

발 간 등 록 번 호
11-B552989-000611-01

300km/h 급 고속열차의 탈선 방지를 위한
차량 탑재(On-board)용 지진 계측 및 10초 이내
지진 조기 경보 기술 응용 단계 연구

최종보고서(일반과제용)										보안등급		
										일반[✓], 보안[]		
중앙행정기관명	국토교통부					사업명	사업명		국토교통기술촉진연구사업			
전문기관명	국토교통과학기술진흥원						내역사업명		국토교통기술혁신연구 (기반연구 유형)			
공고번호	공고-제2호					연구개발과제번호		21CTAP-C152247-03				
국가과학기술 표준분류	EI0605	50%	EA1408	20%	EE1305	10%	ED1117	10%	ED0803	10%		
연구주제	(대분류)걱정없는 안심사회					(중분류)생활안전, 재난재해, 에너지, 주거, 교통			(소분류)기상재해			
연구개발과제명	국문	300km/h 급 고속열차의 탈선 방지를 위한 차량 탑재(On-board)용 지진 계측 및 10초 이내 지진 조기 경보 기술 응용 단계 연구										
	영문	Development of on-board seismic motion detection technique and 10 seconds earthquake alarm system for prevention of 300km/h high speed train derail accident										
주관연구개발기관	기관명	한양대학교 에리카산학협력단					사업자등록번호		134-82-10205			
	주소	(15588) 경기 안산시 상록구 한양대 학로 55 (사동, 한양대학교)					법인등록번호		131471-0017977			
연구책임자	성명	곽동엽					직위		조교수			
	연락처	직장전화						휴대전화				
		전자우편	dkwak@hanyang.ac.kr					국가연구자번호				
연구개발기간	전체	2019. 04. 19 - 2022. 02. 28(35 개월)										
	1년차	2019. 04. 19 - 2019. 12. 31(9 개월)										
	2년차	2020. 01. 01 - 2020. 12. 31(12 개월)										
	3년차	2021. 01. 01 - 2022. 02. 28(14 개월)										
연구개발비 (단위 : 천원)	정부지원 연구개발비	기관부담 연구개발비		그 외 기관 등의 지원금				합계			연구개발비 외 지원금	
	현금	현금	현물	현금	현물	현금	현물	현금	현물	합계		
	총계	600,000	20,200	181,800	-	-	-	-	620,200	181,800	802,000	-
	1년차	134,000	4,600	41,400	-	-	-	-	138,600	41,400	180,000	-
	2년차	155,000	5,200	46,800	-	-	-	-	160,200	46,800	207,000	-
	3년차	311,000	10,400	93,600	-	-	-	-	321,400	93,600	415,000	
공동연구개발기관 등	기관명	책임자	직위	휴대전화		전자우편				비고		
										역할	기관유형	
	공동연구개발기관	한국철도기술연구원	유민택	선임			thezes03@krii.re.kr				공동	정부출연연
		(주)제이비티	김한곤	이사			kony@ejbt.co.kr				공동	중소기업
위탁연구개발기관												
연구개발기관 외 기관												
연구개발담당자 실무담당자	성명	곽동엽					직위		조교수			
	연락처	직장전화						휴대전화				
		전자우편	dkwak@hanyang.ac.kr					국가연구자번호				

이 최종보고서에 기재된 내용이 사실임을 확인하며, 만약 사실이 아닌 경우 관련 법령 및 규정에 따라 제재 처분 등의 불이익도 감수하겠습니다.

2022 년 5 월 16 일

연구책임자 : 곽 동 엽



주관연구기관의 장 : 한양대학교 에리카산학협력단 박태준



공동연구개발기관의 장 : 한국철도기술연구원 한석윤



위탁연구개발기관의 장 : (주)제이비티 이은정



국토교통과학기술진흥원장 귀하

< 요약 문 >

사업명		국토교통기술촉진연구사업				총괄연구개발 식별번호			-		
내역사업명		사회 이슈 해결				연구개발과제번호			21CTAP-C152247-03		
국가과학기술 표준분류		EI0605	50%	EA1408	20%	EE1305	10%	ED1117	10%	ED0803	10%
총괄연구개발명		-									
연구개발과제명		300km/h 급 고속열차의 탈선 방지를 위한 차량 탑재(On-board)용 지진 계측 및 10초 이내 지진 조기 경보 기술 응용 단계 연구									
전체 연구개발기간		2019. 04. 19 - 2022. 02. 28(35 개월)									
총 연구개발비		총 802,000 천원 (정부지원연구개발비 : 600,000 천원, 기관부담연구개발비 : 202,000 천원, 지방자치단체 : 천원, 그 외 지원금 : 천원)									
연구개발단계		기초[] 응용[☒] 개발[] 기타(위 3가지에 해당되지 않는 경우)[]				기술성숙도			착수시점 기준(2) 종료시점 목표(6)		
연구개발과제 유형		지정공모 [] 자유공모 [☒]									
연구개발과제 특성		실용화									
연구 개발 목표 및 내용	최종 목표		1. On-Board 센서를 활용한 열차 진동하중 및 지진하중 DB 2. 열차 진동하중과 지진진동 하중을 구분하는 실용화 단계 기계학습 알고리즘 3. 주행열차의 지진 위험 여부를 판별하는 위험 모델 4. 진동 감지 후 10초 이내 경보 가능한 열차 서행/정지 경보 시스템 5. 운행 의사판단 가상현실 시뮬레이션 구축								
	전체 내용		1. On-Board 센서를 활용한 열차 진동하중 및 지진하중 DB - 가속도계, 자이로, GPS와 같은 각종 센서를 활용한 저비용 On-board 지진 계측 기술 개발 - 열차 내 On-board 센서를 활용한 열차 진동 하중 및 지진 하중 시간이력 계측 시스템 구축 - 열차 하중 및 지진 하중에 대한 Database 구축 2. 열차 진동하중과 지진진동 하중을 구분하는 실용화 단계 기계학습 알고리즘 - 기계학습을 이용하여 열차의 상시 진동하중과 지진의 진동하중을 구분하는 알고리즘 개발 3. 주행열차의 지진 위험 여부를 판별하는 위험 모델 - 지진 진동하중으로부터 지진의 크기를 예측하는 모델 개발 - 지진진동 하중의 크기와 열차의 주행 방향 및 지진파의 전파 방향을 고려하여 열차탈선 위험예측모델 알고리즘 개발 4. 진동 감지 후 10초 이내 경보 가능한 열차 서행/정지 경보 시스템 - On-board 지진조기경보용 안전 운행 시스템 개발 5. 운행 의사판단 가상현실 시뮬레이션 구축 - 가상현실 시뮬레이션을 활용하여 On-board 센서의 지진 감지 후 기관사의 열차 운행 의사판단에 걸리는 소요시간을 실제 계측하여 시스템의 실효성 판단								
	1년차	목표	1. On-Board 센서를 활용한 열차 진동하중 및 지진하중 DB 1) 선행 연구 사례 조사 2) On-board용 동적하중 계측 센서 연구 2. 열차 진동하중과 지진진동 하중을 구분하는 실용화 단계 기계학습 알고리즘 1) 선행 연구 사례 조사 2) 진동 하중 피쳐 추출 기술 개발 3) 지진-열차 진동 하중 판별 기계학습 베이스라인 모델 구현 3. 주행열차의 지진 위험 여부를 판별하는 위험 모델 1) 선행 연구 사례 조사 2) 철도 주행 안전 기준 파악 3) 지진 유발 열차 피해 유형 분석 4. 진동 감지 후 10초 이내 경보 가능한 열차 서행/정지 경보 시스템 1) 선행 연구 사례 조사 2) 데이터 수집 프로세스 설계 3) 데이터베이스 설계 5. 운행 의사판단 가상현실 시뮬레이션 구축 1) 선행 연구 사례 조사 2) 열차 주행 평상시 360도 영상 편집 및 완성 클립 데이터베이스 구축 3) 열차 주행 진동시 360도 촬영 영상 편집 및 완성 클립 데이터베이스 구축								
		내용	1. On-Board 센서를 활용한 열차 진동하중 및 지진하중 DB - On-board용 계측 센서 사례 조사 - 열차 진동 하중 및 지진 하중에 대한 DB 구축 사례 조사 - 기존 계측 센서를 활용하여, 열차 진동 하중 및 지진 하중을 계측할 수 있는 저비용 On-board 계측 센서 연구 - On-board 용 센서를 활용한 열차 진동 하중의 시간이력 계측 기술 개발 - 기계학습용 DB 구축에 대한 기본계획 수립 - 열차하중 및 지진하중에 대한 스펙트럼 분석 2. 열차 진동하중과 지진진동 하중을 구분하는 실용화 단계 기계학습 알고리즘 - 진동 데이터 처리 기술 사례 조사 - 진동 데이터 처리 기술 사례 조사 - 기계학습 모델 학습에 사용하기 위한 피쳐들을 진동 데이터에서 추출하는 기술 개발								

		- Snapshot 데이터를 처리하는 지진-열차 진동 하중 판별 기계학습 모델 구현 - Logistic Regression, SVM, Random Forest, XGBoost, LightGBM 등 다양한 기계학습 모델을 고려 3. 주행열차의 지진 위험 여부를 판별하는 위험 모델 - 움직이는 이동수단에서 지진파 예측 사례 조사 - 지진유발 철도피해 사례 조사 - 지진유발 철도 취약도 모델 선행 연구 조사 - 주행 안전을 위해 제안되어 있는 기준 및 연구 파악 - 지반 붕괴, 구조물 붕괴, 산사태, 철로 변형, 열차 전복 등 열차의 주행을 불가능하게 하는 피해 원인 유형별 분석 4. 진동 감지 후 10초 이내 경보 가능한 열차 서행/정지 경보 시스템 - On-board 센서 예측 데이터베이스 사례 조사 - Online/Offline 예측데이터 수집사례 조사 - 데이터 전송 프로토콜 정의 - 무선통신을 활용한 데이터 수집방안 개발 - 데이터베이스 체계 설계 - On-board 예측데이터의 적재 양을 고려 5. 운행 의사판단 가상현실 시뮬레이션 구축 - 국내 자동차 운전시뮬레이터 시스템에서 가상현실을 활용한 선행연구 사례조사 및 분석 - 해외 철도차량 운행 가상현실 시뮬레이션 시스템 선행연구 사례조사 및 분석 - 가상현실 평상시 철도 운행 시뮬레이션 시스템 콘텐츠로 사용될 360도 영상 촬영 편집 및 데이터베이스 구축 - 실제 기관차 운전석에 탑승하여 360도 카메라를 사용하여 영상 데이터수집 - 가상현실 지진 발생시 철도 운행 시뮬레이션 시스템 콘텐츠로 사용될 360도 영상 촬영 편집 및 데이터베이스 구축 - 철도기술연구원에서 보유하고 있는 6 자유도 진동대 시험기를 활용하여 영상 데이터 촬영 및 편집
	2년차	목표 1. On-Board 센서를 활용한 열차 진동하중 및 지진하중 DB 1) On-board 용 예측 센서 고도화 2) 지진 하중 예측기술 개발 3) 열차 진동하중 및 지진하중 Database 구축 4) 기계학습용 DB 구축방안 수립 및 분석연구 2. 열차 진동하중과 지진진동 하중을 구분하는 실용화 단계 기계학습 알고리즘 1) 지진-열차 진동 하중 판별 기계학습 실시간 모델 구현 2) 모델 성능 평가 및 하이퍼 파라미터 튜닝 3) 앙상블 알고리즘을 통한 기계학습 모델 고도화 3. 주행열차의 지진 위험 여부를 판별하는 위험 모델 1) 지진에 의한 열차 피해 모델 개발 2) 철도 피해정도 예측모델 개발 4. 진동 감지 후 10초 이내 경보 가능한 열차 서행/정지 경보 시스템 1) 위치기반 예측데이터 처리기술 개발 2) 실시간 경보 메시지 전달체계 개발 5. 운행 의사판단 가상현실 시뮬레이션 구축 1) 평상시 열차주행 가상현실 시뮬레이터 개발 2) 지진발생시 열차주행 가상현실 시뮬레이터 개발 내용 1. On-Board 센서를 활용한 열차 진동하중 및 지진하중 DB - 저비용 On-board 센서 고도화 - On-board용 센서를 활용한 지진 하중 예측 기술 개발 - 기계학습 적용을 위한 진동대를 이용한 실지진파(장주기 및 단주기 지진파) 및 정현파의 지진 하중 예측 - 열차하중 및 지진하중에 대한 스펙트럼 분석 2. 열차 진동하중과 지진진동 하중을 구분하는 실용화 단계 기계학습 알고리즘 - 연속적 데이터에 대한 실시간 기계학습 모델 정확도 80% 이상 개발 - 판별 처리 속도 1초 이내로 학습 3. 주행열차의 지진 위험 여부를 판별하는 위험 모델 - 경험적 데이터로 개발된 지진 취약도 모델의 검증 - 철도 시스템 구조물 별 대표 지진 취약도 모델 정립 - 철도 피해 확률 계산 4. 진동 감지 후 10초 이내 경보 가능한 열차 서행/정지 경보 시스템 - GPS 위치 처리 기술 개발 - 이벤트 발생에 따른 메시지 전파 자동화 방안 연구 - 경보 자동화 시간단축 방안 연구 5. 운행 의사판단 가상현실 시뮬레이션 구축 - 열차 주행 360도 영상 편집 및완성 클립 데이터베이스 구축 - 지진발생 열차 주행 가상현실 소프트웨어 개발
	3년차	목표 1. On-Board 센서를 활용한 열차 진동하중 및 지진하중 DB 1) 열차 진동하중 및 지진하중 Database 구축 2) 기계 학습 알고리즘 및 지진 경보 시스템과의 DB 연계방안 수립 2. 열차 진동하중과 지진진동 하중을 구분하는 실용화 단계 기계학습 알고리즘 1) 다중 기기 활용 실험 환경 구축 2) 다중 기기 활용 실험 환경 구축 3. 주행열차의 지진 위험 여부를 판별하는 위험 모델 1) 철도 피해정도 예측모델 개발 2) On-board 경보 시스템 탑재를 위한 모델 최적화 4. 진동 감지 후 10초 이내 경보 가능한 열차 서행/정지 경보 시스템

		1) On-board 지진조기경보시스템 개발 5. 운행 의사판단 가상현실 시뮬레이션 구축 1) 개발된 지진경보발생 시스템 모듈을 연계하여 가상현실 시스템에 결합 2) 가상현실 시스템을 통한 사용자 평가
	내용	1. On-Board 센서를 활용한 열차 진동하중 및 지진하중 DB - 다중 기기를 사용했을 때, 여러 기기에서 다양한 데이터가 입력되는 상황을 구현 - 다중 기기에서 들어오는 실시간 센서 값들을 조합하고 처리하는 기술 개발 - 다중 센서 데이터 처리 효율성을 위한 데이터 병렬 처리 기술 구현 2. 열차 진동하중과 지진진동 하중을 구분하는 실용화 단계 기계학습 알고리즘 - 다중 기기를 사용했을 때, 여러 기기에서 다양한 데이터가 입력되는 상황을 구현 - 다중 기기에서 들어오는 실시간 센서 값들을 조합하고 처리하는 기술 개발 - 다중 센서 데이터 처리 효율성을 위한 데이터 병렬 처리 기술 구현 3. 주행열차의 지진 위험 여부를 판별하는 위험 모델 - On-board 센서 계측 지진 하중 데이터 및 열차 피해 확률 모델을 활용하여 진동 계측 시 열차 위치로부터 1 km 단위별 철도 피해정도 및 확률 모델 실용화 - 실시간 센서 계측 및 분석에 따른 연산피로를 저감시켜 반응속도를 올리기 위한 모델 최적화 연구 4. 진동 감지 후 10초 이내 경보 가능한 열차 서행/정지 경보 시스템 - 철도안전운행 시스템 연계방안 연구 - 열차간 기록 및 이벤트를 통합관리하기 위한 시스템 설계 및 구현 - 시스템 UI/UX 설계 및 구현 5. 운행 의사판단 가상현실 시뮬레이션 구축 - 기계학습을 활용해 개발된 지진경보발생 시스템 모듈을 독립적으로 개발된 열차주행 가상현실 시뮬레이션 시스템에 연계 통합 - 지진경보발생 시스템 모듈이 결합된 가상현실 시뮬레이터에 대한 사용자 평가를 수행하여 문제점 수정 보완 및 최종 사용성평가 자료 수집 및 분석
연구개발성과		- 열차 내 지진진동 감지 센서(On-board 센서)로부터 실시간 진동을 관측하는 시스템을 개발하여 열차 진동 수집 및 DB구축 - On-board 센서가 감지한 진동으로부터 지진을 감지할 수 있는 인공지능 알고리즘 개발 - 지진 감지 시 해당 열차의 운행 위험 여부 판단 및 시스템 피해확률 정보를 제공하는 모듈 개발 및 피해 지표 설정 - 지진 상황에서 기관사의 행동을 파악하고 지진 시 열차 제어 훈련을 수행할 수 있는 열차주행 가상현실 시뮬레이터 제작 - 실시간 진동 감지와 지진 판별, 경보 전송이 가능한 시스템 구축
연구개발성과 활용방안 및 기대효과		1) 연구개발성과의 활용방안 ○ 미래원천기술 확보 - 고정식 지진관측소 미설치 구간에서도 지진을 감지하여 철도변 지진가속도 센서 보다 신속한 대응이 가능하도록 활용 - 열차에서 확장하여 지하철, 고속버스 등 움직이는 객체의 지진 감지 시스템으로 활용 - 고비용의 지진 감지 네트워크 구성이 어려운 국가에서 본 과제에서 개발된 기술을 참고하여 저비용으로 열차 지진 감지 시스템을 구축하는데 활용 가능 - 열차 자체 경보시스템으로 기존 시스템보다 더 신속하고 자세한 경보로 인해 지진에 의한 열차 피해 확률을 획기적으로 단축시키는 데 활용 - 다양한 센서 데이터를 입력으로 이상 상태를 탐지하는 문제에 활용 - 스마트 팩토리, 각종 안전 관련 문제에서 이상 상태를 예측 및 진단하는 곳에 활용 - 다중 센서 기기를 사용하는 방법까지 개발을 했기 때문에 각종 센서들(예: 온도, 압력, 전압 등)의 값을 바탕으로 이상 상태를 종합적으로 판단하는 기술로 확장 가능 - 열차 기관사의 지진대응 훈련 및 안전운행 시스템 최적화에 활용 2) 기대효과 ○ 기술적 측면 - 본 연구는 기계학습과 빅데이터 기술을 활용하여, 움직이고 있는 철도 차량 안에서 On-board 센서를 이용하여 지진 발생 여부를 파악하고 운행 위험 여부를 파악하는 시스템 개발을 제안함. - 이는 비용과 지진 경보 발생의 신속성 면에서, 특수한 목적의 지진 검진 시스템의 추가 설치 없이도 저비용의 센서를 활용하여 지진을 탐지하고 위험을 예측한다는 점에서 효율적이며 관련 기술발전의 가능성이 기대됨. - 기존의 지진 경보 시스템에 더불어 고속열차의 센서를 활용한 클라우드 서비스를 보완적으로 운영함으로써 국가재난안전경보시스템의 정밀화가 기대됨. - 제안된 시스템 피해확률 계산 프레임워크는 철도 시스템뿐만 아니라 고속도로와 같은 직렬 시스템에도 적용하여 지진에 의한 시스템 피해정도 예측에 활용할 수 있을 것으로 기대됨. - 저가형 센서 데이터로도 높은 판별 정확도를 달성할 수 있어 고속열차만이 아닌 여러 열차에 적용 가능할 수 있을 것으로 기대되며, 데이터 수집 및 기계학습 모델 생성에 있어 같은 방법론을 열차 뿐 아니라 다른 이동 시설에도 적용할 수 있을 것으로 기대됨. - 가상현실 시뮬레이션으로 지진 시 기관사대응행동특성 분석 및 열차 운행에의 영향 분

	석, 더 다양한 환경에서 데이터 수집, 그리고 현업에서 쓰기 위해 서버 구축 등의 효과가 기대됨. - 개발된 VR 시뮬레이터는 지진뿐만 아니라 철도 운행 중 발생할 수 있는 다양한 사고에 대해서 시뮬레이션하는데 활용될 수 있을 것으로 기대됨. ○ 경제적·산업적 측면 - 최근 몇 년간 국내 지진 발생 횟수 증가 추이를 보이고 있고, 지진으로 인한 피해는 언제 어디서 발생할지 전혀 모르는 상황임. - 지진 발생시, 갑작스런 산사태, 지반 붕괴, 철로 변형 등 고속열차의 탈선으로 인한 2차 피해가 더 크게 작용할 수 있다는 우려가 존재함. - 이런 문제점들을 해결하기 위해 열차 내 On-board 센서들을 이용하여 지진 발생 시 신속하게 경보를 생성한다면 각종 산업 및 사회의 지진으로 인한 2차적 피해 및 위험을 미리 대비하는 효과를 기대할 수 있음. - 구조물, 자동차 등 다른 대상물의 지진조기경보 시스템과 연계하여 재해예방 관련 시장의 발전을 도모하는 효과 또한 기대할 수 있음.											
연구개발성과의 비공개여부 및 사유	해당없음											
연구개발성과의 등록·기탁 건수	논문	특허	보고서 원문	연구 시설· 장비	기술 요약 정보	소프트 웨어	표준	생명자원		화합물	신품종	
								생명 정보	생물 자원		정보	실물
	16	1	2			9						
연구시설·장비 종합정보시스템 등록 현황	구입기관	연구시설· 장비명		규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)		비고 (설치장소)	ZEUS 등록번호	
국문핵심어 (5개 이내)	고속열차			센서		지진조기경보		기계학습		가상현실		
영문핵심어 (5개 이내)	High Speed Train			Sensor		Earthquake Early Warning		Machine Learning		Virtual Reality		

〈 목 차 〉

1. 연구개발과제의 개요	08
1) 연구개발의 배경 및 필요성	08
2) 연구개발과제의 최종 목표	09
3) 연구개발과제의 년차별 목표	11
4) 년차별 세부연구목표 및 핵심 연구개발성과	12
5) 연구개발성과의 기술성숙도	14
2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행내용	16
1) 세부연구목표 별 연구 수행 내용	16
2) 연구개발 추진 전략 및 방법	95
3) 연구개발 추진 체계	95
4) 연구개발 추진 일정	96
3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도	99
1) 연구수행 결과	99
2) 목표 달성 수준	105
4. 연구개발성과 및 관련 분야에 대한 기여 정도	107
5. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획	107
1) 연구개발성과의 활용방안	107
2) 기대효과	108
3) 추가연구의 필요성	108
4) 기술 이전 계획	109

[별첨자료]

1. 연구개발과제의 개요

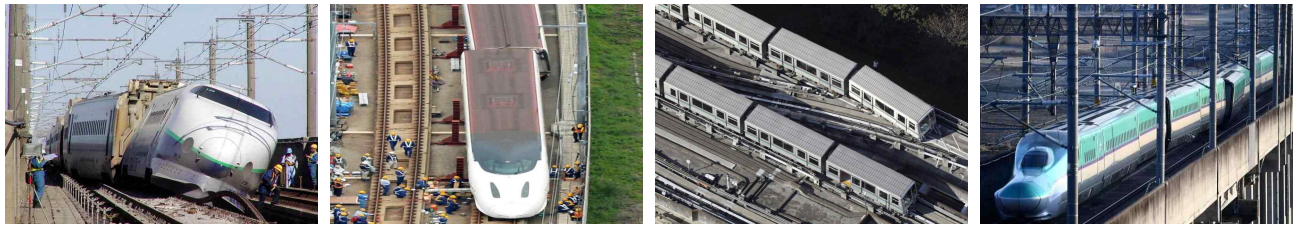
1) 연구개발 배경 및 필요성

(1) 연구개발의 배경

○ 지진 시 철도의 구부러짐 및 노반 침하, 산사태 등 지진피해가 일어난 곳을 열차가 지나가게 된다면 그림 1.1 및 1.2와 같이 열차가 탈선 또는 추돌하여 막중한 인명 및 재산피해를 초래할 수 있음. 따라서 지진의 피해가 예상될 시 신속히 열차의 운행을 서행 또는 정지 시킬 수 있는 조기경보시스템이 필요함.



그림 1.1. 지진에 의한 철도 파손 및 열차 전복 사례



(a) 2004 니가타 지진 (b) 2016 구마모토 지진 (c) 2022 후쿠시마 지진 (d) 2022 후쿠시마 지진

그림 1.2. 지진으로 인한 열차 탈선 사례

○ 우리나라의 KTX 철도는 주요 교각과 터널에 20~30km 간격으로 지진가속도 센서를 설치하였으며, 선로 및 교각 구조물과 이격된 자유장에 시추공 가속도 센서를 설치하여 고속철도의 지진감지 시스템을 구축 운영 중임.

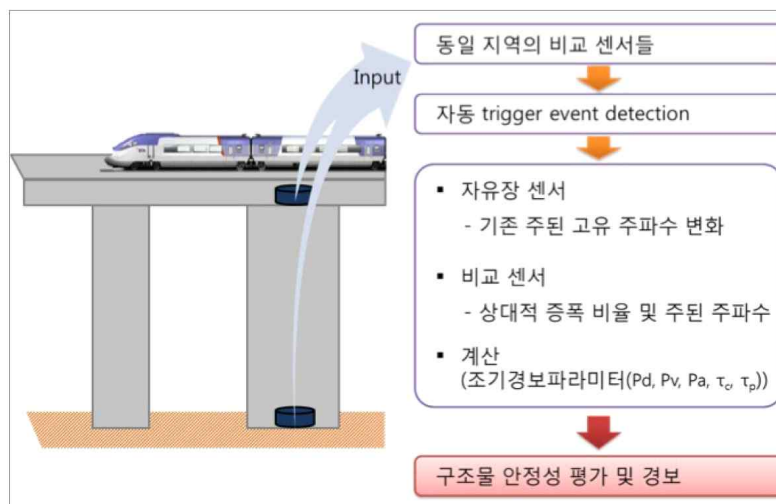


그림 1.3. KTX 고속철도의 지진조기경보시스템 개념도 (지현철, 2016)

○ 현재 국내 고속철도의 경보시스템은 지진감지 시스템에서 일정한 크기 이상의 진동 감지 시 유선으로 기관사에게 통보하여 열차의 운행을 결정하는 형식으로 그 반응 시간이 현저히 떨어지며, 지진계가 설치되지 않은 지역에 열차가 통과할 경우 지진 발생을 인지할 수 없음.

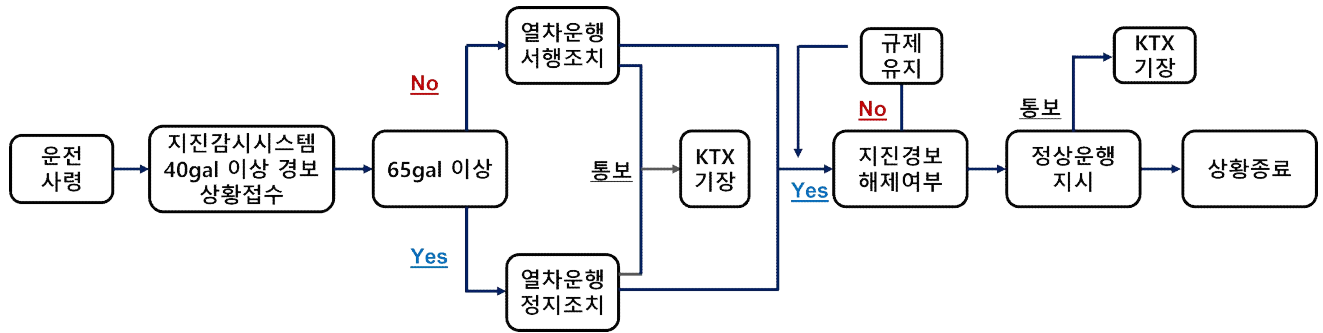


그림 1.4. 지진 시 열차 서행/정지 조치 흐름도(이장석과 김대상, 2009)

(2) 연구개발의 필요성

- 현재 고속선에 대한 지진조기경보시스템은 구축이 되어 있으나, 선로의 연장이 더 방대한 일반선의 경우 지진조기경보시스템이 전혀 구축이 안 되어 있으며, 구축 시 막대한 비용을 동반함.
- 일본 신칸센의 경우, UrEDAS (Urgent Earthquake Detection and Alarm System)라는 지진조기경보 시스템을 1992년부터 도입하여 활용함. UrEDAS는 철도 인근에 지진관측소를 설치하여 철도 쪽으로 들어오는 P-wave를 감지하여 사전 경보함. 또한 JR EEW system(East Japan Railway Company에서 운영하는 지진조기경보 시스템)은 해안가를 따라 설치되어 있는 지진 관측소와 철도를 따라 설치되어 있는 조밀한 지진 관측소를 활용하여 지진조기경보시스템을 운영함.
- 기상청의 기존 지진조기경보 발표 시간은 지진분석의 정확성을 어느 정도 확보한 후 발표하여 지진 관측 후 약 15-25초 정도였으나, 더 빠른 조기경보의 요구로 10초 이내로 단축하려는 연구가 진행되고 있음.
- 국가지진경보시스템(예: 기상청 지진조기경보시스템)의 경우 주행 열차에 직접적으로 연결이 되어 있지 않아 지진조기경보시스템으로부터 철도 중앙관제시스템으로의 경보 공지, 그리고 중앙관제시스템에서 주행열차에 경보 공지 등의 시간소요가 발생하여 열차의 피해 정도를 확대시킬 가능성이 있음.
- 따라서, 본 연구에서는 열차의 On-board 지진경보장치를 개발하여 열차에서 직접 지진의 유무를 감지하고 기관사에게 열차피해정도 위험정보를 전달하는 장치를 개발하고자 함.
- 이러한 장치는 기존의 지진 경보 전달체계보다 더욱 빠르게 기관사에게 경보를 줄 수 있게 됨.
- 또한 열차주행 가상현실 시뮬레이터를 개발하여 지진감지, 경보, 주행의사판단, 열차정지 절차의 훈련을 미리 할 수 있는 환경을 개발함. 이는 지진 시 기관사의 행동 요령을 사전에 교육할 수 있어 조속한 대응으로 열차 피해를 저감할 수 있음.

2) 연구개발과제의 최종 목표

- 해당연구개발과제의 최종목표는 열차 On-board 지진탐지 및 경보 시스템을 구축하는 것이며, 해당 목표를 위해 총 5개의 핵심기술요소(CTE)가 존재함.
- (CTE A) On-board 센서를 활용한 열차 진동하중 및 지진하중 DB 구축
 - 열차 내에서 지진하중을 감지하기 위한 저비용 On-board 센서를 개발하고, 해당 센서의 성능을 시험인증을 통해 검증하였음.
 - 열차 진동하중과 지진 진동하중을 구분하는 기계학습 알고리즘 개발을 위해 열차 진동 하중 및 지진하중에 대한 Database를 구축(열차 진동하중 1,000건 및 지진 진동하중 500건 이상)하고 해당 데이터의 기계학습 적용방안을 연구하는 것이 본 기술의 핵심 목표임.
 - 지진 진동하중의 경우 열차 내에서 감지되는 지진 하중을 최대한 가깝게 모사하기 위해, 구조물 응답 분석을 통한 구조물 전달함수 개발 및 모형 차량에 대한 진동대 실험을 통한 열차 차량 전달함수 개발을 수행하였음.
- (CTE B) 열차 진동하중과 지진진동 하중을 구분하는 실용화 단계 기계학습 알고리즘
 - 고속 열차 운행 중 지진 발생은 큰 재난 사고로 발전하기 쉬움. 빠른 속도로 이동하기 때문에 탈선의 위험이 높으며, 많은 사람이 이용하기 때문에 자칫 대규모 인명 사고로 이어질 수 있음.
 - 기존 열차 내 지진 대응 시스템은 지진 탐지와 경보가 열차 밖에서 이루어지고 그 정보가 열차로 전송

되어 대응 방법이 결정되는 방식임. 하지만 고속 운행을 하는 열차 상황을 고려했을 때, 열차 내에서 지진을 즉각 감지하는 것이 가능하다면 훨씬 더 효율적인 대응이 가능할 것으로 예상함.

- 본 핵심기술은 열차 내에서 신속하게 지진을 탐지할 수 있는 기계학습 기반 지진 탐지 모델로, 실제 열차 내 적용을 위해 저비용 센서 및 빠른 속도로 실행할 수 있는 기계학습 모델 개발을 목표로 함.

○ (CTE C) 주행열차의 지진 위험 여부를 판별하는 위험 모델

- 주행열차의 지진 위험 여부를 판별하는 위험 모델은 On-board 센서에서 관측한 지진동의 크기가 어느 정도의 열차 피해를 유발시킬 수 있는 크기인가를 판별하여 열차 피해 위험정보를 사용자(기관사 또는 중앙관리시스템)에게 전달하는 것에 활용되는 모델임. 이러한 위험도 모델을 개발하기 위해서는 우선적으로 지진으로 인해 열차에 위험을 가할 수 있는 요소를 분석하고, 현행 열차 운행 및 손상 기준에 대한 정의를 살펴볼 필요가 있음. 그 후 철도시설물의 지진취약도를 개발하여 지진 시 어떠한 손상상태가 초과하는 피해를 입을 확률 모델을 각 철도 구간에 정의할 필요가 있으며, 열차의 제동거리를 고려한 철도 시스템 피해확률을 계산할 필요가 있음. 이러한 시스템 피해확률과 현행 열차 운행 제어기준으로부터 열차 피해 위험정보 기준을 마련하여 최종적으로 지진 시 경보시스템을 통해 위험정보를 전달하는 것이 이 핵심기술의 목표임.

○ (CTE D) 진동 감지 후 10초 이내 경보 가능한 열차 서행/정지 경보 시스템

- 진동 감지 후 10초 이내 경보 가능한 열차 서행/정지 경보 시스템을 구축하기 위해서는 개발된 On-board 센서 계측기를 고속열차 객실 내에 설치하여야 하며, 전원 및 인터넷 환경을 통하여 계측정보 및 On-board 센서 계측기를 원격으로 제어할 수 있어야 함. 지진 진동 계측은 고속 주행 중인 상태와 역사 진입 후 정차한 상태를 구분할 수 있어야 하므로 이를 위하여 철도안전운행 시스템의 열차운행 일정표와 GPS 수집 정보를 활용하여 주행 상태를 확인이 가능하도록 연구하였음. 또한, On-board 센서 계측기로 열차 간 지진진동 데이터의 기록 및 이벤트를 통합관리하기 위하여 별도 통합관리 시스템에서 모니터링하며, 필요 시 On-board 센서 계측기가 계측정보를 저장 및 삭제, 저장 목록의 조회 등을 원격 제어하여 저용량 On-board 센서 계측기의 저장용량을 최대한 활용할 수 있도록 구현하였고, 통합관리 시스템에서 각 계측기의 계측 상태 및 위치, 속도 등의 정보를 모니터링하며, 계측 중인 On-board 센서 계측기의 위치 및 계측정보들을 지도 상에서 실시간 모니터링이 가능한 시스템을 구축하였음. 지진진동 발생 시 이벤트를 모니터링 하고 있는 모든 시스템에 위험 알람을 발생하여 열차 서행/정지를 지원할 수 있는 시스템을 설계 및 구현하였음. 계측된 모든 지진진동 계측 데이터는 통합 데이터 관리 시스템에 적재되며, 계측된 정보는 주행열차의 지진위험 여부를 판별하는 위험 모델 등 열차 내 지진 진동 계측 연구에 필요한 데이터들을 통합 관리 할 수 있는 계측 데이터베이스 시스템도 구현하였음.

○ (CTE E) 운행 의사판단 가상현실 시뮬레이터

- 운행 의사판단 가상현실 시뮬레이터는 기관사가 실제와 비슷한 열차 주행 상황에서 지진을 경험했을 때 그에 대한 운행을 진행할지 혹은 중단할지 판별 및 연습할 수 있는 가상현실 시스템으로 사용자(기관사)가 주행 중 지진 환경을 미리 판단할 수 있는 시스템임. 이를 구축하기 위해서 높은 현실감을 줄 수 있는 360도 영상으로 가상환경을 구축하고, 실제 진동을 사용자에게 제공할 수 있는 VR 전동 의자를 이용하여 실제 주행 및 지진 진동에 따라서 촉각 피드백을 개발하고, 운행 의사판단에 따라서 사용자가 직접 주행 속도를 줄일 수 있는 가상 주간제어기가 재생되는 360도 영상과 연계되어 상호작용이 되어야 함. 이 요소들이 가상현실에 결합하여 사용자에게 실제와 유사한 주행 및 지진 경험을 가상현실을 통해서 제공하면서 사용자의 의사판단을 가상현실에 반영할 수 있도록 만드는 것이 이 핵심기술의 목표임.



❖ 지진 시 열차가 탈선 또는 추돌로 인한 인명 및 재산피해 초래



❖ 지진에 의한 피해 예상 시 열차의 운행을 서행 및 정지 시킬 수 있는 조기경보 시스템 필요



❖ 현재 국내 고속철도의 경보시스템은 유선으로 기관에게 통보하여 운행 결정



❖ 지진계가 설치되지 않은 지역에 열차가 통과 시 지진 발생을 인지 할 수 없음



기존의 경보시스템보다 절차에 걸리는 시간을 획기적으로 줄이는 시스템 구축

300km/h 급 고속열차의 탈선 방지를 위한 차량 탑재(On-board)용 지진 계측 및 10초 이내 지진 조기 경보 기술 응용 단계 연구

- ◆ On-board 센서를 활용한 열차 진동하중 및 지진하중 DB 구축
- ◆ 열차 진동하중과 지진진동 하중을 구분하는 실용화 단계 기계학습 알고리즘 개발
- ◆ 주행열차의 지진 위험 여부를 판별하는 위험 모델
- ◆ 진동 감지 후 10초 이내 경보 가능한 열차 서행/정지 경보 시스템 구축
- ◆ 운행 의사판단 가상현실 시뮬레이션 구축

그림 1.5. 연구개발 목표 도식도

3) 연구개발과제의 년차별 목표

○ 핵심기술요소별 최종연구개발목표 달성을 위해 년차별 연구개발목표가 설정되었으며, 각 핵심기술요소의 년차별 연구개발목표 관계도는 그림 1.6과 같음.

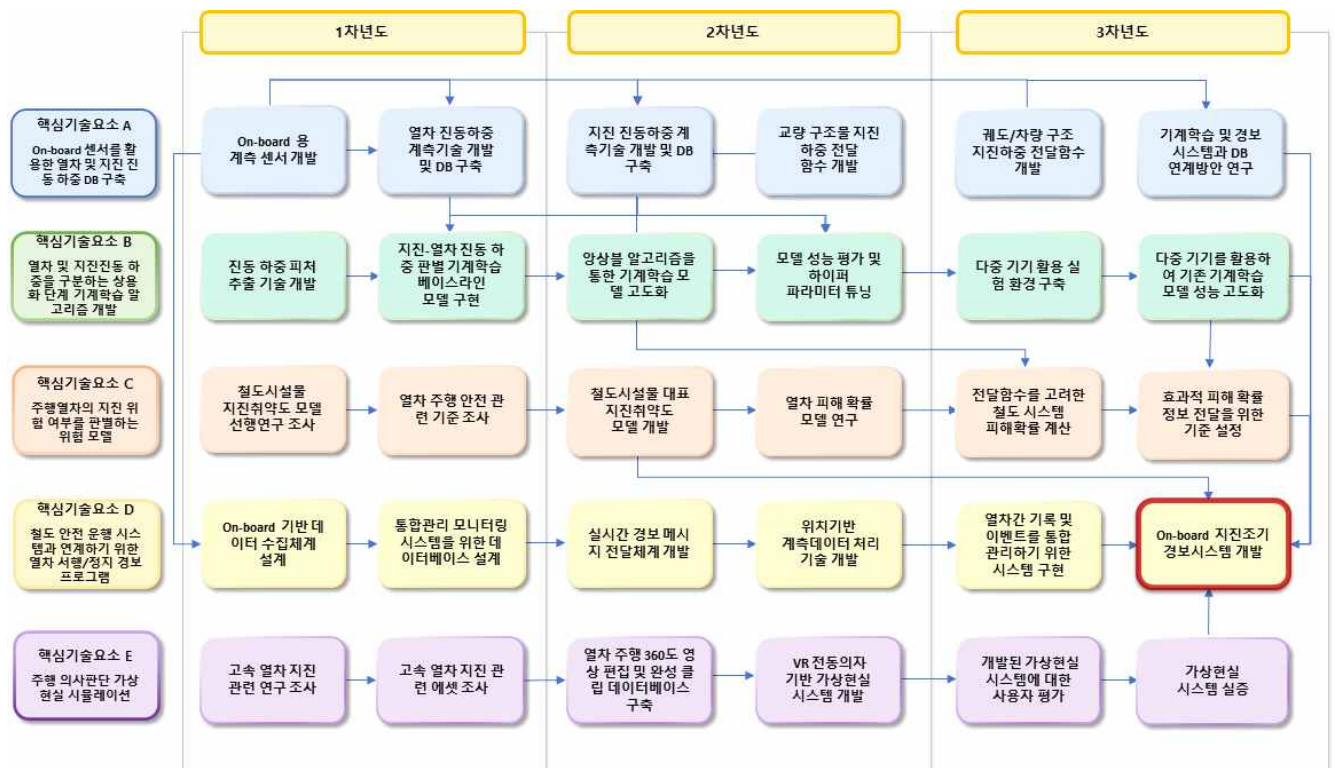


그림 1.6. 년차별 핵심기술요소의 목표 및 목표 간 관계도

4) 년차별 세부연구목표 및 핵심 연구개발성과

구분	CTE	연구개발목표	핵심 연구개발성과 (연구개발성과물)	현재 국내·외 기술수준	연구개발 목표치	목표치 설정 근거	가중치 (%)
1년차 (2019)	A	On-board용 계측 센서 개발	On-board 용 동적 하중계측용 센서 연구	-	동적하중 계측 및 분석이 가능한 센서	On-board 용 동적 하중을 계측할수 있는 센서 확보를 목표 설정	3
		열차 진동하중 계측기술 개발 및 DB구축	기계학습 적용을 위한 DB 구축 수준	-	열차 진동하중 DB 100건 이상 구축	기계학습 피쳐 추출 및 센서 검증을 위한 DB 구축 목표 설정	3
	B	진동 하중 피쳐 추출 기술 개발	추출 진동 피쳐 추출 프로그램	STA, LTA 등 지진 진동 관련 특성 추출 방법이 다양하게 존재	추출 진동 피쳐 10종 이상	지진 탐지 분야에서 보통 사용하는 특성들을 기본 고려할 수 있도록 목표 설정	3
					진동 피쳐 추출 시간 1초 이내	피쳐 추출이 신속하게 진행되어 전체 지진 탐지 목표 시간을 달성할 수 있도록 1초 이내로 목표 설정	
		지진·열차 진동 하중 판별 기계학습 베이스라인 모델 구현	지진 열차 진동 하중 판별 기계학습 모델 프로그램	열차 운행 시 지진 진동에 대한 사례는 없으나, 일반 지진관측소 상황에서 기계학습 기반 지진 탐지는 99.2%	지진-열차 진동 하중 판별 정확도 70% 이상	노이즈가 적은 일반 지진 탐지 상황에 비해 열차 운행 시 발생하는 상시 진동을 고려해 초기 베이스라인 방법의 목표 설정	3
					지진-열차 진동 하중 판별 소요 시간 1초 이내		
	C	철도시설물 지진취약도 모델 선행연구 조사	과거 지진으로 인한 국외 철도 피해 사례로부터 경험적 지진취약도 모델 개발	국외 철도 피해사례에 대한 기술은 있으나 경험적 취약도 모델은 존재하지 않음	지진피해사례를 분석하여 경험적 지진취약도 모델 개발	-	3
			철도시설물(교량, 터널, 성토부 및 절토부) 대상 지진취약도 모델 수집	교량, 터널, 성토부 및 절토부 대상 지진취약도 모델은 다수 존재	철도시설물(교량, 터널, 성토 및 절토부) 별 지진취약도 모델 1개 이상 수집	열차의 피해확률 계산을 위해 철로 상 주요 시설물의 지진취약도 함수 파악 필요	
		열차 주행 안전 관련 기준 조사	국내 열차 주행 및 철로 유지보수 관련 기준 수집	철도의 내진설계, 손상기준, 운행기준 등 열차의 주행 안전 관련 기준 다수 존재	최소 1개 기준으로부터 열차 주행 안전 관련 항목 조사	지진취약도의 손상상태와 기준의 피해지표와 연관시키기 위해 최소 1개 이상의 기준을 수집	3
	D	On-board 기반 데이터 수집체계 설계	On-board 센서 계측 데이터베이스 사례 조사 및 무선통신을 활용한 데이터 수집방안 설계	-	인터페이스 정의 설계 여부	최신 개발 동향 및 충분한 사례 기반으로 수집 인터페이스를 설계	3
		통합관리 모니터링 시스템을 위한 데이터베이스 설계	On-board 계측데이터의 적재 양을 고려 및 데이터베이스 체계 설계	-	데이터베이스 설계 여부	최신 개발 동향 및 충분한 사례 기반으로 수집 데이터베이스 설계	3
	E	고속 열차 지진관련 연구 조사	고속 열차 지진 관련한 대처 훈련 시스템 조사 및 분석	-	보고서 1개	-	3
		고속 열차 지진관련 애셋 조사	고속 열차 지진 가상현실 시스템 구현에 필요한 애셋 수집	-	애셋 20개	-	3
2년차 (2020)	A	열차 진동하중 계측기술 개발 및 DB구축 (계속)	기계학습 적용을 위한 DB 구축 수준	-	열차하중 500개	기계학습 적용을 위한 열차하중 500(누적)개 수집을 목표설정	2
		지진 진동하중 계측기술 개발 및 DB구축	기계학습 적용을 위한 DB 구축 수준		지진 하중 100개	기계학습 적용을 위한 지진하중 100개 수집을 목표설정	2
		교량 구조물 지진하중 전달함수 개발	구조물 지진 응답을 고려한 전달함수 개발		전달함수 개발	합리적인 지진 하중 DB 구축을 위한 전달함수 개발 목표	2
	B	양상불 알고리즘을 통한	양상불 알고리즘을 통한 기계학습 모델 프로그램	열차 운행 시 지진 진동에 대한 사례는	지진-열차 진동 하중 판별 정확도	안정 상태에서 지진 탐지 정확도 대비	3

3년차 (2021)		기계학습 모델 고도화		없으나, 일반 지진관측소 상황에서 기계학습 기반 지진 탐지는 99.2%	75% 이상 지진-열차 진동 하중 판별 소요 시간 1초 이내	80% 정확도 기술 확보를 목표로 설정	3
		모델 성능 평가 및 하이퍼 파라미터 튜닝	딥러닝 적용을 통한 기존 모델 성능 고도화		지진-열차 진동 하중 판별 정확도 80% 이상		
					지진-열차 진동 하중 판별 소요 시간 1초 이내		
	C	철도시설물 대표 지진취약도 모델 개발	지진취약도 모델의 손상상태와 열차 주행 및 철도 유지보수 관련 기준과의 연계	-	지진취약도 모델의 손상상태와 관련기준의 피해지표와의 관계 파악	-	1
			기존의 지진취약도 모델을 가중 조합한 대표 지진취약도 모델 개발	철도시설물의 지진취약도 모델을 가중조합한 모델은 존재하지 않음	철도시설물(교량, 터널, 성토부 및 절토부) 별 대표 지진취약도 모델 제시	열차 피해를 계산을 위해서는 주요 철도시설물의 지진취약도 함수가 필요	2
		열차 피해 확률모델 연구	테스트베드 구간(익산-정읍) 내 철도시설물의 유형 및 지반조건 DB작성	-	DB 1건	-	2
			열차의 속도별 제동거리로부터 철도 시스템 길이 계산	-	고려대상 시스템 길이 확정	-	1
	D	실시간 경보 메시지 전달체계 개발	LTE통신을 통한 위험상황 메시지를 수집서버로 전달 프로토타입 개발	-	계측정보의 실시간 서버전송	계측기의 계측정보가 실시간 처리가 가능하도록 수집서버로 의 전달이 필요	3
		위치기반 계측데이터 처리기술 개발	on-board 계측 시 GPS를 활용한 위치정보 연계 모듈 개발	-	GPS 위치정보 연계	계측정보와 GPS 위치와 속도의 통합 수집이 필요	3
	E	열차 주행 360도 영상 편집 및 완성 클립 DB구축	열차 주행 360도 주행 영상 및 지진영상 데이터베이스 구축	-	20개	-	3
		VR 전동의자 기반 가상현실 시스템 개발	VR 전동의자 시스템 및 360도 영상이 가상환경으로 보이는 가상현실 시스템 개발	-	실행 가능	-	3
	A	궤도/차량 구조 지진하중 전달함수 개발	궤도/차량 지진 응답을 고려한 전달함수 개발		전달함수 개발	합리적인 지진 하중 DB 구축을 위한 전달함수 개발 목표	2
		열차 진동하중 계측기술 개발 및 DB구축 (계속)	기계학습 적용을 위한 DB 구축 수준	-	열차하중 500개	기계학습 적용을 위한 열차하중 1,000개(누적) 수집을 목표설정	2
		지진 진동하중 계측기술 개발 및 DB구축 (계속)	기계학습 적용을 위한 DB 구축 수준		지진 하중 100개	기계학습 적용을 위한 지진하중 300(누적)개 수집을 목표설정	2
		기계학습 및 정보 시스템과의 DB연계방안 연구	열차 및 진동하중 스펙트로그램 분석기법 연구	-	스펙트로그램을 활용한 지진 감지 기술 개발	기계학습 정보 시스템과의 연계를 위한 스펙트로그램 분석 기법 연구	2
	B	다중 기기 활용 실험 환경 구축	다중 센서 데이터를 입력으로 기계학습 모델을 테스트할 수 있는 프로그램	-	센서 기기 2개 이상 처리 가능하고, 스트림데이터를 실시간 입력 지원 가능	실제 열차 적용 상황을 고려하여 실시간으로 데이터가 입력되는 상황을 구현할 수 있도록 목표 설정	4
		다중 기기를 활용하여 기존 기계학습 모델 성능 고도화	다중 센서 데이터 기반 열차 운행 중 지진 판별 기계학습 모델	열차 운행 시 지진 진동에 대한 사례는 없으나, 일반 계측소 상황에서 기계학습 기반 지진 탐지는 99.2%	지진-열차 진동 하중 판별 정확도 85% 이상 지진-열차 진동 하중 판별 소요 시간 1초 이내	안정 상태에서 지진 탐지 정확도 대비 85% 정확도 기술 확보를 목표로 설정	4
		전달함수를 고려한 철도 시스템 피해를	전달함수를 활용하여 열차 내에서 관측된 PGA를 지표면 PGA로의 변환하는	교량, 토층의 전달함수는 존재하나 지표면-열차의	기반암-지표면, 지표면-교량, 노반-열차대차,	지진취약도 모델을 활용하기 위해 지표면 기준 PGA의	2

		계산	관계 정립	전달함수는 존재하지 않음	열차대차-열차객실 사이의 전달함수 개발	예측이 필요함	
			열차 제동 시 지나가는 철도 시스템 길이에 대한 시스템 피해 확률 계산 모듈 개발	교량, 제방 등 직렬 시스템의 피해 확률 계산 존재	제동거리 내 철도시스템의 시스템 피해 확률 계산	-	
		효과적 피해확률 정보 전달을 위한 기준 설정	기존의 지진 시 열차 서행/정지 기준과 부합하는 피해 확률 정보 전달 진동 기준 설정	PGA를 기준으로 열차 서행/정지 기준이 존재함	피해 확률 정보 전달 기준 설정	-	2
D		On-board 지진조기경보시스 템 개발	On-board 지진조기경보 시스템을 원격으로 제어하고 모니터링 할 수 있는 UI/UX 시스템 설계 및 구현	-	구현한 시스템으로 계측기의 실시간 계측 정보를 모니터링하고 원격제어가 가능	통합관리 시스템에서 계측기의 원격제어 및 실시간 모니터링이 가능한 UI/UX 필요	4
		열차간 기록 및 이벤트를 통합관리하기 위한 시스템 구현	열차간 계측된 지진정보를 기록하고 모니터링할 수 있는 수집서버 시스템의 설계 및 구현	-		전체 시스템에서 실시간으로 정보를 송수신 가능한 시스템 설계 필요	4
	E	개발된 지진경보발생 시스템 모듈을 연계하여 가상현실 시스템에 결합	실제 지진 데이터를 적용하여 실제와 비슷한 주행 및 지진 흔들림을 느낄 수 있는 가상현실 시스템 개발	-	실행 가능	-	4
		가상현실 시스템을 통한 사용자 평가	실제 사용자들이 될 기관사들이 개발된 가상현실 시스템을 평가	-	3명	전문가 대상 사용자 평가에 대한 평균 인원	4

5) 연구개발성과의 기술성숙도

구분		연구착수	연구종료	단계별 설명	
기초연구 단계	TRL 1	☐	☐	TRL 1	이론적 연구단계
	TRL 2	☒	☐	TRL 2	기술적 개념정립 단계
실험 단계	TRL 3	☐	☐	TRL 3	실험적 증명 단계
	TRL 4	☐	☐	TRL 4	실험실 성능평가 단계
시작품 단계	TRL 5	☐	☐	TRL 5	유사환경 시험 단계
	TRL 6	☐	☒	TRL 6	유사환경 기술시험 단계
실용화 단계	TRL 7	☐	☐	TRL 7	실제환경 시작품 데모 단계
	TRL 8	☐	☐	TRL 8	시제품 설치 및 성능시험 단계
사업화 단계	TRL 9	☐	☐	TRL 9	현장적용/사업화 단계

최종성과물	기술성숙도 (TRL)		설정근거
	시작 시	종료 시	
On-Board 센서를 활용한 열차 진동 하중 및 지진하중 DB	2	6	-(연구시작시)현재 열차 하중과 지진 진동 하중에 대한 산발적인 Data들은 존재하나, 동일 계측기를 활용한 통합된 DB는 구축된 사례가 없음. -(연구종료시)300km/h 급 KTX에서 계측된 열차 진동 하중 및 진동대를 활용한 지진하중 계측 결과를 모아, 실용화 단계 알고리즘 개발을 위한 Database를 구축함.

