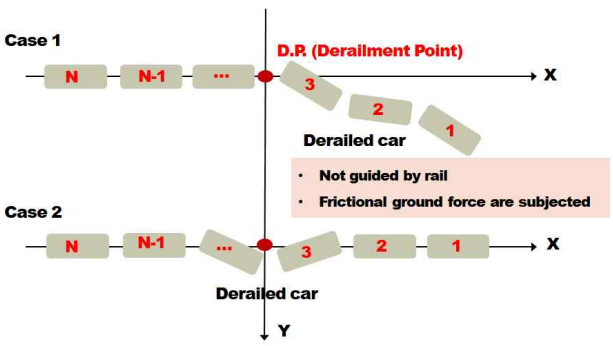
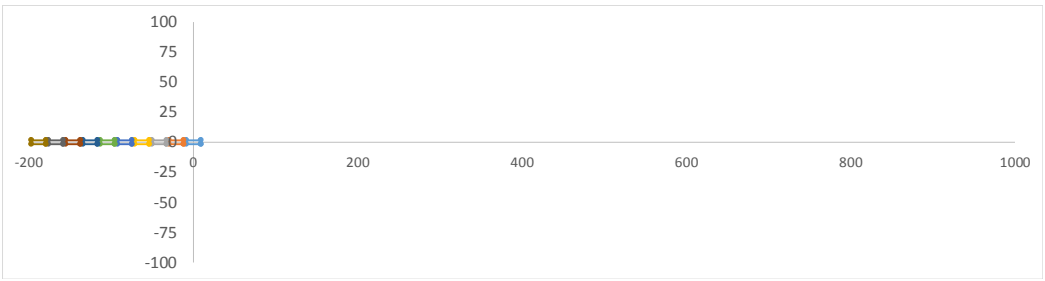


그림 2.6.50 열차의 탈선 Cases

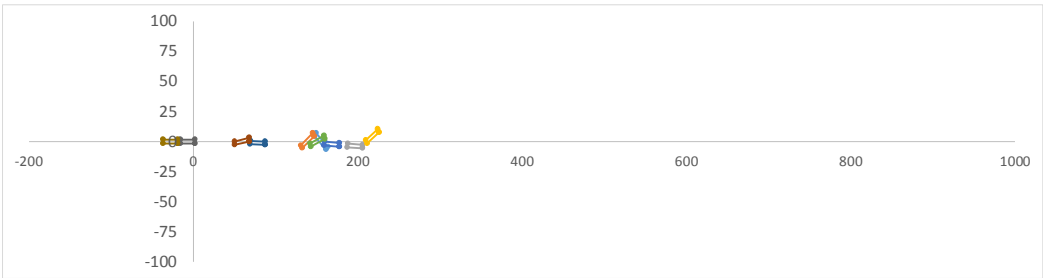
▪ 그림 2.6.50은 열차의 탈선 조건을 나타낸다. 열차의 탈선이 발생하는 지점을 그림 2.6.50과 같이 D.P. (Derailment Point)로 정의한다. 그림 2.6.50에서 Case 1은 선두 열차(1번 차량)가 D.P.를 지나면서 탈선을 하는 경우를 나타내며, Case 2는 선두 열차가 지나간 후 탈선이 임의의 중간 열차에서 발생 되는 경우를 나타낸다. 본 연구에서 열차의 진행 방향은 X축이며, Y방향은 열차의 진행 직각 방향을 나타낸다.

(나) 변수해석을 통한 탈선 거동 분석

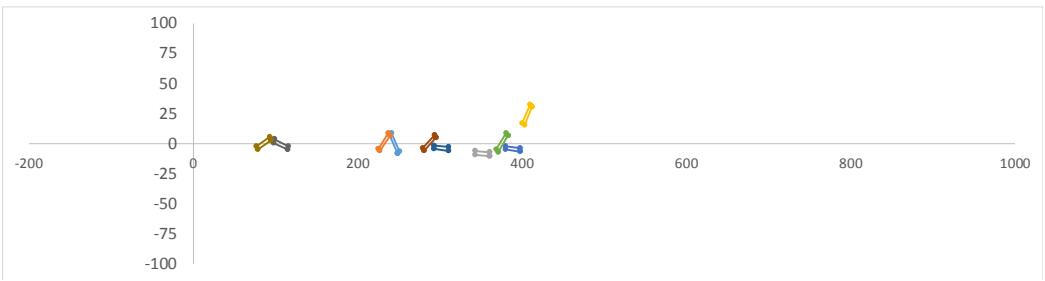
▪ 해석 변수로는 초기 탈선 각도, 탈선속도, 곡률반경을 설정하였다. 탈선 각도는 1°와 3°를 고려하였다. 탈선속도는 50 km/h와 200 km/h를 고려하였으며 곡률반경은 직선궤도와 곡률반경 1,000 m 두 가지 경우에 대하여 해석을 수행하였다.



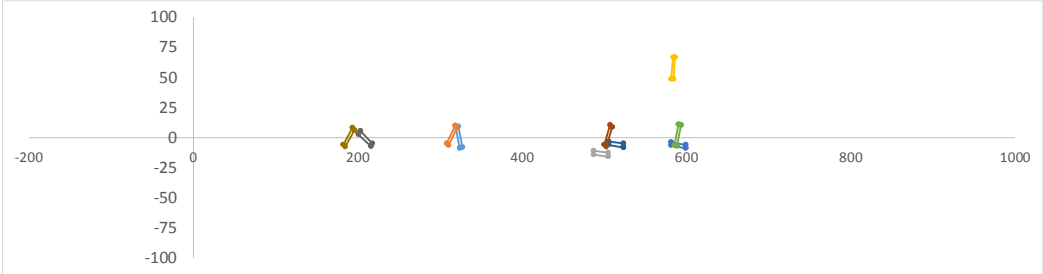
(a)



(b)

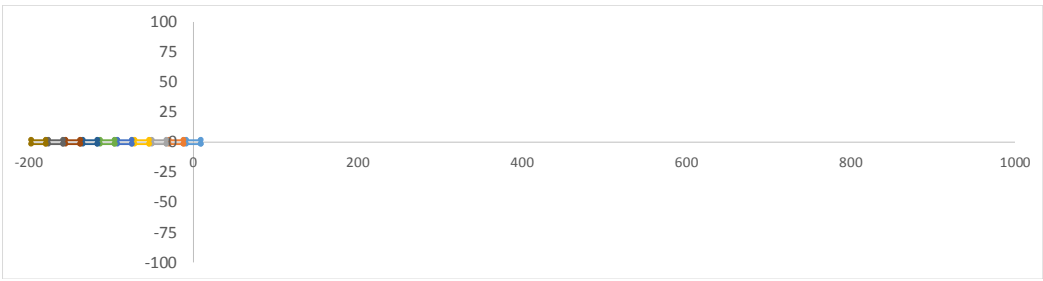


(c)

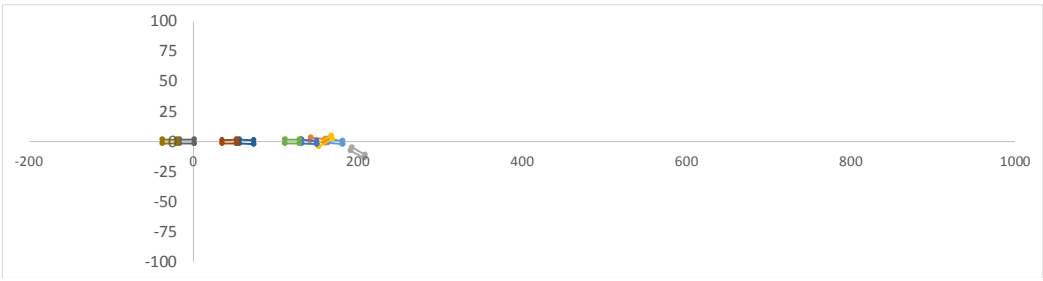


(d)

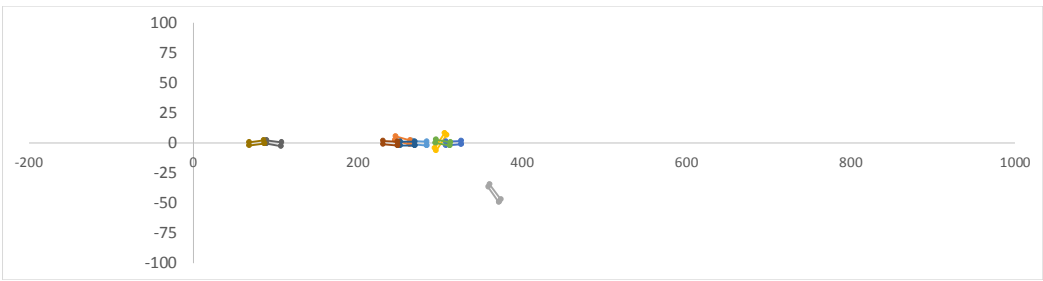
그림 2.6.51 속도=200km/h, θ=3°, 직선궤도: (a) 0.001sec; (b) 3sec; (c) 5sec; (d) 7sec



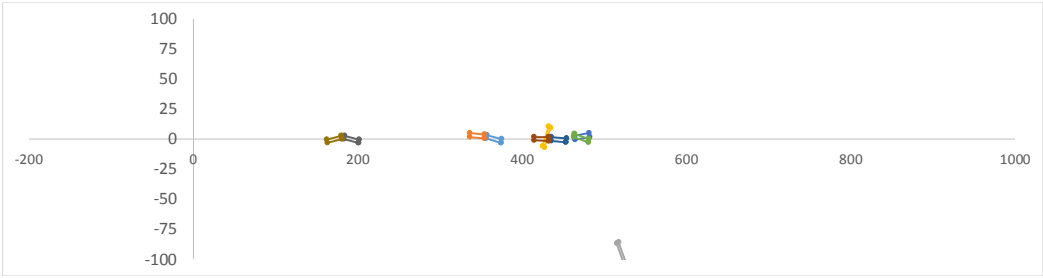
(a)



(b)



(c)



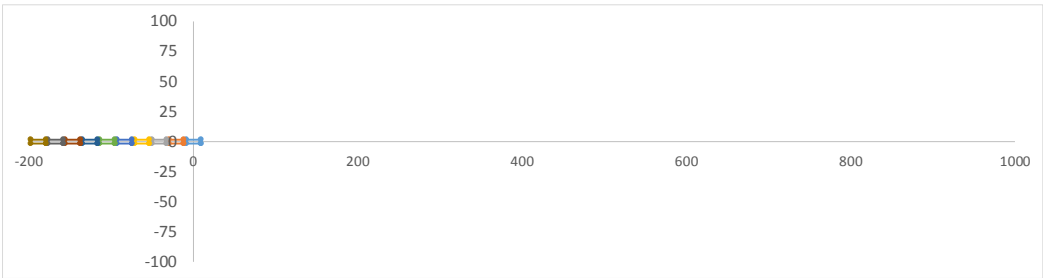
(d)

그림 2.6.52 속도=200km/h, θ=1°, 직선궤도: (a) 0.001sec; (b) 3sec; (c) 5sec; (d) 7sec

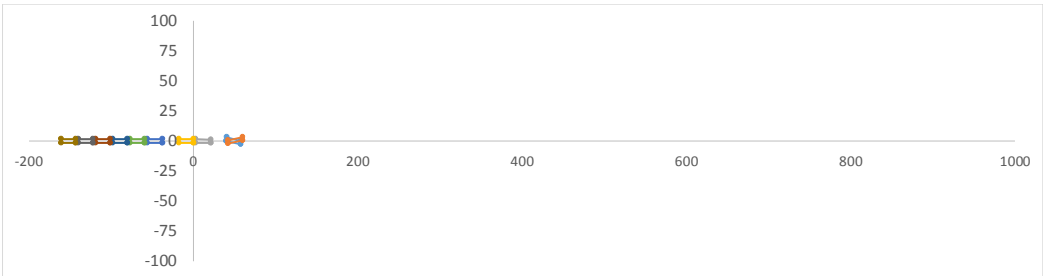
▪ 그림 2.6.51은 속도 200 km/h이며 탈선 각도가 3°, 직선궤도에서 열차가 탈선하였을 경우 시간대별로 탈선 후 거동을 나타낸 그림이다. 탈선 후 거동은 탈선 후 7 sec까지 분석하였다. 이때 탈선 후 종방향으로 이동한 거리는 약 600 m로 나타났으며 횡방향으로는 최대 75 m까지 열차가 이동하는 것으로 나타났다. 열차는 약 3 sec에서 탈선 열차들이 겹쳐지며 후미 열차와 분리되는 현상이 발생하였다. 그림 2.6.52은 속도는 200 km/h로 동일하나 탈선 각도가 1°로 작아지는 경우 탈선 후 거동을 나타낸다. 그림 2.6.51과 2.6.52을 비교하면 탈선 후 열차의 횡방향 이동이 초기 탈선 각도가 작은 경우보다 작게 나타나는 것을 알 수 있다. 또한, 같은 시간에서 종방향 이동도 보다 작은 것을 확인할 수 있다. 하지만, 여전히 열차들은 서로 분리가 되는 것으로 나타났다.

▪ 그림 2.6.53은 직선궤도에서 탈선 각도가 3°일 때 속도가 50 km/h로 줄어든 경우 탈선 후 거동을 보여준다. 그림 2.6.51과 2.6.53을 비교하면 탈선 초기속도 변화에 따른 탈선 후 거동을 알 수 있다. 이 두 그림에서 알 수 있듯이 탈선 후 7 sec까지 종방향 이동은 약 600 m에서 400 m로 감소하는 것을 알 수 있다. 또한, 열차의 최대 횡방향 이동거리는 200 km/h일 때 약 75 m에서 속도가 50 km/h로 줄어들면서 약 25 m로 줄어드는 것을 볼 수 있다. 따라서, 열차의 탈선 초기속도가 탈선 후 거동에 미치는 영향은 큰 것을 알 수 있다.

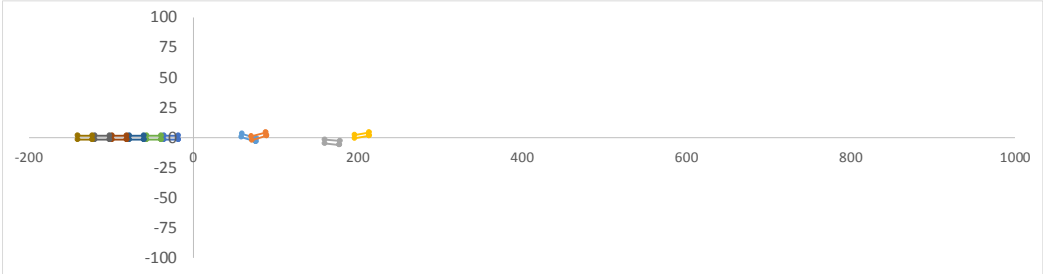
▪ 그림 2.6.52과 그림 2.6.54을 비교하였을 때 탈선 각도 1°일 때 탈선 초기속도의 영향을 파악할 수 있다. 이 그림에서도 알 수 있듯이 속도가 줄어들면서 종방향 및 횡방향 열차의 탈선 후 이동거리가 줄어들며, 특히 횡방향 이동이 크게 줄어든 것을 확인할 수 있다.



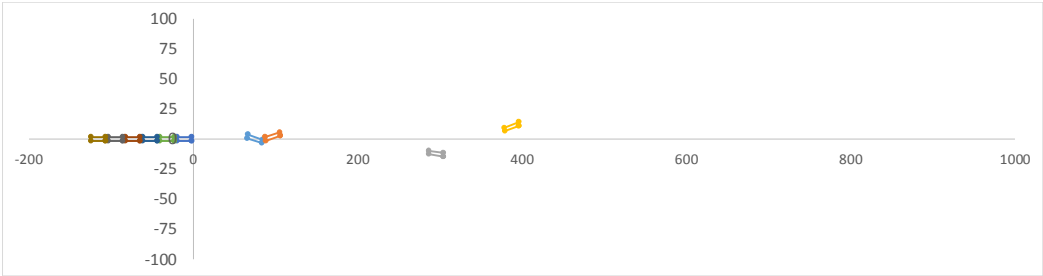
(a)



(b)

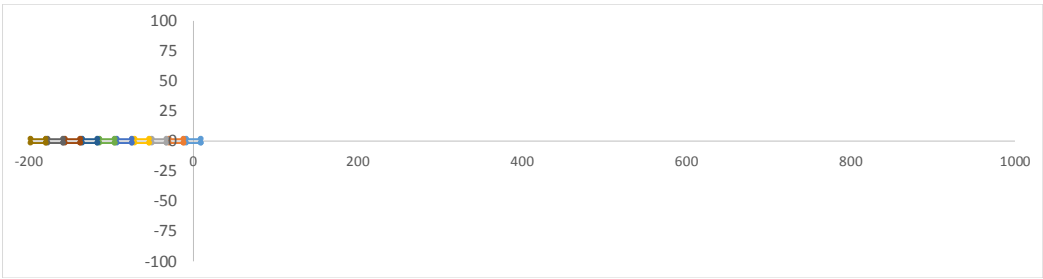


(c)



(d)

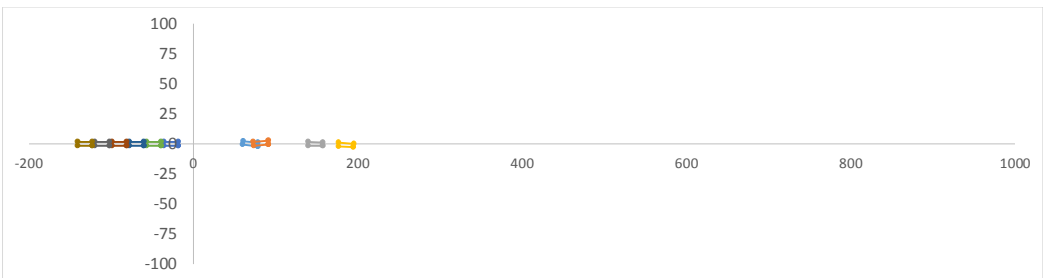
그림 2.6.53 속도=50km/h, θ=3°, 직선궤도: (a) 0.001sec; (b) 3sec; (c) 5sec; (d) 7sec



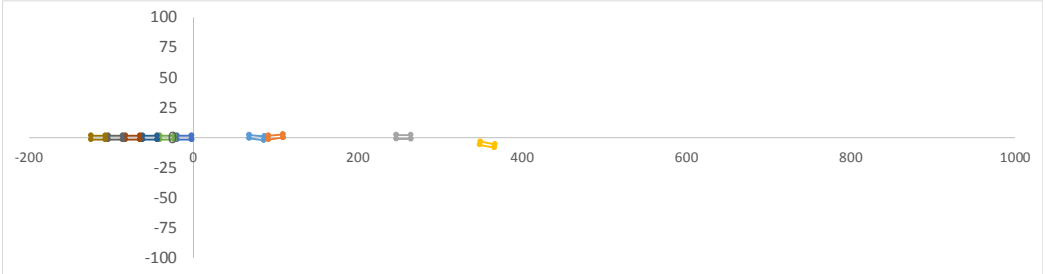
(a)



(b)

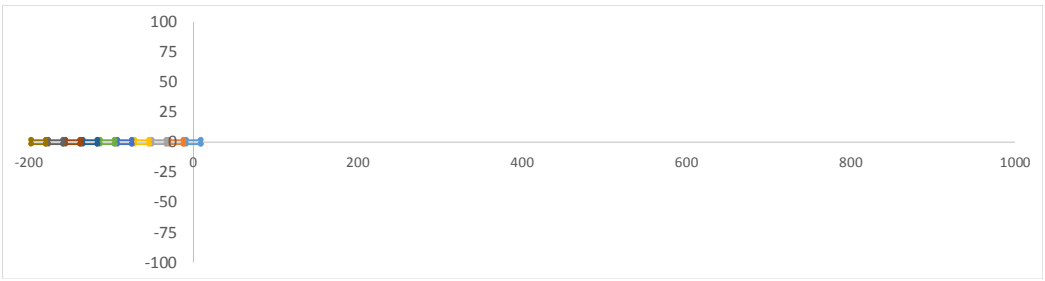


(c)

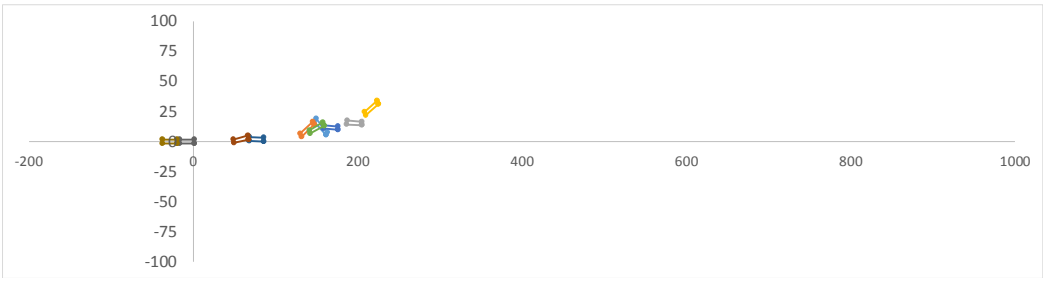


(d)

그림 2.6.54 속도=50km/h, θ=1°, 직선궤도: (a) 0.001sec; (b) 3sec; (c) 5sec; (d) 7sec



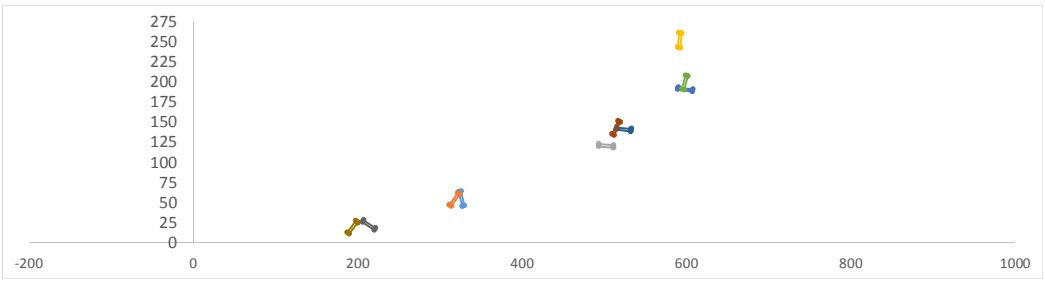
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 2.6.55 속도=200km/h, θ=3°, R=1,000m:
(a) 0.001sec; (b) 3sec; (c) 5sec; (d) 7sec

▪ 그림 2.6.51 - 그림 2.6.54은 모두 직선궤도에 해당하는 결과이다. 그림 2.6.55은 궤도가 곡률 1,000 m이고 속도 200 km/h, 탈선각도 3°일 때 탈선 후 거동을 보여준다. 따라서, 그림 2.6.51과 상호 비교를 통하여 곡률이 탈선 거동에 미치는 영향을 분석할 수 있다. 이 두 그림에서 곡률이 있는 경우는 탈선 후 열차의 횡방향 이동이 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. 직선궤도의 경우, 횡방향 이동이 약 75 m인 점을 고려하면 곡률이 1,000 m일 때는 횡방향 이동이 약 250 m까지 발생하였다. 두 경우 모두 종방향 이동 거리는 유사하였다.

▪ 위의 내용을 정리하면 탈선 각도 및 곡률은 탈선 후 열차의 횡방향 이동에 미치는 영향이 큰 것으로 나타났다. 또한, 속도가 감소할수록 탈선 후 종 및 횡 이동 거리가 줄어드는 것도 확인할 수 있었다. 따라서, 탈선 후 거동을 제한하기 위하여는 위험 구간의 곡률을 가급적 크게 하고 속도를 줄이며 탈선 각도를 최대한 작게 할 수 있도록 하는 것이 바람직하며 본 연구에선 개발하고 있는 DCP의 경우는 탈선 각도를 인위적으로 작게 만들어 탈선 후 거동을 제어하는 방법이다.

(3) 단순식을 활용한 DCP 충돌 하중 산정

(가) DCP 충돌 하중 산정식

▪ 기존연구를 활용하여 본 연구단에서 목표하고 있는 궤간 내 방호시설 (DCP)에 작용하는 충돌 하중을 이론적으로 정립하고자 한다. DCP에 대한 충돌 하중 산정은 기존연구에 나타나 있는 경우와는 다르다. 첫 번째로 기존연구는 방호벽에 열차의 차체가 충돌하는 경우지만 본 연구의 경우는 차륜이 방호시설에 충돌한다. 두 번째는 방호시설이 궤간 내 위치함으로 충돌까지 시간과 이동 거리가 방호벽에 비하여 짧다.

▪ 궤간 내 방호시설에 작용하는 최초 충돌 하중을 산정하기 위하여는 Layden [2]이 제안한 식을 활용할 수 있다. 하지만, DCP의 경우 적용되는 변수(감속도, α; 충돌 각도; 질량 참여율; 손상계수, d_G)에 대한 면밀한 검토가 필요하다.

▪ 최종적으로 탈선 열차의 초기 충돌 하중, F_G는

$$F_G = \frac{m_e(v_I \sin\theta)^2}{2d_G} \tag{2.2.1}$$

로 계산할 수 있다. 여기서, m_e는 열차의 유효질량, v_I는 초기 충돌 시 속도, $\sin\theta$는 충돌 각도이다. 이때 d_G는 실험 및 시뮬레이션 결과가 없는 경우 손상계수는 탈선속도에 비례한다는 가정을 통하여 적절히 선형적으로 증감하여 사용한다.

(나) DCP 충돌 하중 산정식 검증

▪ 본 연구에서는 제안된 식 (2.2.1)를 검증하기 위하여 연구단에서 수행된 실험결과를 사용하여 검증하였다. 식 (2.2.1)를 적용하기 위하여 손상계수 d_G는 충돌 속도 51.16 km/h에서 계산된 d_G=12.564 mm를 사용하여 속도에 d_G가 비례한다는 가정을 적용하여 역산하여 적용하였다.

▪ 본 연구단에서 수행한 실대형 충돌 실험 총 11번의 충돌 실험 중 표 2.6.9과 같이 식 (2.2.1)를 적용 가능한 4가지 경우 (Case 6, 8~10)에 대하여 실험결과와 단순식으로부터 얻은 충돌 하중을 상호 비교하였다.

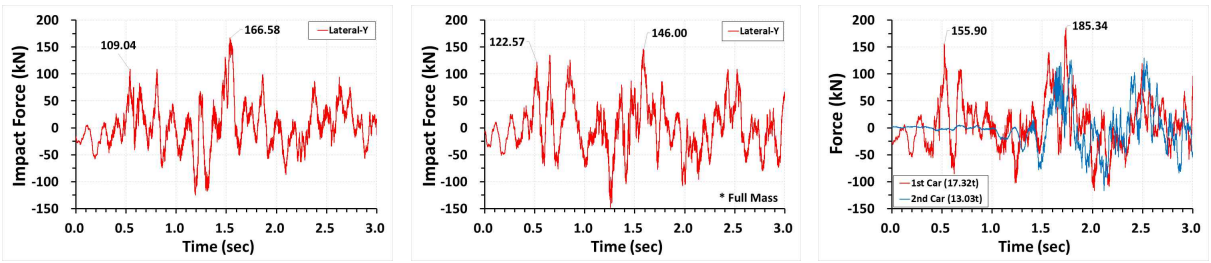
▪ 표 2.6.10는 비교 대상 경우에 대하여 실험적으로 충돌 하중을 산정한 결과를 나타낸 표이다. 식 (2.1)의 경우는 최초 충돌의 경우에만 적용 가능함으로 이에 대한 결과만 표시하였다. 실험결과 최초충돌 이후에 최대 충돌 하중이 대부분 발생하였으며 최초 충돌 하중이 최대 충돌 하중을 의미하지는 않는다. 표 2.6.10에서 볼 수 있듯이 탈선속도는 45.03 km/h에서 51.16 km/h까지 변화하였으며 충돌 하중은 103.17 kN에서 155.90 kN까지 변화하는 것으로 나타났다.

표 2.6.9 실대형 충돌 실험 Cases

연번	실험일자	실험차량	실험속도 (km/h)	실험조건
CASE 6	18.06.15.	평판화차(용접대차) [13.03 tonf]	51.16	· DCP(초도시작품) · 탈선유도시스템(궤간축소)
CASE 8	19.03.19.	컨테이너화차 [17.32 tonf]	46.69	· DCP(시제품) · 탈선유도시스템(궤간축소)
CASE 9	19.06.19.	컨테이너화차 [17.32 tonf]	47.48	· DCP(시제품) · 탈선유도시스템(궤간축소)
CASE 10	19.07.10.	컨테이너화차+평판화차 [17.32+13.03 tonf]	45.03	· DCP(시제품) · 탈선유도시스템(궤간축소)

표 2.6.10 제안 충돌 하중 비교 Cases에 대한 충돌 하중(실험결과)

연번	실험일자	실험차량	실험속도(km/h)	충돌 하중(Full Mass)
				1st Impact
CASE 6	18.06.15.	평판화차(용접대차) [13.03 tonf]	51.16	103.17 kN
CASE 8	19.03.19.	컨테이너화차 [17.32 tonf]	46.69	109.04 kN
CASE 9	19.06.19.	컨테이너화차 [17.32 tonf]	47.48	122.57 kN
CASE 10	19.07.10.	컨테이너화차+평판화차 [17.32+13.03 tonf]	45.03	155.90 kN



(a) (b) (c)

그림 2.6.56 최초 충돌 발생 시점(실험결과): (a) Case 8; (b) Case 9; (c) Case 10.

▪ 그림 2.6.56은 각 비교 Case에 대하여 보다 자세하게 충돌 하중과 시간관의 결과를 나타낸 그림이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 탈선 후 0.5 ~ 0.6 sec 이전에 최초 충돌이 발생하는 것을 알 수 있었다. 식 (2.2.1)에 따르면 충돌까지의 시간이 길어질수록 감속도에 의하여 충돌 속도가 감소하고 충돌 하중도 감소한다. 또한, 본 연구에서 가정한 감속도가 모든 경우에 적용할 수는 없으므로 이에 대한 적절한 고려가 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 이를 종합하여 최초 충돌은 탈선 후 0.1 sec ~ 0.6 sec 사이에서 발생한다고 가정하여 충돌 하중의 범위를 산정하였으며 그 결과는 표 2.6.11와 그림 2.6.57과 같다.

표 2.6.11 제안 충돌 하중 비교 cases에 대한 충돌 하중(실험결과)

연번	실험일자	충돌하중(Full Mass)		
		1st Impact (실험)	1st Impact (단순식, 0.1 sec)	1st Impact (단순식, 0.6 sec)
CASE 6	18.06.15.	103.17 kN	132.0 kN	96.5 kN
CASE 8	19.03.19.	109.04 kN	155.6 kN	110.0 kN
CASE 9	19.06.19.	122.57 kN	158.4 kN	112.7 kN
CASE 10	19.07.10.	155.90 kN	163.4 kN	117.6 kN

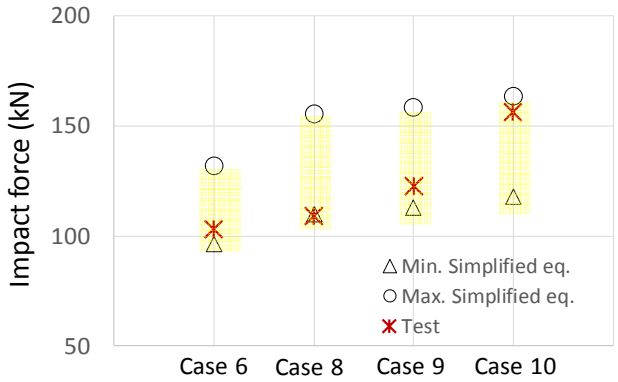


그림 2.6.57 실험결과와 이론식을 통한 하중 범위의 비교

▪ 이 표와 그림에서 알 수 있듯이 실험결과 나타난 최초 충돌 하중은 본 연구에서 제안한 식 (2.2.1)를 사용하여 계산된 최소와 최대 충돌 하중 범위에 들어옴을 알 수 있다. 대부분 충돌 시점을 탈선 후 0.6 sec로 가정한 최소값에 실험결과가 보다 근접한 것을 알 수 있으며 이러한 이유는 그림 2.6.51에서 볼 수 있듯이 대부분의 충돌이 약 0.5 sec 근처에서 발생하기 때문으로 판단된다. 하지만, 충돌 하중 산정 시 여러 고려하지 못한 요소들이 있을 수 있으며 최초 충돌 하중이 최대 충돌 하중을 의미하는 것은 아니므로 최초 충돌 하중의 시간을 본 연구와 같이 0.1 sec ~ 0.6 sec로 설정하여 충돌 하중의 범위를 넓게 산정할 필요가 있다.

(4) 소결론

▪ 본 연구에서는 실대형 실험이나 상세 FEM을 이용한 탈선 시뮬레이션 수행 전 대략적인 DCP의 충돌 하중 산정 및 탈선 후 열차의 거동을 살펴보기 위한 단순화된 '방호시설에 작용하는 탈선 열차 충돌 하중 산정을 위한 이론해석 기법'을 연구하였다.

▪ 이를 위하여 먼저 기존에 수행된 연구를 참고하여 2차원 강체 모델을 활용한 탈선 거동 모사 프로그램을 작성하여 변수해석을 수행하여 탈선 후 거동에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 통하여 초기 탈선 각도 및 속도가 작을수록 탈선 후 열차의 횡방향 일탈이 적은 것을 알 수 있었다. 또한, 곡선 궤도에서 탈선이 발생하는 경우 열차의 횡방향 일탈이 크게 증가하는 것을 알 수 있었다. 따라서, 열차의 횡방향 일탈을 줄이기 위해서 위험 구간의 곡률반경을 개선하고 운행속도를 줄이면서 DCP와 같은 탈선 각도를 획기적으로 줄일 수 있는 장치가 필요한 것으로 나타났다.

▪ 또한, 기존연구와 실험결과를 사용하여 DCP에 열차가 충돌할 때 발생하는 최초 충돌 하중 산정식을 제안하였다. 실험결과와 비교한 결과 제안식에서 계산된 충돌 하중의 범위에 실험결과가 포함되는 것을 확인하였다. 추후 보다 많은 데이터 비교를 통하여 유효질량 및 손상계수에 대한 연구가 추가된다면 산정식의 정확도를 보다 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

다. 자갈도상 모델링 및 해석기술연구

(1) 자갈도상에 진입한 일탈차량의 거동특성분석을 위한 해석기술연구 필요성

▪ 자갈궤도에서의 주행 차량이 일탈할 경우, 궤도(레일)에서 일탈된 대차의 일부 차륜이 1차적으로 자갈층과 충돌을 일으킬 수 있는데, 자갈층의 기본적인 역학적 특성에 따라 자갈층과 차륜 간의 충격 및 마찰거동에 의해 일탈한 차량이 갖는 운동에너지 상당량을 소산시켜 급격한 제동을 기대할 수 있고, 또 한편으로는 아주 급격한 제동에 의해 예상 불가능하고 불규칙한 형태의 순간적인 회전 운동이 유발되어 차량의 전복 등의 과격한 동적 운동이 발생할 수 있다.

▪ 차량 일탈 시 자갈층과의 충돌이 예상되는 경우, 자갈층의 동적 에너지흡수 또는 소산 성능과 함께 자갈층의 상태와 일탈 차량의 운동에너지특성에 따른 급제동 및 불규칙 회전 운동 등을 합리적으로 평가할 수 있다면 자갈궤도에서의 소요 방호성능을 합리적으로 평가할 수 있고 이를 기반으로 최적의 방호시설설계가 가능하다.

▪ 기존의 유한요소해석기법으로는 자갈층으로 구성된 자갈궤도의 모델링 및 동적 해석에 뚜렷한 한계가 존재한다. 일례로, 자갈층을 구성하는 개별 자갈은 외부에서 하중이 작용할 때 큰 상대변위가 나타나고 경우에 따라서는 서로 분리가 발생한다. 이러한 기본적인 거동특성을 일반적인 유한요소해석기술로는 모사하기 어렵다.

▪ 따라서 자갈층에 진입한 일탈차량의 주행경로, 운동에너지 변화 등을 합리적으로 해석하기 위해서는 무엇보다도 자갈층의 합리적인 모델링기법이 정립되어야 하고 추가적으로 일탈차량과 자갈층 간의 충돌해석기술이 개발되어야 한다.

(2) 개별요소법 기반 자갈도상 모델링 및 해석기술

▪ Discrete Element Method (DEM, 개별해석법)은 입자 하나 하나를 객체로 모델링하여 해석을 수행한다. 기본적인 DEM 해석기법에서 개별 입자는 특정한 크기를 갖는 구체 (sphere) 형태의 강체 (rigid body)로 모델링하고, 각 입자 간 접촉조건 및 마찰조건을 부여하여 매 증분해석단계마다 입자 간의 접촉 및 충돌을 검토, 접촉 및 충돌하중을 산정하고, 뉴튼 제 2법칙을 통해 각 입자의 가속도와 이를 적분하여 속도 및 변위를 계산하는 절차를 통해 동적해석을 수행하게 된다. 아래 그림은 DEM 해석과정을 간략히 표현한다.

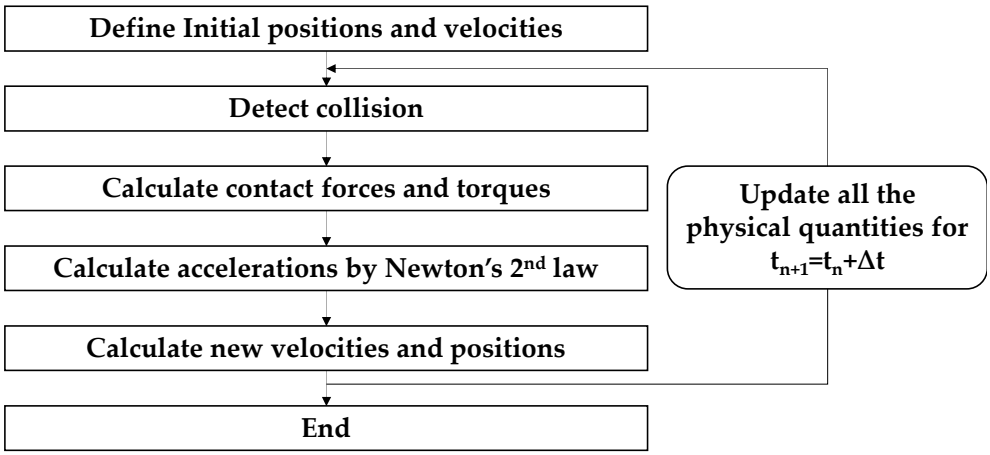


그림 2.6.58 DEM 해석 절차

▪ 입자의 모델링을 위해서는 먼저 입자의 직경 (또는 반지름)과 밀도 그리고 초기위치 정보가 필요하다. 또한, 각 입자 간 접촉 시 하중을 계산하기 위한 접촉모델이 정의되어야 한다. 그림 2.6.59는 DEM에서 일반적으로 고려하는 구형 강체 간 접촉모델 (Mindlin, 1949)을 표현한다. 입자간 접촉은 수직 (normal) 방향과 접선 방향 (friction)에 대해 고려하고, 입자의 강성 및 감쇄효과를 모두 고려할 수 있도록 (비선형) 스프링과 대쉬팟 모델로 구성된다.

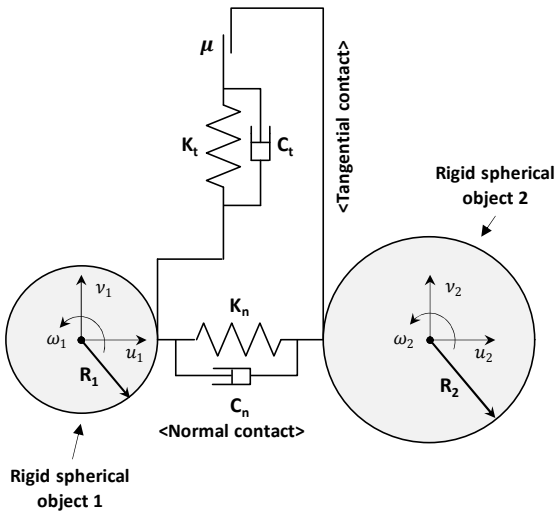


그림 2.6.59 DEM 해석 시 입자 간 접촉모델

▪ 범용프로그램인 ABAQUS의 DEM 해석에서도 Hertz contact model을 다음 식에 의거하여 고려가 가능하다.

접촉력 $F=\frac{4}{3}E^*R^{1/2}d^{3/2}$

여기서, $E^*=\frac{(1-v_1^2)}{E_1}+\frac{(1-v_2^2)}{E_2}$, R=radius of sphere, d=구체와 반무한 탄성체 간 접촉시 근입깊이 (그림 3.11), E_1=구체의 탄성계수, E_2=반무한 탄성체의 탄성계수, v_1=

구체의 포아송비, v_2=반무한 탄성체의 포아송비

▪ 구체와 구체간 접촉력 F는 식 3.1을 통해 계산이 가능한데, 반지름이 각각 R_1과 R_2인 구체 간 접촉력 계산 시에는 식 3.1의 R이 다음 식을 통해 계산된다.

$$\frac{1}{R}=\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}$$

(3) 개별요소법 기반 자갈도상 모델링 및 해석기법 연구

(가) 자갈층 자갈 모델링 및 DEM 기반 자갈층-차륜 간 충돌해석방법

▪ DEM 해석법에서는 합리적인 입자층 모델링기법이 필수적이다. 특히 자갈도상과 같이 크기와 형상이 모두 다른 무수히 많은 자갈로 구성되어 있는 경우, 각각의 자갈을 하나하나 모델링하는 것은 매우 비효율적인 작업이다. 본 연구에서는 MATLAB을 통해 한정된 공간 내에 일정한 개수의 입자를 생성함에 있어서 서로 겹치지 않는 한 최대의 크기를 갖도록 하는 “random particle packing” 기법을 개발하고 관련 code를 작성하였다.

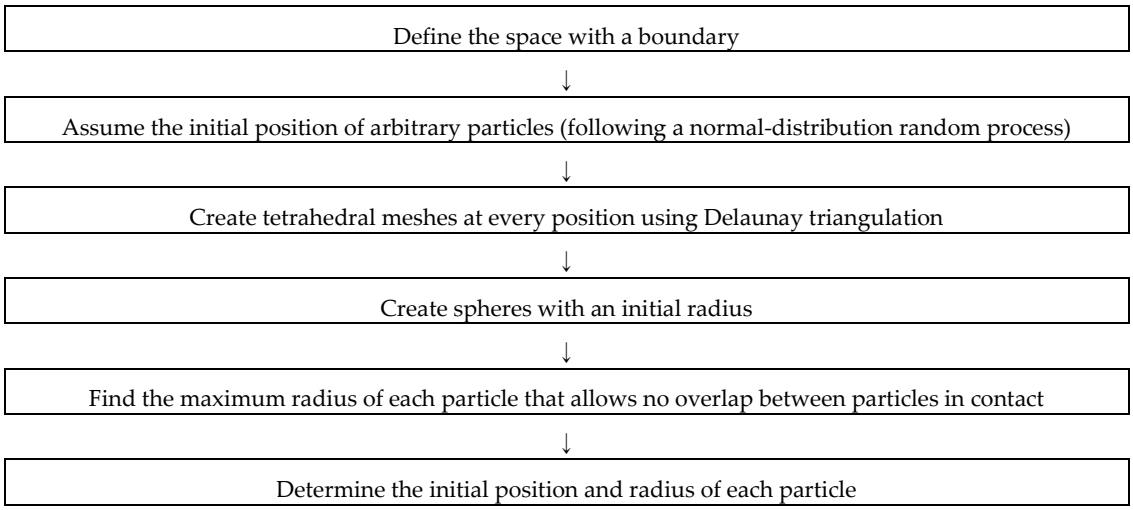


그림 2.6.60 Random particle packing 절차

▪ 본 연구에서는 DEM해석 기반 자갈층-차륜 간 충돌해석기법를 정립했다. 그림 2.6.61은 해석절차를 나타낸다.

