

최종보고서(일반과제용)										보안등급	
										일반[✓], 보안[]	
중앙행정기관명	국토교통부				사업명	사업명		국토교통기술촉진연구사업			
전문기관명	국토교통과학기술진흥원					내역사업명		국토교통기술혁신연구 (사회이슈해결 유형)			
공고번호	공고-제02호				연구개발과제번호		21CTAP-C1552137-03				
국가과학기술 표준분류	EI0602		50%	EI0401		30%	EI1102		20%		
연구주제	(대분류) 걱정없는 안심사회			(중분류) 생활안전, 재난재해, 에너지, 주거, 교통			(소분류) 교통안전				
연구개발과제명	국문	철도 터널내 바닥 여굴 채움재에 따른 궤도 진동영향 저감방안 제시									
	영문	Suggestions for concrete slab track vibration influence reduction according to overbreak filling materials in tunnel bottom of railway									
주관연구개발기관	기관명	서울과학기술대학교 산학협력단				사업자등록번호					
	주소	(우)01811 서울 노원구 공릉로 232				법인등록번호					
주관연구책임자	성명	조 국 환				직위		교 수			
	연락처	직장전화					휴대전화				
		전자우편					국가연구자번호				
연구개발기간	전체	2019. 04. 19 - 2021. 12. 31(2년 8.4개월)									
	1년차	2019. 04. 19 - 2019. 12. 31(8.4개월)									
	2년차	2020. 01. 01 - 2020. 12. 31(1년)									
	3년차	2021. 01. 01 - 2021. 12. 31(1년)									
연구개발비 (단위 : 천원)	정부지원 연구개발비	기관부담 연구개발비		그 외 기관 등의 지원금 자발기탁금 기타()				합계		연구개발비 외 지원금	
	현금	현금	현물	현금	현물	현금	현물	현금	현물		합계
총계	600,000	20,010	180,090	-	-	-	-	620,010	180,090	800,100	-
1년차	134,000	4,470	40,230	-	-	-	-	138,470	40,230	178,700	-
2년차	135,000	4,500	40,500	-	-	-	-	139,500	40,500	180,000	-
3년차	331,000	11,040	99,360	-	-	-	-	342,040	99,360	441,400	-
공동연구개발기관 등	기관명	책임자	직위	휴대전화		전자우편		비고			
								역할		기관유형	
공동연구개발기관	(주)대한하이텍건설	이경석	이사					시험		중소기업	
	(주)본이앤씨	이주공	대표이사					계측		중소기업	
위탁연구개발기관											
연구개발기관 외 기관											
연구개발담당자 실무담당자	성명	김 종 원				직위		연 구 원			
	연락처	직장전화					휴대전화				
		전자우편					국가연구자번호				

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

2022년 03월 17일

연구책임자 :

조 국 환

주관연구개발기관의 장 : 서울과학기술대학교 산학협력단 박 근 (직인)

공동연구개발기관의 장 : (주)대한하이텍건설 이 평 환 (직인)

위탁연구개발기관의 장 : (주)본이앤씨 이 주 공 (직인)