열차 진동하중과 지진진동 하중을 구분하는 실용화 단계 기계학습 알고리즘	2	5	-(연구시작시)열차 진동 하중과 지진 진동 하중에 대한 동일 계층 DB가 전무했기 때문에, 이를 판별하는 기계학습 기술도 초창기 단계임. -(연구종료시)본 과제에서 수집된 실제 데이터를 사용하여 기계학습 모델 성능을 평가하며, 실제 열차 상황을 모사한 가상현실 시뮬레이션 환경에서 전체 성능을 평가함.
주행열차의 지진 위험 여부를 판별하는 위험 모델	2	5	-(연구시작시)지진 진동 크기에 따른 산사태 위험, 지반 파괴 위험 모델들은 존재하나, 철도 구부러짐, 절단 등 열차를 탈선 시킬 수 있는 피해에 대한 분석사례가 없음. -(연구종료시)철도 파괴, 지반 변위 등 열차에 직접적 영향을 끼치는 피해를 확률적으로 예측하는 피해 취약도 모델을 개발하고, 열차에서 감지한 진동 및 취약도 모델을 토대로 열차 위치에서 제동거리 내 시스템 피해 정도 예측 모델을 개발함.
진동 감지 후 10초 이내 경보 가능한 열차 서행/정지 경보 시스템	3	5	-(연구시작시)On-site 시스템 기술이 연구 중이나, On-board 특성이 반영된 시스템의 사례가 없음. -(연구종료시)유사환경에서의 시제품 운용을 통한 성능을 평가함.
주행 의사판단 가상현실 시뮬레이션	1	4	-(연구시작시)자동차분야의 경우에는 적극적으로 가상현실(VR) 주행 시뮬레이션을 활용하고 있으나, 국내에서 철도운행분야의 VR 적용은 초기 단계임. -(연구종료시)360도 영상 콘텐츠를 활용한 HMD(Head-Mounted Device) 기반 가상 주행 시뮬레이션 시스템을 개발하여 본 과제에서 개발하는 지진위험에 대한 주행열차 시뮬레이터를 개발함.

2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행 내용

1) 세부연구목표 별 연구 수행 내용

(1) (CTE A) On-board 센서를 활용한 열차 진동하중 및 지진하중 DB 구축

가) On-board용 계측센서 개발

■ 개요

- MEMS 센서 기반 가속도 데이터를 수집할 수 있는 저비용 계측기 개발
 - 저비용 가속도 센서를 탑재한 Raspberry Pi board를 활용함.
 - 가속도 계측 프로그램 고도화를 통해 1/100초 계측성능을 확보함. (100 hz 이상)
 - 패키징을 통해 계측 센서 부착 및 계측을 용이하도록 보완함.

■ 결과

- On-board 용 계측 센서 개발 및 스펙
 - IMU 센서 : BerryGPS-IMU -GPS & 10DOF IMU
디지털 3축 가속도계
중량 0.008kg, SPI/I2C 인터페이스 지원
GPS Module MT3337
 - 보드 : RaspberryPi 4 모델 B
Broadcom BCM2711, quad-core Cortex-A72 (ARM v8) 64-bit SoC @ 1.5GHz
4GB 메모리
USB 3.0 슬롯 2개
1Gbps 이더넷
 - 총 제작비용 개당 200,000원 이하로 제작함.



그림 2.1. 개발된 가속도 계측용 Sensor

- On-board 용 계측 센서 검정
 - 한국산업기술시험원을 통해 개발된 가속도 센서에 대한 시험 성적서 발급(별첨자료 p.48)을 진행함.
 - 진동가속도 크기 0.1g ~ 0.3g 및 입력 주파수 1Hz ~ 10Hz 크기로 가진하고, 고성능 가속도계와 개발 센서의 peak 가속도 오차를 검증함.
 - 총 10회 실험에서 오차 값은 평균 4.5%, 최대 10%로 발생하였으며, 해당 실험에 대한 시험 성적서를 발행함. (성적서 번호 : 22-0011706-01-1, 해당 파일 별첨)

나) 열차 진동하중 계측기술 개발 및 DB구축

■ 개요

- 철도 공사 데이터(고비용, 고정밀도 데이터) 및 개발된 On-board 센서 결과 데이터(저비용, 저정밀도 데이터)에 대한 DB 구축
 - 향후 기계학습에 활용할 수 있는 열차 지진 가속도 DB를 구축함.
 - 테스트 베드 구간인 익산-정읍 구간(콘크리트 궤도) 및 그 외 구간(자갈궤도 구간) 대해 분리하여

Database를 구축함.

- 계측일자, 구간, 계측빈도, 객차 및 좌석번호 등의 정보를 포함하여 Database를 구축하였으며, On-board sensor의 경우 다중 센서 활용을 위해 동일 열차의 다른 구역에서 계측을 수행함.

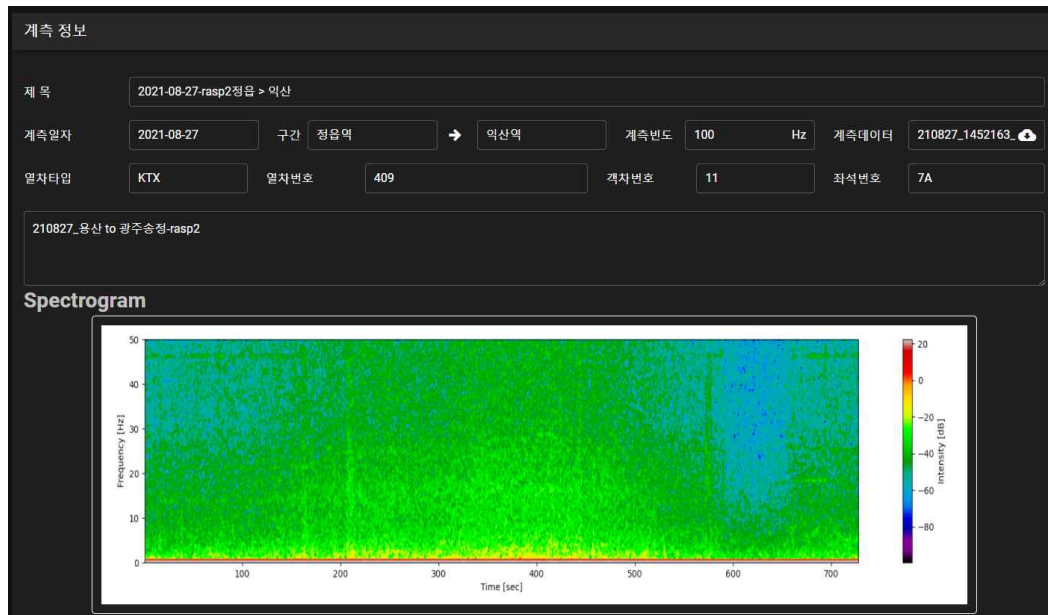


그림 2.2. 열차 가속도 계측자료 예시

■ 결과

- 테스트 베드 구간에서 총 400개, 그 외 구간에서 총 600개의 열차 진동하중을 포함하는 database를 구축함.

다) 궤도/차량 구조 지진하중 전달함수 개발

■ 궤도-차량 전달함수 개발을 위한 진동대 실험 수행

- 궤도-차량 전달함수 도출을 위해 KTX-산천 고속열차의 레일 및 열차 모형을 제작하고 진동대 실험을 수행함.
- 한양대학교 에리카 캠퍼스에서 보유하고 있는 진동대 장비 사용

항목	제원
Force (Sine Peak)	445 N
Stroke (Peak - Peak)	158 mm
Frequency Range	DC 200 Hz



그림 2.3. 활용 진동대 사진 및 진동대 제원

- 상사법칙의 경우 아래 표와 같이 lai(1989)의 2형태 상사법칙을 적용하였으며 상사비는 20으로 함.

표 2.1. 진동대 실험을 위한 모형체 제작

	상사비	제원 (m)	무게 (kg)
레일 바닥면	20	0.16×0.4×0.01	4.98
레일 높이	7.6	0.02	-
열차 차량	20	0.07×0.3×0.05	5.03
열차 차륜	10	0.09	-

- 모형 레일은 PCL, TCL, 레일의 무게를 합산한 후 상사법칙을 적용하여 고정된 형태로 제작하였음.

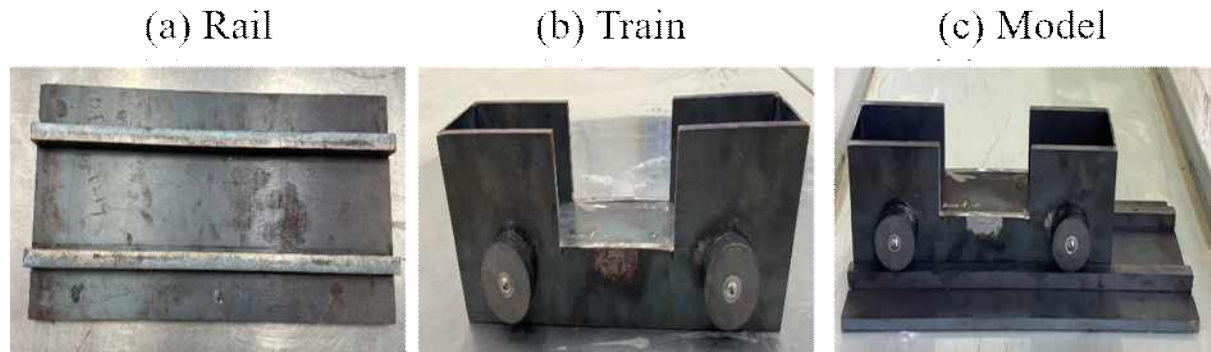


그림 2.4. (a) 레일 베이스와 (b) 열차의 (c) 모형 제작체

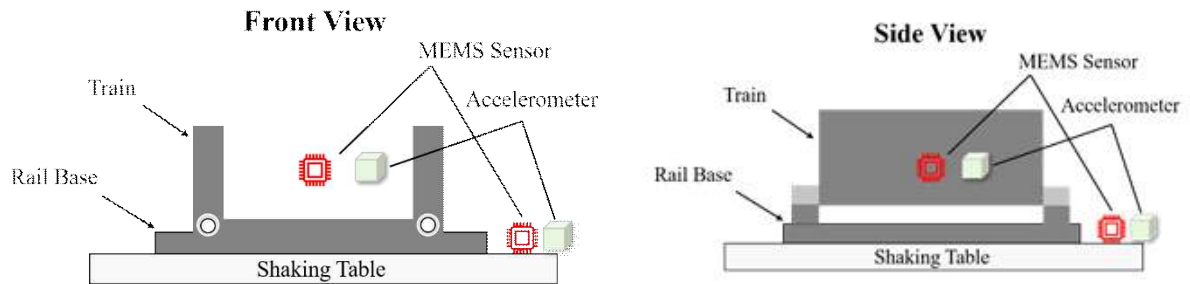


그림 2.5. 진동대 실험 도식화

○ 총 13개의 실제 지진파(국내 6, 해외 7) 및 28개의 백색소음(White noise)을 입력 지진파로 실험 수행함.

- White noise (백색 소음): 전 주파수 영역에 걸쳐서 동일한 수준의 에너지를 지닌 Signal
- 특정 실험체의 고유 주파수 및 주파수영역 별 에너지 증폭/감소 특성을 판단하기에 용이함.

표 2.2. 진동대 실험 지진파

지진파	날짜 (Y.M.D)	규모	PGA (g)	지역
Gyeongju Aftershock	2016.09.19	4.5	0.046	국내
Pohang Aftershock	2018.02.10	4.6	0.015	국내
Odaesan	2007.01.20	4.5	0.136	국내
Pohang	2017.11.15	5.4	0.258	국내
Gyeongju	2016.09.12	5.5	0.42	국내
Gyeongju	2016.09.12	5.5	0.089	국내
Northridge	1994.01.17	6.69	0.089	해외
Northridge	1994.01.17	6.69	0.048	해외
Kobe	1995.01.16	6.9	0.474	해외
Kobe	1995.01.16	6.9	0.074	해외
El Centro	1940.05.19	6.95	0.243	해외
Chichi	1999.09.20	7.62	0.371	해외
Chichi	1999.09.20	7.62	0.096	해외

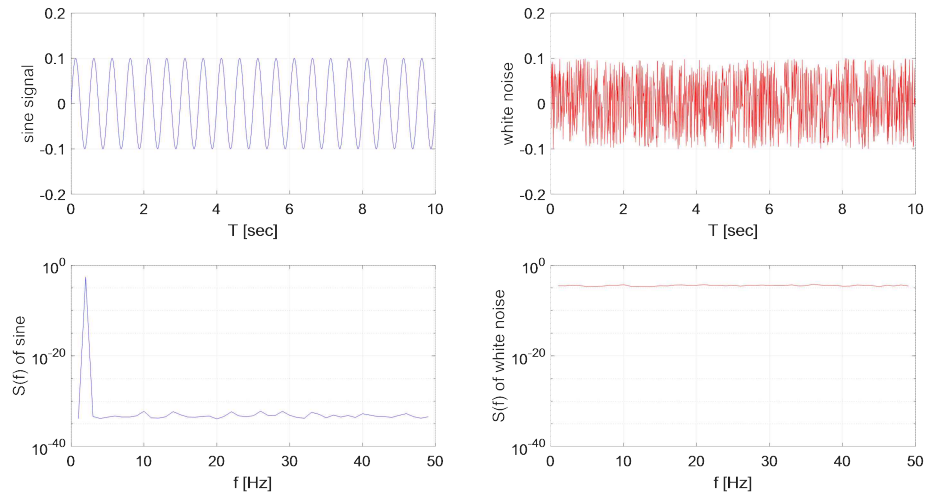


그림 2.6. White noise 특성

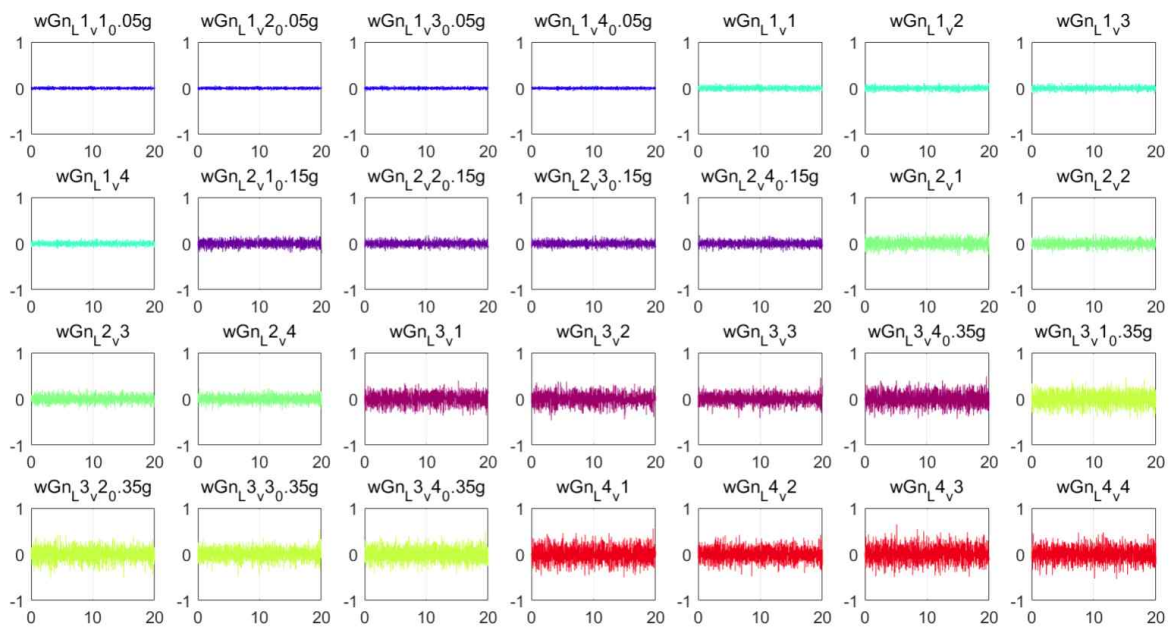


그림 2.7. 백색소음 가진시 진동대위에서의 가속도 계측값

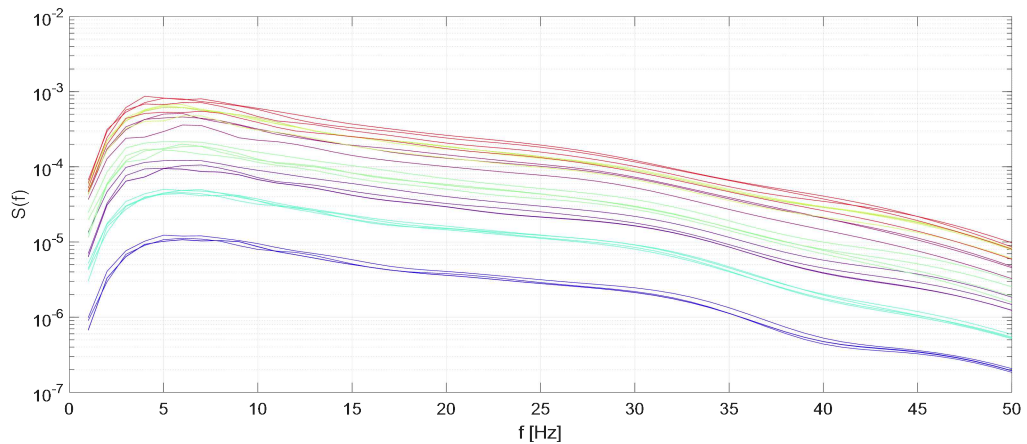


그림 2.8. 백색소음 가진에 대한 진동대위 가속도의 spectrum

■ 궤도-차량 전달함수 도출

○ 가진 데이터 선정

- 궤도-차량 시스템은 차량바퀴와 궤도사이가 분리되어 있는 비연속 시스템임.

- 하중-변위의 비선형이 발생할 것으로 예상됨.
- 다양한 에너지의 실지진파 및 백색소음을 실험에 적용함.

- 백색소음의 생성

- Inverse Fast Fourier Transform (이하 IFFT) 에 기반하여 생성함.
- 진동대의 물리적 한계로 인해 입력진동의 에너지분포가 약간 고르지 못함

○ 실험 데이터 Post Processing

- 본 연구에서 적용할 계측시스템의 sampling frequency(100 Hz)
 - signal의 Fast Fourier Transform (이하 FFT)를 수행 시, 유효한 주파수 영역은 0~50 Hz임.
 - 원활한 전달함수 도출을 위해 실험데이터에 low pass filter (50 Hz)를 적용함
- 원활한 전달함수 산정을 위해 smoothing 기법을 적용함.

○ 실제 지진파 전달함수 도출

- 10 Hz 이상 주파수 영역에서 전달함수가 증가하는 것을 확인할 수 있음.
- 지진파의 규모(M_w)가 커질수록 전달함수가 커짐.
 - 지진파의 규모가 커질수록, 차량가속도와 지진파 간의 에너지 비가 더욱 커짐: 궤도-차량 시스템이 비선형적 거동을 나타냄.
- $M_w = 6$ 을 기점으로 지진파에 대해서 2개의 전달함수를 도출하였음.

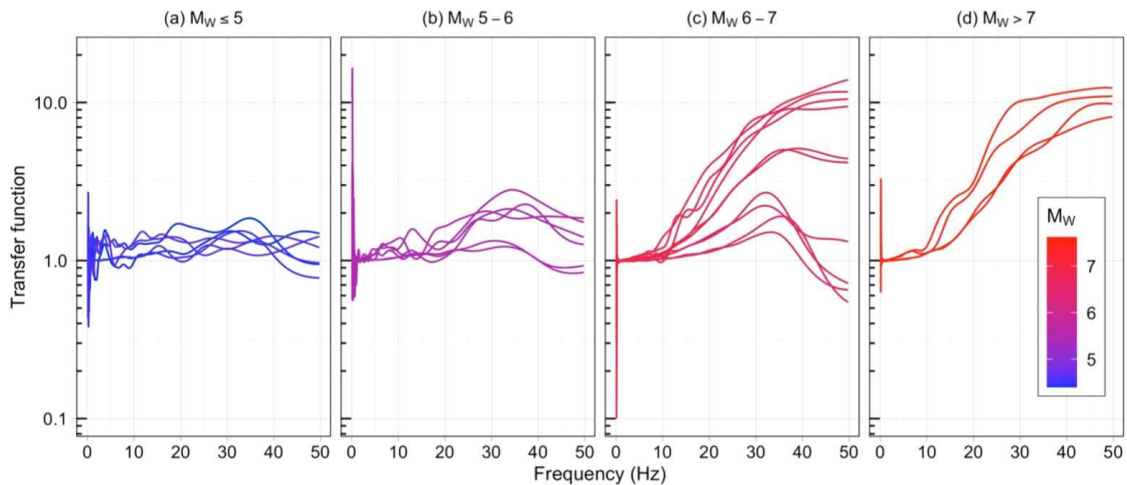


그림 2.9. 지진파별 전달함수 산정 결과

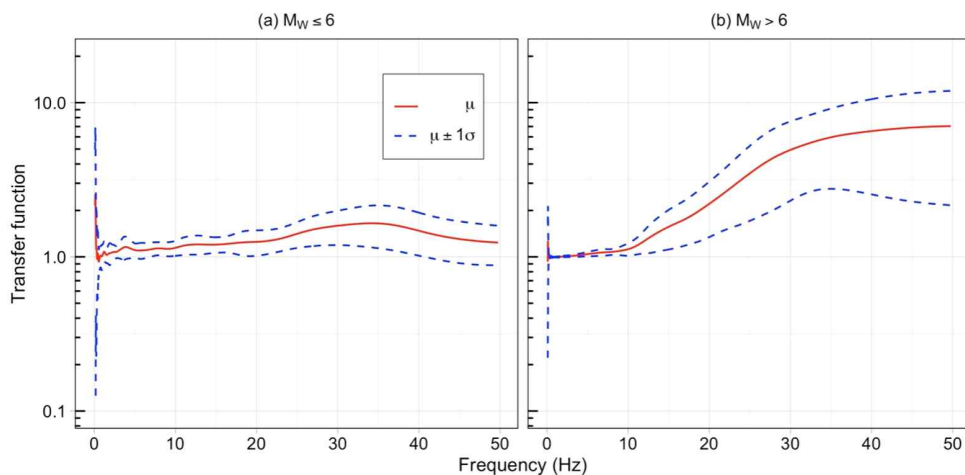


그림 2.10. 규모에 따른 궤도-차량 전달함수 모델

○ 백색소음을 통한 전달함수 도출

- 10 Hz 이상 구간에서 전달함수의 크기가 커짐.
- 백색소음의 에너지 크기가 커질수록 10 Hz 이상 구간에서의 전달함수 값이 증가함.
- 백색소음의 spectrum 최대치를 기준으로 10^{-4} (단위 m^2/s^3) 전후로 산정된 전달함수들을 나눈 후,

전달함수 모델을 산출함.

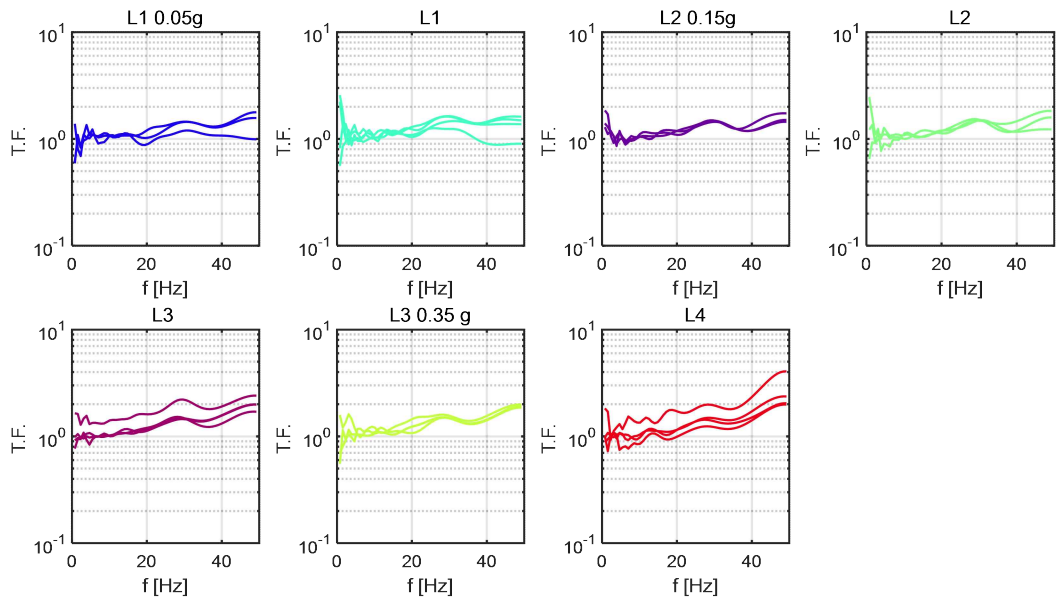


그림 2.11. 백색소음 에너지별 전달함수 산정 결과

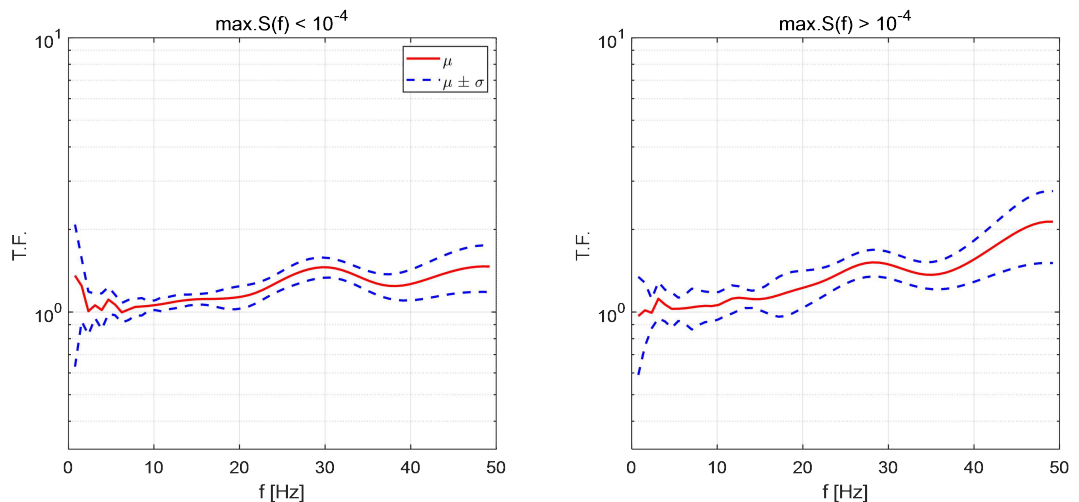


그림 2.12. 백색소음 기반 전달함수 모델

○ 대차-객차 전달함수 개발

- KTX의 대차에서 측정한 열차진동 가속도가 존재함. KTX 대차에서의 가속도 관측은 상시 관측은 아니며, 시험 데이터로만 존재하여 상시활용은 불가능함.
- 객차의 댐핑효과를 확인하기 위해 대차에서 관측한 열차의 상시진동과 객차 바닥에서 관측한 열차의 상시진동을 비교하여 대차와 객차의 전달함수를 개발함.
- 객차의 댐핑효과에 의해 고주파수에서 1보다 낮은 전달함수가 나타남.

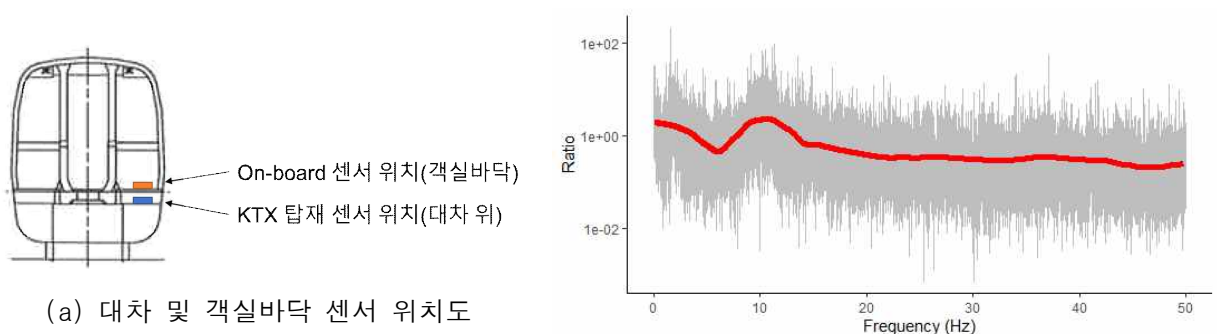


그림 2.13. 대차-객차의 전달함수 및 전달함수 모델

라) 교량 구조 지진하중 전달함수 개발

■ 교량구간 전달함수 개발을 위한 모델링 및 전달함수 도출

○ 실증 열차구간에서의 교량구간 전달함수 도출을 위한 교량정보 수집

- 총 11개 연속교 타입 교량으로 교각 Type은 PSC Box, Steel Box, Arch교량으로 구분함.
- 익산-정읍 실증구간 내 교각의 Cap, Footing을 제외한 기둥 부분의 길이는 답사 결과 5~15 m 사이로 위치마다 달라짐.

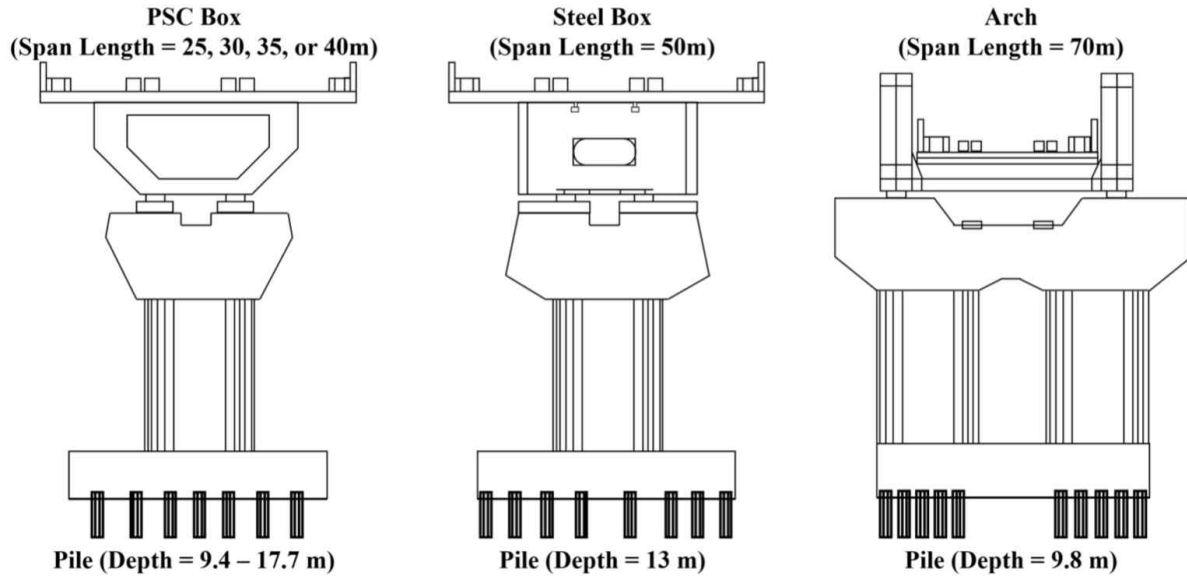


그림 2.14. 익산-정읍 실증구간 내 교량의 유형

○ 교량구간 진동응답의 산정

- 열차의 탈선에 직접적인 영향을 미치는 교량 직각방향의 거동은 교각의 특성에 의해서 결정됨.
 - 교각 및 주형의 수평거동에 대한 모델링을 수행함.
- 교량구간별 단자유도 모델의 구축
 - 내진설계기준 및 교량유지관리 지침을 활용한 교각 거동 모델링
 - 콘크리트 설계기준에 기반한 교각 단면 모델링
 - 교각의 길이가 짧은 높은 강성의 구조물: 선형 모델 기법 적용

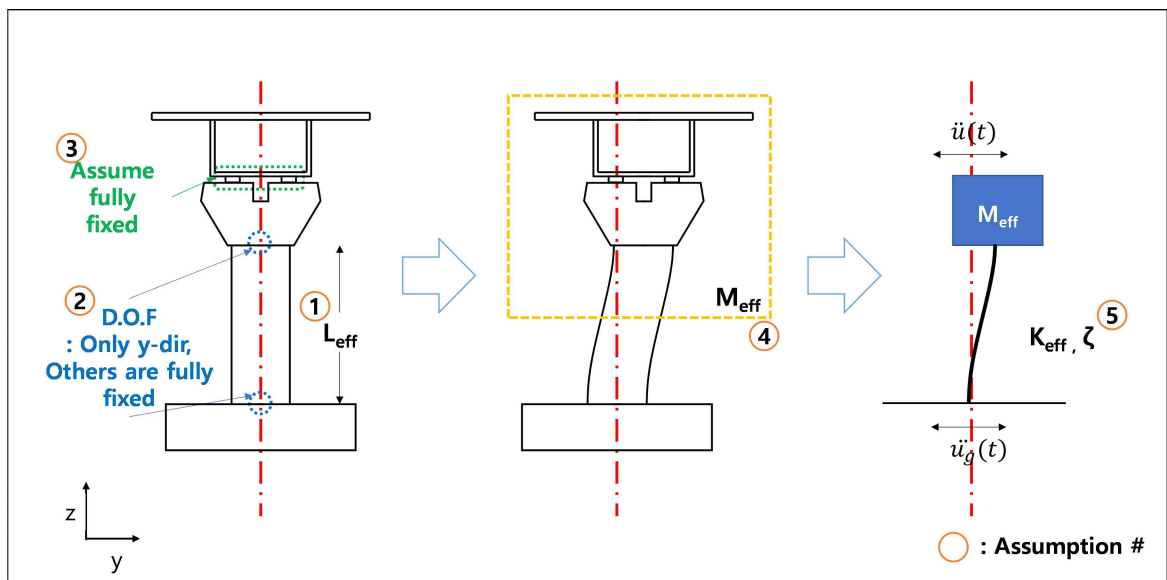


그림 2.15. 교량 단자유도 모델링 중 교각 거동 가정: 내진설계기준 및 교량유지관리지침 활용

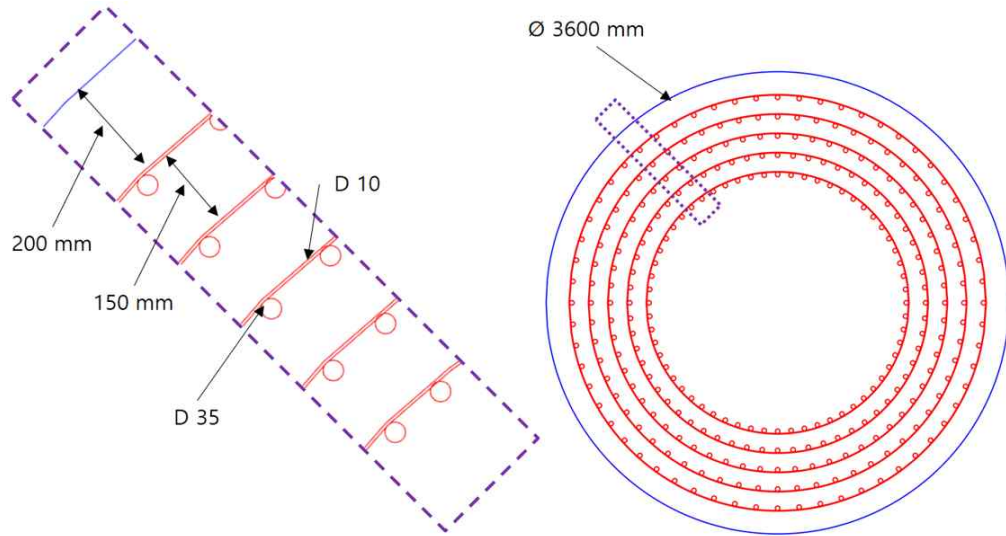


그림 2.16. 교량 단자유도 모델링 중 교각 단면 가정: 콘크리트설계기준 활용

표 2.3. 실증 구간 내 교량 단자유도 모델링 결과

Case	L_{eff} (m)	Span (m)	M_{eff} ($kg \times 10^6$)	$M_{eff}/Span \text{ length}$ ($kg \times 10^3/m$)	I_{eff} (m^4)	K_{eff} ($kN/m \times 10^6$)	f_n (Hz)	T_n (s)
1	14	25	1.37	54.8	6.955	0.838	3.94	0.25
2	14	30	1.56	52	6.955	0.838	3.68	0.27
3	14	35	1.76	50.3	6.955	0.838	3.47	0.29
4	14	40	1.95	48.8	6.955	0.838	3.3	0.3
5	14	50	1.54	30.8	6.955	0.838	3.71	0.27
6	14	70	2.16	30.9	6.955	1.675	4.43	0.23

○ 교량구간 교량응답 해석 및 전달함수 산정

- 위의 궤도-열차 전달함수 도출에 활용된 지진파를 적용함.
- 단자유도 모델의 시간이력 해석을 통한 교량구간 응답을 산정하였으며, 수치해석기법으로 Newmark 방법 및 Duhamel 방법을 적용함.

- 해석을 통해 구해진 전달함수와 이론적 전달함수의 비교

→ Peak Frequency 보다 낮은 주파수 영역: $M_w > 6$ 인 상대적으로 큰 지진파에 기반한 전달함수 값들은 이론값에 수렴하는 반면, $M_w \leq 6$ 인 작은 지진파는 이론값에 수렴하지 못하며, 평균값 또한 이론값에 비해서 높게 나옴.

→ Peak Frequency 보다 높은 주파수 영역: $M_w > 6$ 인 상대적으로 큰 지진파에 기반한 전달함수 값들은 이론값에 수렴하지 못하는 반면, $M_w \leq 6$ 인 작은 지진파는 이론값에 수렴함.

○ 교량구간 전달함수 모델

- $M_w = 6$ 을 기점으로 교량모델에 대해서 2개의 전달함수를 도출하였음.

→ 전달함수의 정규화: 구조물의 고유 주파수(f_n)를 활용한 정규화

- 주파수 영역대 ($f/f_n < 1$ or $f/f_n > 1$) 및 지진파의 크기에 따라 variation의 크기가 달라짐

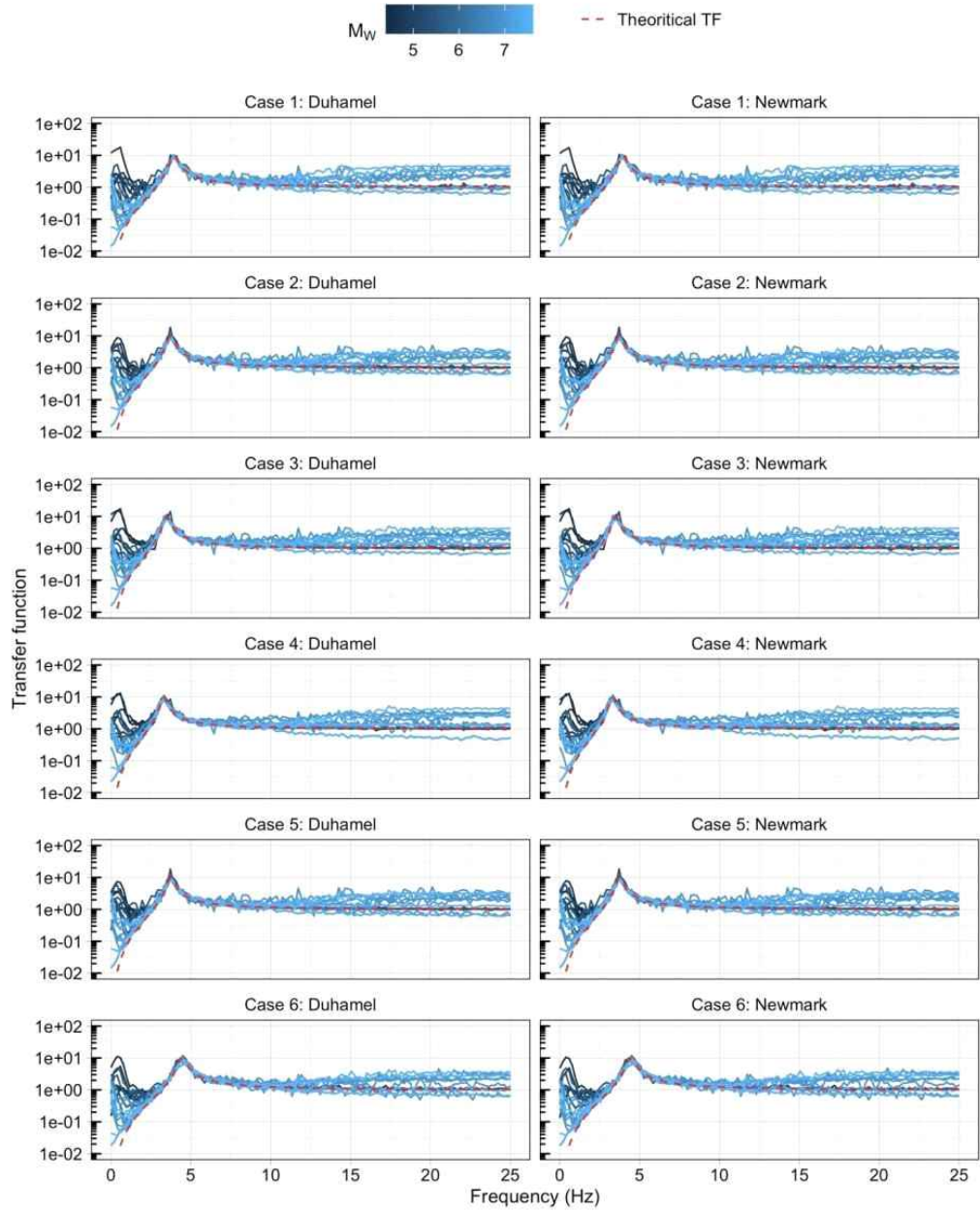


그림 2.17. 실증 구간 내 교량 단자유도 전달함수 산정

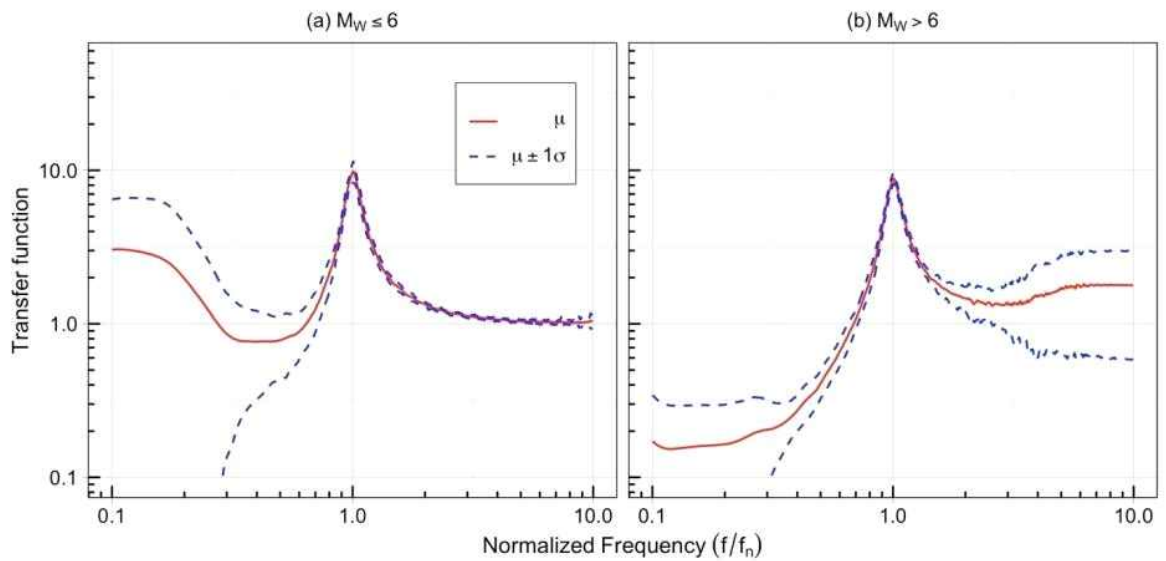


그림 2.18. 실증구간내 교량 단자유도 전달함수 모델

마) 지진 진동하중 계측기술 개발 및 DB구축

■ 개요

- 향후 기계학습에 활용할 수 있는 지진 하중 구조물 응답 결과 DB 구축
 - 진동대 실험을 통해 얻은 실측 시간이력, 실지진파 및 실지진파에 전달함수를 적용한 시간이력을 분리하여 Database 구축
 - 지진파명, 센서 종류, PGA, 계측위치 등이 포함되도록 Database 구축

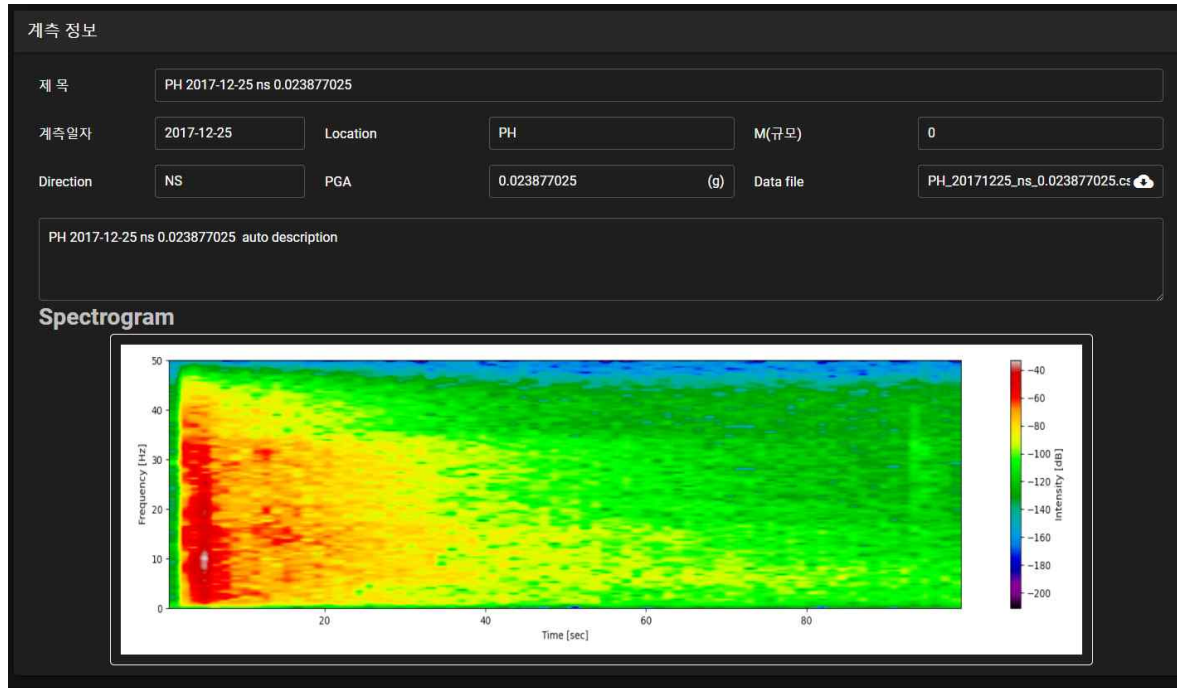


그림 2.19. 지진 가속도 계측자료 예시

■ 결과

- 계측지진파 시간이력 150개, 실지진파 시간이력 170개 및 실지진파에 전달함수를 적용한 시간이력 340개 등 총 660개에 대한 Database를 구축함.

바) 기계학습 및 정보 시스템과의 DB연계방안 수립

■ 개요

- 본 연구에서 개발하고자 하는 시스템은 실시간으로 계측된 시간이력을 분석하여, 지진의 발생여부를 감지하여야 함.
- 따라서, 시간에 따른 데이터 특성의 변화를 감지할 수 있는 분석기법을 적용해야 하며, 이를 위해 시간에 따른 데이터 특성변화를 분석할 수 있는 시간-주파수 해석기법을 적용함.
- Short Time Fourier Transform (STFT), Continuous Wavelet Transform (CWT) 및 Wigner-Ville Distribution (WVD) 기법을 적용함.

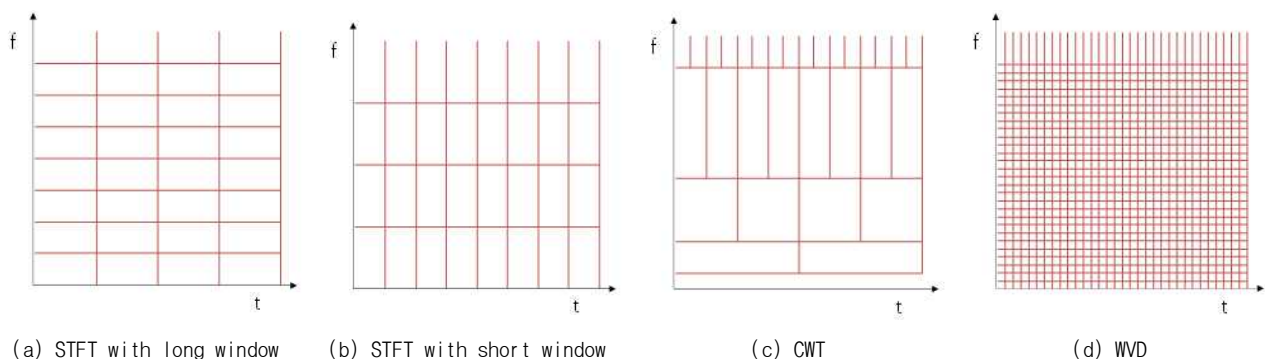


그림 2.20. 시간-주파수 해석 기법의 해상도 차이

■ 지진 및 열차 시간이력의 시간-주파수 해석기법 적용

- 교량 응답 모델링 및 성토구간 모델링을 통해 구한 지진 응답에 대해서 시간-주파수 해석기법을 적용함.
- 교량구간 응답 지진 해석 결과
 - 1,000년 재현주기로 조정된 포항 지진 가속도 및 교량(BR3) 응답에 대한 STFT, CWT, WVD를 수행함.
 - 최대가속도가 발생한 10초 인근에서는 교량을 거치면서 각 교량 고유주파수 주변의 에너지가 증가하였으며, 고유주파수 이외의 주파수 영역에서는 에너지가 감소함.
 - 교각의 높이에 따라 지진파의 응답특성이 크게 달라지며 BR2의 경우 높은 감쇠계수의 영향으로 인해 에너지의 감소가 더 명확하게 나타남.
 - 10초 이후 구간의 경우, 시간이 지날수록 각 교량의 고유주파수 인근 영역의 에너지만이 상대적으로 덜 감소함.
 - 포항지진 및 교량응답에서도 WVD가 시간에 따른 에너지의 변화가 가장 급격하게 나타나며, STFT가 가장 변화의 폭이 적음.

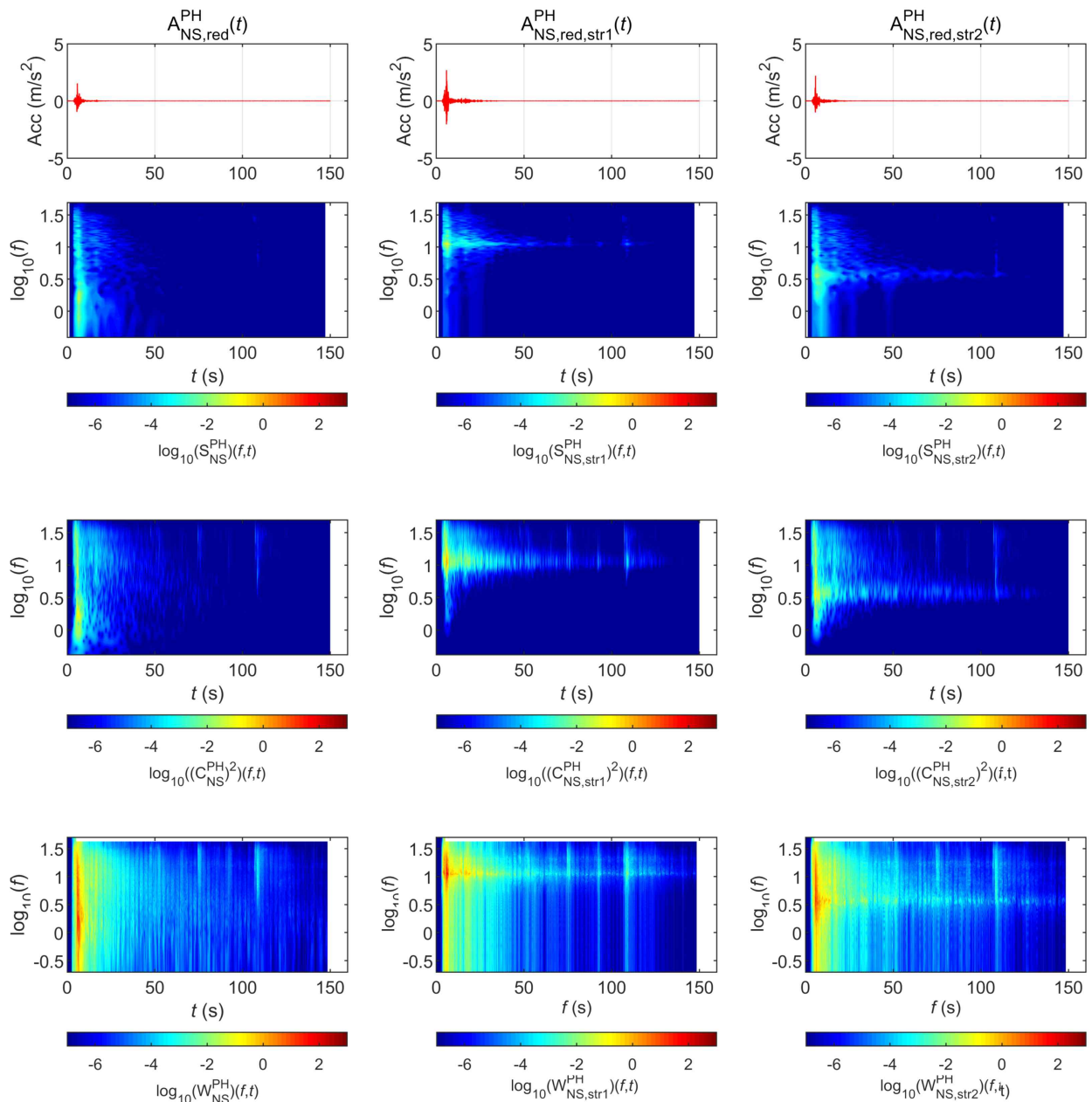


그림 2.21. 1000년 재현주기 포항 지진파 교량구간(BR3) 응답에 대한 STFT, CWT, WVD 결과 비교

○ 성토구간 응답 지진 해석 결과

- 1,000년 재현주기로 조정된 하치노헤 지진 가속도 및 지반(109.25k구간) 응답에 대한 STFT, CWT, WVD를 수행함.
- 경주지진 및 포항지진과는 다르게, 최대가속도가 발생하는 30초 이후에서도 데이터가 종료되는 시간까지 0.3~10 Hz ($10^{-0.5}$ to 10^1) 영역에서 에너지가 높게 나타나는 것을 확인할 수 있음.
- 전 시간구간에 걸쳐서 10 Hz 이상의 에너지가 성토구간에서는 감소한 반면, 10 Hz 이하 에너지에서는 감소 폭이 낮은 것을 확인함.
- 하치노헤 지진 가속도 및 성토구간 응답 해석 시, WVD 방법이 STFT 및 CWT에 비해서 에너지 변화에 가장 민감하게 반응하며, 시간 축 및 주파수 축 해상도 또한 가장 높은 것을 확인함.
- WVD는 해석을 수행한 window 경계에서 약간 값이 낮게 나오며 이에 따라 contour상에서 a set of vertical lines가 확인됨.