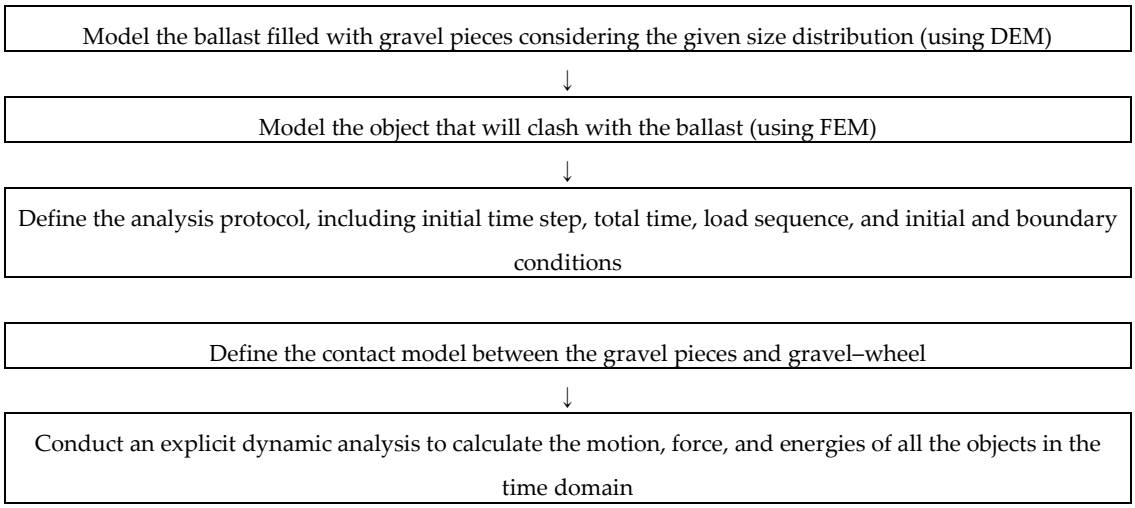


그림 2.6.61 자갈층-차륜 간 충돌해석 절차

(나) 개별요소법 기반 자갈도상 모델링 및 해석기법의 수치적 검증

▪ 개별 입자를 독립된 개체로 모사할 수 있는 DEM 해석 기반의 자갈층 모사를 통해 자갈 간의 마찰과 접촉조건을 보다 현실적으로 모사가 가능하다. 그러나 앞서 검토된 대로, 개별 입자를 강체로 모사하는 경우 입자 간 접촉 및 마찰조건을 결정하는 다양한 영향 인자에 따라 자갈층의 전체적 및 국부적 거동특성이 상이하게 정의된다. 일탈된 열차가 자갈층에 진입한 이후 주행특성의 예측을 위한 시뮬레이션을 위해서는, 자갈층의 역학적 특성을 결정하는 각 영향 인자의 고려 범위 도출을 포함한 합리적인 모델링 기법에 대한 실제적인 검증연구가 필요하고, 이러한 목적에 따라 본 연구에서는 자갈층과 중량체 간 충돌 실험을 실시하고 이를 DEM 기반 해석결과와의 직접비교를 통해 본 해석기법을 검증하였다.

▪ 자갈층과 중량체 간 충돌거동분석을 위해 본 연구에서는 자갈층으로의 중량체 자유낙하실험을 실시하였다. 일정 높이에서 중량체를 자유낙하시켜 중량체가 자갈층과 충돌하여 완전히 정지할 때 까지 가속도를 계측하고, 필터링 등 전처리 된 계측 가속도의 수치적분을 통해 물체의 속도 및 위치를 시계열 데이터화 하여 이를 DEM 해석결과와 비교하였다.

▪ 그림 2.6.62와 같이 충분한 강성을 갖는 자갈층 박스를 제작하여(1,000×1,300×700 mm) 그 안에 31.5~50.0mm 의 크기를 갖는 임의 형상의 철도 도상용 자갈을 채워 실험을 위한 자갈층을 구성(1,000×1,300×600 mm)하고, 로드셀을 포함한 총 중량 656kgf의 낙하추를 특정 높이에서 자유낙하시켜 타겟마크의 가속도를 계측, 이를 후처리하여 낙하시점부터 자갈층에 충돌한 이후 근입하여 완전히 정지할 때까지의 운동특성을 분석하였다.



(a) 낙하실험 전경



(b) 자갈층



(c) 중량체 근입



(b) 중량체 충돌 이후 자갈층 변형

그림 2.6.62 자갈층-중량체 충돌실험

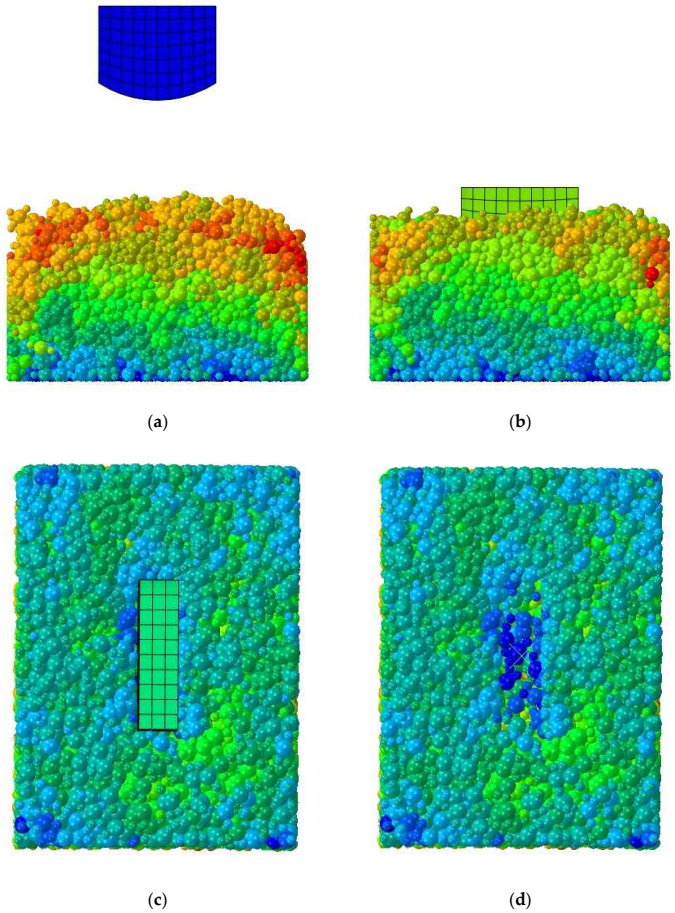
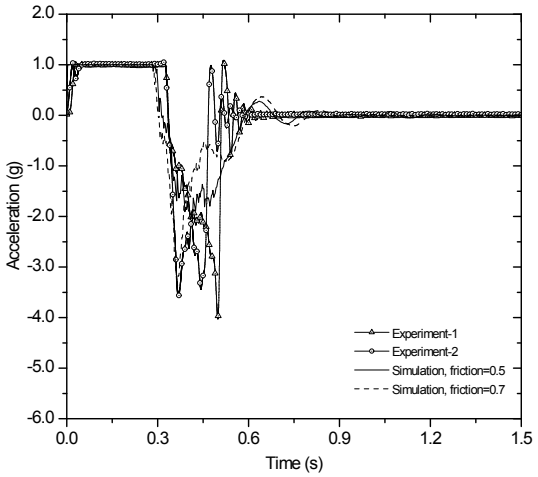
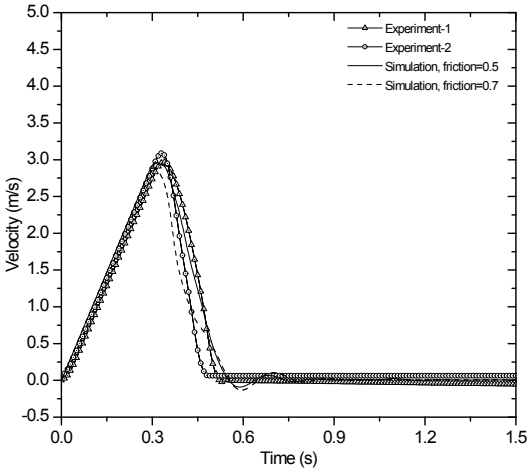


그림 2.6.63 자갈층-중량체 충돌실험

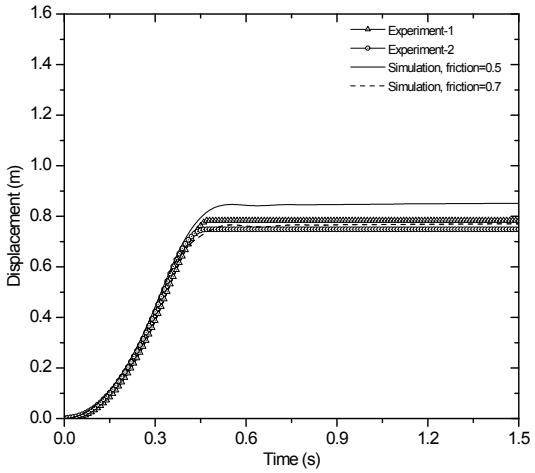
▪ DEM 해석 기반 자갈층 모델링기법의 타당성 검증을 위해 자갈층-중량체 충돌실험과 동일한 조건으로 해석모델을 구축하였다. 낙하실험에서 구현된 자갈층을 모델링하기 위해 자갈층 박스와 동일한 경계조건모델(1,000×1,300 mm)을 구성하고 여기에 600mm 높이 수준까지 자갈입자를 채워 자갈층 모델을 구현하였다. 본 검증모델에서 활용한 입자요소는 구형 강체를 결합한 클럼프 모델을 사용하였다. 해석시간은 총 2.5초로, 0~1.0초 구간은 클럼프 입자의 자유낙하에 의한 자갈층 형성, 그 후 1.0~2.5초는 중량체의 자유낙하가 진행되었다. 실험과 동일하게 자갈층 최상단과 접촉하기 전까지 중량체의 낙하거리는 0.5m 및 1.0m 조건으로 구분하여 해석을 수행하였고, 자갈과 자갈간의 마찰계수를 0.5~0.7의 범위로 고려하여 자갈 간 마찰계수가 자갈층의 interlocking 효과에 미치는 영향을 검토하고 실험결과와 유사한 결과를 보이는 마찰계수의 정량적인 범위를 검토하기 위해 간단한 case study를 진행하였다. 본 해석은 ABAQUS Explicit V2017를 통해 수행되었다.



(a) 가속도

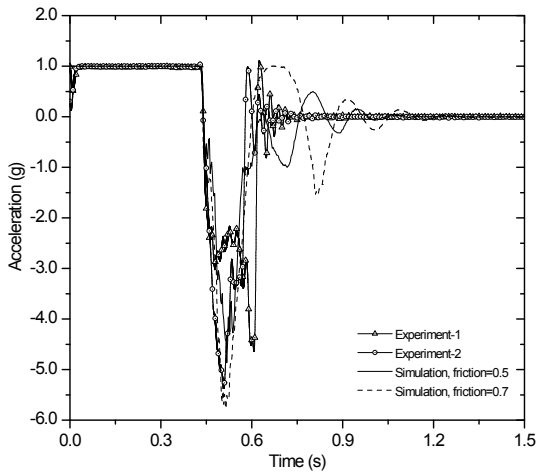


(b) 속도

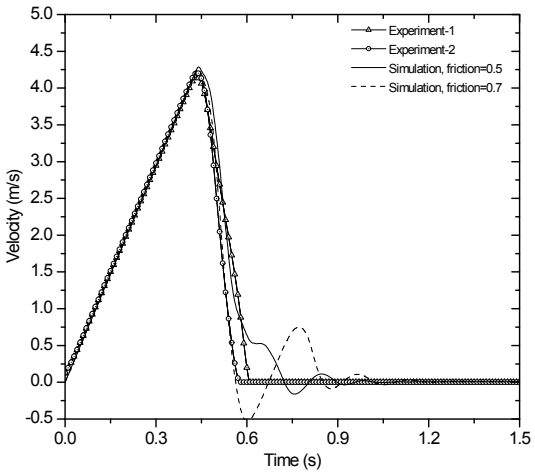


(c) 변위

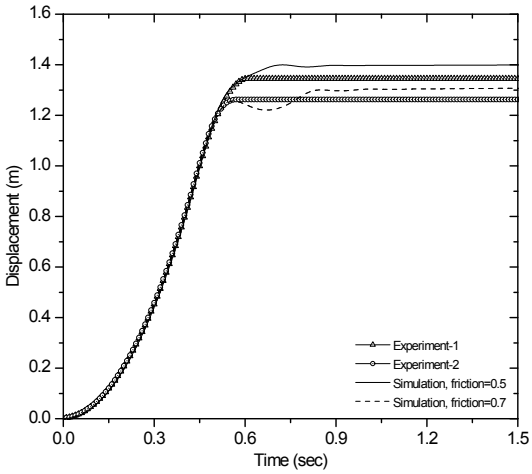
그림 2.6.64 0.5m 높이 자유낙하실험-해석결과 비교



(a) 가속도



(b) 속도



(c) 변위

그림 2.6.65 1.0m 높이 자유낙하실험-해석결과 비교

▪ 0.5m 및 1.0m 높이에서 자유낙하시켜 자갈층과의 충돌 이후 완전 정지시까지의 중량체의 가속도, 속도, 변위 결과를 시계열 데이터로 비교·분석하였다. 비교된 가속도와 속도, 근입깊이는 실험 결과와 상당히 유사하게 나타났고, 각 물리량의 절대값 뿐 만 아니라 시계열 데이터의 패턴 역시 매우 유사하게 나타났다. 이러한 비교연구 결과는 본 연구에서 제안하는 DEM 기반 자갈층 모델링 및 중량체와의 충돌해석기법의 타당성을 입증한다. 각 낙하 조건에 대해 자갈층 내 자갈 간 마찰계수를 0.5 및 0.7을 적용하여 마찰계수에 따른 자갈층의 결속력특성을 검토하였다. 검토 결과, 더 큰 마찰계수를 도입하는 경우, 자갈 간 마찰의 증대에 따른 결속력 강화로 동일 높이에서 낙하한 중량체에 발생하는 최대 가속도가 증가하고 반대로 근입깊이는 감소하는 특성이 본 해석연구결과 명확히 나타났다. 이러한 결과는 정성적으로 예상이 가능한 물리적 특성을 주요 파라미터의 조정을 통해 합리적으로 구현이 가능하다는 것을 의미한다.

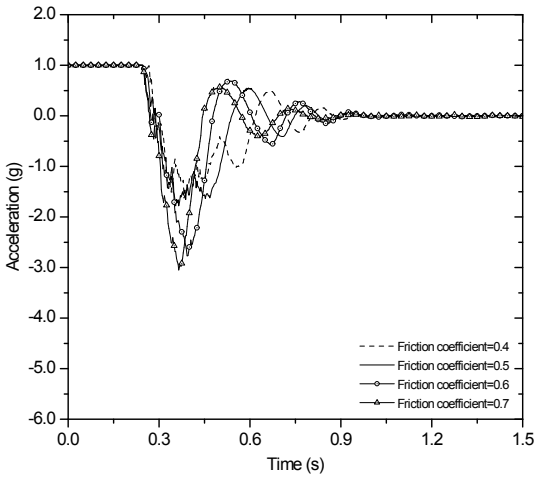
표 2.6.12 자갈층과 충돌한 자유낙하물체의 근입깊이 비교

	Test			**Simulation**	
	Test-1	Test-2	Average	Friction = 0.5	Friction = 0.7
0.5-m drop height	0.33	0.24	0.28	0.35	0.26
1.0-m drop height	0.46	0.35	0.41	0.47	0.38

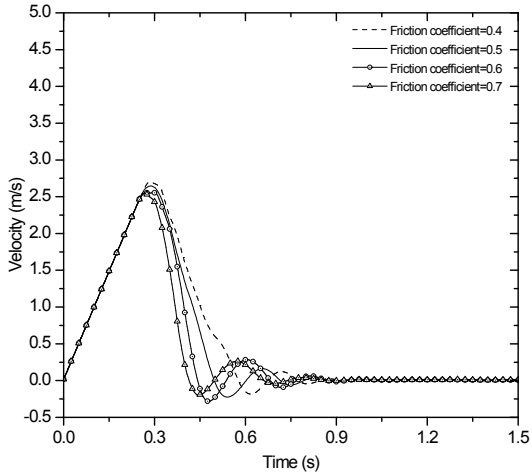
(다) 자갈도상-물체 간 충돌거동에 대한 Case study

▪ DEM해석기술을 통해 자갈층을 수치모델링 할 때, 입자와 입자, 입자와 충돌 물체 간 마찰특성은 해석결과에 큰 영향을 미치는 주요 인자로 예상할 수 있다. 특히 입자과 입자 간 마찰계수는 자갈층의 결속력을 결정할 것이고, 결과적으로 자갈층에 충돌하거나 진입한 물체의 후속거동에 큰 영향을 미칠 것으로 이해할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 영향특성을 해석적으로 분석하였다. 그림 2.6.66은 입자 간 마찰계수에 따

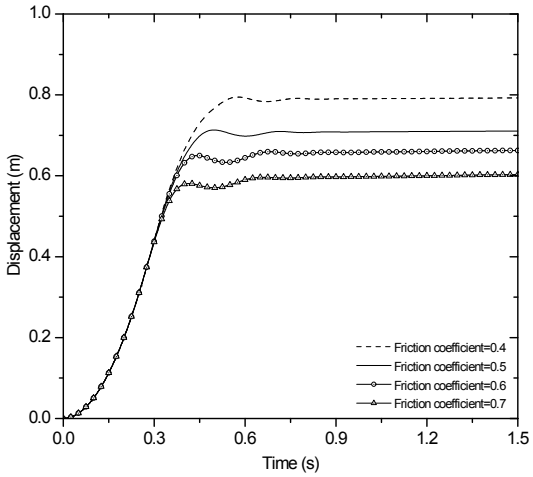
른 자유낙하 물체의 자갈층과 충돌 후 동적운동을 나타내고, 그림 2.6.67는 자유낙하하는 물체가 자갈층과 충돌할 때 마찰에 의한 에너지소산특성변화를 나타낸다. 이 그림에 잘 나타난 대로, 입자 간 마찰계수가 크게 도입될수록 자갈층의 결속력이 강화되어 더 강결한(stiff) 층을 이루는 것을 명확히 알 수 있다.



(a) 가속도



(b) 속도



(c) 변위

그림 2.6.66 입자 간 마찰계수가 자갈층의 결속력 및 자갈층-자유낙하물체 간 충돌거동에 미치는 영향 (낙하높이=0.5m, 자갈과 물체 간 마찰계수=0.6)

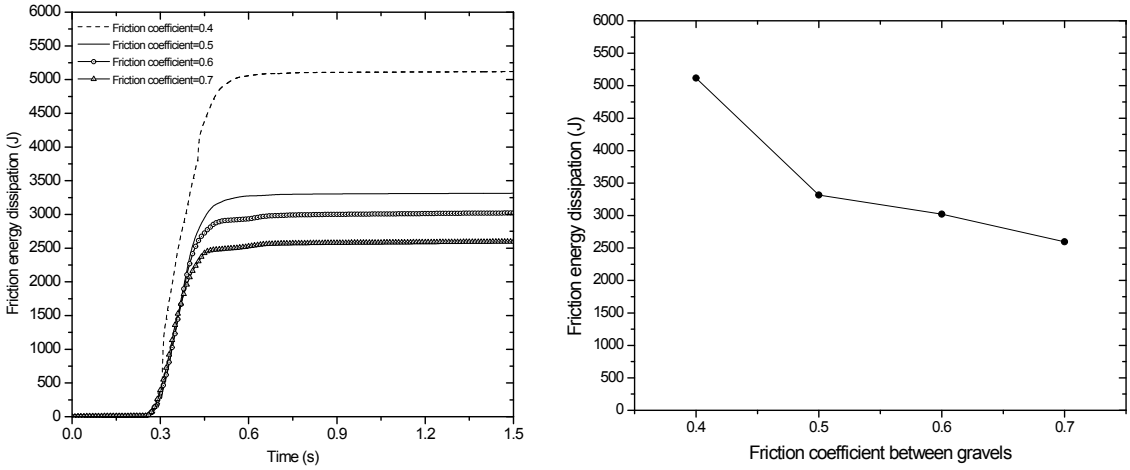
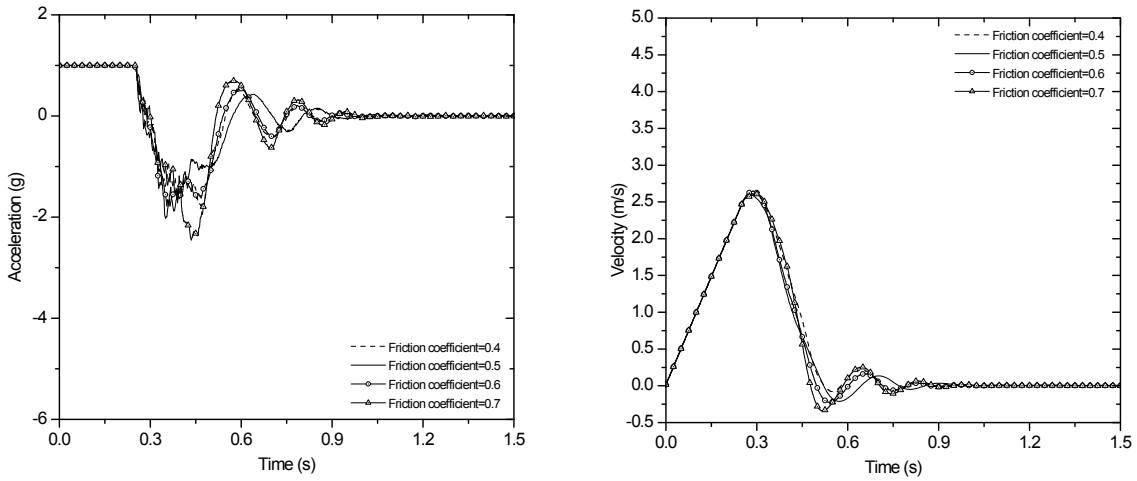
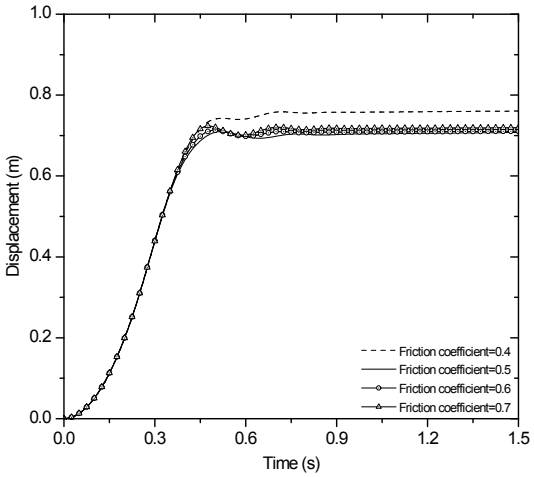


그림 2.6.67 입자 간 마찰계수가 자갈층-자유낙하물체 충돌 시 마찰에 의한 에너지 소산에 미치는 영향(낙하높이=0.5m, 자갈과 물체 간 마찰계수=0.6)

▪ 그림 2.6.68는 입자와 물체 간 마찰계수에 따른 자유낙하 물체의 자갈층과 충돌 후 동적운동을 나타내고, 그림 2.6.69은 자유낙하하는 물체가 자갈층과 충돌할 때 마찰에 의한 에너지소산특성변화를 나타낸다. 앞선 결과와 달리, 입자-물체 간 마찰계수의 영향은 상대적으로 크지 않음을 알 수 있고, 본 해석연구범위에서는 입자와 물체 간 마찰계수가 0.5 이상인 경우, 정의되는 마찰계수는 충돌 후 동적거동에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.



(a) 가속도 (b) 속도



(c) 변위

그림 2.6.68 입자-물체 간 마찰계수가 자갈층의 결속력 및 자갈층-자유낙하물체 간 충돌거동에 미치는 영향(낙하높이=0.5m, 자갈과 물체 간 마찰계수=0.6)

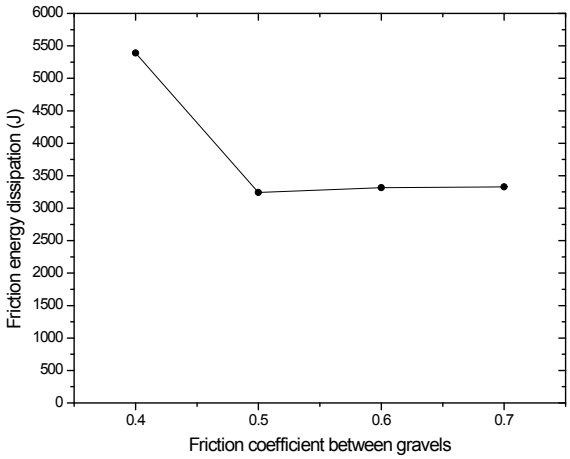
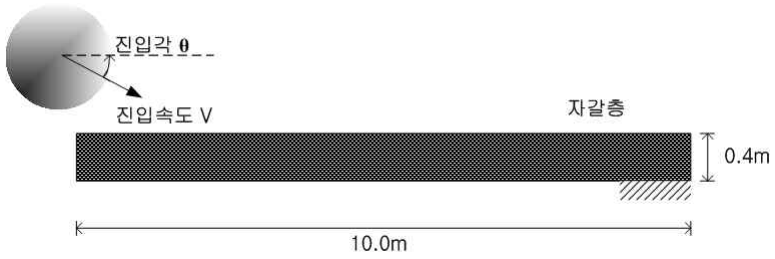


그림 2.6.69 입자-물체 간 마찰계수가 자갈층-자유낙하물체 충돌 시 마찰에 의한 에너지 소산에 미치는 영향(낙하높이=0.5m, 자갈과 자갈 간 마찰계수=0.5)

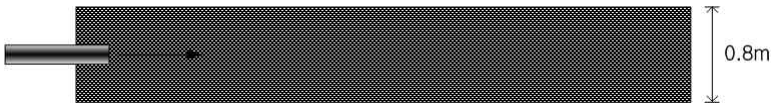
(4) 자갈층에 진입한 일탈차량(차륜)의 주행특성 분석 간 상호작용 특성 분석

▪ 본 연구에서는 DEM 기반 자갈층 모델링기술 및 자갈층-일탈차량(차륜) 간 동적상호작용해석기법을 연구하였고, 이를 활용하여 특정 운동특성을 갖고 자갈층에 진입한 물체의 자갈층 진입 후 동적운동특성을 해석적으로 분석하였다.

▪ 그림 2.6.70은 본 상호작용해석연구를 위한 자갈층(폭 0.8m, 길이 10.0m, 깊이 0.4m) 및 일탈차륜의 초기진입조건(진입속도/진입각도)를 간략히 표현한다.



(a) 정면도



(b) 평면도

그림 2.6.70 자갈층-일탈차륜 상호작용해석 모델 개요

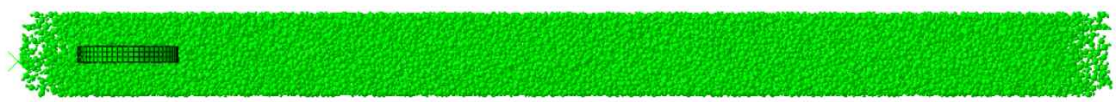
▪ 본 연구에서는 자갈층 특성(자갈 간 마찰계수)과 진입하는 물체의 속도 및 진입각도를 주요 변수로 하여 해석연구를 수행하였다. 본 연구에서 고려된 변수는 표 2.6.13과 같고, 그림 2.6.71은 수치해석모델을 나타낸다.

표 2.6.13 해석 변수 개요

자갈층 깊이 (cm)	40.0cm
자갈 밀도 (kg/m^3)	1,680.0, 2,680.0
자갈층 내 자갈 간 마찰계수	0.3, 0.5, 0.7
물체 진입 속도 (km/hr)	30, 40, 50
진입 각도 (deg)	15, 30, 45



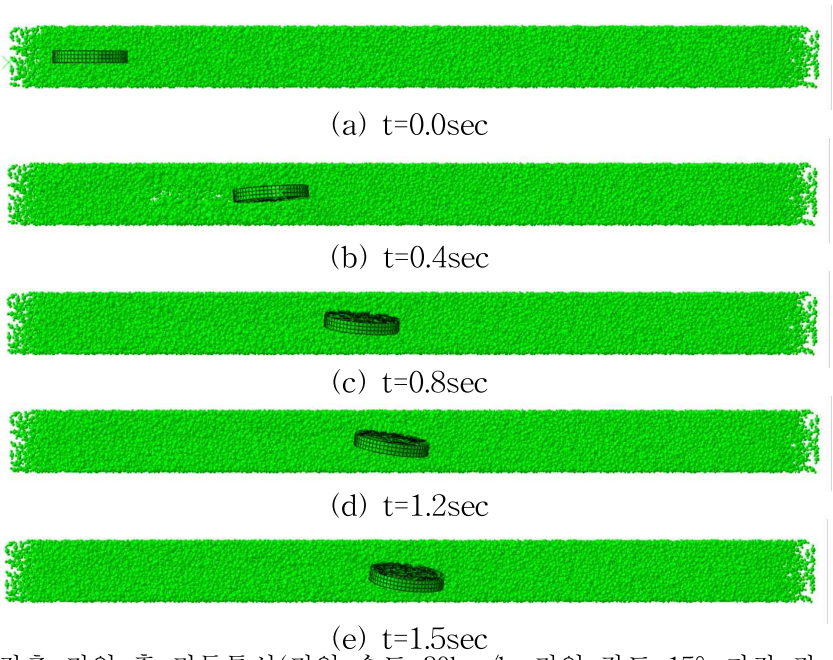
(a) 정면도



(b) 평면도

그림 2.6.71 자갈층-일탈차륜 상호작용해석 수치모델

▪ 40cm 깊이, 자갈 밀도 1,680 kg/m^3, 자갈층에 30km/h의 속도로 15°의 각도로 진입한 후 물체의 거동 특성에 대해 각 방향 변위와 속도, 가속도 등의 응답으로 검토하였다.



(a) t=0.0sec

(b) t=0.4sec

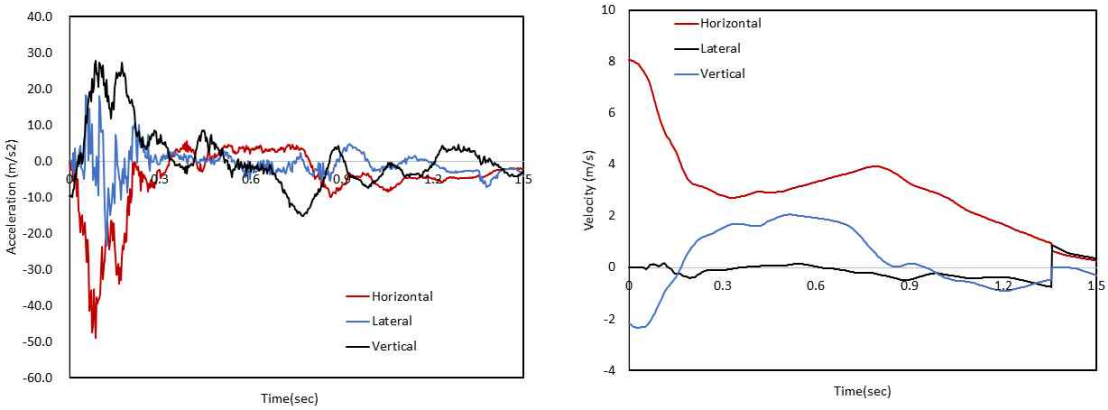
(c) t=0.8sec

(d) t=1.2sec

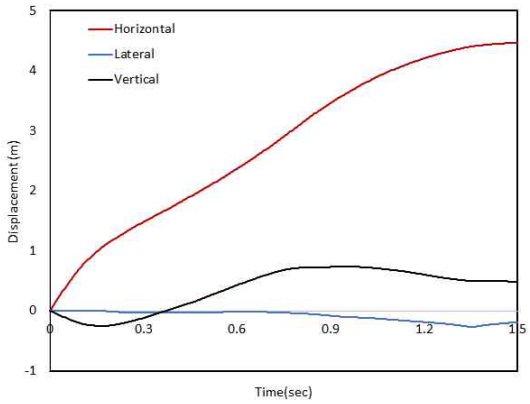
(e) t=1.5sec

그림 2.6.72 자갈층 진입 후 거동특성(진입 속도=30km/h, 진입 각도=15°, 자갈 간 마찰 계수=0.7)

▪ 자갈층에 진입한 이후 자갈층과 1차적으로 충돌하고 속도벡터 방향으로 운동은 지속하지만 계속된 자갈과의 접촉 및 마찰에 의해 운동에너지가 감소하여 물체는 정지 상태에 접어든다. 그림 2.6.73은 물체의 변위, 속도, 가속도 결과를 나타낸다. 본 모델의 경우 물체는 수평방향으로 약 4.7m 이동 후 정지상태에 다다른 것으로 평가되었다. 그림 2.6.74은 물체의 이동 경로(평면 상)를 나타낸다. 물체에 급격한 감속이 있은 후 수평(Lateral) 변위가 증가하기 시작하고 이후 물체가 정지상태에 다다를 때 수평방향으로의 기울임이 발생하며 이와 같은 경로가 나타난다.



(a) 가속도 (b) 속도



(c) 변위

그림 2.6.73 물체 진입 후 변위, 속도, 가속도(자갈층 깊이=40.0cm, 자갈 밀도=1,680 kg/m^3, 30km/hr 속도, 15° 진입)

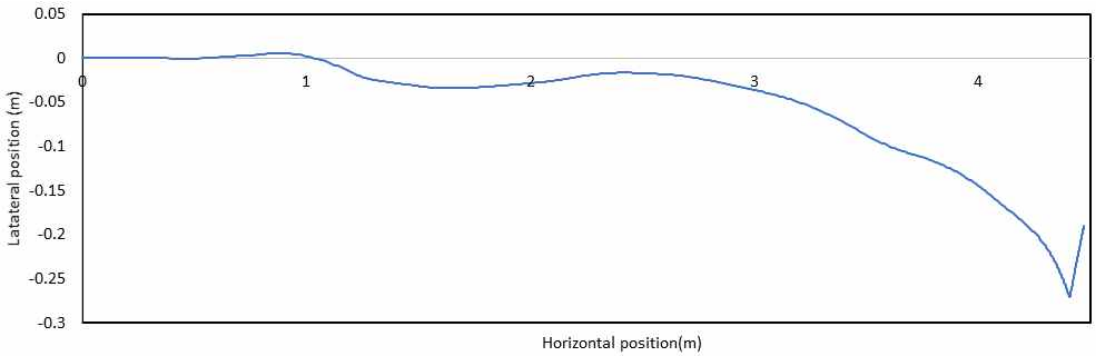


그림 2.6.74 물체 진입 후 수평경로

▪ 그림 2.6.75는 물체가 자갈층으로 진입하는 순간부터 1.5초 구간동안 평가되는 에너지를 나타내는데, 본 그림에서 잘 나타나듯이 진입하는 물체가 갖는 운동에너지는 자갈 입자 간 그리고 자갈층과 물체 간의 마찰에 의해 소산되는 것을 명확하게 알 수 있다.

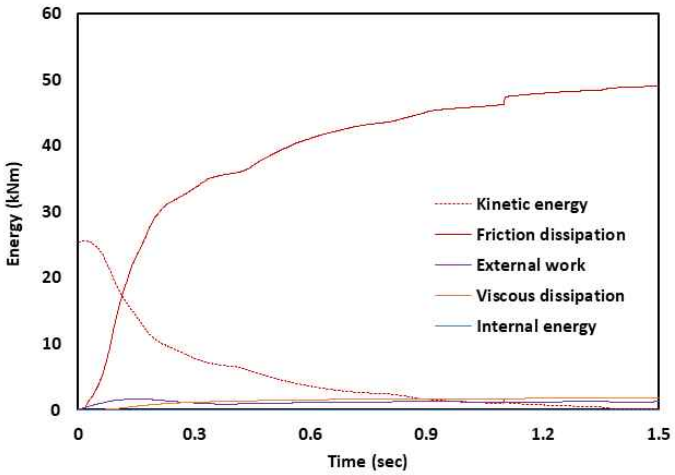


그림 2.6.75 물체 진입 후 에너지변화(자갈층 깊이=40.0cm, 자갈 밀도=1,680 kg/m^3, 30km/hr 속도, 15° 진입)

▪ 해석연구 결과, 본 연구에서 정립한 해석기법을 통해 자갈층에 특정속도로 진입한 물체의 운동 특성을 수치적으로 해석 가능한 것으로 판단된다. 이를 확장하면 본 해석기법을 통해 자갈층에 진입한 차량모델의 주행 특성과 함께 차량에 작용하는 마찰 및 충격력 등을 수치적으로 모두 평가 가능할 것으로 기대된다.

2.7 일탈사고 사고위험도 등급화 및 적정 충격도 모델을 활용한 일탈방호시설 적용 방안 제시

가. 철도차량 일탈사고 사례 조사 및 원인 분석

(1) 국내외 탈선사고 사례 수집 및 원인 분석, 사고 피해, 사고 경향성 조사 수행

▪ 국내의 경우. 철도 사고 영역에서 일탈사고를 따로 분류하여 구분하지는 않고 있으며, 탈선사고로 일괄 분류하고 있다(국토교통부, 철도사고 등의 보고에 관한 지침, 2015). 따라서, 철도 열차탈선사고 보고서를 통하여 일탈사고의 사례보고서를 조사를 수행하였다.

표 2.7.1 철도사고 분류체계 (2015, 국토교통부, 철도사고 등의 보고에 관한 지침)

<table>
<tr><th>사고 구분 1</th><th>구분 2</th><th>구분 3</th><th>구분 4</th></tr>
<tr><td rowspan="11">철도사고</td><td rowspan="6">철도교통사고</td><td rowspan="4">열차사고</td><td>열차충돌사고</td></tr>
<tr><td>열차탈선사고</td></tr>
<tr><td>열차화재사고</td></tr>
<tr><td>기타열차사고</td></tr>
<tr><td colspan="2">건널목사고</td></tr>
<tr><td rowspan="3">철도교통사상사고</td><td>여객</td></tr>
<tr><td>공중(公衆)</td></tr>
<tr><td>직원</td></tr>
<tr><td rowspan="5">철도안전사고</td><td colspan="2">철도화재사고</td></tr>
<tr><td rowspan="3">철도안전사상사고</td><td>여객</td></tr>
<tr><td>공중(公衆)</td></tr>
<tr><td>직원</td></tr>
<tr><td colspan="2">철도시설파손사고</td></tr>
<tr><td colspan="2">기타철도안전사고</td></tr>
<tr><td rowspan="2">운행장애</td><td colspan="2">위험사건</td></tr>
<tr><td colspan="2">지연운행</td></tr>
<tr><td colspan="4">철도재난 : 폭풍, 호우, 폭설, 홍수, 지진, 낙뢰 등 자연형상, 대규모 화재·폭발 등</td></tr>
</table>

▪ 항공·철도 사고조사 위원회에서는 이러한 열차탈선사고에 대한 보고서를 발행 중에 있으며, 본 연구에서는 '06~'15년의 탈선사례 사고보고서를(56건) 확보하여, 각각의 사고에 대하여 사고의 원인, 인적피해 및 물적피해 상황으로 분석하였다.