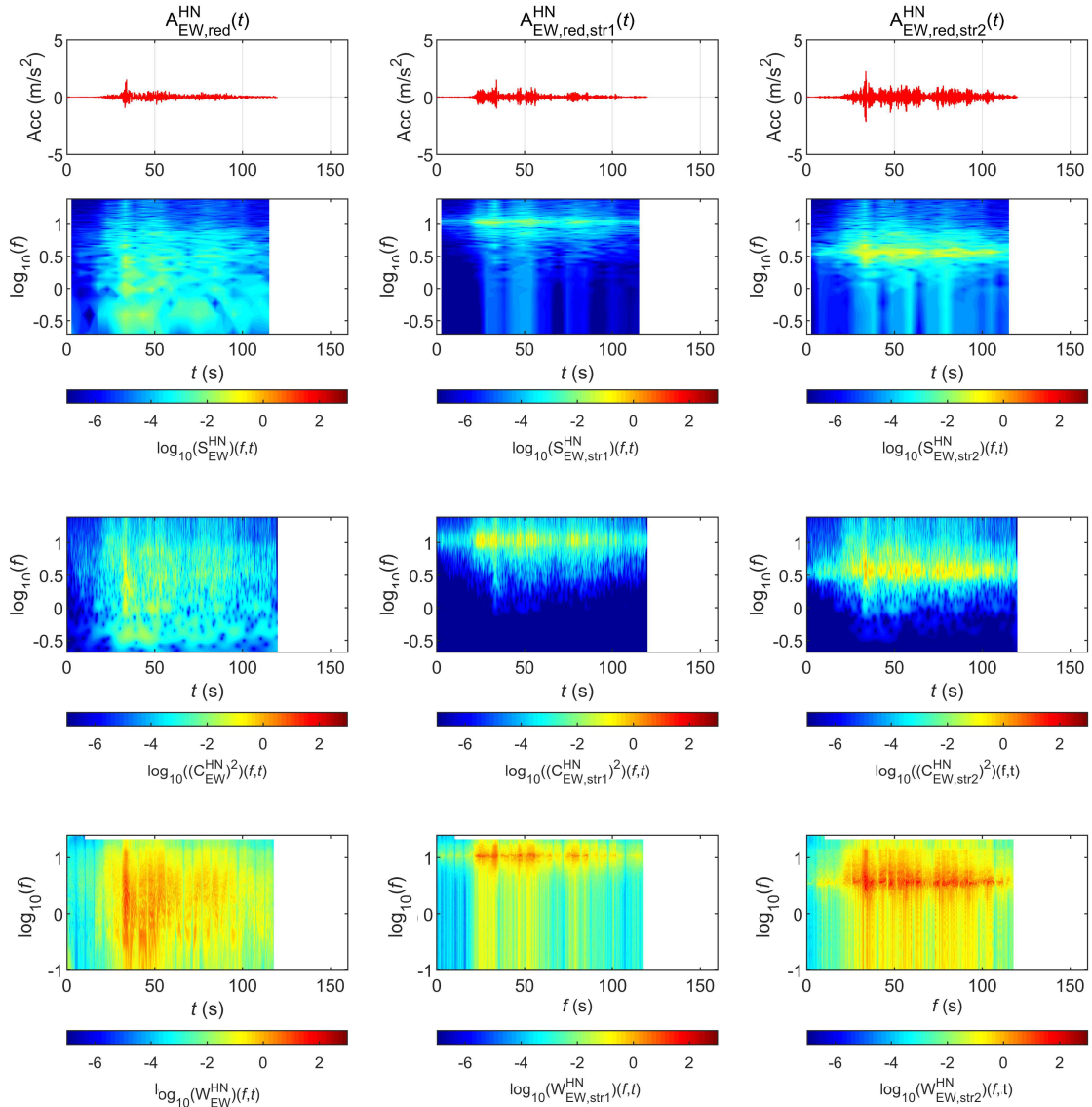


그림 2.22. 1000년 재현주기 하치노헤 지진과 성토구간(109.25k) 응답에 대한 STFT, CWT, WVD 결과 비교

○ 열차 진동가속도 분석

- 열차의 횡방향 가속도 측정데이터 및 STFT, CWT, WVD 분석하였음.
- 전 시간 구간에 걸쳐서 약 100 Hz 에 energy가 높게 나타나는 것으로 확인함.
- 해당 에너지는 2차 가속이 이루어지는 200초부터 1차 감속이 종료된 600초 에서 더욱 높게 나타났 으며, 이는 열차 작동 시, 일정수준의 회전을 유지하는 열차 요소에 의한 결과임.
- 10~30 Hz (101~101.5) 영역에서는 속도에 따라서 주파수가 증감하는 2개의 라인 성분이 존재하며,

이 라인 성분은 속도의 증가에 따라서 주파수뿐만 아니라 에너지 자체도 증가함.

- 두 개의 라인 성분들은 속도와 직접적으로 연관된 열차요소(바퀴 및 기어)와 연관되어 있는 것으로 판단 됨.

- 3 Hz (100.5) 이하 주파수 영역에서는 가속 및 감속시에 높은 에너지 레벨이 나타나고, 일정한 속도로 주행 시에는 낮은 에너지로 확인됨.

- 방법별 특징을 살펴보면, STFT의 경우 전체적인 데이터의 경향성은 모두 명확하나, 3 Hz 이하 영역에서의 해상도가 낮게 확인되며, 이는 STFT자체의 해상도와 더불어 y축이 log-scale로 표현되었기 때문임.

- CWT 의 경우 고주파수 영역에서 경향성이 명확하게 나타나지만, 가속 및 감속 장치와 연관된 3 Hz 이하 저주파수 성분은 감지하지 못함.

- WVD의 경우, 위의 두 방법과는 다르게 3 Hz 이하 저주파수 영역에서 에너지 증감이 명확하게 확인됐으며, 3 Hz 이상 주파수 영역에서 시간-주파수 영역에서의 에너지 변화 경향성이 명확하게 확인됨.

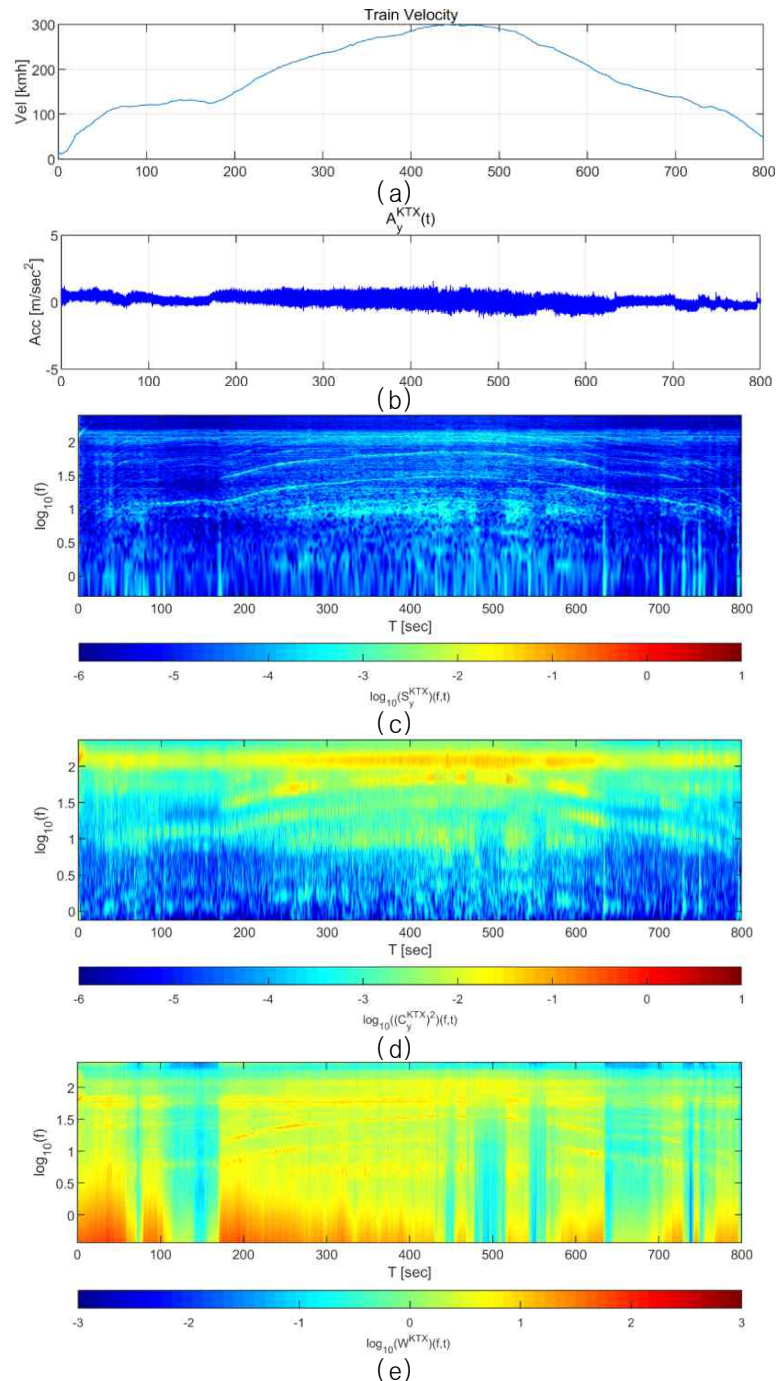


그림 2.23. 열차 진동가속도 결과: (a) velocity (b) lateral acceleration time series (c) STFT (d) CWT (e) WVD

■ 지진-열차 시간이력의 superposition 및 해석

○ 데이터 병합 방법

- 데이터 신뢰성 확보를 위해 Upsampling 기법 적용
- 열차 속도에 따라 열차 진동가속도의 특성이 달라지기 때문에, 열차 운행 시 1차 가속 (0~50 sec, zone 1), 저속 등속 (130~180 sec, zone 2), 2차 가속 (220~270 sec, zone 3), 최고 속도 (400~450 sec, zone 4), 1차 감속 (550~600 sec, zone 5), 2차 감속 구간 (720~770 sec, zone 6) 을 선정하고, 각각의 열차 데이터와 지진데이터의 초기 60 sec 구간을 중첩함.

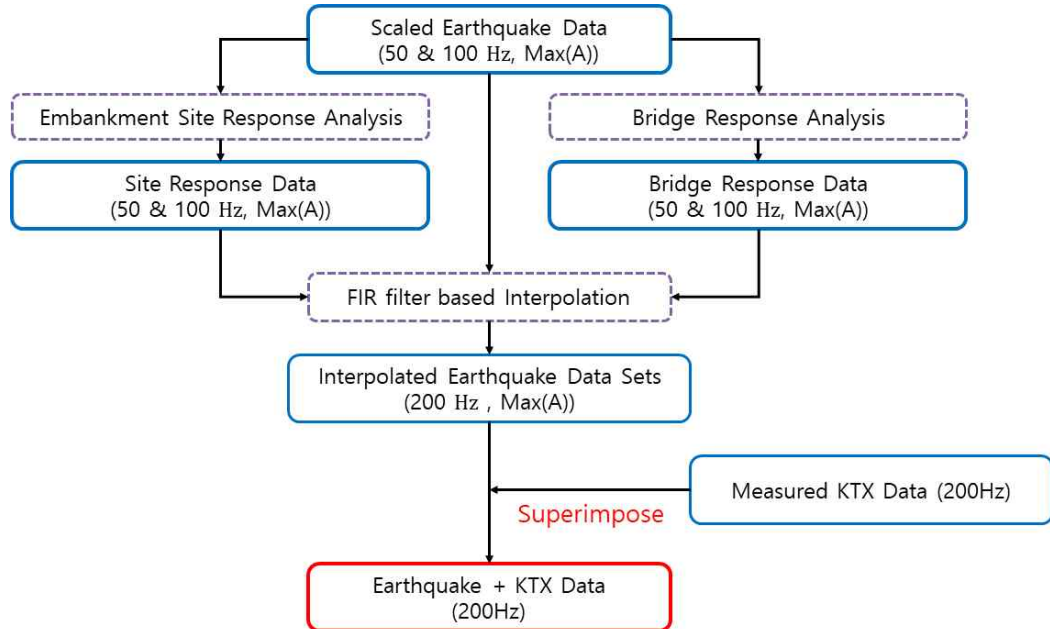


그림 2.24. 데이터 병합 플로우 차트

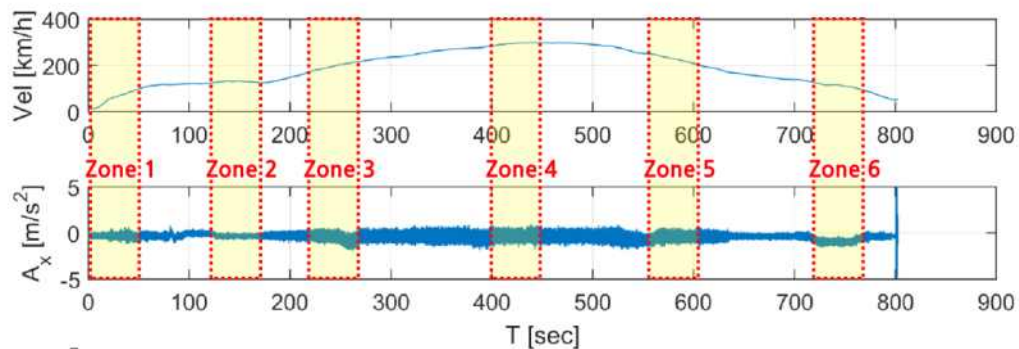


그림 2.25. 속도 대역 별 데이터 병합 구역

○ 교량 구간 병합 데이터 분석

- 1,000년 재현주기로 조정된 포항 지진의 교량 응답이 중첩된 열차응답에 대한 STFT, WT, WVD 결과를 분석함.
- STFT의 경우, 교량의 고유주파수 인근에서 열차데이터와 비교하여 명확한 차이가 나타나지만, 4 Hz 이상의 주파수 영역에서는 명확한 차이가 나타나지 않음을 확인함.
- CWT의 경우 STFT와 유사한 결과를 확인 하였으며, WVD의 경우 교량응답에 대해서 전 시간-주파수 영역에서 열차데이터와 비교하여 확연한 차이를 보임.

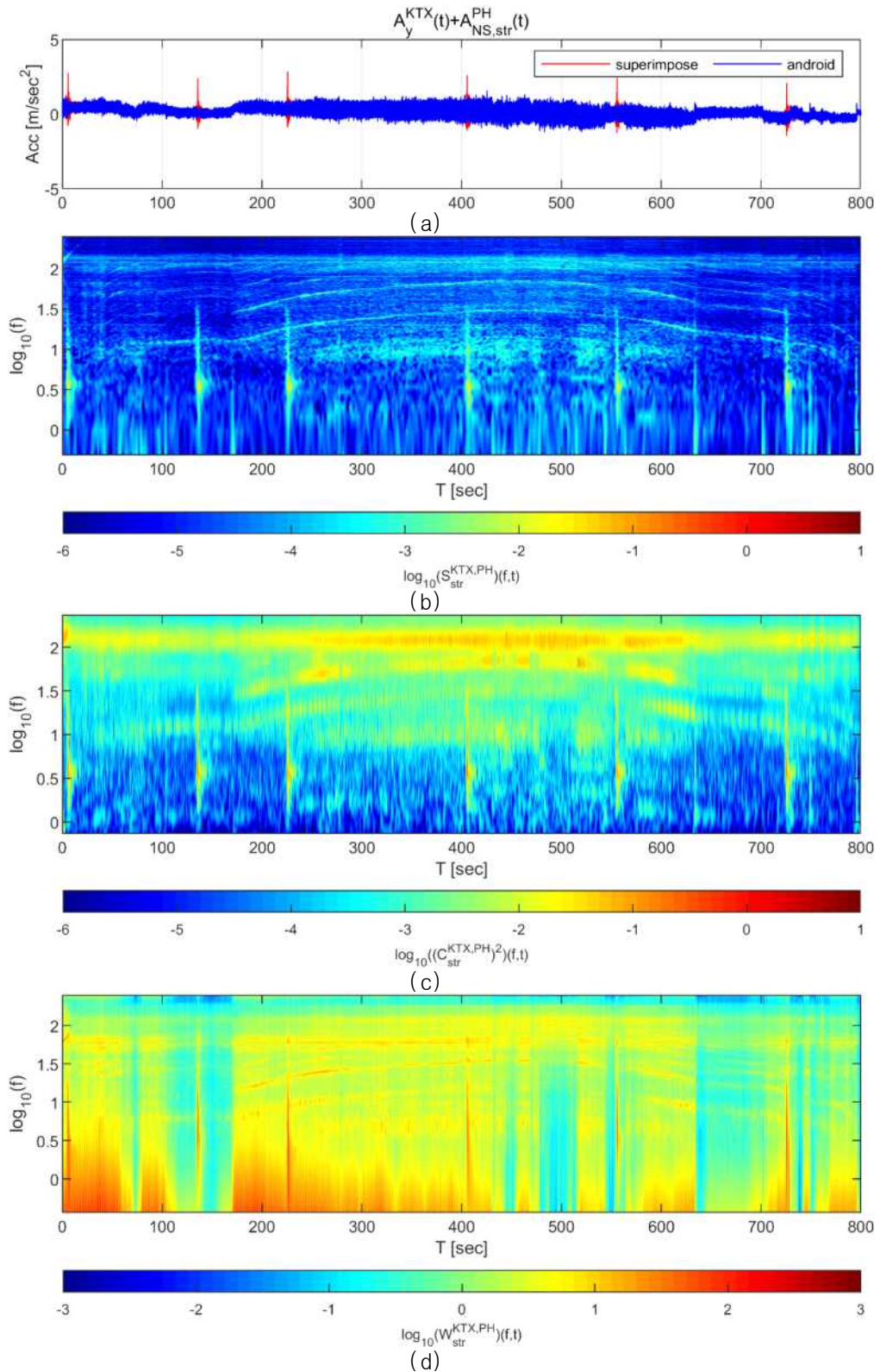


그림 2.26. 열차 진동가속도 및 교량구간(BR3) 지진 응답 하중 중첩 결과에 대한 스펙트로그램 (포항지진, 재현주기 1000년) (a) lateral acceleration time series (b) STFT (c) CWT (d) WVD

○ 성토 구간 병합 데이터 분석 결과 (109.25k 구간)

- 1,000년 재현주기로 조정된 포항 지진의 KP 109.25k지반 응답이 중첩된 열차응답에 대한 STFT, CWT, WVD 결과를 분석함.
- STFT의 경우, 1,000년 재현주기 지반응답은 3 Hz(100.5) 이하 저주파수 영역에서 열차데이터와 비교하여 명확한 차이를 확인함.
- 포항 지진이 경주지진과 비교하여 저주파수 영역에서 높은 에너지를 지니고 있고, 지반응답에서도

이 저주파수 영역의 에너지가 증폭되었기 때문임. WT에서도 STFT와 유사한 결과를 확인.

- WVD의 경우, STFT 및 CWT와 마찬가지로 명확한 차이를 확인

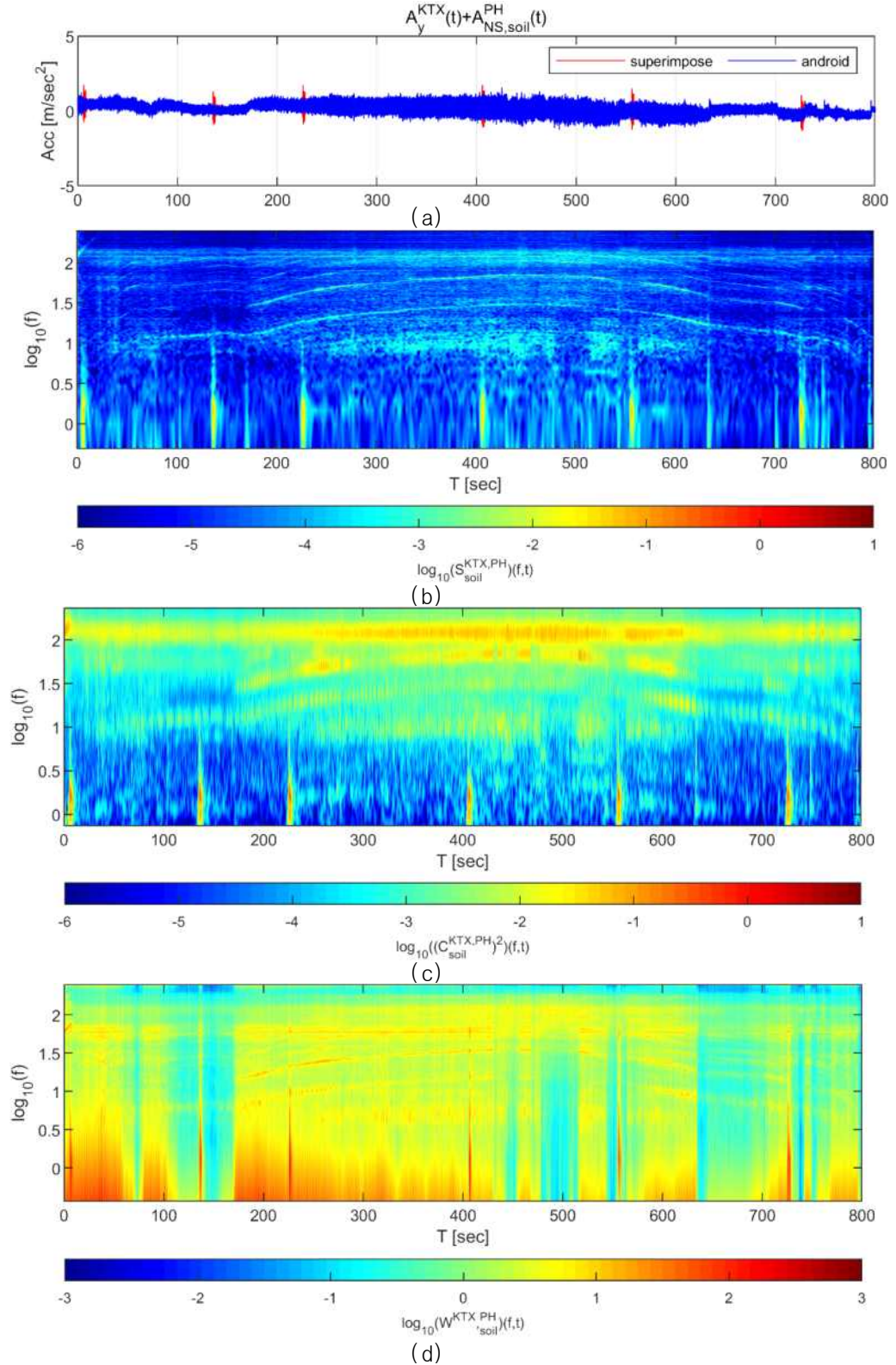


그림 2.27. 열차 진동가속도 및 성토구간(109.25k) 지진 응답 하중 중첩 결과에 대한 스펙트로그램 (포항지진, 재현주기 1000년) (a) lateral acceleration time series (b) STFT (c) CWT (d) WVD

(2) (CTE B) 열차 진동하중과 지진진동 하중을 구분하는 실용화 단계 기계학습 알고리즘

가) 열차 운행 진동 특성 추출 기술 개발

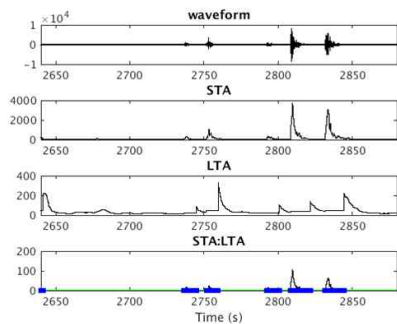
■ 개요

○ 지진 탐지(Seismic Detection) 방법은 크게 Seismic Signal Processing, Machine Learning, Deep learning으로 구분될 수 있음.

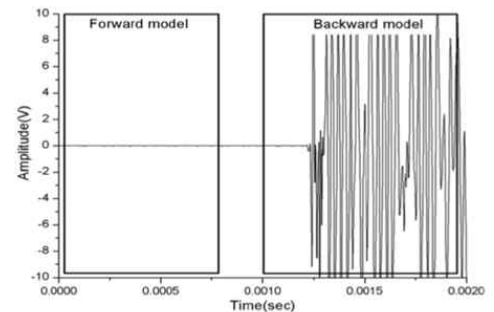
- Seismic Signal Processing: 진동 데이터의 신호적 특성을 추출하여 이상 진동을 검출하는 방법
- Machine Learning: 진동 데이터의 특성을 입력으로 하여 상시 진동과 지진 진동을 구분하는 패턴을 입력 데이터에서 찾도록 학습하는 방법
- Deep Learning: 진동 신호 데이터 자체를 입력으로 하여 별도 특성 추출 없이 딥러닝 모델을 통해 진동 판별 패턴을 탐지하는 방법

○ 신호 처리 연구들에서 활용하고 있는 다양한 진동 피쳐들을 조사하고 이를 추출할 수 있는 프로그램을 개발함.

- STA/LTA: STA는 Short-Term Average (단기 진폭 평균)을 나타내고, LTA는 Long-Term Average (장기 진폭 평균) 나타내는데, 전반적인 진폭인 LTA에 비해 최근 진폭인 STA의 값이 크면 지진으로 판별하는 방법
- AIC (Akaike Information Criterion): AIC는 통계 모델이 데이터를 얼마나 잘 표현하는지 평가하는 척도로 특정 시각을 기점으로 전/후 AIC값을 구하고 합한 값이 작은 지점을 지진 발생으로 추정하는 방법
- Kurtosis, Skewness: 파형의 첨도(뾰족한 정도)와 왜도(비대칭 정도)를 나타내는 값으로 일반 진동에서 얻어지는 일반적인 값의 차이에 기반해 지진 판별
- Waveform Cross Correlation: 지진파에 대한 Template(들)을 구성하고, 입력되는 진동이 Template과 얼마나 유사한지 평가하여 지진 감지 (유사도 측정을 위해 상관계수 사용)



$$R = \frac{STA}{LTA} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X(i)}{\frac{1}{M} \sum_{j=1}^M Y(i)}$$



(a) STA/LTA를 활용한 지진 판별 예시

(b) Akaike Information Criterion 예

그림 2.28. STA/LTA 지진 판별 예시 및 AIC예

■ 결과

○ 열차 내 지진 진동 특성 추출기를 Python 프로그램 형태로 개발

- 열차 운행 중 상시 진동이 발생하는데, 진동의 특성을 분석하면 탑승자 만족도를 높이기 위한 운행 가이드라인 구축 및 위험 운행 구간 판별 등에 활용 가능함.
- 본 프로그램은 열차 진동을 X, Y, Z 3개 축에 대한 Raw Signal(Time-Intensity Data)로 입력 받아, 다양한 진동 특성(Feature)으로 변환 및 추출함.
- 구체적으로 총 276개 특성으로 변환해 주는데, 그 중 42개는 Raw Signal에서 추출한 특성들로 X, Y, Z축 각각에 대하여 어떤 구간 내 발생 진동의 통계적 특성(평균, 최댓값, 최솟값, 표준편차, 왜도, 첨도 등)과 주파수 특성(FFT 변환 후 주파수 별 통계적 특성)으로 구성되고, 그외 234개는 Raw Signal를 IMF1, IMF2, IMF3으로 파형 변환을 한 뒤, 각각에 대해 위와 같은 방식으로 추출하여 얻은 특성들임 (*IMF는 진동 특성을 분석할 때 자주 사용하는 진동 신호 변환 기법).

○ 주요 기능

- 실험을 위해 열차 상시 진동 데이터에 이상 진동을 섞는(Superposition) 기능임.

- 입력된 진동 Signal에 대하여 276개 진동 특성(Feature)를 반환함.

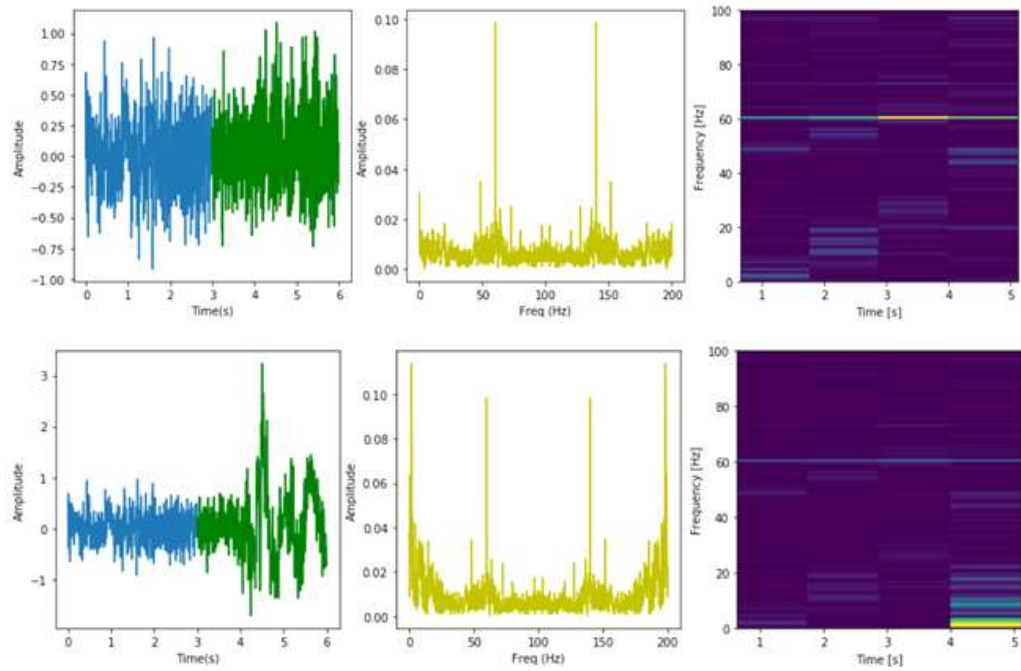


그림 2.29. 진동 데이터 FFT, SFFT 변환 결과 (상: 일반 열차 진동, 하: 열차 + 지진 진동)

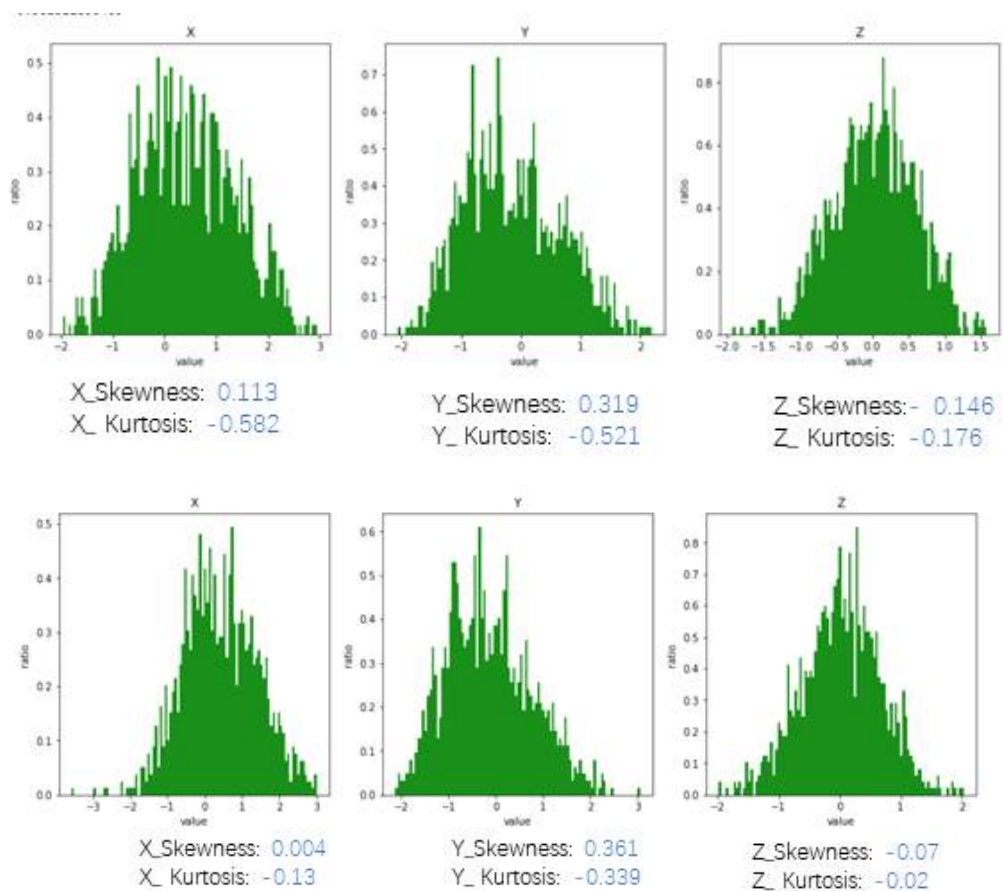


그림 2.30. Kurtosis와 Skewness (상: 일반 열차 진동, 하: 열차 + 지진 진동)

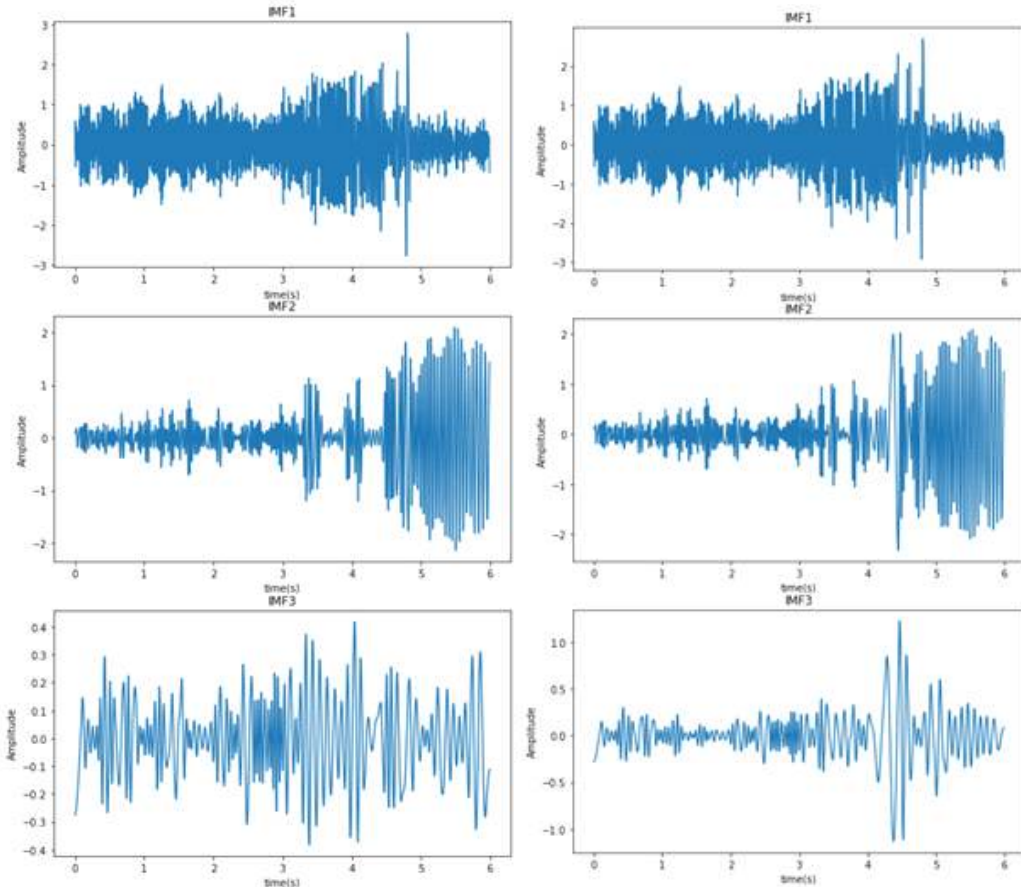


그림 2.31. IMF 변환 결과 (좌: 일반 열차 진동, 우: 열차 + 지진 진동)

나) 지진-열차 진동 하중 판별 기계학습 베이스라인 모델

■ 개요

- 일반적인 기계학습과 같이 피처를 추출하고 모델 학습 뒤, 새로운 데이터에 테스트하는 과정을 수행.
- Signal Processing 기반 방법에서 요구되는 Threshold 선택을 기계학습 기반 방법을 하지 않아도 된다는 장점이 있음.
- Seismic Detection에 사용되는 Feature들 예
 - Signal Processing을 통해 추출되는 값
 - Covariance Matrix (x, y, z축 별 signal 간)
 - IMF (Intrinsic Mode Function)
- 기계학습 알고리즘을 조사하고, 이를 열차-지진 진동 데이터에 적용하여 열차 운행 중 지진 판별 기계학습 모델 개발.

■ 결과

- 열차 운행 중 지진 발생 여부를 자동으로 판별하기 위한 프로그램을 개발
 - 본 프로그램은 X, Y, Z 3개 축 각각에 대하여 시간-진동 세기 데이터를 입력 받고, 이를 학습된 4가지 기계학습 모델을 통해 상시 진동 혹은 지진 진동 여부를 출력함.
 - 기계학습 모델은 Logistic Regression, SVM, Random Forest, XGBoost 방법이 적용되었으며, 각 모델 별 판별 예측 결과를 출력함.
 - 또한 열차 속도에 따라 예측 결과를 받아볼 수 있는데, 상시 진동이 적은 저속 구간과 상시 진동이 큰 고속 구간에 대해 각각 학습된 모델의 예측 결과를 출력함.
- 7가지 기계학습 알고리즘 구현
 - Logistic regression: 독립변수와 종속변수의 관계를 함수로 표현하고, 이 함수를 기반으로 주어진 독립변수에 대응하는 종속변수를 예측함. 이때 종속변수는 위암 여부가 되고, 위암 여부에 대한 확률을 계산함.
 - SVM (Support Vector Machine): 머신러닝의 한 분야로 각 클래스에 속하는 데이터가 벡터 공간 상

의 벡터로 주어졌을 때, 두 클래스 사이에서 가장 큰 margin을 가는 hyperplane을 찾는 알고리즘.

- Random Forest: 랜덤 포레스트는 원본 데이터에서 무작위로 데이터를 추출하여 여러 개 결정 트리 분류기 모델을 생성한 후 새로운 데이터가 들어왔을 때 각 모델의 결과값을 최다 득표 보팅을 통해 조합함. 특히 모든 피쳐들을 똑같이 다 사용하면 개별 모델의 예측값이 유사해질 수 있기 때문에, 각 개별 모델 학습 시 사용하는 피쳐 집합도 매번 임의로 구성하는 특징이 있음.

- AdaBoost: 대표 결정 트리 기반 부스팅 알고리즘으로 AdaBoost 방법이 있으며, 여러 결정 트리를 순차적으로 연결하되, 앞 모델이 잘못 예측한 데이터 샘플에 더 가중치를 주어 다음 모델이 해당 샘플을 더 집중적으로 배울 수 있도록 하는 것이 특징임.

- XGBoost: AdaBoost가 잘못 분류된 샘플에 한해 가중치를 부여하는 방식이었다면, XGBoost는 전체 샘플에 대해 Gradient값을 가중치를 부여하는 방식으로 Gradient가 크면 향후 학습을 통해 개선할 여지가 더 크다는 의미로 해석하여 가중치를 샘플의 Gradient에 비례하게 사용함.

- LightGBM: XGBoost는 전체 데이터에 대해 Gradient를 계산하여 다음 모델 학습에 사용하기 때문에 매번 모델 학습에 들어가는 계산 비용이 큼. LightGBM은 각 단계에서 모델 학습에 사용하는 데이터와 피쳐 수를 줄여서 학습을 더 효율적으로 수행하는데, 많은 연구 결과에서 XGBoost와 비교했을 때 학습 속도는 훨씬 빠르나 성능은 비슷하거나 더 개선되는 것으로 알려짐.

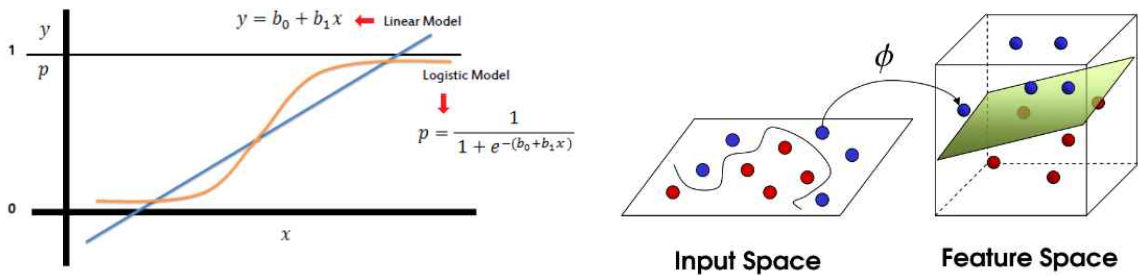


그림 2.32. Logistic regression, 선형회귀, SVM, AdaBoost 기법의 개요

다) 딥러닝 및 앙상블 기법 기반 지진-열차 진동 하중 판별 기계학습 모델 개발

■ 개요

- 2차년도에는 자체 센서 기기를 통해 수집한 열차 진동 데이터를 바탕으로 본격적으로 열차 운행 중 지진 판별을 위한 기계학습 모델을 개발 시작.
- 수집된 KTX 진동 데이터와 국내 지진 데이터셋을 활용하여 열차-지진 진동 판별을 위한 학습 데이터셋을 생성하고 전처리 적용.
- Logistic Regression Classifier, RandomForest, CNN-RNN 등의 학습 알고리즘을 적용하여 지진-열차 진동 하중 판별 기계학습 실시간 모델 구현.
- 학습된 기계학습 모델에 대한 평가 실험을 수행하여 목표치였던 정확도 80% 이상을 달성.

■ 결과

1) 기계학습 용 지진-열차 진동 데이터셋 생성 및 전처리

- 오송-대전 운행 중 수집된 실제 KTX 열차 진동 데이터 사용
 - 열차의 Body, Axle, Bogie 별, 측정 방향 별로 가속도(m/s²) 데이터 (Sampling Rate는 200Hz).

- 본 연구에서는 Body의 X, Y, Z 축에서 얻어진 가속도 데이터를 사용하였음.

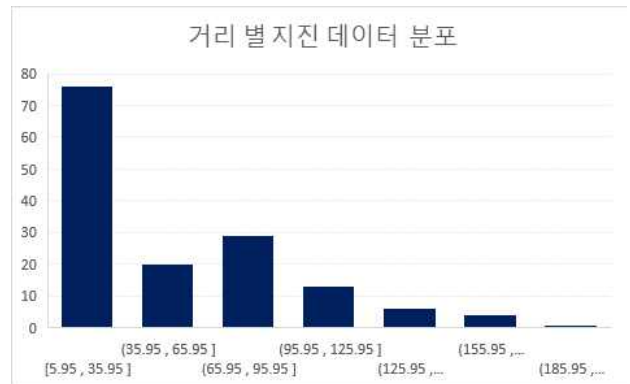
○ 국내 발생 지진 데이터 사용

- 2002년부터 2018년까지 60개 지진계측소에서 관측된 국내 지진 데이터를 사용 (총 149건).

- 지진의 규모는 최소 2.3에서 최대 5.8까지 분포되어 있으며, 지진-계측소 거리는 최소 5.94km에서 203km까지 다양하게 분포되어 있음.



(a) 규모 별 지진 데이터 분포



(b) 거리 별 지진 데이터 분포

그림 2.33. 규모 및 거리 별 지진 데이터 분포

○ KTX 열차 진동 데이터와 국내 발생 지진 데이터를 중첩하여 열차-지진 데이터 생성

- 지진 진동에서 S파 도달 시점을 기준으로 최근 30초 구간과 열차 진동 데이터 중 임의의 30초 구간을 선택하고, 이 두 진동 데이터를 중첩(Superposition)하여 열차-진동 데이터를 생성.

- 지진 진동에서 X, Y, Z 축에 대한 진동값의 Magnitude 값이 가장 높은 지점을 S파 도달 시점으로 사용하였으며, 지진 규모와 계측소까지 거리에 따라 크기는 차이가 있었음.

- 중첩을 위해 전체 열차 운행 진동 데이터에서 30초 길이를 가진 2,141개의 구간을 임의로 추출하여 사용하였음.

○ KTX 진동 데이터와 열차-지진 진동 데이터를 각각 훈련용, 평가용 데이터셋 분리

- 평가용 데이터셋은 규모와 거리가 고르게 지진 진동이 분포되도록 규모와 거리를 통제하여 구성하였음 (규모는 2~3, 3~4, 4~5, 5~로 4단계로 구분, 거리는 ~10, 10~50, 50~100으로 3단계로 구분하였음).

- 훈련용 데이터셋은 실험 결과 지진 진동이 분명한 데이터들만으로 구성하는 것이 가장 높은 성능을 보였음 (최종 모델은 규모 5이상 거리 10km이내 데이터로만 학습).

2) 지진-열차 진동 하중 판별 기계학습 실시간 모델 구현

○ 베이스라인 알고리즘으로 Logistic Regression Classifier

- X, Y, Z 축 별로 30초 길이의 진동 데이터를 입력 받아, 이 진동이 열차 진동인지 혹은 열차-지진 진동인지를 판별하는 분류 모델.

- Stochastic Gradient Descent 알고리즘을 사용하여 Logistic Regression 모델을 최적화 진행함.

○ 딥러닝 기반 CNN-RNN 조합 모델 구현.

- Deep Neural Network 기반 지진 감지 모델인 CRED(CNN-RNN Earthquake Detector) 구조를 사용하였음.

- CRED는 크게 Feature Extraction, Sequence Learning, Classification의 3단계로 구성.

- 입력 데이터

- Spectrogram(시간-주파수 조합)을 입력으로 사용.

- Spectrogram은 X, Y, Z 축의 가속도 데이터(m/s²)를 STFT(Short Time Fourier Transform)하여 얻은 결과로 각각의 frame이 각 주파수성분을 얼마만큼 가지고 있는지 표현.

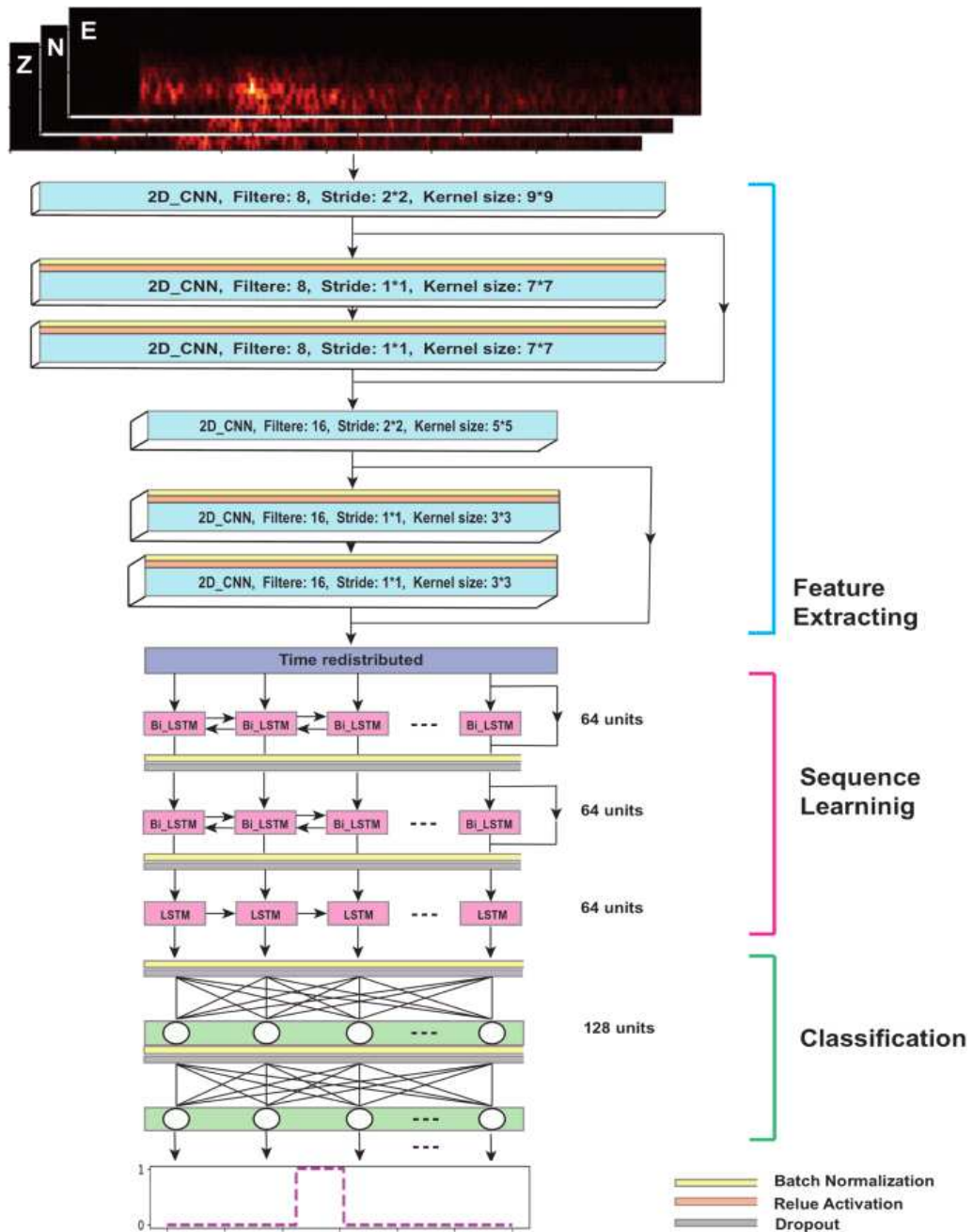


그림 2.34. CNN-RNN 딥러닝 구조

- Feature Extraction 단계

- Feature Extraction 단계는 convolutional layer들로 구성.
- Strider가 2인 convolutional layer가 있는데 이는 Feature map의 크기를 절반으로 줄여주는 역할을 수행.
- 그리고 residual block 안의 convolutional layer들이 있는데 앞에 Batch Normalization과 활성화 레이어들이 있어 훈련을 가속화하고 과적합을 방지해 주는 정규화 역할을 함.
- 또한 시간 복잡도를 고려해 3개의 레이어 당 필터 수를 두 배씩 증가해준다는 특성 존재.

- Sequence Learning 단계

- Convolutional layer 이후에 피쳐 볼륨은 시퀀스로 재분배되고 양방향 LSTM의 두 개의 residual block으로 전달.
- 양방향 LSTM의 계층은 데이터의 순차적 패턴을 학습하고 모델링.
- 신호는 왼쪽에서 오른쪽으로 증가하는 시간에 따라 데이터가 측정되기 때문에 반복 과정 끝에 하나의 단방향 LSTM 레이어를 추가해주는 과정을 거침.

- Classification 단계

- 마지막으로 네트워크의 두 계층은 Fully Connected Layer로 High level reasoning을 수행.

- 학습된 시퀀스 모델에 원하는 출력 클래스에 매핑.
- 시그모이드 이진 활성화 함수를 사용하여 지진 신호일 최종 출력.