표 2.7.2 2006~2015 국내 철도 탈선사고 현황

연도	사고명	사고원인 상세(탈선원인)	인적피해	물적피해(천원)
06	동해남부선 경주역구내 화물열차 탈선	차륜미끄러짐	0	-
06	경부선 대전역구내 화물열차 탈선	차륜열화파손	0	88,200 이상
06	경의선 화전역구내 통근열차 탈선	인적오류	0	8,760 이상
06	경부선 소정리역구내 화물열차 탈선	인적오류	0	8,650 이상
07	경전선 옥곡역구내 무궁화열차 탈선	인적오류, 궤도파손	0	6,950 이상
07	중앙선 신녕역구내 화물열차 탈선	차축 베어링 경화 및 마모	0	75,170 이상
07	영동선 나한정역구내 무궁화열차 탈선	인적오류	0	240 이상
07	경원선 왕십리역구내 화물열차 탈선	차륜 및 선로상태 불량	0	10,200 이상
07	영동선 분천역구내 화물열차 탈선	선로 이상 (급곡선부 차량자중 작용)	0	12,300 이상
07	4호선 당고개역 전동열차 탈선	인적오류	0	-
08	경부선 남성현역구내 화물열차 탈선	인적오류 (선로정비 불량)	0	329,000 이상
08	중앙선 매곡역구내 무궁화열차 탈선	인적오류	0	98,000 이상
08	중앙선 지평역구내 화물열차 탈선	차축 불량, 조립 인적오류	0	30,000 이상
08	7호선 온수역 전동열차 탈선	인적오류(운전, 차량보수), 신호수신불량	0	2,000 이상
08	태백선 자미원역 무궁화열차 탈선	인적오류(운전, 승무)	0	21,500 이상
09	경의선 서울역구내 새마을열차 탈선	선로 이상 (선형 여유 존재 무, 캔트불량)	0	116,000 이상
09	경부선 대신-아포역간 화물열차 탈선	차량불량 (차량 용접수리부 불량)	0	57,590 이상
10	2호선 신도림역 전동열차 탈선	인적오류(운전), 신호이상	0	-
10	진해선 진해-통해역간 새마을호 탈선	인적오류(선로관리)	0	-
10	과천선 범계-금정역간 탈선	선로 이상(궤도틀림), 차량이상(부품 열화 및 마모)	0	116,020 이상
10	호남선 익산역구내 화물열차 탈선	선로 이상 (차륜 텅레일간 접촉각 부족, 텅레일 표면 불량)	0	20,520 이상
10	경부선 천안역구내 전동열차 탈선	인적오류(운전, 역무)	0	16,000 이상
10	경부선 용산역구내 화물열차 탈선	선로 이상(곡선부 회전각 부족)	0	3,300 이상
10	9호선 신논현역구내 전동열차 탈선	인적오류(신호, 조작-자동운전, 관제 등)	0	872,480 이상
11	경부선 전동-서창역간 단행열차 탈선	인적오류(차량점검, 의사전달 등)	0	2,400 이상
11	경부고속선 광명역 ktx열차 탈선	인적오류(선로정비 불량, 신호설비 불량 등)	0	-
11	전라선 전주역구내 화물열차 탈선	인적오류(운전)	0	-
11	분당선 죽전역 전동열차 탈선	인적오류 (선로정비 불량)	0	59,600 이상
12	1호선 종로5가역 전동열차 탈선	인적오류 (운전. 차량정비불량), 차량 부품 품질관리 부실	0	22,000 이상
12	경부선 의왕력 화물열차 탈선	선로 이상?(궤도 평면선틀림)	-	107,000 이상
12	중앙선 운산-무릉역간 화물열차 탈선	차량불량?(차량베어링 기능 상실)	-	-
12	태백선 자미원역 무궁화열차 탈선	인적오류 (운전)	1 부상	4,150 이상
12	경부선 천안역구내 전동열차 탈선	인적오류 (선로정비 불량)	0	324,000 이상
12	경부선 신탄진역 구내 입환차량 탈선	인적오류 (운전)	0	2,550 이상
12	부산 3호선 배산-물만곡역 간 전동열차 충돌-탈선	충돌에 의한 탈선, 1차-차량고장(제동장치 불량), 2차-인적오류 (운전)	201 부상 (입원 47)	153,000 이상
13	호남선 익산-황등역간 화물열차 탈선	차량불량 (차량베어링 기능 상실)	-	-
13	경인선 동인천역 구내 화물열차 탈선	인적오류 (운전, 차량정비 불량)	-	110,000 이상

연도	사고명	사고원인 상세(탈선원인)	인적피해	물적피해(천원)
13	경부선 평택-서정리역간 화물열차 탈선	차량불량 (차륜결함, 피로균열 성장)	-	93,500 이상
13	경부선 대구역 KTX 열차 충돌-탈선	충돌에 의한 탈선, 1차-인적오류 (운전, 신호 오인)	21 (부상)	15,425,000 이상
13	중앙선 탑리-비봉역간 화물열차 탈선	치량불량 (차륜결함, 피로파괴)	-	18,000 이상
13	경원선 이문차량기지구내 전동회송열차 탈선	인적오류 (운전, 관제)	0	45,000 이상
13	경의선 수색역구내 새마을호 회송열차 탈선	인적오류 (운전)	0	170 이상
13	경부선 오산-송탄역간 화물열차 탈선	차량불량 (차륜 취성파괴) 인적오류 (정비)	-	278,000 이상
14	경부선 직산-두정역 간 새마을호 열차 탈선	차량불량 (차량베어링 기능 상실)	2(경상)	300,000 이상
14	경원선 동두천중앙역 구내 전동열차 탈선	차량불량 (기어행거 볼트 미세균열 성장)	0	48,000 이상
14	4호선 숙대입구-삼각지역 간 전동회송열차 탈선	차량불량 (차량베어링 기능 상실)	0	32,080 이상
14	2호선 상왕십리역 전동열차 충돌-탈선	충돌에 의한 탈선, 신호오류	477 (경68, 중22)	2,826,000 이상
14	중앙선 업동-의성역간 화물열차 탈선	인적오류 (궤도 보선), 기온급상승에 의한 레일 장출	0	35,400 이상
14	경부선 연화역 구내 화물열차 탈선	선로 이상(곡선선로 불량), 인적오류(궤도 보선 미흡)	0	1,650 이상
14	태백선 문곡-태백역간 열차 충돌-탈선	충돌에 의한 탈선, 1차-인적오류 (운전)	101 (사1, 경100)	4,200,000 이상
14	동해남부선 덕하역구내 화물열차 탈선	차량불량 (대차 프레임 균열손상)	0	49,000 이상
14	한국중부발전㈜ 서천화력선 간치-동백정역 간 화물열차 탈선	인적오류 (궤도 보선 미흡)	0	201,200 이상
15	경인선 인천역구내 전동열차 탈선	선로 이상(켄트량 부족, 뒤틀림 한계근접), 전동차 축상높이 기준 초과	0	36,000 이상
15	충북선 도안-증평역간 화물열차 탈선	차량불량 (베어링 기능 상실), 인적오류 (베어링 검수 소홀)	-	
15	중앙선 선신양회전용선 차량충돌 및 탈선	인적오류 (불량 궤도 사용)	0	422,860 이상
15	동해남부선 부전역 구내 화물열차 탈선	-	0	10,030 이상

▪ 추가적인 표본을 확보하기 위하여, 해외의 탈선사고 사례보고서를 다음과 수집하여 동일하게 원인, 인적피해 및 물적피해 상황으로 분석하였다.

- 유럽(E-RAIL) '03~'16년, 558건
- 영국(HSE, RSSB, RAIB) '91~'16년, 145건
- 일본(MLIT) '04~'16년 , 38건
- 호주(ATSB) '01~'15년, 69건
- 캐나다(TSB) '91~'15년, 209건

(2) 철도차량 일탈사고 원인분석

(가) 국내 철도차량 일탈사고 위험요소 분석, 원인 분류 체계 조사 수행

▪ 국내에서는 한국철도기술연구원에서(2004-2011, 철도사고 위험도 분석 및 평가체계 구축) 선행연구가 진행되었으며, '96-'05년 동안의 국내외 철도사고 사례를 종합하여 탈선뿐 아니라 전체 철도사고에 대하여 진행단계별 사고 진전 시나리오 전개 및 위험추적기술 개발을 수행하였다.

▪ 현 국내 철도차량 일탈사고의 원인 및 위험사건의 분류 체계는, 철도안전정보종합관리시스템 내 안전분석 현황에서 확인이 가능하며, 주요 위험사건 및 상세위험사건은 다음과 같이 정의하고 있다.

표 2.7.3 열차탈선사고의 위험사건목록 표준코드 (2010, 한국철도공사)

위험사건 속성분류(위험원)	위험사건
위험사건속성명	철도사고 및 운행장애 위험사건
진로구성결함_탈선	선로전환(장치/취급)결함의 원인으로 진로구성결함이 발생하여 열차탈선
	패색결함의 원인으로 진로구성결함이 발생하여 열차탈선
	연동장치결함의 원인으로 진로구성결함이 발생하여 열차탈선
	열차집중제어장치(CTC)결함의 원인으로 진로구성결함이 발생하여 열차탈선
	신호기 등의신호결함의 원인으로 진로구성결함이 발생하여 열차탈선
	자동열차제어장치결함의 원인으로 진로구성결함이 발생하여 열차탈선
운전취급결합_탈선	신호/지시취급 결함의 원인으로 운전취급결함이 발생하여 열차탈선
	제동체결 지연/미체결/완해불량의 원인으로 운전취급결함이 발생하여 열차탈선
	과속운행의 원인으로 운전취급결함이 발생하여 열차탈선
선로결함_탈선	궤도결함 등 선로결함으로 열차탈선
	노반결함 등 선로결함으로 열차탈선
	기타결함 등 선로결함으로 열차탈선
장애물_탈선	외부장애물 등 선로상의 장애물에 따른 열차탈선
	차량부품/적재물 등 선로상의 장애물에 따른 열차탈선
	시설/적재물 등 선로상의 장애물에 따른 열차탈선
주행장치 결함_탈선	주행장치 결함으로 열차탈선
하중분포불량_탈선	중량화물적재 불량/유동 등 하중분포 불량에 따른 열차탈선
	차량-궤도 인터페이스 부적합 등 하중분포 불량에 따른 열차탈선
기타_탈선	열차탈선 기타 위험사건

(나) 해외 철도차량 일탈사고 위험요소 분석, 원인 분류 체계 조사 수행

▪ 해외의 경우, EU에서 탈선사고에 대한 피해경감 및 예방 등의 조치를 위한 연구를 진행하기 위한 D-Rail Project를 수행하였으며, 이는 '05년에서 '10년의 사고사례를 토대로 탈선에 대한 원인과 리스크, 탈선결과 및 탈선상황에서의 피해상황을 조사 및 분석하였다. 탈선사고의 주요원인이 되는 시설오류, 차량오류, 운영오류에 추가적으로 기후 환경 및 제 3의 요인 등과 확인 불가 요인을 추가하여 5가지의 메인 카테고리를 선정, 유럽 뿐 아니라 미국과 러시아의 탈선사고 원인 및 경제적 영향 등에 대한 통계자료를 작성하였다.

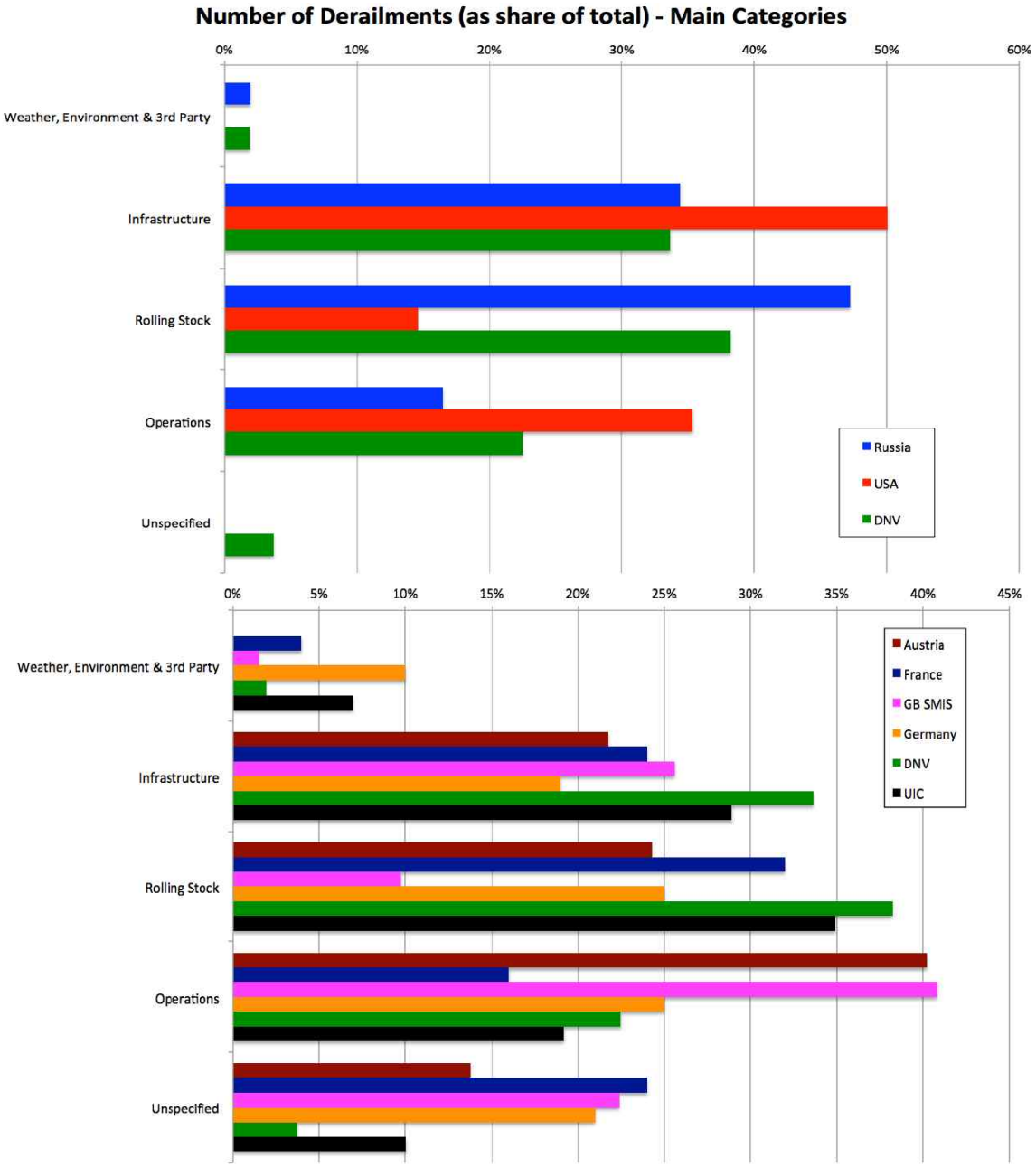


그림 2.7.1 Breakdown of number of derailments (as share of total) into major categories

(다) 국내외 선행연구 비교

▪ 국내의 경우, 사고를 분기탈선, SPAD, 결함탈선으로 나누어 각각의 사고별 위험사건을 설정하였지만, 해외의 경우는 모든 사건에서의 위험사건을 설정하였다. 또한, 국내의 경우 위험사건의 중첩을 고려하지 않았지만, 해외의 경우 중첩을 고려한 경우가 존재하였다. 위험사건 및 주요 원인의 종류가 해외의 경우(약 40종 이상)와 국내의 경우(약 30종 이상)가 차이가 있음이 확인되며, 이는 화물수송에 대한 비중이 큰 해외의 철도 교통 환경과, 인적수송에 대한 비중이 큰 국내의 교통 환경의 차이 때문에 발생하였다고 판단이 가능하였다(화물의 불균등 선적 등).

(3) 철도차량 일탈사고 원인분석

(가) 철도차량 일탈사고 피해영향 분석 방법론 조사

▪ 국내 철도열차 탈선사고 보고서 등을 토대로 조사한 결과, 철도운영기관의 사고비용 관리 항목은, 인적피해량, 직접적 물적피해비용(차량피해비용, 선로복구비용, 시설피해비용, 응급복구비용, 반환 운임비용)의 영역에서 취급함을 확인할수 있었다. 하지만, 철도사고 사고비용 산정에 관한 연구(신형진 외, 2010)과 안전지표 설명 및 데이터 출처(한국철도공사, 2012)에 따르면, 이는 국내 도로교통사고비용 산정방법바탕으로 철도사고에 적용시키며, 본 산정방식을 적용하는 대상사고도 한국철도공사의 철도사고로 한정되어 있어 타 운영기관의 철도사고에 대한 산정은 이루어지지 않는 것으로 확인되었다. 철도안전관리지표의 사고비용관련 지표와 철도운영기관의 사고비용 관리 항목은 물적피해, 운행손실비용, 재산피해보상비용, 근로손실비용, 기타비용으로 분류 가능하지만, 각 운영기관 별 자체적인 사고비용 관리 항목이 존재하며, 지연에 대한 영업손실비용, 사고로 인한 근로손실비용, 기타 사고조사비용 등은 전반적으로 관리하고 있지 않는 것으로 확인할 수 있었다.

▪ 반면, 해외의 경우, 영국의 경우에는 지연비용, 인적피해비용, 차량피해비용, 기반시설피해비용, 사고복구/조사비용, 기타비용의 총 6개의 대분류 및 25개의 중분류로, 호주의 경우 인적비용, 자산비용, 기타비용의 3개의 대분류와 16개의 중분류로 사고비용 항목을 구성하고 있으며 이 두 사고분류체계는 대체적으로 유사한 거사을 확인할 수 있었다.

▪ 국내외 철도사고 피해영향 분석은 주로 직접적 피해에 한정되어 있으며, 간접적 피해를 고려하더라도 일부만 포함시키며, 또한 피해영향 분석에 대한 전체 과정의 전개 등을 포함하지 않고 단순 고려 항목 별 가이드 라인정도에 제한되어 있었다.

(나) 철도차량 일탈사고 피해영향 산정방안 조사

▪ 현재 철도안전관리지표 내의 비용에 대한 항목은, 인명손실비용, 물적피해비용, 운행손실비용, 보상비용 직원손실비용 등으로 관리하고 있으나, 대부분 직접적 피해 비용 산정에 한정되어 있었다. 철도사고 사고비용 산정에 관한 연구(신형진 외, 2010)에서는

현재 철도안전지표 상 사고비용관련 지표들에 추가적으로 해외의 사고비용항목을 적용하는 방법으로, 피해영향 산정 방법을 다음과 같이 제안하고 있다.

표 2.7.4 철도사고인명피해비용 산정방법

항목		자동 산정방법 (사상자 1명당 비용)
생산손실비용	사망	● 연령별 평균수입 × 활동기간 × 생존확률 × 경제활동 참가율
	중상 경상	● 연령별 평균수입 × 사고로 인한 손실 근로일 수 × 경제활동 참가율
의료비용		● 사고건당 의료 및 행정비용(원단위)을 사상자 1명당 비용으로 환산하여 적용 (철도공사의 사고건당 추정의료/행정비용을 동일 적용) ※ 사망자(중상, 경상) 1인의 의료비용 : 총 사상건수 × 사고건당추정의료비용) / 총 사망자(중상, 경상)
행정비용		
심리적 비용		● 물리적비용(생산손실, 의료비, 물적 피해비, 행정비용)의 배분비율(영국기준)을 적용하여 사망자는 물리적비용 대비 38%, 중상자 는 100%, 경상자는 8%를 적용함 (한국교통연구원, 2005년 교통사고비용 추정)
주석		● 평균수입 및 생존확률, 경제활동 참여율은 남녀 기준으로 제시됨 ● 활동기간은 65세를 퇴직나이로 가정함 ● 통계청 [경제활동인구연보]로부터 경제활동 참가율 구함 ● 노동부 [임금구조 기본통계조사 보고서]로부터 평균수입을 구함 ● 의료비용 및 행정비용은 한국교통연구원 [교통사고비용추정]의 사고건당 추정비용(원단위) 활용 ● 심리적비용은 물리적비용의 사상자별 배분비율을 적용(영국 및 한국교통 ● 통계청 [생명표]로부터 생존확률 구함연구원 산정기준)

표 2.7.5 운영손실비용 산정방법

항목	산정방법
운행지연손실비용	● 비용 = (지연차량수 × 지연시간) × (총수입)/(총 운행차량수×영업시간) ● 철도구분별로 비용산정 ● 지연차량수 및 지연시간은 사고통계 시스템의 값 활용 (지연시간 산정 : 지연종료시간 - 지연시작시간) ● 철도구분(고속철도, 일반철도, 도시철도) 별 총수입, 총 운행차량수, 영업시간을 년 단위로 관리하고 적용하여야 함
대체수송 비용	● 비용 = (일일버스 대당이용 비용) × (운행 대체 차량수) ● 운행 대체 차량수 = 버스 차량수 × 사용일 수(운영기관 입력 및 관리항목) ● 열차사고 및 운행지연으로 인한, 타 교통편 편성 및 대체비용임

표 2.7.6 물적피해비용 산정방법

항목			산정방법
물적피해비용	차량 피해비용		● 5개의 개별항목으로 관리, 시설피해 비용의 경우, 전체 또는 세부로 나누어서 관리
	선로 피해비용		
	시설 피해비용	신호통신 피해비용	
		전철설비 피해비용	
		기타시설 및 구조물 피해비용	
		시설 피해비용 전체	

표 2.7.7 기타비용 산정방법

항목	산정방법
사고조사비용	● 사고조사비용 = (시간당 평균임금) × (사고조사 시간) ● 사고조사 시간 = 조사인원수 × 시간 (운영기관 입력 및 관리항목) ● 시스템 관리 항목 : 시간당 평균 임금 ● 비용입력 대상 : 철도사고 보고에 관한 지침 제4조(철도사고등의 즉시보고), 제5조(철도사고 등의 조사보고) 등이 해당
법적 비용	● 실제 발생된 비용 입력 ● 사고건당 압력이 불가함으로 비용처리 된 누계 비용을 입력·관리 함
이미지손실 비용	● 철도사고로 인해 해당열차를 운행할 수 없어 발생하는 영업상 손실비용과 행정적인 제재로 인한 손실, 그리고 사고로 해당 철도운영기관의 신뢰도 하락으로 인한 예약취소(발매손실) 및 수요감소에 따른 손실비용을 포함
기타	● 기타 비용(항목이 없는 비용)

(다) 국내외 타 산업분야의 피해영향 산정 방법론을 고려한, 철도일탈사고 피해영향 산정 방법론(안) 제시

▪ 국내 항공분야에서는 직접비와 간접비로 구분, 직접비는 기체 손실비용, 사고수습비용, 사고분석비용, 의료비용으로 구성되며, 간접비는 생산손실비용, 영업손실비용(운행감축손실, 행정재재 벌금손실), 이미지손실비용(예약취소 손실, 시장점유 감소 손실) 심리적(고통)비용 등으로 구성되어져 있다. 환경 및 화공분야에서는 신규 사업계획 및 사고발생 시 피해영향 분석을 위해 여러 가이드 라인을 제시하고 있으며, 항목에 대한 상세보다는 전체적인 Framework를 제시하고 있다.

① Guidance on Socio-Economic Analysis - Restrictions
(2008, European Chemicals Agency /ECHA - REACH)

② COCO-2: A Model to assess the Economic Impact of an Accident
(2008, UK Health Protection Agency)

③ UK Recovery handbook for Chemical/Biological/Radiation incidents (2012/2015/2015, Health Protection Agency)

④ NCHRP Report 755 - Comprehensive Costs of Highway-Rail Grade Crossing Crashes (2013, Transportation Research Board)

⑤ Socio-Economic and Environmental Disaster Impact Assessment Handbook for Jamaica (2013, Planning Institute of Jamaica)

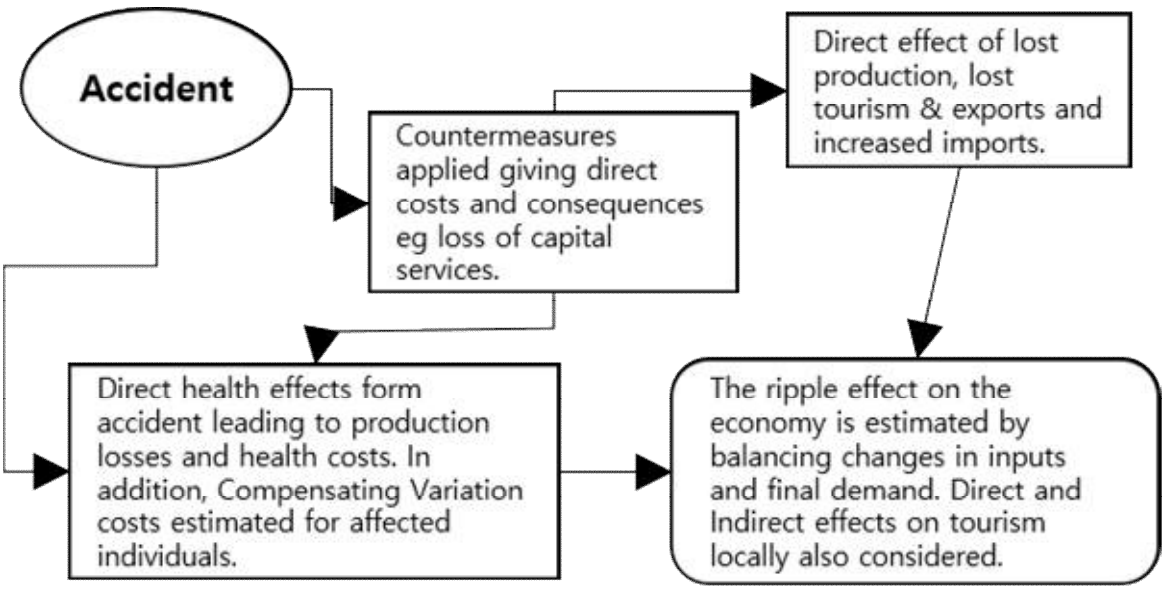


그림 2.7.2 COCO-2의 사고발생 후 주변영향 발생 흐름 개략도

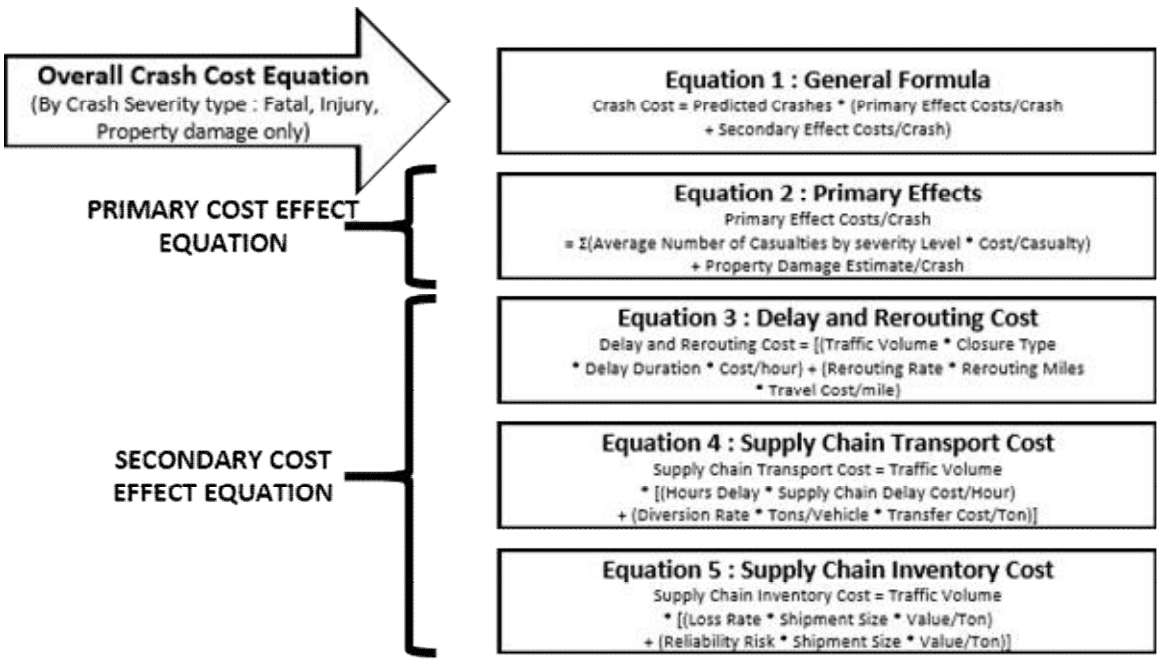


그림 2.7.3 NCHRP Report 755의 도로-철도 건널목 교통사고 비용 산정 계략도

나. 철도차량 일탈사고 주요 영향인자간 상관관계 분석

(1) 고장 수목 분석(Fault Tree Analysis)를 통한 철도차량 일탈사고 세부 원인인자 선정

▪ 철도차량 일탈사고를 주요사건(Top Event)로 설정하고 다음과 같이 중간사건(Intermediate Event) 설정 및 각각의 중간사건 별 기본사건 (Basic Event)을 설정, 고장수목분석을 수행하였다.

▪ 신호 결함의 경우, 신호전달 및 전달체계 오류, 폐색 장치 오류, 신호 장비 결함으로 기본사건을 선정 하였다. 인적 결함의 경우, 시설 정비 불량, 차량 정비 불량, 운전 불량, 신호제어 불량, 외부 인적오류로 나눌 수 있지만, 기존 인적결함에 포함되었던 시설 정비 불량과 차량 정비 불량, 신호제어 불량의 경우 각각 시설 결함, 차량 결함, 신호 결함의 기본사건이 되는 일부 항목의 원인과 상동하므로, 운전 불량과 외부 인적오류에 관하여 전개하였다. 시설 결함의 경우, 분기기부, 노반부, 레일, 기타 시설 결함으로 분류하여 각각 전개하였고, 차량 결함의 경우, 동력차 결함, 객차결함, 차량 연결부 결함의 중간사건을 가지며, 각 중간사건 별 기본사건을 전개하는 형태로 연구를 수행하였다.

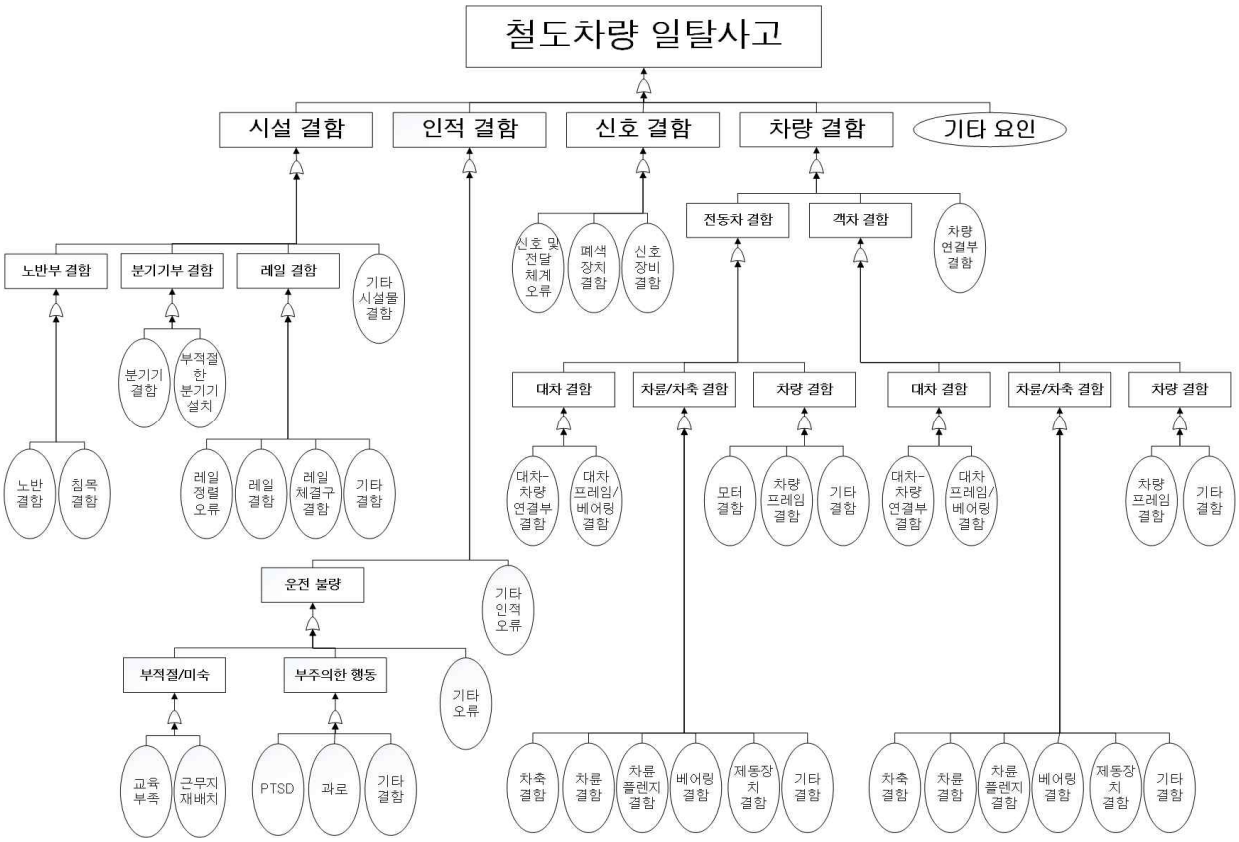
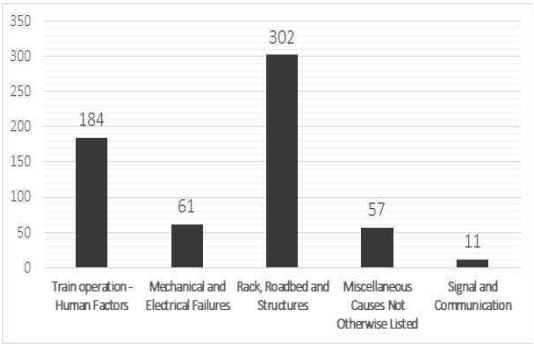


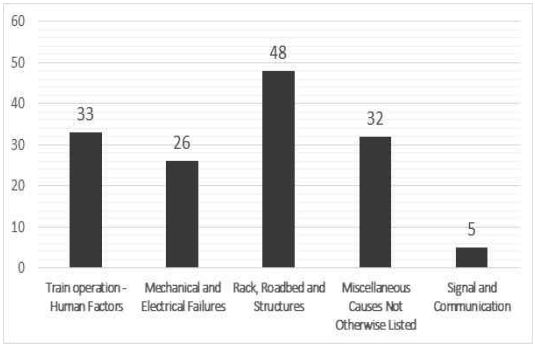
그림 2.7.4 철도차량 일탈사고의 고장수목도

(2) 위험도 평가 주요 영향인자 간 상관관계 분석

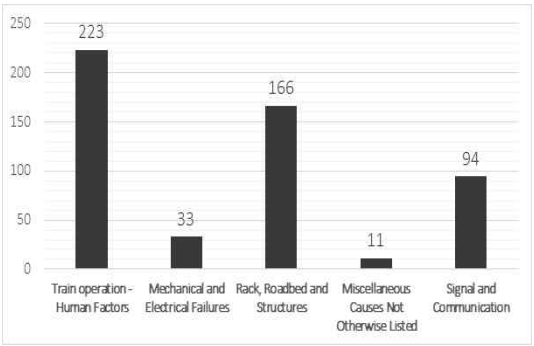
▪ 미국, 영국, 유럽, 일본, 호주의 철도차량 일탈사고 보고서 및 간략 보고서를 분석하여 다음과 같이 영향인자 분포를 확인하였다.



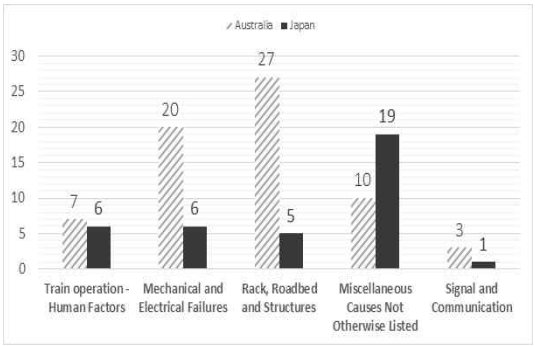
(a) 미국 (2001~2016)



(b) 영국 (1990~2016)



(c) 유럽 (2004~2016)



(d) 호주 (2001~2016), 일본 (2007~2015)

그림 2.7.5 해외 철도차량 일탈사고의 주요 영향인자 분포

▪ 국내의 경우, 2006년부터 2015년 까지 발생한 총 56건의 탈선 사고보고서를 수집 및 분석하였으며, 기존 원인분류 체계 내에서 시설 보수 불량 및 신호 제어 불량 등이 인적 결함에 포함되어 분류되어 있기 때문에 다음과 같이 해외와 차이를 보이는 분포를 나타낸다.

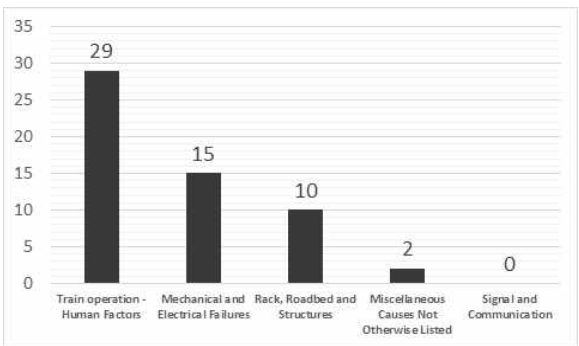


그림 2.7.6 국내 철도차량 일탈사고의 주요 영향인자 분포

▪ 본 연구에서는 각각의 결함을 재분류하여 다음과 같이 철도차량 일탈사고의 원인에 대한 분포를 확인하였다.

① 국내 : [1순위 - 부주의에 의한 운전오류],
[2순위 - 차륜·차축 결함], [3순위 - 궤도 결함]

② 미국 유럽 : [1순위 - 궤도 결함], [2순위 - 신호 결함],
[3순위 - 분기기 결함]

③ 영국 : [1순위 - 궤도 결함], [2순위 - 신호 결함],
[3순위 - 부주의에 의한 운전 오류]

표 2.7.8 고장수목분석을 이용한 철도차량 일탈사고의 주요 영향 인자별 발생확률

주요 인자 항목 (중간사건)			세부 인자(기본사건)	한국		미국		영국		유럽	
시설 결함	노반부 결함		노반 결함	0.0179	0.0529	0.0098	0.0098	0.1241	**0.1241**	0.0562	0.0752
			침목 결함	0.0357		–		–		0.0201	
	분기기부 결함		분기기 결함	0.0357	0.0702	0.1886	**0.1939**	0.0621	0.0621	0.0361	**0.1407**
			부적절한 분기기 설치	0.0357		0.0065		–		0.1084	
	레일 결함		레일정렬오류	0.1964	**0.2390**	0.1415	**0.2804**	0.0483	**0.3004**	0.4739	**0.6348**
			레일 결함	–		0.0569		0.2276		0.2369	
			레일 체결구 결함	0.0179		0.0309		–		0.0361	
			기타 결함	0.0357		0.0829		0.0483		0.0562	
	기타 시설물 결함		기타 시설물 결함	0.0179	0.0179	0.0098	0.0098	0.0276	0.0276	0.0361	0.0361
차량결함	전동차 결함	대차 결함	대차-차량 연결부 결함	0.0179	0.0354	–	0.0016	–	0.0621	–	0.0040
			대차 프레임/베어링 결함	0.0179		0.0016		0.0621		0.0040	
		차륜/차축 결함	차축결함	0.0179	**0.2137**	0.0098	0.0369	0.0276	**0.1441**	0.0281	0.0968
			차륜결함	0.0536		0.0130		0.0138		0.0361	
			차륜 플렌지 결함	0.0179		0.0049		–		–	
			베어링 결함	0.1071		0.0049		0.0069		0.0201	
			제동장치 결함	0.0179		–		0.0759		0.0120	
			기타 결함	0.0179		0.0049		0.0276		0.0040	
		차량 결함	모터 결함	0.0179	0.0705	0.0016	0.0292	0.0069	0.0480	–	0.0040
			차량 프레임 결함	–		–		–		0.0040	
			기타 결함	0.0536		0.0276		0.0414		–	
	객차 결함	대차 결함	대차-차량 연결부 결함	0.0179	0.0354	–	0.0016	–	0.0621	–	0.0040
			대차 프레임/베어링 결함	0.0179		0.0016		0.0621		0.0040	
		차륜/차축 결함	차축결함	0.0357	**0.2733**	0.0033	0.0194	0.0276	**0.1375**	0.0281	**0.1113**
			차륜결함	0.1250		0.0065		0.0138		0.0361	
			차륜 플렌지 결함	0.0179		0.0065		–		0.0161	
			베어링 결함	0.1071		0.0016		0.0069		0.0201	
			제동장치 결함	0.0179		–		0.0621		0.0120	
			기타 결함	–		0.0016		0.0345		0.0040	
		차량 결함	차량 프레임 결함	–	0.0714	0.0130	0.0323	–	0.0621	0.0040	0.0040
			기타 결함	0.0714		0.0195		0.0621		–	
	차량 연결부 결함		차량 연결부 결함	–	–	–	–	0.0345	0.0345	–	–
신호결함			신호 및 전달체계 오류	0.1250	**0.2310**	0.1870	**0.2224**	0.2345	**0.2974**	0.2691	**0.3462**
			폐색 장치 결함	0.0714		0.0309		0.0759		0.0562	
			신호 장비 결함	0.0536		0.0130		0.0069		0.0522	
인적결함	운전불량	부적절/미숙	교육 부족	0.0357	0.0529	0.0488	0.0488	0.0690	0.0690	0.0602	0.0678
			근무지 재배치	0.0179		–		–		0.0080	
		부주의한 행동	PTSD	–	**0.2809**	–	0.0553	–	**0.1760**	–	0.0476
			과로	0.0179		–		0.0207		0.0241	
			기타 결함	0.2679		0.0553		0.1586		0.0241	
		기타 오류	기타오류	–	–	0.0033	0.0033	0.0414	0.0414	–	–
	기타 인적오류		기타 인적오류	–	–	0.0390	0.0390	0.0414	0.0414	–	–
기타 결함			기타 결함	0.0179	0.0179	0.0927	0.0927	0.1241	**0.1241**	0.0442	0.0442

다. 정량평가 기반 철도차량 일탈사고 위험도 등급화모델 제안

(1) 사고 피해 영향 환경 요인 선정 및 분포 확인

▪ 철도차량 일탈사고는, 열차 탈선 당시 속도와 탈선 지점의 환경, 열차의 탈선이후 거동 등에 따라 그 피해의 정도 차이가 크게 발생한다.

▪ 기존 철도시스템 위험도 평가 매뉴얼(2011, 철도기술연구원)에서는 다음과 같이 탈선사고 표준 사고시나리오를 전개하고, 해당 표준 사고로 인해 발생하는 인명사상의 위험도를 등가사망환산지수를 적용하여 세부적으로 평가하였다.

① 이때, 사고의 위험도 평가지표를 인적 피해에 한정, 이상 검지, 제동 취급, 탈선상황, 위험노출인원으로 선정하였다.

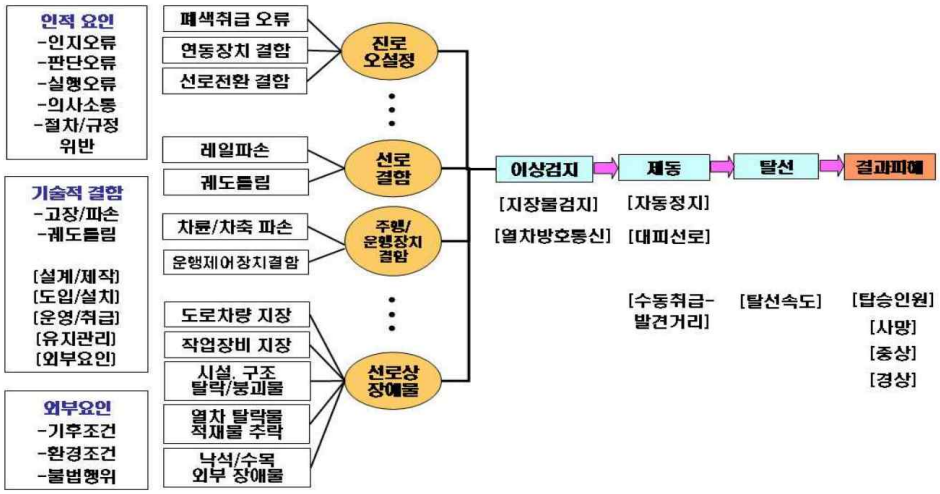


그림 2.7.7 철도 탈선사고 표준 사고시나리오 (2011, 철도기술연구원)

표 2.7.9 열차탈선사고 심각도 및 위험도 평가 지표

사고 구분	대상 위험사건	심각도 영향인자	결과 피해	위험도 평가지표
1) 운행 중 열차탈선 2) 입환 중 탈선	진로 오설정 운전취급 결함 선로 결함 주행/운행장치 결함 하중분포 결함 선로장해물로 진입 한계 지장물과 접촉	1) 이상검지 - 지장물 검지 - 열차방호 2) 제동 취급 - 발견거리 - 열차속도 - 자동/수동 제동 3) 탈선상황 - 대피선 유도 - 장소(터널/교량) - 전복 4) 위험노출인원 - 여객/화물 - 탑승인원(시간대)	1) 여객 - 사망 - 중상 - 경상 2) 직원 - 사망 - 중상 - 경상 1) 공중 - 사망 - 중상 - 경상	-대상 위험사건이 초래하는 등가인명사상 (사고/장애 이력 공학적 계산 또는 전문가 판단 적용) - 등가인명사상환산지표 중상10명 = 사망1명 경상200명 = 사망1명

▪ 기존 열차탈선사고 심각도 및 위험도 평가 지표는, 해당 사고가 단일 위험사건으로 발생하거나, 그 원인에 대한 방호가 용이한 경우 사용됨이 일반적이며, 본 연구에서 대상과 같이 철도차량 일탈사고와 같이 그 원인이 복잡하거나, 방호가 어려운 경우 적용하기 매우 어렵다.

▪ 또한, 인적 피해에 한정하여 시나리오 전개 및 영향인자 선정 등이 이루어진 바, 차량 피해, 시설 피해등과 같은 경제적 피해는 고려되지 않은 상태이다.

▪ 따라서, 본 연구에서는 철도차량 일탈사고의 사례 분석 결과를 통해, 다음과 같이 경제적 피해에 영향을 주는 환경인자를 선정하였다.

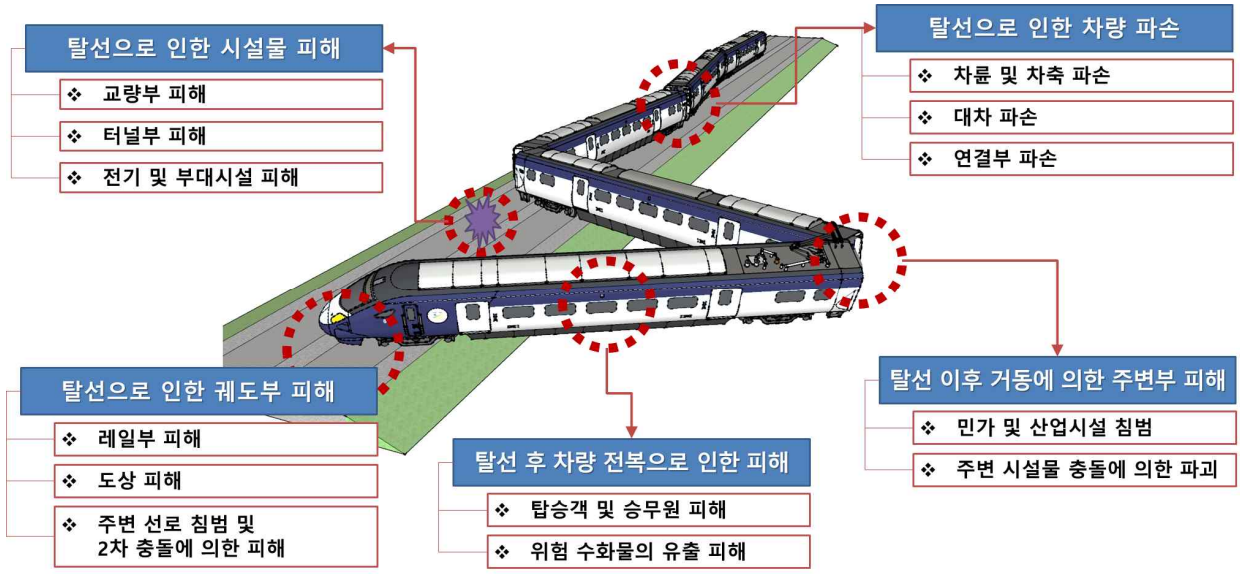


그림 2.7.8 철도차량 일탈사고의 피해 유형 개요

① 철도차량 일탈사고는, 열차의 탈선 시 속도에 따라 탈선 이후 열차의 거동이 결정됨, 따라서, 탈선 지점 설계 속도에 따라 다음과 같이 분류함

- 고속구간 (150km/h 이상) : 고속철도 운행구간
- 중속구간 (40~150km/h) : 일반철도 운행구간, 고속철도 속도 저하구간(역사진입)
- 저속구간 (40km/h 미만) : 일반철도 역사진입 구간, 차량 기지 입환 구간

② 철도차량 일탈사고는, 열차의 탈선 시 궤도가 설치된 시설물의 종류에 따라 피해 정도의 차이가 발생함.



a) 중국 윈저우 탈선사고 (2011)

- 교량 구간 탈선 사고
- 탈선 당시 속도 미상 (약 200km/h 주행구간)
- 탈선 이후 열차 다수 낙교 및 교량 상부 구조 피해 발생



b) 석포역 무궁화호 탈선사고 (2016)

- 터널 구간 탈선 사고
- 탈선 당시 속도 약 56km/h
- 탈선 이후 추가적인 2차 피해 없음

그림 2.7.9 궤도 시설물에 따른 일탈 사고 사례 비교

- 교량 구간 : 열차가 탈선 이후 낙교할 경우, 차량 손상 및 인명피해 가중 외에도 시설물 자체의 손상으로 인한 추가 피해가 야기됨

- 터널 구간 : 터널구간의 경우, 탈선 이후 열차의 거동을, 터널 구간 자체가 잡아주는 효과가 발생하여 일탈방호시설과 비슷한 효과가 발생 가능함. 다만, 사고 수습의 어려움 및 터널 자체의 붕괴 위험성이 있기 때문에 추가적인 방호대책 또한 필요함

- 일반 구간 : 일반 궤도 구간

③ 철도차량 일탈사고는, 열차의 탈선 시 궤도의 선형에 따라 추가적 고려가 필요함



a) 미국 Cimarron 탈선사고 (2016)

- 직선 구간 탈선사고
- 탈선 당시 속도 약 60 MPH
- 부상자 57인, 차량 피해 $ 2,784,355, 해당 궤도 피해 $363,000



b) 미국 필라델피아 탈선사고 (2015)

- 곡선 구간 탈선사고
- 탈선 당시 속도 약 59 MPH
- 부상자 13인, 차량 피해 $4,148,125, 주변 궤도 피해 $181,732

그림 2.7.10 궤도 선형에 따른 일탈 사고 사례 비교

- 곡선 구간 : 곡선구간의 경우, 탈선 발생 당시 탈선 각도가 직선구간에 비해 크

고, 일탈사고 발생의 경우에도 관성 및 원심력에 의해 차량이 궤도 외측으로 과도하게 일탈되는 경향이 있음. 따라서, 차량 피해, 주변부 피해는 가중되나, 궤도 자체 피해는 상대적으로 적음.

- 직선 구간 : 직선구간은 곡선구간에 비해, 탈선 발생 당시, 열차가 기존 진행 방향의 관성에 의해 계속 거동하는 경향이 큼. 따라서, 궤도 자체 피해가 가중되나, 차량 피해, 주변부 피해는 상대적으로 적음.

- 분기기 구간 : 분기기 구간은, 열차의 진행방향이 급격하게 변경되기 때문에 별도의 고려가 필요한 구간임

④ 철도차량 일탈사고는, 열차의 탈선 시 해당 지점의 주변 환경에 따라 직접적인 피해(시설물 및 주거지 피해 등)이 추가적으로 발생할 수 있음



a) 후쿠치야마선 탈선사고 (2005)
- 비 임야지 탈선 사고
- 곡선부 과속 운행으로 인한 탈선 (탈선 당시 속도 116km/h)
- 탈선 당시, 주변 맨션과 충돌, 주변 피해 발생



b) 프랑스 고속열차 TGV 탈선사고 (2015)
- 임야지 탈선 사고
- 곡선부 과속 운행으로 인한 탈선 (탈선 당시 속도 352km/h)
- 탈선 당시, 주변으로 심한 일탈이 발생하였으나 주변 피해 미비

그림 2.7.11 주변 환경에 따른 일탈 사고 사례 비교

- 임야지

- 비 임야지 (도심지, 산업지, 교통시설 등)

▪ 또한, 기존 사고사례의 분석을 통해, 차량의 탈선 이후 거동으로 인한 인명피해 및 사고 심각도 경향성이 존재함을 확인하였고, 이를 고려하기 위하여 현재 국내 운영 중인 열차의 연결상태를 고려하려 하였다. 현재 국내에 운영중인 열차들의 연결상태는 관절 대차 연결식 열차와, 일반 연결식 열차로 분류할 수 있다.



그림 2.7.12 현재 국내 운영 중인 열차의 연결상태



a) 전주선 율촌역 탈선사고 (2016)
- 탈선 당시 속도 약 117~127km/h
- 승객 6인 부상, 승무원 1인 사망(총 28인 탑승)

b) 강릉선 KTX 탈선사고 (2018)
- 탈선 당시 속도 약 103km/h
- 승객 15인 부상, 승무원 1인 경상(총 201인 탑승)

그림 2.7.13 국내 철도차량 일탈 사고 사례 비교

▪ 철도차량의 경우, 관절 대차를 적용할 경우 다음과 같은 장단점이 존재한다.

- 차량과 차량 사이 대차를 통해 곧바로 이어지기 때문에 진동이 저감됨
- 대차의 숫자를 감소시켜, 1편성 열차의 경량화가 가능함
- 대차의 변위각이 줄어들어 곡선부 안정화가 용이함
- 탈선 및 충돌시 차량의 분리를 막아주어 잭나이프/전복 현상 방지 효과 존재함
- 대차간격 고려가 필수적이기 때문에, 차량한계 및 편성에 악영향을 줌
- 각 차륜에 걸리는 하중 증가 및 궤도 재하하중이 증가함

▪ 현재 국내에 운영중인 차량 중, 고속선의 경우 관절 대차 연결식 열차를, 일반선의 경우 일반 연결식 열차로 운영하고 있다. 또한, 향후 도입 예정 차량(EMU-250, EMU-320 등)의 경우, 일반 연결식 열차로 운영 예정에 있으며, 도입 시 기존 관절 대차 연결식 열차 운행에 따른 탈선 이후 위험 거동 감소 효과가 사라질 것으로 예상된다. 따라서, 관절 대차 연결식 열차와 일반 연결식 열차로 나누어 운영되고 있는 현 시점과, 향후 시점을 고려하여 통합된 사고 심각도 영향 인자를 다음과 같이 분류하였다.

표 2.7.10 차량 연결 구조에 따른, 궤도 구간 별 사고 심각도 영향 인자 분류

대상	평면선형 (1)			비 임야지/임야지 (2)			교량/터널/일반 (3)			주행속도(4)		
	구분	km	%	구분	km	%	구분	km	%	구분	km	%
관절 대차 연결식 열차 구간 (현행)	총연장	658.28	100	비임야	77.51	11.77	교량	186.50	28.33	고속	605.48	91.98
	직선구간	435.53	66.16				터널	284.64	43.24			
	곡선구간	185.48	28.18	임야	580.77	88.23				중속	52.80	8.02
	분기기구간	37.26	5.66				일반	187.14	28.43			
관절 대차 + 일반 연결식 열차 혼용 구간 (현행)	총연장	857.90	100	비임야	173.34	20.21	교량	57.52	6.70	중속	696.26	81.16
	직선구간	-	60.00				터널	70.41	8.21			
	곡선구간	-	30.00	임야	684.56	79.79				저속	161.71	18.84
	분기기구간	-	10.00				일반	729.98	85.09			
일반 연결식 열차 구간 (현행)	총연장	2477.9	100	비임야	500.66	20.21	교량	116.14	6.70	중속	2011.1	81.16
	직선구간	-	60.00				터널	203.35	8.21			
	곡선구간	-	30.00	임야	1977.2	79.79				저속	467.09	18.84
	분기기구간	-	10.00				일반	2108.4	85.09			
국내 철도노선 전체 평균 (향후)	총연장	3994.1	100	비임야	751.51	18.82	교량	410.17	10.27	고속	605.48	15.16
	직선구간	2437.0	61.02				터널	558.40	13.98	중속	2760.1	69.10
	곡선구간	1186.2	29.70	임야	3242.6	81.18						
	분기기구간	370.84	9.28				일반	3025.5	75.75	저속	628.50	15.75

(2) 정량평가 기반 철도차량 일탈사고 위험도 등급화 모델 제안

▪ 사고 위험도 요인을 토대로 직접적 피해규모 추산액 산정식을 다음과 같이 제안하였으며, 각각의 추산액은, 국내외 사고 사례 분석을 통해 가정하였다.

※ 직접적 피해규모 추산액 = 차량피해 추산액 + 궤도/분기기 피해 추산액
+ 시설물 피해 추산액 + 주변 피해 추산액

① 차량피해 추산액 산정의 경우, 과거 대구역 사고로 대파되었던 KTX 33호기 수리비용인 13량 기준 64억원을 기준으로 하여(대구역 사고로 대파됐던 KTX 33호... 파란만장 복귀 사연, 2014, 이종현, 조선비즈), 1량당 약 5억원 이상의 비용이 발생함을 확인할 수 있으며, 일반선의 수리비의 경우, 과거 수리비용을 참고하여 1량당 약 1억 5천만원 이상의 비용이 발생한다고 가정하였다.

- 단, 철도차량 일탈 사고 이후 해당 열차만 손상된다는 가정하에 - 즉, 추가적 충돌이 발생하지 않을 경우, 해당 열차의 파손 정도를 과거 사고사례를 통해 가정하였다.

② 궤도/분기기 피해 추산의 경우, 궤도/분기기 피해 추산액은 “자갈도상과 콘크리트 도상 궤도구조의 경제성 비교”(2006, 박종복 외)에서 제시한 2006년 기준 콘크리트도상 궤도구조의 유지관리 비용에 실질 할인율을 적용하여 단위 비용을 가정, 추산에 이용하였다.

표 2.7.11 콘크리트 궤도 유지관리 비용

유지관리항목	비용(천원/㎞, 2006)	비용(천원/㎞, 2018)
콘크리트도상 보수	227,338	252,711
방진재 레일패드 교체	35,727	39,714
RC 침목교체	232,859	258,848
레일교체	217,627	241,916
콘크리트도상 교체 (교체 213,202 + 폐기 181,205)	394,407	438.426
체결구 교체	25,021	27,814
분기기 교체	133,024	147,870

③ 시설물 피해 추산의 경우, 교량에 한하여 추산액 산정을 위한 단가를 선정하였으며, 대상 교량은 철도교량에서 많이 쓰이는 PSC Box 거더교를 대상으로 철도차량 일탈사고 발생 시 상부구조가 파손되어 해체 폐기 및 재설치 한다고 가정하고 추산액을 산정하였다. 여기서 건설단가는 철도투자편람 산출기준을 준용하여 2014년 기준 산정한 m당 공사단가(쐐기형 핀바를 이용한 프리스트레스트 거더의 설계기법 개발, 2014, 서경석)와 2001년 기준 교량별 해체폐기비용(교량별 해체폐기 비용, 2001, 중앙대학교 건설산업기술연구소)에 각각 할인율을 적용하여 가

정 및 추산하였다.

표 2.7.12 PSC-Box 거더교의 건설 및 해체 폐기 단가

구분	비용(원/m)	비용(원/m, 2018)
PSC-Box 거더교 건설단가	22,956,581	23,464,448
PSC-Box 거더교 해체 폐기 비용	831,106	967,894

④ 주변 피해 추산액은, 철도차량 일탈사고 발생 시, 특정 구역의 인구가 대피하는데 소요되는 비용과, 사고사례 분석을 통한 피해복구액 가정을 통하여 추산하였다.

- 특정 구역의 인구가 대피하는데 소요되는 비용의 경우 국내 도심지 인구밀도 평균과 1인당 순간 이주 보상액을 곱하여 계산하며, 순간 이주 보상액은 다음과 같이 계산이 가능하다.(한국 월성, 고리 원전 1호기 사고피해 모의실험, 2012, 박승준 외).

※ 1인당 순간 이주 보상액 = 이동을 위한 교통비 (10만원)
+ 일시적 숙박비용 금액 (10만원 × 14일) + 이사비용(200만원)

≒350만원/1인

표 2.7.13 국내 도심지 인구밀도(2015, 통계청)

행정구역별	면적(km2)	인구밀도 (인/km2)
서울특별시	605.2	16,364.0
부산광역시	769.9	4,479.9
대구광역시	883.6	2,791.0
인천광역시	1062.6	2,755.5
광주광역시	501.2	2,998.8
대전광역시	539.3	2,852.3
울산광역시	1060.8	1,099.6
세종특별자치시	464.9	439.0
경기도	10183.5	1,226.4
도심지 평균 인구밀도		**2218.1**

표 2.7.14 항목별 피해규모 추산액 산정 기준

피해 항목	구분		금액(천원)	추산 기준	비고
차량 피해 추산액	고속		약 1,500,000 이상	차량 3량 대파 및 전면 수리 비용 (고속선)	1) 수리비용의 경우, 과거 차량 수리비용을 참고하여 다음과 같이 산정 - 고속선 1량 전면 수리비 : 5억 - 일반선 1량 전면 수리비 : 1억 5천 2) 향후 신규 차량 도입 시, 고속선과 일반선의 피해 추산 기준이 변경될 수 있음
	중속		약 1,000,000 이상	차량 2량 대파 및 전면 수리 비용 (고속선)	
			약 600,000 이상	차량 4량 대파 및 전면 수리 비용 (일반선)	
	저속		약 50,000 미만	1량 차량 및 대차 파손 or 경미한 손상 (고속선)	
			약 30,000 미만	1량 차량 및 대차 파손 or 경미한 손상 (일반선)	
궤도 피해 추산액	곡선	고속	약 100,672 이상	100m 이상 구간 피해 (콘크리트 도상 교체)	1) 해당 추산에 사용한 비용은 다음과 같으며, m당 단위비용을 가정, 추정하였음 - 방진재 레일패드 교체 - RC 침목 교체 - 레일 교체 - 체결구 교체 2) 또한, 콘트리트 도상 교체(폐기 및 교체)와 보수는 분리하여 추산함 3) 분기기구간의 경우, 분기기 교체를 가정 추산함
		중속	약 50,336 이상	50m 이상 구간 피해 (콘크리트 도상 교체)	
		저속	약 16,420 미만	20m 구간 피해 (콘크리트 도상 보수)	
	직선	고속	약 201,344 이상	200m 이상 구간 피해 (콘크리트 도상 교체)	
		중속	약 100,672 이상	100m 이상 구간 피해 (콘크리트 도상 교체)	
		저속	약 32,840 미만	40m 구간 피해 (콘크리트 도상 보수)	
분기기 구간 피해 추산액	고속		약 54,525 이상	분기기 1틀 (전장 93m) 교체 + 도상 교체	
	중속		약 22,279 이상	분기기 2틀 (전장 38m) 교체 + 도상 교체	
	저속		약 10,415 이상	분기기 2틀 (전장 26m) 교체 + 도상 보수	
시설물 피해 추산액 (교량)	직선	고속	약 1,954,587 이상	교량 2경간 손상 (폐기+부설)	1) 본 시설물 피해 추산액의 경우, 철도교량에 많이 쓰이는 PSC-Box 거더교를 대상으로 가정하고 추산함 2) 이때, 교량의 손상은 상부구조 파손 상황을 가정하여 추산함
		중속	약 977,294 이상	교량 1경간 손상 (폐기+부설)	
		저속	-	교량 손상 없음 (궤도 피해에 한정)	
	곡선	고속	약 977,294 이상	교량 1경간 손상 (폐기+부설)	
		중속	약 977,294 이상	교량 1경간 손상 (폐기+부설)	
		저속	-	교량 손상 없음 (궤도 피해에 한정)	
주변 피해 추산액 (교량, 일반구간에 해당)	직선	고속	약 2,888,172 이상	50㎡ 인구 대피 + 피해복구액	1) 터널내 탈선의 경우, 터널에 열차가 진로를 방해 받기 때문에 주변피해가 발생하지 않는다 가정, 제외함 2) 국내 도심지 인구밀도 평균과 1인당 순간 이주 보상액을 곱하여 추산함
		중속	약 500,000 이상	10㎡ 지역 피해복구액	
		저속	-	없음	
	곡선	고속	약 57,763,446 이상	1㎢ 인구 대피 + 피해복구액	
		중속	약 5,776,345 이상	100㎡ 인구 대피 + 피해복구액	
		저속	-	없음	

▪ 앞서 언급한 바와 같이, 철도차량 일탈 사고는 그 사례가 전 세계적으로 매우 드믄 편이며, 사고 이후 피해에 대한 정확한 산정 결과 또한 많이 존재하지 않는다.

▪ 따라서, 본 연구에서는 철도안전정보종합관리시스템, 철도산업정보센터, 한국 항공 철도 사고 조사위원회의 보고서(06~15년, 56건)외에도, 유럽의 E-Rail DB(558건), 영국 HSE/RSSB/RAIB 사고보고서(145건), 일본 MLIT(38건), 호주 ATSB(69건), 캐나다 TSB(209건) 등의 탈선사고 보고서 등을 이용, 대표사례 선정 및 경향성 분석 등을 통해 피해 추산액을 선정하였다.

▪ 앞서 제시한 피해액 추산식을 통해 얻어진 사고 위험도 인자 별 분포를 EU에서 이용하는 철도 사고의 물적 피해규모를 기준으로 사고 규모별 분류법을 이용해, 국내 궤도환경에서의 철도차량 일탈사고 위험군 분류 기준(안)을 제시하였다.

표 2.7.15 EU의 철도사고 물적 피해규모 기준과, 철도차량 일탈사고 위험군 분류 기준(안)

EU의 철도사고 물적 피해규모 기준	철도차량 일탈 사고 위험군 분류 기준(안)
- None; - Less than €150,000 (<€150,000); - Equal to or greater than €150,000 (≥€150,000); - Equal to or greater than €2,000,000 (≥€2,000,000).	고위험군 : 피해추산액 약 2,000 백만원 이상
	중위험군 : 피해추산액 약 150 백만원 이상
	저위험군 : 피해추산액 약 150 백만원 미만

표 2.7.16 관절 대차 연결식 열차 구간의 위험군 분류

분류	궤도 환경			
고위험군 (30.32%)	비임야지	고속	교량	곡선
				직선
			일반	곡선
				직선
			분기기	
		중속	교량	곡선
				직선
			일반	곡선
	임야지	고속	교량	곡선
				직선
		중속		곡선
				직선
중위험군 (64.69%)	비임야지	고속	터널	직선
				곡선
		중속	일반	직선
			터널	곡선
				직선
			분기기	
	임야지	고속	터널	곡선
				직선
			일반	곡선
				직선
		중속	터널	곡선
				직선
			일반	곡선
				직선
저위험군 (4.99%)	임야지	고속	분기기	
		중속	분기기	

표 2.7.17 혼용 구간 및 일반 연결식 열차 구간의 위험군 분류

분류	궤도 환경			
고위험군 (5.18%)	비임야지	중속	교량	곡선
				직선
			일반	곡선
중위험군 (69.51%)	비임야지	중속	일반	직선
			터널	직선
				곡선
			분기기	
	임야지	중속	교량	직선
				곡선
			터널	곡선
				직선
			일반	곡선
				직선
저위험군 (25.31%)	나머지			

표 2.7.18 향후 운행환경에 따른 전체 궤도의 위험군 분류

분류	궤도 환경			
고 위험군 (4.42%)	비 임야지	고속	교량	직선
				곡선
			일반	직선
				곡선
			분기기	
		중속	일반	곡선
	임야지	고속	교량	직선
		중속	교량	곡선
중 위험군 (21.97%)	비 임야지	고속	터널	직선
				곡선
		중속	교량	직선
			일반	직선
			분기기	
	임야지	고속	교량	곡선
			터널	직선
				곡선
			일반	직선
				곡선
		중속	교량	직선
				곡선
저 위험군 (73.61%)	나머지 구간			

(3) 사회 경제적 피해영향을 고려한, 철도차량 일탈사고 위험도 등급 모델 제안

(가) 철도차량 일탈사고의 사회·경제적 피해영향분석 방법론 재설정

▪ 철도차량 일탈사고의 경우, 교통지연에 따른 피해와 직접적인 인적 피해와 같은 사회적 피해의 경향성 파악이 어렵기 때문에, 그 원인이 되는 운행 빈도에 대한 접근을 통해 해당 피해 영향을 고려하였다.

(나) 철도차량 일탈사고의 사회·경제적 위험도 등급안 제시

▪ 현재 국내에서 운행하고 있는 철도의 총 지선 및 영업연장은 약 4,077km 이며, 이 중 특수선로를 제외한 주요 영업 연장은 약 3918km에 달한다. 각 선로별 운행횟수 및 영업 키로수는 다음과 같으며, 일평균 운행횟수 100회 이상일 때 고 운행 빈도군, 50회 이상일 때 중 운행 빈도군, 50회 미만일 때 저 운행 빈도군으로 구분하였다.

표 2.7.19 국내 철도선로 구간 별 운행 빈도 수 (2018. 한국철도통계 연보 참고)

구분	일 평균 운행횟수		전체 일 평균 운행횟수	비고
	주중	주말		
경부선	564	624	581.14	일부 구간 혼용
경부고속선	105	122	109.86	고속 전용
호남선	88	84	86.86	일부 구간 혼용
호남고속선	56	58	56.57	고속 전용
전라선	135	135	135.00	혼용구간
장항선	40	41	40.29	
중앙선	260	219	248.29	
태백선	23	22	22.71	
영동선	12	14	12.57	
충북선	65	57	62.71	
대구선	9	9	9.00	
동해남부선	126	118	123.71	
경전선	58	58	58.00	일부 구간 혼용
경춘선	153	141	149.57	
경의선	54	36	48.86	
경원선	56	38	50.86	
경북선	6	6	6.00	
수인선	174	138	163.71	
동해선	40	40	40.00	혼용구간
강릉선	36	52	40.57	혼용구간
경강선	118	97	112.00	
경인선	474	396	451.71	
안산선	267	222	254.14	
분당선	360	263	332.29	
일산선	268	216	253.14	
수서고속선	120	120	120.00	고속 전용

▪ 앞서 제시한 예상 피해 분류군과 해당 빈도군을 매칭하여, 국내 철도 환경을 고려한 철도차량 일탈사고 위험도 등급안을 작성하였다. 단, 신열차 도입시, 모든 열차는 일반 연결식 열차구간이기 때문에 전구간에 적용해야 하지만, 선로 개량 및 추가 선로 개설은 예측이 불가하기 때문에 현재 국내 운영 중인 전 철도 노선에 적용하는 형식을 취하였다.

표 2.7.20 관절 대차 연결식 열차 구간의 철도차량 일탈사고 위험도 등급(안) - 현행

관절 대차 연결식 열차 구간 (총연장 658.28km)	고빈도군 (경부고속선, 수서고속선)	저빈도군 (호남고속선)
고위험군 30.32%	A-H1 (22.03%)	A-H2 (8.29%)
중위험군 64.69%	B-H2 (47.01%)	B-H2 (17.68%)
저위험군 4.99%	C-H1 (3.63%)	C-H2 (1.36%)

표 2.7.21 혼용구간 및 일반 연결식 열차 구간의 철도차량 일탈사고 위험도 등급(안) - 현행

혼용 구간 및 일반 연결식 열차 구간 (총연장 3335.8km)	고빈도군	중빈도군	저빈도군
고위험군 5.18%	A-N1 (2.31%)	A-N2 (1.09%)	B-N1 (1.78%)
중위험군 69.51%	B-N2 (31.02%)	B-N3 (14.57%)	C-N1 (23.93%)
저위험군 25.31%	C-N2 (11.29%)	C-N3 (5.30%)	C-N4 (8.71%)

표 2.7.22 국내 전 구간의 철도차량 일탈사고 위험도 등급(안) - 향후

전체 구간 (총연장 3994.1km)	고빈도군	중빈도군	저빈도군
고위험군 9.32%	A-1 (5.56%)	A-2 (2.28%)	B-1 (1.49%)
중위험군 68.72%	B-2 (33.66%)	B-3 (15.08%)	C-1 (19.99%)
저위험군 21.96%	C-2 (10.03%)	C-3 (4.65%)	C-4 (7.27%)

라. 철도차량 일탈사고 위험도 등급별 방호 대책 수립

(1) 철도차량 일탈사고 방호대책 방법론 수립

▪ 일반적으로 재난관리의 목표는 총체적 재난관리모형(Comprehensive Emergency Management Model, CEM)에 기반하고 있으며, 이는 재난발생 시점이나 관리 시기를 기준으로 다음과 같이 나눌 수 있다. 철도차량 일탈사고의 방호대책은 이 중 완화와 예방, 대비와 계획 범위에서 고려하여야 하여야 한다.

- 완화와 예방 (Mitigation and Prevention)
- 대비와 계획 (Preparedness and Planning)
- 대응 (Response)
- 복구 (Recovery)

▪ 철도차량 일탈 사고의 경우, 그 원인이 되는 탈선사고 자체를 방호할 수 없지만, 추가적인 진전에 대한 억제는 가능할 것으로 판단되며, 사고 진전의 규모 별 방호대책과 특별상황에 대한 고려가 가능하도록 방호대책을 수립하는 것을 원칙으로 하여 방호대책을 수립하여야 한다.

(2) 사고 진전의 규모 별 방호대책 수립

▪ AASHTO 교량설계 시방서(AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 2007)에서는, 탈선된 열차 차체를 방호하기 위하여 궤도 외부에 Barrier를 설치하여 열차 차체를 방호하도록 제시하고 있다.

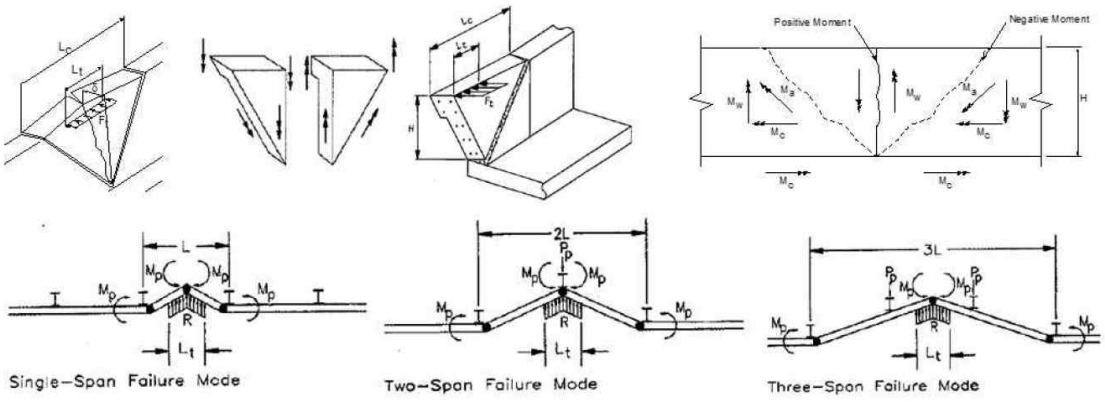


그림 2.7.14 열차 방호를 위한 Barrier 설계

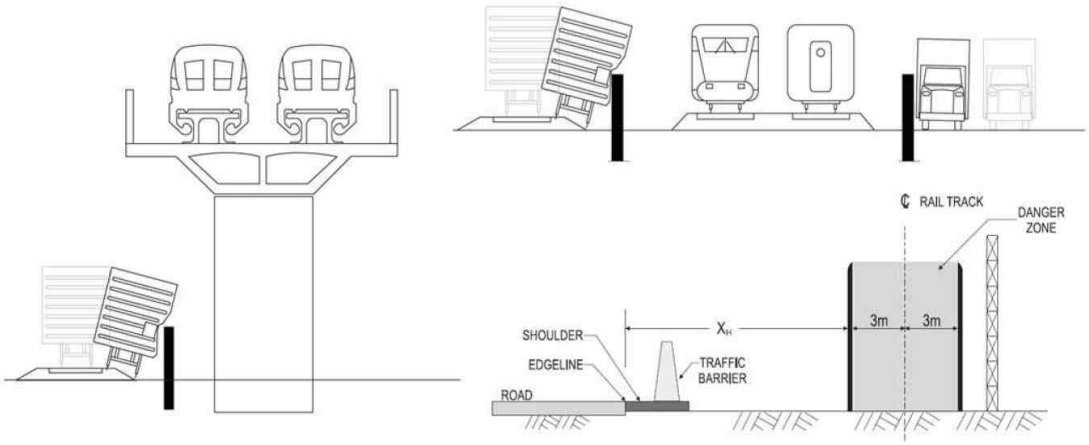


그림 2.7.15 열차 차체 방호 개념

▪ 유럽의 경우, 탈선열차의 일탈방호시설 또는 대책을 DCP(Derailment Containment Provisions)라 지칭하고 타입에 따라 크게 3가지로 구분하여 나누고 있다.

- DCP Type 1. 차륜 레벨에서의 일탈방호 (레일 내부에 설치)
- DCP Type 2. 차륜 레벨에서의 일탈방호 (레일 외부에 설치)
- DCP Type 3. 대차 레벨에서의 일탈방호

- Installed Between Running Rails ► Retaining Wheel Level



그림 2.7.16 DCP Type 1. 차륜 레벨에서의 일탈 방호 (레일 내부에 설치)

- Installed Outside of Running Rails ► Retaining Wheel Level



그림 2.7.17 DCP Type 2. 차륜 레벨에서의 일탈 방호 (레일 외부에 설치)

- Installed Outside of Running Rails ► Retaining Bogie Level

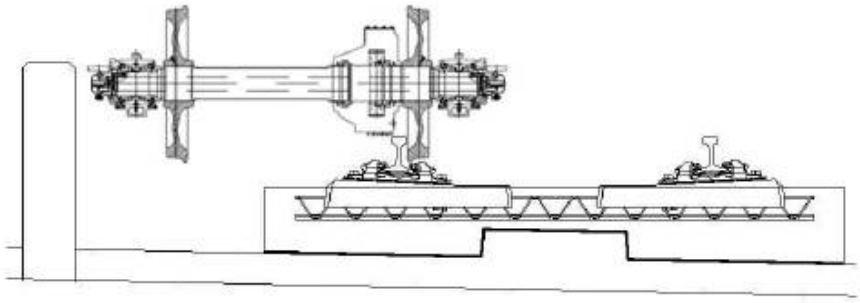


그림 2.7.18 DCP Type 3. 대차 레벨에서의 일탈 방호

▪ 국내에서는 철도안전법 내에 탈선방지시설의 차원에서 가드레일 또는 방호벽의 안전시설을 설치하여야 한다고 규정하고 있으며, 철도설계지침 및 편람에서도 본선부대 및 안전시설(KR C-02060)에 따라 교량 상판에 방호벽을 설치하도록 명시하고 있다. 이처럼, 기본적으로 철도차량 일탈사고의 방호 수단은 다음과 같이 분류가 가능함

- 탈선 차량 방호벽 설치
- 철도차량 일탈방호시설 설치
- 가드레일 설치

(3) 철도차량 일탈사고 방호대책 수립

▪ 철도차량 일탈사고 방호대책은 1)대상 궤도의 예상 피해와 운행빈도 등을 고려한 위험도 등급 확인, 2)위험도 등급별 표준 방호대책 수립, 3)관리자 판단 및 특수상황을 고려한 추가적 방호대책 수립의 3가지 단계로 나눌 수 있다.

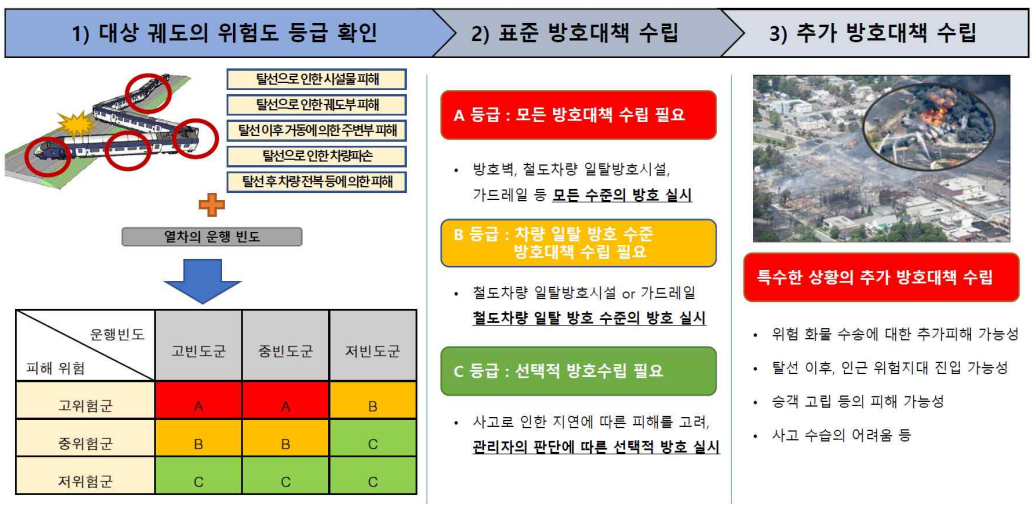


그림 2.7.19 철도차량 일탈사고 방호대책 개요

▪ 대상 궤도의 위험도 확인은, 해당 궤도의 형태, 주변환경, 시설물 등의 피해 심각도 요인을 통해 예상가능한 위험군 분류 및 운행횟수를 고려한 운행빈도군을 고려하여, 본 연구에서 제시하는 위험도 등급안에 대입, 확인할 수 있다. 앞서 제시한 위험도 등급안(피해위험군 및 운행빈도군)을 토대로 확인한 별 표준 방호대책 수립을 수행하였다.

① 위험도 등급 A의 경우, 기본적으로 방호벽과 철도차량 일탈방호 시설, 가드레일과 같은 모든 수준의 방호 중 해당 궤도에 적용 가능한 것으로 실시함 (현행 기준, 전체궤도의 약 9.32% 예상)

- 단, 방호벽의 추가적인 설치에 필요한 지리적 조건의 제한이 발생할 경우(예) 교량) 일탈방호 시설과 가드레일 수준의 방호를 일단 적용하고, 추가적으로 주변환경에 직접 방호 수단을 적용하는 형태로 실시 (현행 기준, 전체궤도의 약 5.23% 예상)

② 위험도 등급 B의 경우, 기본적으로 철도차량 일탈방호 시설이나 가드레일 수준에서 방호를 실시함 (현행 기준, 전체 궤도의 약 68.72% 예상)

- 단, 위험도 등급 B 중, 저 운행군으로 판단되는 경우, 피해 복구를 제외한 추가적인 피해가 발생하지 않을 것이라 판단, 철도차량 일탈방호 시설과 가드레일 수준 방호 형태 중 관리자가 판단하여 합리적이라 판단되는 방법으로 방호 실시 (현행 기준, 전체 궤도의 약 22.90% 예상)

- 또한, 위험도 등급 B 중, 교량상 궤도의 경우, 철도차량 일탈사고 발생 시 낙교의 위험이 다소 존재하는 바, 관리자의 판단으로 기존 표준 방호 수준외에 추가적인 방호벽 설치 등의 방호를 실시 (현행 기준, 전체 궤도의 약 5.23% 예상)

③ 위험도 등급 C의 경우, 사고 진전에 따른 피해액이 크지 않을 것으로 판단, 방호대책을 수립하지 않음 (현행 기준, 전체 궤도의 약 21.96% 예상)

- 단, 위험도 등급 C 중, 중 운행군이나 고 운행군으로 판단되는 경우, 사고 이후 지연에 따른 피해를 예상하여 관리자의 판단으로 방호를 실시 (현행 기준, 전체 궤도의 약 10.03% 예상)

④ 특수 상황을 고려한 방호대책 수립

표준 방호 대책 외에 추가적인 특수 상황의 경우, 관리자와 해당 지역의 업체 및 지자체 등과의 논의를 통해 추가적인 방호대책을 수립하여야 하며, 해당 특수상황에는 다음과 같은 피해가 존재할 수 있다.

- 위험화물 수송 노선의 경우, 탈선 이후 위험물 유출에 따른 피해
- 탈선 이후, 인근 공장 등의 위험지대 진입으로 인한 피해 등
- 대체 교통수단의 미흡 및 접근의 용이성 부족으로 인한 승객 고립 등의 피해
- 그 외 추가적인 피해를 야기할 가능성이 존재하거나, 수습에 어려움이 발생하여 피해가 가중되는 경우

이러한 특수 상황 중, 궤도에 인접한 위험 시설물의 경우, 자체적으로 방호시설이 존재하는 지를 파악 후, 관리자가 판단하여 추가적인 방호대책 수립하여야 한다. 또한, 수습에 어려움이 발생하여 추가적인 피해가 야기될 가능성이 존재하는 경우, 추가적인 수습 체계 구축이나 즉각 대응체계 마련 등을 통해 방호대책을 수립하여야 한다.

마. 철도차량 일탈사고 방호대책 체계 수립에 따른 리스크 감소 효과 예상

본 절에서는, 현재까지 연구를 토대로 작성된 철도차량 일탈사고 위험도 등급안과, 각 상황별 철도차량 일탈사고 방호대책을, 현재 운행중인 호남고속선 구간 중 대표 사례를 선정, 적용시켜 보았다. 해당 예시는, 호남고속선 운영 환경에 대하여, 철도차량 일탈사고 방호대책 수립 및 리스크 감소 효과를 보여주기 위하여 수행하였으며, 궤도공사 실시설계 당시의 결과와 현 운행 상황 등을 고려하여 전개하였다.



그림 2.7.20 호남고속선 전체노선 조감도

호남 고속선의 경우, 실시설계 당시 전체 연장 중 약 64.53%가 직선부, 28.84%가 곡선부, 6.63%가 분기기부로 설계되었으며, 전체 궤도의 40.03%가 교량, 24.71%가 터널 35.27%가 노반에 설치 되었다. 또한, 운행구간의 약 77.15%가 임야지 주변에 건설되었

으며, 90.31% 구간에서 고속 운행이 가능한 궤도이다.

앞서 확인한 바와 같이, 일평균 운행횟수가 56.67회로 운행빈도는 중빈도군에 속하지만, 단일 노선에 대한 검토이므로, 운행빈도를 제외한 피해 위험군 분류만으로 예제를 전개하였다. 호남고속선의 경우, 위험군 분류에 따라 다음과 같은 궤도 분포를 보인다.