○ 앙상블 기계학습 모델: Random Forest

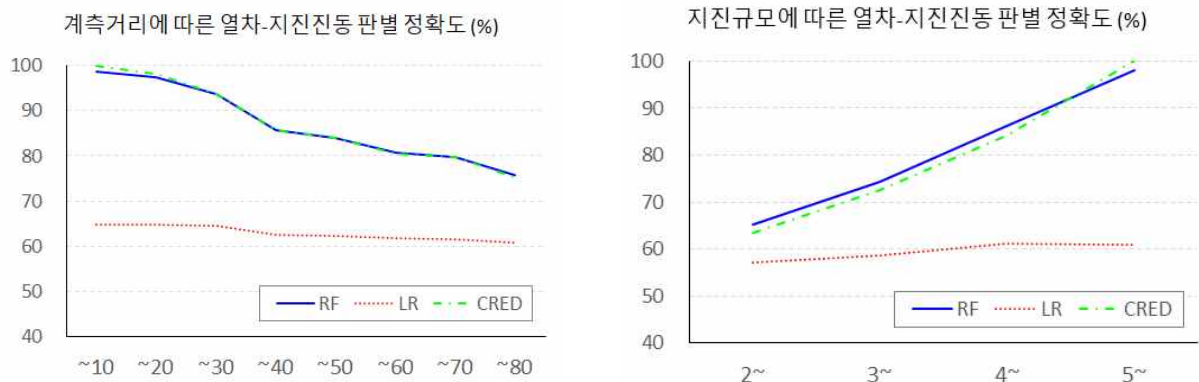
- 여러 개 의사 결정 트리 분류기 모델을 조합해서 사용하는 배깅 방법임.
- 원본 데이터에서 무작위로 데이터를 추출하여 여러 개 학습 데이터 세트를 구축.
- 각 데이터로 모델을 학습 시켜, 여러 개 학습 모델을 생성.
- 새로운 데이터가 들어오면 개별 학습 모델이 판단한 결과들을 통합하여 다수 모델이 선택한 결과를 최종 결과로 선택.
- 하지만 트리를 여러 개 만들어도 같은 트리만 여러 개 만들어지면 의미가 없음. 다른 트리들이 다양하게 만들어지도록 학습 데이터 및 특성 사용을 다르게 함.
- Bootstrap Sampling: n개 학습 데이터셋이 있을 때 n번 데이터를 임의로 선택(중복 허용)해 트리별 학습 데이터 다르게 사용.
- Random Attribute Selection: 모든 속성을 다 사용하는 것이 아니라 트리 별로 속성들 중 일부를 임의로 선택해 사용 (보통 총 속성 수의 제곱근 만큼).

3) 지진-열차 진동 하중 판별 기계학습 실시간 모델 성능 평가 결과

○ 성능 평가 환경

- 훈련용 데이터로 총 3,420개 진동데이터가 사용되었고, 훈련용 데이터는 규모가 크고 지진-계측 거리가 가까운 분명한 지진 데이터만을 사용하였음.
- 평가용 데이터는 지진 규모에 따른 성능 변화와 지진-계측 거리에 따른 성능 변화 실험을 위해 각각 만들었음.
- 각 실험을 위해 2,973개씩의 진동데이터가 테스트셋으로 사용됨.
- 지진 규모에 따른 성능 변화 실험을 위한 평가용 데이터는 지진-계측 거리를 10km 이내로 고정하고, 이 조건에 부합되는 지진 진동 데이터들을 지진 규모에 따라 2~3, 3~4, 4~5, 5로 구분하여, 이 규모 단위 별로 비슷한 수의 데이터가 포함되도록 하였음.
- 지진-계측 거리에 따른 성능 변화 실험을 위한 평가용 데이터는 지진 규모를 5이상으로 고정하고, 이 조건에 부합되는 지진 진동 데이터들을 지진-계측 거리를 ~10km, 10~50km, 50~100km로 구분하여 이 단위 별로 비슷한 수의 데이터가 포함되도록 하였음.

○ 모델 별 정확도 비교 결과



(a) 계측거리에 따른 열차-지진진동 판별

(b) 지진규모에 따른 열차-지진진동 판별

그림 2.35. 계측거리 및 지진규모에 따른 열차-지진진동 판별

○ 전반적으로 RandomForest 및 딥러닝 기반 CRED 모델이 정확하게 열차-지진 진동을 판별하였으며, 특히 10km이내 규모 5 이상의 지진 진동에 대해서는 100% 판별 정확도를 보였고, 규모 5이상, 계측거리 60km이내에 대해서도 80%의 높은 판별 정확도를 보였음.

○ 같은 구간, 시점의 데이터는 아니기 때문에 단적인 비교는 어렵지만, KTX 내장 센서 데이터를 사용했을 때 결과와 비교했을 때 성능 차이가 크지 않았음 (KTX 내장 센서 사용 시, 10km 이내 규모 5이상 지진 발생 시 97% 정확도, 규모 5이상 계측거리 100km 이내 대해 80% 정확도를 보임).

라) 다중 센서 기기 기반 지진-열차 진동 하중 판별 기계학습 모델 개발

■ 개요

- 최근 30초의 가속도값을 입력받아 현재 진동이 열차의 일반적인 상시 진동인지 아니면 지진 발생으로 인한 이상 진동 인지를 구별할 수 있는 기계학습 모델을 만들고 평가할 수 있도록, 다중 센서 기기 센서 데이터를 순차적으로 입력하도록 하는 데이터 처리 모듈 구현
- 다중 센서 사용 유무, 전처리 적용 유무, 모델 구조에 따른 12가지 다른 설정 별 모델 판별 정확도 및 데이터 처리 시간을 측정하는 비교 실험을 수행

■ 결과

1) 다중 기기 모델 실험 및 평가 환경 구축

- 열차와 지진에 대한 두 종류 진동 데이터셋을 사용하였으며, X, Y, Z 3개 방향 별, 시간 별 가속도 측정값으로 구성되었고 샘플링은 100hz (1초 당 100개 데이터 포인트)에서 이뤄짐.
- 자체 개발 센서 기기를 통해 수집된 열차 진동 데이터 사용함.
 - 객실 내 한 쌍의 가속도 센서 탑재된 RPi 기기를 통해 수집함.
 - 이렇게 다중 기기로 모여진 데이터는 총 56회, 65,709초 분량의 데이터(이 중, 테스트베드 구간인 정읍-익산 구간 데이터는 총 7회, 8747.38초 분량)가 사용됨.



그림 2.36. 자체 센서 데이터 수집 기기

- 100hz 데이터이고, 모델 입력으로 최근 30초 구간의 데이터가 사용되기 때문에, 모델 단위에서 보면 총 20,813개의 열차 진동 데이터가 사용됨.
- 추출 시 10%씩 구간을 겹치게 하여 데이터를 추출하여 총 20,813개의 데이터 인스턴스를 사용함.

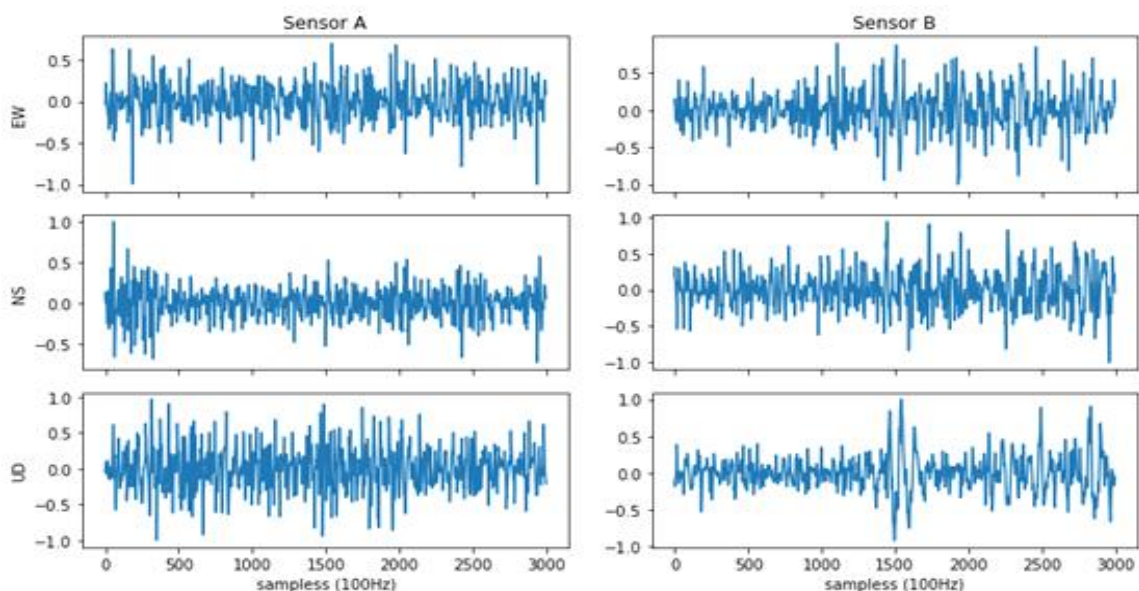


그림 2.37. 수집 열차 진동 데이터 샘플 예

○ 국내 지진 계측소에서 계측된 지진파 데이터에 전이 함수를 적용하여 열차 운행 중 얻을 수 있을 것으로 추정되는 지진파를 생성하여 실험에 활용함.

- 국내 지진 계측소에서 계측된 지진 진동 데이터를 바탕으로 세가지 조건(열차 선로, 토층, 교량)을 고려한 전이 함수들을 적용하여 열차 운행 중 지진파 데이터 생성함.
- 총 489개 지진파, 한 지진파 당 약 16초 길이

PGA	데이터 수
[0, 0.03)	165
[0.03, 0.1)	221
[0.1, 0.2)	63
[0.2, +)	40

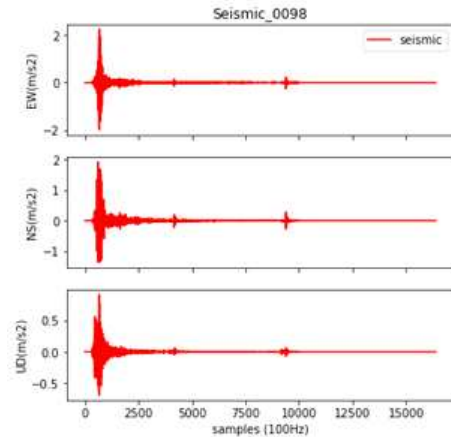


그림 2.38. PGA구간 진동 데이터 수 및 진동 데이터 예

○ 모델 학습을 위해 일반 열차 상시 진동 데이터와 열차 운행 중 지진 데이터가 필요한데, 이 중 열차 운행 중 지진 데이터로 열차 상시 진동 데이터와 앞서 생성한 지진파를 중첩하여 사용함.

- 지진파를 열차 진동에 중첩(Superposition)하여 열차 내 지진 진동 데이터 생성함.
- 열차 진동 30초 구간 끝에 지진 S파 시점 앞쪽 진동을 중첩함.
- 총 데이터 개수: 20,813개 (PGA 그룹 당 6,937개)
- 지진 강도 그룹 별 샘플 수를 균등하게 분배함.

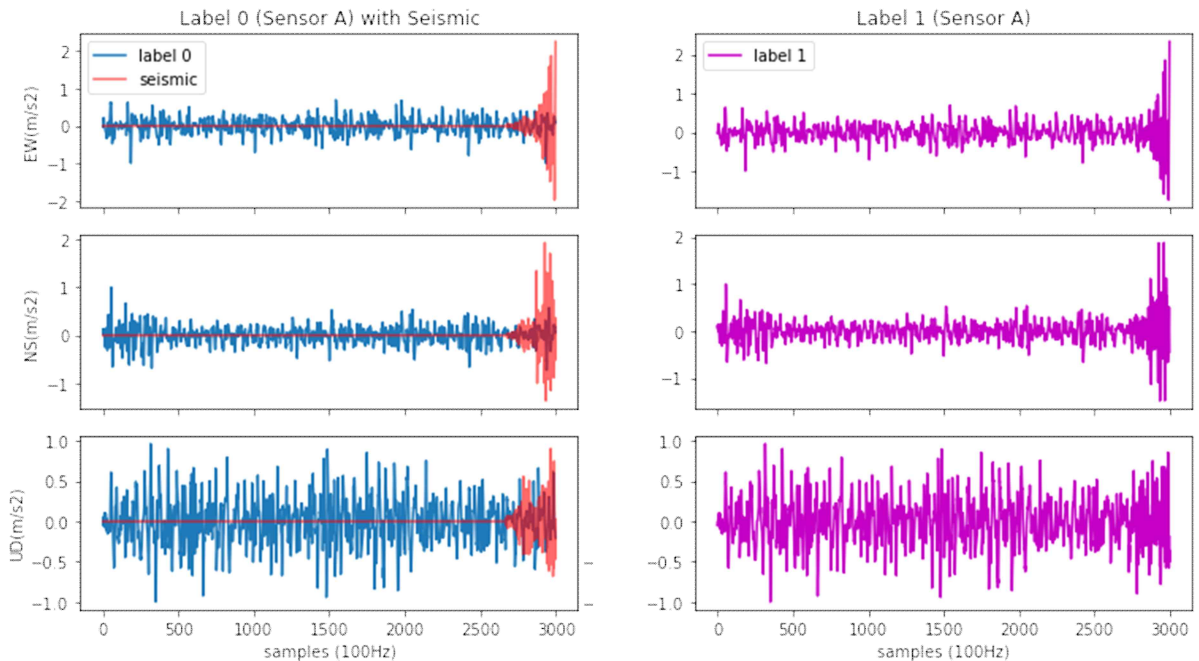


그림 2.39. 열차 운행 시 지진 진동 생성 예

○ 데이터셋을 스트림 형태로 모델에 입력하여 학습 및 평가를 진행할 수 있도록 Python Generator 모듈을 구현함.

○ 모델 성능 평가를 위한 성능 척도 계산 및 시각화 (Confusion Matrix, AUC, ROC) 방법 구현함.

2) 다중 기기 기반 기계학습 모델 개발

○ 고속 열차 내 지진 진동 탐지를 위한 딥러닝 모델로, 30초 길이의 진동 데이터(X, Y, Z축)를 입력 받아, 지진 진동일 확률을 출력하는 QT-Net(Quake on Train)을 연구 개발함.

○ 특징

- 두개 계측기를 사용하여 저가형 센서 데이터 보완함.
- 진동의 주파수 분석 결과를 입력으로 사용함 (STFT 알고리즘).
- 주파수 대역 별 강도(Intensity)의 관계를 학습하는 CNN 모듈과 시점 별 변화 패턴을 분석하는 LSTM 모듈을 함께 사용하는 딥러닝 구조를 사용함.

○ 동작 방식

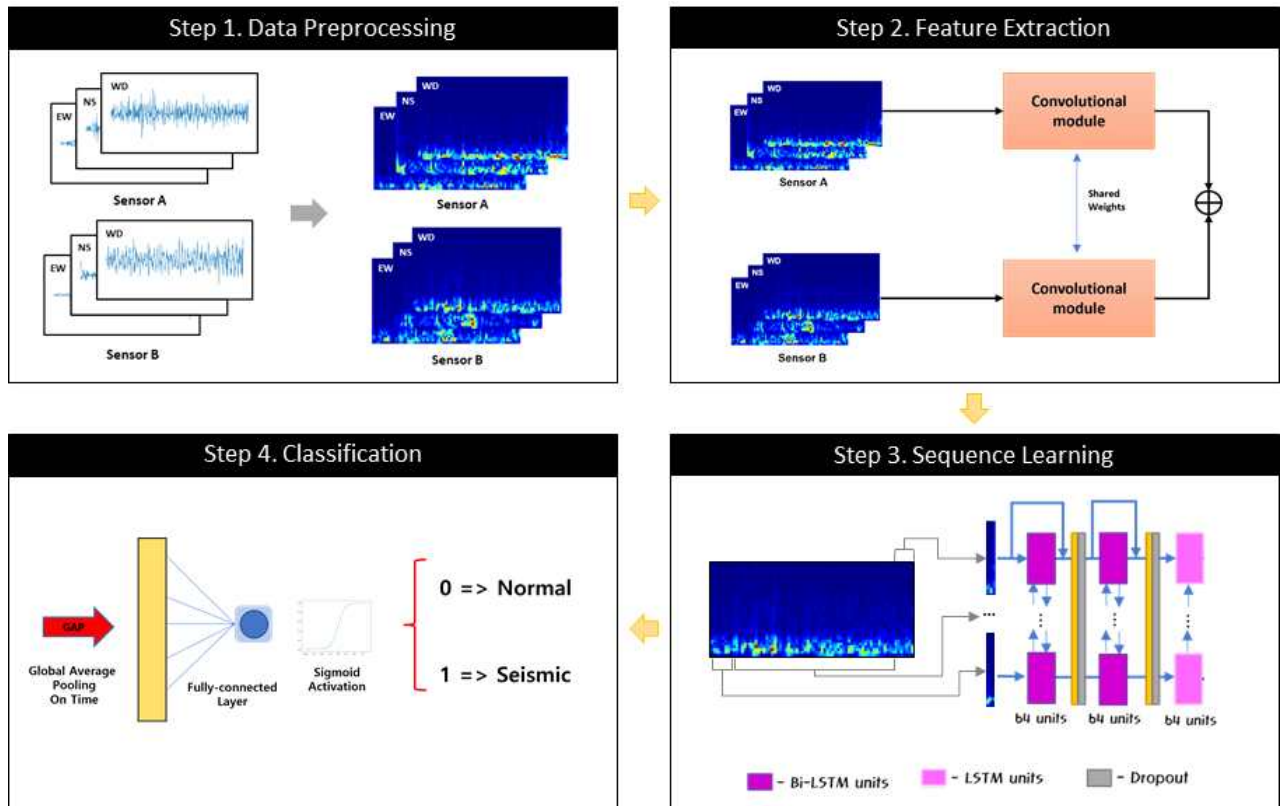


그림 2.40. 열차-지진 진동 판별 딥러닝 모델 동작 과정

○ 1단계: 데이터 전처리

- 모델 입력을 위한 기본 전처리 수행 (Detrending data by mean, 1-45hz band pass filtering, Minmax normalization).
- 진동 특성을 효율적으로 분석하고 학습시키기 위해 1D 진동 데이터에 Short Time Fourier Transformation(STFT)을 적용하여 2D 형태 데이터로 변환함.

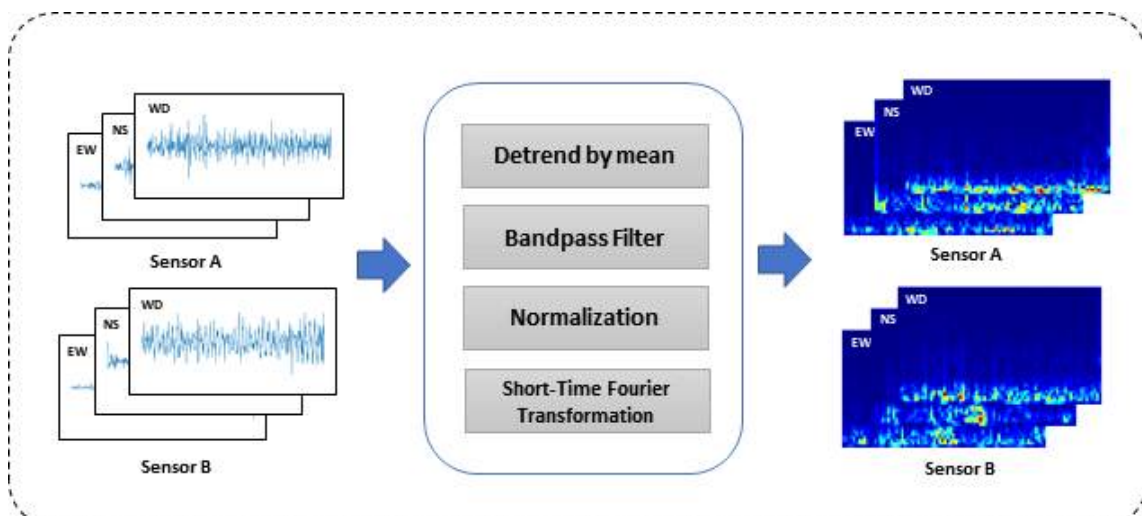


그림 2.41. 열차 진동 데이터 전처리

○ 2단계: 특성 추출 (CNN 모듈)

- 입력 받은 time-frequency 데이터에서 피쳐 추출 및 학습 수행함.
- Convolution layer를 Residual block 구조로 배치함.
- 커널의 크기를 줄임과 동시에 필터의 수를 늘려 시간 복잡도 유지함.
- Weight sharing 적용: 각 센서 데이터를 입력한 두 모듈의 weight를 공유하여 학습 출력 결과를 더하여 종합적인 피쳐를 추출함.

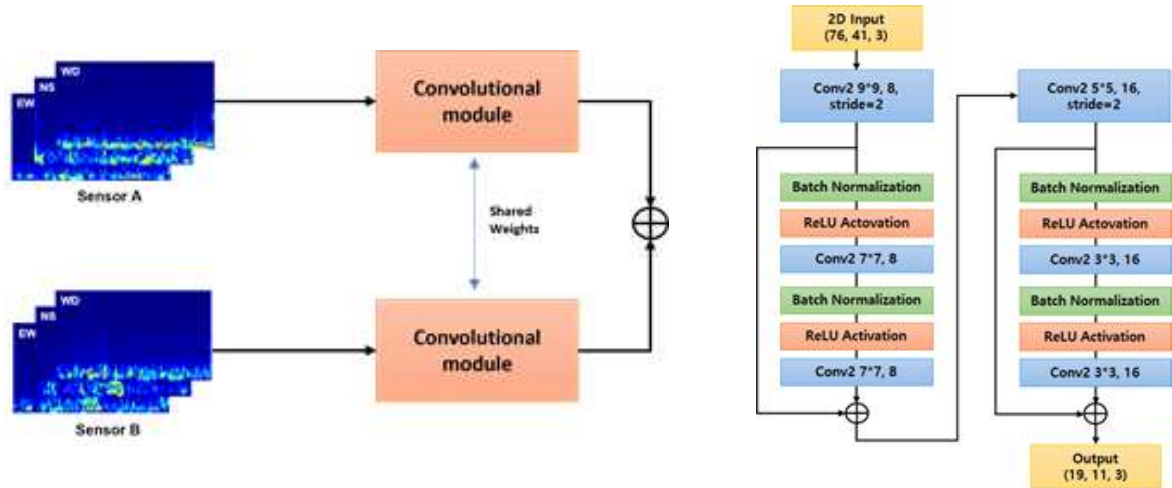


그림 2.42. Weight sharing 및 CNN 모듈 구조

○ 3단계: 시퀀스 학습 (LSTM 모듈)

- 입력 받은 특성 맵에서 시퀀스 적인 특성을 학습
- Bi LSTM 레이어를 Residual block 구조로 배치함.
- 레이어의 사이에 dropout을 배치하여 overfitting 방지함.
- 데이터의 실제 시퀀스가 좌에서 우로 흐르는 단방향 시퀀스이므로 마지막에 단방향 LSTM을 배치함.

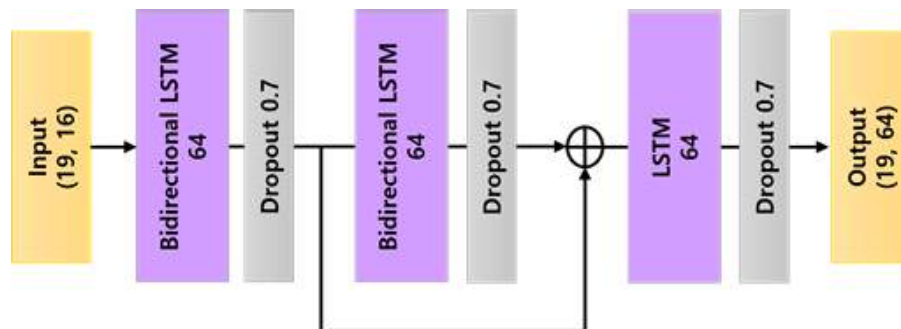


그림 2.43. LSTM 모듈 구조

- Global Average Pooling on Time & Depth을 적용하여 Convolution module에서 출력된 특성 맵을 시간과 필터 정보를 기준으로 압축하여 Recurrent module에 전달함으로써 훈련시킬 모델 파라미터의 수 감소 효과를 만들었음.

※ Global Average Pooling

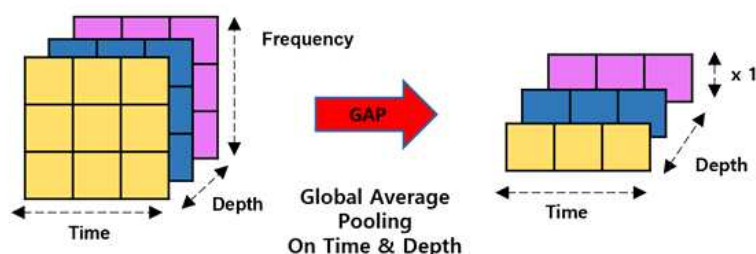


그림 2.44. Global Average Pooling 예

○ 4단계: Classification 모듈

- Global Average Pooling with output layer을 통해 Recurrent Module의 출력 결과를 압축하여 크기가 1인 fully connected layer에 전달함.
- Sigmoid activation을 통해 지진 발생 여부를 판별함.

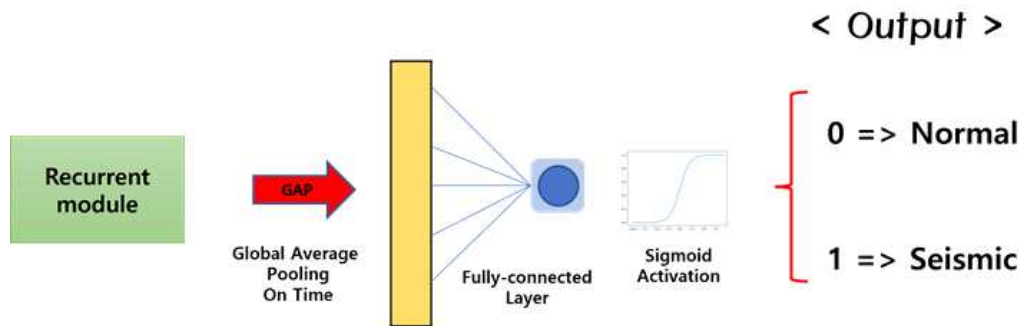


그림 2.45. 분류 모델 실행 과정

3) 다중 기기 기반 기계학습 모델 평가

○ 학습/평가용 데이터셋 구성

- 열차 진동, 지진 진동 데이터셋을 4:1로 나누어 각각 학습과 평가에 사용함.
- 학습 데이터셋과 평가 데이터셋 양쪽에 같은 열차 진동이 중복해서 포함되지 않도록 생성함.
- 열차 진동을 바탕으로 만들어진 지진 진동도 동일함.

표 2.4. 학습/평가용 데이터셋 구성

		Train	Test
열차 진동		16,636	4,177
열차 내 지진 진동	PGA 0~0.03	-	1,393
	PGA 0.03~0.1	5,545	1,391
	PGA 0.1~0.2	5,545	1,391
	PGA 0.2~	5,545	

○ 성능 비교 방법

- 세가지 요소 별로 12가지 다른 방법을 비교함.
 - 사용 센서 수 : 단일 센서/다중 센서
 - STFT 전처리 : STFT 적용 유/무
 - 모델 구조 : CNN모듈 + LSTM모듈, CNN모듈, LSTM모듈

표 2.5 센서별 성능 비교

입력 센서	STFT	모델 구조
단일 센서	X	LSTM
		CNN
		CNN+LSTM
	O	LSTM
		CNN
		CNN+LSTM
다중 센서 (Dual)	X	LSTM
		CNN
		CNN+LSTM
	O	LSTM
		CNN
		CNN+LSTM

○ 성능 평가 척도

– 정확도(Accuracy)

- 모델이 True/False 라고 분류한 것 중 실제 True/False 인 것의 비율을 나타냄.
- Label 별로의 정확도 뿐만 아니라 지진의 PGA 그룹 별로의 정확도 또한 계산함.

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + FN + FP + TN}$$

- 1,000건의 데이터를 처리하는데 걸리는 소요 시간을 측정함.

○ 모델 학습 환경

- CPU는 Intel Core i9-10900KF를 사용하였음.
- GPU는 TITAN RTX를 사용하였음.
- Loss function으로는 binary cross entropy 식을 사용하였음.
- Optimizer로는 Adam 알고리즘을 사용함.
- Epoch가 10, 20, 40마다 학습률 감소하는 경향을 보였음.
- Early Stopping: 15 step동안 최적의 validation loss가 갱신되지 않으면 학습 정지시킴.

○ 모델 학습 및 평가 결과

- 각 방법 별 정확도 결과(전체 테스트셋)는 아래와 같음.

표 2.6 모델 학습 및 평가 결과

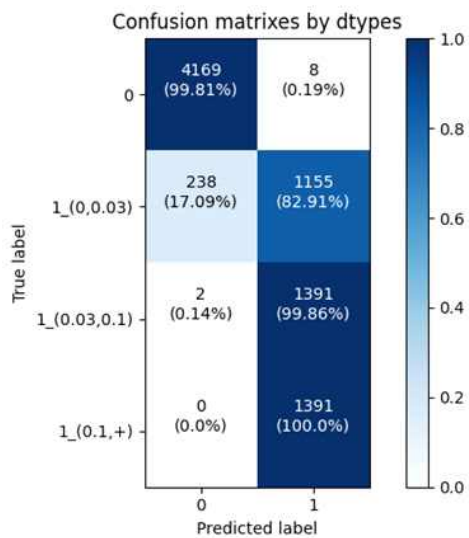
입력센서	STFT	모델 구조	상시진동	PGA 구간		
				[0, 0.03)	[0.03, 0.1)	[0.1, +)
단일 센서	X	Residual CNN	99.59	69.63	98.49	99.64
		Residual BiLSTM	98.9	73.22	97.7	99.93
		Residual CNN+BiLSTM	99.33	69.49	97.63	100.0
	O	Residual CNN	99.38	70.78	98.78	99.93
		Residual BiLSTM	99.62	72.36	98.28	99.86
		Residual CNN+BiLSTM	99.31	76.88	98.99	100.0
다중 센서	X	Residual CNN	99.83	83.85	99.43	99.93
		Residual BiLSTM	99.4	73.3	97.27	99.86
		Residual CNN+BiLSTM	99.83	82.27	99.71	100.0
	O	Residual CNN	99.81	82.91	99.86	100.0
		Residual BiLSTM	99.93	83.06	99.64	99.93
		Residual CNN+BiLSTM	99.93	81.26	99.78	100.0

- 각 방법 별 정확도 결과(테스트베드 구간 테스트셋: 정음-익산 구간)는 아래와 같음.

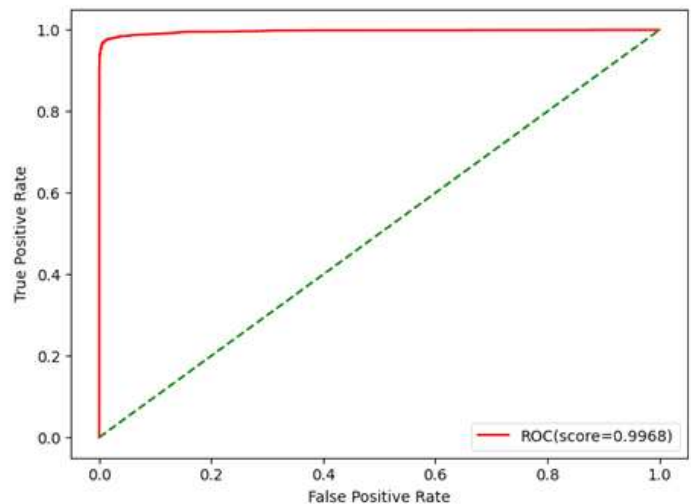
표 2.7 테스트베드 구간 테스트셋의 정확도 결과

입력센서	STFT	모델 구조	상시진동	PGA 구간		
				[0, 0.03)	[0.03, 0.1)	[0.1, +)
단일 센서	X	Residual CNN	99.1	40.54	92.43	100.0
		Residual BiLSTM	97.83	35.68	87.57	100.0
		Residual CNN+BiLSTM	98.01	36.76	90.27	100.0
	O	Residual CNN	99.1	37.3	94.59	100.0
		Residual BiLSTM	99.28	38.92	93.51	100.0
		Residual CNN+BiLSTM	98.74	46.49	96.76	100.0
다중 센서	X	Residual CNN	99.64	52.97	97.84	100.0
		Residual BiLSTM	98.56	48.11	95.14	100.0
		Residual CNN+BiLSTM	99.82	49.73	98.38	100.0
	O	Residual CNN	99.64	52.43	100.0	100.0
		Residual BiLSTM	100.0	55.14	99.46	100.0
		Residual CNN+BiLSTM	99.82	50.27	100.0	100.0

- 가장 높은 성능을 기록한 다중센서-STFT사용-CNN 방법의 지진 판별 성능 결과 상세임.



(a) Confusion Matrix 결과



(b) ROC 커브 및 AUC

그림 2.46. Confusion Matrix, ROC 커브, 그리고 AUC

- 각 방법 별 파라미터 수 (모델 크기) 및 처리 소요 시간은 아래와 같음.

표 2.8 각 방법 별 파라미터 수 및 처리 소요 시간

입력센서	STFT	모델 구조	모델 크기 (파라미터 수)	1,000건 데이터 처리 속도 (초)
단일 센서	X	Residual CNN	4,303	28.50
		Residual BiLSTM	231,041	114.59
		Residual CNN+BiLSTM	193,999	109.04
	O	Residual CNN	16,308	33.20
		Residual BiLSTM	202,573	48.30
		Residual CNN+BiLSTM	206,004	43.83
다중 센서	X	Residual CNN	4,303	31.94
		Residual BiLSTM	231,041	173.54
		Residual CNN+BiLSTM	193,999	112.30
	O	Residual CNN	16,308	36.55
		Residual BiLSTM	202,573	53.11
		Residual CNN+BiLSTM	206,004	43.39

○ 실험 결과 요약

- 다중 센서를 사용한 모델의 성능은 단일 센서를 사용한 같은 세팅의 모델보다 높은 성능을 보임.
- 입력 데이터에 STFT 처리를 적용한 모델은 그렇지 않은 같은 세팅의 모델보다 높은 성능을 보임.
- 모델 구조의 경우, Convolutional Module을 단독으로 사용한 모델과 CNN과 BiLSTM을 함께 사용하는 경우 정확도가 대체적으로 높게 나타남.
- 처리하는데 걸리는 시간은 정확도가 높았던, 다중센서-STFT-CNN 방법의 경우 평균 0.03초/건, 다중센서-STFT-CNNBiLSTM의 경우 0.04초가 필요한 것으로 나타남.
- 따라서 열차 상시 진동 20,813개, 열차 내 지진 진동 20,813개 총 41,626개 데이터가 모델 학습 및 평가에 사용됨.
 - 딥러닝 연구에서 어느 정도 데이터 크기가 충분한 것에 대해서는 문제마다 굉장히 다른데, 본 평가 실험 결과로 나온 모델 학습 곡선과 성능 결과를 참고했을 때, 적어도 모델 학습에 있어, 충분하다고 사료됨.
 - 본 연구에서는 적은 양의 데이터로도 딥러닝 모델 학습이 가능하도록 모델 구조 내 파라미터를 줄일 수 있는 기법들이 반영되어 있음.
- 단, 현재 실험 결과는 데이터 수집 환경을 고려해 해석될 필요는 있으며, 보다 다양한 환경에서 비슷한 성능을 보일 수 있는지에 대해서는 향후 추가 검증은 필요함.
- 테스트베드 이외 구간 등 다양한 구간의 열차 진동 특성을 반영한 성과품 도출을 위해서는 더 많은 데이터가 필요하고, 향후 연구에서 데이터 구축 및 기계학습 신뢰도 향상을 추진하겠음.

(3) (CTE C) 주행열차의 지진 위험 여부를 판별하는 확률 모델

가) 국내 철도시설물 안전 기준

■ 개요

- 주행열차의 지진 위험 여부를 판별하기 위해서는 열차의 주행 안정성을 저해하는 요소(철도 선로 변형, 진동, 궤도 틀림 등)에 대한 분석이 필요함.
- 현행 철도 설계, 보수, 손상 기준 및 지진 시 운행 기준 등에는 주행 안정성을 저해하는 요소들의 심각도가 정량적으로 제시되어 있음.
- 철도시설물의 지진취약도함수에 사용되는 손상상태는 경미한 손상, 중간 손상, 광범위한 손상, 완전 손상 등으로 정의됨. 하지만 이러한 손상상태는 지진취약도함수 개발자에 따라 정성적으로 기술되어 있어, 각 손상상태와 주행 안정성의 저해요소, 철도시설물의 상태평가 기준 등과의 관계 정립이 필요함.
- 또한, 지진 시 지진동에 의해 유발될 수 있는 주행열차의 피해 확률 계산 시 피해정도에 대한 기준을 정립할 필요가 있음.
- 따라서, 각 철도시설물의 손상상태를 국내 철도 주행 및 설계 관련 기준과 연관하여 주행열차 피해에 대한 의미를 정량적으로 제시할 필요가 있음. 이에 철도손상기준, 열차 서행/정지 지침, 주행안전성 및 승차감 기준 등을 조사하여 검토함.

■ 결과

- 철도 설계지침 및 편람 KR C-02040 내진설계 편
 - 지하철도 구조물 내진설계 성능에 기초한 내진설계개념을 도입하였음. 설계 기본원칙은 비교적 큰 규모의 지진에 의한 지반진동에 의해서도 구조물의 전부 또는 일부가 붕괴되어서는 안되며, 가능하면 지진에 의한 피해의 예측이 가능하고 피해조사와 보수를 위해 현장접근이 가능하도록 설계하는 것임.
- 철도 설계지침 및 편람 KR C-08070 주행안전성 및 승차감 검토 편
 - KR C-08070은 고속철도 및 일반철도 모두를 포함하는 철도 교량의 주행 열차 하중에 대한 주행 안전성과 승차감, 그리고 교량의 동적 안전성 확보를 기술함.
 - 설계속도 200km/h 이상인 고속철도 교량은 일정 간격의 연행 하중 작용에 의한 공진위험 등이 상시 존재하므로 모든 교량에 대하여 이 규정에 의한 동적거동 검토를 필수적으로 수행해야 함.
 - 운행 열차 하중에 의한 동적 거동은 속도별 최대 응답을 검토함. 검토 항목으로는 상판의 연직가속도, 교량의 연직처짐 등이 존재함. 검토 및 모델링 방법은 ‘주행 안전성 및 승차감 검토를 위한 절차 및 방법’을 따르며, 각 항목의 검토 기준은 ‘주행 안전성 및 승차감 검토 기준’을 따름.
- 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침(한국시설안전공단, 2017)
 - 상태평가 및 안전성 평가를 실시한 결과를 종합하여 지침의 평가 기준에 따라 시설물의 종합평가결과를 결정함.
 - 정밀안전진단(안전점검)을 실시한 책임기술자는 당해 시설물에 대한 종합적으로 평가한 결과로부터 시설물의 안전등급을 우수, 양호, 보통, 미흡, 불량으로 지정함.

표 2.9. 안전 등급별 시설물의 상태

안전등급	시설물의 상태
A (우수)	문제점이 없는 최상의 상태
B (양호)	보조부재에 경미한 결함이 발생하였으나 기능 발휘에는 지장이 없으며 내구성 증진을 위하여 일부의 보수가 필요한 상태
C (보통)	주요부재에 경미한 결함 또는 보조부재에 광범위한 결함이 발생하였으나 전체적인 시설물의 안전에는 지장이 없으며, 주요부재에 내구성, 기능성 저하 방지를 위한 보수가 필요하거나 보조부재에 간단한 보강이 필요한 상태
D (미흡)	주요부재에 결함이 발생하여 긴급한 보수·보강이 필요하며 사용제한 여부를 결정하여야 하는 상태
E (불량)	주요부재에 발생한 심각한 결함으로 인하여 시설물의 안전에 위험이 있어 즉각 사용을 금지하고 보강 또는 개축을 하여야 하는 상태

○ 선로유지관리지침(한국철도시설공단, 2016)

- 고속철도의 궤간에서의 지진으로 인한 주요 피해는 궤간의 침하이며, 침하에 따라 준공기준, 목표기준, 주의기준, 보수기준, 속도제한기준의 관리단계가 존재함.

- 1) 준공기준(CV): 신선 건설 시의 준공기준으로 유지보수 시는 적용하지 않음.
- 2) 목표기준(TV): 궤도유지보수 작업에 대한 허용기준으로 유지보수 작업이 시행된 경우 이 허용치 내로 작업이 완료되어야 함.
- 3) 주의기준(WV): 이 단계에서는 선로의 보수가 필요하지 않으나, 관찰이 필요하고 보수작업의 계획에 따라 예방보수를 시행 할 수 있음.
- 4) 보수기준(AV): 유지보수작업이 필요한 단계 제한된 기간 이내에 보수 작업이 시행되어야 함.
- 5) 속도제한기준(SV) : 이 단계에서는 열차의 주행속도를 제한하여야 함.

- 상태평가 및 안전성 평가를 실시한 결과를 종합하여 지침의 종합평가 기준에 따라 시설물의 종합평가결과를 결정함.

- 선로유지관리지침의 고속철도 궤도 틀림 관리기준은 수평 및 뒤틀림, 궤간, 고저, 방향으로 구분됨.

- 지진으로 인한 주요 피해 중 하나인 고저틀림의 기준표는 다음과 같음.

표 2.10. 고속철도 궤도틀림 관리기준 (고저)

기호	정의
N_{10m}	10m 이하 현정시법으로 측정한 고저틀림 - 측정된 고저틀림과 기준선의 차이
N_{20m}	20m 비대칭 현정시법(4.1m, 16.8m)으로 측정한 고저틀림 - 측정된 고저틀림과 기준선간의 차이
N_{all}	30m 기선에서 측정한 궤도 국부 고저 - 기록된 틀림값의 Peak-Peak 측정값
N_{SD_10m}	10m 현 고저틀림의 200m 구간의 표준편차 - 측정된 고저틀림과 기준선 차이값의 200m 표준편차
N_{SD_20m}	20m 현 고저틀림의 200m 구간의 표준편차 - 측정된 고저틀림과 기준선 차이값의 200m 표준편차

- 고저틀림의 한계값으로 인한 관리단계의 분류는 다음과 같음.

표 2.11. 고속철도 궤도틀림 한계값에 따른 관리단계

관리단계		한계값	
		고저틀림 (mm)	표준편차
준공기준 (CV)	새로운 궤도부설시 요구되는 값	$N_{10m} \leq 2$ $N_{20m} \leq 3$ $N_{all} \leq 5$	$N_{SD_10m} \leq 1.0$ $N_{SD_20m} \leq 1.3$
목표기준 (TV)	궤도 유지보수 작업후 요구되는 값	$N_{10m} \leq 3$ $N_{20m} \leq 4$ $N_{all} \leq 7$	$N_{SD_10m} \leq 1.3$ $N_{SD_20m} \leq 1.7$
주의기준 (WV)	이 단계의 의미 : - 결함의 원인 및 특성의 확인 - 수평틀림의 진행상황 감시	$5 \leq N_{10m} < 10$ $7 \leq N_{20m} < 14$ $10 \leq N_{all} < 18$	$N_{SD_10m} \geq 1.9$ $N_{SD_20m} \geq 2.6$
보수기준 (AV)	1개월 내에 유지보수를 시행	$N_{10m} \geq 10$ $N_{20m} \geq 14$ $N_{all} \geq 18$	관리하지 않음
속도제한기준 (SV)	속도제한 = 230km/h	$15 \leq N_{10m} < 18$ $20 \leq N_{20m} < 24$ $24 \leq N_{all} < 30$	관리하지 않음
	속도제한 = 170km/h	$18 \leq N_{10m} < 22$ $24 \leq N_{20m} < 28$ $N_{all} \geq 30$	관리하지 않음
	속도제한 < 160km/h	$N_{10m} \geq 22$ $N_{20m} \geq 28$	관리하지 않음

- 철도시설물의 지진취약도 함수 국산화 연구(국립방재교육연구원 방재연구소, 2008)
 - 철도시설물의 손상상태(Damage Level, DL)를 정의하기 위해 전체적으로 다섯 가지 단계로 손상상태를 정의함.
 - 손상 상태는 손상없음(DL 1), 경미한 손상(DL 2), 중간 손상(DL 3), 과도한 손상(DL 4), 완전한 손상(DL 5)으로 구분되며, 아래의 표와 같이 정의됨. 손상없음(DL 1)의 상태는 표에서 제외함.

표 2.12. 철도 시설물별 손상상태에 따른 피해 정의

철도 시설물	손상 상태 (DL)	정의
선로/노반	2	성토지반의경미한 침하 /경미한 선로의 손상
	3	지반의 부등침하 등으로 주목할 만한 수준의 선로 변형 발생
	4	과도한 지반변형으로 인한 선로의 뒤틀림 또는 변형 발생
	5	과도한 손상과 동일
교량	2	교대 및 교각의 경미한 균열 및 콘크리트 탈락
	3	중간정도의 균열과 콘크리트 탈락 발생 /5cm 미만의 변위
	4	붕괴가 발생하지 않는 수준에서의 교각의 손상/접속부, 연결부침하/연직방향단차 등
	5	기동, 교량 상판의 붕괴 /기초의 손상으로 인한 기울어짐
터널	2	라이닝균열 /콘크리트 탈락 /터널 입구 부분 지반의 경미한 침하
	3	라이닝의 중간정도 균열과 콘크리트 탈락
	4	터널 입구의 지반침하 /라이닝의과도한 균열발생
	5	붕괴가 가능한 수준의 터널 라이닝의 균열
철도 설비	2	경미한 건물의 손상 /경미한 앵커의 손상 /매우 짧은 기간 동안 전기 공급 중단 등
	3	건물의 중간정도손상 /주목할 만한 앵커의 손상 /며칠 동안의 전기 공급 중단 등
	4	과도한 건물의 손상
	5	건물의 완전한 손상

- 철도시설물에 대한 지진취약도 모델 선행연구
 - 다음은 수집한 철도시설물의 지진취약도 모델에 대한 대상 구조물 및 모델 개발에 대한 요약을 나타냄.

표 2.13. 각 시설물의 지진취약도 모델에 대한 요약

시설물 유형	지진취약도 모델	비고
교량	Kim et al. (2010)	근거리 및 원거리 지진으로 구분되는 지진가속도 기록을 사용하여 국내 교량의 대표적인 형식의 하나인 PSC상자형교에 대한 지진취약도 곡선을 평가하였음. 근거리와 원거리로 구분된 지진 특성이 지진취약도 곡선에 미치는 영향을 분석함. 예제교량은 총 연장 200m (4@50m)인 PSC 상자형교이고 교각의 높이는 좌로부터 각각 14m:21m:14m임. 지진취약도 곡선에 대한 근거리 및 원거리 지진의 영향이 현저한 차이를 나타내므로 지진취약도 해석시 근거리와 원거리로 구분되는 지진의 특성을 반영하여 수치해석으로 분석함.
	Seo et al. (2010)	지진취약도 분석을 위해 수정된 HAZUS 방법을 통한 한국형 지진취약도함수를 개발하여 국내 실정에 맞는 지진재해평가기술을 제안함. 해석교량은 분류체계에 의해 구분된 표준교량 중 PSC-I 거더교를 선정하였고, 이에 대해 수치해석적 방법으로 지진취약도함수를 구한 후, HAZUS에 제시된 간편한 방법에 의한 지진취약도 함수와 비교함. PSC-I 거더교의 하부구조는 동일한 원형단면을 갖는 3개의 교각에 의해 지지되며, 상부구조는 35m의 동일 경간장을 가진 총 연장이 140m인 4경간 교량을 수치해석함.
	방재연구소 (2008)	교량의 지진취약도 함수로 내진교량과 비내진교량에 대하여 구분하여 제시하였음. 1960년 이전에 건설된 철도교량은 비내진 교량으로 구분하였으며, 이후 건설된 철도교량은 내진교량으로 구분하였음. 교량의 내진손상은 구조요소 또는 교량의 부분, 즉 교각, 교대, 데크, 접속부와 연결부로 구분하여 각각 고려하였음. 교량의 각 요소별로 구해진 취약도함수로 교량전체의 취약도함수를 구함

터널 (굴착식)	Kim et al. (2014)	경부고속철도의 굴착식 터널에 대해 수치적 방법을 통해 지진취약도 함수를 개발함. 원형 또는 타원형 형상을 가지고 있는 굴착식 터널의 지진취약도 함수는 상대적으로 동일한 크기의 지반운동에서 개착식 박스 터널에 비해 피해 확률이 낮은 것으로 분석함.
	Andreotti and Lai (2019)	암석으로 이루어진 산악터널에 대한 지진취약도 함수를 나타냄. 깊이가 깊어질수록, 두께가 두꺼울수록 지진에 대한 피해 확률이 낮아짐. 대상으로 깊이 80m에 위치한 0.7m의 두께의 터널을 사용함.
	Hu et al. (2020)	원형터널을 대상으로 수치적 해석을 수행함. 취약도 분석을 진행하였으며, 매설 깊이와 터널의 피해확률은 상관성이 낮은 것으로 분석함.
터널 (개착식)	Kim et al. (2014)	터널 점검결과 천장부에서 종방향 균열이 발생한 터널을 포함하여 총 27개소의 경부고속철도터널을 내진성능 상세평가 대상 구조물로 선정 후 상세평가를 진행하여 지진취약도 함수를 나타냄. 내진성능 상세평가는 2차원 횡단면 해석을 원칙으로 하였으며, 박스터널과 같은 개착식 구조물에 대해서는 응답 변위법을 적용함.
	Huh et al. (2017)	지진 하중을 받는 지하 구조물의 지반-구조 상호작용 거동을 다룰 수 있는 유사정적 해석 지침을 참고하여 철근 콘크리트 터널에 대해 수치해석을 수행함. 대상은 중앙의 직사각형 기둥으로 지지된 박스형 복선 터널이며, 모래, 풍화토, 암반의 층으로 터널 위치를 변화 시켜가며 해석을 수행함.
	Park et al. (2018)	두 모델은 유사정적 해석 지침을 참고하여 해석을 수행함. 터널 주변 지반은 지반-터널 간의 상호 작용을 고려하기 위해 일련의 수직, 전단 스프링으로 모형화 하였으며, 각각의 스프링 계수는 도시철도 내진설계 기준의 절차를 따라 계산함.
	Nguyen et al. (2019)	
토공	S. Argyroudis & M. Kaynia (2006)	지진 강도에 대한 응답은 동적 거동을 시뮬레이션하기 위한 탄성 기준과 함께 2D 비선형 탄성 원소 모델을 사용하여 평가함. 토양 변형률에 대한 강성과 감쇠의 의존성을 고려하기 위해 교정 절차를 따름. 성토와 절토의 반응에 대한 토양 조건과 지반 운동 특성의 영향을 고려함. 지반 분류 및 성토 높이, 절토 깊이를 분류하여 모델을 형상하여 수치해석을 수행함.

○ 철도시설물의 손상상태와 기준과의 연계

- 지진취약도 모델의 선행연구 또한 철도 구조물 손상상태 기준을 경미한 손상(DL 2), 중간 손상(DL 3), 광범위한 손상(DL 4), 완전한 손상(DL 5) 등으로 정의함. 손상상태에 대한 기술은 각 연구 별로 정성적으로 기술되어 있어, 각 지진취약도 모델의 손상상태와 국내 기준에서 제시하는 구조물별 상태 평가 기준 등과의 관계 정립이 필요함.
- 선로유지관리지침(국가철도공단, 2018)에서 제안하는 관리기준의 속도제한기준은 속도감소를 의미하며, 국내 철도시설물의 지진취약도함수 개발(국립방재교육연구원 방재연구소, 2008) 문헌의 경미한 손상 정의는 선로의 변형이 발생하였으나 열차가 서행으로 운전이 가능한 정도를 의미함. 이 기준의 설명을 통해 두 기준은 속도제한으로 정의가 일치한다고 할 수 있음. 따라서, 토공의 지진취약도 함수(Argyroudis and Kaynia, 2015)에서 지진취약도 함수의 DL 2에 대한 정의는 서행 운행과 일치함.

표 2.14. 토공 구조물의 손상상태 정립

문헌	정의	
안전점검 및 정밀안전진단 세부지침 (2017)	시설물의 안전에는 지장이 없으며, 주요부재에 내구성, 기능성 저하 방지를 위한 보수가 필요하거나 보조부재에 간단한 보강이 필요	
선로유지관리지침 (2018)	속도제한기준 (SV)	속도제한 = 230km/h 속도제한 = 170km/h 속도제한 < 160km/h
철도 시설물의 지진취약도함수 국산화 연구 (2008)	선로의 변형이 발생하였으나 열차가 서행으로 운전이 가능한 정도의 손상	
Argyroudis and Kaynia (2015)	DL 2 : Open, reduced speed. DL 3 : Closed during repair works. DL 4 : Closed during reconstruction works	

- 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침(한국시설안전공단, 2017)은 교량의 상태평가 기준에 따라 균열 폭 및 손상면적에 따른 기준을 정립함. 지침의 안전등급 C의 상태는 기능발휘에는 지장이 없는 상태이며 일부의 보수가 필요한 상태를 말함. 철도시설물의 지진취약도함수 국산화 연구의 철도교량 손상상태 정의에서 경미한 손상(DL 2)은 교대에 경미한 균열발생 또는 콘크리트 탈락으로 미관상의 보수만 필요한 정도임. 이를 바탕으로 교량 대상 지진취약도 함수 선행연구들의 DL 2와 정밀안전진단 세부지침의 안전등급 C를 동일한 수준으로 간주하여 손상상태에 대한 기준을 정립함.