표 2.7.23 호남고속선의 위험군 분류

분류	궤도 환경				비율
고위험군 (45.77%)	비임야지	고속	교량	곡선	2.38%
				직선	5.33%
			일반	곡선	2.10%
				직선	4.70%
			분기기		1.37%
		중속	교량	곡선	0.26%
				직선	0.57%
			일반	곡선	0.23%
	임야지	고속	교량	곡선	8.04%
				직선	18.00%
		중속		곡선	0.86%
				직선	1.93%
중위험군 (49.13%)	비임야지	고속	터널	직선	3.29%
				곡선	1.47%
		중속	일반	직선	0.50%
			터널	곡선	0.16%
				직선	0.35%
			분기기		0.15%
	임야지	고속	터널	곡선	4.97%
				직선	11.11%
			일반	곡선	7.09%
				직선	15.86%
		중속	터널	곡선	0.53%
				직선	1.19%
			일반	곡선	0.76%
				직선	1.70%
저위험군 (5.12%)	임야지	고속	분기기		4.62%
		중속	분기기		0.50%

(1) 예제 1. 호남고속선 고위험군의 방호대책 및 리스크 감소 효과 추산



그림 2.7.21 대상 지역 위성지도 및 측면 사진 (충남 논산시)

① 대상지역

- 충남 논산시 교량상 직선궤도 고속주행 구간
- 현재 주변에 산업단지가 위치해 있는(직선거리 약 80m) 비임야지로, 교량의 높이도 비교적 높아, 탈선 이후 낙교 발생시 사고피해 가중 가능성 존재.
- 교량의 양 끝단에 터널 입구가 위치함
- 고위험군 구간에 속함(임야지, 고속주행, 교량, 직선궤도)

② 해당 지역의 경우, 예상피해 추산액이 약 65억원 이상으로 집계 되며, 교량의 높이가 비교적 높기 때문에, 낙교에 대한 위험이 다량 존재하는 구간임

- 최소 차량 3량 대파 및 전면수리 : 1,500,000천원 이상
- 200m 이상 구간 피해 : 201,344천원 이상
- 교량 2경간 손상 : 1,954,587천원 이상
- 50㎡ (인구대피 + 피해복구) : 2,888,172천원 이상

③ 사고 진전 규모 별 피해에 다른 방호대책 수립 시, 해당 지역의 경우 교량상 궤도이기 때문에, 추가적인 방호벽 설치가 불가함. 하지만, 호남고속선에 경우, 교량의 길이방향에 대차레벨이서 구속이 가능한 DCP Type3 형태의 좌우 날개벽이 존재함. 따라서, 가드레일과 일탈방호 시설물 설치를 통한 낙교에 위험성을 최대한 방지하는 방식으로 방호대책을 수립하여야 하며, 방호 이후 피해는 다음과 같이 약 12억원 이상으로, 기존 고위험군에서 중위험군 수준으로 하락과 약 53억원 정도의 피해금액 감소가 예상됨

- 최소 차량 2량 대파 및 전면수리 : 1,000,000천원 이상
- 200m 이상 구간 피해 : 201,344천원 이상
- 교량 자체 손상 없음 : -
- 인구대피 + 피해복구 발생 없음 : -

(2) 예제 2. 호남고속선 중위험군의 방호대책 및 리스크 감소 효과 추산



그림 2.7.22 대상 지역 위성지도 및 측면 사진 (전북 정읍시)

① 대상지역

- 전북 정읍시 일반 직선궤도 고속주행 구간
- 주변이 대부분 논밭과 같은 임야지이며, 노반도 비교적 고성토 노반이 아닌 것으로 파악
- 중위험군 구간에 속함(임야지, 고속주행, 일반, 직선궤도)

② 해당 지역의 경우, 예상피해 추산액이 약 17억원 이상으로 집계 되며, 교량의 높이가 비교적 높기 때문에, 낙교에 대한 위험이 다량 존재하는 구간임

- 최소 차량 3량 대파 및 전면수리 : 1,500,000천원 이상
- 200m 이상 구간 피해 : 201,344천원 이상
- 시설물 피해 없음 : -
- 인구대피 + 피해복구 발생 없음 : -

③ 사고 진전 규모 별 피해에 다른 방호대책 수립 시, 해당 지역의 경우 일반 궤도이며 주변 피해는 발생할 가능성이 현저히 낮음. 따라서, 가드레일과 일탈방호 시설물 설치를 통한 철도차량의 탈선 후 과도한 일탈을 방지 정도에서 방호대책을 수립하여야 함. 해당 방호대책으로 인해, 추가적으로 차량 피해가 감소할 것을 판단하며, 방호 이후 피해는 다음과 같이 약 7억원 이상으로, 동일한 중위험군에 위치하지만, 피해금액이 약 10억정도 감소할 것으로 예상됨. 특히 해당 사례의 경우, 방호벽과 같이 대차나 차량레벨에서 방호가 이루어지지 않기 때문에, 차량 손상금액이 크게 줄 것으로 기대됨.

- 최소 차량 1량 대파 및 전면수리 : 500,000천원 이상
- 200m 이상 구간 피해 : 201,344천원 이상
- 교량 자체 손상 없음 : -
- 인구대피 + 피해복구 발생 없음 : -

(3) 예제 3. 호남고속선 내 특수 상황에 대한 방호대책 및 리스크 감소 효과 추산

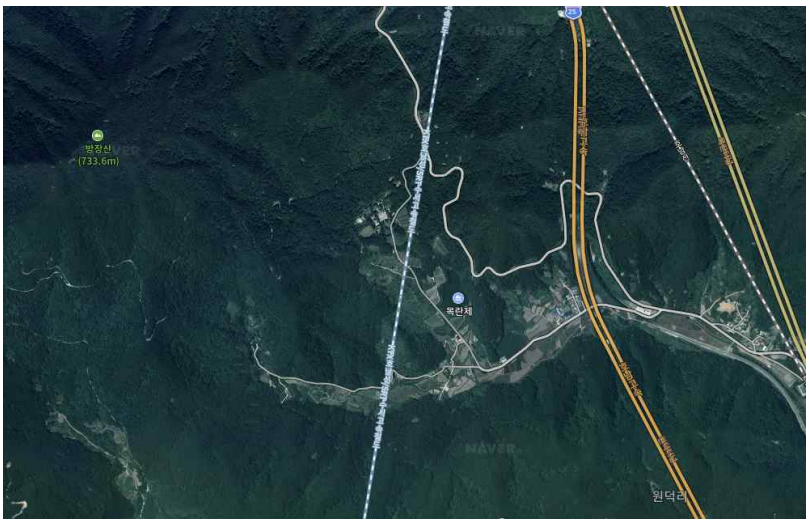


그림 2.7.23 대상 지역 위성지도 및 측면 사진 (전남 장성군)

① 대상지역

- 전남 장성군 터널 내 직선궤도 고속주행 구간
- 전남 장성군 지역의 터널 내 궤도 구간의 경우, 타 지역과 달리 주변 거주자나, 접근여건이 매우 어려운 상황으로, 사고 발생시 고립의 위험성이 다수 존재함
- 따라서, 1)사고 발생상황을 가정한 추가적인 방호대책에 대한 고려 및 2)사고 즉시 복구를 위한, 탈선 이후 거동을 통제할 수 있는 수단에 대한 접근이 필요
- 다만, 터널구조물의 경우, 탈선이후 철도차량의 과도한 일탈을 막아주는 효과가 존재하기 때문에, 철도차량 일탈방호시설의 추가적인 설치를 제외한, 가드레일 수준의 추가적인 방호에 대한 고려가 필요할 것으로 판단됨.

2.8 탈선/충돌 시뮬레이션을 위한 단순화차량모델 및 해석의 타당성

가. 국내 외 차량 모델링 기법 및 선행연구 조사

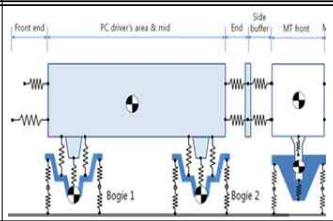
▪ 열차 충돌사고 시뮬레이션 기술은 열차의 고속화에 따라 안전 성능향상의 필요성으로 연결되어 많은 연구가 진행되었다. 충돌 시뮬레이션에 관련하여 EN 15227[1]과 국내 철도차량기술기준에서는 운행조건, 철도차량의 종류, 충돌 상황에 따라 분류하여 각각 충돌안정성을 평가하도록 하고 있다. 그 중 정면출동사고각본은 직선 평면 선로에서 열차가 제동이 되지 않은 상태로 25km/h의 속도로 동일한 제원의 열차의 정면에 충돌하는 조건으로 충돌안전에 대한 판단기준을 만족해야 하며 충돌 후 타고오름 판단기준도 만족해야 한다.

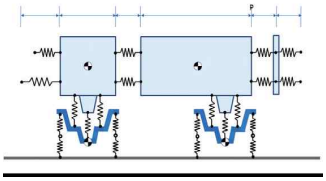
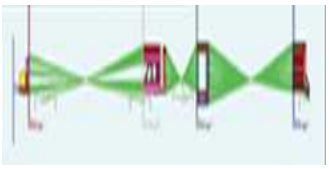
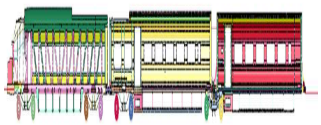
▪ 시뮬레이션에서 가상시험모델은 철도차량 차체와 주요부품을 유한요소 모델링하여 실제차량과 유사한 조건을 갖는 시뮬레이션 모델을 의미하며, 충돌안정규정에서 요구하는 가상시험모델은 유한요소 모델과 다물체 동역학 모델을 혼합하여 모델링 하는 것을 허용하고 있다.

▪ 모든 차량을 유한요소모델로 구성할 시 해석에 따른 시간과 비용이 많이 들어가기 때문임. 충돌로 인해 영향을 적게 받는 후방의 차량은 다물체 동역학 모델로 구성하되 전방의 유한요소 모델과 동적거동이 잘 일치 할 수 있도록 모델링 하는 것이 중요하다.

▪ 열차 충돌사고 시뮬레이션 기술에 대한 선행연구[2]에서 열차 충돌사고 시뮬레이션 기술에 관련하여 철도차량 충돌안전도 설계를 단계별로 개념설계, 기본설계, 상세설계, 최종평가 단계로 분류되었다.

표 2.8.1 설계 단계별 충돌/타고오름 해석 모델의 장/단점

모델종류	충돌/타고오름해석 모델	설계 단계	장점	단점
강체 차제 2D 모델		기본	·가장 단순함	·차체변형고려 불가 ·좌굴해석불가능 ·수직변위불일치 ·장애물해석불가 ·분산형만가능

유연체 차체 2D 모델		기본	·차체변형고려 · 길이방향거동일치	·좌굴거동모사 불가 ·수직변위불일치 ·장애물해석불가
2D/3D 하이브리드 모델		설계	· 좌굴거동모사가능 ·수직변위일치 ·장애물해석가능	·승객구간강체로고려
타고오름 해석용 VTM		최종 평가	·최종평가용 (규정)	·과도한해석시간 ·설계단계에적용불가

▪ Half car를 실험실 레벨에서 탈선시키고 탈선 후 발생하는 거동을 시뮬레이션 값과 비교분석하여 검증하는 연구가 진행되었었다.[3] 선행연구에서는 실험에 사용하는 Half car에 스트레인 게이지를 장착하여 탈선 후 충격을 감지하였고, 탈선 후 거동에서 모터와 레일간, 기어박스와 레일간, 레일 체결장치와 차륜간의 접촉을 확인하였다.

▪ 또한 레일과 차륜의 접촉으로 횡방향으로 거동이 제한되는 것을 시뮬레이션의 값과 비교분석하여 시뮬레이션 모델을 검증하였다. (그림 2.8.2)



그림 2.8.1 선행연구 – 기어박스와 레일 접촉확인

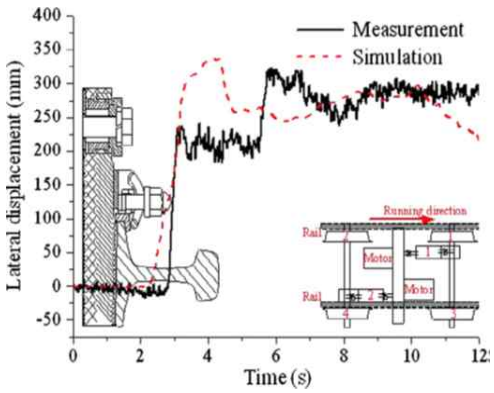


그림 2.8.2 선행연구 – 접촉력 비교분석

▪ 선행연구의 내용과 같이 탈선 후 거동은 궤간 내의 구성품과 대차의 구성품의 접촉으로 인해 동적거동에 영향을 미친다, 따라서 탈선 후 거동을 예측·모사하기 위해서는 궤간 내의 침목 등을 모델링하여 시뮬레이션에 적용할 필요가 있다.

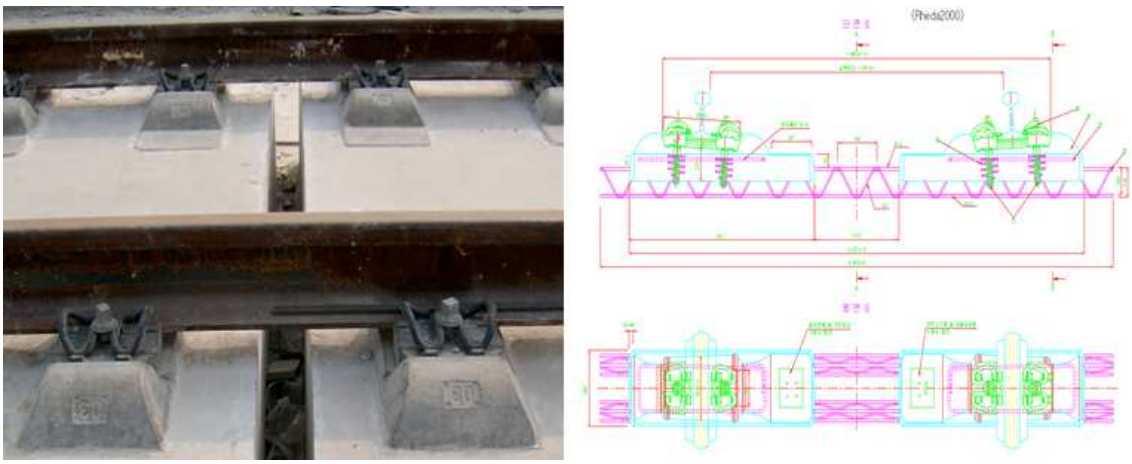


그림 2.8.3 교량 위 콘크리트 궤도 실사 및 도면

나. 단순화 모델링 기법

(1) 유한요소를 활용한 차륜 모델링 및 검증

(가) Wheel / Rail Contact

▪ 본 연구에서는 상용 프로그램인 Ls-dyna를 사용하여 동역학 시뮬레이션 모델을 구성함. Ls-dyna는 비선형 충돌해석에 주로 사용됨. 그러나 Simpack 과 같은 철도 전용 동역학 소프트웨어가 아니기 때문에 Wheel / Rail 접촉 알고리즘이 기본적으로 내장되어 있지 않음.

▪ 따라서 기본 Ls-dyna에 기본 컨택 알고리즘을 활용한 차륜과 레일이 이론을 기반으로 도출된 탈선 조건에서 탈선이 발생하는지 확인하고자 함.

(나) Ls-Dyna의 Penalty method

▪ LSTC社의 동역학 상용소프트웨어인 Ls-Dyna에서는 접촉을 표현하는데 Penalty Method를 사용한다. Contact Force를 Master surface에 Slave node의 침투량 체크와 Contact stiffness의 계산으로 산출. 침투량에 비례하여 Contact Force도 증가하게 된다.[4]

(2) 탈선이론모델을 통한 유한요소 차륜 검증

(가) 탈선거동을 예측하기 위한 탈선 이론 모델

▪ 탈선유형을 분류한 연구가 이루어졌으며[5], 그 중 Jump-up(미끄러져 오름탈선)에 대하여 정상상태, Slip-over, Slip & roll-over, Roll-over에 대해 윤축이론모델이 연구

되었고[3], climb-up(타고오름 탈선)에 대하여 Climb & Roll-over, Roll-over로 분류하여 윤축이론 모델이 연구되었다[4].

▪ 탈선 유형 중 타고오름 탈선에 의한 사고가 주로 발생하므로 타고오름 탈선 이론모델을 유한요소 모델에 적용하여 탈선이 발생하는지 확인하고자 한다.

▪ 타고오름 탈선조건에 대하여 각 방향성분의 힘을 정적평형방적식으로 정리하면 다음과 같다.

$$\Sigma F_H = F - R_F\cos\alpha + \mu R_F\sin\alpha - \mu R_L = ma_{Gx} \quad (1)$$

$$\Sigma F_V = R_L + R_F\sin\alpha + \mu R_F\cos\alpha - W_L - W_R = ma_{Gy} \quad (2)$$

$$\Sigma M_A = -hF - aW_R - bR_L + (a+b)W_L = -\bar{y}ma_{Gx} + \bar{x}ma_{Gy} + I_G\ddot{\theta} \quad (3)$$

(나) 이론모델을 적용한 단일윤축 시뮬레이션

▪ 선행 연구에서 도출된 식(1) ~ 식(3)을 이용하여 타고오름 탈선이 발생하는 조건을 (그림 2.8.4)와 같이 도출하였다. 차륜의 좌우 수직하중과 윤축하중을 합친 값(W_L+ W_R)은 KTX 동력대차 중량인 68 kN, 수평방향 하중은 90 kN으로 가정하였다.

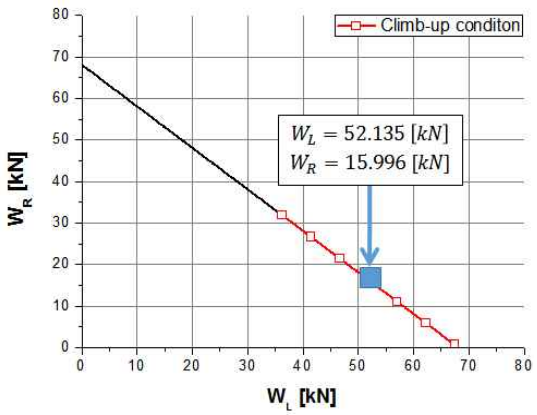


그림 2.8.4 이론식을 이용한 타고오름 탈선 조건

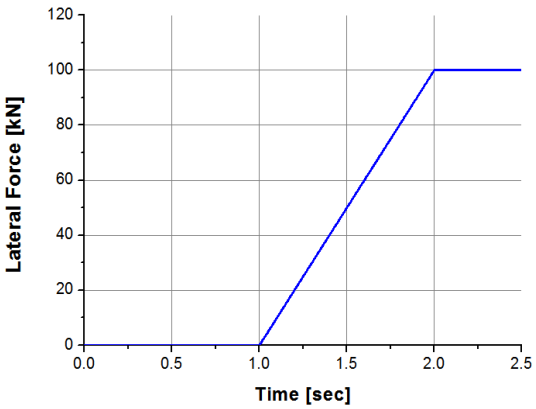


그림 2.8.5 모델 검증을 위한 시뮬레이션 조건 (횡력)

▪ 시뮬레이션 모델을 검증하기 위해 타고오름 조건 중 중간 값에 해당하는 W_L(52.135 kN), W_R(15.996 kN)에 대해서 검증하였다. 또한, 시뮬레이션에서 순간적인 외력은 충격으로 작용되기 때문에 (그림 2.8.5)과 같이 시간에 따라 증가하도록 설정하였고, 주행속도는 50 km/h로 설정하였다.

▪ 타고오름 탈선의 조건은 (표 2.8.2)와 같음. 즉, 외쪽 차륜은 레일과 맞닿아 있고, 오른쪽 휠 플렌지가 레일을 타고 오르면서 휠 트레드가 레일에서 떨어지는 상태이다.

표 2.8.2 타고오름 탈선 조건

Derailment pattern	Climb-up
Derailment condition	$R_L > 0$
	$R_F > 0$
	$d_R > 0$

▪ 시뮬레이션 결과는 (그림 2.8.6)과 같이 나타냄. 횡력이 시간에 따라 작용하면서 오른쪽 휠의 플렌지가 레일과 접촉하다가 (그림 2.8.7)와 같이 약 1.325 초에 최종적으로 탈선이 발생하게 된다.

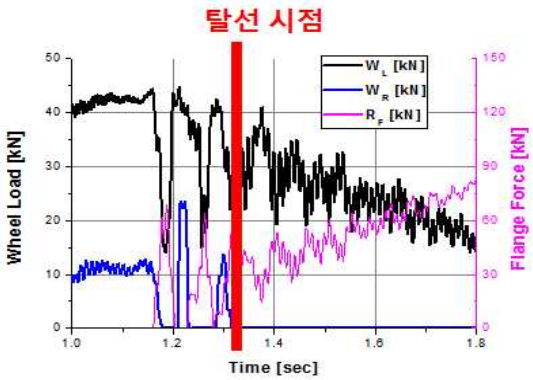


그림 2.8.6 모델 검증용 시뮬레이션 결과

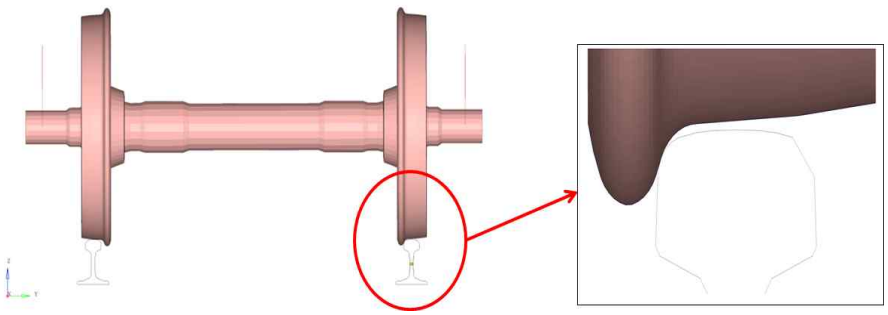


그림 2.8.7 타고오름 탈선

▪ 이론식과 시뮬레이션 결과를 비교한 결과 약간의 오차가 발생하였지만, 탈선 거동이나 탈선 시점이 거의 일치하여 유한요소로 모델링된 차륜이 타고오름 탈선을 잘 모사하는 것으로 판단된다.

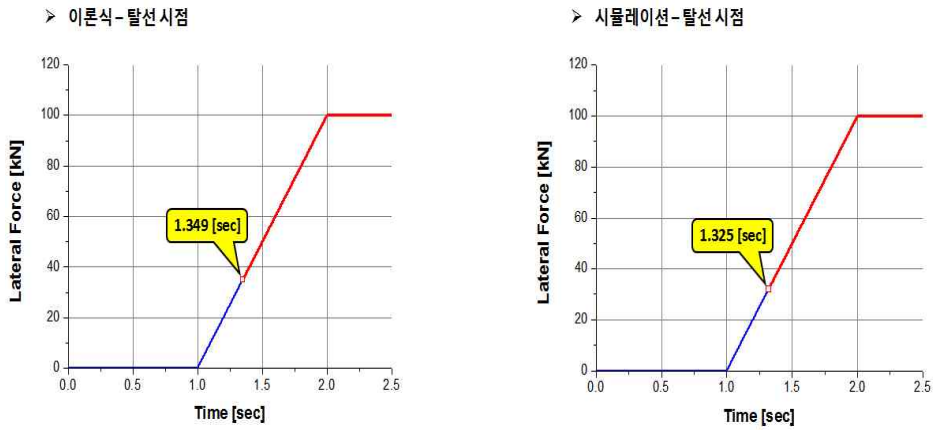


그림 2.8.8 타고오름 탈선에 대한 이론식과 시뮬레이션 결과 비교

(3) 프레임 단순화 기법

▪ 일탈방호시설의 설계하중 및 시공위치를 결정하기 위해서는 열차의 탈선거동을 확인해야한다. 실제 탈선실험은 현실적으로 불가능하기 때문에 동역학 소프트웨어를 통해 탈선거동을 확인하게 된다.

▪ 방호시설의 개발단계에서는 열차의 탈선 후 거동뿐만 아니라 방호시설물과의 충돌해석도 포함해야하며 이는 단순충돌 해석보다 훨씬 큰 규모의 해석이다. 따라서 해석모델의 단순화는 필수적으로 필요하게 된다.

▪ 국내 철도차량은 사용용도와 종류에 따라 대차가 달리 사용되어 다양한 대차가 동일한 규격(1,435mm)의 선로 위를 달리고 있기 때문에 다양한 대차에 대하여 모두 시험을 진행할 수 없으며, 컴퓨터를 이용한 시뮬레이션에서도 대차의 종류에 따라 새로운 모델을 만드는 과정은 많은 비용과 시간이 들어간다. 또한 모든 형상을 유한요소로 모델링 할 경우 해석시간도 증가하게 되기 때문에 다양한 차량을 쉽게 모델링 수 있는 단순화 모델을 사용하는 것이 효과적이다.

▪ 따라서 본 연구에서는 시뮬레이션 상에서 다양한 대차 및 프레임을 빠르게 모델링하기 위해 대차 모델에 질량, 무게중심, 회전관성 등 대차의 특성을 사용자가 입력할 수 있는 Rigid 1D 요소를 활용하여 프레임의 요소 개수 또한 줄일 수 있는 모델링 방법을 제안한다.

표 2.8.3 사용자 입력가능 항목

항목		단위
질량		kg
회전관성모멘트	I_{xx}	$kg \cdot mm^2$
	I_{yy}	
	I_{zz}	
무게 중심점		·

▪ 본 연구에서 제안하는 단순화 모델링 절차는 다음과 같다.

1. 3D 형상 모델을 토대로 단순화할 프레임의 무게중심, 현가장치 취부 및 연결 조인트 좌표를 구함.

2. 1번 절차에서 구한 무게중심, 현가장치 취부 및 연결 조인트 좌표를 기준으로 절점을 생성.

3. 1D 강체 요소에 관성모멘트 및 무게중심을 부여할 수 있는 Ls-Dyna의 키워드인 NODAL_RIGID_BODY_INERTIA 기능을 활용하여 2번 절차에서 생성한 절점을 활용하여 강체요소를 생성.

4. 3번 절차에서 생성된 1D 강체요소 키워드에 질량 및 회전관성모멘트를 대입.

5. 현가장치 절점에 차량에 맞는 현가장치 스프링 생성 및 연결

6. 차량 모델인 경우 차량에 구조에 맞는 적절한 연결 조인트 및 빔 요소를 사용하여 차체 연결 모델링

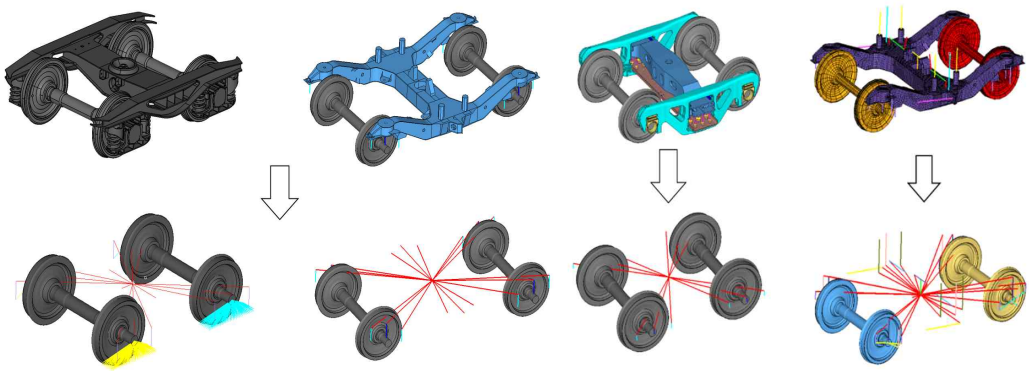


그림 2.8.9 단순화 대차 모델 예시

▪ 단순화 대차 예시는 그림(2.4.9)에 나타냈으며 절점의 위치를 변경할 수 있기 때문에 대차가 변경될 경우 절점을 추가하거나 위치를 수정하여 손쉽게 모델링이 가능하다.

다. 고속열차 단순화 모델

(1). 기존차량모델

▪ 선행연구과제에서 개발된 모델은 탈선과정이나 탈선 후 거동을 보기 위한 것이 아니라 열차가 탈선하여 일탈방호장치(Derailment Containment Performance: DCP)에 충돌하였을 때 가해지는 충격력을 1차적으로 예상하기 위해 만들어진 모델임을 확인하였

다.

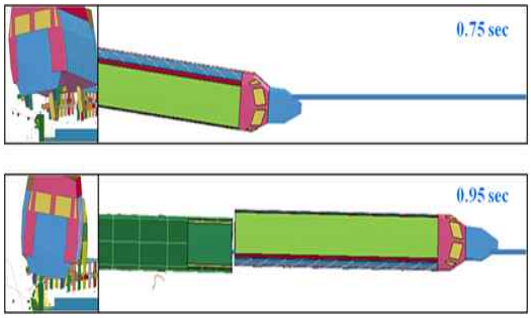


그림 2.8.10 선행연구과제 – 탈선열차 구조물 충돌

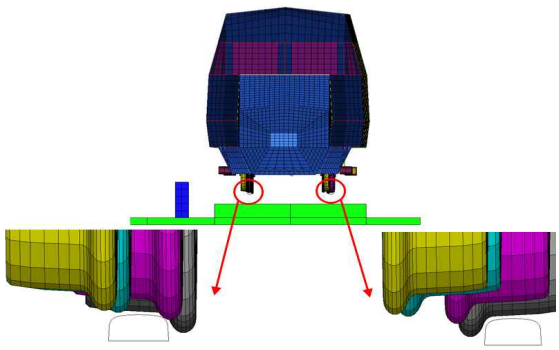


그림 2.8.11 선행연구과제 – 모델 정면

▪ 선행연구과제의 모델은 고속열차가 정상운행 중 탈선하여 일탈방호장치에 충돌하였을 때 발생하는 충격력을 구하기 위해서 KTX-산천 1편성 전체를 구성하였지만, 열차의 객차와 대차 모두들 유한요소모델로 구성하여 충돌해석을 진행할 시 많은 해석시간이 소요되기에 철도차량 충동-탈선 사고 시뮬레이션 기술에서 언급하였던 것처럼 충돌의 영향을 적게 받는 부분을 단순화하여 구성하는 모델링 기법을 사용하였다.

▪ (그림 2.8.11)와 같이 열차의 탈선과정을 모사하기 위해 탈선을 일으키는 외력이나 충돌 등을 모델 내에 구성하지 않고 초기부터 열차의 맨 앞 차량과 두 번째 차량의 차륜을 임의적으로 레일의 밖으로 이동시켜 차량의 탈선을 발생시키는 방법을 이용하였다.

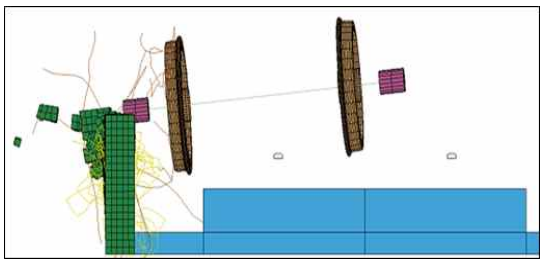


그림 2.8.12 선행연구과제 – 탈선열차 구조물 충돌

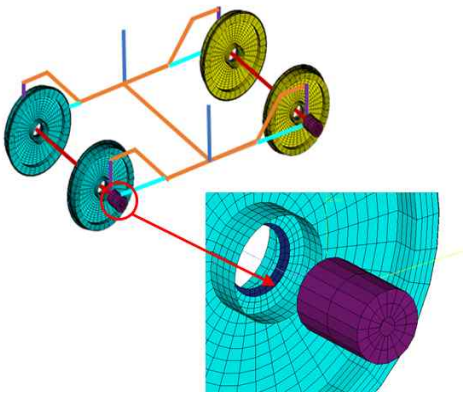


그림 2.8.13 선행연구과제 – 대차 모델링

▪ 열차의 차륜과 레일의 구름접촉을 위해 차륜은 2D Shell 요소를 사용. 1차 충돌에 관여되지 않는 대차, 윤축 그리고 현가장치를 구성을 (그림 2.8.13)과 같이 형상과 무게를 갖는 Beam으로 구성하여 해석 계산 량을 줄이도록 하였다.

▪ 차량의 대차와 객차의 많은 부분을 단순화시켰지만, 열차가 탈선 후 일탈방호장치

(DCP)에 1차적으로 충돌할 것이라 예상되는 윤축의 끝단은 (그림 2.8.13)와 같이 모델링하여 충돌하는 부분을 실제처럼 모사하였다.

(2) 개선 차량 모델

▪ 기본 모델에서 단순화하여 모델링된 부분을 본 연구의 목적에 맞게 모델을 수정·보완하였다. 해당 연구에서는 열차의 탈선 전 거동도 모사하여야 한다. 따라서 차륜과 레일을 유한요소모델로 구현하고 실제와 유사한 구름접촉을 표현하는데 있어 중요한 점은 차륜·레일의 요소들 간의 접촉으로 발생하는 진동을 줄이는 것이다.

▪ (그림 2.8.14)과 같이 차륜 답면의 요소를 세밀하게 모델링하여 차륜·레일의 접촉면에서 발생할 수 있는 진동을 줄임으로써 철도차량의 구름접촉 시뮬레이션 가능하다. 이전 모델과 개선 모델에 대한 시뮬레이션 결과는 (그림 2.8.15)과 같다. 개선 모델과 같이 요소를 작게 생성해야 탈선유도장치와 접촉 시 응력 집중 현상을 피할 수 있다.

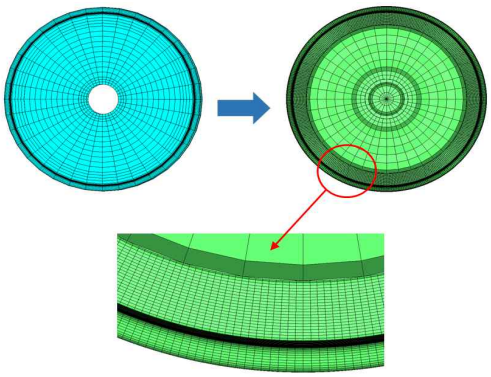


그림 2.8.14 개선 차량 모델의 차륜 모델링 변경

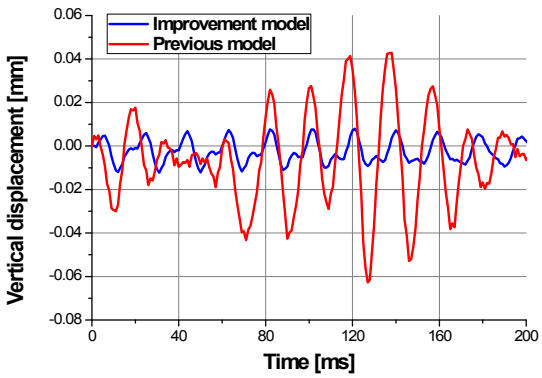


그림 2.8.15 개선 모델과 이전 모델의 구름접촉 결과 비교

(3) 단순화 차량모델링

(가) KTX 대차조사

▪ 고속철도는 일반적으로 200km/h 이상의 속도로 운행하는 열차와 철도시설을 의미하며 국내 고속철도는 프랑스 알스톰社의 Train Grande Vitesse:TGV의 기술을 이전받아 HSR 350x를 개발하였고 이 개발품의 양산품이 KTX-산천이며, 이는 동력차 2량, 객차 8량으로 총 10량 1편성으로 구성되어있다.(그림 2.8.16)

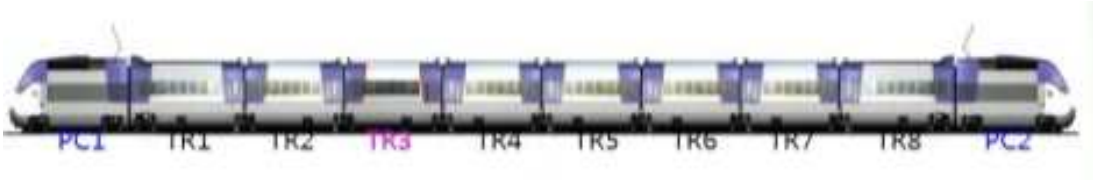


그림 2.8.16 KTX-산천 열차 편성도

▪ 동력의 사용은 동력집중식으로 되어있으며 Bolsterless종류의 관절대차를 사용한다. 관절대차는 차량 1대에 대차 2대를 사용하는 대신 차량과 차량사이를 1개의 대차로 지지하는 관절형으로 되어있다. (그림 2.8.17)

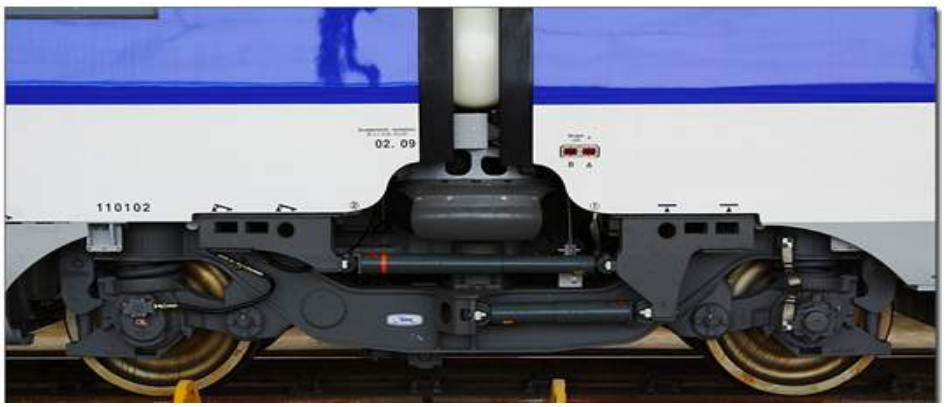


그림 2.8.17 KTX-산천 관절대차

▪ 선행연구과제에서는 양산품인 KTX-산천을 모델로 선정하여 모델링을 진행. 아래 (표 2.8.4)는 KTX-산천의 동력대차에 대한 구성과 제원이다[9].

표 2.8.4 KTX-산천 동력대차 제원

Feature	Type
Bogie type	Bolsterless
Axle load	17 tons
Track gauge	1,435 mm
Wheel diameter	920mm(new)
Primary suspension	Axle box wing type (+verticaldamper)
Secondary supernation	Coil spring +vertical, lateral, yaw damper

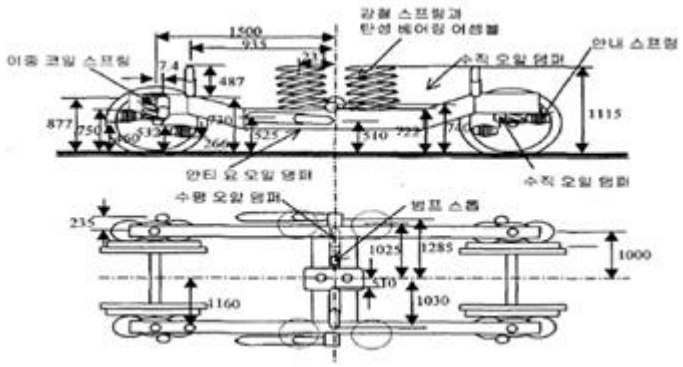


그림 2.8.18 KTX-산천 동력대차 현가장치 구성도

▪ 본 연구에서는 차체의 변형, 에너지 흡수 등을 확인하는 것이 아니고 열차의 질량과 회전관성모멘트 및 현가장치 특성에 의한 탈선 거동확인 및 DCP 충격력 산출이 목적이므로 차체와 대차 단순화 모델링이 가능하다. KTX의 현가장치 특성 및 차체, 대차 질량 등은 문헌을 참고하여 모델링하였다.[9, 10,11]

표 2.8.5 KTX 동력차 현가장치 제원 및 구성

현가요소	기계적 특성치						비고 (단위)
	X 방향	Y 방향	Z 방향	T 방향	P 방향	W 방향	
이중코일스프링	0.5813	0.5813	0.752	0.1	0.1	0.1	MN/m
안내스프링	20.2	4.5	0.25	0.044	0.03	0.473	MN/m MNm/rad
수직오일댐퍼			0.01				MNs/m
코일스프링	0.15	0.15	0.634	0.1	0.1	0.1	MN/m MNm/rad
수직오일댐퍼			0.02				MNs/m
수평오일댐퍼		0.1					MNs/m
안티요 오일댐퍼	0.0	0.0026	0.01	0.02	0.3		속도(m/s)
	0.0	11.0	11.6	12.0	19.0		힘(KN)

표 2.8.6 KTX 객차 현가장치 제원 및 구성

현가요소	기계적 특성치						비고 (단위)
	X 방향	Y 방향	Z 방향	T 방향	P 방향	W 방향	
이중코일스프링	0.3266	0.3266	0.535	0.1	0.1	0.1	MN/m
탄성조인트	54.67	10.67	0.29	0.06	0.007	0.06	MN/m MNm/rad
수직오일댐퍼			0.006				MNs/m
에어스프링	0.1	0.1	0.3	0.303	0.15	0.17	MN/m MNm/rad
안티롤바				3.8			MNm/rad
안티요 오일댐퍼	0.0	0.01	0.02	0.035	0.3		속도(m/s)
	0.0	7.2	11.4	13.8	18.36		힘(KN)

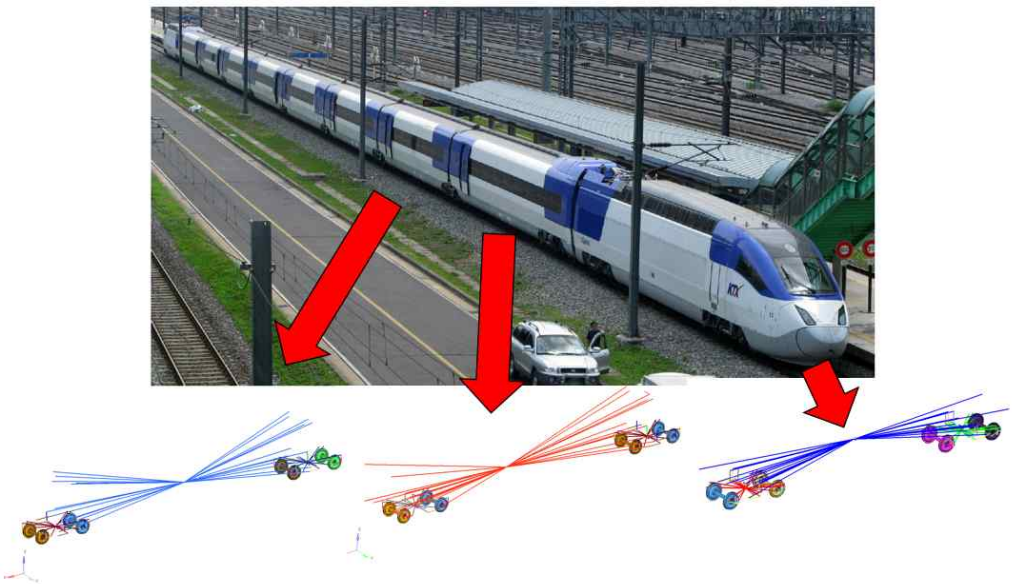


그림 2.8.19 고속열차 단순화 모델링

▪ 고속열차를 대상으로 탈선실험을 실시하여 모델을 검증하기에는 현실적인 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 화물열차 실험으로 대신하였으며 실험의 목적은 고속열차 단순화 모델링 기법 사용의 근거를 확보하기 위함이다. 단순화 기법을 적용한 모델이 실험을 통해 탈선거동을 재현할 수 있음을 보인다면 고속열차 모델에도 동일하게 적용가능하다고 판단하였다. 따라서 단순화 기법을 적용한 화물열차 모델을 제작한 후 중량, 연결효과, DCP 유무 등 여러 조건의 탈선 실험을 수차례 진행하여 단순화기법을 적용한 시뮬레이션 모델이 실제 탈선시험과 동일한 탈선거동을 보임을 확인하였고, 모델링 기법의 검증이 완료되었다.

▪ 탈선 실험과 시뮬레이션 비교를 통해 단순화 기법을 적용한 시뮬레이션 모델이 실제와 유사한 거동을 나타내는 것을 확인하였으므로 같은 기법을 사용하여 고속열차 모델 역시 단순화하여 모델링하였다.