표 2.15. 교량의 손상상태 정립

문헌	정의
안전점검 및 정밀안전진단 세부지침 (2017)	안전등급 C: 프리스트레스 콘크리트 거더 상태평가의 간단한 보강이 필요한 상태는 균열 폭 0.2 mm - 0.3mm, 표면 손상면적 2%이상-10%미만을 뜻함.
철도 시설물의 지진취약도함수 국산화 연구 (2008)	교대 및 교각에서 경미한 균열 발생, 콘크리트 탈락의 상태를 말하며, 미관을 위한 보수가 필요한 정도를 뜻함.
Kim et al. (2010)	D _L 2 (경미한 손상): 균열, 박리 D _L 3 (중간 손상): 연결부위 또는 교대 뒷벽 콘크리트 붕괴 D _L 4 (심한 손상): 교각 콘크리트 파괴 D _L 5 (완전 파괴): 상판 낙교, 교각 붕괴
Seo et al. (2010)	D _L 2 : 경미한 손상 D _L 3 : 중간 손상 D _L 4 : 심한 손상 D _L 5 : 완전 파괴

- 터널의 상태평가는 대상 구간인 철근콘크리트라이닝 및 개착터널의 균열을 기준으로 정립하였음. 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침에서의 안전등급 C는 0.3 - 0.5mm의 균열 폭을 의미함. 철도시설물의 지진취약도함수 국산화 연구에서는 경미한 손상을 미세한 라이닝 균열 및 콘크리트 탈락, 경미한 침하 정도의 수준으로 정의함. 경미한 손상은 부재 일부의 보수가 필요한 상태이며, 운행에는 지장이 없는 상태를 의미함. 터널 지진취약도 함수 선행연구에서의 경미한 손상(DL 2) 정의 또한 미세한 균열과 미관상의 보수만 필요한 상태로 정의함. 이를 기준으로 지진취약도 함수 DL 2, 3, 4의 상태를 기준과 연계하여 C, D, E 안전등급으로 연결함.

표 2.16. 터널의 손상상태 정립

문헌	정의
안전점검 및 정밀안전진단 세부지침 (2017)	터널의 콘크리트라이닝의 철근 상태평가 기준을 균열 폭이 0.3mm - 0.5mm로 경미한 손상을 정의함.
철도 시설물의 지진취약도함수 국산화 연구 (2008)	라이닝의 균열, 콘크리트 탈락, 터널 입구부분 지반의 경미한 침하 정도로 정의함
Kim et al. (2014)	D _L 2 : Minor cracking of the tunnel liner (damage requires no more than cosmetic repair) D _L 3 : Moderate cracking of the tunnel liner D _L 4 : Major ground settlement at a tunnel portal and extensive cracking of the tunnel liner
Hu et al. (2017)	D _L 2 : Minor
Park et al. (2018)	D _L 3 : Moderate
Nguyen et al. (2019)	D _L 4 : Extensive

나) 철도시설물 대표 지진 취약도 함수

■ 개요

- 시설물의 지진취약도는 주어진 지진동 크기에 대해 목표로 하는 손상상태 이상의 피해를 입을 확률을 나타내는 것으로, 시설물의 피해상태를 확률적으로 계산하는 데 사용함. 취약도 함수는 0%-100%까지의 피해확률을 나타내는 함수로, 주로 누적정규분포 모델이 취약도 함수로 사용됨.
- 지진취약도 함수는 지진 발생 시 세그먼트의 피해 유무를 기반으로 경험적으로 개발할 수 있으며,

수치해석적 방법으로도 개발할 수 있음.

○ 지진동에 의한 철도시설물의 피해는 결과적으로 주행열차의 안정성을 저해함.

○ 철도시설물은 교량, 터널, 토공(성토 및 절토), 역사, 전원공급장치, 전신주 등 열차 운행을 위한 모든 시설물을 포함하나, 이번 연구에서는 철도시설물 중 주요 구조 부재인 교량, 터널, 토공에 대한 지진 취약도 분석을 목표로 함.

○ 철도 교량, 터널, 토공에 대한 지진취약도 모델은 국내외 여러 연구자에 의해 제시되었음. 이번 연구에서는 각 시설물에 대해 지진취약도를 수집하고 가중 조합하여 대표 지진취약도를 제시함.

○ 다음은 수집한 지진취약도 모델에 대한 대상 구조물 및 모델 개발에 대한 요약을 나타냄.

■ 결과

○ 과거 지진 피해 사례를 이용한 고속철도 시설물의 경험적 지진취약도 함수 개발

- 규모 6.6 2004 니가타 지진 당시 조에츠 신칸센 고속철도 시스템에 구조물 피해가 발현함.

- 고속철도 시스템의 구조물 유형, 지진에 의한 피해 위치 및 피해 정도, 관측된 계기진도를 추정하여 경험적 방법으로 취약도 모델을 개발함.

· 피해가 발생한 지역(에치고유자와역-니가타역: 총 118km)의 철도시스템을 200m 단위 세그먼트로 분류하여 경험적 취약도 함수를 개발함.

· 터널을 제외한 모든 구간에서 교량 위에 철도가 설치되어 있어, 역사, 교각, 터널 총 3개의 구조물로 분류가 가능함.

· 조에츠 신칸센의 2004 지진에 의한 피해 상황 및 복구를 기술한 JR 보고서를 참조하여 피해 기술, 피해 구간, 철도 구조물 유형을 파악함.

· 위치의 불확실성을 고려하여 피해 위치를 각 세그먼트에 분포함.

· HAZUS(FEMA, 2004) 피해 상태 기술을 참조하여 철도 피해 기술에 의거한 피해 정도(=손상상태) (DL 1-4)를 정립함.

표 2.17. 2004 니가타 지진에 의한 고속철도 시스템의 피해와 피해 위치

거리 (km)	피해 기술	철도 구조물 유형	위치
0-0.2		역사	에치고-유자와 역
0.2-28.6	44 전철주 기울임 2 제설 구조물 피해	혼합	에치고-유자와 역과 우라사 역 사이
0.2-1.6		교량	
1.6-25.6		터널	
25.6-28.6		교량	
28.6-28.8	11 전철주 기울임	역사	우라사 역
28.8-62.8	70 전철주 기울임 2 제설 구조물 피해	혼합	우라사 역과 나가오카 역 사이
28.8-30.6		교량	
30.6-37.0	콘크리트 떨어짐	터널	우라사 터널
37.0-37.2		교량	
37.2-40.4	콘크리트 떨어짐	터널	히로노우치 터널
40.4-40.6		교량	
40.6-40.8	4 교각 피해	교량	No.1 와나즈 교량
40.8-41.0	8 교각 피해	교량	No.3 와나즈 교량
41.0-41.4	2 교각 피해	교량	우오노가와 교량
41.4-50.0	- 철로 슬라브 변형 - 아치와 측벽 조각 떨어짐 - 중앙통로 피해	터널	우오노마 터널
50.0-50.4		교량	
50.4-51.8	- 철로 슬라브 변형 - 콘크리트 떨어짐 - 중앙통로 균열	교량	요켄 터널
51.8-54.6	콘크리트 떨어짐	교량	타키야 터널
54.6-54.8	2 지반 침하	교량	요도가와 교량과 토카마치 교량
54.8-55.4	28 교각 피해 - 슬라브와 철로 고정핀 피해 - 철로 변형	교량	무라마츠 교량
55.4-56.4		교량	
56.4-56.6	1 교각 피해 - 슬라브와 철로 고정핀 피해	교량	카타다 교량
56.6-62.2		교량	
62.2-62.4	지반 침하	교량	카미시마 교량
62.4-62.8	37 전철주 기울임	역사	나가오카 역

62.8-85.8	14 전철주 기울임 5 제설 구조물 피해	교량	나가오카 역과 쓰바메산조 역 사이
63.8-64.0	1 교각 피해	교량	No.1 후쿠로마치 교량
69.2-69.6	1 교각 피해	교량	소리다 교량
71.0-71.4	1 교각 피해	교량	하야미 교량
84.0-84.2	1 교각 피해	교량	카이바미 교량
85.8-86.0	37 전철주 기울임	역사	쓰바메산조 역
86.0-118.2	1 제설 구조물 피해	교량	쓰바메산조 역과 니가타 역 사이
118.2-118.4		역사	니가타 역

표 2.18. 2004 니가타 지진 피해 기술 별 피해 정도 분류

피해 정도	피해 상태	대상 구조물	피해 기술	피해 세그먼트 수
1	미약한 손상	역사 교량	- 전철주 기울임 - 제설 구조물 피해	9
2	경미한 손상	터널 교량	콘크리트 떨어짐 1-4개 교각 피해	11
3	중간 손상	터널 교량	콘크리트 떨어짐, 궤도 슬래브 변형, 중앙통로 균열 4개 초과 교각 피해	4
4	광범위한 손상	교량	지반 침하 또는 철로 변형	4

· 미지질조사국(USGS)에서 제공하는 ShakeMap으로부터 2004 니가타 지진에 대한 최대지반가속도, 최대지반속도, 그리고 응답스펙트럼 (0.3초, 1.0초, 3.0초)에 대한 래스터 파일을 철도 세그먼트 위치에 중첩시켜 각 세그먼트에서의 해당 계기진도를 추출함.

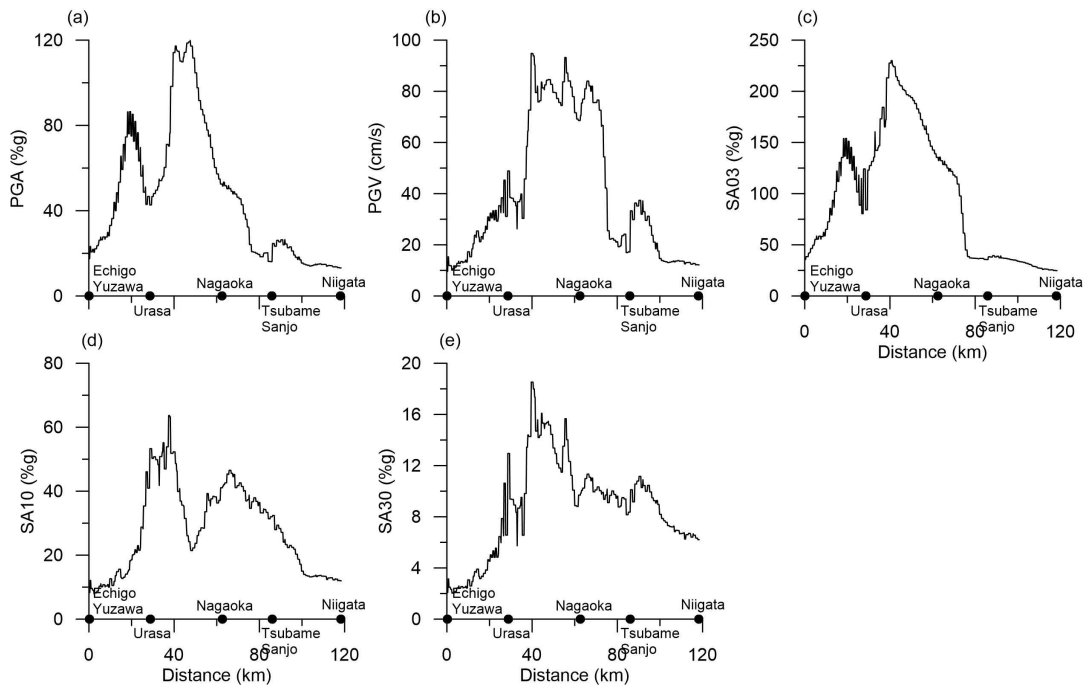


그림 2.47. 2004 니가타 지진에 의한 철도거리에 따른 진도 분포

- 다음의 절차를 활용하여 경험적 취약도 모델을 개발함.
 1. 특정 진도 범위 안에 속하는 세그먼트에서 피해 세그먼트 수 계산
 2. 총 세그먼트와 피해 세그먼트와의 비율로 피해 확률 계산
 3. 진도 범위를 변경하여 피해 확률 계산
 4. 회귀분석을 사용하여 피해 확률을 예측하는 취약도 곡선 추정
- 최대우도법을 활용하여 로그누적정규분포를 사용하는 취약도 곡선을 추정함

$$\{\hat{\mu}, \hat{\beta}\} = \max_{\mu, \sigma} \prod_{j=1}^m \binom{n_j}{z_j} \Phi\left(\frac{\ln x_j - \mu}{\beta}\right)^{z_j} \left(1 - \Phi\left(\frac{\ln x_j - \mu}{\beta}\right)\right)^{n_j - z_j}$$

n_j : 총 세그먼트 수

z_j : 피해 입은 세그먼트 수

x_j : 대상 진도

Φ : 표준누적정규분포 함수

- 피해 정도가 0, 1, 2를 초과할 때의 취약도 곡선 개발을 개발함.
- β 가 낮을수록 불확실성이 적기 때문에 최적 취약도 곡선이라 할 수 있음.
- 따라서, 분석된 지진 사례의 취약도 곡선을 위한 최적 진도는 고유주기 3.0초 응답스펙트럼임.

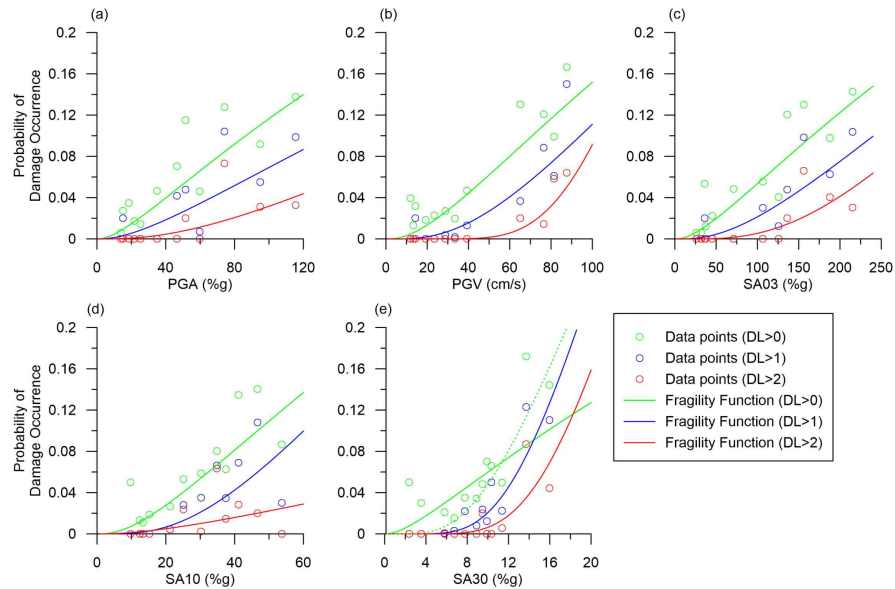


그림 2.48. 피해 정도 및 사용 계기진도 별 피해 확률 및 취약도 곡선

표 2.19. 각 계기진도 및 피해정도에 따른 취약도 곡선(로그누적정규분포) 상수

계기진도	상수	DL > 0	DL > 1	DL > 2
PGA	μ (%g)	701.2	945.9	966.4
	β	1.63	1.52	1.22
PGV	μ (cm/s)	405.1	331.4	176.7
	β	1.36	0.98	0.43
$SA_{0.3}$	μ (%g)	1210	1094	881.7
	β	1.55	1.18	0.85
$SA_{1.0}$	μ (%g)	259.7	195.8	1291
	β	1.34	0.92	1.62
$SA_{3.0}$	μ (%g)	31.6	29.0	31.8
	β	0.69	0.52	0.46

- 개발한 경험적 취약도 모델을 2016 규모 7.0 구마모토 지진에 의한 피해 사례와 비교하여 검증함.
- JR보고서로부터 피해 위치 및 피해 기술을 조사함.
- 신미나마타역부터 신노무타 역까지 총 113km 연장을 200m 단위 세그먼트로 분류함.
- 피해 유형을 결정하기 위해 고속철도 시스템의 구조물 유형을 분석함.

표 2.20. 2016 구마모토 지진에 의한 고속철도 시스템의 피해와 피해 위치

거리 (km)	피해 기술	철도 구조물 유형	위치
43.2-75.0	33 교각기둥 손상	교량	신야스시로역과 쿠마모토 사이
75.0-96.8	122 방음벽 붕괴 4 교각 베어링 손상	교량	쿠마모토역과 신타마나역 사이

표 2.21. 피해 기술 별 피해 정도 분류

피해 정도	피해 상태	대상 구조물	피해 기술	피해 세그먼트 수
2	경미	교량	교각 기둥 손상 교각 베어링 손상 방음벽 붕괴	25

- 계기진도를 추정하기 위해 각 세그먼트 중앙에서의 위치(위도 및 경도)를 계산함.
- 미지질조사국(USGS)에서 제공하는 ShakeMap으로부터 2016 구마모토 지진에 대한 최대지반가속도, 최대지반속도, 그리고 응답스펙트럼 (0.3초, 1.0초, 3.0초)에 대한 래스터 파일을 철도 세그먼트 위치에 중첩시켜 각 세그먼트에서의 해당 계기진도를 추출함.

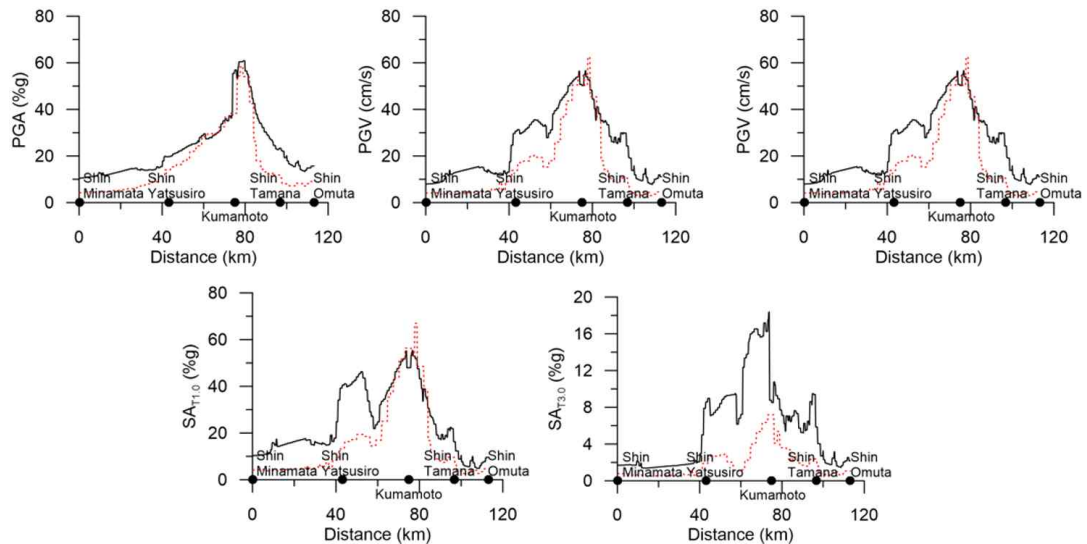


그림 2.49. 2016 구마모토 지진 본진 및 여진에 의한 계기진도 분포

- 2004 니가타 지진으로부터 개발된 경험적 취약도 모델을 2016 구마모토 지진 사례에 적용하여 총 22개의 세그먼트의 피해를 예측함.
- 실제 피해 세그먼트인 25와 비교하여 88%의 예측 정확도를 확인함.

○ 교량의 대표 지진취약도 함수 제안

- 교량의 대표 지진취약도 함수 제안을 위해 총 3개의 선행 지진취약도 함수를 등가가중조합함.

표 2.22. 선행연구의 교량에 대한 지진취약도 함수 파라미터

문헌	손상 수준 (D_L)	중간값 (μ)	표준 편차(β)
철도 시설물의 지진취약도함수 국산화 연구 (2008)	2	0.036	0.48
	3	0.101	0.51
	4	0.29	0.47
Kim et al. (2010)	2	0.348	1.18
	3	0.527	
	4	1.083	
Seo et al. (2010)	2	0.1418	0.668
	3	0.2184	
	4	0.3112	

표 2.23. 가중조합된 교량의 대표 지진취약도 함수 파라미터

구조물 유형	손상 수준 (D_L)	중간값 (μ)	표준 편차(β)
교량	2	0.140	0.702
	3	0.237	0.717
	4	0.494	0.697

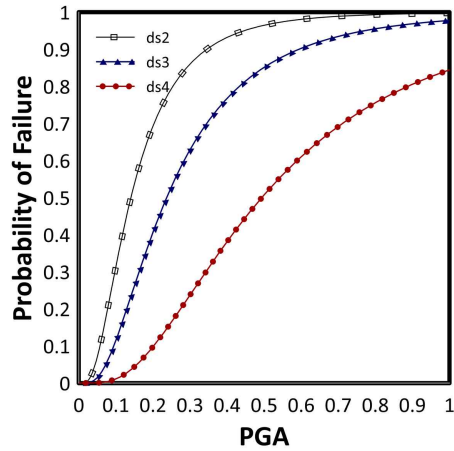


그림 2.50. 교량의 대표 지진취약도 곡선

○ 터널의 대표 지진취약도 함수 제안

- 터널의 대표 지진취약도 함수 제안을 위해 4개의 개착식 터널과 3개의 굴착식 터널의 선행 지진취약도 함수를 각각 등가가중조합함.

표 2.24. 선행연구의 개착식 터널에 대한 지진취약도 함수 파라미터

문헌	손상 수준 (D_L)	중간값 (μ)	표준 편차(β)
Kim et al. (2014)	2	0.61	0.67
	3	1.09	
	4	1.8	
Hu et al. (2017)	2	0.3	0.09
	3	0.61	0.09
	4	0.74	0.1
Park et al. (2018)	2	0.58	0.69
	3	0.67	
	4	0.83	
Nguyen et al. (2019)	2	0.73	0.74
	3	1.23	
	4	1.92	

표 2.25. 선행연구의 굴착식 터널에 대한 지진취약도 함수 파라미터

문헌	손상 수준 (D_L)	중간값 (μ)	표준 편차(β)
Kim et al. (2014)	2	0.85	0.79
	3	1.36	
	4	2.04	
HAZUS (2004)	2	0.6	0.6
	3	0.8	
	4	-	
S.Argyroudis and K. Pitilakis (2012)	2	0.55	0.7
	3	0.82	
	4	1.05	

표 2.26. 터널의 대표 지진취약도 함수 파라미터

구조물 유형	손상 수준 (D_L)	중간값 (μ)	표준 편차(β)
개착식 터널	2	0.5375	0.5325
	3	0.7805	
	4	1.075	
굴착식 터널	2	0.66	0.3897
	3	0.9834	
	4	1.545	

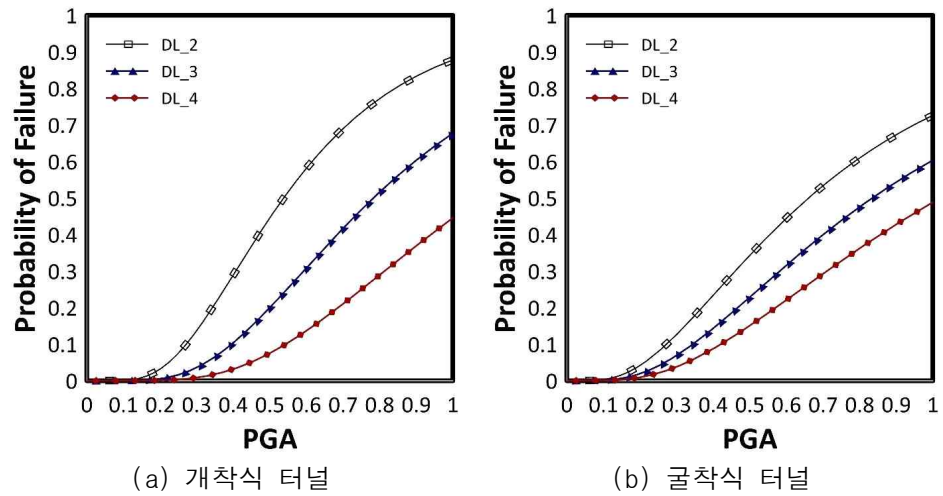


그림 2.51. 터널의 지진취약도 곡선

○ 토공(성토 및 절토)의 대표 지진취약도 함수 제안

- 토공의 경우 하나의 선행연구에서 제안한 지진취약도 함수를 이용함.
- 성토의 높이 및 절토의 깊이, 지반분류에 따라 다른 지진취약도 함수가 제안됨.

표 2.27. 토공의 지진취약도 함수 파라미터

구조물 유형	지반분류	손상 수준(DL)	높이 또는 깊이(m)	중간값(μ)	표준 편차(β)
성토	C	2	2	0.53	0.52
			4	0.36	0.9
			6	0.3	0.7
		3	2	0.77	1
			4	0.57	0.9
			6	0.3	0.7
		4	2	1.17	1
			4	0.91	0.9
			6	0.84	0.7
	D	2	2	0.4	0.9
			4	0.25	0.9
			6	0.12	0.8
		3	2	0.53	0.9
			4	0.37	0.9
			6	0.2	0.8
		4	2	0.72	0.9
			4	0.54	0.9
			6	0.34	0.8
절토	C	2	6	0.44	1
		3		0.74	
		4		1.29	
	D	2	4	0.31	1
		3		0.58	
		4		1.11	
		2	6	0.27	1
		3		0.49	
		4		0.93	

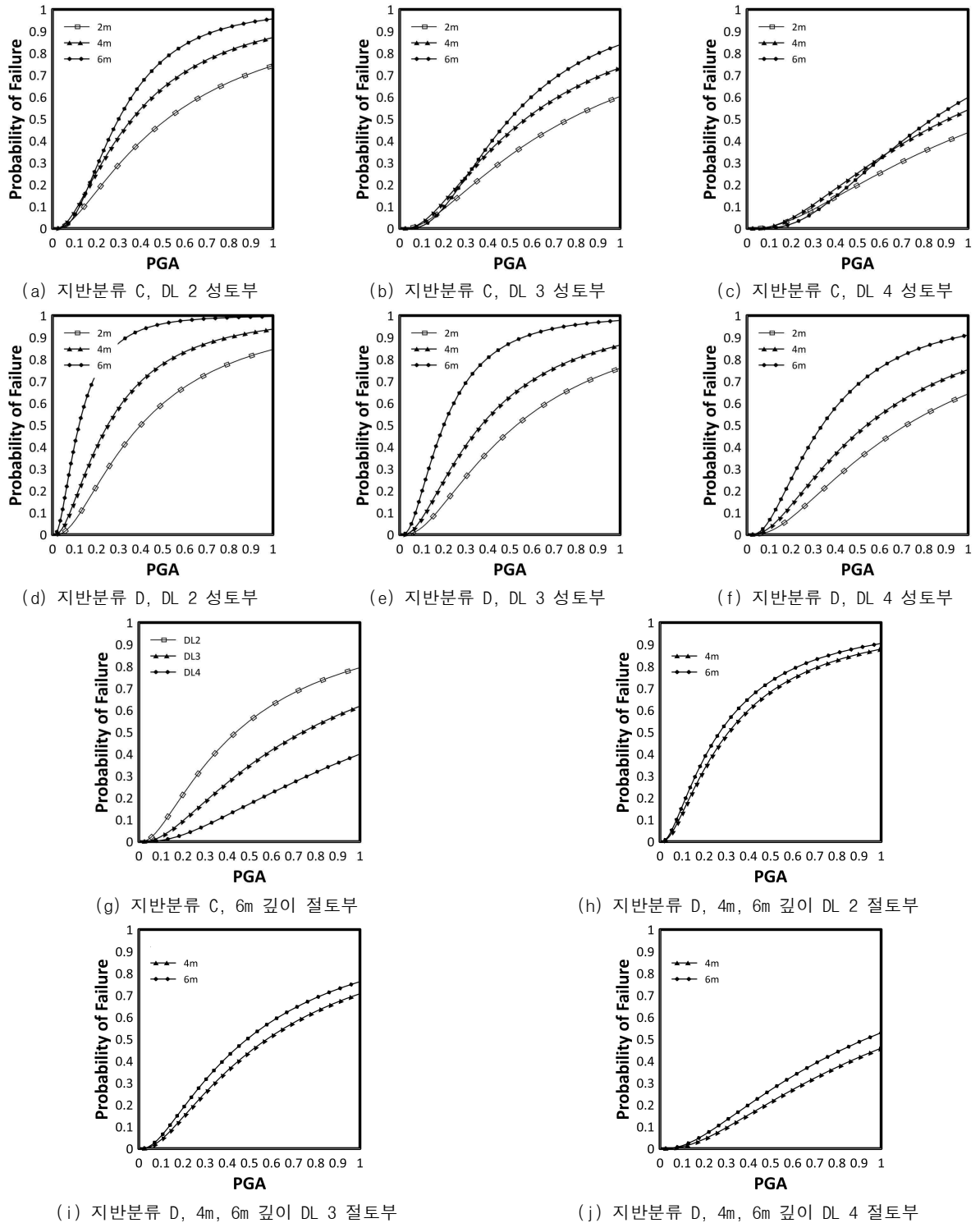


그림 2.52. 토공의 지진취약도 곡선

다) 테스트베드(익산-정읍) 구간 시스템 피해 확률 모듈

■ 개요

- 빠른 속도로 움직이는 열차의 경우 제동을 시작하여도 완전히 정차할 때까지 제동시간이 소요되며, 이러한 제동시간동안 이동한 거리를 제동거리라 함.
- 지진 시 열차의 피해확률은 철도의 피해확률과 직접적으로 연동됨. 지진동을 감지 후 열차정지를 위해 급제동을 하여도 제동거리만큼 열차는 이동하게 되며, 이 제동거리 내에 철도의 피해가 존재하면 열차 탈선 등의 피해를 야기할 수 있음.
- 시스템 피해확률이란 주어진 시스템에서 어느 한 요소 이상이 피해를 입을 확률을 의미함. 지진동에 의한 열차의 피해확률을 계산할 시 단순히 한 작은 구간에 위치한 시설물의 피해확률이 아닌, 제동거리 내에 있는 철도시설물의 시스템 피해확률을 계산해야 더 합리적인 열차 피해확률을 산정할 수 있음.

○ 해당연구과제에서는 테스트베드(익산-정읍 고속철도 구간) 구간의 철도시설물을 20 m구간으로 구분하고 각 구간의 시설물 유형을 맞는 지진취약도 함수를 정의하였음. 그리고 열차의 제동거리를 고려하여 지진 감지 시 열차의 피해확률을 철도 시스템의 피해확률로 나타냄.

○ 철도시설물의 지진취약도 함수는 지표면에서의 PGA를 기준으로 제시되어 있음. 해당과제에서 개발하는 On-board 시스템으로부터 감지하는 가속도는 열차객실에서 감지하는 최대가속도(Peak Floor Acceleration, PGA)이므로, PFA를 지표면의 PGA로 변경할 필요가 있음. 이를 PFA에 각 경우에 맞는 전달함수를 적용하여 PGA를 계산함.

■ 결과

○ 열차의 제동거리 산정

- KTX의 비상 제동 시 감속 가속도(a_0)는 약 4.5km/h/s임.
- 열차의 속도(V_0)가 300km/h 일 때, 공주시간(t_n)을 1초로 가정하면 비상 제동 시 완전정지까지의 총 이동 거리(S)는 약 3.6km임.

$$S = \frac{V_0^2}{2a_0} + V_0 t_n$$

- 열차의 비상제동거리 세부기준(철도차량 안전기준에 관한 지침; 국토교통부, 2010)에 의하면, 비상 제동시 주행속도별 고속철도차량의 제동거리는 주행속도 300km/h일 경우 3.3km, 200km/h일 경우 1.6km로 설정되어 있음.
- 따라서, 열차에서 지진 탐지 후 정지할 때까지의 거리를 최고주행속도일 때를 가정하여 3.3km 철로에 대한 지진피해확률 계산이 필요함.

○ 테스트베드(익산-정읍) 구간의 시설물 및 지반 유형 결정

- 익산역부터 정읍역까지의 약 30.5km 연장을 철로의 교각과 교각 사이의 평균거리인 20m 단위 세그먼트로 분류하고, 선로일람약도를 참고하여 각 세그먼트의 구조물 유형 분석 및 중앙에서의 위치(위도 및 경도)를 결정함.
- 구조물 유형은 굴착식 및 개착식 터널, 교량, 성토부 및 절토부로 구분됨.
- 교량의 경우 교각의 높이는 최소 2m에서 최대 9m이나 대다수의 교각이 평균 6m의 높이를 가지고 있음.
- 터널의 경우 굴착식 터널의 경우 연장 0.54km, 개착식 터널의 경우 연장 0.5km로 구성되어 있음. 성토 및 절토 높이 별 연장은 다음 표와 같이 구성되어 있음.

표 2.28. 철도시설물 간의 최대가속도에 대한 전달함수

구조물별 유형	높이 (m)	총 연장 (km)
성토	2	2.9
	4	2.9
	5	0.32
	6	4.5
	7	0.5
	8	0.36
	10	0.24
	12	0.12
절토	2	0.2
	4	0.4
	6	1.02
	10	0.2
	12	0.08
	20	0.1

- 익산-정읍구간의 지반 유형의 경우 Choi et al. (2021)의 V_{S30} 분류를 활용 시 V_{S30} 은 283-664m/s로 지반분류 C 및 D로 구성되어 있음.



(a) KTX 호남선 익산-정읍 구간의 위치

구조물별 유형	세그먼트 수	총 연장 (km)
터널(굴착형)	27	0.54
터널(개착형)	25	0.5
교량	781	15.62
성토부	592	11.84
절토부	100	2

(b) KTX 호남선 익산-정읍 구간 구조물 분류

그림 2.53. KTX 호남선 익산-정읍 구간의 위치 및 구조물 분류

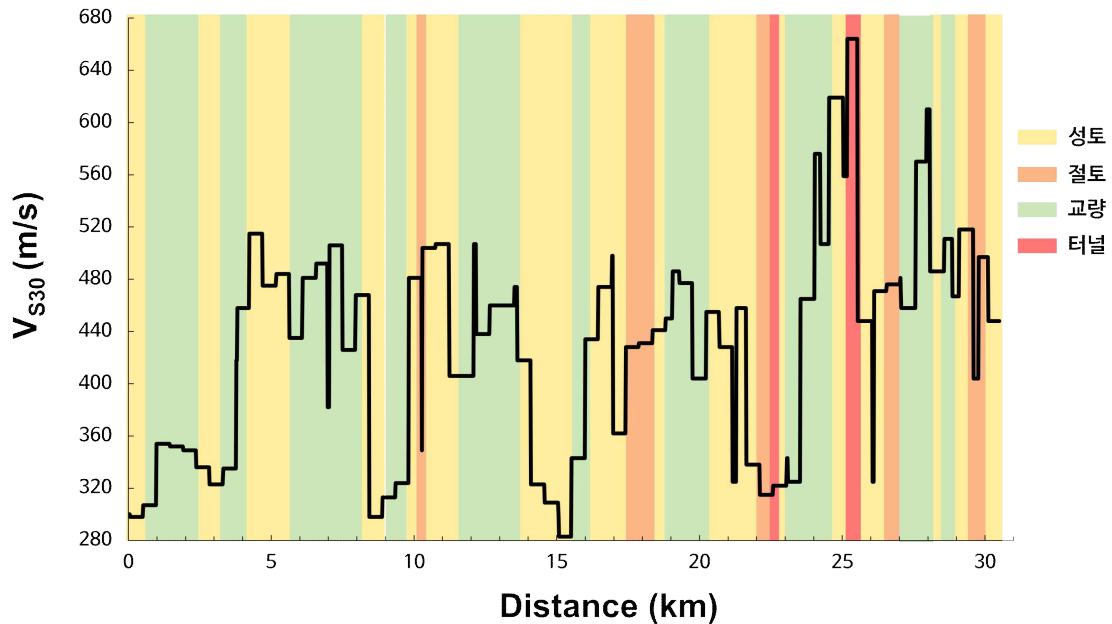


그림 2.54. KTX 호남선 익산-정읍 구간의 V_{S30} 및 구조물 유형

○ 전달함수를 활용하여 지표면 기준 지진동의 크기 도출

- 해당과제의 공동연구로부터 기반암-지표면($TF_{bedrock}$), 지표면-교량상부(TF_{bridge}), 지표면-대차(TF_{rail}), 대차-객실(TF_{room})의 전달함수를 도출함.
- 터널의 경우, 지반 내에 위치해 있으므로 기반암으로부터의 전달함수를 1로 가정함.
- 교량의 경우, 교각의 높이에 따라 고유주기가 변동하여 전달함수에 변화가 생기나, PGA에 대한 전달함수의 경우 변동 폭이 크지 않아 평균 교각높이(6 m)에 대한 전달함수를 사용함.
- 토층의 경우, 기반암 기준 지반운동에측모델과 토층에서 계측한 지반운동의 관계로부터 V_{S30} 의 함수로 전달함수를 제시함. 기반암 기준 지반운동에측모델은 Jo and Baag (2003) 모델과 Emolo et al. (2015) 모델을 가중 조합한 후 기반암에서 계측한 계기진도에 맞춰 조정하였으며, 기반암 지반운동에측모델의 추정치와 지표면에서의 계기진도의 비를 V_{S30} 의 함수로 나타냄.
- 지표면-대차 전달함수의 경우 실내모형시험으로부터 유추함.
- 대차-객실 전달함수의 경우, 대차에서 계측한 가속도 기록의 평균과, 객실에서 계측한 가속도 기록의 평균과의 비로 계산함.

표 2.29. 철도시설물 간의 최대가속도에 대한 전달함수

전달함수 유형	전달함수
기반암-지표면 (TF_{soil})	$TF_{soil} = \frac{PGA_{soil}}{PGA_{bedrock}} = \exp(4.89 - 0.63 \ln(V_{S30})) \geq 2$
기반암-터널 (TF_{tunnel})	$TF_{soil} = \frac{PGA_{tunnel}}{PGA_{bedrock}} = 1$
지표면-교량 (TF_{bridge})	$TF_{bridge} = \frac{PGA_{bridge}}{PGA_{soil}} = 1.1 \text{ for } M < 6$ $TF_{bridge} = \frac{PGA_{bridge}}{PGA_{soil}} = 2 \text{ for } M \geq 6$
지표면-대차 (TF_{rail})	$TF_{rail} = \frac{PGA_{train}}{PGA_{soil}} = 1.2 \text{ for } M < 6$ $TF_{rail} = \frac{PGA_{train}}{PGA_{soil}} = 7 \text{ for } M \geq 6$
대차-객실 (TF_{room})	$TF_{room} = \frac{PGA_{room}}{PGA_{train}} = 0.25$

○ 제동거리 내 철도시설물 시스템 피해 확률 계산

- 시스템 피해 확률은 어떤 피해에 의해 시스템이 동작하지 않을 확률을 나타내는 것으로, 직렬 시스템의 경우 시스템 내 적어도 한 요소가 피해를 입을 확률을 나타냄.
- 직렬 시스템에서 시스템 내 각 요소의 피해 상관정도에 따라 시스템 피해 확률의 범위는 다음과 같이 표현됨.

$$\max(P_f(i)) \leq P_{sys} \leq 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_f(i))$$

- 각 요소의 피해 상관정도가 종속적일 경우 시스템 피해 확률(P_{sys})은 각 요소의 피해 확률(P_f) 중 최대 피해 확률과 동일하며, 상관정도가 독립적일 경우 P_{sys} 는 P_f 의 보수의 곱의 보수와 같음.
- 요소들의 거동이 특정 거리 안은 종속적이며(특성거리), 거리 밖은 독립적인 것으로 가정할 경우 시스템 피해 확률은 다음과 같이 계산됨.

$$P_{sys} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_{char}(i))$$

- P_{char} 은 특성거리 내 요소의 최대피해 확률을 나타냄.
- 선행연구에 의하면 지진에 의한 하천제방의 피해의 경우 특성거리를 200-300m로 제시함 (Zimmaro et al., 2019).
- 하천제방과 비교하여 비교적 일률적으로 건설되는 철도의 특성을 고려하여 특성거리를 500m로 가정한 후 시스템 피해 확률을 계산함.
- 다음의 표는 시스템 피해 확률 계산의 예시를 보여줌.
 - 대상 시스템은 제동거리를 3.5km로 가정하여 기점대비 현 열차위치에서 3.5km전방까지로 간주함.
 - 특성거리를 500m로 하여 각 특성거리 내 최대요소피해 확률을 계산함.
 - 현 열차의 On-board 가속도 센서에서 0.1g의 최대가속도를 검출하였다고 가정함.
 - 피해 확률 계산 시 각 구조물의 전달함수를 고려하여 지진파의 크기를 조절함.
 - 최종적으로 최대요소피해 확률로부터 시스템 피해 확률을 계산함.

표 2.30. 계측위치에 따른 시스템 피해 확률

열차위치, 대상시스템 및 PFA (g)	특성거리 구간 (km)	구간 내 최대취약요소	DL 2 취약도함수 파라미터 (x_m, β)	PGA (g)	$\max(P_f(i))$	P_{sys}
열차위치: 10km 대상시스템: 10-13.5km PFA (g): 0.1	10.0 - 10.5	성토	0.12, 0.9	0.050	16.5%	58.8%
	10.5 - 11.0	성토	0.12, 0.9	0.049	15.7%	
	11.0 - 11.5	성토	0.12, 0.9	0.048	15.6%	
	11.5 - 12.0	교량	0.14, 0.702	0.056	9.4%	
	12.0 - 12.5	교량	0.14, 0.702	0.056	9.4%	
	12.5 - 13.0	교량	0.14, 0.702	0.053	8.3%	
	13.0 - 13.5	교량	0.14, 0.702	0.051	7.7%	
열차위치: 20km 대상시스템: 20-23.5km PFA (g): 0.1	20.0 - 20.5	교량	0.14, 0.702	0.050	7.1%	45.3%
	20.5 - 21.0	교량	0.14, 0.702	0.048	6.4%	
	21.0 - 21.5	성토	0.12, 0.9	0.046	14.4%	
	21.5 - 22.0	성토	0.12, 0.9	0.046	14.4%	
	22.0 - 22.5	절토	0.44, 1.0	0.058	2.2%	
	22.5 - 23.0	성토	0.12, 0.9	0.058	2.1%	
	23.0 - 23.5	교량	0.14, 0.702	0.057	10.2%	

- 다음의 그림은 DL 2, 3, 4에 대해 열차가 익산-정읍구간의 기점(익산역)으로부터 5, 10, 15, 20, 25km 지점에 있다고 가정할 시 PGA에 대한 시스템 피해확률(제동거리 3.5km)을 나타냄.

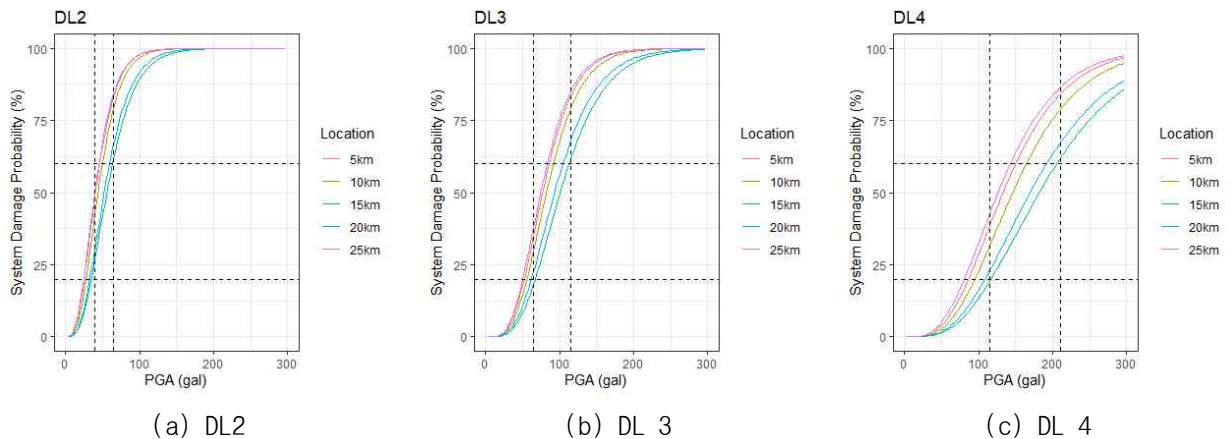


그림 2.55. 지진시나리오에 따른 시스템 피해 확률

라) 열차 운행 제어를 위한 진동 기준 설정

■ 개요

○ 현재의 지진 시 열차 운행 제어 기준은 철도안전관리 시행세칙(2020)에서 제안하고 있으며, 고속철도 지진조기경보시스템 내에 구축되어 있는 가속도계의 가속도가 65 gal($\text{gal}=\text{cm/s}^2$) 이상일 경우 정지, 45 gal 이상일 경우 서행, 45 gal미만일 경우 주의하며 운행으로 제시되어 있음.

표 2.31. 지진시 철도 운행 여부 현황

최대가속도	< 40 gal	40 - 65 gal	> 65 gal
현행 기준	조치 없음	서행	정지

○ 해당연구과제에서는 단순한 가속도 크기로 인한 운행 제어 기준만이 아닌 각 손상상태에 대한 철도 시스템 피해확률을 계산하였으므로, 철도 피해로 인한 열차의 피해 가능성 정도에 대해 더 많은 정보를 기관사 또는 중앙통제시스템에 전달할 수 있음.

○ 따라서, 현행 열차 운행 제어 기준과 부합하며, 추가적인 피해 예상 정보를 해당연구과제에서는 단순한 가속도 크기로 인한 운행 제어 기준만이 아닌 각 손상상태에 대한 철도 시스템 피해확률을 계산하였으므로, 철도 피해로 인한 열차의 피해 가능성 정도에 대해 더 많은 정보를 기관사 또는 중앙통제시스템에 전달할 수 있음.

■ 결과

○ 철도 시스템 피해확률에 기반한 열차 피해 정도 기준

- 익산-정읍 구간의 시스템 피해확률(그림 2.55)에 따르면, 지진 발생 시 열차운행에 조치를 취하지 않는 기준인 최대가속도 40 gal에 해당하는 최소 시스템 피해확률은 DL 2(경미한 손상)의 20%에 부합하고, 서행을 지시하는 65 gal은 DL 2의 60%, DL 3(중간 손상)의 20%에 부합함.
- 65 gal 이후는 열차운행을 정지하며 더 이상 최대가속도에 따른 현행기준의 조치사항은 없음.
- 40 gal, 65 gal에 부합하는 20%, 60%의 시스템 피해확률을 DL 3, DL 4(광범위한 손상)에 대입하면 DL 3의 60%, DL 4의 20%에 해당하는 최대가속도는 115 gal이며, DL 4의 60%에 해당하는 최대가속도는 210 gal임.
- 이를 기준으로 경보 없음, 주의, 경계, 심각, 매우심각의 다섯가지 단계를 최대가속도 기준에 따라 정의하는 시스템 피해확률 기반 피해 지표를 정의함.

표 2.32. 시스템 피해확률 기반 피해 지표

시스템 피해확률	DL 2 :< 20%	DL 2 : 20% - 60% DL 3 :< 20%	DL 2 :> 60% DL 3 : 20% - 60% DL 4 :< 20%	DL 3 :> 60% DL 4 : 20 - 60%	DL 4 :> 60%
경계 정보	경보 없음	주의	경계	심각	매우심각
최대가속도	< 40 gal	40 - 65 gal	65 - 115 gal	115 - 210 gal	> 210 gal

(4) (CTE D) 진동 감지 후 10초 이내 경보 가능한 열차 서행/정지 경보 시스템

가) 철도안전운행 시스템 연계방안 연구

■ 개요

- 철도안전운행 시스템과의 연계방안에 대한 연구는 on-board 지진조기경보 시스템을 무인 탑재 시스템으로 열차에 탑재하여 외부에서 이 시스템을 원격 구동하고 계측상태를 모니터링하기 위하여 구동 시 필요한 안정적인 전원의 공급과 계측상태를 지속적으로 모니터링하며 계측 제어 및 조기경보 정보를 전달하기 위한 끊임없는 Wifi 접속이 유지되어야 하므로 열차 객실 내에 설치될 on-board 지진조기경보 시스템의 네트워크 설치 환경에 대한 연계방안 마련을 해야 함.
- 역과 역 사이 구간을 기준으로 계측을 수행하기 때문에 운행 중인 열차 구간에 대한 정보를 수집하고 이에 대한 위치 정보를 기준으로 역간 구간에 대한 정보 연계가 필요함. 그리고 지진조기경보 시스템을 열차 벽 등에 설치하는 경우에는 객실 내 진동으로 정확한 진동 계측이 어려우므로 열차 객실 바닥에 설치를 해야 하는 데 이 경우 GPS 수신 안테나가 하늘을 바라보지 못하는 상황으로 이에 대한 방안 마련이 필요함.

■ 결과

- 철도안전운행시스템과 연계 고려 대상은 다음과 같음.
 - 열차 객실 내 전원 공급
 - 열차 객실 내 Wifi 연결
 - GPS 안테나 설치
 - 열차 운행 구간 판독을 위한 기준 환경 선정
- 철도안전운행 시스템에서의 열차 객실 내 전원공급 체계는 on-board 지진조기경보 시스템에 적합하지 않는 것으로 확인됨. 호남선, 경부선 및 강릉선 구간을 기준으로 전력공급을 위해 220V 콘센트가 있는 열차좌석에서 해당 17회 시험을 수행하였음. 전력은 대체로 열차 운행 시작 후 5~10여분 후에야 전력이 공급되기 시작하나 승차역 전후 또는 터널 진입 중에는 대체로 전력의 공급이 중단되었음. 지속적 계측을 위해서는 전원이 무중단으로 제공할 수 있는 체계가 지원되어야 함.
- 전원 이슈는 시중의 10,000mA의 보조 배터리를 사용하였으며, 완충 시 연속 사용시간은 평균 12시간 정도가 확보되었음.
- 철도안전운행 시스템의 Wifi 접속은 시스템 구조상 화면에서 웹 브라우저를 통한 인증 과정이 필요함. on-board 지진조기경보 시스템은 화면 등의 별도 출력 장치를 탑재하지 않아서 Wifi의 SSID와 비밀번호 체계의 인증이 미리 처리되어야 하며 철도안전운행 시스템에서 이러한 인증 방식의 제공이 필요함.
- 일반적으로 SSID 인증 방식으로 모바일 단말기를 활용하였음. 모바일 단말기의 hotspot 설정을 통하여 SSID 방식의 Wifi 환경을 구성할 수 있음.
 - Android 화면 위 상단에서 아래로 끌어내려 hotspot icon을 활성화
 - Hotspot icon이 활성화되면 길게 눌러 모바일 핫스팟 설정 화면에서 text가 SSID 확인(설정 버튼을 눌러 네트워크 이름(SSID) 및 비밀번호는 변경이 가능)
 - 네트워크의 모 단말에 접속하여 접속된 단말 목록 확인
- on-board 지진조기경보 시스템(Raspberry PI)에서는 별도의 모니터가 탑재되어 있지 않기 때문에 미리 SSID 및 password에 대한 정보 파일을 생성하여 최초 1회 OS가 부팅하면서 이 파일의 정보를 로드하여 별도의 입출력 장치를 통하지 않고 Wifi 인증을 통한 접속을 설정할 수 있음. 이를 위하여 ssh 파일과 wpa_supplicant.conf 파일을 생성하고 OS를 보유한 sd 카드에 이 두 파일을 복사 후 on-board 지진조기경보 시스템의 전원을 켜. 그러면 on-board 지진조기경보 시스템이 부팅하면서 자동으로 Wifi 인증 과정을 설정하여 Wifi 네트워크 환경에 접속하게 됨. 이를 위한 설정 방법은 다음과 같음.
 - 연결할 AP(철도안전운행 시스템의 Wifi, 공유기, Mobile phone's hotspot 등)의 Wifi 접속 정보인 SSID와 password 정보로 접속 정보 파일(text 포맷)을 생성

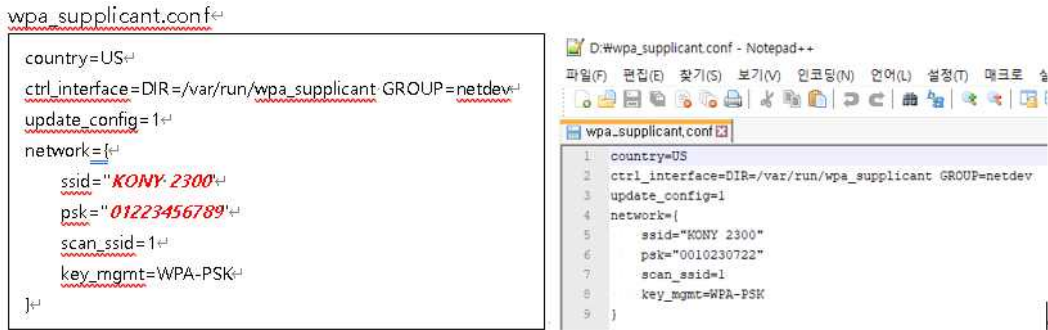


그림 2.56. Wifi 자동 접속 스크립트

- wpa_supplicant.conf 파일과 ssh 파일을 boot 드라이브(sd카드)에 복사
- 복사 완료 후 Raspberry PI를 reboot하면 wifi에 연결된 것을 확인 가능

모바일 핫스팟

다른 디바이스와 인터넷 연결 공유

☒ 점

다음에서 인터넷 연결 공유

Wi-Fi 2

네트워크 이름: KONY 2300

네트워크 암호:

편집

연결된 장치: 1/8

디바이스 이름 IP 주소 물리적 주소(MAC)

raspberrypi 192.168.137.38 dc:a6:32:3e:0b:02

그림 2.57. Wifi에 연결 확인

- 해당과제 수행 중에는 철도안전운행 시스템과의 Wifi 연계를 위한 별도의 과정을 진행하지 않았기 때문에 테스트 수행 중에 별도의 모바일 단말기를 활용하여 on-board 지진조기경보 시스템(Raspberry PI)이 인터넷 통신을 수행할 수 있는 모바일 네트워크 환경을 구성하여 전반적인 테스트를 수행하였음.
- 해당과제에 사용된 Raspberry PI 기반의 on-board 지진조기경보 시스템은 자체 GPS 안테나를 내장하고 있으나 열차 객실 내의 정확한 열차진동을 계측하기 위해서는 열차 객실 바닥에 최대한 밀착시켜야 하므로 GPS 위성을 바로 바라볼 수 없어 계측기의 내장 GPS로는 위치 및 속도정보를 파악할 수가 없음.