▪ 고속열차는 화물열차와 다른 구조와 형상을 가지고 있기 때문에 고속열차는 다음과 같은 절차로 수정하여 모델링하였다. 고속열차 3D 형상 모델을 토대로 단순화할 프레임의 무게중심, 현가장치 취부 및 연결 조인트 좌표를 구하며 무게중심, 현가장치 취부 및 연결 조인트 좌표를 기준으로 절점을 생성하였다. 그 후 1D 강체 요소에 관성모멘트 및 무게중심을 부여할 수 있는 Ls-Dyna의 키워드인 NODAL RIGID BODY INERTIA 기능을 활용하여 생성한 절점을 활용하여 강체요소를 생성한다. 생성된 1D 강체요소 키워드에 고속열차 대차의 질량 및 회전관성모멘트를 대입한 후 현가장치 절점에 차량에 맞는 현가장치 스프링 생성 및 연결한다. 그 후 차체와 연결을 위해 조인트 및 빔 요소를 사용하였다.

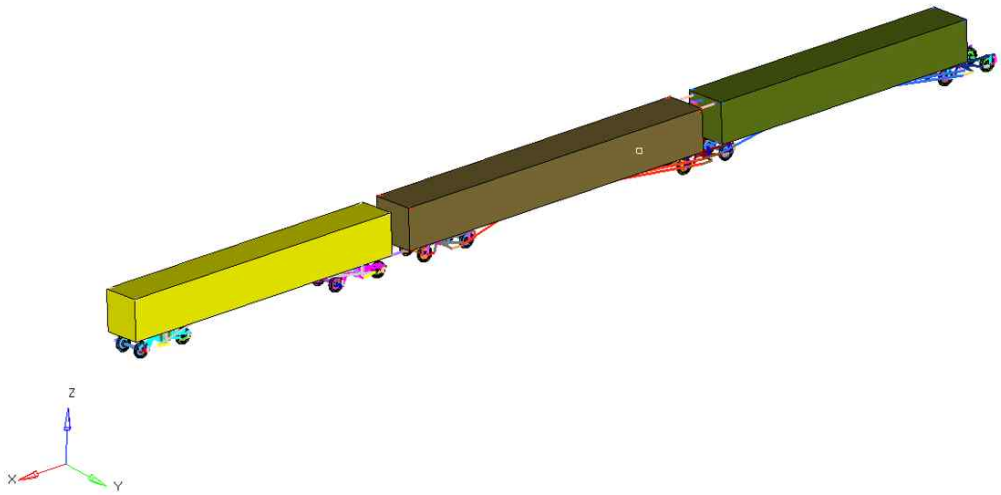


그림 2.8.20 고속열차 단순화 모델

▪ 고속열차 10량을 모두 모델링하여 시뮬레이션을 진행할 경우 과도한 해석시간이 소요되므로 동력차, 동력객차, 객차 총 3량을 모델링하여 시뮬레이션을 진행하였다. 3량의 총 길이는 약 60m이며 질량 145 ton, 요소개수 753,003개로 모델링하였다.

라. 다물체 동역학을 활용한 곡선구간 시뮬레이션

(1) 곡선구간 과속 시뮬레이션

▪ 다물체 동역학은 주행안정성이나 탈선의 발생 등 전체 차량의 움직임을 예측하는데 주로 사용하고 있으며 유한요소모델에 비해서 많은 해석시간을 줄일 수 있다.

▪ 앞서 진행한 단순화 모델을 사용하여 요소에 개수를 줄였지만 유한요소 모델을 사용하여 탈선 과정을 모두 시뮬레이션하기에는 현실적으로 무리가 있으므로 우선 다물체 동역학 모델을 사용하여 탈선 거동을 확인하는 것이 바람직하다.

▪ 본 연구에서는 다물체 동역학 고속열차 시뮬레이션 위해 상용소프트웨어인 Simpack을 사용하였으며 차량의 특성 값은 유한요소 모델과 동일하게 대입하여 동력차 1량을

모델링하였다.

▪ 곡선부에서 열차의 탈선은 한 가지 특정요소가 아닌 차륜/레일의 접촉과 차량/궤도/운전조건 등 다양한 요인들이 복합적으로 관련되어 발생한다. 이러한 요소들을 모두 고려하는 것은 어려운 일이기 때문에 본 연구에서는 일차적으로 정상적이 궤도에서 고속 주행 중 탈선에 영향을 미치는 궤도의 변수만을 고려하여 시뮬레이션을 진행하였다.

▪ 설계속도에 대한 곡선반경 규정은 KR-C14020 궤도 선형 및 배선[12]에서 찾을 수 있으며 다음 (그림 2.8.21)에 나타내었음. 최대 설정캔트와 최대 부족캔트는 그림 2.8.21 아래 부분에 공식에 의해 산출되며 (표 2.8.7) 에는 캔트 부설 기준을 나타낸다.

표 2.8.7 궤도 별 부설캔트 조건

설계속도 V (킬로미터/시간)	자갈도상 궤도		콘크리트도상 궤도	
	최대 설정캔트 (밀리미터)	최대 부족캔트(1) (밀리미터)	최대 설정캔트 (밀리미터)	최대 부족캔트(1) (밀리미터)
200< V≤350	160	80	180	130
V≤200	160	100(2)	180	130

(2) 본선의 곡선반경은 설계속도에 따라 다음 표의 값 이상으로 하여야 한다.

설계속도 V(킬로미터/시간)	최소 곡선반경(미터)	
	자갈도상 궤도	콘크리트도상 궤도
350	6,100	4,700
300	4,500	3,500
250	3,100	2,400
200	1,900	1,600
150	1,100	900
120	700	600
V≤70	400	400

주) 이외의 값은 제7조의 최대 설정캔트와 최대 부족캔트를 적용하여 다음 공식에 의해 산출한다.

$$R \geq \frac{11.8\,V^2}{C_{max} + C_{d,max}}$$

여기서 R : 곡선반경(미터)

V : 설계속도(킬로미터/시간)

C_{max} : 최대 설정캔트(밀리미터)

$C_{d,max}$: 최대 부족캔트(밀리미터)

그림 2.8.21 궤도 및 속도에 따른 최소 곡선반경

▪ 곡선부 과속 시뮬레이션은 고속선로 기준으로 R1600, R2400, R3500, R4700 반경을 가진 곡선을 사용하였으며 곡선반경 별 완화곡선 및 캔트조건은 (그림 2.8.22)와 같은 조건을 적용하였다.

▪ 동력차 1량을 기준으로 각 곡선반경별 이상적인 주행조건에서 탈선이 발생하는 최대 속도를 시뮬레이션으로 추정하였으며 레일은 Simpack에서 기본적으로 사용하며 고속철도에 사용되는 UIC 60 레일을 사용하였다.

▪ (그림 2.8.23) 은 R4700 곡선 조건을 Simpack에 대입한 예시로 나머지 3개의 곡선반

경 조건도 동일한 방식으로 대입하여 모델링 하였다.

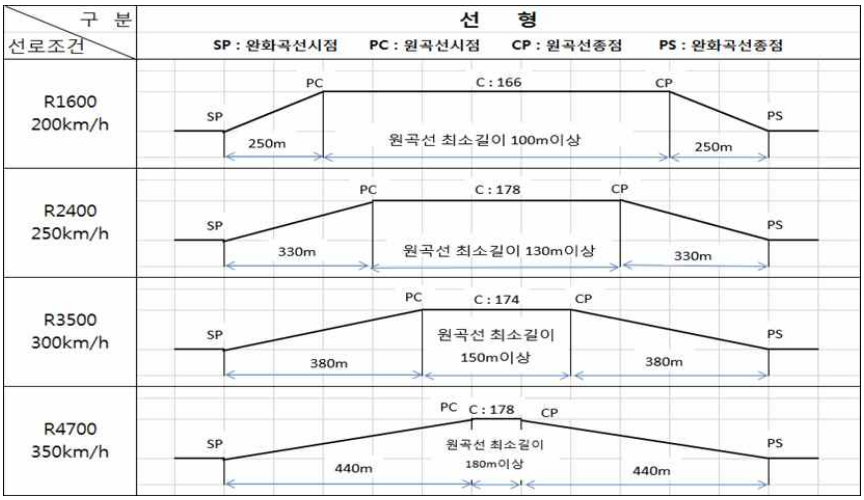


그림 2.8.22 곡선반경에 따른 완화곡선 및 캔트 조건

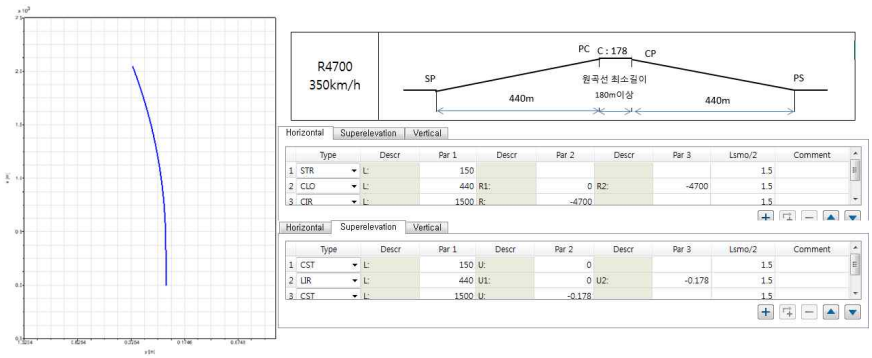


그림 2.8.23 Simpack 곡선 모델링 조건

▪ 시뮬레이션 결과 이상적인 곡선 궤도 조건에서 과속할 경우 전복 탈선이 발생하였다. 전복탈선은 외측으로 작용하는 원심력에 의해 내측 차륜의 윤중이 감소하게 되어 전복되는 탈선형태로 (그림 2.8.25~2.8.26) 와 같이 내측 차륜의 윤중이 0으로 감소하는 것을 확인할 수 있다.

▪ (그림 2.8.24) 은 시뮬레이션에서 전복이 발생하는 순간을 나타냈으며 차량이 바깥쪽으로 전복되는 모습을 보여준다.

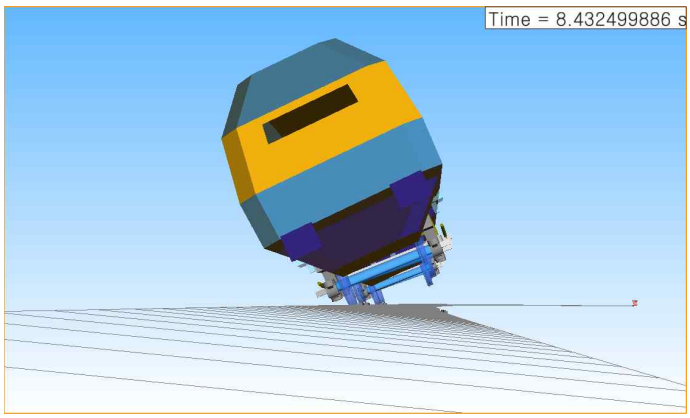


그림 2.8.24 곡선구간 전복되는 동력차

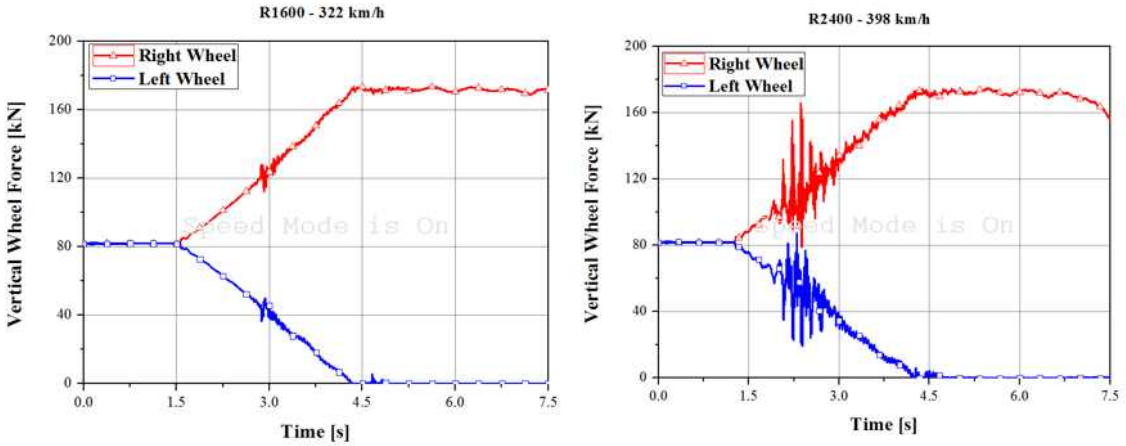


그림 2.8.25 곡선반경에 따른 전복 탈선속도 및 차륜/레일 접촉력

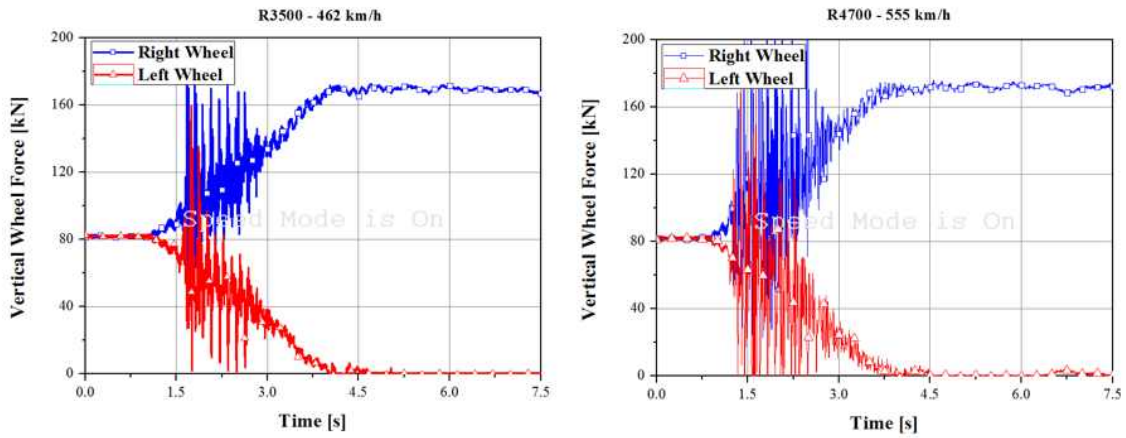


그림 2.8.26 곡선반경에 따른 전복 탈선속도 및 차륜/레일 접촉력2

표 2.8.8 곡선반경 별 전복탈선 속도

곡선반경	R1600	R2400	R3500	R4700
탈선속도	322km/h	398km/h	462km/h	555km/h

▪ R1600 곡선반경에서는 322km/h에서 전복되었으며 R2400, 3500, 4700의 경우 각각

398, 462, 555km/h의 속도에서 차량이 전복되었다. (표 2.8.8) 는 각 곡선반경 별 전복 탈선 속도를 정리한 것으로 고속철도 궤도는 일반적인 선로보다 설계 곡선반경이 매우 크고 이상적으로 주행했을 때 비교적 높은 속도에서 전복이 발생함을 확인하였다.

▪ 본 연구에서 개발되는 DCP의 경우 궤간 내에 설치되는 형태이기 때문에 전복탈선에 대한 열차 방호는 불가능하므로 곡선부 과속에 의한 전복 탈선에 의한 차량의 일탈 방지를 위해서는 다른 방법이 필요할 것으로 보인다.

마. 탈선 초기조건 도출

(1) 탈선 위험도 평가

▪ 본 연구는 고속열차가 탈선하였을 때 DCP 가해는 하중을 추정하여 설계하중을 도출하고 시공위치 등을 확인하기 위함이므로 시뮬레이션에서 차량의 탈선을 필수적으로 고려해야한다.

▪ 철도차량의 탈선 원인에는 레일 및 차축의 결함, 궤도 뒤틀림, 측풍 등 다양함. 정상적으로 주행 중인 경우 외부에서 작용하는 힘은 측풍 등에 의해 차체에 가해지는 하중이므로 본 단계에서는 차체에 가해지는 힘만으로 탈선이 발생하는지 평가하고자 한다.

▪ 유럽, 북미 및 일본과 같이 철도 선진국의 경우 각 국가별로 (표 2.8.9)과 같이 탈선을 판단하는 기준과 방법을 가지고 있다. [13~16]

▪ 탈선을 판단하는 방법은 여러 가지가 있지만, 일반적으로 타고오름 탈선 판정 시에는 윤중과 횡력의 비로 판단하고, 전복 탈선 판정 시에는 윤중 감소율을 사용하고 있다.

표 2.8.9 지역별 탈선 기준 평가방법

Country / Regulation	Method / Criteria	Note
The West	$(Q/P)_{sma} < 0.8$	2m moving average of derailment coefficient
UIC	$Q/P < 0.8$	Derailment coefficient
TSI	$\triangle P/P_0 < 0.9$	Ratio of wheel unloading
North America	$Q/P < 1.0$	Derailment coefficient
	$\sum \lvert Q/P \rvert < 1.0-1.5$	Weinstock
	$\triangle P/P_0 < 0.9$	Ratio of wheel unloading

▪ 차체에 작용하는 하중 이외에 레일 불규칙도와 같은 다른 외력은 전혀 없다고 가정

하였다.

(가) 곡선선로에서 탈선 위험도 평가

표 2.8.10 이론과 시뮬레이션으로 추정한 탈선계수

Track conditions	Force [kN]	Derailment Coefficient		Deviation [%]
		Theory	Simulation	
Straight Track	0	0	0	0
	24	0.046	0.063	2.1
	43	0.121	0.105	2.0
	54	0.139	0.126	1.6
Curved Track (Lateral Acc.=0.5m/s2)	0	0.088	0.055	4.1
	24	0.142	0.096	5.8
	43	0.180	0.156	3.0
	54	0.194	0.159	4.4
Curved Track (Lateral Acc.=1.0m/s2)	0	0.157	0.102	6.9
	24	0.198	0.143	6.9
	43	0.228	0.189	4.9
	54	0.239	0.202	4.6
$\frac{Sulation - Theory}{0.8} \times 100 = Error\,[\%]$				

▪ (표 2.8.10)는 EN 규정에 따라 직선구간, 횡가속도가 0.5 [m/s2], 1 [m/s2]이 작용하는 곡선구간 총 3개의 조건에 대해서 차체에 일정한 하중이 작용하였을 때 차량의 탈선계수를 나타낸 것이다. 차체에 걸리는 힘은 측풍에 대한 고속열차 운행조건을 하중으로 환산하여 나타낸다. [17]

▪ 이론식과 시뮬레이션의 휠 / 레일 접촉부위의 조건을 동일하게 평가하기 위하여 이론과 시뮬레이션 모델의 1차 현가장치에 작용하는 횡 방향, 수직 방향 힘을 이용하여 탈선계수를 (표 2.8.10)에 정리하였다. UIC 기준 (Q/P < 0.8)으로 최대 오차는 약 7 [%] 이내로 발생하는 것을 확인하였다.

▪ 하지만 차체에 일정한 하중 조건 하에서 탈선계수가 상당히 낮게 평가되었다. 그 이유는 하중이 지면과 수평하게 곡선 외측방향으로 작용하게 되면 타고오름 탈선의 위험보다 전복 탈선의 위험이 커지기 때문이다. 전복탈선의 경우 하중에 따라 횡력과 휠/레일의 수직 접촉력이 동시에 증가한다.

▪ 131 kN의 하중이 차체에 작용하면 왼쪽 윤중의 값은 “0”에 도달함에도 불구하고 탈선계수는 0.3을 나타내기 때문에 전복탈선 조건에서 탈선계수로 탈선 여부를 판단하기에는 한계가 있다.

표 2.8.11 이론과 시뮬레이션으로 추정한 윤중감소율

Track conditions	Force [kN]	Ratio of wheel unloading		Deviation [%]
		Theory	Simulation	
Straight Track	0	0	0	0
	24	0.120	0.119	0.1
	43	0.233	0.220	1.4
	54	0.292	0.276	1.8
Curved Track (Lateral Acc.=0.5m/s2)	0	0.128	0.120	0.9
	24	0.248	0.248	0
	43	0.343	0.353	1.1
	54	0.398	0.395	0.3
Curved Track (Lateral Acc.=1.0m/s2)	0	0.256	0.242	1.6
	24	0.376	0.364	1.3
	43	0.471	0.463	0.9
	54	0.526	0.526	0
$\frac{Sulation - Theory}{0.9} \times 100 = Error\,[\%]$				

▪ 전복 탈선조건에서는 TSI 규정에서 제시하는 윤중 변화율(△P/P)을 기준으로 평가하는 것이 바람직함. 동일한 하중, 선로조건에서 이론식과 시뮬레이션에서 나온 윤중 변화율을 (표 2.8.11)에 나타낸다.

▪ TSI 기준 (△P/P < 0.9)으로 최대 오차는 약 2 [%] 이내로 발생하는 것을 확인하였다.

▪ 하중이 약 113 [kN]이 작용하였을 때, TSI 기준 (△P/P < 0.9)을 초과하는 것을 알 수 있다. 따라서 전복탈선 조건에서는 탈선계수보다 윤중 변화율로 탈선 여부를 판단하는 것이 바람직하다.

(나) 운행조건에서 탈선 위험도 평가

▪ 고속으로 운행 중인 철도차량은 차륜의 특성, 레일 불규칙도 등 여러 가지 원인에 의해서 측풍과 같은 외력이 없어도 Q/P가 발생하게 된다.

▪ 선행 연구에서 국내의 고속열차 중 하나인 KTX-산천의 탈선계수를 측정하여 주행안전성을 평가하였다. [18~19] 시뮬레이션으로 추정한 탈선계수와 도출된 이론식을 이용하여 차축에 작용하는 횡 방향 힘으로 식 (1)과 같이 변환하였다.

$$F_H = \frac{\left[\frac{Q}{P}(1+\gamma)-\mu\gamma\right]F_{LV1}+\left[\mu(1+\gamma)-\frac{Q}{P}\gamma\right]F_{RV1}}{\left[(1+\mu\beta)-\frac{Q}{P}\beta\right]} \quad (1)$$

▪ 도출된 식을 이용하여 고속열차 주행 시 기본적으로 발생하는 횡 방향 힘과 EN 규정에서 제시한 선로 조건에서 차체 하중에 따른 윤중 변화율을 (표 2.8.12)에 표현하였다.

표 2.8.12 이론과 시뮬레이션으로 추정한 윤중감소율

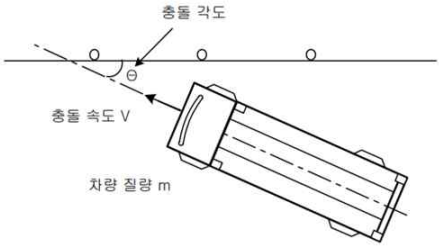
Track conditions	Force [kN]	Ratio of wheel unloading		Deviation [%]
		Theory	Simulation	
Straight Track	0	0.198	0.173	2.8
	24	0.318	0.304	1.6
	43	0.413	0.403	1.1
	54	0.468	0.462	0.7
Curved Track (Lateral Acc.=0.5m/s2)	0	0.323	0.305	2.0
	24	0.443	0.429	1.6
	43	0.538	0.528	1.1
	54	0.593	0.587	0.7
Curved Track (Lateral Acc.=1.0m/s2)	0	0.448	0.454	0.7
	24	0.568	0.579	1.2
	43	0.663	0.681	2.0
	54	0.718	0.739	2.3

▪ 열차의 탈선 위험도를 평가할 때 일반적으로 탈선계수(Q/P)를 많이 사용하고 있지만 설명한 바와 같이 탈선계수를 이용한 평가 방법은 전복 탈선 조건에서는 탈선을 예측하기 어렵기 때문에 전복 탈선 조건에서는 윤중 변화율(△P/P)로 평가하여야 한다.

▪ 본 연구에서는 차체에 가해지는 하중을 측풍을 기준으로 산정하였다. 위에서 정리한 것처럼 고속철도 운행조건 하에서 최대 속도의 측풍이 발생하여도 정상적인 궤도조건에서의 주행상황으로는 탈선계수, 윤중 변화율 모두 규정이내 값이 발생한 것을 확인할 수 있었다.

▪ 따라서 열차의 탈선을 발생시키고자 할 경우 비정상적인 상황을 가정할 수밖에 없으며 본 연구에서는 열차가 탈선하였다고 가정한 상황과 주행 중 궤간이 벌어져 탈선한 상황을 가정하여 해석을 진행하였다.

(2) 차량모델 확인



$$IS = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (\frac{V}{3.6} \cdot \sin\Theta)^2 \text{.....(식 2-1)}$$

여기서, IS : 충격도 (kJ)
m : 충돌 차량의 질량 (ton)
V : 충돌 속도 (km/시)
Θ : 충돌 각도 (°)

<그림 2.1> 충격도 산정

<강도 성능 평가를 위한 시험 조건>

등 급	충돌 속도 (km/시)	차량 중량 (kg)	충돌 각도 (°)	기준 충격도 (kJ)
SB1	55	8.000	15	60
SB2	65			90
SB3	80			130
SB3-B	85			150
SB4	65	14.000		160
SB5	80			230
SB5-B	85			270
SB6	80	25.000		420
SB7		36.000		600

그림 2.8.27 충격도 산정 방법
[도로안전시설 설치 및 관리 지침 -차량방호 안전시설 편-]

▪ 차량 방호시설에 대한 충격도 산정방법은 (그림 2.8.27)에 나타냈으며 차량의 운동에너지를 방호시설이 흡수를 할 수 있는가를 판단하였다.[20]

▪ 시뮬레이션 모델이 충격도 산정 공식으로 구한 값과 동일하게 나오는지 확인하기 위해 80km/h의 속도에서 2.5도를 대입하여 비교하였다. 시뮬레이션 조건은 공식과 동일하게 초기속도를 80km/h로 대입하였으며 궤도를 2.5도 회전하였고 해석차량은 고속열차 동력차 1량으로 수행하였다.

$$IS = \frac{1}{2} \cdot 66 \cdot (\frac{80}{3.6} \cdot \sin(2.5))^2 = 31.0061\,kJ$$

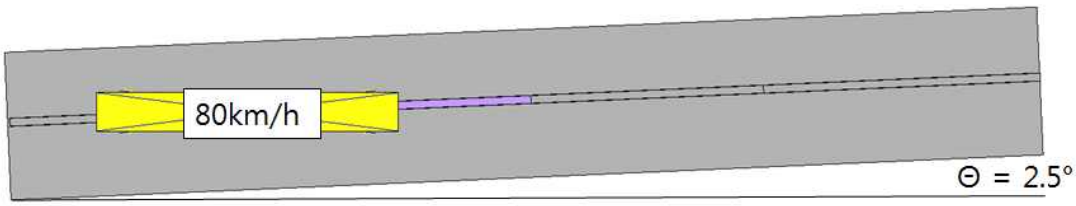


그림 2.8.28 시뮬레이션 해석 조건

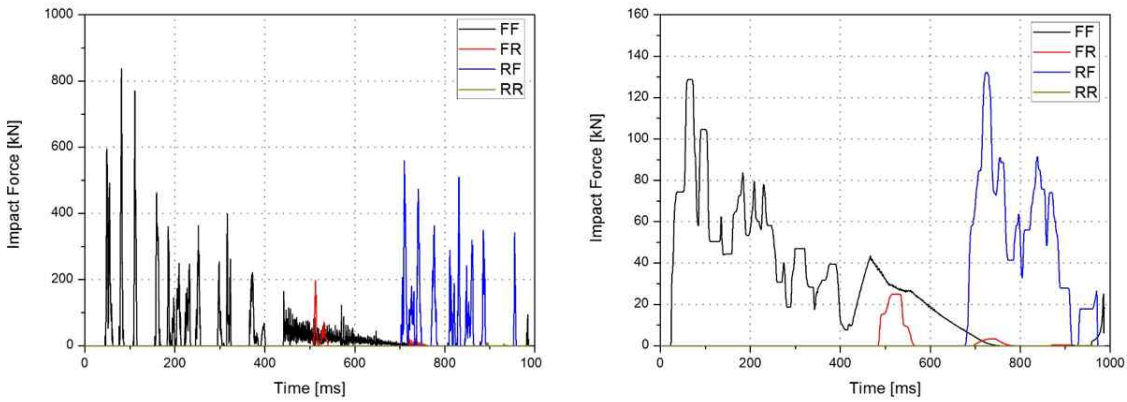


그림 2.8.29 DCP 충돌하중 (좌-50ms 이동평균 전, 우-50ms이동평균 후)

▪ 80km/h에서 2.5도 각도로 충돌했을 때 발생한 충격력은 (그림 2.8.29)와 같으며 필터링 하기 전 최대 충격력은 약 838kN 발생했으며 50ms 이동평균 적용 시 128.7kN 값을 보였다.

▪ 시뮬레이션 결과 충격도 산정공식으로 계산한 운동에너지의 이론값과 시뮬레이션 DCP 내부에너지가 약 2.37%차이가 발생했으며 적은 차이로 모델의 신뢰성을 확인하였다. 즉 80km/h 속도에서 2.5도 각도로 충돌했을 때 DCP가 파손되며 차량의 횡방향 운동에너지를 적절히 흡수한 것으로 확인하였다.

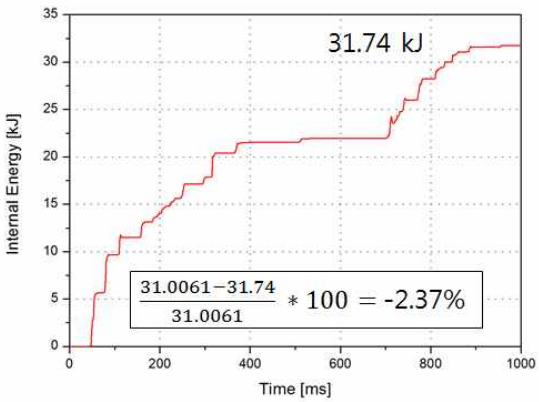


그림 2.8.30 DCP 내부에너지

(3) 시뮬레이션 초기조건 도출

▪ 차량이 곡선주행을 하며 탈선하는 과정을 모두 시뮬레이션을 하는 것이 이상적이나 실제 탈선이 복잡한 요인이 합쳐져 발생하기 때문에 시뮬레이션에 탈선이 발생하는 조건을 명확히 알기도 어려우며 시뮬레이션에 적용하여 탈선을 일으키기는 힘들기 때문에 본 시뮬레이션 시에는 차량이 곡선을 주행하다가 탈선했다는 가정을 한 후 진행하였다.

▪ 차량이 이미 탈선을 했다고 가정했기 때문에 초기 조건을 어떻게 적용하느냐에 따라 차량의 충돌각도가 달라진다.

▪ (그림 2.8.31) 곡선에서 발생하는 충돌각도를 나타낸 것으로 α는 곡선반경에 의해 이미 결정된 기하학적인 값이지만 β는 곡선반경, 캔트, 속도 등에 의해 결정되는 값이며 추가적으로 발생되는 β 각도를 추정할 필요가 있다.

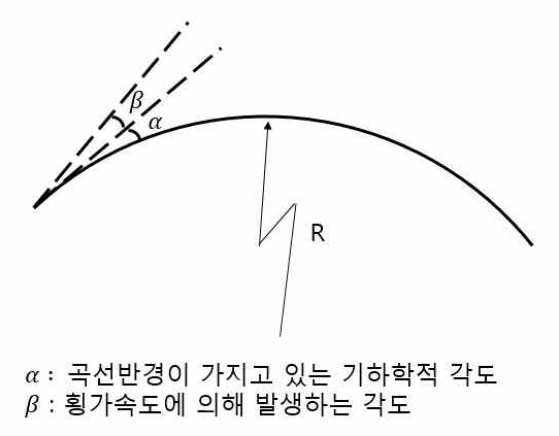


그림 2.8.31 곡선에서 탈선 시 발생하는 충돌각도

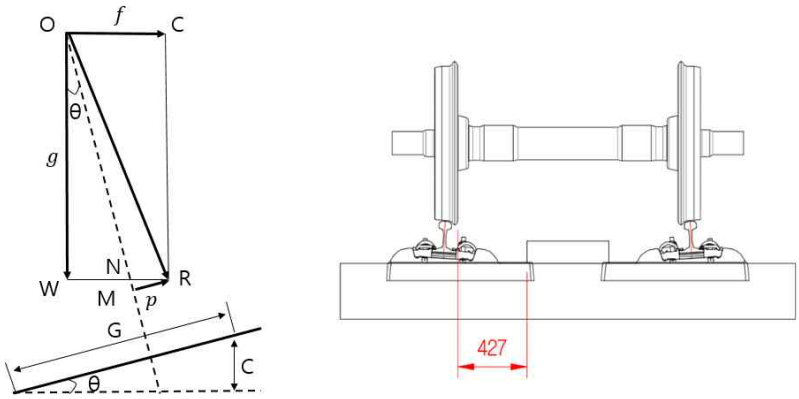


그림 2.8.32 곡선 주행 시 횡가속도 추정 공식 참고 그림

▪ (그림 2.8.32) 왼쪽 그림은 열차가 곡선을 주행할 때 발생하는 요소들을 나타낸 것으로 본 그림으로부터 바깥으로 발생하는 횡가속도를 추정할 수 있다.

▪ 캔트 부설에 사용되는 공식을 활용하여 v=300km/h, 곡선반경 R3500, 캔트량 174mm에서의 원심가속도를 계산하였다.

$$a_p = \frac{300^2}{12.96 \bullet 3500} - \frac{174}{153} = 0.84687 m/s^2$$

위에서 구한 원심가속도를 등가속도식에 적용하면 횡방향 속도를 알 수 있다.

$$v^2 - v_o^2 = 2as$$

이때 s는 차량이 바깥으로 진행하는 거리인 차륜과 DCP 사이거리 427mm를 대입.

$$즉, v^2 = 2 \bullet 0.84687 \bullet 0.427 = 0.72322\,(m/s)^2$$

이론적으로 계산된 속도를 기존 진행방향 300km/h 속도를 적용하여 추가각도 β 를 추정하면, $\beta = \tan^{-1}(\frac{0.8504}{83.333}) = 0.58467^{\circ}$ 로 계산가능하다.

▪ 따라서 곡선반경이 가지고 있는 기하학적 각도 + 원심가속도에 의해 발생한 추가 각도 0.58467도를 탈선 초기조건에 고려하였다. R3500 곡선반경에 300km/h 속도로 진행하다가 탈선했다고 가정하였으며 충돌하는 DCP 구간은 여러 개의 패널로 구성하였다.

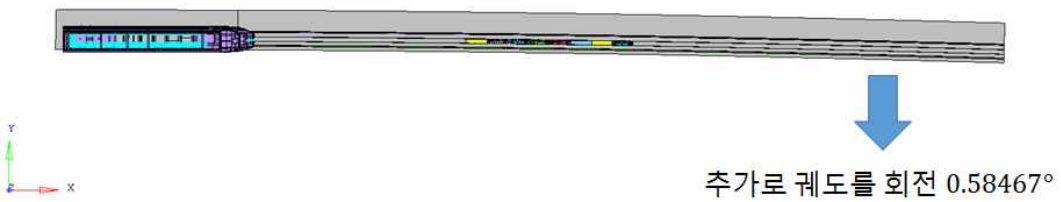


그림 2.8.33 Case 1,2 궤도조건

▪ (표 2.8.13)은 각 차륜별 충돌하중을 나타낸 것으로 좌측은 필터링 적용 전 우측은 50ms 이동평균 필터링 적용 후 충돌하중을 나타낸 것이다. 충돌하중은 1번 차륜에서 211 kN, 2번 차륜에서 223 kN, 3번 차륜에서 187 kN, 4번 차륜에서 204 kN 로 각각 나타냈다.

표 2.8.13 각 차륜 별 충돌하중

	충돌하중 [kN] (필터링 전)	충돌하중 [kN] (필터링 후)
Wheel 1 (FF)	4676	211
Wheel 2 (FR)	2889	223
Wheel 3 (RF)	3106	187
Wheel 4 (RR)	872	204

표 2.8.14 DCP 패널당 에너지

Part	△Internal Energy	Total Internal Energy [kJ]
DCP2	0.36	0.8
DCP3	0.6	1.65
DCP4	0.77	2.01
DCP5	0.2	0.64
DCP6	1.82	3.57
DCP7	1.44	1.83
DCP8	0.32	0.87

▪ 시뮬레이션 결과 DCP 에너지는 (표 2.8.14)에 정리하였으며 최대 3.57 kJ 로 나타났다.

▪ 내부에너지는 소재가 변형을 적게 할수록 작게 나오며 소재에 따라 다르게 발생하기 때문에 소재특성을 고려하여 평가하여야 한다.

▪ 또한 추가각도를 고려한 시뮬레이션의 경우 탈선 후 차량의 낙하, 침목등과의 충돌과정을 모두 생략한 조건이다. 따라서 실제 탈선과정에서 침목에 의한 충돌, 마찰 등에 의해 발생하는 에너지 소산이 없어 충돌하중이 높아질 수 있다.

바. 곡선 주행 중 탈선 시 DCP 충돌하중 및 내부에너지 추정

(1) 곡선부 탈선 시뮬레이션

(가) 300km/h R3500

▪ 300km/h 속도에서 최소 곡선반경인 R3500에 대해서 곡선 주행 중 탈선하는 해석을 진행하였다. 곡선구간 탈선은 주로 과속에 의해 발생하게 되며 큰 인명피해를 초래한다.

▪ 다물체 동역학 시뮬레이션 결과 곡선구간 과속은 주로 전복탈선 형태로 발생하여 궤간 내 DCP로 방호하기에는 무리가 있다. 하지만 앞서 구한 곡선구간 전복탈선 속도는 이상적인 조건에서의 결과이므로 실제 주행 중에서는 차량/궤도/운행조건 등에 의해 전복하지 않고 타고오름, 미끄러져 오름 등의 탈선이 발생하여 차륜이 궤간 내에 탈선할 수 있다. 따라서 곡선구간 주행 중 궤간 내 탈선하여 DCP에 충돌이 발생한 경우도 고려해야한다.

▪ 곡선구간 열차의 탈선은 다양한 요인들이 복합적으로 관련되어 발생하기 때문에 이러한 요소들을 시뮬레이션으로 모두 고려하여 유도한 대로 탈선시키기는 어렵다.

▪ 주행 중 탈선 조건을 직접 대입하여 탈선 시기키는 어려우므로 주행 중 외측 레일이 일자로 진행하며 궤간이 늘어나게 되어 차륜이 레일 사이로 떨어지도록 하였으며 차량이 차례로 궤간내로 떨어지도록 하였다.

▪ (그림 2.8.34)는 외측 레일이 직선으로 진행하며 궤간이 넓어지는 것을 보여주며 궤간내로 차륜이 떨어지며 탈선하게 된다.

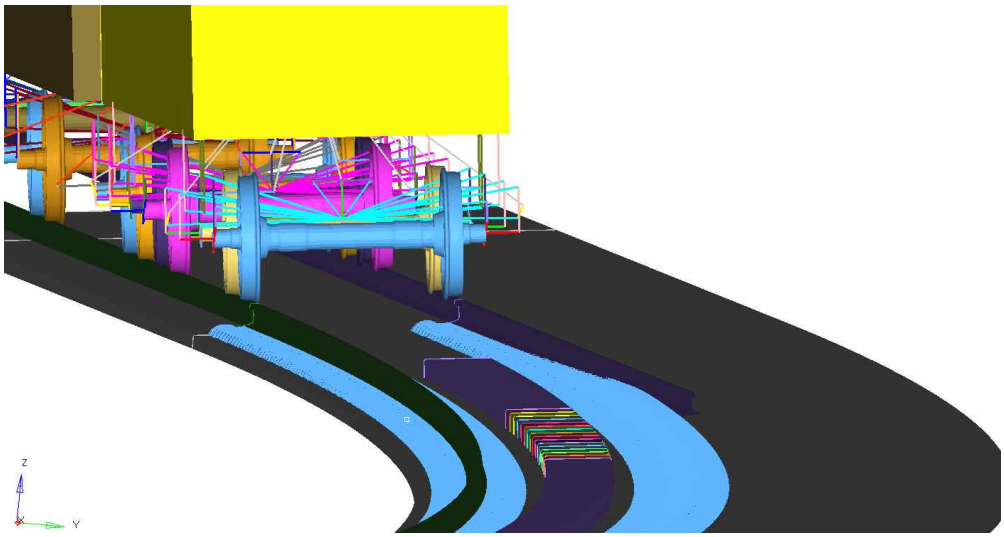


그림 2.8.34 R3500 곡선 탈선 조건

▪ DCP는 충돌지점에 별도의 패널 15개를 모델링하여 DCP 1개의 패널당 걸리는 충돌하중과 내부에너지를 추정하고자 하였다. (그림 2.8.35)는 모델링한 DCP 번호를 나타낸다.

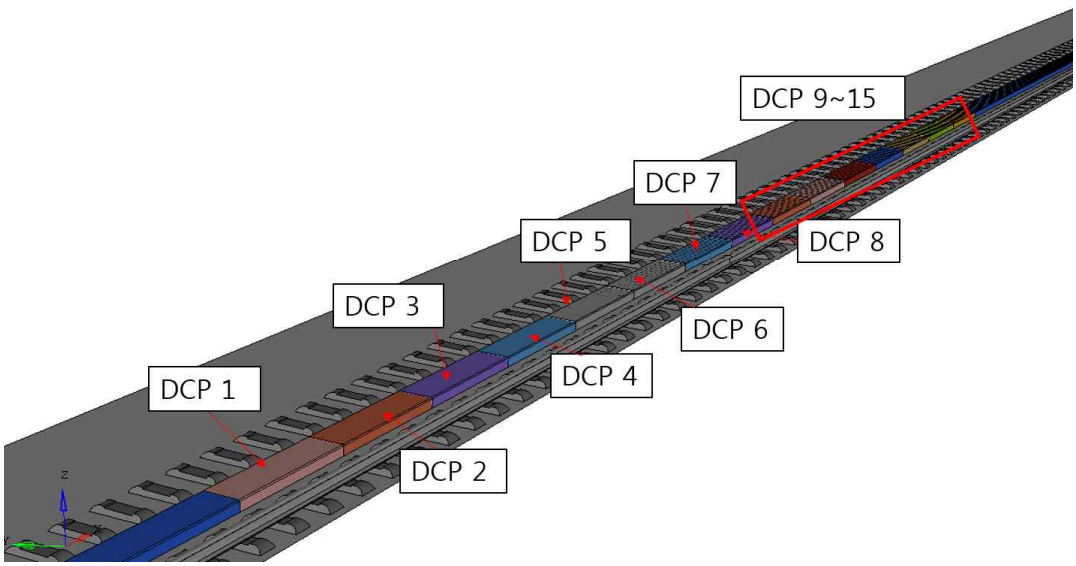


그림 2.8.35 DCP 패널번호

▪ 해석결과 DCP 12번 패널에서 가장 큰 충돌하중이 발생하였다.(그림 2.8.36)

▪ 표 2.8.15는 패널당 DCP 충돌하중을 나타낸 것으로 필터링 전은 11번 DCP에서 1505.1 kN으로 가장 높게 나왔으며 필터링 후 충돌하중은 12번 DCP에서 165.6 kN으

로 가장 크게 발생하였다. 곡선 주행 탈선 시뮬레이션의 경우 탈선한 상태로 가정하여 진행한 시뮬레이션 결과보다 낮은 충돌하중 결과를 보였다.