그림 2.58. 열차 객실 바닥에 고정한 지진조기경보 시스템

- 때문에 on-board 지진조기경보 시스템을 원격제어 및 상태를 확인할 수 있는 모바일 앱을 개발하였고, 모바일 앱의 GPS 정보를 계측기와 실시간으로 연동하여 속도 추이별 진동의 변이를 복합 분석할 수 있는 환경을 구축하였음.

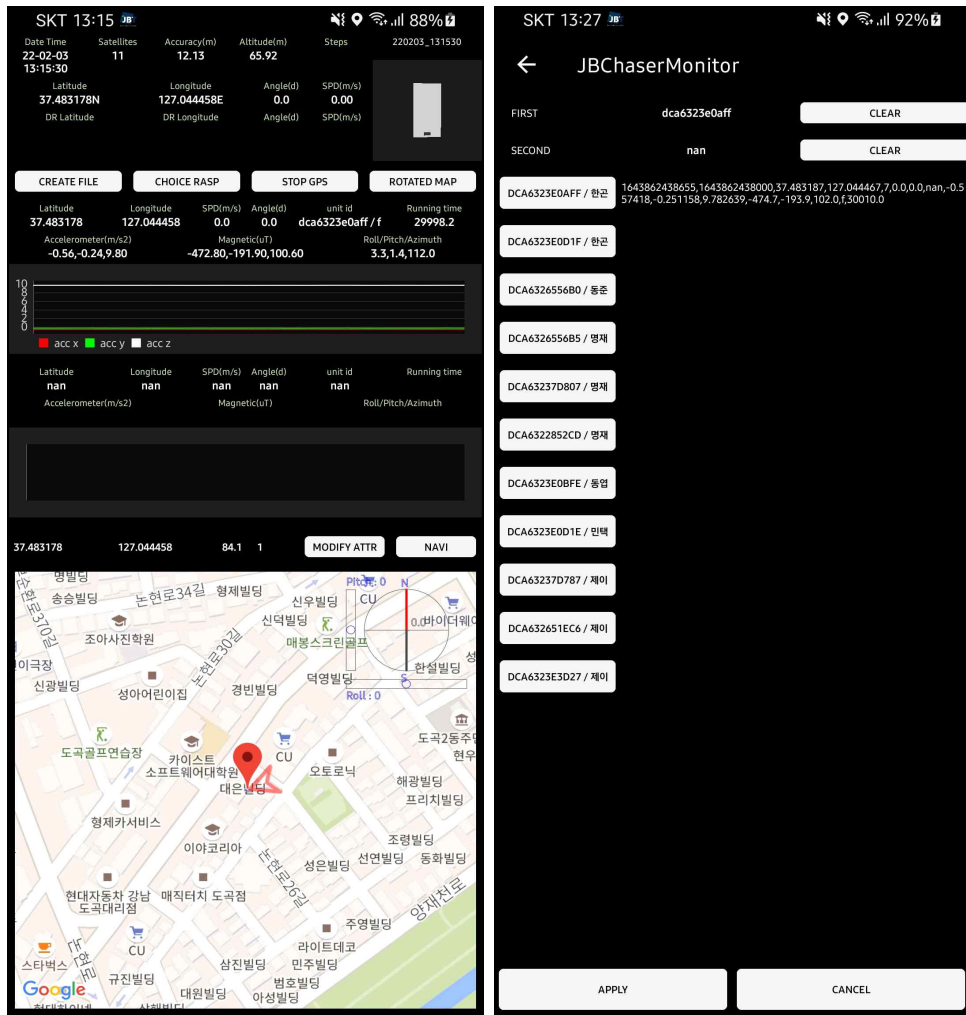


그림 2.59. 지진조기경보 시스템을 제어 중인 모바일 앱

○ GPS 위치정보로 기차역의 위치를 판별하는 연구에서는 승차역 주변이나 터널 등 GPS 수신이 안되는 구역이 상당수 존재하였음. 이에 열차 운행 구간의 판독은 철도안전운행 시스템의 열차운행 시간표를 활용하였으며, 실제 열차 주행 테스트 시 열차의 각 역에 도착하는 시간은 비교적 일정하게 유지되던 것으로 확인하였음.

경부선 하행 (From Seoul to Busan)		경부선 상행 (From Busan to Seoul)	
구분	역명	구분	역명
1	서울	1	부산
2	의정부	2	부산
3	가평	3	부산
4	포천	4	부산
5	춘천	5	부산
6	강릉	6	부산
7	원주	7	부산
8	춘천	8	부산
9	강릉	9	부산
10	원주	10	부산
11	춘천	11	부산
12	강릉	12	부산
13	원주	13	부산
14	춘천	14	부산
15	강릉	15	부산
16	원주	16	부산
17	춘천	17	부산
18	강릉	18	부산
19	원주	19	부산
20	춘천	20	부산
21	강릉	21	부산
22	원주	22	부산
23	춘천	23	부산
24	강릉	24	부산
25	원주	25	부산
26	춘천	26	부산
27	강릉	27	부산
28	원주	28	부산
29	춘천	29	부산
30	강릉	30	부산
31	원주	31	부산
32	춘천	32	부산
33	강릉	33	부산
34	원주	34	부산
35	춘천	35	부산
36	강릉	36	부산
37	원주	37	부산
38	춘천	38	부산
39	강릉	39	부산
40	원주	40	부산
41	춘천	41	부산
42	강릉	42	부산
43	원주	43	부산
44	춘천	44	부산
45	강릉	45	부산
46	원주	46	부산
47	춘천	47	부산
48	강릉	48	부산
49	원주	49	부산
50	춘천	50	부산
51	강릉	51	부산
52	원주	52	부산
53	춘천	53	부산
54	강릉	54	부산
55	원주	55	부산
56	춘천	56	부산
57	강릉	57	부산
58	원주	58	부산
59	춘천	59	부산
60	강릉	60	부산
61	원주	61	부산
62	춘천	62	부산
63	강릉	63	부산
64	원주	64	부산
65	춘천	65	부산
66	강릉	66	부산
67	원주	67	부산
68	춘천	68	부산
69	강릉	69	부산
70	원주	70	부산
71	춘천	71	부산
72	강릉	72	부산
73	원주	73	부산
74	춘천	74	부산
75	강릉	75	부산
76	원주	76	부산
77	춘천	77	부산
78	강릉	78	부산
79	원주	79	부산
80	춘천	80	부산
81	강릉	81	부산
82	원주	82	부산
83	춘천	83	부산
84	강릉	84	부산
85	원주	85	부산
86	춘천	86	부산
87	강릉	87	부산
88	원주	88	부산
89	춘천	89	부산
90	강릉	90	부산
91	원주	91	부산
92	춘천	92	부산
93	강릉	93	부산
94	원주	94	부산
95	춘천	95	부산
96	강릉	96	부산
97	원주	97	부산
98	춘천	98	부산
99	강릉	99	부산
100	원주	100	부산

그림 2.60. 철도안전운행 시스템의 KTX 열차시간표 엑셀 파일

- 철도안전운행 시스템의 열차 시간표 정보는 현재시간을 기준으로 기차역의 위치를 판별하여 자동으로 승차역간의 구간을 나누고 구간 별로 계측 파일을 생성할 수 있도록 연구하였음.
- [실시간 계측데이터 모니터링] 웹 페이지를 통하여 연계된 열차 구간별 시간표를 on-board 지진조기경보 시스템에 적용하게 되면 해당 시간을 확인하여 정해진 역 구간마다 각각의 계측 파일들을 생성할 수 있게 하였음.

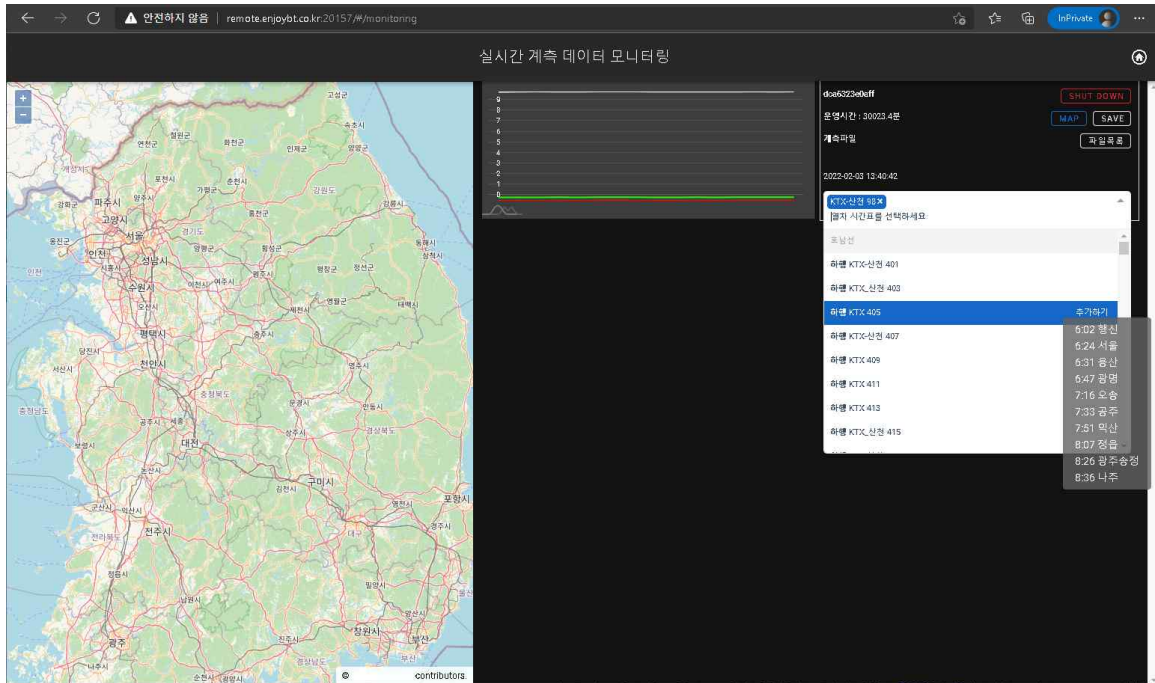


그림 2.61. 열차 시간표 할당 화면

나) 열차간 기록 및 이벤트를 통합관리하기 위한 시스템 설계 및 구현

■ 개요

- 금년 과제 수행 중에 열차간 기록 및 이벤트를 통합관리 하기 위하여 on-board 지진조기경보 시스템에서 계측되고 있는 상황 및 무인 탑재를 고려하여 원격으로 제어할 수 있는 시스템의 설계 및 구현이 필요함.

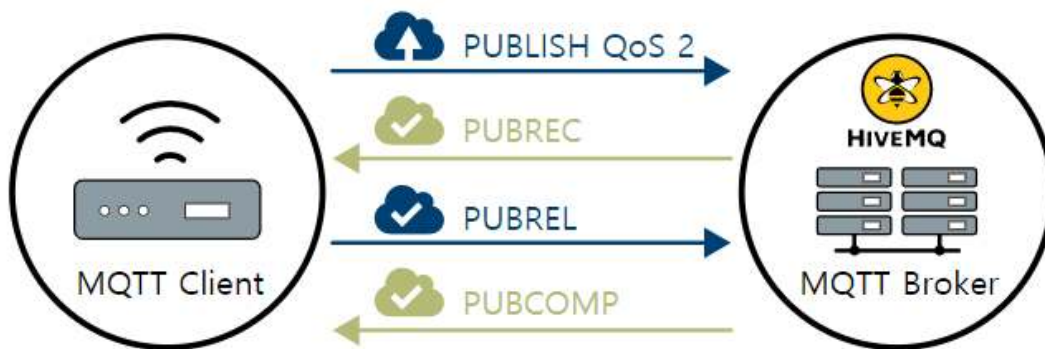


그림 2.62. QoS2 정확히 한번 제공하는 구조 구조

■ 결과

- 열차간 기록 및 이벤트를 통합관리하기 위한 시스템 설계 및 구현을 위하여 다음과 같은 사항을 고려하였음.
 - MQTT 프로토콜을 사용한 과제의 시료(10대의 Raspberry PI)
 - 모든 계측기 계측상태 확인 및 제어를 위한 통합관리 모니터링 시스템의 설계 및 구현
- MQTT 프로토콜은 다음과 같은 메시지 AMQP(Advanced Message Queueing Protocol)를 따르는 오픈소스 메시지 브로커 서비스로 어떤 요청을 다른 API에게 위임하고 빠른 응답을 할 때 많이 사용하는 Rabbit MQ 브로커 서비스에서 관리됨.

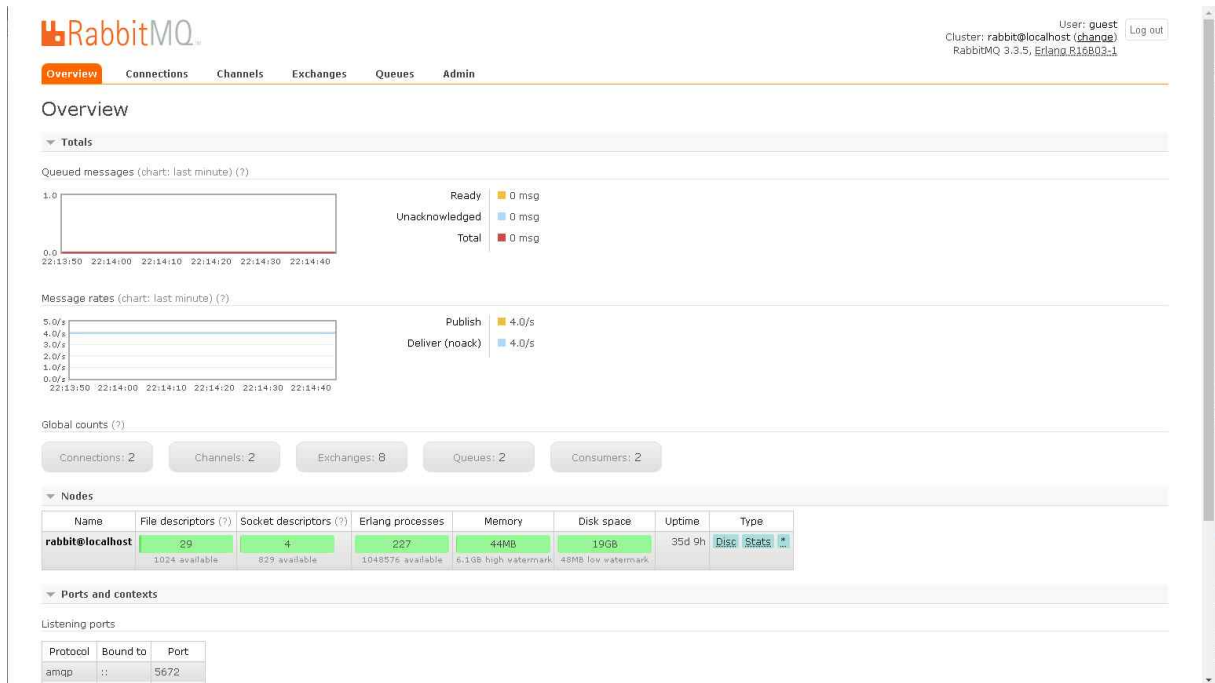


그림 2.63. MQTT 브로커 서버로 활용되는 Rabbot MQ 소프트웨어 관리 페이지

- 계측데이터는 MQTT 프로토콜을 사용하여 수집서버에 전송되고 이 데이터들은 Mongo DB에 저장되고, 모바일과 웹 통합모니터링 시스템에서 Mongo DB의 데이터들을 처리 후 각 모니터링 화면에서 계측기의 운영상태 및 계측상태를 확인할 수 있도록 설계하였음.
- 시스템에서 계측 후 보관된 계측파일 목록 조회와 계측 중인 상태(현재 위치, 속도정보, 계측정보)를 실시간으로 수집할 수 있는 구조도 고려함.
- 이를 위하여 양방향 통신이 가능한 MQTT 프로토콜을 채택하였으며, MQTT 프로토콜은 네트워크의 일시적 단절(터널 등에 진출입 시 일시적 네트워크 단절 발생)을 고려, 네트워크 단절 시 바로 재접속이 가능한 설계가 필요함.
- on-board 지진조기경보 시스템 설계에 있어 필요한 주요 고려 대상은 다음과 같음.
 - 일시적 단절을 고려한 네트워크 구성
 - on-board 지진조기경보 시스템의 상태 모니터링
 - 원격제어 명령을 통한 on-board 지진조기경보 시스템 상태 파악 및 제어
 - 모바일 앱을 통한 GPS 수신정보 동기화
 - 지진발생 시 위험상황을 바로 알릴 수 있는 지진조기경보 체계 구성
- 전체 서비스 흐름 구성은 다음과 같이 설계하였음.

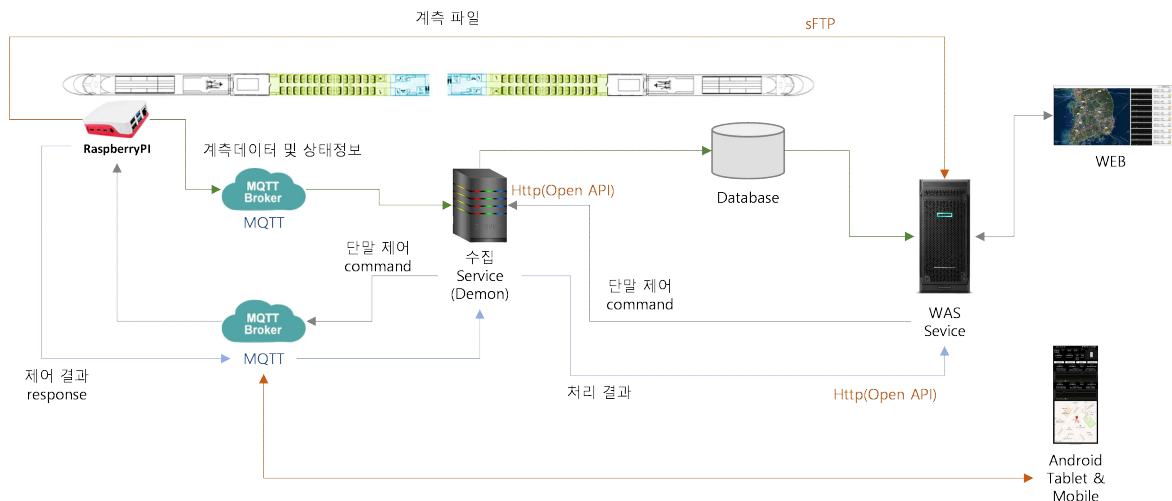


그림 2.64. System Data 전체 흐름도

○ 계측 시스템은 전원 on 이후, 무중단 계측을 수행하며, 100ms 간격으로 MQTT 프로토콜로 수집 서비스 서버에 전송함. 이 데이터들은 수집서버의 Mongo DB 버퍼에서 처리 후 MQTT 브러커에 접속된 모든 통합 모니터링 시스템 웹과 모바일에게 전파됨.

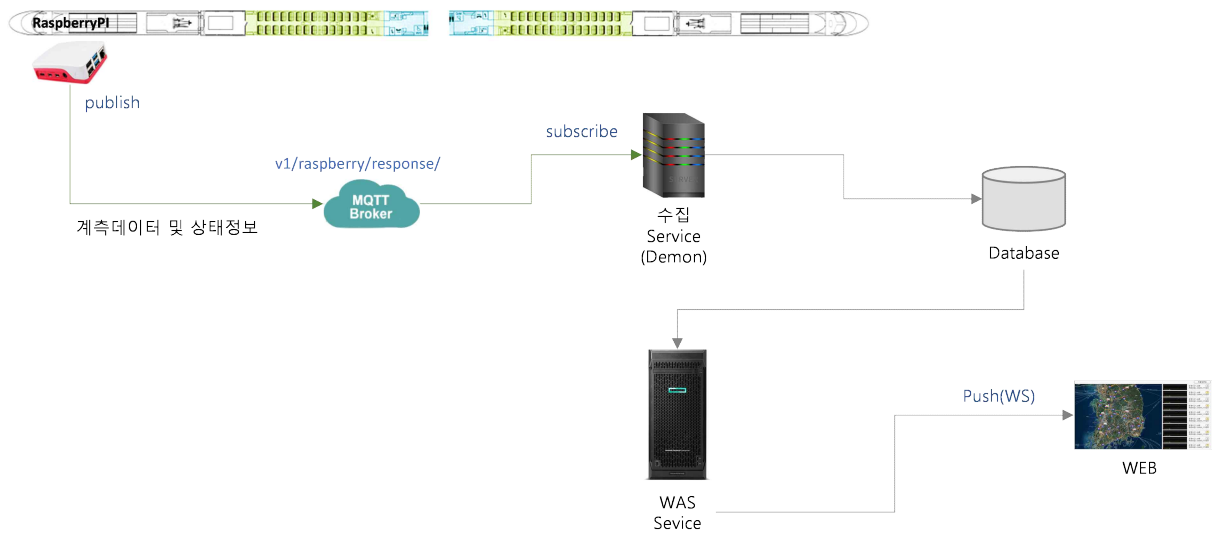


그림 2.65. 계측 데이터 및 상태 정보 Data흐름도

○ on-board 계측기의 저장공간 SD Card를 사용하기에 부족한 저장공간으로 모든 계측정보의 파일 저장 이 어려움. 원격제어로 필요시에만 계측정보를 파일로 저장하고 ftp로 통합관리 시스템에 upload 후 삭제해 계측기의 저장공간을 확보할 필요가 있음. 이러한 원격제어 서비스의 흐름도는 다음과 같음.

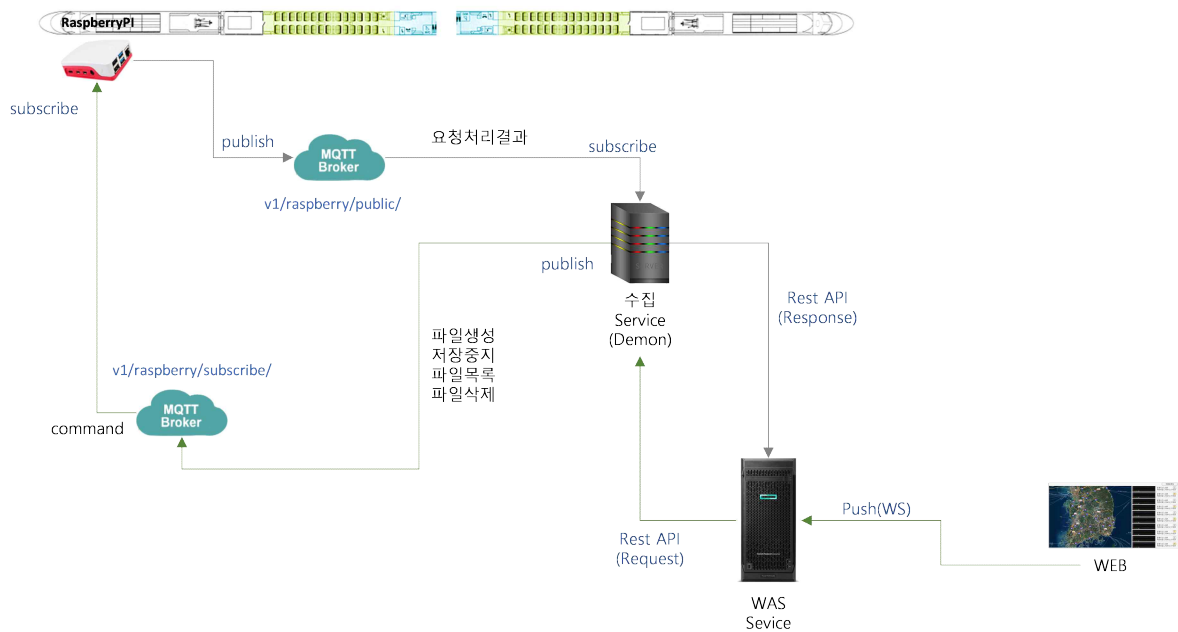


그림 2.66. 계측파일 목록 요청(장비제어) Data흐름도

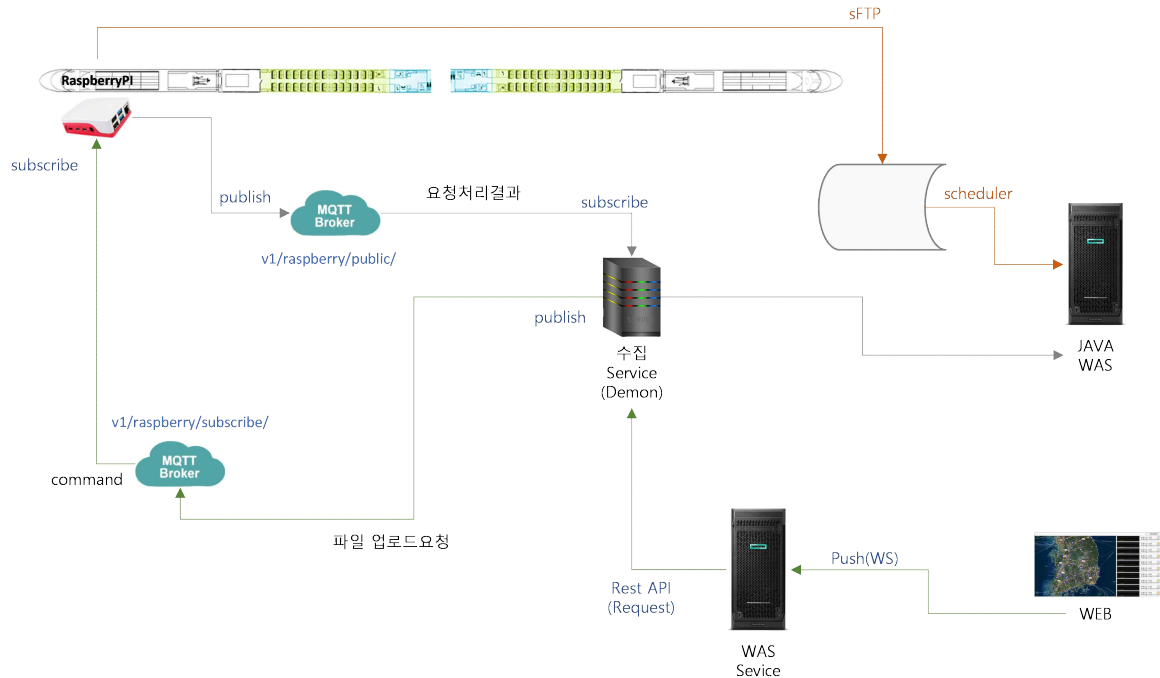


그림 2.67. 계측파일 업로드 요청(장비제어) Data흐름도

○ 열차간 기록 및 이벤트를 통합관리 및 모니터링 시스템의 data 흐름을 기준으로 아래와 같은 흐름도를 설계하였으며, 통합 조회 시스템에 통합관리 체계를 추가적으로 설계하여 원격제어 및 상태 모니터링이 가능한 화면 간의 흐름을 설계하였고, 이를 기반으로 한 웹 및 모바일 앱 통합관리 및 모니터링 시스템의 전체적인 화면 구성 흐름을 설계하고 구현하였음.

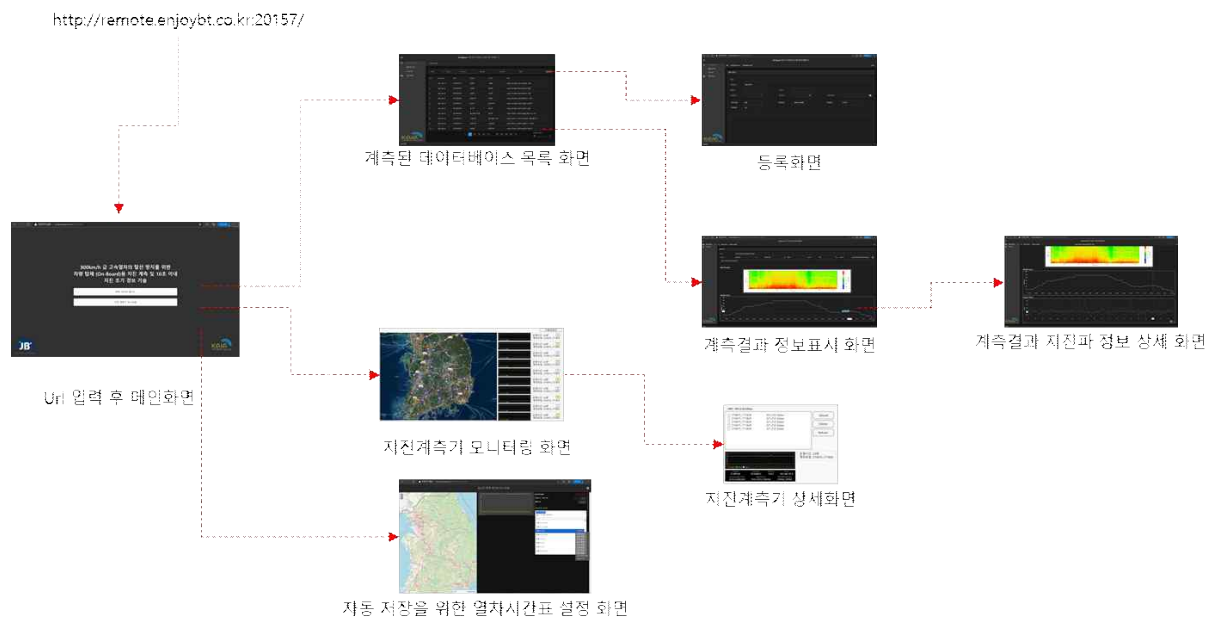


그림 2.68. 전체 화면 흐름도

○ 열차간 기록 및 이벤트를 통합관리 및 모니터링 시스템은 10ms 단위로 계측되는 열차진동 정보를 효율적으로 관리하기 위하여 NoSQL 데이터 기반의 Mongo DB를 사용하였음.

○ Mongo DB는 문서지향 데이터베이스(Document Oriented Database)으로서 NoSQL(Not Only SQL) 데이터베이스 중에 하나로서 전통적인 테이블 관계 기반의 RDBMS가 아니며 SQL을 사용하지 않으며, Mongo DB는 NoSQL 부문에서의 인지도가 1위인 데이터베이스로서 테이블 같은 스키마가 고정된 구조 대신 json 형태의 동적 스키마형 문서를 제공하는 데이터베이스임. 이와 같은 형태의 데이터베이스를 사용하는 가장 큰 이유로는 기존의 RDBMS 방식보다 현저히 빠른 속도를 제공하고 빠른 데이터의 읽고/쓰기 기능을

제공하여 대용량 정보를 관리하기에 가장 적합한 형태의 데이터베이스임. 복잡한 쿼리를 사용할 수 없다는 단점을 가지고는 있지만, 이 시스템에서는 복잡한 쿼리를 사용하지 않으므로 열차 간 기록 및 이벤트를 통합관리 및 모니터링 시스템의 데이터베이스 설계에 가장 적합한 형태로 사료됨.

○ Mongo DB의 대표적인 관리 툴로는 Robo 3T라는 SW가 있으며 JSON 형태로 관리됨.

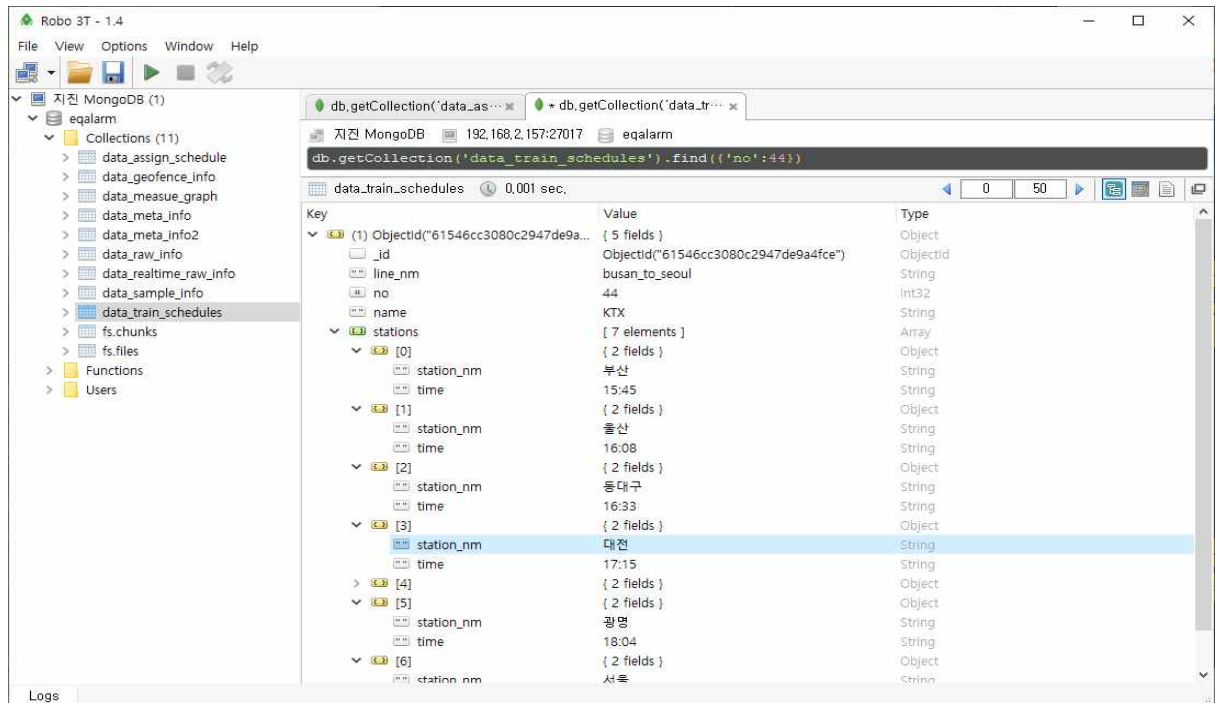


그림 2.69. Mongo DB 데이터 관리 방식

다) 시스템 UI/UX 설계 및 구현

■ 개요

○ 열차간 기록 및 이벤트의 통합관리 및 모니터링 시스템에서는 웹 서비스 시스템과 모바일 앱(안드로이드)의 UI/UX로 설계 및 구현하였음.

○ on-board 지진조기경보 시스템은 모니터 등 입출력 장치가 없어 UI/UX 설계가 필요하지 않지만, 모바일 앱 또는 웹 서비스 시스템으로 지진조기경보 시스템의 운영 상태를 확인하고 제어할 수 있는 UI/UX를 위주로 설계가 진행되어야 했으며, 원활한 원격제어를 위하여 MQTT 프로토콜을 사용하였음.

○ 모바일 앱 시스템에 대한 UI/UX 설계는 열차 객실 내에서 정확한 객실 내 지진 진동을 계측하기 위하여 객실 바닥에 on-board 지진조기경보 단말을 부착하는 이유로 GPS 수신에 어렵고 데이터 모니터링을 네트워크 참여를 위해 Wifi 접속을 지원하여야 하므로 이러한 이슈 사항들의 내용을 확인하고 제어가 필요함.

○ 실제 객실 바닥에 설치된 지진조기경보 시스템이 정상적으로 구동되고 있는지, 계측 정보 수집은 잘 수행되고 있는지 등 현장 사항에서 조치 가능한 상태를 모니터링 하는 것이 필요함.

○ Wifi 접속이 어떤 지진조기경보 시스템과 연결이 되어 있어 모바일 앱이 수신하고 있는 GPS 정보를 전파할 수 있는가를 고려하여 UI/UX를 설계 및 구현하였음.

○ 웹 시스템에서는 전반적인 관리 위주로 UI/UX 설계를 고려하였으며, 지진조기경보 시스템에 보관된 계측 파일 목록을 확인하고 해당 파일들을 수집서버에 업로드하고 저용량 스토리지를 위하여 자동 삭제가 가능하도록 설계 및 구현하였음.

■ 결과

○ 안드로이드 기반의 모바일 앱 시스템 UI/UX 설계는 열차객실 바닥에 부착한 on-board 지진조기경보 시스템을 직관적을 모니터링하고 제어할 수 있는 구조로 설계 및 구현하였음.

- 모바일 앱 UI에서는 수신 중인 위경도, 수신시간, 수신 위성 개수, accuracy(m), 이동 속도(m/s), 진행 방향각도(degree) 등의 GPS 수신정보를 표시하도록 개발함.
- 구글 지도를 활용하여 모바일 단말기가 위치하는 좌표를 표시하며 GPS 수신정보들은 Start GPS 버튼

을 누르면 현재 이 모바일 단말과 연결된 on-board 계측기에게 계측한 지진진동 정보와 함께 서버에 전송할 수 있도록 개발함. 지진 진동 계측기에서 모바일 앱에서 GPS 정보가 필요하지 않은 경우 Stop GPS 버튼을 눌러 GPS 위치 정보 전송을 중지하고 계측기의 GPS 정보를 사용하도록 개발함.

- 모바일 앱에서 네트워크에 참여한 on-board 계측기를 설정하여 모바일 앱이 제어 및 모니터링 할 단말을 설정하도록 함.(해당 모바일 단말이 직접 Wifi Hot spot을 제공하지 않고 다른 Hot spot을 사용하여도 무방)

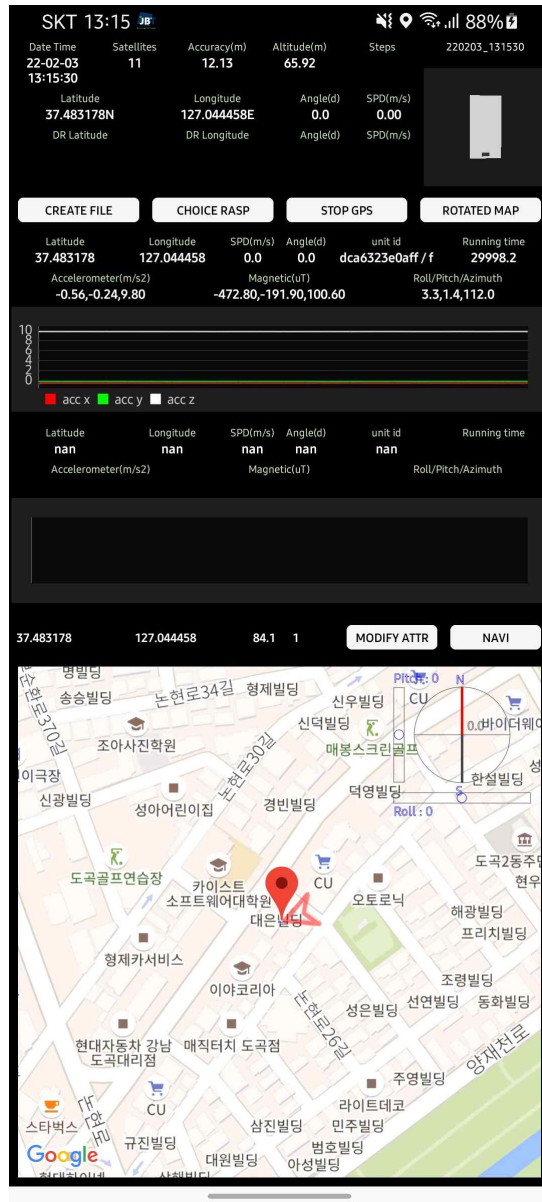
- 최대 2대를 제어하도록 설계하였으며, 연결된 계측기의 운영 및 계측상태가 모바일 앱 화면의 선형 가속도 그래프와 수치 항목에 지속적으로 표현되도록 설계하였음. 상하, 전후좌우에 대한 중력가속도 값을 m/s^2 단위로 표현함.

- 모바일 앱에서는 on-board 지진조기경보 시스템을 원격제어하기 위하여 운영 중인 지진조기경보 시스템들의 목록을 수집 서버로부터 받아옴.

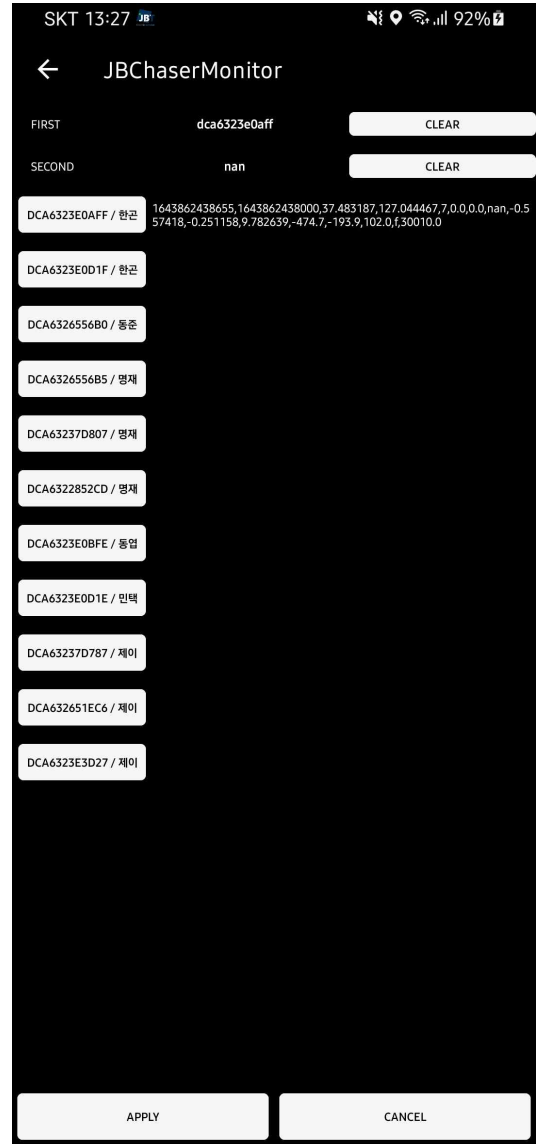
- 하단의 목록에서 좌측의 버튼을 누르면 상단의 설정 표시 항목에 해당 지진조기경보 시스템의 Map address를 표시하며, 취소 시 상단의 clear 버튼을 누르면 항목이 nan으로 표시하고, 설정을 취소하도록 구현됨.

- 모바일 앱에서 제어 및 모니터링을 수행할 지진조기경보 시스템의 선택이 완료되면 apply를 눌러 선택한 지진조기경보 시스템의 계측 중인 상태를 그래프와 수치로 확인할 수 있으며, GPS 수신정보의 원격 공유 및 계측정보 저장 기능의 수행을 원격으로 제어할 수 있도록 설계 및 구현함.

- 지진조기경보 시스템은 반드시 제어하는 모바일 앱 시스템과 hot spot으로 연결되어 있을 필요는 없으며, MQTT Broker 게이트로 제어 및 데이터를 주고 받을 수 있도록 설계 및 구현하여 이 시스템들이 설치되어 있는 모바일 단말에서 어디서든 제어가 가능하게 구현하였음.



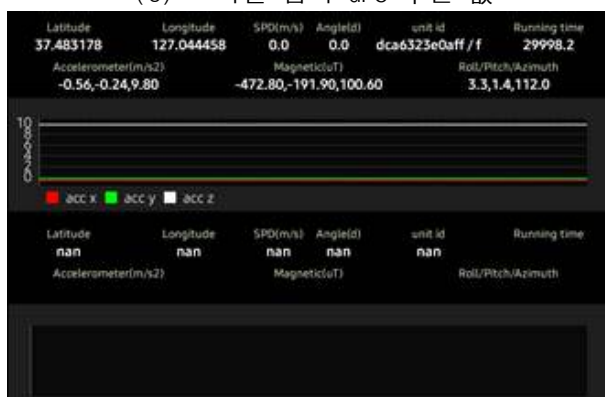
(a) 모바일 앱 메인 화면



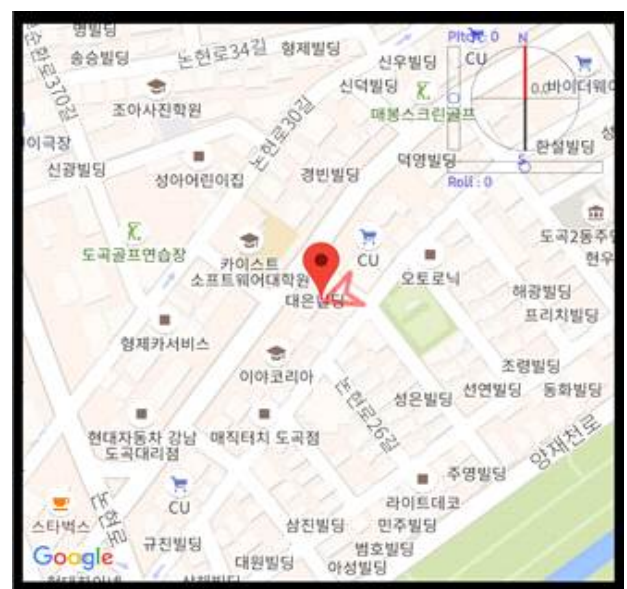
(b) 모바일 앱에서 제어할 지진조기경보 시스템 선택



(c) 모바일 앱의 GPS 수신 값



(d) on-board 지진조기경보 시스템의 계측정보



(e) 모바일 앱과 조기경보 시스템의 위치시현

그림 2.70. 모바일 앱 인터페이스

○ 웹 시스템에서는 on-board 지진조기경보 시스템이 계측한 정보들의 목록을 확인하고 분석된 결과를 함께 조회할 수 있는 계측 데이터베이스와 지진조기경보 시스템을 제어할 수 있는 부분으로 전체 메뉴를 분리 구성하여 UI/UX를 설계 및 구현하였음.

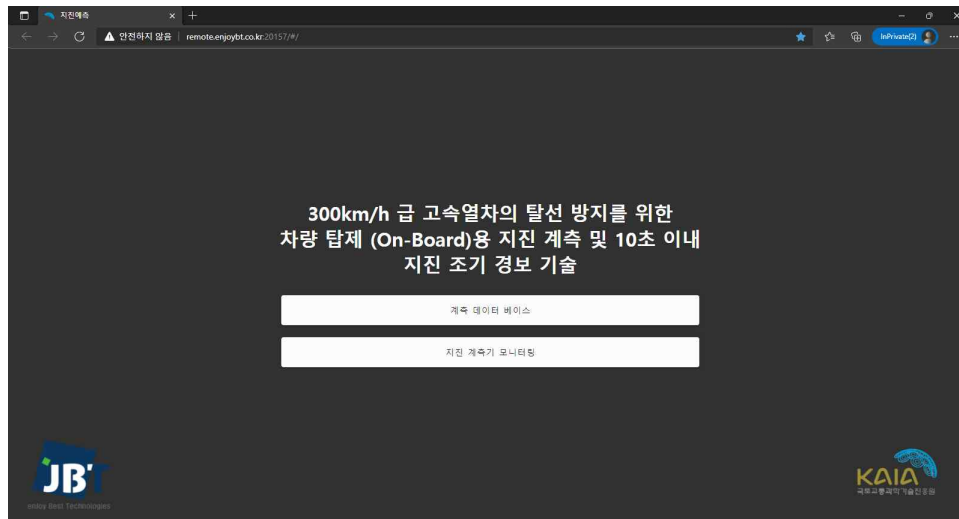


그림 2.71. 웹 시스템의 메인화면

- 계측 데이터베이스에서는 on-board 지진조기경보 시스템에서 계측한 내용을 등록하며, 등록 시 계측 정보를 기준으로 지진 스펙트럼 및 시간대별 속도와 계측된 지진진동 데이터 간의 상관관계를 보여 주도록 설계 및 구현하였음.
- on board 지진조기경보 시스템 데이터베이스에서는 열차진동 가속도와 지진가속도로 등록된 데이터들을 구분하였으며, 열차진동 가속도는 전체보기, 정읍 익산구간 및 그 외 구간의 데이터들을 조회할 수 있도록 UI/UX를 설계 및 구현하였음.
- 지진가속도 부분에서는 계측한 지진계측 정보를 저장하며, 진동대 시험 계측 가속도 정보와 실지진파 계측 가속도 정보를 조회하는 UI/UX를 설계 및 구현하였음.
- 열차 진동가속도
 - 열차 진동가속도 정보 목록 화면에서는 전체, 정읍 익산 구간 및 그 외 구간 카테고리를 기준으로 필터링하여 조회할 수 있게 설계하여 목록으로 보여주는 화면을 구현함.
 - 목록 필드는 계측 일자, 사용 장비, 출발역, 도착역, 제목 순으로 표시하며, 각 항목마다 조건 검색으로 필터링 된 목록을 조회할 수 있도록 구현하였으며, 이 화면에서 신규 데이터를 등록도 가능하도록 설계 및 구현하였음.
 - on board 지진조기경보 시스템 데이터베이스에 열차 내 객실에서 계측한 지진조기경보 시스템의 데이터를 등록하는 UI/UX로 목록의 기본 표출 항목 이외에 열차번호, 객차번호, 좌석번호를 등록할 수 있으며 계측 빈도 Hz를 입력하여 계측정보를 등록하도록 시스템을 설계하였음.
 - 계측파일은 on board 지진조기경보 시스템에서 계측한 csv 형식의 파일을 선택하고 화면 우상단의 등록 버튼을 누르면 시스템에 계측된 정보가 업로드되고, 스펙트럼과 속도 그래프를 분석하여 시스템에 등록할 수 있음.
 - 열차 진동가속도 데이터 세부 정보는 신규등록 시 입력한 항목과 함께 분석된 정보인 스펙토그램과 스피드 차트와 함께 표시되는 UI/UX로 설계 및 구현하였음.
 - 스피드 차트에서 마우스를 overlay 하면 열차에서 계측되었던 시간 및 속도 값을 확인할 수 있고 스피드 차트에서 원하는 시간 시점에 더블 클릭을 하면 해당 시점의 열차 객실 내에서 계측하였던 지진 진동 값을 확인할 수 있도록 설계 및 구현하였음.
 - 열차 진동가속도 데이터 세부 정보에서 Spectrogram은 구간 내 진행 시간에 따른 진동 주파수와 신호크기의 변화를 특징으로 이용하여 지진을 검출할 수 있게 함.
 - 열차 내 가속도계 등을 대체재로 지진 경보 시스템에 활용하는 것이 효율적이나 열차에 설치된 가속도계의 경우, 지진계와는 달리 열차 주행 시 진동 데이터가 포함되어 있음.
 - 지진 발생 시 성토 구간에 의해서 변화된 지진 응답을 계측하며 이러한 결과를 한눈에 식별이 용

이하게 구분할 수 있는 UI 방식 중의 하나임.

- ◆ 또한, Speed chart를 통하여 열차의 속도 변화 및 저속 또는 고속 주행 시 속도정보에 따른 진동 주파수와 신호크기의 변화 특징을 파악할 수 있는 UI를 제공하고 해당 시점에서의 진동 주파수와 신호크기 그래프를 확인 가능한 UX를 제공하도록 구현하였음.

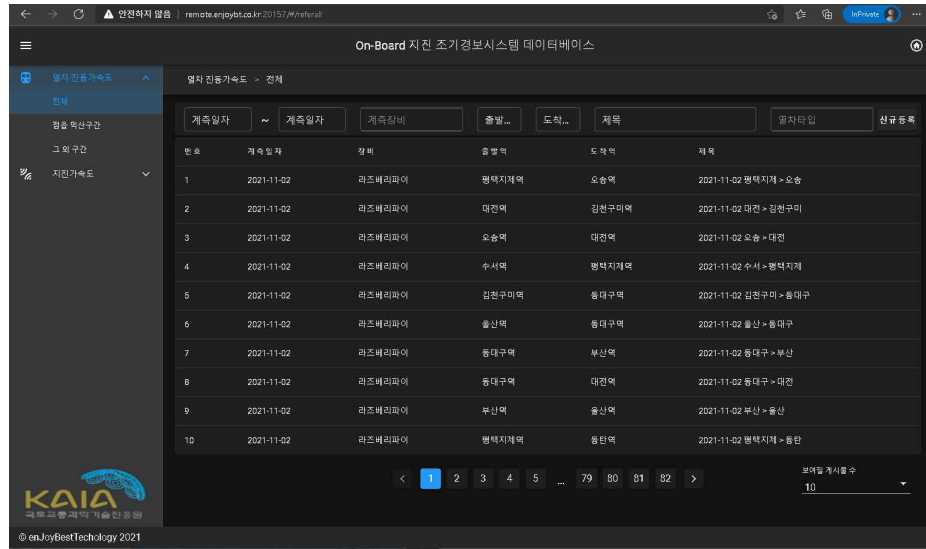


그림 2.72. 열차 진동가속도 목록 화면



그림 2.73. 목록 조회를 위한 필터 조건

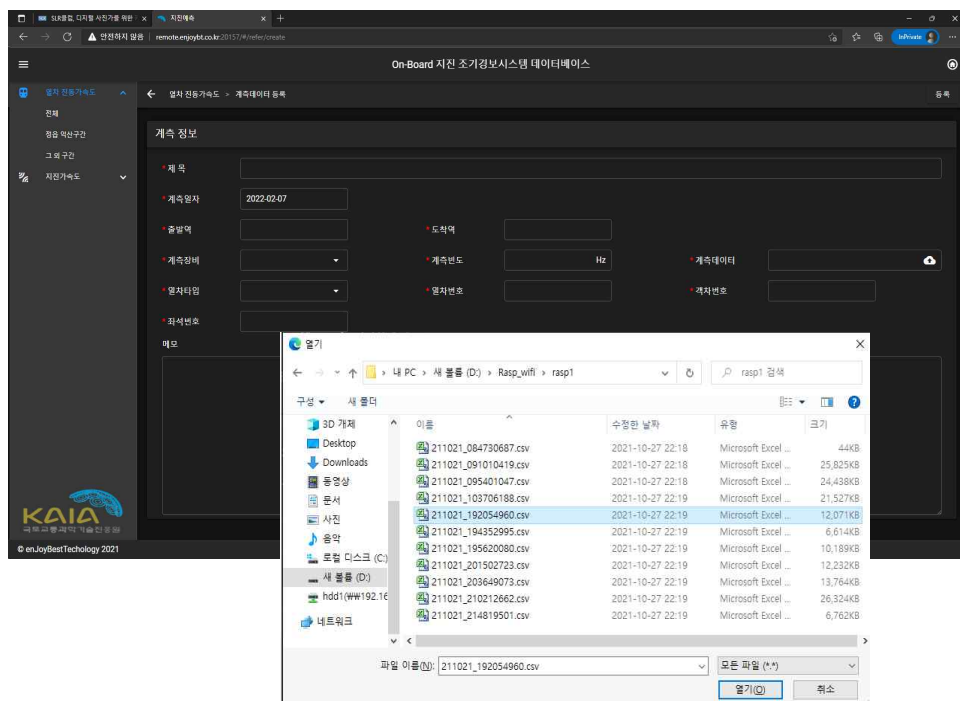


그림 2.74. 열차 진동가속도 신규등록 화면



그림 2.75. 계측 데이터 상세정보 조회 화면



그림 2.76. 특정 시점에서의 지진진동 계측 정보 표시 화면

- 지진가속도

- ◆ 지진가속도는 과거에 계측된 지진 주파수 정보를 조회 지진가속도 부문, 진동대 시험을 통해 산출된 실험 계측 가속도 부문, 실지진파 계측 가속도 부문으로 나누어 메뉴를 제공하도록 구현하였음.
- ◆ 지진가속도 목록조회에서는 계측일자, 제목, STID(Station ID), M(규모), REPIC(진앙거리), EW.PGA(g, 동서방향), NS.PGA(g, 남북방향), UD.PGA(g, 상하방향) 항목으로 목록을 구성함. 이 화면에서 계측일자 구간 또는 제목과 STID를 필터조건으로 목록을 재구성할 수 있도록 UI/UX를 설계 및 구현하였음.
- ◆ on board 지진조기경보 시스템 데이터베이스에 지진가속도 데이터를 등록하는 UI/UX로 목록의 기본 표출 항목 이외에 진동수 Hz를 입력하여 지진가속도 데이터를 등록하도록 시스템을 설계하였

음.