▪ 이는 탈선한 상태를 가정하여 진행한 시뮬레이션의 경우 열차의 초기 운동에너지를 전부 가지고 있는 상태로 곡선반경의 기하학적각도로 진행하며 DCP 충돌하지만 곡선 주행 중 탈선의 경우 탈선 후 차량이 차례로 탈선하며 열차의 방향이 곡선반경의 기하학적 각도보다 작아져 충돌각도가 감소하여 상대적으로 충돌하중이 낮게 발생한 것으로 보인다.

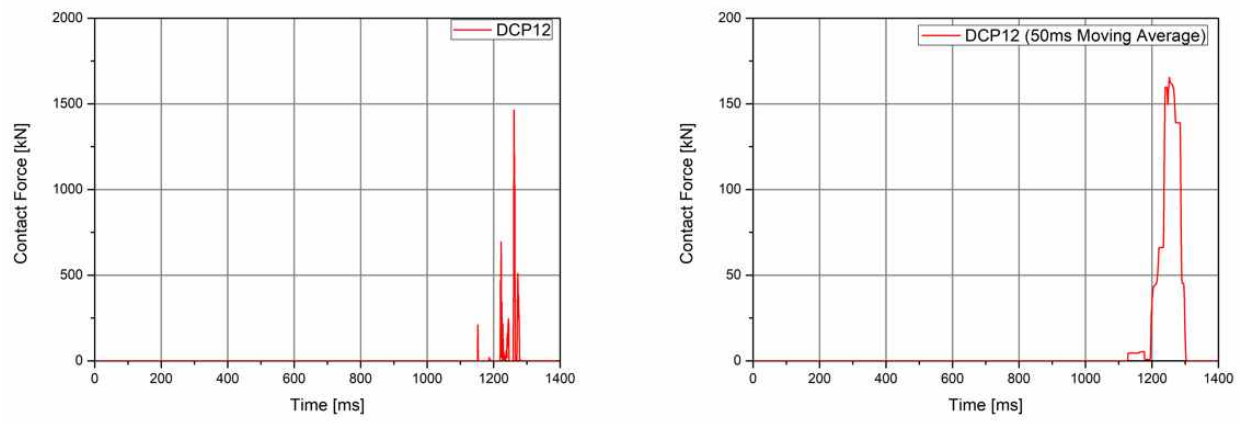


그림 2.8.36 12번 DCP 충돌하중 그래프

표 2.8.15 각 차륜 별 충돌하중

	충돌하중 [kN] (필터링 전)	충돌하중 [kN] (필터링 후)
DCP 1	-	-
DCP 2	-	-
DCP 3	-	-
DCP 4	852.7	51
DCP 5	867.6	81
DCP 6	916.2	76.6
DCP 7	601.9	67.4
DCP 8	638.9	46
DCP 9	228.9	43.7
DCP 10	278.8	26.7
DCP 11	1505.1	96.7
DCP 12	1464.4	165.6
DCP 13	831.9	141
DCP 14	426.3	97.3
DCP 15	369.4	56.6

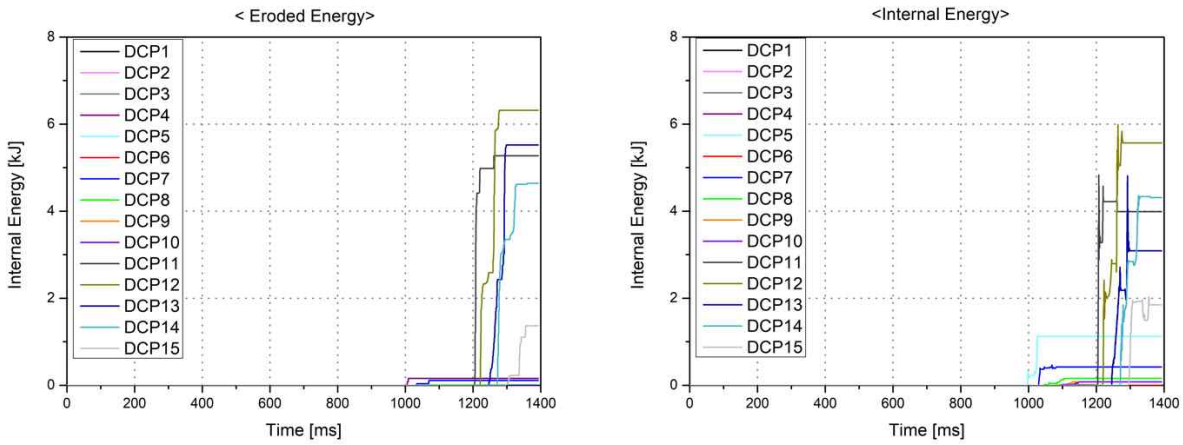


그림 2.8.37 DCP 1~15 패널에 걸리는 내부에너지 비교

▪ DCP 패널 당 내부에너지는 (그림 2.8.37)에 나타내었으며 내부에너지는 최종적으로 누적된 내부에너지와 충돌에 의해 발생하는 내부에너지 변화량 그리고 콘크리트 파손에 의해 비산된 Eroded 에너지를 구분하여 정리하였다.

▪ 표 2.8.16은 DCP 패널의 Eroded 에너지와 누적 내부에너지, 순간 최대 내부에너지의 변화량 결과를 정리하여 나타내었다. 한 패널에서 발생한 최대 Eroded 에너지는 6.32 kJ로 12번 DCP에서 발생하였다. 최대 누적 내부에너지는 5.56 kJ로 마찬가지로 12번 DCP에서 가장 큰 값이 발생하였다. 누적된 에너지가 아닌 순간적인 내부에너지 변화량은 DCP 11번 패널에서 3.3 kJ로 확인되었으며 이는 DCP 내충격성평가에 적용된 3.5 kJ 이하이므로 DCP 앵커부는 건전할 것으로 보인다.

표 2.8.16 각 DCP 별 내부에너지

	Eroded Energy [kJ]	Internal Energy [kJ]	△Internal Energy [kJ]
DCP 1	-	-	
DCP 2	-	-	
DCP 3	-	-	
DCP 4	0.6	0.3	0.26
DCP 5	0.14	1.2	0.9
DCP 6	0.9	0.26	0.15
DCP 7	0.11	0.42	0.36
DCP 8	-	0.16	0.05
DCP 9	-	0.08	0.03
DCP 10	-	0.08	0.03
DCP 11	5.27	4	3.3
DCP 12	6.32	5.56	2.3
DCP 13	5.52	3.1	2.2
DCP 14	4.64	4.3	2.85
DCP 15	1.37	1.84	1.92

(나) 250km/h R2400

▪ 250km/h 속도에서 최소 곡선반경인 R2400에 대해서 곡선 주행 중 탈선하는 해석을 진행하였다.

▪ R2400 조건도 R3500 조건과 동일하게 곡선 주행 중 외측 레일이 일자로 진행하며 궤간이 늘어나게 되어 차륜이 레일 사이로 떨어지도록 하였으며 차량이 차례로 궤간내로 떨어지도록 하였다.

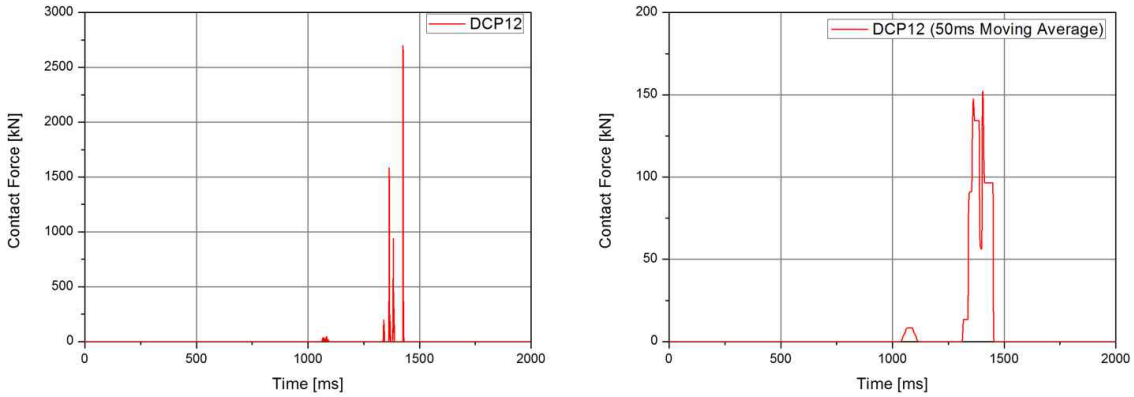


그림 2.8.38 12번 DCP 충돌하중 그래프

▪ 해석결과 DCP와 첫 충돌은 5번 패널에서 발생하였으며 DCP 12번 패널에서 가장 큰 충돌하중이 발생하였다. R2400 곡선에서는 차륜이 DCP와의 충돌을 반복하며 파손이 일정하게 발생하지 않았다.

▪ 표 2.8.17은 패널당 DCP 충돌하중을 나타낸 것으로 필터링 전은 12번 DCP에서 2681.1 kN으로 가장 높게 나왔으며 필터링 후 충돌하중은 12번 DCP에서 152.3 kN으로 가장 크게 발생하였다.

표 2.8.17 각 차륜 별 충돌하중

	충돌하중 [kN] (필터링 전)	충돌하중 [kN] (필터링 후)
DCP 1	-	-
DCP 2	-	-
DCP 3	1023.2	54.8
DCP 4	1090	121.2
DCP 5	1238.4	130.9
DCP 6	1210.4	97.9
DCP 7	1319	54.1
DCP 8	701.8	44
DCP 9	106.4	26.7
DCP 10	54	18.4
DCP 11	240	23.2
DCP 12	2681.1	152.3
DCP 13	1043.9	84.5
DCP 14	1200.4	101.3
DCP 15	823	135

▪ (표 2.8.18)은 DCP 패널의 Eroded 에너지와 누적 내부에너지, 순간 최대 내부에너지의 변화량 결과를 정리하여 나타낸 것이다.

▪ 한 패널에서 발생한 최대 Eroded 에너지는 5.72 kJ로 12번 DCP에서 발생하였다. 최대 누적 내부에너지는 2.6 kJ로 동일한 12번 DCP에서 가장 큰 값이 발생하였고 내부에너지의 최대변화량은 2.2 kJ이 발생하였다.

표 2.8.18 각 DCP 별 내부에너지

	Eroded Energy [kJ]	Internal Energy [kJ]	△Internal Energy [kJ]
DCP 1	-	-	-
DCP 2	-	-	-
DCP 3	0.53	0.6	0.6
DCP 4	0.56	1.55	1.05
DCP 5	1.95	1.65	0.85
DCP 6	0.56	0.95	0.55
DCP 7	-	0.26	0.16
DCP 8	-	0.02	0.02
DCP 9	-	-	-
DCP 10	-	-	-
DCP 11	0.25	0.15	0.15
DCP 12	5.72	2.6	2.2
DCP 13	1.13	1.68	0.81
DCP 14	3.97	1.24	0.46
DCP 15	3.7	1.1	0.72

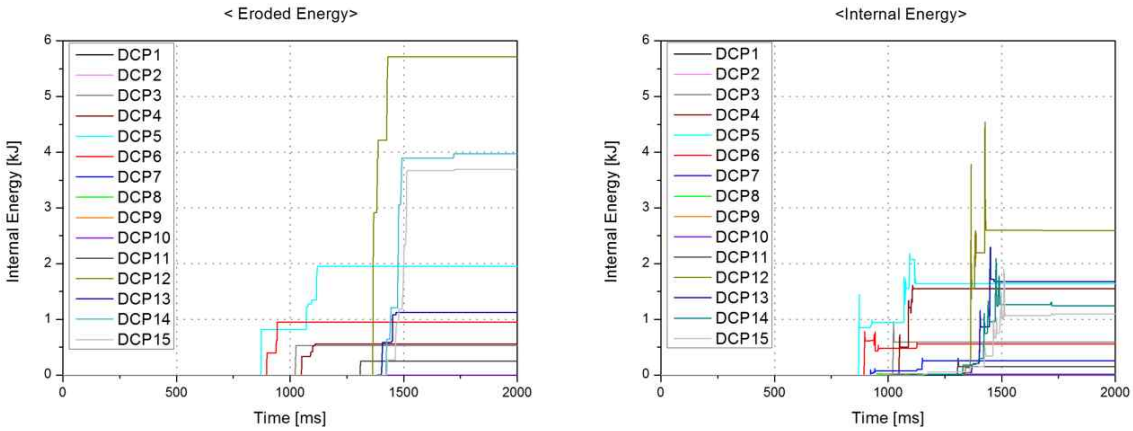


그림 2.8.39 DCP 1~15 패널에 걸리는 내부에너지 비교

(다) 200km/h R1600

▪ R1600 조건에서는 DCP 패널은 20개로 나눠서 모델링 하였으며 충돌이 발생한 DCP 패널만 (그림 2.8.40~2.8.41)에 나타내었다.

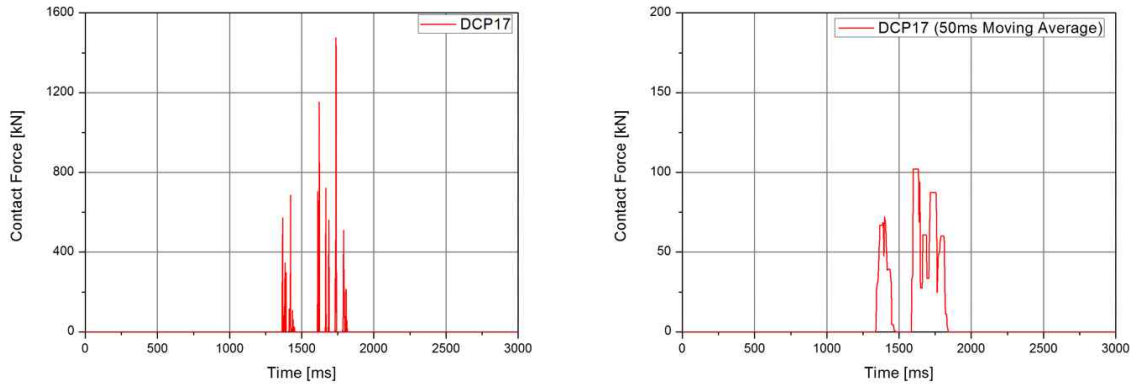


그림 2.8.40 17번 DCP 충돌하중 그래프

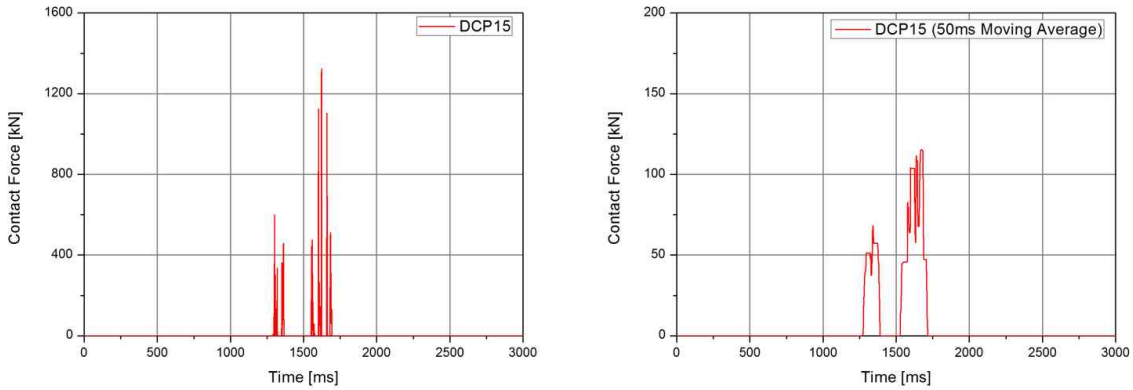


그림 2.8.41 15번 DCP 충돌하중 그래프

▪ 해석결과 DCP와 첫 충돌은 4번 패널에서 발생하였다.

▪ 표 2.8.19는 패널당 DCP 충돌하중을 나타낸 것으로 필터링 전은 17번 DCP에서 1475.2kN으로 가장 높게 나왔으며 필터링 후 충돌하중은 15번 DCP에서 115.1 kN으로 가장 크게 발생하였다.

표 2.8.19 각 DCP 별 충돌하중

	충돌하중 [kN] (필터링 전)	충돌하중 [kN] (필터링 후)
DCP 1	-	-
DCP 2	-	-
DCP 3	-	-
DCP 4	1233.7	111.4
DCP 5	5.2	0.018
DCP 6	896.1	40.8
DCP 7	1124.5	58.6
DCP 8	972.5	84.3
DCP 9	1041.3	87.1
DCP 10	894.3	83
DCP 11	575.4	90.5
DCP 12	1356	83.3
DCP 13	-	-
DCP 14	757.4	79.7
DCP 15	1305.4	115.1
DCP 16	1056.3	94.5
DCP 17	1475.2	102.1
DCP 18	1064.1	113.4
DCP 19	787.3	82.1
DCP 20	767.7	54.2

▪ DCP 패널 당 내부에너지는 그림 2.8.42에 나타내었으며 내부에너지는 최종적으로 누적된 내부에너지와 충돌에 의해 발생하는 내부에너지 변화량 그리고 콘크리트 파손에 의해 비산된 Eroded 에너지를 구분하여 정리하였다.

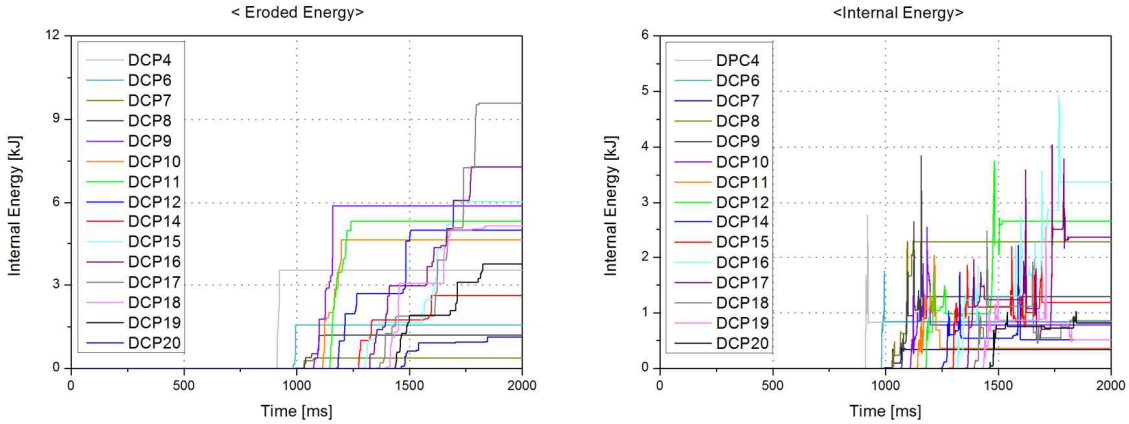


그림 2.8.42 DCP 1~20 패널에 걸리는 내부에너지 비교

▪ 표 2.8.20은 DCP 패널의 Eroded 에너지와 누적 내부에너지, 순간 최대 내부에너지의 변화량 결과를 정리하여 나타낸 것이다.

▪ 한 패널에서 발생한 최대 Eroded 에너지는 9.6 kJ로 17번 DCP에서 발생하였으며 최대 누적 내부에너지는 3.38 kJ, 내부에너지 최대변화량은 2.07 kJ로 16번 DCP에서 가장 큰 값이 발생하였다.

표 2.8.20 각 DCP 별 내부에너지

	Eroded Energy [kJ]	Internal Energy [kJ]	△Internal Energy [kJ]
DCP 1	-	-	-
DCP 2	-	-	-
DCP 3	-	-	-
DCP 4	3.54	0.83	0.83
DCP 5	-	0.017	0.017
DCP 6	1.56	0.84	0.84
DCP 7	0.37	0.34	0.24
DCP 8	1.2	2.3	1.05
DCP 9	5.9	1.3	1.3
DCP 10	4.63	0.78	0.78
DCP 11	5.3	0.36	0.36
DCP 12	5	2.7	1.67
DCP 13	-	-	-
DCP 14	2.62	0.52	0.52
DCP 15	6.04	1.2	1.1
DCP 16	7.3	3.38	2.07
DCP 17	9.6	2.4	1.13
DCP 18	5.14	0.86	0.86
DCP 19	3.77	0.51	0.5
DCP 20	1.13	0.82	0.75

2.9 일탈방호시설에 대한 설계지침 개발 (철도설계지침 및 편람 개정)

가. 철도설계지침 및 편람(KR C-02060, 본선부대 및 안전시설) 개정(안) 도출

(1) [개정항목 1] 교량관련 부대시설

관련기준	현 행	제·개정(안)	사 유
KR C-02060 (본선부대 및 안전시설)	3. 교량관련 부대시설 3.1 부속설비 3.1.1 상판에 부설해야 하는 시설물 (1) 철도 운영과 연관해서 상판에 부설해야 하는 시설물은 다음과 같다. ⑧ 탈선 방호벽	⑧ 일탈 방호 시설 (Derailment Containment Facility)	· 교량 상에서 탈선된 열차를 방호하는 시설은 크게 3가지 종류가 있으므로 방호벽이 아닌 일탈 방호 시설로 확대된 용어로 수정 (별첨 자료, KR C-02060 개정 연구 결과 보고서, 제1장 1.2절 3페이지)
	(11) 탈선방호벽	(11) 일탈 방호 시설	· 용어 수정
	① 고속철도에서 주행 중인 열차가 교량	① 고속철도 교량에서 주행하는 열차가	· 방호와 방지는 다른 개념임. 일탈 방호

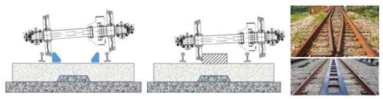
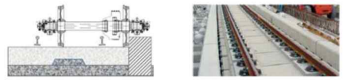
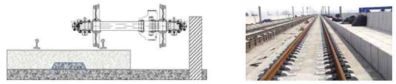
	위에서 탈선하는 것을 방지하는 시설물을 설치해야 한다.	탈선할 경우 피해를 최소화하기 위한 일탈 방호 시설을 설치해야 한다.	시설에는 탈선을 방지하는 시설도 포함됨. 일탈 방호 시설의 개념은 탈선된 열차를 의도된 영역 안으로 구속시켜서 피해를 최소화하는 것임.
	② 탈선방호벽은 열차의 주행속도에 따른 탈선하중 및 직선구간, 곡선구간 시설물 높이, 폭 등의 설치조건을 고려하여 설계해야 한다.	② 일탈 방호 시설은 주행 열차의 탈선 충돌하중과 충돌에너지, 선로의 기하 조건 등의 운행 환경에 부합되어야 하며 탈선 열차의 과도한 수평 일탈(교축 직각방향 탈선 이동)을 제어하는 성능(의도된 영역 안으로 구속시키는 능력)이 입증되어야 한다.	• 일탈 방호 시설 설계에 적용될 하중은 탈선하중이 아닌 탈선된 열차가 방호 시설에 충돌하는 하중과 에너지임. • 일탈 방호 시설의 성능은 충돌하중과 에너지에 저항하는 능력과 탈선 열차가 의도된 영역 안으로 구속되는 능력이 모두 확보되어야 함.

(2) [개정항목 2] 안전시설의 일반사항

관련기준	현 행	제·개정(안)	사 유
KR C-02060 (본선부대 및 안전시설) 해설 1. 안전시설	해설 1. 안전시설 1. 안전시설의 일반사항 1.2 안전시설의 종류 1.2.1 열차운전 안전시설 (1) 탈선방호시설 1.3 안전시설의 기능 1.3.1 열차운전 안전시설 (1) 열차의 탈선을 방지하는 기능 1.4 설계시 고려사항 1.4.2 종합적 고려사항 (1) 열차운전 안전시설 ① 열차탈선 방호시설은 열차가 교량상에서 탈선하여도 교량 하부로 낙하 하지 않도록 충분한 강성을 가져야 한다.	해설 1. 안전시설 1. 안전시설의 일반사항 1.2 안전시설의 종류 1.2.1 열차운전 안전시설 (1) 일탈 방호 시설 1.3 안전시설의 기능 1.3.1 열차운전 안전시설 (1) 탈선된 열차를 의도된 영역 안으로 구속하고 열차의 과도한 수평 일탈(교축 직각방향 탈선 이동)을 제어하는 기능 1.4 설계시 고려사항 1.4.2 종합적 고려사항 (1) 열차운전 안전시설 ① 일탈 방호 시설은 열차가 교량 상에서 탈선하여도 교량 하부로 낙하하거나 인접 선로를 침범하지 않도록 충분한 강성과 강도를 가져야 한다.	• 용어 수정 • 방호와 방지는 다른 개념임. 일탈 방호 시설의 개념으로 수정함. • 용어 수정 • 인접한 선로로의 침범도 방호되어야 함. • 탈선 열차의 후속 객차도 지속적으로 방호되어야 하므로 충분한 강도를 가져야 함.

	② 열차탈선 방호시설로 인하여 궤도의 유지보수에 지장을 주지 않아야 하며, 또한 열차운행을 위한 신호체계에도 지장을 주어서는 안 된다.	② 일탈 방호 시설로 인하여 궤도의 유지보수에 지장을 주지 않아야 하며, 또한 열차운행을 위한 신호체계에도 지장을 주어서는 안 된다.	・용어 수정

(3) [개정항목 3] 열차운전 안전시설

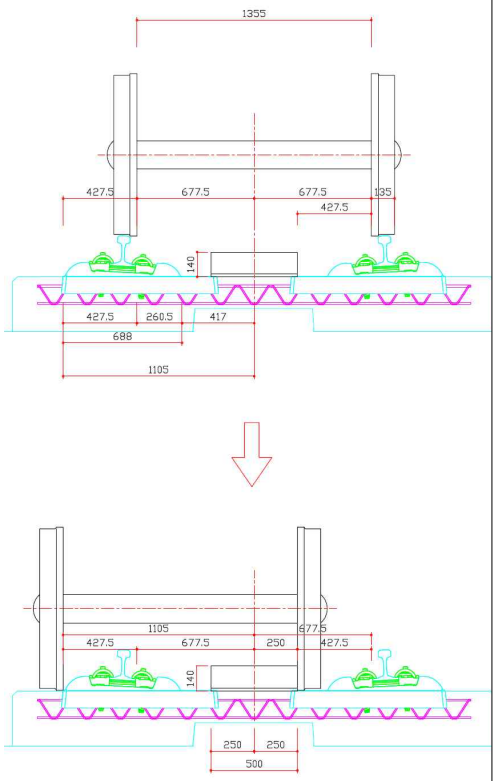
관련기준	현 행	제・개정(안)	사 유
KR C-02060 (본선부대 및 안전시설) 해설 1. 안전시설	2. 열차운전 안전시설 2.1 탈선방호시설 2.1.1 정의 및 기능 교량구간에서 열차가 탈선 하였을 때 차량이 전복하거나 교량하부로 낙하하는 것을 방지하기 위하여 설치하는 시설물로서 일반철도에서 적용하고 있는 가드레일방식과 고속철도에서 채택하고 있는 측면구조물방식이 있으며, 본 절에서는 측면구조물방식에 대하여 기술한다.	2. 열차운전 안전시설 2.1 일탈 방호 시설 2.1.1 정의 및 기능 교량구간에서 열차가 탈선 하였을 때 교량 하부로 낙하하는 것을 방지하거나 인접 선로를 침범하지 않도록 차륜 또는 차축을 방호하는 시설물로서, 궤간 내에 설치하여 차륜을 방호하는 구조물 방식(Type 1), 궤도 측면에 설치하여 차륜을 방호하는 구조물 방식(Type 2), 그리고 궤도 측면에 설치하여 차축을 방호하는 구조물 방식(Type 3)이 있다. **궤간 내에 설치하여 차륜을 방호하는 구조물 방식** (Type 1)  **궤도 측면에 설치하여 차륜을 방호하는 구조물 방식**(Type 2)  **궤도 측면에 설치하여 차축을 방호하는 구조물 방식**(Type 3) 	・용어 수정 ・국제적으로 통용되고 있는 일탈 방호 시설의 종류를 3가지 Type으로 제시함. (별첨 자료, KR C-02060 개정 연구 결과 보고서, 제1장 1.2절 3페이지) ・현 지침에서 제시하고 있는 측면 구조물 방식은 궤도 측면에 설치하여 차축을 방호하는 구조물 방식(Type 3)에 해당함.

	2.1.2 설계기준	2.1.2 설계기준	
	교축직각방향 탈선 이동을 막아주는 장치적인 역할로써 케이블 홈통(Ditch)등에 설치하게 되어 있는 탈선 방호벽 등의 교량 상부면 돌출구조에는 150KN의 교축직각방향 수평하중을 적용하여 탈선 시 열차의 수평 이탈을 제어 할 수 있도록 하여야 한다.	일탈 방호 시설은 탈선된 열차의 과도한 수평 일탈(교축 직각방향 탈선 이동)을 연속적으로 제어할 수 있고 탈선 열차와 일탈 방호 시설과의 충돌 하중 및 에너지에 견고하게 견딜 수 있도록 충분한 강성과 강도를 보유하여야 한다.	• 현 지침에서 제시하고 있는 측면 구조물 방식(Type 3)의 설계하중인 150 kN은 방호 성능을 충분히 만족시킨다고 볼 수 없으므로 삭제함. (별첨 자료, KR C-02060 개정 연구 결과 보고서, 제2장 2.3절 9~13페이지) • 3가지 Type의 일탈 방호 시설이 보유해야 하는 성능을 규정함.
	(1) 탈선방호벽의 위치	(1) 위치 및 제원	• 용어 수정
	① 탈선 방지 기능을 고려한 위치	① 궤간 내에 설치하여 차륜을 방호하는 구조물 방식(Type 1)의 일탈 방호 시설은 선로 중심부에 위치하고 제원은 다음을 고려하여 결정한다. 가. 차륜과의 충돌하중/에너지 나. 충돌 후 차륜 구속 다. 차륜 제원 라. 레일 체결장치와 험프와의 간섭 마. 탈선 후의 대차 하부 구조와 궤도 상면과의 연직방향 순 간격	• 궤간 내에 설치하여 차륜을 방호하는 구조물 방식(Type 1)의 일탈 방호 시설에 대한 위치와 제원 결정을 위한 검토 항목 신설
		② 궤도 측면에 설치하여 차륜을 방호하	• 궤도 측면에 설치하여 차륜을 방호하는

		는 구조물 방식(Type 2)의 일탈 방호 시설은 선로 중심부로부터 떨어진 거리와 제원은 다음을 고려하여 결정한다. 가. 차륜과의 충돌하중/에너지 나. 충돌 후 차륜 구속 다. 충돌 후 차량 전도 라. 차륜 및 대차의 차축 제원 마. 레일 체결장치와 험프와의 간섭	구조물 방식(Type 2)의 일탈 방호 시설에 대한 위치와 제원 결정을 위한 검토 항목 신설
		③ 궤도 측면에 설치하여 차축을 방호하는 구조물 방식(Type 3)의 일탈 방호 시설은 선로 중심부로부터 떨어진 거리와 제원은 다음을 고려하여 결정한다. 가. 차륜과의 충돌하중/에너지 나. 충돌 후 차량 구속 및 전도 다. 탈선 내측 레일과 차륜의 1차 충돌 허용 여부 라. 대차의 차축 제원	• 궤도 측면에 설치하여 차축을 방호하는 구조물 방식(Type 3)의 일탈 방호 시설에 대한 위치와 제원 결정을 위한 검토 항목 신설
	② 점검통로의 연석기능으로 충분한 폭원 확보		• 삭제
		(2) 충돌 하중 및 에너지 일탈 방호 시설의 설계를 위한 충돌 하중과 충돌 에너지는 방호 시설의 재료와 위치 및 제원, 선로 조건, 열차 종류 및 속도 등을 고려하여 산정한다.	• 충돌하중과 에너지의 산정조건을 신설

		(3) 성능 검증 일탈 방호 시설의 성능은 탈선/충돌 실험 또는 입증된 해석모델을 사용한 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 검증되어야 한다.	• 일탈 방호 시설의 성능 검증 신설
	(2) 호남고속철도에서의 탈선방호벽 설계 예	삭제	• 현 지침에서 제시하고 있는 측면 구조물 방식(Type 3)을 적용한 설계하중 150 kN은 방호 성능을 충분히 만족시킨다고 볼 수 없으므로 예를 삭제함. • 현 조건에서의 충돌 하중은 탈선 조건에 따라 600 ~ 4,000 kN임. (별첨 자료, KR C-02060 개정 연구 결과 보고서, 제2장 2.3절 9~13페이지)
		(4) 궤간 내에 설치하여 차륜을 방호하는 구조물 방식(Type 1)의 콘크리트 궤도용 일탈 방호 시설 설계 예	• KTX 차량을 대상으로 한 일탈 방호 시설(Type 1)의 설계 예를 신설
		① 제원 * KTX 대차 하부에 존재하는 Axle Gear Reduction Unit과 Motor Reduction Unit의 탈선 후 기하조건을 고려한 콘크리트 궤도 TCL 상면과의 순 간격은 145mm임. 일탈 방호 시설 높이 = 145 mm - 여유분 5 mm = 140 mm	• 별첨 자료, KR C-02060 개정 연구 결과 보고서, 제3장 3.1절 14~17페이지

		* 선로 중심으로부터 외측 콘크리트 험프까지의 거리는 1,105 mm이고 차륜 내측까지의 거리는 677.5 mm임. 탈선 후 차륜이 외측으로 이동하여 험프와 간섭되지 않는 횡이동 거리는 = 1,105 - 677.5 mm = 427.5 mm 이때 산출되는 궤간 내 방호 시설의 최대 설치가능 폭은 = 2×(677.5-427.5) mm = 500 mm	
		② 충돌 하중 및 에너지 * KTX 차량, R3500, 속도 300 km/h, 콘크리트 궤도 등의 조건을 고려하고 방호 시설의 폭에 따른 탈선 후 일탈 방호 시설에 차륜이 충돌하는 하중과 일탈 방호 시설의 내부 에너지 산정 * 최소 0.1mm < 폭 ≦ 최대 500mm 165.6 kN ≦ 충돌하중 < 208.8 kN 3.3 kJ ≦ 충돌 에너지 < 10.9 kJ	• 별첨 자료, KR C-02060 개정 연구 결과 보고서, 제3장 3.3절 23~34페이지
		③ 일탈 방호 시설 * 최소 충돌 하중 165.6 kN과 최소 충돌 에너지 3.3 kJ에 대한 내하 성능과 탈선 열차를 의도된 영역(궤간 내)안으로의 구속 성능을 만족시키는 Type1에 해당하는 일탈 방호 시설(철근 콘크리트 구조)은 다음과 같다.	• 별첨 자료, KR C-02060 개정 연구 결과 보고서, 제3장 3.4절 35~37페이지

		 1355 427.5 677.5 677.5 135 427.5 140 427.5 260.5 417 688 1105 1105 677.5 427.5 677.5 250 427.5 140 250 250 500	

3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

가. 목표 달성도

(1) 1차년도 1세부

<table>
<tr><th rowspan="3">구분</th><th rowspan="3">핵심
성과목표
(과제명)</th><th rowspan="3">단위 성과목표</th><th rowspan="3" colspan="2">성과지표</th><th colspan="4">성과검증기준</th><th rowspan="3">가중치</th></tr>
<tr><th colspan="2">목표수준</th><th rowspan="2">측정방법</th><th rowspan="2">검증방법</th></tr>
<tr><th>목표치</th><th>달성치</th></tr>
<tr><td rowspan="6">성과
질적
목표
점검</td><td rowspan="6">1세부-
철도교량
열차일탈
방호시설
개발 및
검증</td><td rowspan="2">기존철도교량
일탈방지방호시설
개량기술개발</td><td>①</td><td>개념설계(안) 및 기술사양</td><td>1식</td><td>1식</td><td>기술사양 설정의
적합성, 개념설계의
타당성</td><td>기술사양서 및
개념설계도</td><td>11</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td>1식</td><td>1식</td><td>적용재료의 타당성</td><td>적용재료
(안)</td><td>2</td></tr>
<tr><td rowspan="2">기존 철도교량
접속구간
일탈방지방호시설
개량기술개발</td><td>①</td><td>접속구간 횡방향
안전성검토</td><td>1식</td><td>1식</td><td>기술검토 보고서
검토결과</td><td>기술검토 보고서</td><td>2</td></tr>
<tr><td>②</td><td>개념설계(안) 및 기술사양</td><td>1식</td><td>1식</td><td>기술사양 설정의
적합성, 개념설계의
타당성</td><td>기술사양서 및
개념설계도</td><td>5</td></tr>
<tr><td colspan="8">질적목표 종합점수 = Σ (성과목표별 달성평점 ×가중치)</td><td>20</td></tr>
<tr><td colspan="9">환산점수</td></tr>
<tr><td rowspan="4">양적지
표점검</td><td></td><td colspan="2">목표</td><td>목표건수</td><td>달성건수</td><td>증빙</td><td>인정건수</td><td>달성률</td><td>가중치</td></tr>
<tr><td>기존 철도교량
일탈방호시설
개량기술개발
/
기존 철도교량
접속부 궤도
지지구조일탈
방호시설 개발</td><td colspan="2">개념설계
도면 및
사양서 개발</td><td>1식</td><td>2식</td><td>설계도서
사양서</td><td>2식</td><td>200</td><td>100</td></tr>
<tr><td colspan="8">양적목표 종합점수 = Σ (성과목표별 달성평점 ×가중치)</td><td>100</td></tr>
<tr><td colspan="9">환산점수</td></tr>
</table>

(2) 2차년도 1세부

<table>
<tr><th rowspan="3">구분</th><th rowspan="3">핵심성과목표</th><th colspan="2" rowspan="3">단위 성과목표</th><th colspan="2" rowspan="3">성과지표</th><th colspan="4">성과검증기준</th><th rowspan="3">가중치
(20점)</th></tr>
<tr><th colspan="2">목표수준</th><th rowspan="2">측정방법</th><th rowspan="2">검증
방법</th></tr>
<tr><th>목표치</th><th>달성치</th></tr>
<tr><td rowspan="5">성과
질적
목표
점검</td><td rowspan="3">철도교량상
탈선된
열차의
주행을
의도된
영역(선로
영역) 내로
유도하기
위한 궤간 내
일탈방호
시설 개발</td><td rowspan="3">A-2</td><td rowspan="3">궤간 내
일탈방호시설
기본설계 및 제작</td><td>①</td><td>DCP 제원도출
및 궤간 내
DCP 적용에
따른 구조
안전성 검토</td><td>100%</td><td>100%</td><td>외부 전문가
자문을 통한
해석 및
기술검토의
적합성 및
검토항목의
적정성 확인</td><td>보고서,
학술발표</td><td>5</td></tr>
<tr><td>②</td><td>실내시험을 통한
성능도출</td><td>100%</td><td>100%</td><td>외부 전문가
자문을 통한
시험결과
도출의 타당성
확인</td><td>보고서,
학술지
게재
논문</td><td>5</td></tr>
<tr><td>③</td><td>초도시작품
제작 및
시험시공</td><td>100%</td><td>100%</td><td>외부 전문가
자문을 통한
기본설계 및
시작품과
시공적정성</td><td>보고서,
기본설계도,
시작품
(프로토타입)</td><td>10</td></tr>
<tr><td colspan="8">질적목표 종합점수 = ∑ (성과목표별 달성평점 ×가중치)</td><td>20</td></tr>
<tr><td colspan="9">환산점수</td></tr>
<tr><td rowspan="5">양적
지표
점검</td><td colspan="3" rowspan="4">사업연계지표</td><td>목표</td><td>목표
건수</td><td>달성
건수</td><td>증빙</td><td>인정
건수</td><td>달성율</td><td>가중치
(100점)</td></tr>
<tr><td>국내 학술지 게재 논문</td><td>1</td><td>2</td><td>국내외
등재지
게재논문</td><td>2</td><td>200</td><td>30</td></tr>
<tr><td>특허출원</td><td>1</td><td>2</td><td>특허출원</td><td>2</td><td>200</td><td>30</td></tr>
<tr><td>초도시작품
제작 및 시험시공</td><td>1</td><td>1</td><td>제작 및
시공
(증빙보고서)</td><td>1</td><td>100</td><td>40</td></tr>
<tr><td colspan="8">양적목표 종합점수 = ∑ (성과목표별 달성율 ×가중치)</td><td>100</td></tr>
<tr><td colspan="9">환산점수</td></tr>
</table>

(3) 3차년도 1세부

구분	핵심성과목표	단위 성과목표		성과지표		성과검증기준				가중치 (총 20점)
						목표수준		측정방법	검증 방법	
						목표치	달성치			
성과 질적 목표 점검	철도교량 상 탈선된 열차의 주행을 의도된 영역 (선로영역) 내로 유도하기 위한 궤간 내 일탈방호시설 개발	A-3	궤간 내 일탈 방호 시설 상세 설계 및 제작	①	일탈방호 시설의 매개변수 해석 및 인터페이스 (궤도, 교량) 성능	$\frac{\text{측정 값}}{\text{목표성능값}} \times 100$ ≥100%	$\frac{\text{측정 값}}{\text{목표성능값}} \times 100$ ≥100%	매개변수 해석, 인터페이스 안정성 검토로 제시되는 값 (2세부 연구결과로 제시되는 충돌설계 하중 대비)	보고서. 학술발표	4
				②	실내시험을 통한 성능 도출	$\frac{\text{측정 값}}{\text{목표성능값}} \times 100$ ≥100%	$\frac{\text{측정 값}}{\text{목표성능값}} \times 100$ ≥100%	강도시험, 충돌방호시험, 인터페이스 시험 결과 (2세부 연구결과로 제시되는 충돌설계하중 대비)	보고서, 학술지 게재논문	4
				③	현장 시공속도	20m/4hr	20m/4hr	시험선로 현장 시공을 통한 시공속도 측정	보고서, 학술발표	4
				④	시제품의 품질 (철근인장 응력, 콘크리트 공시체압축강도, 앵커인발강도)	시제품의 품질확보 ≥100%	시제품의 품질확보 ≥100%	시제품 품질관련 각 지표에 대한 기준시험수행	보고서, 상세 설계도, 시제품	8
	질적목표 종합점수 = ∑ (성과목표별 달성평점 ×가중치)									20
	환산점수									

구분		목표	목표 건수	달성 건수	증빙	인정건수	달성율	가중치 (총100점)
양적 지표 점검	사업연계지표	학술지 게재 논문(비SCI)	1	2	KCI 등재지 게재논문	2	200	15
		특허출원	1	1	출원명세서	1	100	15
		시제품	1	1	시제품	1	100	25
		일탈방호시설 시험시공	1	1	현장시공	1	100	25
	양적목표 종합점수 = ∑ (성과목표별 달성율 ×가중치)							100
	환산점수							