- ◆ 계측 파일은 csv 형식의 파일을 선택하고 화면 우상단의 등록 버튼을 누르면 시스템에 계측된 정보 파일이 업로드되고, 스펙트럼을 분석하여 시스템에 등록할 수 있음.
- ◆ 실험 계측 가속도 조회 UI에서는 계측일자, 제목, 지진파, INPUT ACC, POSITION, SENSOR, PGA(g)의 목록으로 구분되며, 계측구간 및 제목과 position 항목의 필터 조건으로 검색 결과의 목록을 조회할 수 있도록 UI/UX를 설계 및 구현하였음.
- ◆ on board 지진조기경보 시스템 데이터베이스에 실험 계측 가속도 데이터를 등록하는 UI/UX로 목록의 기본 표출 항목 등록하도록 시스템을 설계하였음.
- ◆ 계측 파일은 csv 형식의 파일을 선택하고 화면 우상단의 등록 버튼을 누르면 시스템에 계측된 정보 파일이 업로드되고, 스펙트럼을 분석하여 시스템에 등록할 수 있음.
- ◆ 실지진파 계측 가속도 조회 UI에서는 계측일자, 제목, Location(장소), M(규모), Direction(계측방향), PGA(g)의 목록으로 구분되며, 계측구간 및 제목과 direction 항목의 필터 조건으로 검색 결과의 목록을 조회할 수 있도록 UI/UX를 설계 및 구현하였음.
- ◆ 실지진파 계측 가속도 데이터를 등록하는 UI/UX로 목록의 기본 표출 항목 등록하도록 시스템을 설계하였음.
- ◆ 계측 파일은 csv 형식의 파일을 선택하고 화면 우상단의 등록 버튼을 누르면 시스템에 계측된 정보 파일이 업로드되고, 스펙트럼을 분석하여 시스템에 등록할 수 있음.

번호	계측 일자	제목	STID	M (규모)	REPLIC	EW.PGA(g)	NS.PGA(g)	UD.PGA(g)
1	2018-02-10	Selected0149	PHIA2	4.6	12.83980724	0.01503712	0.019428613	0.019086992
2	2017-12-25	Selected0148	PHIA2	3.5	9.302981749	0.012064561	0.023877028	0.020853872
3	2017-11-19	Selected0147	PHIA2	3.6	6.069105361	0.024837986	0.020061304	0.021688428
4	2017-11-19	Selected0146	PHIA2	3.5	8.223358437	0.043723878	0.036867376	0.037097527
5	2017-11-15	Selected0145	PHIA2	2.5	6.340804583	0.039139075	0.013523086	0.01638934
6	2017-11-15	Selected0144	PHIA2	4.3	8.562277311	0.044772729	0.066334965	0.041856397
7	2017-11-15	Selected0143	YCH	5.4	100.8469002	0.01922766	0.023122174	0.017610187
8	2017-11-15	Selected0142	ULIN	5.4	96.94357902	0.081359472	0.051057681	0.03109674
9	2017-11-15	Selected0141	TBA2	5.4	117.0173554	0.042455638	0.032980223	0.029912815
10	2017-11-15	Selected0140	PHIA2	5.4	8.240370406	0.243153726	0.273084788	0.132535329

그림 2.77. 지진가속도 영역의 지진가속도 목록 조회 화면

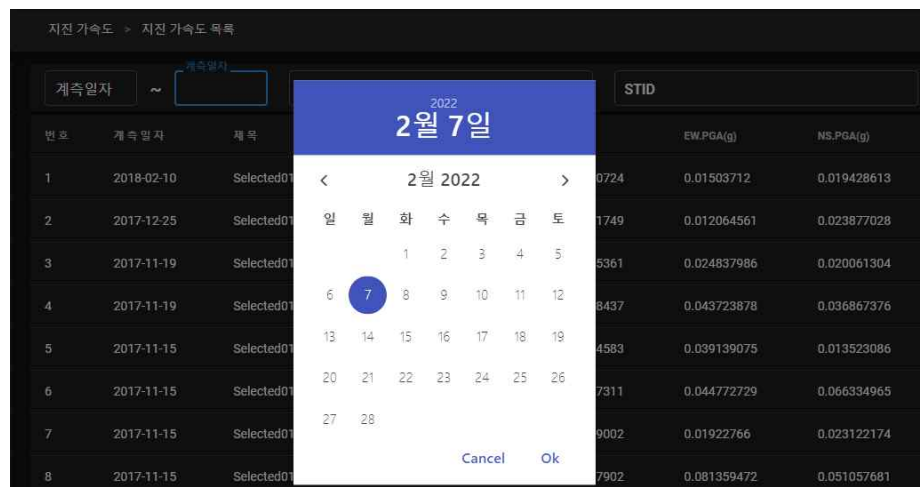


그림 2.78. 지진가속도 목록 조회 필터 조건

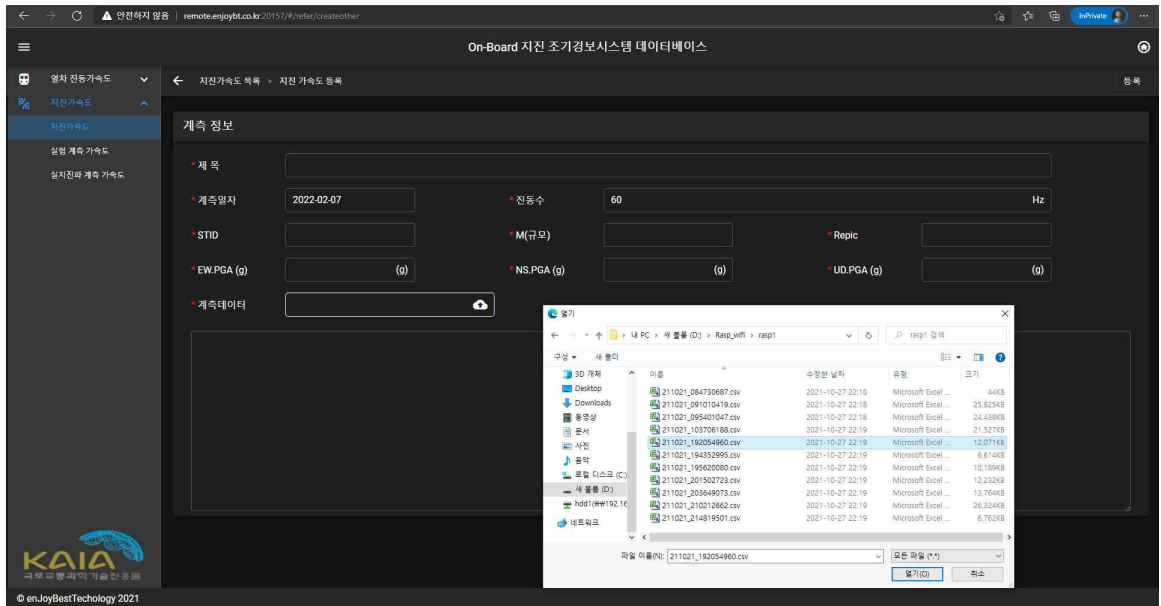


그림 2.79. 지진가속도 정보 등록화면

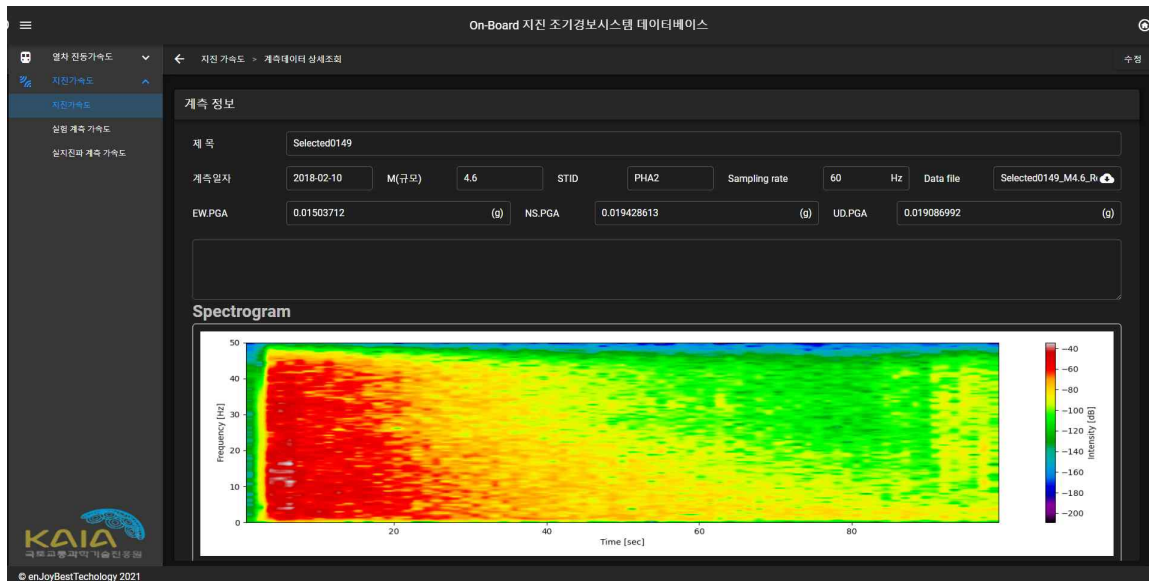


그림 2.80. 지진가속도 상세정보 조회 화면

On-Board 지진 조기경보시스템 데이터베이스

지진 가속도 > 실험 계측 가속도 목록

계측일자 ~ 계측일자 제목 POSITION 신규등록

번호	계측일자	계측	지진	INPUTACC.	POSITION	SENSOR	PGA(g)
1	2021-07-22	test	KORE_NIS000	0.16941896	base	bcc	0.16941896

보이려는 계측일 수: 10

그림 2.81. 실험 계측 가속도 목록 조회 화면

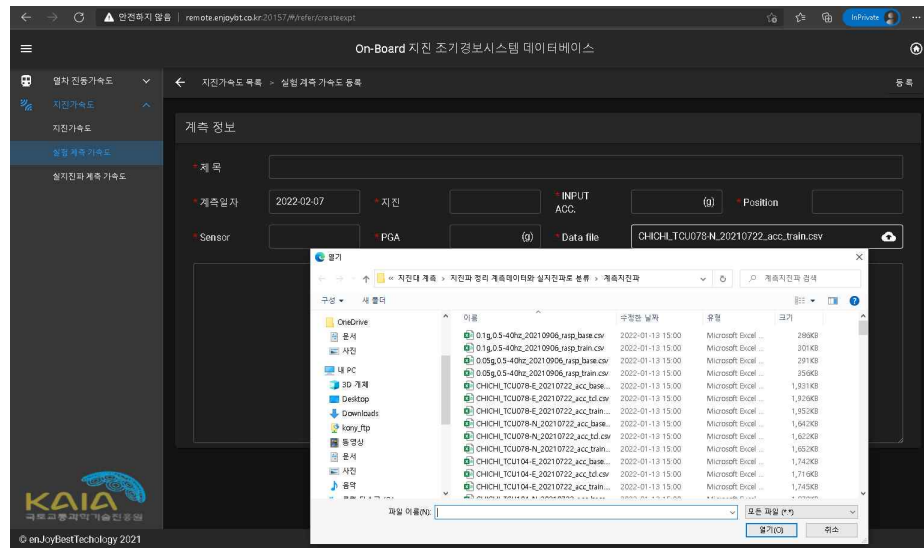


그림 2.82. 실험 계측 가속도 데이터 등록 화면



그림 2.83. 실험 계측 가속도 상세정보 조회 화면

On-Board 지진 조기경보시스템 데이터베이스

지진가속도 > 실지진파 계측가속도 목록

계측일... ~ 계측일... 제목 DIRECTION 신규등록

번호	계측일자	제목	LOCATION	M(규모)	DIRECTION	PGA(g)
1	2022-01-28	TEST	PC	2	ew	0.074065816
2	2007-01-20	PC 2007-01-20 ew	PC	2	ew	0.074065816

1

보여줄 개수 10

그림 2.84. 실지진파 계측 가속도 목록 화면

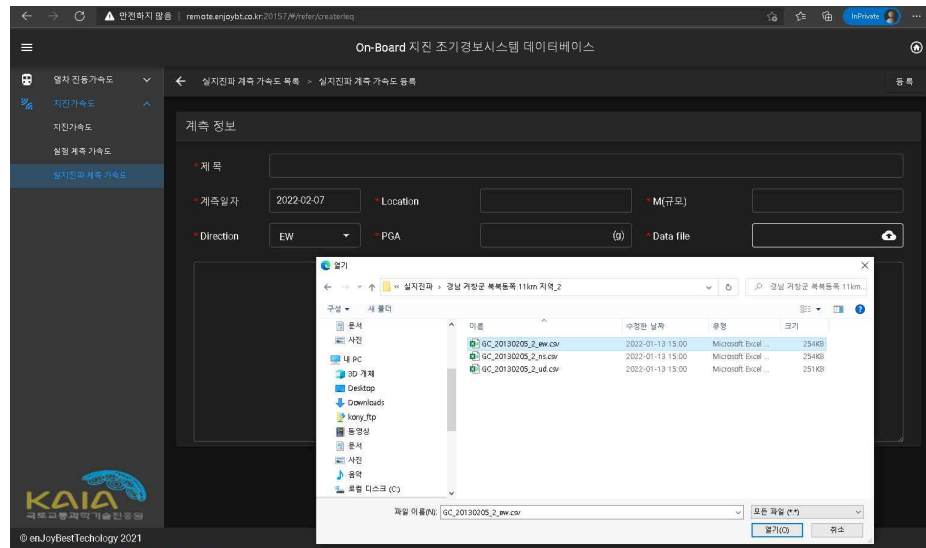


그림 2.85. 실지진파 계측 가속도 데이터 등록 화면



그림 2.86. 실지진파 계측 가속도 상세정보 조회 화면

- on board 지진조기경보 시스템 지진 계측기 모니터링 UI/UX는 고속 주행 중인 열차의 객실 내에서 지진진동 가속도와 GPS 수신기를 활용한 위치 및 속도정보 계측하고 있는 on board 지진조기경보 시스템 단말기(Raspberry PI)의 계측 및 운영 상태를 실시간으로 모니터링하고 이 단말기가 계측 중인 정보들을 파일로 저장할 수 있도록 원격제어를 목적으로 설계 및 구현하였음.

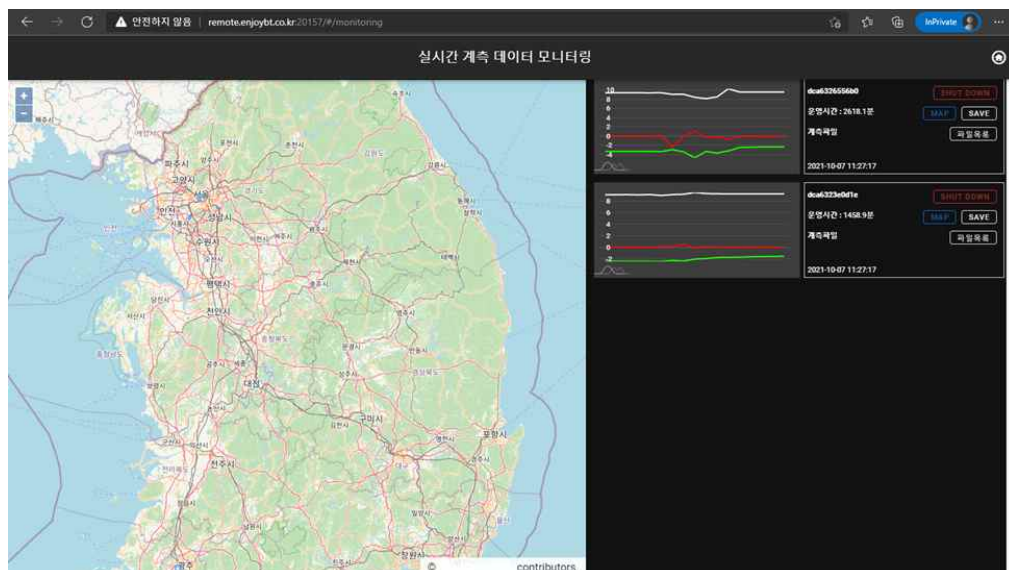


그림 2.87. 실시간 계측 데이터 모니터링 화면

- 실시간 계측 데이터 모니터링 화면의 지도

- ◆ 지도를 통한 모니터링은 on-board 지진조기경보 단말기가 GPS 위성에서 수신(또는 이 단말기를 제어하는 모바일 앱에서 제공하는 GPS 수신정보)한 위치 정보를 기반으로 각각의 단말기들 위치를 지도상에 시현 하도록 UI를 설계하였음.
- ◆ 우측의 단말 계측 그래프 부문에서 단말의 현재 위치에 대한 확대 지도로 위치를 포커싱할 수 있도록 UX를 설계하고 구현하였음.

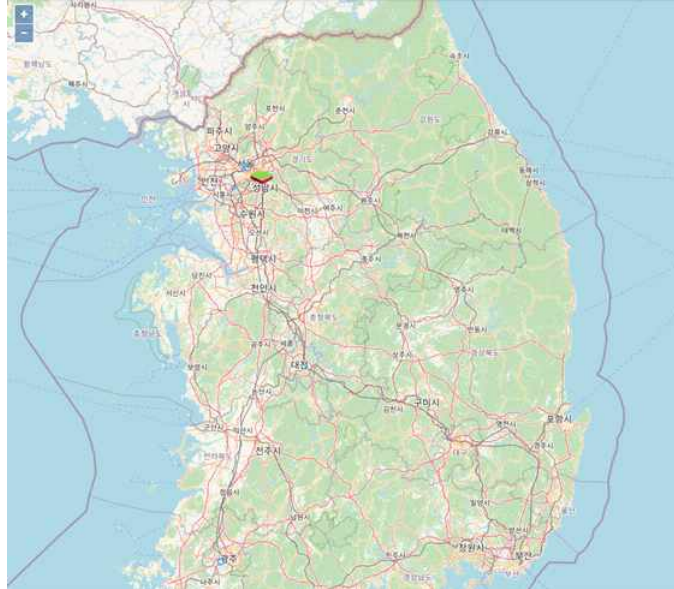


그림 2.88. 계측 운영 중인 on board 단말기들의 지도 위치 시현

- On-board 지진조기경보 시스템의 실시간 계측 데이터 모니터링

- ◆ on-board 지진조기경보 시스템은 100Hz의 단위로 진동 정보를 계측함.
- ◆ 실시간 모니터링 시스템에서는 계측 중인 지진조기경보 단말의 운영 상태를 모니터링하는 것이 위주이므로 계측기의 상태 정보는 10Hz 단위로 받아 정보를 시현 하도록 설계 및 구현하였음.
- ◆ 그래프에서는 단말이 계측 중인 정보를 실시간으로 도식화하여 보여 주는 UI를 제공하며, 우측 정보 창에서는 지진조기경보 단말이 부팅 후 가동한 총 운영시간과 계측 파일 생성 여부를 확인할 수 있는 UI/UX를 설계 및 구현하였음.
- ◆ 화면의 Map 버튼을 눌러 좌측 지도에 모니터링 중인 단말이 계측 중인 위치를 지도에 포커싱함
- ◆ 자동 저장 시스템 이외로 필요에 의해 생성 중인 계측 파일의 저장을 멈추거나 또는 새로 생성할 수 있도록 UI를 구성하였음.
- ◆ 파일 목록 버튼을 누르면 모니터링 대상 단말이 보유하고 있는 계측 파일들의 목록을 원격으로 조회할 수 있으며, 이 파일들의 일부를 삭제하거나 통합 계측 데이터베이스 시스템에 업로드하여 등록할 수 있게 함.(단, 업로드된 파일은 시스템 성능을 위하여 자정에 일괄적으로 수행.)
- ◆ on-board 지진조기경보 시스템은 철도안전운행의 열차 시간표와 연계하여 정해진 시간에 도착하는 역 이름과 현재의 시간 그리고 열차 종류 및 열차번호 등의 정보들을 기준으로 저장될 계측 파일의 이름으로 생성하고 원격 파일 저장 제어명령으로 MQTT 브로커를 통하여 지진조기경보 계측기에게 전파하고 자동으로 파일을 생성할 수 있도록 설계 및 구현하였음.
- ◆ on-board 지진조기경보 시스템에서 지진 진동 주파수를 감지하게 되면, 지진조기경보 단말은 수집 서버에 지진감지 이벤트를 전송하게 되며, 이 경우 시스템에 접속해 있는 모든 모바일 앱과 실시간 계측 데이터 모니터링 웹 시스템에게 즉시 전파되고, 대상 단말 모니터링 부분에 일반화면과 빨강 화면이 차례로 깜빡이도록 UI/UX가 표시되도록 설계 및 구현하였음.
- ◆ 지진 진동계측기의 계측정보는 서버에 전송되어 누적 판단하여 시스템 피해 확률 기반 피해 지표에 따라 최대가속도 값이 40 gal 미만인 경우 현행기준으로 별다른 조치는 하지 않으며, 40 ~ 65 gal 사이에 존재하는 경우 서행하도록 '주의요함'을 인지하도록 빨강 경광 효과를 천천히 표출하

- 며, 65 gal 이상인 경우 부저와 함께 빠른 경광 표출로 ‘광범위한 피해’ 이벤트를 표출함.
- ◆ 시스템 피해 확률은 경보없음, 주의요함, 경계필요, 심각, 매우심각 단계로 나뉘며 주의요함 시 서행을 유도하며, 경계필요, 심각, 매우심각 단계 시 광범위한 피해 단계로 모니터링에 참여한 모든 표출 디바이스에 이벤트를 표출하는 구조를 갖도록 구현함.

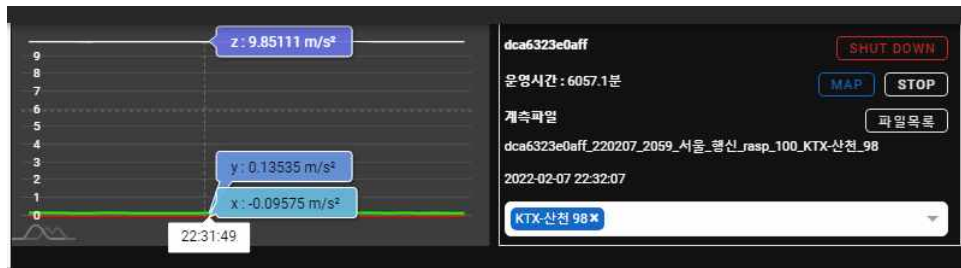


그림 2.89. 실시간 모니터링 중인 on board 지진조기경보 시스템 단말

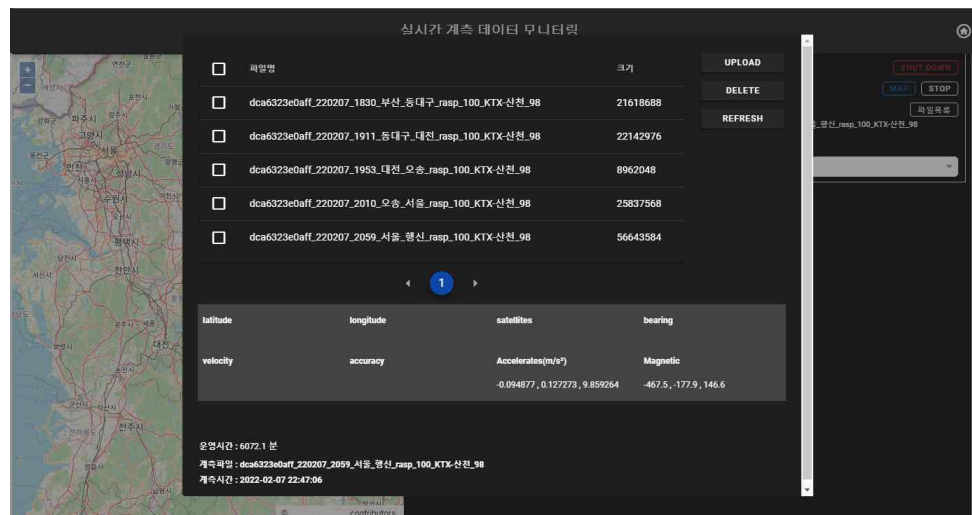


그림 2.90. 지진조기경보 시스템이 보유하고 있는 파일 목록 조회 화면

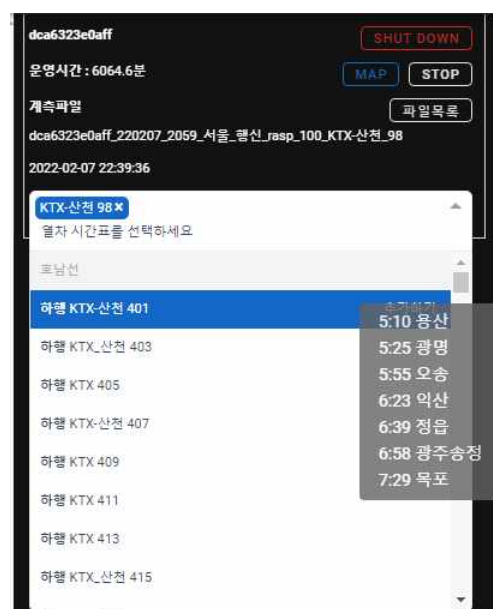


그림 2.91. 열차 시간표 적용 UI/UX



그림 2.92. 지진 감지 시 전파된 이벤트 표시 화면

라) 기타 연구활동

■ 개요

○ on-board 지진조기경보 시스템이 계측한 파일은 csv 형태의 데이터로서 데이터 유형을 실제 확인하기는 어려운 상황이 많았음. 현장에서 계측된 내용을 확인할 수 있는 별도의 시스템이 필요하였음.

■ 결과

○ 계측SW가 계측한 파일을 읽어 시뮬레이터를 하는 별도의 SW를 설계하였으며, 현장에서 확인하지 못한 상황은 시뮬레이션을 수행하여 확인할 수 있도록 시스템을 구현하였음.

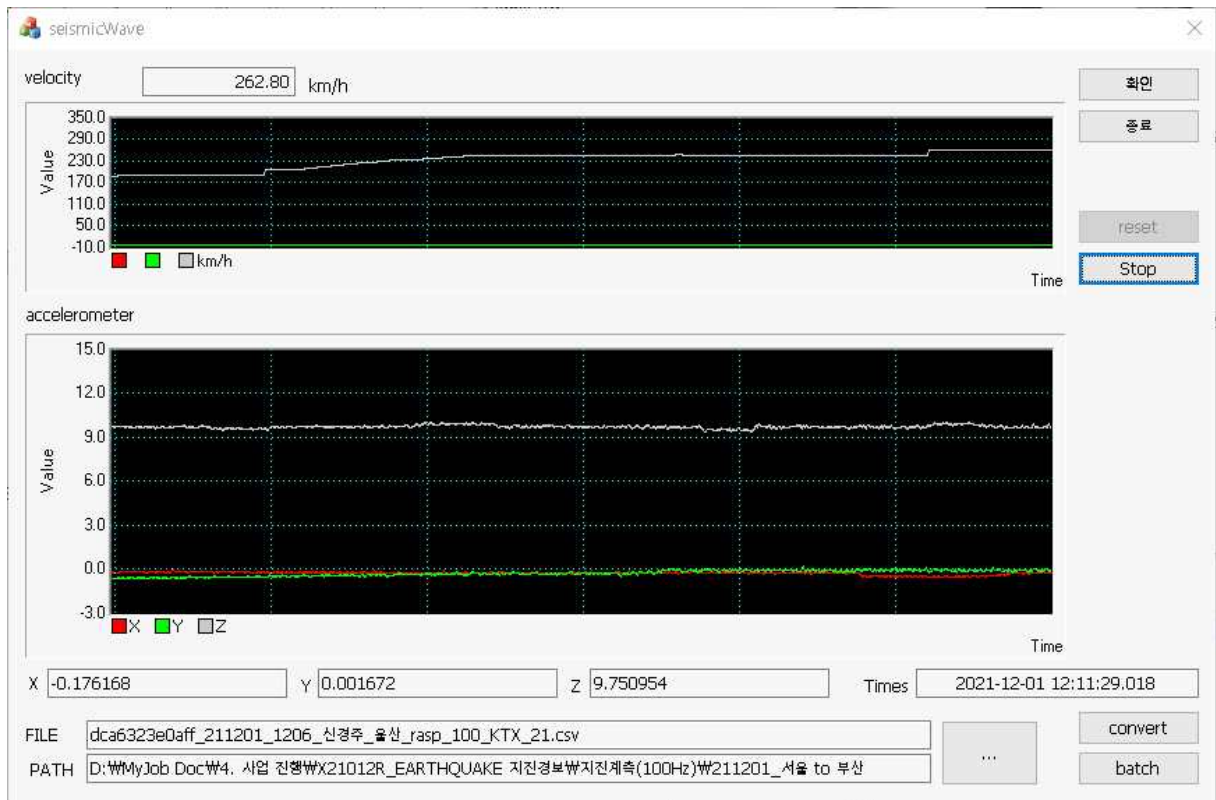


그림 2.93. 지진진동 계측 파일 시뮬레이터 SW

(5) (CTE E) 운행 의사판단 가상현실 시뮬레이터

가) 선행 기술 조사 및 에셋 수집

■ 개요

- 선행 기술 조사에서 활용한 시뮬레이터의 소프트웨어 및 관련 인터페이스를 구축하기 위해서 선행 기술 조사를 진행함.
- 사용자가 볼 가상 철도 환경 및 지진 효과를 구축하기 위해서 에셋 조사를 진행함.

■ 결과

- 철도 가상현실 선행 기술
 - 국내에서 진행된 가상현실 운전 시뮬레이션에 관련 연구에서는 쉽게 사용할 수 있도록 다음과 같은 조건들을 맞추기 위해서 노력함.
 - 가상현실에 대한 넓은 시야각을 제공함으로 실제와 유사한 가상현실을 경험할 수 있도록 만듦.

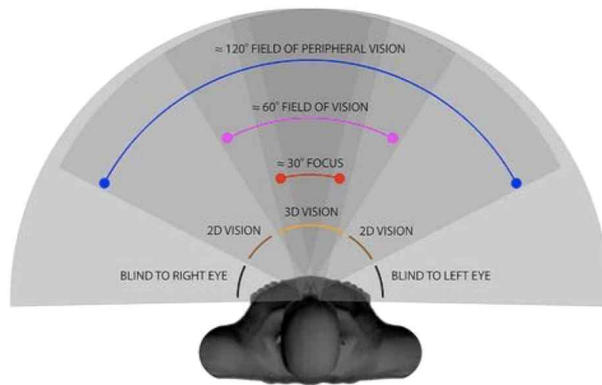


그림 2.94. FOV(Field of view): 운전자의 시야각을 말하며 일반적으로 135도가 실제 운전자의 시야각(Babin et al., 2017)

- 실감적인 소리와 진동: 운전에 경우, 실제 차량의 조향 장치 부품을 사용하여 실차와 동일한 핸들감을 제공하고, RPM에 따른 엔진음, 경적음, 급정지/급출발시 타이어 마찰음, 주변 차량 소음 및 충돌음 등 다양한 소리와 제공함으로 실감나는 가상현실에 집중할 수 있도록 만듦.



그림 2.95. 3축 의자: 의자의 기울기를 주기 위해서 필요하며, 몰입감과 극대화 하는데 필요함, 현대자동차의 경우, 6축 의자로 운전 시뮬레이터를 제작함.

- 철도 전기기사를 위한 가상현실 훈련

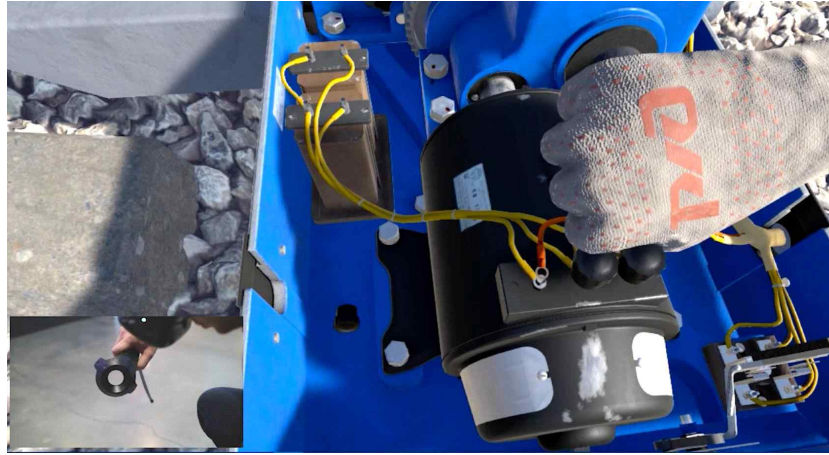


그림 2.96. Tengo Interactive사에서는 러시아의 철도에서 철도 변경 기기가 작동이 안될 때 고칠 수 있는 방법을 제시하고 있음.

- 철도 실행 장치 조정

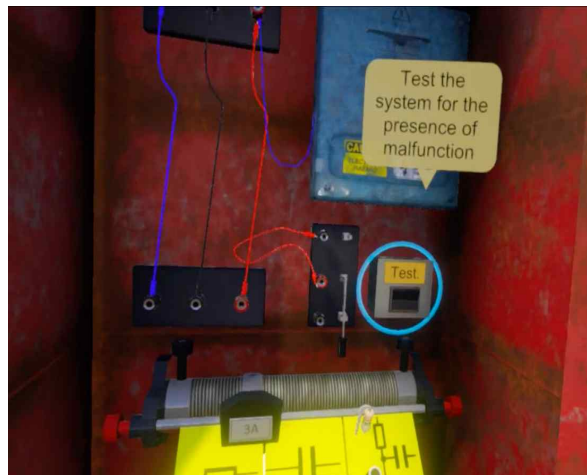


그림 2.97. Inlusiun사에서는 실제 기관사가 아니라 관련 기술자가 어떻게 철도를 운행되도록 만드는지 알려주는 시뮬레이션임.

- 실내에서 지진상황에 대비하는 VR 연구 사례



그림 2.98. 본 연구에서는 실내 공간에서 진행하여 단지 공간 자체를 흔드는 것뿐만 아니라 흔들림에 따라서 실내의 물건들이 어떻게 움직이는지도 자세하게 적혔음. 또한 실내의 구성물질의 종류와 밀도에 따라서 다르게 움직이도록 만들기도 했음.(Li et al., 2017)

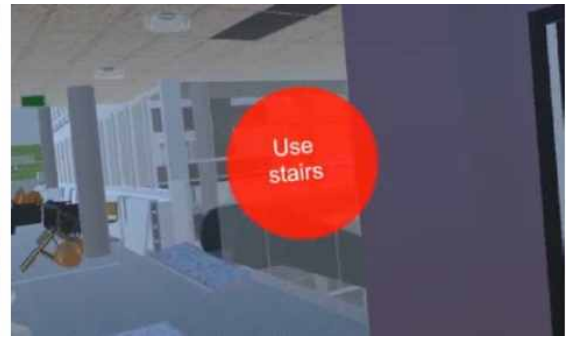


그림 2.99. 실내에서 지진상황에 대한 대처 방법을 가르쳐 주는 VR 연구 사례: 위와 같이 실내에서 지진이 일어났지만 그에 대한 대처를 선택지로 고르게 함으로써 지진과 같은 위급상황에서 어떻게 대처하는지 알려줬음.(Feng et al., 2020)

○ 철도 환경을 구현한 예셋

- 열차를 표현한 3D 모델



(a) LOWPOLY 고속 열차 3D 모델



(b) Arunas B. 고속 열차 3D 모델



(c) ESFGAMES 열차 내부 3D 모델



(d) Edit Point 열차 내부 3D 모델

그림 2.100. 열차 및 열차 내부 3D모델

- 특수 열차를 표현한 3D 모델



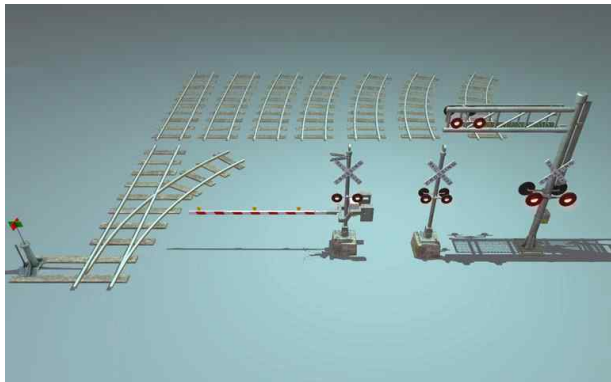
(a) Lowpoly 화물 열차 3D 모델



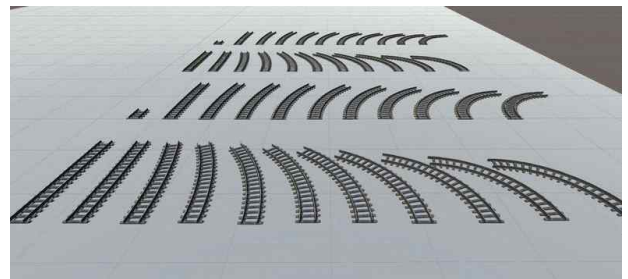
(b) IG Blocks 특수 화물 열차 3D 모델

그림 2.101. 특수 열차 3D모델

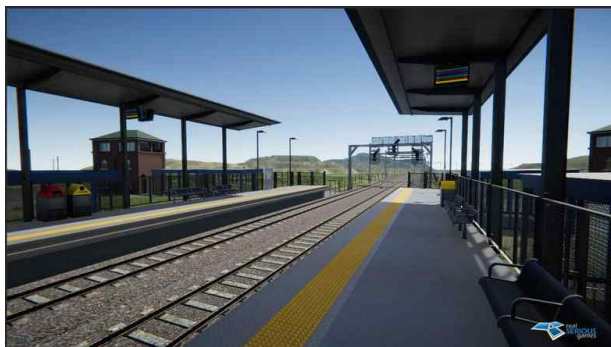
- 철로 및 관련 구조물을 표현한 3D 모델



(a) IndieGameModels의 철로와 신호등 3D 모델



(b) AGLOBEX의 철로와 신호등 3D 모델



(c) Real Serious Games의 열차정거장과 관련 구조물의 3D 모델



(d) Asset Store의 열차정거장과 관련 구조물의 3D 모델

그림 2.102. 철로, 신호등, 열차정거장과 관련 구조물의 3D모델

- Imphenzia사에서 제공하는 철도 관련 효과음은 약 40개로 지나가는 소리, 출발하는 소리 등이 있음.
- SoundFellas사에서 제공하는 역에서 나는 소리는 약 10개로 공감각적 음향으로 제공함. 또한 열차에서 문이 열리고 닫히는 소리가 각각 8개의 사운드를 제공함.
- Stormwave사에서 제공하는 열차 효과음은 움직이는 동안의 열차 소리를 제공함.
- SoundBits사에서 제공하는 기차 소리는 옆에서 지나가는 소리로 84개의 효과음을 제공함.

○ 지진 환경을 구현한 에셋

- Mugle Studio에서는 카메라 효과를 넣어 줄 수 있는 에셋을 제공하여 간단하게 지진 효과를 나타낼 수 있으며 코드도 제공하여 필요에 따라서 수정 가능함.
- Mageiros Studio에서는 직접 가상환경에 지진 효과를 줄 수 있는 에셋을 제공하여 시각자체가 아니

라 가상현실의 환경에서 직접 지진을 일으킬 수 있음.

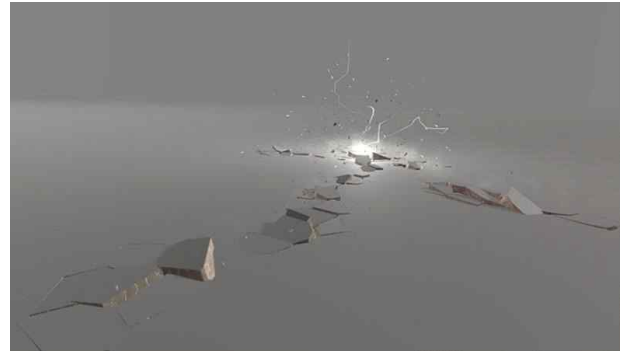


그림 2.103. RiverMill Studios에서 제공하는 지진효과에 대한 3D 모델



그림 2.104. KRIPTO289가 디자인한 폭발효과에 대한 3D 모델(지진과 직접 관련이 없지만 지진에 대한 관련 효과 중 중요한 효과로 판단함)

- Olivier Girardot가 제공하는 폭발 효과음 중 지진 효과음 4개를 수집함.
- Evil Mind은 마법 효과음을 제공하지만 그 중 지진 효과음으로 9개를 제공함.
- GameAudioVision사에서 제공하는 임팩트 있는 사운드를 15개 수집함.

나) 지진발생 열차 주행 가상현실 시뮬레이터 개발

■ 개요

- 가상현실내의 현실적인 배경을 구축하기 위해서 360도 영상을 촬영 및 데이터베이스를 구축함.
- VR전동의자를 통한 실제적인 지진효과를 구현하고 가상의 주간제어기를 조절할 수 있도록 만듦으로 보다 실제적인 가상현실 시뮬레이터를 개발함.

■ 결과

- 열차 주행 360도 영상 데이터 DB 구축
 - 한국철도기술연구원에서 주행하는 열차에 360도 카메라를 배치하여 촬영함.
 - 각 상황의 데이터를 수집 및 편집하여 10개의 클립을 데이터베이스로 정리함.
 - 촬영한 360도 열차 주행 영상 중 진동이 심한 10개의 클립을 데이터베이스로 정리함.



그림 2.105. 열차 주행 360도 영상을 구하기 위한 촬영 현장



그림 2.106. 촬영된 열차 주행 360도 영상 장면

○ 가상현실 소프트웨어 개발

- 가상현실 시스템을 구축하는 에디터인 Unity3D으로 가상환경을 구축함.
- 가상현실 소프트웨어와 VR기기가 연동할 수 있도록 개발한 SteamVR 플러그인을 활용함.
- 사용자의 배경이 360도 영상이 되도록 만들고 3D 구조물로 기관실을 구축함.
- 360도 영상을 가상현실에서 활용하기 위해서 Google VR SDK를 활용하여 구체의 화면이 360도 영상의 스크린이 되도록 만들.
- VR 사용자를 구체의 한 가운데에 배치함으로 360도 영상이 사용자가 보는 배경이 되도록 만들.
- 시뮬레이터가 시작 시, 바로 주행하는 장면을 보여줌으로 실제로 주행하는 듯한 느낌을 줄 수 있지만, 실제 기관사가 운영할 때에는 각종 기계판 및 조정판이 앞에 있어야 하기에 기관실이 구현된 3D 모델을 활용함.
- 수집한 에셋(Asset)중 기관실이 3D 모델이 구현 Arunas B.사의 고속 열차 3D 모델을 활용함.
- VR 사용자의 위치를 고속 열차 3D 모델의 기관실 안에 배치함으로 시뮬레이터가 시작 시, VR 사용자가 실제로 기관사석에서 운전하는 것처럼 느낄 수 있게 함.



그림 2.107. 가상현실에서 VR 사용자 보는 360도 영상과 3D 모델을 같이 보는 모습

- VR환경에서 시청각 피드백(feedback)을 구현하기 위해서 지진 효과 에셋을 활용함.
- 지진 발생시 VR사용자가 보고 있는 가상환경이 흔들리는 효과를 구현하기 위해서 지진 효과 에셋을 활용함.
- CameraShakeFX 에셋은 지진이 발생하면 일정 시간동안 VR 사용자의 머리의 위치를 강제적으로 흔들리도록 개발 되어 있음.
- 또한 지진이 발생하는 동안 땅이 갈라지면서 발생하는 소리도 같이 재생이 됨.
- 가상환경에서 주행하다가 중간에 갑자기 지진이 발생하도록 구현함.

```

/* Find all gameobjects in the scene and loop through them until we find all the nearby stress receivers */
var targets = UnityEngine.Object.FindObjectsOfType<GameObject>();
for(int i = 0; i < targets.Length; ++i)
{
    var receiver = targets[i].GetComponent<StressReceiver>();
    if(receiver == null) continue;
    float distance = Vector3.Distance(transform.position, targets[i].transform.position);
    /* Apply stress to the object, adjusted for the distance */
    if(distance > Range) continue;
    float distance01 = Mathf.Clamp01(distance / Range);
    float stress = (1 - Mathf.Pow(distance01, 2)) * MaximumStress;
    receiver.InduceStress(stress);
}

```

그림 2.108. 가상현실에서 지진 발생을 구현하기 위한 코드

- 3축 진동의자를 활용하여 가상 지진에 대한 촉각 피드백(feedback)을 개발함.
- 지진 효과에 따라 의자를 흔들리는 효과를 구현하기 위해서 이노시뮬레이션사의 3축 전동 의자를 활용함.
- 6축 전동 의자를 활용하는 것으로 계획했지만 3축 전동 의자로 충분히 지진 효과를 구현이 가능했기에 3축 전동의자를 활용함.

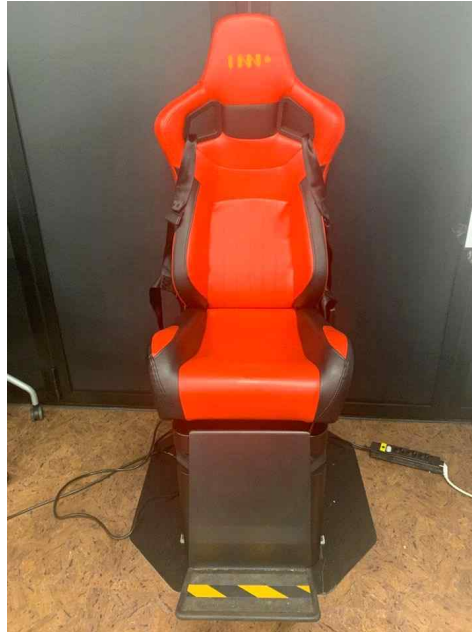


그림 2.109. 가상환경 시뮬레이터에서 사용된 이노시물레이션사의 3축 전동의자

- 3축 전동의자는 주행 시 안정적으로 고정되어 있다가 지진이 발생시 VR 사용자의 머리의 위치가 바뀌는 만큼 전동의자도 흔들리게 개발하여 현실적으로 지진 효과를 촉각적으로 느낄 수 있도록 개발함.

```
void Update()
{
    on = earthquake.GetComponent<TraumaInducer>().earthquarkon;
    MInput.UseAutoRotation = false;
    nowposition = Player.transform.position;
    if(on)
        MInput.SetInputValues((firstposition.x-nowposition.x)*2, (firstposition.y - nowposition.y)*2, (firstposition.z - nowposition.z)*2, 0, 0, 0);
}
```

그림 2.110. 지진 발생시 3축 전동의자가 흔들리도록 만든 코드

- 지진 발생 후, 주행 중인 열차를 긴급 정지 할 수 있는 버튼을 개발함.
- 가상현실에서 긴급 정지 버튼을 누르면 열차가 천천히 멈추도록 개발함.
- 긴급 정지 버튼은 열차내의 긴급 정지 버튼과 비슷하게 3D 모델을 Blender로 디자인 함.



그림 2.111. 긴급 정지 버튼 3D 모델

- 긴급 정지 버튼을 누르면 360도 열차 주행 영상의 배속이 느려지면서 열차가 천천히 멈추는 것을 구현함.
- 청각적으로 열차의 바퀴와 선로가 서로 마찰되는 소리를 정지하는 동안 들리게 함으로 시청각적으로 열차가 멈춰지는 걸 느낄 수 있도록 개발함.

```

if (speeddown == true)
{
    if (!trainstoppingaudioClip.isPlaying && !played1)
    {
        trainstoppingaudioClip.Play();
        played1 = true;
    }

    if (Time.time - beforetime > 2 && counter < 3)
    {
        videoPlayer.playbackSpeed = videoPlayer.playbackSpeed - 0.1f;
        beforetime = Time.time;
    }

    else if (Time.time - beforetime > 1 && counter < 6)
    {
        videoPlayer.playbackSpeed = videoPlayer.playbackSpeed - 0.1f;
        beforetime = Time.time;
    }

    else if (Time.time - beforetime > 1 && counter >= 6)
    {
        videoPlayer.playbackSpeed = videoPlayer.playbackSpeed - 0.1f;
        beforetime = Time.time;
    }
}
}

```

그림 2.112. 긴급 정지시 영상 배속을 조절하는 코드

- 열차 내 속도를 조절 할 수 있는 주간제어기를 개발함.
- 주간제어기를 내리면 360도 영상의 속도가 점차 빨라지도록 만들고, 반대로 주간제어기를 밀면 360도 영상의 속도가 느려지도록 개발함.
- 실제 열차 속도 제어 상황을 묘사하여 기존 비상 버튼을 삭제하고 주간제어기로 끝까지 밀면 긴급 정지하도록 개발함.



그림 2.113. 개발된 주간제어기

- 지진경보시스템과 가상현실 시스템을 연동하기 위해 저장된 주행 중의 열차 데이터와 지진 중의 흔들림 데이터를 가상현실 시스템에 적용함.
- 주행 중에는 주행에 대한 흔들림 데이터를 전동차의 위치 데이터로 적용하여 흔들리고, 지진 중에는 지진에 대한 흔들림 데이터를 전동차에 적용하여 흔들리도록 개발함.

```

private void Update()
{
    timepassed = timepassed + Time.deltaTime;

    if (timepassed > 0.01f)
    {
        train_ew = float.Parse(data_train[0]["dis.ew.m"].ToString()) * 30;
        train_ns = float.Parse(data_train[1]["dis.ns.m"].ToString()) * 30;
        train_ud = float.Parse(data_eq[0]["dis.ud.m"].ToString()) * 30;
        if (videoPlayer.time > 30 && videoPlayer.time < 60)
        {
            if (videoPlayer.time > 30 && videoPlayer.time < 30.2)
            {
                time = Time.time;
                float multiple = (20 - (Time.time - time)) / 20;
                train_ew = train_ew * multiple;
                train_ns = train_ns * multiple;
                train_ud = train_ud * multiple;
            }
            i = i + 1;
            h = h + 1;
        }
        if (h >= num_eq)
        {
            h = 0;
        }
        if (i >= num_train)
        {
            i = 0;
        }
    }
}

```

그림 2.114. 열차 데이터를 기반으로 전동차에 적용되는 흔들림 코드

- 과제 내용에 따라 지진에 바로 반응하는 가상 패드가 있는 환경과 일반적인 주행 상황의 지진을 경험하는 환경을 각각 개발함.
- 가상 패드는 지진 감지 즉시 화면이 보이도록 개발함.

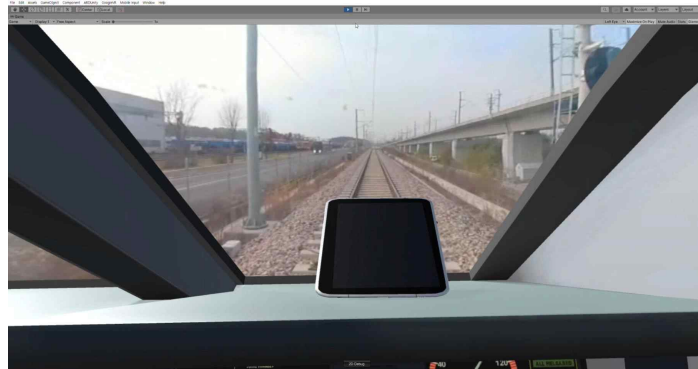


그림 2.115. 구현된 가상 패드

- 일반적인 환경에서는 지진 감지 후 관제소에서 연락하는 시간을 고려하여 지진 발생 후 10초 후에 전화로 지진을 인지하도록 개발함.
- 또한 각 환경에서 사용자가 지진 발생 후 긴급 정지까지 얼마나 걸리는지 확인할 수 있도록 개발함.

```

2021년 12월 23일 16시 21분 36초
Mode: Pad Mode
Quake evoked time:105.0038
Player stoped time:106.3778
-----
2021년 12월 23일 17시 17분 39초
Mode: No Pad Mode
Quake evoked time:10.0053
Player stoped time:31.44429

```

그림 2.116. 기록된 지진발생시간과 사용자가 긴급 정지한 시간

다) 가상현실 시뮬레이터 사용자 경험 평가

■ 개요

- 사용자 경험 평가를 통해서 실제 사용자가 사용하기 적합한지 확인하고 실제 사용자가 사용하는데 있어서 부족한 부분을 확인하고자 함.
- 1차 사용자 경험 평가에는 4명의 현직 기관사가 참여하고, 2차 사용자 경험 평가에는 소장급 기관사 1명이 참여함.