(4) 4차년도 1세부

구분	핵심성과목표	단위 성과목표		성과지표		성과검증기준				가중치 (총 20점)
						목표수준		측정방법	검증 방법	
						목표치	달성치			
성과 질적 목표 점검	철도교량 상 탈선된 열차의 주행을 의도된 영역 (선로영역) 내로 유도하기 위한 궤간 내 일탈방호시설 개발	A-4	궤간 내 일탈방호 시설 설계/시공/유지 보수 기술 개발	①	일탈방호 시설의 현장성능 평가	$\frac{\text{측정 값}}{\text{목표성능값}} \times 100 \geq 100\%$		현장 실대형 실험을 통한 측정값 (2세부 연구결과로 제시되는 최종 충돌설계하중 대비)	보고서, 학술지	7
				②	궤간 내 일탈방호 시설 설계도서 및 시방서 제작	100%		20m/4hr 시공속도로 시공 가능한 DCP 설계도서와 시방서 제작여부	설계도서	6
				③	유지보수 기법 및 매뉴얼 개발	· 대손상(전면교체) : 2hr/TCL1개 · 소손상(균열보수) : 1hr/TCL1개		시험선로에서 관련 기법을 제시하고 이를 매뉴얼화	기법 매뉴얼	7
	질적목표 종합점수 = ∑ (성과목표별 달성평점 ×가중치)									20
	환산점수									

양적 지표 점검	사업연계지표	목표	목표 건수	달성 건수	증빙	인정건수	달성율	가중치 (총 100점)
		학술지 게재 논문(비SCI)	1		KCI 등재지 게재논문			10
		특허출원	1		출원명세서			10
		설계도서	1		도면, 구조계산서			20
		시방서	1		시방서			20
		현장시험검증	1		현장검증			20
		기술이전	1		기술이전			20
	양적목표 종합점수 = ∑ (성과목표별 달성율 ×가중치)							100
	환산점수							

(5) 1차년도 2세부

<table>
<tr><td rowspan="7">성과
질적
목표
점검</td><td rowspan="2">핵심성과목표</td><td colspan="2" rowspan="2">단위 성과목표</td><td colspan="2" rowspan="2">성과지표</td><td colspan="4">성과검증기준</td><td rowspan="2">가중치
(20점)</td><td rowspan="2">달성
평점
(1~5)</td></tr>
<tr><td colspan="2">목표수준</td><td rowspan="2">측정방법</td><td rowspan="2">검증
방법</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td>목표치</td><td>달성치</td></tr>
<tr><td rowspan="4">철도차량
일탈방호
시설의
성능기준 및
평가기술 개발</td><td rowspan="4">A-1</td><td rowspan="4">일탈방호시설에 대한
성능기준 및 평가기술
개발</td><td>①</td><td>탈선/충돌 실험 인프라 구축 및 기법의 적정성</td><td>100%</td><td>100%</td><td>외부 전문가 자문을 통한 실대형 탈선/충돌 실험 인프라 구축 및 기법(계측, 실험방법 등)의 적정성 확인</td><td>보고서,
학술발표</td><td>8</td><td>8</td></tr>
<tr><td>②</td><td>탈선/충돌 시뮬레이션 기법의 적정성</td><td>100%</td><td>100%</td><td>외부 전문가 자문을 통한 열차 탈선/충돌 시뮬레이션(모델링, 검증방법 등) 기법의 적정성 확인</td><td>보고서,
학술지
게재논문</td><td>8</td><td>8</td></tr>
<tr><td>③</td><td>방호시설 등급화를 위한 위험도 기반 신뢰성 분석 방법론의 타당성</td><td>100%</td><td>100%</td><td>외부 전문가 자문을 통해 일탈방호시설 등급화를 위한 기초자료 분석, 위험도 기반 신뢰성분석 방법론에 대한 타당성 확인</td><td>보고서,
학술발표</td><td>2</td><td>2</td></tr>
<tr><td>④</td><td>실험 차량 모델링 및 탈선모사 연구의 타당성</td><td>100%</td><td>100%</td><td>외부 전문가 자문을 통해 시뮬레이션을 위한 차량모델 동적거동 검증, 탈선모사 및 유도장치 설계에 대한 타당성 확인</td><td>보고서,
학술발표</td><td>2</td><td>2</td></tr>
<tr><td colspan="8">질적목표 종합점수 = ∑ (성과목표별 달성평점 ×가중치)</td><td>20</td><td>20</td></tr>
<tr><td colspan="9">환산점수</td><td>5</td></tr>
<tr><td rowspan="4">양적
지표
점검</td><td rowspan="2" colspan="2">사업연계지표</td><td colspan="2">목표</td><td>목표
건수</td><td>달성
건수</td><td>증빙</td><td>인정
건수</td><td>달성율</td><td>가중치
(100점)</td><td>달성
평점</td></tr>
<tr><td colspan="2">국내 학술지 게재 논문</td><td>1</td><td>1</td><td>논문 및
게재예정증명</td><td>1</td><td>100</td><td>100</td><td>100</td></tr>
<tr><td colspan="8">양적목표 종합점수 = ∑ (성과목표별 달성율 ×가중치)</td><td>100</td><td>100</td></tr>
<tr><td colspan="9">환산점수</td><td>5</td></tr>
</table>

(6) 2차년도 2세부

	핵심성과목표	단위 성과목표		성과지표		성과검증기준				가중치 (20점)	달성 평점 (1~5)
						목표수준		측정방법	검증 방법		
						목표치	달성치				
성과 질적 목표 점검	탈선사고 위험도 등급화 및 궤간 내 일탈방호시설의 소요 방호성능 적정성 평가기법 개발	A-2	탈선/충돌 실험 및 시뮬레이션을 통한 탈선 후 거동 연구	①	탈선/충돌 실험 기법 적정성	100%	100%	외부 전문가 자문을 통한 실대형 탈선 후 거동 실험 기법 (실험수행, 결과, 분석 등)의 적정성 확인	보고서, 학술발표	7	7
				②	탈선/충돌 시뮬레이션 기법 적정성	100%	100%	외부 전문가 자문을 통한 열차 탈선/충돌 시뮬레이션 (실험결과와의 검증, 해석결과 분석 등) 기법의 적정성 확인	보고서, 학술지 게재논문	7	7
				③	일탈사고 위험도 평가 및 방호시설 등급화의 타당성	100%	100%	외부 전문가 자문을 통해 일탈사고 위험도 평가, 방호시설의 위험도 등급화에 대한 타당성 확인	보고서, 학술지 게재논문	3	3
				④	시뮬레이션 차량 모델 및 탈선 유도·모사의 타당성	100%	100%	외부 전문가 자문을 통한 실험용 대차 모델 및 탈선 유도·모사의 타당성 확인	보고서, 학술발표	3	3
	질적목표 종합점수 = ∑ (성과목표별 달성평점 ×가중치)									20	20
	환산점수										

양적 지표 점검	사업연계지표	목표	목표 건수	달성 건수	증빙	인정 건수	달성율	가중치 (100점)	달성 평점
		국내 학술지 게재 논문	1	1	국내 등재지 게재논문	1	100%	30	30
		국외 학술지 게재 논문	1	1	국외 학술지 게재논문	1	100%	60	60
		홍보(세미나 개최)	1	1	세미나 개최	1	100%	10	10
	양적목표 종합점수 = ∑ (성과목표별 달성율 ×가중치)							100	100
	환산점수								

(7) 3차년도 2세부

	핵심성과목표	단위 성과목표		성과지표		성과검증기준				가중치 (20점)	달성 평점 (1~5)
						목표수준		측정방법	검증 방법		
						목표치	달성치				
성과 질적 목표 점검	탈선사고 위험도 등급화 및 궤간 내 일탈방호시설의 소요 방호성능 적정성 평가기법 개발	A-3	탈선 후 거동 연구 및 궤간 내 일탈방호시설 성능의 적정성 평가	①	탈선/충돌 실험 기법 적정성	100%	100%	외부 전문가 자문을 통한 충돌거동 및 충돌하중 규명/검증 실험의 적정성 확인	보고서, 학술지 게재논문	7	7
				②	탈선/충돌 시뮬레이션 기법 적정성	100%	100%	외부 전문가 자문을 통한 열차 탈선/충돌 시뮬레이션 (실험결과와의 검증, 해석결과 분석 등) 기법의 적정성 확인	보고서, 학술발표	7	7
				③	일탈방호시설 성능 등급화 모델의 타당성	100%	100%	외부 전문가 자문을 통해 일탈방호시설의 성능 등급화 모델에 대한 타당성 확인	보고서, 학술발표	3	3
				④	탈선/충돌 시뮬레이션을 위한 단순화차량모델 도출의 타당성	100%	100%	외부 전문가 자문을 통한 도출된 단순화차량모델의 타당성 확인	보고서, 학술지 게재논문	3	3
	질적목표 종합점수 = ∑ (성과목표별 달성평점 ×가중치)									20	20
	환산점수										

		목표	목표 건수	달성 건수	증빙	인정 건수	달성율	가중치 (100점)	달성 평점
양적 지표 점검	사업연계지표	학술지 게재 논문(SCI)	1	1	SCI급 저널 게재논문	1	100%	50	50
		학술지 게재 논문(비SCI)	1	2	KCI 등재지 게재논문	2	200%	25	25
		설계기준 제안	1	1	철도설계지침 및 편람 개정 (안)	1	100%	25	25
	양적목표 종합점수 = ∑ (성과목표별 달성율 ×가중치)							100	100
	환산점수								

(8) 4차년도 2세부

	핵심성과목표	단위 성과목표		성과지표	성과검증기준				가중치 (20점)	달성 평점 (1~5)
					목표수준		측정방법	검증 방법		
					목표치	달성치				
성과 질적 목표 점검	탈선사고 위험도 등급화 및 궤간 내 일탈방호시설의 소요 방호성능 적정성 평가기법 개발	A-4	궤간 내 일탈방호시설 성능의 적정성 평가 및 설계지침 개발	① 탈선/충돌 실험 기법 적정성	100%	100%	외부 전문가 자문을 통한 강도성능/ 차량안전성능 평가 실험의 적정성 확인	보고서, 학술발표	5	5
				② 탈선/충돌 시뮬레이션 기법 적정성	100%	100%	외부 전문가 자문을 통한 열차 탈선/충돌 시뮬레이션(성능 적정성 평가) 기법의 적정성 확인	보고서, 학술지 게재논문	5	5
				③ 일탈사고 사고위험도 등급화 및 적정 충격도 모델을 활용한 일탈방호시설 적용 방안 제시	100%	100%	외부 전문가 자문을 통해 등급별 일탈방호시설의 적용 방안에 대한 타당성 확인	보고서, 학술지 게재논문	3	3
				④ 탈선/충돌 시뮬레이션을 위한 단순화차량모델 및 해석의 타당성	100%	100%	외부 전문가 자문을 통한 개발된 단순화차량모델 및 이를 통한 해석결과의 타당성 확인	보고서, 학술지 게재논문	3	3
				⑤ 일탈방호시설에 대한 설계지침 개발 (철도설계지침 및 편람 개정)	100%	100%	외부 전문가 자문을 통해 방호시설 관련 설계지침에 대한 적정성 확인	보고서, 설계지침	4	4
	질적목표 종합점수 = ∑ (성과목표별 달성평점 ×가중치)								20	20
	환산점수									

		목표	목표 건수	달성 건수	증빙	인정 건수	달성율	가중치 (100점)	달성 평점
양적 지표 점검	사업연계지표	학술지 게재 논문(SCI)	2	2	SCI급 저널 게재논문	2	100%	50	50
		학술지 게재 논문(비SCI)	1	1	KCI 등재지 게재논문	1	100%	10	10
		설계기준 반영	1	1	철도설계지침 및 편람 개정	1	100%	30	30
		인력양성	1	3	관련 학위논문	3	300%	10	10
	양적목표 종합점수 = ∑ (성과목표별 달성율 ×가중치)							100	100
	환산점수								

나. 양적성과 달성

(1) 1세부

구분	계획 성과	달성성과
1차년도	개념설계 도면 및 사양서 개발 1식	개념설계 도면 및 사양서 개발 2식(200%)
2차년도	논문 1건	논문 2건
	특허 1건	특허 2건
	시작품 제작 및 시험시공 1건	시작품 제작 및 시험시공 1건
3차년도	논문 2건	논문 2건
	특허 1건	특허 1건
	시제품 1건	시제품 1건
	시험시공 1건	시험시공 1건
4차년도	논문 1건	논문 1건
	특허 1건	특허 1건
	설계도서 1건	설계도서 1건
	시방서 1건	시방서 1건
	현장시험검증1건	현장시험검증 2건
	기술이전 1건	기술이전 1건

(2) 2세부

구분	계획 성과	달성성과
1차년도	국내 학술지 게재 논문 1건	국내 학술지 게재 논문 1건
2차년도	국내 학술지 게재 논문 1건	국내 학술지 게재 논문 1건
	국외 학술지 게재 논문 1건	국외 학술지 게재 논문 1건
	홍보(세미나 개최) 1건	홍보(세미나 개최) 1건
3차년도	학술지 게재 논문(SCI) 1건	학술지 게재 논문(SCI) 1건
	학술지 게재 논문(비SCI) 1건	학술지 게재 논문(비SCI) 2건
	설계기준 제안 1건	설계기준 제안 1건
4차년도	학술지 게재 논문(SCI) 2건	학술지 게재 논문(SCI) 2건
	학술지 게재 논문(비SCI) 1건	학술지 게재 논문(비SCI) 1건
	설계기준 반영 1건	설계기준 반영 1건
	인력양성 1건	충남대 박사 2명, 서울과기대 1명

다. 목표 미달성 시 원인(사유) 및 차후대책(후속연구의 필요성 등)

라. 관련 분야 기여도

(1) 연구 개발 성과의 활용 방안

▪ 탈선열차의 방호 메커니즘 및 탈선 후 거동 규명은 철도기준의 선진화 모범 사례로 적극 활용될 수 있으며, 탈선열차와 시설물과의 충돌 시뮬레이션 기법 및 검증 기술은 다양한 시설조건(교량, 토공, 인접교통 등)에 대한 탈선 안전성 평가에 활용

▪ 본 연구에 의해 구축된 ‘철도안전시설 성능시험장’에서는 열차의 탈선 후 충돌거동 규명에 대한 연구수행 뿐만 아니라, 개발되는 Product의 테스트베드로 활용됨에 따라 개발 시제품 성능의 적정성을 평가하여 실용화에 기여

▪ 탈선으로 인한 열차의 선로 일탈로 인한 대형 2차 피해를 예방하기 위하여 일반철도 및 고속철도의 선로, 교량, 곡선구간, 접속구간 등에서 인명 및 재산상의 손실을 방지할 수 있는 일탈방호의 기술적 대안을 제시

▪‘기존 철도교량 일탈방호시설 개량기술’은 운행선 교량 상 차단시간내 급속시공이 가능하여 열차운행에 영향을 주지 않으며, 지진, 강풍, 인적실수에 의한 사고를 최소화를 할 수 있는 일탈방호성능 확보가 필요한 개소에 최단시간내 시설개량 솔루션을 제공

- 예1) 기존 철도교량 구간의 일탈방호성능 확보를 위한 급속시공대책

- 예2) 지진발생 가능성이 높은 활성단층 인근의 고속열차 구간 등 급속시공이 가능한 일탈 방호대책으로 제시하여 안정성 확보

- 예3) 향후 400km/h급 고속철도, 연약침하구간의 철도운행안전 문제제기 시 RISK가 높은 구간에 비교적 저비용으로 안정성 확보대책 제시

▪‘평택～오송 구간 고속철도 2복선화’ 추진계획(47.5km, 29,419억원, 3차 국가철도망구축계획) 등에 본 연구 최종성과물인 일탈방호시설에 대한 설계지침 및 일탈방호 성능의 적정성 평가기법을 통해 검증받은 궤간 내 일탈방호시설 반영 추진

- ‘19～‘20 기본 및 실시설계 (본 연구 4차년도)

- ‘21～‘25 착공 및 완공 (‘21 본 연구 종료)

▪ 기술실시 후 상용화 추진을 하여 200 km/h 이상 준고속 철도건설 구간(원주～강릉, 원주～제천, 서해선, 영천～신경주, 도담～영천 등)에 일탈방호시설에 대한 설계지침 및 일탈방호 성능의 적정성 평가기법을 통해 검증받은 궤간 내 적용 예상. 철도 안전 인프라 확충 및 안전산업 활성화 정책에 따른 적용확대 기대

(2) 기대효과

(가) 기술적 측면

□ 국제적 공백기술 확보에 따른 기술선도

○ 특히, 효과 및 성능검증 기술은 전 세계적으로 전무

○ 탈선/충돌 실험인프라 구축으로 시설분야와 차량분야, 그리고 인간공학분야의 융합연구체계 구축

→ 실대형 실험인프라 구축 및 전문연구인력 양성에 따른 기술 선도

→ 일탈방호시설 설계지침/성능 적정성 평가기법(원천기술) 개발 및 검증인프라 구축

(나) 경제적·산업적 측면

□ 열차의 안전성능을 향상시켜 편안하고 안전한 교통시스템을 제공할 수 있으며, 안전성 및 경제성을 확보함과 동시에 신형식 궤도 기술 개발 및 실용화를 통한 철도 교통시스템의 국제 경쟁력 확보에 기여할 수 있음.

□ 탈선 후 열차의 거동을 예측하고 시설과의 충돌거동/하중을 평가할 수 있는 해석적 및 실험적 연구를 수행하여 그 결과물을 근거로 탈선방호성능에 관한 설계지침을 개정하는 것은 설계기준 선진화에 크게 기여할 것임.

□ 철도인프라 방호기술을 현업에 즉시 적용할 수 있는 급속 일탈방호성능 확보가 가능한 기반기술 확보와 관련 방호시설의 설계, 제작, 급속유지보수 기술연구를 통하여 열차지체시간 최소화 등의 실질적인 기술 확보가 가능함.

□ 철도의 고속화 등 급격한 기술진보와 동시에 철도시설의 노후화도 동시에 진행되면서 열차탈선, 선로이탈에 의한 2차 피해 확대가 예상됨에 따라 대형인명사고를 예방할 수 있는 안전한 철도인프라 기술을 확보하며, 연구 성과로 도출될 것으로 예상되는 실대형 탈선/충돌 실험 및 시뮬레이션을 통한 성능의 적정성 평가기법, 설계지침, 궤간 내 일탈방호시설 기술은 전 세계적으로 증가 추세인 고속철도 인프라 개발에 따른 2015년 약 63.6조원, 2016년 약 66.1조원의 세계 궤도시장에서 경쟁력을 발휘할 수 있을 것으로 판단됨.

○ 북미의 Class 1 선로는 2020년까지 매년 약 11조원을 투자하여 개량

○ 중국은 2020년까지 고속철도 건설에 약 253조원 투자

○ 전 세계적으로 2022년까지 약 729조원이 유럽과 아시아를 중심으로 고속철도에 투자될 것이며 고속철도 연장은 약 74,896 km

(다) 사회적 측면

□ “철도안전산업 활성화” 목표달성을 위한 추진과제로 ‘안전투자 확대를 통한 안전산업 수요창출’, ‘제도개선을 통한 안전산업 선진화’를 도모할 수 있으며, “철도안전기

술 개발” 목표달성을 위한 추진과제로 ‘철도안전 원천기술 개발 및 검증인프라 확충’, ‘철도안전 고도화를 위한 R&D확대’ 방향에 부합하여 철도안전성능 향상 및 대형철도사고 발생 Zero화 목표에 일조하고 국민이 안심하고 신뢰하는 인명중시 철도안전 구현에 이바지 할 수 있음.

(라) 연구성과의 파급·기대효과

□ 국제적 공백기술 확보에 따른 기술자립 및 선도

자연재해 및 인적·사회적 재난에 의한 피해 최소화 도모

철도 인프라 안전산업 수요창출 및 안전산업 선진화 도모

철도안전 원천기술 개발 및 검증인프라 구축

○ 자체적 철도시스템 안전방재 기술 확보 및 국제 경쟁력 확보에 기여

○ 다양한 시설조건(교량, 토공, 접속부 등)에 대한 탈선 안전성 평가에 활용

○ 철도기준의 선진화 모범 사례로 적극 활용

○ 실대형 실험인프라 구축 및 전문연구인력 양성에 따른 기술 선도

○ 실대형 탈선/충돌 실험인프라 구축으로 시설분야와 차량분야, 그리고 인간공학분야의 융합연구체계 구축

□ 급성장하면서 지속적인 투자가 이루어지고 있는 세계 철도시장에서 경쟁력을 발휘할 수 있을 것으로 판단됨.

→ 중국의 고속철도 연장은 2030년까지 약 25,631km

→ 중국의 철도연장은 2020년이 되면 약 120,000km로 러시아 추월

→ 북미의 Class 1 선로는 2020년까지 매년 약 11조원을 투자하여 개량

→ 중국은 2020년가지 고속철도 건설에 약 253조원 투자

※ Frost & Sullivan, Rail Outlook Study 2013-2022 (2013)

□ 중국 고속철도 연장 2030년까지 약 25,631km 계획

→ 약 5.895km(6.8조원)의 사업가치 창출 가능

□ 전 세계 고속철도 연장 2022년까지 약 74,896km 추정

→ 약 17,226km (20조원)의 잠재적 사업가치 추정

4. 연구개발성과의 활용 계획 등

가. 활용계획

(1) 철도교량 일탈방호시설에 대한 기반 연구 자료

‘철도 일탈방호 시설기술’은 관련 연구가 없어서 탈선 후 충돌현상 규명과 이로 인한 피해발생을 예측하기 어려웠음. 그러나 관련 연구분야의 기반연구를 위한 연구절차를 정립하고 충돌과 구조물의 관련 현상을 규명함.

이 연구를 기반으로 하여 방호해석기법과 시험평가기법을 개발하여 제시하였고 방호를 위한 일탈방호시설의 설계, 시공, 성능평가, 유지보수 전반에 대한 핵심기술 확보하고 시설, 차량, 신호분야 등 인터페이스에 대한 검토와 향후 철도방호 기술분야의 기반을 구축함.

(2) 철도교량 일탈방호시설 제품 개발

‘철도 일탈방호 시설기술’은 운행선 교량 상에 차단 시간내 급속시공이 가능하여 열차 운행에 영향을 주지 않으며, 지진, 강풍, 인적실수에 의한 사고를 최소화를 할 수 있는 일탈방호성능 확보가 필요한 개소에 시설개량 솔루션을 제공할 수 있게 되었음.

본 연구에서는 고속철도 교량에서 주행선로를 일탈하여 열차가 낙교 또는 반대편 선로 진입을 최소화 할 수 있는 시설을 열차 차단없이 급속 조립시공이 가능한 방호구조와 시공기술을 개발함. 이는 현행 고속철도 방호벽의 전면적인 개선(충돌하중 150kN→1000kN으로 벽체추가시공) 없이도 탈선에 대한 2차사고를 최소화가 가능함

개발기술은 프리캐스트(Precast Concrete, PC) 패널을 구조를 기존철도 콘크리트 궤도에 앵커링하여 부착 급속시공하는 형식으로서 1일 20m 이상의 시공이 가능한 기술임. 향후 노후화 시설물, 곡선구간, 지진, 강풍 발생구간과 인적오류에 의한 사고를 대비하면서 사고피해를 최소화 할 수 있는 시설 개량 솔루션임.

일본의 경우 신칸센 전 노선으로 방호구조설치를 확대하고 있는 실정임. 일본,네덜란드,홍콩 설치된 DCP와 다르게 현장조립시공이 가능한 창의적 방식이며 경제적(일본 1km당 100억원 소요)임.

시작품 성능개선, DCP 변경 상세설계, 최종시작품 제작과 성능시험을 수행, 시공과 유지보수까지 많은 연구와 검증절차를 통해 철도시스템 안전방재 기술 확보 및 대국민 신뢰도 향상을 기대

‘평택~오송 구간 고속철도 2복선화’ 추진계획(제3차 국가철도망구축계획 민자사업 계획)에 따라 본 연구 최종성과물 반영 추진

200 km/h 이상 철도건설 구간 성과물 적용 노력 (원주~강릉, 원주~제천, 서해선, 영천~신경주, 도담~영천 등)

나. 추가연구필요성

탈선으로 인한 열차의 선로 일탈로 인한 대형 2차 피해를 예방하기 위하여 일반 및 고속철도의 선로, 교량, 곡선구간, 접속구간 등에서 인명, 재산상의 손실을 방지할 수 있는 일탈방호의 기술적 대안을 제시

향후 철도고속화, 철도도심지 통과 등 철도환경변화와 동시에 시설노후화도 진행되고 있어서 열차탈선, 선로이탈에 의한 2차 피해 확대가 예상됨. 이에 따른 대형인명사고를 예방할 수 있는 안전한 철도인프라 기술을 확보하며, 일탈방호를 겸하는 시설개발로 향후 안전방재분야의 해외시장 개척을 위한 기반을 구축할 것으로 판단.

열차의 안전성능을 향상시켜 편안하고 안전한 교통시스템을 제공할 수 있으며, 안전성 및 경제성을 확보함과 동시에 신형 방호시설의 국제 경쟁력 확보에 기여함.

붙임. 참고문헌

[1] 강윤석, et al. 철도 일탈방호시설 개념설계 및 기술사양. 대한토목학회지, 2017, 65.8: 24-31.

[2] 교량별 해체 폐기 비용(중앙대 건설산업기술연구소, 2001)

[3] 국토교통부, “차량방호 안전시설 실물충돌시험 업무편람”, 2015.

[4] 국토부. 도로안전시설 설치 및 관리지침 (차량방호안전시설편). 2014.

[5] 국토부. 도로안전시설 설치 및 관리지침 (차량방호안전시설편). 2014.

[6] 김기재, et al. 개별요소법을 이용한 도상자갈 침하 영향인자 평가. 대한토목학회논문집, 2016, 36.4: 715-722.

[7] 김민수, et al. ETA 및 FTA 를 이용한 철도 건널목사고 위험도 평가 모델 개발에 대한 연구. 한국철도학회 논문집, 2009, 12.6: 936-943.

[8] 김민수, et al. 철도건널목 사고 위험도-발생빈도 평가모델 개발. 한국안전학회지, 2009, 24.3: 96-101.

[9] 김석봉, 오경두, 백상호, 이준학, 박영준, 백종혁 (2013), “방호공학”, 육군사관학교 화랑대연구소

[10] 김종호, et al. 실대형 실험을 통한 주강대차의 탈선 후 거동 분석. 한국철도학회 논문집, 2018, 21.8: 815-829.

[11] 김지환, et al. 콘크리트 일탈방호시설의 구조성능에 관한 실험 연구. 2. 한국방재학회 논문집, 2019, 19: 37-43.

[12] 남성원. 풍압력을 받는 철도차량의 전복 안전에 관한 이론 해석. 한국철도학회 논문집, 2012, 15.6: 537-542.

[13] 도로비용 사고비용의 추계와 평가 (도로교통공단, 2016)

[14] 박주남, et al. 열차 충돌/탈선사고의 위험사건 정의 및 원인 분류. 한국철도학회 학술발표대회논문집, 2007, 12-17.

[15] 박찬우, et al. 철도 사상사고 위험도 평가 모델 개발에 관한 연구. 한국철도학회 논문집, 2009, 12.2: 190-198.

[16] 배현웅, et al. 국외 사례를 통한 DCP 개념 고찰. 한국철도학회 학술발표대회논문집, 2014, 1155-1159.

[17] 배현웅, et al. 열차 탈선 후 일탈방지벽과의 충돌해석. 한국철도학회 학술발표대회논문집, 2015, 1363-1367.

[18] 배현웅, et al. 열차 탈선피해 저감을 위한 DCP 개념. 한국강구조학회지, 2015, 27.2: 42-46.

[19] 배현웅, et al. 철도차량 일탈방호를 위한 시설 개발 및 성능기준 연구단 소개. 대한토목학회지, 2017, 65.8: 14-19.

[20] 송성태, et al. 경부고속철도건설사업 성과평가. 한국철도학회 학술발표대회논문집, 2012, 1149-1156.

[21] 송인호, et al. 일탈방호시설 (DCP) 설계를 위한 단순화 차량모델링 기법 연구. 한국철도학회 논문집, 2019, 22.7: 527-537.

[22] 신형진, et al. 철도사고 사고비용 산정에 관한 연구. 한국철도학회 학술발표대회논문집, 2010, 1913-1922.

[23] 심경석, et al. 차세대 고속열차 (HEMU-430X) 의 주행 안전에 따른 탈선평가. 한국철도학회 논문집, 2012, 15.4: 343-351.

[24] 안전지표 설명 및 데이터 출처 (한국철도공사, 2012)

[25] 엄범규, et al. 상사법칙을 적용한 KTX-산천의 1-5 축소대차 설계에 관한 연구. 한국철도학회 학술발표대회논문집, 2012, 1772-1777.

[26] 유원희, “대차 메카니즘 설계 최적화 분야”, 한국철도기술연구원, 철도시스템 기반기술연구 KRRI 연구 01-51.

[27] 이나현, et al. 가스건 충돌모형실험에 의한 철도 일탈방호시설물의 거동 평가. 한국콘크리트학회 학술대회 논문집, 2019, 31.1: 727-728.

[28] 이나현, et al. 재료형상에 따른 철도 일탈방호시설물 (DCP) 의 충돌해석 연구 결과 분석. 한국철도학회 학술발표대회논문집, 2018, 139-140.

[29] 이나현, et al. 충돌하중에 대한 철도 일탈방호시설물 (DCP) 의 충돌해석변수연구. 한국철도학회 학술발표대회논문집, 2018, 345-346.

[30] 이나현; 김지환; 강윤석. 열차 충돌하중에 대한 콘크리트 일탈방호시설물 (DCP) 의 해석적 거동 검토. 한국산학기술학회 논문지, 2018, 19.11: 604-613.

[31] 임정현. 교량의 선박충돌 설계하중에 대한 확률론적 산정 기법. 2013. PhD Thesis. 서울대학교 대학원.

[32] 전주환, 박부견, 권욱현(Vinay K. Ingle, John G. Proakis 원저), “MATLAB을 이용한 디지털 신호 처리”, 시그마프레스, 1998.

[33] 정상섬; 이광우; 고준영. 대변형 해석기법 (Coupled Eulerian-Lagrangian) 을 이용한 3 차원 토석류 거동분석. 한국지반공학회논문집, 2015, 31.12: 45-57.

[34] 철도건설선 고속화 실행계획 수립방안 연구 (한국교통연구원 외, 2008)

[35] 철도사고 위험도 분석 및 평가체계 구축 최종보고서(철도기술연구원, 2011)

[36] 철도통계연보 (국토교통부, 2017)

[37] 철도통계연보 (국토교통부, 2019)

[38] 충남대학교 (2016) “일탈방지방호 성능을 갖는 콘크리트 궤도 기술 개발 기획“충남대학교 (2016) “일탈방지방호 성능을 갖는 콘크리트 궤도 기술 개발 기획“

[39] 피지현; 오정호. 개별요소해석법을 이용한 지오그리드 격자 크기와 도상자갈재료 입도분포 상관관계 평가. 대한토목학회논문집, 2016, 36.1: 143-149.

[40] 한국 월성, 고리 원전 1호기 사고피해 모의실험

[41] 한국방재학회, “탑승자의 이론적 충돌속도와 충돌가속도 해석 방안 연구”, 2006. 12

[42] 현웅배, et al. Collision Behavior Analysis Between Derailed Train and Structure According to Collision Analysis Condition. Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation, 2017, 17.3: 45-54.

[43] ACCIDENT, Railroad. Safety Performance Report. Korea Transportation Safety Authority, 2016.

[44] ACT, Railway Safety. Ministry of Land, Infrastructures and Transport. Railway Safety Policy Division, 2015.

[45] AM (ALBRECHT MICHAEL) BIRK, et al. Development of a derailment accident computer simulation model. Transportation Development Centre, 1988.SOPER, David. The aerodynamics of a container freight train. Springer, 2016.

[46] American Association of State Highway and Transportation Officials (2009) "Manual for Assessing Safety Hardware", American Association of State Highway and Transportation Officials

[47] Annual Safety Performance Report (RSSB, 2011~2016)

[48] AUTHORITY, Korea Rail Network. Railway design guidelines and handbooks-Subsidiary and Safety Facilities of Main Lined. Korea Rail Network Authority, KR C-02060, 2013.

[49] BAE, H. U. Advanced design concept of derailment containment provisions using collision simulation after train derailment. A dissertation for the degree of Doctor of Philosophy, Department of Civil Engineering, Graduate School, Chungnam National University, South Korea, 2015.

[50] BAE, H. U. Advanced design concept of derailment containment provisions using collision simulation after train derailment. A dissertation for the degree of Doctor of Philosophy, Department of Civil Engineering, Graduate School, Chungnam National University, South Korea, 2015.

[51] BAE, H. U., et al. FE Analysis Model for Simulation of Collision Behavior of Derailed Train. In: Proceedings of the Spring Conference of the Korean Society for Railway. 2015.

[52] BAE, Hyun-Ung, et al. Impact force evaluation of the derailment containment wall for high-speed train through a collision simulation. Advances in Civil Engineering, 2018, 2018.

[53] BĂLAN, Gheorghe-Stelian; BĂLAN, Mariana. ECONOMIC AND FINANCIAL

CRISIS IMPACT ON RAIL SECTOR. Internal Auditing & Risk Management, 2010, 19.3.

[54] BARROT, J. Commission decision of 21 February 2008 concerning a technical specification for interoperability relating to the rolling stock sub-system of the trans-European high-speed rail system. Official J. Eur. Union L, 2008, 84.

[55] BEASON, W. L.; HIRSCH, T. J.; CAMPISE, W. L. Measurement of heavy vehicle impact forces and inertia properties. Final Report. 1989.

[56] BEASON, W. L.; HIRSCH, T. J.; CAMPISE, W. L. Measurement of heavy vehicle impact forces and inertia properties. Final Report. 1989.

[57] Beom-Gyu Eom, Byeong-Yeon Han, Bu-Byoung Kang, Hi sung Lee, “A Study on 1/5 Scaled Bogie Design of KTX-Sancheon using Similarity Laws” The Korean Society for Urban Railway , Journal of The Korean Society For Urban Railway, pp.1772-1777, 2012.5

[58] BROD, Daniel. Comprehensive Costs of Highway-Rail Grade Crossing Crashes. Transportation Research Board, 2013.

[59] BUTH, C. Eugene, et al. Collision loads on bridge piers: phase 2, report of guidelines for designing bridge piers and abutments for vehicle collisions. Texas Transportation Institute, 2011.

[60] CHOI, Se-Young; KOO, Jeong-Seo; YOU, Won-Hee. Development of a Theoretical Wheelset Model to Predict Wheel-Climbing Derailment Behaviors Caused by Rolling Stock Collision. Journal of the Korean Society for Railway, 2011, 14.3: 203-210.

[61] DNV Study - Final A1, A2, A3, A4 Report (DNV, 2011)

[62] EMORI, Richard I. Analytical approach to automobile collisions. SAE Technical Paper, 1968.

[63] EUROCODE, C. E. N. 1: Actions on structures, Part 2: Traffic loads on bridges. Brussels: European Standard EN, 1991, 2: 2003.

[64] EUROPEAN COMMISSION, et al. Impact assessment guidelines. SEC 2009 (92), 2009.

[65] EUROPEAN RAILWAY AGENCY (VALENCIENNES). Railway safety performance in the European Union. 2011.

[66] Guidance on Socio-Economic Analysis – Restrictions (European Chemicals Agency /ECHA – REACH, 2008)

[67] GUO, Lirong, et al. Study of the post-derailment safety measures on low-speed derailment tests. Vehicle System Dynamics, 2016, 54.7: 943-962.

[68] H.U. Bae, K.H. Min, Y.S. Kang, N.H. Lim (2017), "Test-field and Test-infra Construction for Derailment/Collision of Railway Train", The Magazine of the Korean Society of Civil Engineering, 65(8), pp. 20-23

[69] HAM, Yeong-Sik. 철도차량의 탈선 메커니즘. Railway Journal, 2010, 13.1: 18-23.

[70] HAMILTON, Booz Allen. Report on the Findings of: Current Practice and Effectiveness of Derailment Containment Provisions on High Speed Lines. 2004.

[71] HIGGINS, N. A., et al. COCO-2: a model to assess the economic impact of an accident. Health Protection Agency, 2008.

[72] HIRSCH, T. J., et al. Analysis and design of metrorail-railroad barrier system. Texas A&M University, 1989.

[73] HIRSCH, T. J., et al. Analysis and design of metrorail-railroad barrier system. Texas A&M University, 1989.

[74] KIM, Geo-Young; KOO, Jeong-Seo; KWON, Tae-Soo. Study on a 2-Dimensional Dynamic Modeling Technique to Analyze the Overriding Phenomena of Rollingstock. Journal of the Korean Society for Railway, 2011, 14.1: 11-18.

[75] KIM, Myung Su, et al. Theoretical cross-wind speed against rail vehicle derailment considering the cross-running wind of trains and the dynamic wheel-rail effects. Journal of Mechanical Science and Technology, 2016, 30.8: 3487-3498.

[76] KOO, J. S.; KIM, G. Y. Simulation Technology in the Train Crash Accidents. Transactions of KSAE, 2011, 33.11: 18-25.

[77] KOO, Jeong Seo; OH, Hyun Suk. A new derailment coefficient considering dynamic and geometrical effects of a single wheelset. Journal of Mechanical Science and Technology, 2014, 28.9: 3483-3498.

[78] KWON, Hyeok-Bin; YOU, Won-Hee; CHO, Tae-Hwan. Measurement of Aerodynamic Loads on Railway Vehicles Under Crosswind. Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, 2011, 35.1: 91-98.

[79] Layden, G. (2014). Development of crash wall design loads from theoretical train impact. 2014 AREMA Annual conference & exposition.

[80] LEE, H. Y., et al. A combined economic and environmental performance framework for railway infrastructure maintenance. 2014.

[81] LIM, Jaehoon, et al. A Study on Cause Analysis of Derailment Accident Using Failure Tree Analysis. Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation, 2018, 18.2: 19-26.

[82] LING, Liang, et al. Lateral impact derailment mechanisms, simulation and analysis. International Journal of Impact Engineering, 2016, 94: 36-49.

[83] LIU, Xiang; SAAT, M. Rapik; BARKAN, Christopher PL. A Framework for Evaluating Cost-Effectiveness of Accident Prevention Strategies under Uncertainty 2. 2012.

[84] MAHMOUD, Enad; PAPAGIANNAKIS, A. T.; RENTERIA, David. Discrete element analysis of railway ballast under cycling loading. Procedia engineering, 2016, 143: 1068-1076.

[85] MICHIE, Jarvis Dale. Recommended procedures for the safety performance evaluation of highway appurtenances. 1981.

[86] MINDLIN, Raymond David. Compliance of elastic bodies in contact. J. Appl. Mech., ASME, 1949, 16: 259-268.

[87] MOYER, Paul D., et al. Safety of High Speed Guided Ground Transportation Systems: Intrusion Barrier Design Study. United States. Federal Railroad Administration, 1994.

[88] NAM, Seong-Won. Theoretical analysis on overturn safety of train affected by wind pressure. Journal of the Korean Society for Railway, 2012, 15.6: 537-542.

[89] NATIONAL HIGHWAY TRAFFIC SAFETY ADMINISTRATION, et al. Laboratory Test Procedure for New Car Assessment Program Frontal Impact Testing. Washington, DC, 2012.

[90] NEZAMI, Erfan G., et al. A fast contact detection algorithm for 3-D discrete element method. Computers and geotechnics, 2004, 31.7: 575-587.

[91] Optimization of Derailment Protection System and Establishment of Installation Standard, Final Report, pp.6-236, Korea Rail Network Authority, 2014.

[92] P. Wang. (2015). "Wheel-Rail Relation Design", Design of High-Speed Railway Turnouts, pp. 97~162. doi. 10.1016/B978-0-323-39617-2.00004-7

[93] PADERNO, Chiara; EPFL, Lavoc. Simulation of ballast behaviour under traffic and tamping process. 2009.

[94] Rail Safety and Standards Board (RSSB). "Recommendations for the Design of Bridges". GC/RC5110, 2000.

[95] RHO, Joo-Hyun. A Numerical Study on Aerodynamic Characteristics in Tunnel for High Speed Combi Train-HSB. The KSFM Journal of Fluid Machinery, 2014, 17.5: 54-59.

[96] S. Yi. (2018). "The Effect Law of the Curve Parameters of a High-Speed Railway on Vehicle-Line Dynamic Performance", Dynamic Analysis of High-Speed Railway Alignment, pp. 73~108,
doi. 10.1016/B978-0-12-812887-9.00 003-9

[97] SAE International, SAE J211, "Instrumentation for Impact Test", 2003.

[98] SAMPSON, David John Matthew. Active roll control of articulated heavy

vehicles. 2000. PhD Thesis. University of Cambridge.

[99] Simulia, ABAQUS V6.17 user manual.

[100] SNCF DIRECTION DES AUDITS DE SECURITE (2015) “DERAILLEMENT DU TRAIN D’ESSAI N°814521 SUR LE RACCORDEMENT DE VENDENHEIM DE LA LGV EST EUROPEENNE EN CONSTRUCTION LE 14 NOVEMBRE 2015”, Paris

[101] Socio-Economic and Environmental Disaster Impact Assessment Handbook for Jamaica (Planning Institute of Jamaica, 2013)

[102] SOPER, David. The aerodynamics of a container freight train. Springer, 2016.

[103] Status & Statistical Analysis of Railway Accidents in 2016, Korea Transportation Safety Authority, 2016.

[104] TOMA, Elton E. A computer model of a train derailment. 2000.

[105] UK Recovery handbook for Chemical/Biological/Radiation incidents (Health Protection Agency, 2012/2015/2015)

[106] VASIĆ, Gordana, et al. Development of the Future Rail Freight System to Reduce the Occurrences and Impact of Derailment. In: Scientific expert conference on railways RAILCON12. 2014.

[107] W.H. You (2011), “Design Optimization Study on Bogie Mechanism, Korea Railroad Research Institute, 01-51

[108] XUE, X., et al. Qualitative comparison of the characteristics of articulated and non-articulated trains and their effects on impact. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2011, 225.1: 24-37.

[109] YANG, T. H.; MANOS, W. P.; JOHNSTONE, B. A Study Continuation of Derailment Behavior Final Report (Phase 08 Report on Computer Derailment Study). RPI/AAR Report RA-08-1-12 (R-135). Railroad Tank Car Safety Research and Test Project. Association of American Railroads, Washington, DC, 1972.

[110] ZHOU, Taoyong, et al. Discrete element method simulation of railway ballast compactness during tamping process. The Open Electrical & Electronic Engineering Journal, 2013, 7.1.

뒷면지

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.