■ 결과

- 1차 사용자 경험 평가
 - 현직 기관사 4명을 대상으로 현재까지 개발한 시스템을 평가함 .
 - 가상현실 관련 설문지 결과에 따르면 약 70% 이상의 몰입감을 느꼈다고 응답하고 멀미감도 어느정도 느꼈다고 언급함.
 - 전반적인 주행경험은 실제 열차와 비슷하지만 지진효과가 시각적으로 과다하여 멀미감이 느꼈다고 응답함.
 - 위 응답을 기반으로 시각 효과를 통한 지진 효과와 비상 정지 버튼을 제거함.



그림 2.117. 1차 사용자 평가

○ 2차 사용자 경험 평가

- 서울고속기관차소장을 대상으로 개발한 시스템을 평가함.
- 가상현실 평가를 각각 비교할 때, 가상 패드가 없는 환경보다 가상 패드가 있는 환경에서 긴급 대처하는 시간이 약 15초 이상 빨라진 것을 확인함.



그림 2.118. 2차 사용자 평가

2) 연구개발 추진 전략 및 방법

(1) 연구진 내 연구 교류

- 주관기관과 공동기관의 주기적 공정회의로 연구 진행상황 확인 및 연구 진행을 위해 필요한 사항에 대해 상시 요청함.
- 합동 열차진동 계측을 수행하여 열차 진동하중 DB의 자료를 구축함.
- 공동 실내모형실험을 진행하여 모형체 제작 및 진동 데이터 생성 등에 토의를 진행함.
- 공동 전달함수 개발 등의 연구를 통해 공동으로 논문(SCIE)을 편찬함.
- 센서 데이터의 테스트로 자료 평가 - 알고리즘 수정의 절차를 연구진 내에서 진행함
- 연구진의 교류(한양대 에리카 연구원의 한국철도기술연구원 파견)로 원활한 연구 교류를 진행함.

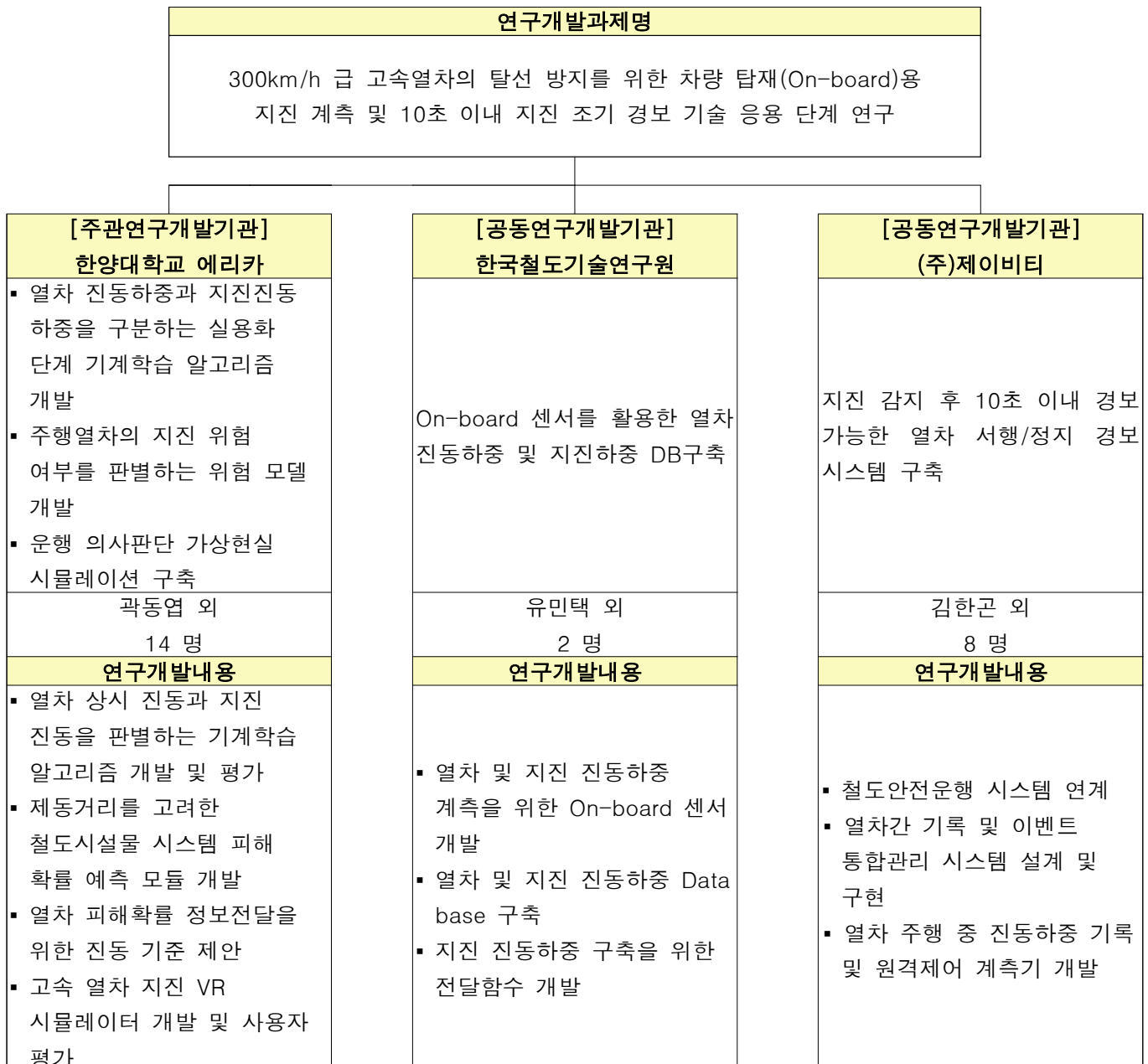
(2) 외부기관 협조요청

- 한국철도공사에 협조를 요청하여 KTX 기관사실 및 오송 시험선에서 360도 영상 녹화를 수행함.
- 열차 진동하중 상시 계측을 추진함.

(3) 전문가 자문회의

- 자체 전문가 자문회의로부터 연구 보완사항에 대한 피드백을 수렴함(별첨자료 p.53).
- 자문 의견을 바탕으로 연구 내용을 보완함.

3) 연구개발 추진 체계



4) 연구개발 추진 일정

[1차연도]

한양대학교 에리카산학협력단(주관)																
연번	세부 연구개발내용	수행일정(월)												주요 결과물	연구개발비 (단위:천원)	연구개발기관 (책임자)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12			
1	철도시설물 지진취약도 모델 선행연구 조사													국외 철도 피해 사례로부터 경험적 취약도 모델 개발	5,000	곽동엽
2	열차 주행 안전 관련 기준 조사													국내 열차 주행 및 철로 유지보수 관련 기준 수집	10,000	곽동엽
3	지진-열차 진동 하중 판별 기계학습 베이스라인 모델 구현													기계학습 베이스라인 모델	5,000	고민삼
4	진동 하중 피쳐 추출 기술 개발													피쳐 추출 프로그램	10,000	고민삼
5	관련 사례 조사 및 분석													보고서	5,000	김기범
6	철도 지진 관련 에셋 조사													보고서	10,000	김기범
한국철도기술연구원(공동)																
연번	세부 연구개발내용	수행일정(월)												주요 결과물	연구개발비 (단위:천원)	연구개발기관 (책임자)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12			
1	선행 사례 연구 조사													선행 연구로부터 DB 구축 및 계측기술 방안 모색	5,000	유민택
2	On-board 용 동적하중 계측 센서 연구													On-board 용 동적하중 계측 센서 개발	15,000	유민택
3	진동하중 계측기술 개발													계측기술 개발	10,000	유민택
4	열차 진동하중 Database 구축													열차 진동하중 DB 구축	10,000	유민택
㈜제이비티(공동)																
연번	세부 연구개발내용	수행일정(월)												주요 결과물	연구개발비 (단위:천원)	연구개발기관 (책임자)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12			
1	선행 연구사례 조사													-	5,000	최임청
2	데이터 수집 프로세스 및 데이터 베이스 설계													설계서	60,000	최임청
3	보고서 작성													보고서	30,000	최임청

[2차연도]

한양대학교 에리카산학협력단(주관)																
연번	세부 연구개발내용	수행일정(월)												주요 결과물	연구개발비 (단위:천원)	연구개발기관 (책임자)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12			
1	철도시설물 대표 지진취약도 모델 개발													가중 조합한 대표 지진취약도 모델 개발	10,000	곽동엽
2	열차 피해 확률모델 연구													테스트베드 구간 철도시설물 DB작성	10,000	곽동엽
3	모델 성능 평가 및 하이퍼 파라미터 튜닝													기계학습 평가 실험 결과	10,000	고민삼
4	양상블 알고리즘을 통한 기계학습 모델 고도화													양상블 기계학습 모델 프로그램	10,000	고민삼
5	360도 주행/지진 열차 영상 촬영 및 데이터베이스 구축													데이터베이스	20,000	김기범
6	가상현실 시스템 360도 영상 및 VR전동의자 시스템 구축													소프트웨어	25,000	김기범
한국철도기술연구원(공동)																
연번	세부 연구개발내용	수행일정(월)												주요 결과물	연구개발비 (단위:천원)	연구개발기관 (책임자)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12			
1	On-board 용 계측 센서 고도화													계측 센서 개발	10,000	유민택
2	교량 구조 지진하중 전달함수 개발													지진 하중 전이 함수 개발	10,000	유민택
3	열차 하중 및 지진 하중에 대한 DB 구축													열차 하중 및 지진 하중에 대한 DB 구축	20,000	유민택
㈜제이비티(공동)																
연번	세부 연구개발내용	수행일정(월)												주요 결과물	연구개발비 (단위:천원)	연구개발기관 (책임자)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12			
1	위치기반 계측데이터 처리기술 개발													프로토타입 소프트웨어	40,000	김한곤
2	실시간 경보 메시지 전달체계 개발													연계모듈 소프트웨어	42,000	김한곤

[3차연도]

한양대학교 에리카산학협력단(주관)																
연번	세부 연구개발내용	수행일정(월)												주요 결과물	연구개발비 (단위:천원)	연구개발기관 (책임자)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12			
1	전달함수를 고려한 철도 시스템 피해확률 계산													철도 시스템 피해확률 계산 모듈 개발	20,000	곽동엽
2	효과적 피해확률 정보 전달을 위한 기준 설정													피해확률 정보 전달을 위한 진동 기준 설정	25,000	곽동엽
3	다중 기기를 활용하여 기존 기계 학습 모델 성능 고도화													다중 기기 기반 기계학습 프로그램	20,000	고민삼
4	다중 기기 활용 실험 환경 구축													다중 기기 테스트 프로그램	25,000	고민삼
5	철도 데이터 연계 시스템 구축													소프트웨어	10,000	김기범
6	사용자 평가 진행													보고서	10,000	김기범
한국철도기술연구원(공동)																
연번	세부 연구개발내용	수행일정(월)												주요 결과물	연구개발비 (단위:천원)	연구개발기관 (책임자)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12			
1	모형 진동대 실험을 통한 궤도/차량 전달함수 개발													지진하중을 계측하기 위한 기술개발	20,000	유민택
2	열차 하중 및 지진 하중에 대한 DB 구축													열차 하중 및 지진 하중에 대한 DB 구축	30,000	유민택
2	기계학습과 DB 연계방안 연구													열차 하중 및 지진하중 스펙토그램 분석기법	20,000	유민택
㈜제이비티(공동)																
연번	세부 연구개발내용	수행일정(월)												주요 결과물	연구개발비 (단위:천원)	연구개발기관 (책임자)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12			
1	On-Board 지진조기경보시스템 설계													설계서	60,000	김한곤
2	시스템 구현													계측소프트웨어, 안드로이드 앱, 통합시스템SW	135,000	김한곤
3	시범 운용 및 테스트													On-Board 지진조기경보시 스템	40,000	김한곤

3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도

1) 연구수행 결과

(1) 정성적 연구개발성과

가) (CTE A) On-board 센서를 활용한 열차 진동하중 및 지진하중 DB구축

■ 개요

- On-board용 계측 센서 개발
 - 열차 및 지진 하중 등 동적 하중을 100hz 이상으로 계측가능한 저비용 센서를 MEMS를 이용하여 개발하고 그 성능을 검증하였음.
- 열차/진동하중 계측기술 개발 및 DB 구축
 - 열차 하중과 지진 하중을 구분하는 기계학습 알고리즘에 사용하는 DB를 구축하였으며, 목표로 한 지진하중 DB 300개 이상, 열차 하중 DB 1,000개 이상을 구축하였음.
- 교량 및 궤도/차량 지진하중 전달함수 개발
 - 열차에서 계측되는 지진 하중의 합리적 추론을 위해 교량 구조물 및 궤도/차량에서의 지진하중 전달함수를 개발하였음.
- 열차/진동하중 계측기술 개발 및 DB 구축
 - 열차 하중 및 지진 진동하중의 스펙트로그램 분석기법을 통해 지진 감지 기술에 대한 연계방안 연구를 수행하였음.

구분	세부 연구목표	세부 연구개발 내용	주요 결과물	달성도
1차년도 (2019)	On-board용 계측 센서 개발	On-board 용 동적 하중계측용 센서 연구	▪ 동적하중 계측 및 분석이 가능한 센서 개발 ▪ 열차 진동하중 DB 100건 이상 구축	100%
	열차 진동하중 계측기술 개발 및 DB구축	기계학습 적용을 위한 열차 진동하중 DB 구축		
2차년도 (2020)	지진 진동하중 계측기술 개발 및 DB구축	기계학습 적용을 위한 지진 진동하중 DB 구축	▪ 열차하중 DB 500개 구축 ▪ 지진 하중 DB 100개 구축 ▪ 교량 구조물 지진하중 전달함수 개발	100%
	교량 구조물 지진하중 전달함수 개발	구조물 지진 응답을 고려한 전달함수 개발		
3차년도 (2021)	궤도/차량 구조 지진하중 전달함수 개발	궤도/차량 지진 응답을 고려한 전달함수 개발	▪ 궤도/ 차량 구조 지진하중 전달함수 개발 ▪ 열차하중 DB 500개 구축 ▪ 지진 하중 DB 100개 구축 ▪ 스펙트로그램을 활용한 지진 감지 기술 개발	100%
	기계학습 및 정보 시스템과의 DB연계방안 연구	열차 및 진동하중 스펙트로그램 분석기법 연구		

나) (CTE B) 열차 진동하중과 지진진동 하중을 구분하는 실용화 단계 기계학습 알고리즘 개발

■ 개요

- 지진-열차 진동 하중 판별 기계학습 베이스라인 모델 구현
 - 진동 하중 피쳐 추출 기술 개발: 열차 운행 상황이 아닌 일반 지진 탐지 방법에 대해서는 많은 연구가 있어왔는데, 이중 진동 피쳐를 바탕으로 하는 기계학습 방법을 조사하고, 이때 주로 사용하는 피쳐들을 추출하는 방법을 자체 구현함. 총 276개 피쳐를 추출하는 프로그램을 개발하였고, 피쳐는 크게 진동의 통계적 피쳐와 주파수 피쳐로 구분할 수 있음.
 - X, Y, Z 3개 축 각각에 대하여 시간-가속도 데이터를 입력 받아 지진-열차 상시 진동을 구분하는 기계학습 모델을 개발함. 다양한 기계학습 알고리즘(Logistic Regression Classifier, SVM, Random Forest, LightGBM)을 고려하였으며, KTX 내 부착된 센서 데이터를 사용하여 모델 학습 수행함.
- 실시간 지진-열차 진동 하중 판별 기계학습 모델 개발
 - 연속된 데이터를 일정 시간 구간 별로 입력 받아 진동 여부를 판별하는 기계학습 모델로 확장함. 저가형 센서를 바탕으로 자체 수집한 데이터를 입력으로 기계학습 모델을 생성함.
 - 다양한 모델을 조합하는 앙상블 기계학습 기법을 적용하여 기존 베이스라인 모델 성능을 고도화.
- 다중 센서 기반 지진-열차 진동 하중 판별 기계학습 모델 개발
 - 다중 센서를 입력으로 사용하여 기존 기계학습 모델 성능 고도화 수행. 다중 센서를 효율적으로 처

리할 수 있도록 하기 위한 딥러닝 기법 적용 (예: Weight Sharing, Global Average Pooling). 실제 테스트 베드 구간에서 수집한 데이터를 바탕으로 성능 평가 (정확도 및 처리 시간)

구분	세부 연구목표	세부 연구개발 내용	주요 결과물	달성도
1차년도 (2019)	지진-열차 진동 하중 판별 기계학습 베이스라인 모델 구현	- 진동 하중 피쳐 추출 기술 개발 - 다양한 기계학습 알고리즘 (Logistic Regression Classifier, SVM 등)을 피쳐에 적용하여 베이스라인 모델 개발	- 진동 하중 피쳐 추출 프로그램 - 지진-열차 진동 판별 기계학습 베이스라인 모델 프로그램	100%
2차년도 (2020)	실시간 지진-열차 진동 하중 판별 기계학습 모델 개발	- 실시간 데이터 입력 및 처리를 위한 기계학습 전처리 모듈 개발 - 앙상블 기법을 활용한 기계학습 모델 고도화	앙상블 기법을 지원하는 실시간 지진-열차 진동 판별 기계학습 베이스라인 모델 프로그램	100%
3차년도 (2021)	다중 센서 기반 지진-열차 진동 하중 판별 기계학습 모델 개발	- 다중 센서 데이터 처리 및 평가 환경 구축 - 다중 센서 데이터 기반 딥러닝 모델 개발 및 평가	- 다중 센서 데이터 처리 및 평가 프로그램 - 다중 센서 데이터를 입력으로 하는 딥러닝 모델 프로그램 - 실제 열차 데이터에 적용한 평가 실험 결과	100%

다) (CTE C) 주행열차의 지진 위험 여부를 판별하는 위험 모델 개발

■ 개요

- 국내 철도시설물 대표 지진취약도 모델 제시
 - 기존 선행연구에서 제안된 철도시설물 지진취약도 모델을 시설물 별(교량, 터널, 토공)로 취합하고 가중 조합하여 시설물 별 대표 지진취약도 모델을 제시함.
- 열차 주행 안전 관련 기준 조사
 - 선로유지관리지침, 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침 등 국내 기준을 조사하여 지진취약도 모델의 손상상태와 각종 기준에서 제시하는 정량적 손상상태 정도를 대칭시킴.
- 테스트베드(익산-정읍)구간의 철도 시스템 피해확률 계산
 - 테스트베드 구간(정읍-익산)내 각 세그먼트별 구조물의 종류에 따라 대표 지진취약도 모델을 할당한 후, 열차 제동거리를 시스템으로 간주하여 시스템 피해확률을 계산함.
- 정보전달을 위한 피해 기준 설정
 - 테스트베드 구간에서 계산한 시스템피해확률과 열차 서행/정지 기준을 조합하여 시스템 피해확률 기반 피해 지표를 제안함.

구분	세부 연구목표	세부 연구개발 내용	주요 결과물	달성도
1차년도 (2019)	철도시설물 지진취약도 모델 선행연구 조사	- 철도시설물 지진취약도 모델 선행연구를 취합하여 취약도 모델 정리 및 손상상태 기준 정립 - 과거 철도시설물의 지진피해사례로부터 경험적 취약도 모델 개발	- 교량, 터널, 토공의 선행 지진취약도 모델 취합 완료 2004 니가타 지진 피해사례로부터 철도시설물 지진취약도 모델 개발 완료	100%
	열차 주행 안전 관련 기준 조사	국내 열차 주행 안전관련 기준을 수집하여 지진취약도 모델 손상상태 정의와 매칭	선로유지관리지침, 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침 등의 기준으로부터 철도 피해 기준 정립 완료	100%
2차년도 (2020)	철도시설물 대표 지진취약도 모델 개발	취합된 지진취약도 모델을 가중 조합하여 철도시설물 별 대표 지진취약도 모델을 제시	교량, 터널(굴착식 및 개착식), 토공(성토 및 절토) 등 각 철도시설물에 대한 대표 지진취약도 모델 정립	100%
	열차 피해 확률모델 연구	- 열차 제동거리 계산 - 철도 시스템 피해확률 기본 개념 정립	- 제동거리 계산 및 기준으로부터 고속주행시 비상제동거리 계산 완료 - 시스템 피해확률의 기본 범위 계산 완료	100%
3차년도 (2021)	전달함수를 고려한 철도 시스템 피해확률 계산	객실 내에서 측정한 최대가속도를 지표면 기준에서의 최대가속도로 변환하는 전달함수를 계산	- 시스템 피해확률 계산 방법 정립 - 테스트베드 구간의 각 기준 위치에 대한 시스템 피해확률 계산	100%

		- 특성거리를 가정하여 익산-정읍 구간 내 제동거리 내의 철도 시스템에 대한 피해확률 계산 - 시스템 피해확률과 열차 서행/정지 기준을 고려한 피해확률 정보 기준 설정		
	효과적 피해확률 정보 전달을 위한 기준 설정		시스템 피해확률 기반 피해 지표 정립	100%

라) (CTE D) 지진 감지 후 10초 이내 경보 가능한 열차 서행/정지 경보 시스템 구축

■ 개요

- 철도안전운행 시스템과 직접적 연계는 지속적 전원 공급 및 설치 위치의 제한으로 시스템의 열차운행 일정표를 연계하여 열차 역간 구간을 기준으로 계측을 수행할 수 있도록 연계방안을 연구하였음.
- 열차간 기록 및 이벤트를 통합관리하기 위하여 on-board 센서 계측기의 계측 상태를 별도 통합관리 시스템에서 모니터링하며, 필요 시 on-board 센서 계측기가 계측정보를 저장 및 삭제, 저장 목록의 조회 등을 원격 제어할 수 있도록 통합관리 시스템을 설계 및 구현하였음.
- 통합관리 시스템을 웹을 통하여 관리할 수 있도록 UI/UX를 설계 및 구현하였으며, 관리의 편의성을 위하여 안드로이드를 이용한 별도의 통합관리 시스템의 UI/UX를 추가로 설계 및 구현하였음.

구분	세부 연구목표	세부 연구개발 내용	주요 결과물	달성도
1차년도 (2019)	On-board 기반 데이터 수집체계 설계	On-board 센서 계측 데이터베이스 사례 조사 및 무선통신을 활용한 데이터 수집방안 설계	테이블 및 인터페이스 정의서	100
	통합관리 모니터링 시스템을 위한 데이터베이스 설계	On-board 계측데이터의 적재 양을 고려 및 데이터베이스 체계 설계		
2차년도 (2020)	실시간 경보 메시지 전달 체계 개발	LTE통신을 통한 위험상황 메시지를 수집서버로 전달 프로토타입 개발	LTE통신을 통한 메시지 수집서버로 전달 프로토타입	100
	위치기반 계측데이터 처리 기술 개발	on-board 계측 시 GPS를 활용한 위치정보 연계 모듈 개발	on-board 센서를 활용한 지진계측 및 GPS위치정보 연계모듈	100
3차년도 (2021)	On-board 지진조기경보시스템 개발	On-board 지진조기경보 시스템을 원격으로 제어하고 모니터링 할 수 있는 UI/UX 시스템 설계 및 구현	지진계측SW	100
	열차간 기록 및 이벤트를 통합관리하기 위한 시스템 구현	열차간 계측된 지진정보를 기록하고 모니터링할 수 있는 수집서버 시스템의 설계 및 구현	제어 모바일앱, On-Board 지진조기경보 시스템	100

마) (CTE E) 운행 의사판단 가상현실 시뮬레이션 구축

■ 고속 열차 지진 관련 연구 및 에셋 조사

- 총 5개의 연구사례를 분석하여 고속 열차 지진 관련 연구로는 시뮬레이터의 각종 구성요소(넓은 FOV를 통한 시각, 전동의자를 통한 촉각, 철도 환경의 효과음을 통한 청각)가 중요한 것을 확인하고, 철도 현장에서의 시뮬레이션 활용 예시와 가상현실을 통한 지진 훈련 활용 예시를 통해 자연스러운 지진 인터페이스가 시뮬레이터에 효과적인 것으로 분석함.
- 총 20개의 에셋을 조사함으로 가상현실 시뮬레이션에 중요한 3D 모델 및 각종 효과음을 구현할 수 있음을 확인함, 해당 에셋들에서 가장 적합한 에셋을 고속 열차 지진 시뮬레이터에 적용함.

■ 360도 주행 및 지진 열차 영상 데이터베이스 구축

- 한국철도기술연구원의 연습차량에서 360도로 주행 환경을 촬영함.
- 촬영된 360도 영상들 중 안정적으로 촬영된 영상을 주행 영상으로 10개로 지정하고, 흔들림이 심하게 촬영된 영상을 지진 영상으로 10개로 지정하여 데이터베이스를 구축함.

■ 가상현실 기반 고속 열차 지진 시뮬레이터 개발

- 촬영된 360도 영상 및 VR 전동의자를 기반으로 기관사가 훈련할 수 있는 가상현실 시뮬레이션 시스템을 개발함. 더불어 지진 데이터를 전동의자에 적용하여 실제 열차의 진동과 지진의 진동을 시뮬레이터에 느낄 수 있도록 개발함.
- 1차 및 2차 사용자 평가를 진행함으로 총 5명의 기관사들부터 개발된 시스템에 대해서 평가를 받았음. 평가에 참여한 대부분의 참가자들은 높은 몰입감을 느꼈다고 응답하고, 멀미감도 좀 느꼈다고 응답함. 그에 따라서 부가적인 지진 시각 효과를 제외하고 주간제어기만으로 속도를 조절하도록 개발함.

구분	세부 연구목표	세부 연구개발 내용	주요 결과물	달성도
1차년도 (2019)	관련 연구 및 에셋 조사	- 고속열차 지진과 관련 국내외 연구사례 조사 - 관련 에셋 조사	관련 연구 5개 및 관련 에셋 15개에 대한 보고서	100%
2차년도 (2020)	360도 주행 및 열차 영상 데이터 페이스 구축	360도 주행 및 열차 영상 데이터 촬영 - 데이터베이스 구축	주행 영상 10개와 지진 영상 10개	100%
3차년도 (2021)	가상현실 기반 고속 열차 지진 시뮬레이터 개발	- 고속 열차 지진 VR 시뮬레이터 개발 - 사용자 경험 평가	- 고속 열차 지진 VR 시뮬레이터 - 기관사 5명의 사용자 경험 평가서	100%

(2) 정량적 연구개발성과

구분		1차년도 (목표/달성)	2차년도 (목표/달성)	3차년도 (목표/달성)	총합 (목표/달성)
논문 게재	SCI	0/1	2/8	5/3	7/12
	비SCI	2/1	2/1	2/2	6/4
	계	2/2	4/9	7/5	13/16
학술회의 발표	국내		0/3	0/2	0/5
	국제	0/1			0/1
	계	0/1	0/3	0/2	0/5
보고서 원문		0/1	0/1		0/2
지식재산권	특허 출원	1/1		1/0	2/1
	특허 등록			0/1	0/1
	계	1/1		1/1	2/2
저작권	소프트웨어	2/3	3/3	3/3	8/9

(3) 세부 정량적 연구개발성과

[과학적 성과]

□ 논문(국내외 전문 학술지) 게재

번호	논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행기관	SCIE 여부 (SCIE/비SCIE)	게재일	등록번호 (ISSN)	기여율
1	Vision-Based Human Activity Recognition System Using Depth Silhouettes: A Smart Home System for Monitoring the Residents	Journal of Electrical Engineering & Technology	Kibum Kim	14	한국	Springer	SCIE	2019.09.16	1975-0102	30%
2	2004 니가타 지진 사례 분석을 통한 고속철도 시스템의 지진 취약도 곡선 개발	한국지반공학회논문집	양승훈	11	대한민국	한국지반공학회	비SCIE	2019.11.01.	1229-2427	100%
3	Development of seismic fragility curves for high-speed railway system using earthquake case histories	GEOMECHANICS AND ENGINEERING	Seunghoon Yang	2	대한민국	Techno-Press	SCIE	2020.04.25.	2005-307X	100%
4	Wearable Inertial Sensors for Daily Activity Analysis Based on Adam Optimization and the Maximum Entropy Markov Model	Entropy	Sheikh Badar	10	스위스	MDPI	SCIE	2020.05.20	1099-4300	30%

5	TermBall: Tracking and Predicting Evolution Types of Research Topics by Using Knowledge Structures in Scholarly Big Data	ACCESS	고민삼	8	미국	IEEE	SCIE	2020.06.08	2169-3536	25%
6	Analysis of a Wake-Up Task-Based Mobile Alarm App	Applied Science	고민삼	10	스위스	MDPI	SCIE	2020.06.09	2076-3417	50%
7	Development of a Seismic Detection Technology for High-Speed Trains Using Signal Analysis Techniques	Sensors	유민택	13	스위스	MDPI	SCIE	2020.07.	1424-8220	100%
8	A Novel Statistical Method for Scene Classification Based on Multi-Object Categorization and Logistic Regression Stochastic	Sensors	Abrar Ahmed	20	스위스	MDPI	SCIE	2020.07.10	1424-8220	30%
9	Recognition of Physical Activity and Healthcare Using Tri-Axial Inertial Wearable Sensors	Applied Sciences	Ahmad Jalal	10	스위스	MDPI	SCIE	2020.10.13	2076-3417	30%
10	성토 구간 지반 응답을 고려한 열차 내 지진 감지 기술 개발 연구	한국지반공학회 논문집	유민택	10	대한민국	한국지반공학회	비SCIE	2020.10.	1229-2427	100%
11	Comparison of Signal-Analysis Techniques for Seismic Detection System for High-Speed Train Data: Effect of Bridge Structures	Sensors	유민택	23	스위스	MDPI	SCIE	2020.12.	1424-8220	100%
12	Automatic human posture estimation for sport activity recognition with robust body parts detection and entropy markov model	MULTIMEDIA TOOLS AND APPLICATIONS	Amir Nadeem	14	미국	Springer	SCIE	2021.03.16	1573-7721	30%
13	HearIt: Auditory-Cue-Based Audio Playback Control to Facilitate Information Browsing in Lecture Audio	Applied Science	고민삼	11	스위스	MDPI	SCIE	2021.04.22	2076-3417	50%
14	철도 터널 구조물의 기존 지진취약도 모델 적합성 평가	한국터널지하공간학회 논문집	양승훈	1	대한민국	한국터널지하공간학회	비SCIE	2022.01.31.	2233-8292	100%

15	관측 환경에 따른 상시미동의 HVS 결과 신뢰도 평가	KSCE Journal of Civil and Environment al Engineering Research	유병호	1	대한민국	대한토목학회	비SCIE	2022.02	1015-6348	100%
16	The Connection to the Public's Preferred Sports Analysis and Physical Education Curriculum	Plos One	고민삼	17	미국	Plos	SCIE	2022.03.16.	1932-6203	50%

□ 국내 및 국제 학술회의 발표

번호	회의 명칭	발표 내용	발표자	발표 일시	장소	국명
1	The 2019 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM19)	Seismic reliability of high-speed railway considering composite damage types using 2004 M6.6 Niigata earthquake case history	곽동엽	2019.08.17.	제주	대한민국
2	HCI Korea 2020	Card: 이미지 카드 기반 뉴스 토픽 요약 시스템	이현아	2020.02.11	제주	대한민국
3	2020 한국 지진공학회 온라인 Work 및 학술발표회 논문집	지진피해 조기대응을 위한 고속열차 on-board 감지 시스템 연구 현황 및 방향	곽동엽	2020.09.25.	온라인	대한민국
4	2020 대한토목학회 정기학술대회	고속열차 내에서 기록되는 지진파 시간이력의 변화 추정	양승훈	2020.10.23.	제주	대한민국
5	2021 한국터널지하공간학회 학술발표회 논문집	철도 터널 구조물의 기존 지진취약도 모델 적합성 평가	양승훈	2021.04.22.	서울	대한민국
6	한국철도학회 2021년 정기총회 및 추계학술대회	진동대를 활용한 고속열차에 탑재된 On-board 형 센서 성능 검증	양승훈	2021.11.11.	제주	대한민국

□ 보고서 원문

번호	연도	보고서 명	발간일	등록 번호
1	2019	300km/h 급 고속열차의 탈선 방지를 위한 차량 탑재(On-board)용 지진 계측 및 10초 이내 지진 조기 경보 기술 응용 단계 연구 제1차년도 보고서	2019.12.31	-
2	2020	300km/h 급 고속열차의 탈선 방지를 위한 차량 탑재(On-board)용 지진 계측 및 10초 이내 지진 조기 경보 기술 응용 단계 연구 제2차년도 보고서	2020.11.13.	-

[기술적 성과]

□ 지식재산권(특허, 실용신안, 의장, 디자인, 상표, 규격, 신제품, 프로그램)

번호	구분	지식재산권 등 명칭 (건별 각각 기재)	국명	출원			등록			기여율	활용 여부
				출원인	출원일	출원번호	등록인	등록일	등록번호		
1	특허	차량 탑재형 열차 지진 경보 시스템 및 방법	대한민국	유민택	2019.11.07	10-2019-0141979	-	-	-	100%	
2	특허	차량 탑재형 열차 지진 경보 시스템 및 방법	대한민국	-	-	-	유민택	2021.06.07	제 10-22640 39 호	100%	

○ 지식재산권 활용 유형

번호	제품화	방어	전용실시	통상실시	무상실시	매매/양도	상호실시	담보대출	투자	활용 예정	기타
2										√	

□ 저작권(소프트웨어, 서적 등)

번호	저작권명	창작일	저작자명	등록일	등록번호	저작권자명	기여율
1	열차내 진동가속도 계측 시스템	2019.11.05	(주)제이비티	2019.11.07	C-2019-032560	(주)제이비티	100%
2	열차 내 지진 진동 특성 추출 프로그램	2019.10.16	한양대학교에리카 산학협력단	2019.11.14	C-2019-034220	한양대학교에리카 산학협력단	100%
3	기계학습 기반 열차 내 지진 진동 판별 프로그램	2019.11.07	한양대학교에리카 산학협력단	2019.11.14	C-2019-034221	한양대학교에리카 산학협력단	100%
4	360도 영상을 활용한 고속 철도 속의 가상 지진 환경 프로그램	2020.04.30.	한양대학교에리카 산학협력단	2020.10.28	C-2020-038382	김기범, 한상선	100%
5	열차내 진동가속도 계측 데이터 수집 프로그램	2020.10.30	(주)제이티비	2020.11.17	C-2020-042314	(주)제이티비	100%
6	뉴럴 네트워크 기반 열차 내 지진 진동 판별 프로그램	2020.11.11	한양대학교에리카 산학협력단	2020.11.13	C-2020-045121	한양대학교에리카 산학협력단	100%
7	Seismo for Raspberri PI(고속열차 내 지진감시 프로그램)	2021.12.30	(주)제이티비	2022.01.26	C-2022-007114	(주)제이티비	100%
8	JBChaserMonitor(지진계측기 추적 및 제어 앱)	2021.12.30	(주)제이티비	2022.01.26	C-2022-007115	(주)제이티비	100%
9	다중 가속도 센서 데이터를 통한 열차 운행 시 지진 진동 판별 시스템	2022.02.11	한양대학교에리카 산학협력단	2022.03.29	C-2022.014935	고민삼, 김운우	100%

2) 목표 달성 수준

CTE	연구개발목표	달성내용	달성도(%)
A	○ On-board 센서를 활용한 열차 진동하중 및 지진하중 DB 구축 - 열차 진동하중 및 지진하중 계측을 위한 On-Board 센서 개발 - 열차 내 지진 가속도 추정을 위한 교량 및 성토구간 응답 해석 - 궤도-차량 상호작용 분석을 위한 진동대모형 실험 수행 - 열차 진동가속도 및 지진가속도에 대한 DB 구축 - 구축된 DB와 기계학습 알고리즘 및 지진경보 시스템과의 연계방안 수립	① 지진하중 계측기술 개발 - MEMS 센서 기반 가속도 데이터를 수집할 수 있는 저비용 계측기 개발 및 고도화하였으며, 패키징을 통해 계측센서 부착 및 계측을 용이하도록 보완함. ② 지진 가속도 계측을 위한 진동대모형 실험 수행 - 열차 내 가속도 계측 구현 실험을 수행하였으며, 실지진데이터를 적용하여 지진에 의한 열차-궤도 모델의 변형특성 분석 및 고성능 가속도계를 활용하여 데이터를 검증함. ③ 열차 진동가속도DB 구축 및 지진 가속도 DB 구축 - 테스트베드 구간 DB 약 400건, 그외 구간 약 500건 등 총 1,000건의 DB를 구축함. ④ 스펙트로그램분석기법 연구 - 시간에 따른 데이터 특성변화를 분석할 수 있는 시간-주파수 해석기법을 적용하여 해상도 및 해석 시간 차이에 따른 데이터 분석 및 적용성 평가를 통한 최적 기법 도출함. ⑤ 열차 진동 가속도-시간이력에 대한 스펙트로그램분석 수행 - 열차의 횡방향가속도 계측데이터 및 STFT, WT, WVD 분석하여 방법별 특징을 분석하였으며, 지진 가속도와 열차진동 가속도 병합하	100%

		여 지진경보시스템과의 연계방안을 수립함.	
B	○ 열차 진동하중과 지진진동 하중을 구분하는 실용화 단계 기계학습 알고리즘 - 진동 판별 정확도 85% 이상 - 진동 처리 소요 시간/건 1초	① 다중 센서 기반 지진-열차 진동 판별 딥러닝 모델을 통해 진동 판별 정확도 95.24% 달성 - 열차 상시 진동 판별 정확도 99.93% - 열차 내 지진 진동 판별 정확도 100% (PGA 0.1이상), 99.78% (PGA 0.03이상), 81.26% (PGA 0.1 미만) * 열차 운행에 영향을 줄 수 있는 지진은 PGA 0.1이상 ② 다중 센서를 효율적으로 처리하는 기법을 적용하여 빠른 처리 속도 달성 (0.03초/건)	100%
C	○ 주행열차의 지진 위험 여부를 판별하는 위험 모델 - 철도시설물 지진취약도 모델 개발 - 제동거리를 고려한 철도시설물 시스템 피해 확률 모델 개발 - 주행열차의 지진 피해 확률 경보 기준 설정	① 철도시설물 대표 지진취약도 모델 개발 - 철도시설물 중 교량, 터널, 성토 및 절토부를 대상으로 기존 지진취약도 모델의 가중 조합을 통해 대표 지진취약도 모델을 개발함. ② 제동거리를 고려한 철도시설물 시스템 피해 확률 모델 개발 - 고속주행 시 열차 비상제동거리 계산을 완료함. - 제동거리를 시스템으로 간주하여 테스트베드 구간에서의 시스템 피해확률 계산을 완료함. ③ 주행열차의 지진 피해 확률 경보 기준 설정 - 시스템 피해확률과 기존의 열차 서행/정지 기준을 기반으로 최대 가속도에 대한 시스템 피해확률 정보 및 경계 정보 지표를 제안함.	100%
D	○ 진동 감지 후 10초 이내 경보 가능한 열차 서행/정지 경보 시스템 - On-board 지진조기경보시스템 개발	① 철도안전운행 시스템의 열차 운행표를 참조하여 역간 구간 계측 정보 적용 ② 열차간 계측된 지진정보를 기록하고 모니터링할 수 있는 수집서버 시스템의 설계 및 구현 ③ On-board 지진조기경보 시스템을 원격으로 제어하고 모니터링 할 수 있는 UI/UX 시스템 설계 및 구현	100%
E	○ 운행 의사판단 가상현실 시뮬레이터 - 관련 연구 및 에셋 조사 - 360도 열차 주행/지진 영상 데이터베이스 구축 - 가상현실 시뮬레이터 개발	① 관련 연구 및 에셋 조사 - 고속 열차 지진 훈련 시스템과 관련된 국/내외 연구 사례 5개 조사 및 가상현실 시뮬레이터에 사용할 수 있는 관련 에셋 15개를 조사함. ② 360도 열차 주행/지진 영상 데이터베이스 구축 - 한국철도기술연구원 내의 연습 차량 주행 영상을 360도 영상으로 촬영 및 주행 영상 10개/ 지진 영상 10개를 데이터베이스로 구축함. ③ 가상현실 시뮬레이터 개발 - 에셋조사 및 촬영된 360도 영상을 기반으로 가상현실 시뮬레이터를 개발하고 5명의 기관사들에게 사용성 평가를 진행함.	100%

4. 연구개발성과의 관련 분야에 대한 기여 정도

- 기존 고속열차 및 일반열차의 지진경보시스템의 경우 구조물에서 계측된 지진 가속도에 따라 관제실에서 지진 위험을 평가하고, 다시 열차로 지진에 대한 서행/정지 경보를 내리는 환경이었으나, 본 연구는 열차 내에서 자체적으로 지진을 감지할 수 있는 장비를 저비용으로 개발하고 계측된 데이터베이스를 기계학습 기법과 연계하여 지진을 판별하는 모델을 개발하였음. 해당 연구 성과품은 기존 지진 경보 시스템보다 지진 발생 이후 더 즉각적인 대응이 가능하게 해주며, 일반열차와 같이 지진 경보 시스템이 구축되지 않은 상대적으로 열악한 열차 환경에서도 지진의 판별 및 경보가 가능하게 해주어 철도시설물 방재 분야에 획기적인 연구 성과임. 해당 연구 성과를 바탕으로 기 구축된 철도 노선 및 향후 국가철도망구축계획, GTX 사업 등에 정된 사업에서도 실용화가 기대되며, 특히 현재 철도 계측 관련 장비들이 모두 차량 탑재화 되고 있는 실정을 고려하면 해당 연구 성과품은 모듈화하여 철도 운영기관에 납품 및 사업화 가능성이 높음.
- 기존 철도시설물의 지진취약도 모델은 각 시설물에 한정하여 최대가속도 대비 해당 시설물의 피해확률을만 을 제시하였으나, 본 연구는 열차 주행 시 비상 제동 시에도 움직이게 되는 거리를 고려하여 시스템 피해확률을 제시함. 또한 시스템 피해확률을 기존의 열차 서행/정지 기준과 비교하여 더욱 세세한 피해 지표를 제시함.
- 기존 기계학습 기반 지진 탐지 방법은 노이즈가 굉장히 적은 환경에서 수집된 데이터를 바탕으로 연구되어 왔으나, 본 연구는 비교적 노이즈가 큰 열차 운행 상황에서 지진 진동을 판별하는 기술을 개발하여 기존 연구와 차별적이고 도전적인 문제를 다루었음. 또한 다중 센서를 사용하여 판별 모델의 성능을 고도화하고 동시에 여러 데이터를 효율적으로 처리할 수 있는 딥러닝 기법을 적용하여 빠른 속도로 탐지 가능한 기술을 개발하여 실제 열차 운행 상황에 적용 가능한 기술을 개발하였음.
- 기존 연구들에서는 철도 관련 VR은 철도 시설물을 수리하는 작업 및 훈련하는 것에 집중 했지만(Stiles et al., 2018; Randeniya et al., 2019; Yang et al. 2020), 본 연구에서는 열차를 운행하는 기관사를 대상으로 하는 가상현실 시스템을 개발하여 기존 가상현실을 통한 훈련의 대상을 넓힘. 또한 VR 전동회차를 통해서 가상현실을 통한 주행 경험 및 지진 경험을 4D 시스템으로 구현하여 보다 현실감 있는 가상현실 시뮬레이터를 개발함.
- 실시간 운행 중인 고속열차 객실 내에서 발생하는 진동 정보와 위치 및 속도 정보를 수집하고 이를 수집 서버에서 관리하게 하여 열차 기관사 또는 모니터링 작업자가 위험 상황에 미리 조치할 수 있도록 시스템을 개발하였으며, 열차 객실 내에 장착된 지진 진동 계측 SW를 원격으로 통제할 수 있도록 개발하였음. 저가의 장비를 사용하여 가격 경쟁력을 높일 수 있었으며, 연구개발을 통하여 저가의 장비로서도 지진 진동 계측을 수행할 수 있었으며, 위험상황 발생 시 충분히 관계자 및 열차 기관사가 이를 인지할 수 있는 지원 시스템을 개발에 기여하였음.

5. 연구개발성과 관리 및 활용 계획

1) 연구개발성과의 활용방안

- 고정식 지진관측소 미설치 구간에서도 지진을 감지하여 철도변 지진가속도 센서 보다 신속한 대응이 가능하도록 활용
- 열차에서 확장하여 지하철, 고속버스 등 움직이는 객체의 지진 감지 시스템으로 활용
- 고비용의 지진 감지 네트워크 구성이 어려운 국가에서 본 과제에서 개발된 기술을 참고하여 저비용으로 열차 지진 감지 시스템을 구축하는데 활용 가능
- 열차 자체 경보시스템으로 기존 시스템보다 더 신속하고 자세한 경보로 인해 지진에 의한 열차 피해확률을 획기적으로 단축시키는 데 활용
- 다양한 센서 데이터를 입력으로 이상 상태를 탐지하는 문제에 활용
- 스마트 팩토리, 각종 안전 관련 문제에서 이상 상태를 예측 및 진단하는 곳에 활용
- 다중 센서 기기를 사용하는 방법까지 개발을 했기 때문에 각종 센서들(예: 온도, 압력, 전압 등)의 값을 바탕으로 이상 상태를 종합적으로 판단하는 기술로 확장 가능
- 열차 기관사의 지진대응 훈련 및 안전운행 시스템 최적화에 활용

2) 기대효과

○ 기술적 측면

- 본 연구는 기계학습과 빅데이터 기술을 활용하여, 움직이고 있는 철도 차량 안에서 On-board 센서를 이용하여 지진 발생 여부를 파악하고 운행 위험 여부를 파악하는 시스템 개발을 제안함.
- 이는 비용과 지진 경보 발생의 신속성 면에서, 특수한 목적의 지진 검진 시스템의 추가 설치 없이도 저비용의 센서를 활용하여 지진을 탐지하고 위험을 예측한다는 점에서 효율적이며 관련 기술발전의 가능성이 기대됨.
- 기존의 지진 경보 시스템에 더불어 고속열차의 센서를 활용한 클라우드 서비스를 보완적으로 운영함으로써 국가재난안전경보시스템의 정밀화가 기대됨.
- 제안된 시스템 피해확률 계산 프레임워크는 철도 시스템뿐만 아니라 고속도로와 같은 직렬 시스템에도 적용하여 지진에 의한 시스템 피해정도 예측에 활용할 수 있을 것으로 기대됨.
- 저가형 센서 데이터로도 높은 판별 정확도를 달성할 수 있어 고속열차만이 아닌 여러 열차에 적용 가능할 수 있을 것으로 기대되며, 데이터 수집 및 기계학습 모델 생성에 있어 같은 방법론을 열차 뿐 아니라 다른 이동 시설에도 적용할 수 있을 것으로 기대됨.
- 가상현실 시뮬레이션으로 지진 시 기관사대응행동특성 분석 및 열차 운행에의 영향 분석, 더 다양한 환경에서 데이터 수집, 그리고 현업에서 쓰기 위해 서버 구축 등의 효과가 기대됨.
- 개발된 VR 시뮬레이터는 지진뿐만 아니라 철도 운행 중 발생할 수 있는 다양한 사고에 대해서 시뮬레이션하는데 활용될 수 있을 것으로 기대됨.

○ 경제적·산업적 측면

- 최근 몇 년간 국내 지진 발생 횟수 증가 추이를 보이고 있고, 지진으로 인한 피해는 언제 어디서 발생할지 전혀 모르는 상황임.
- 지진 발생시, 갑작스런 산사태, 지반 붕괴, 철로 변형 등 고속열차의 탈선으로 인한 2차 피해가 더 크게 작용할 수 있다는 우려가 존재함.
- 이런 문제점들을 해결하기 위해 열차 내 On-board 센서들을 이용하여 지진 발생 시 신속하게 경보를 생성한다면 각종 산업 및 사회의 지진으로 인한 2차적 피해 및 위험을 미리 대비하는 효과를 기대할 수 있음.
- 구조물, 자동차 등 다른 대상물의 지진조기경보 시스템과 연계하여 재해예방 관련 시장의 발전을 도모하는 효과 또한 기대할 수 있음.

3) 추가연구의 필요성

○ (On-board 센서 관련) 열차 내 설치 및 실용화를 위한 저비용 On-board센서를 개발하고 그 성능을 검증하였으나, 내구성 확보, 전원공급, 데이터 연계방안 등에 대한 추가 연구가 필요함. 최종적으로 과제 성과품의 실용화를 위해 아래와 같은 기술적 사항의 보완이 필요할 것으로 판단됨.

- 내구성 확보 : 최소 10,000시간 이상 연속 계측이 가능한 내구성을 지닌 센서 개발
- 전원공급방법 : 철도 운영기관과의 협의를 통한 열차 내 전원공급 방안 도출 (필요 전원이 낮아 공급에 무리는 없음)
- 데이터 연계방법 : On-board 지진 감지용 라즈베리파이에서는 별도의 통신 모듈이 장착되어 있어 데이터 통신이 가능함. 데이터 통신을 위하여 별도의 통신 서비스(SKT, KT 등)에 데이터 요금제에 가입 후 USIM을 장착하면 저비용으로 데이터 통신 서비스가 가능 함. 별도 LTE 통신망 공유기를 활용한 데이터 전송

- 사구간 GPS 보정방법 : 터널 구간 내 열차 속도를 활용한 실시간 위치 보정 기술 도입

○ (Database 구축) 개발된 On-board 지진 감지 시스템의 대상을 변경하여 일반열차, 지하철 등에서의 유효성을 검증할 필요가 있음. 일반열차, 지하철의 경우 열차의 진동 특성이 고속열차와 상이하며 철도시설물 또한 다르게 구성되어 있으므로 진동 계측, 지진 감지 모델의 유효성 검증, 피해 확률 계산 등의 추가적인 연구가 필요함. 특히 해당 연구 결과의 경우 익산-정읍 구간의 테스트베드 구간에 데이터가 집중되어 있어, 향후 연구성과품의 실용화를 위해 다양한 구간 및 철도 종류에 따른 열차 하중의 데이터베이스 확보가 필요함.

○ (주행열차의 지진시 위험모델) 시스템 피해확률의 정확한 계산을 위해서는 각 철도시설물의 특성거리에

대한 계산이 필요함. 현재 특성거리는 하천제방의 특성거리와 비교하여 보수적으로 선택되었으나, 더욱 정확한 특성거리의 파악을 위해서는 지진파의 상관거리, 지반의 상관거리, 교량 및 터널 등 구조물의 상관거리를 파악해야 함. 이는 지반의 불균질성, 구조물 강도의 불균질성 등에 대한 추가 연구를 필요로 함.

○ (기계학습모델) 현재 기계학습 모델은 열차 상시 진동과 지진 진동을 구분하도록 설계 되었으나, 구체적으로 지진 진동이 어느정도 크기인지까지 판별하도록 개발되지는 못했음. 따라서 현재는 지진 진동 모델이 탐지 시, 그 시점의 진동 크기 값을 다시 계산하여 열차 운영을 결정하게 되는데, 만약 기계학습 모델이 지진 진동 탐지 시 현재 진동의 크기나 열차 운행 타입(정지, 서행 등)을 직접 출력하도록 설계한다면 조금 더 빠르게 대응이 가능할 것으로 보임. 하지만 이러한 연구를 수행하기 위해서는 기계학습 모델 구조가 더 복잡하게 설계되어야 하고, 이에 따라 더 많은 양의 데이터를 수집하는 등의 추가 연구가 필요함.

4) 기술 이전 계획

○ 차량 탑재형 열차 지진 경보 시스템 등에 대하여 한양대학교 에리카 캠퍼스 및 한국철도기술연구원이 공동기관인 (주)제이비티로 기술이전을 추진 중이며 해당 기술이전 계약은 4월 안에 완료할 계획임.

○ 기술 이전 내용을 바탕으로 (주)제이비티는 한국철도공사, 주식회사 에스알, 부산교통공사 등에 기술이전 및 실용화를 추진하고, 해당 과정에서 필요한 운영기관 업무 협의는 한국철도기술연구원에서 협조할 계획임.

○ 해당 개발 기술의 기술 이전 및 실용화를 위해서는 “고속철도 운전취급 규정” 제 39조 지진 발생시 운전 취급 등에 대한 철도 운영기관의 관련 규정에 대한 재개정이 필요함. 해당 연구 성과품에 대한 지속적인 시 운전 및 검증과 함께 제도 개선을 병행하여 연구개발성과품의 기술 이전 및 실용화를 추진할 계획임.

○ 현재 한국철도기술연구원에서 기획 중인 “국민 SOC 안전관리를 위한 재난 상황인지 데이터 연계지원 디지털 플랫폼 개발” 및 “철도 장대 터널 고위험 재난의 이용자 대응 기술 개발”과제에 해당 연구 성과품인 지진 감지 및 대응 기술을 이전 및 적용하여 재난 대응 플랫폼 및 대응 기술 검증 테스트 베드에 적용토록 하겠음.

< 별첨자료 >

별첨 자료

1. 참고문헌

2. 성과점검기준표 및 증빙자료

3. On-board 센서 인증 성적서

4. 자문의견서

5. 시스템 인터페이스 및 테이블 정의서

6. 주관연구기관 자체평가의견서

7. 성과활용보고서

8. 연구개발성과활용계획서

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통과학기술 연구개발사업 ‘300km/h 급 고속열차의 탈선 방지를 위한 차량 탑재(On-board)용 지진 계측 및 10초 이내 지진 조기 경보 기술 응용 단계 연구’ 연구개발과제 최종보고서이다.
2. 이 연구개발내용을 대외적으로 발표할 때에는 반드시 국토교통부(국토교통과학기술진흥원)에서 시행한 국토교통과학기술 연구개발사업의 결과임을 밝혀야 한다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 된다.