국토교통과학기술진흥원장 귀하

< 요약 문 >

사업명		국토교통기술촉진연구사업			총괄연구개발 식별번호		-						
내역사업명		국토교통기술혁신연구			연구개발과제번호		21CTAP-C152137-03						
국가과학기술 표준분류		EI0602	50%	EI0401	30%	EI1102	20%						
총괄연구개발명		-											
연구개발과제명		철도 터널내 바닥 여굴 채움재에 따른 궤도 진동영향 저감방안 제시											
전체 연구개발기간		2019. 04. 19 - 2021. 12. 31(2년 8.4개월)											
총 연구개발비		총 800,100천원 (정부지원연구개발비 : 600,000천원, 기관부담연구개발비 : 200,100천원)											
연구개발단계		기초[] 응용[☒] 개발[] 기타(위 3가지에 해당되지 않는 경우)[]			기술성숙도		착수시점 기준(5) 종료시점 목표(7)						
연구개발과제 유형		지정공모 [☒] 자유공모 []											
연구개발과제 특성		사회이슈해결											
연구 개발 목표 및 내용	최종 목표		- 궤도 진동저감에 적합한 여굴 채움재의 배합설계(안) 및 기준 제시 - 철도 터널내 바닥부에 적용 가능한 보수방안 제시										
	전체 내용		- 기존 터널내 발생한 균열 및 파괴원인 분석 - 여굴 크기와 채움재 및 주변 암반조건에 따른 열차진동특성 분석 - 여굴 채움재에 따른 정적 및 동적특성 분석 및 최적 채움재료 제시 - 현재 균열 발생 구간에 대한 보수방안 제시										
	1년차	목표	- 여굴 채움재료 기준에 대한 문제점 제시 및 기준 분석										
		내용	- 기존 터널내 발생한 균열 및 파괴원인 분석										
	2년차	목표	- 여굴 채움에 따른 터널내 열차진동특성 분석										
		내용	- 여굴 크기와 채움재 및 주변 조건에 따른 열차진동특성 분석										
	3년차	목표	- 궤도 진동저감에 적합한 여굴 채움재의 배합설계(안) 및 기준 제시 - 철도 터널내 바닥부에 적용 가능한 보수방안 제시										
		내용	- 여굴 채움재에 따른 정적 및 동적특성 분석 및 최적 채움재료 제시 - 현재 균열 발생 구간에 대한 보수방안 제시										
연구개발성과		- 궤도 진동저감에 적합한 여굴 채움재의 배합설계(안) 및 기준 제시 - 철도 터널내 바닥부에 적용 가능한 보수방안 제시											
연구개발성과 활용방안 및 기대효과		(활용계획) - 국내 여굴관련 기준 제·개정(안) 도출 - 균열이 발생한 운행 중인 구간에 대한 보수·보강 실시 - 향후 시공될 철도 터널내, 경제적 바닥부 여굴 채움재로 활용 (기대 효과) - 기존 철도 터널 하부에 적용 가능한 보수방안(방법) 확보 - 경제적이고 안전한 여굴 채움재 제시로 기존 콘크리트채움 대비 건설비 절감 - 열차진동으로 인한 문제(궤도틀림 등)를 방지하여 안전한 철도운행 가능											
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
		2	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
연구시설·장비 종합정보시스템 등록 현황		구입기관	연구시설· 장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	ZEUS 등록번호			
		-	-	-	-	-	-	-	-	-			
국문핵심어 (5개 이내)		철도 터널		여굴		채움재		궤도 진동		주행안정성			
영문핵심어 (5개 이내)		Railway Tunnel		Overbreak		Filling Material		Track Vibration		Running Stability			

< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요	01
2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행내용	07
3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도	100
4. 연구개발성과 및 관련 분야에 대한 기여 정도	107
5. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획	108
6. 참고 문헌	109

별첨자료(성과 증빙자료 등)

1. 연구개발과제의 개요

1) 연구개발과제의 최종 목표

(1) 최종 목표

- 궤도 진동 저감에 적합한 여굴 채움재의 배합설계(안) 및 기준 제시
- 철도 터널내 바닥부에 적용 가능한 보강방안 제시

(2) 세부 목표

가. 총괄

	자료조사 및 분석	여굴 크기와 채움재 및 주변 암반 조건에 따른 열차진동특성 분석	채움재 배합설계(안) 및 기준 제시		시험·시공을 통한 보강방안 제시
			채움재 정·동적 물성 평가	수치해석을 통한 터널 바닥 진동특성	
1차년도	· 국내외 여굴처리 방안 검토 및 분석 · 국내 여굴처리 구간 현황 검토 및 문제점 분석	· 현장계측(Ⅰ)(수서·평택) - 사운딩기법 개발 - GPR탐사 실시 - 도상가속도 등 측정	· 정동적 평가(Ⅰ) (시멘트계) - 공시체 제작 - 일축 및 Cyclic Loading Test		
2차년도		· 현장계측(Ⅱ)(강릉선) - 사운딩기법 개발 - GPR탐사 실시 - 도상가속도 등 측정	· 정동적 평가(Ⅱ) (우레탄계) - 공시체 제작 - 일축 및 Cyclic Loading Test	· 현장계측 결과와 실내 시험 및 시험·시공에 의한 물성치 활용 · 현장계측&수치해석 비교 분석	· 채움재별 현장 시험·시공 실시 - 현장적용성 평가 - 경제성 평가 - 시주(Sampling) · 현장계측(Ⅲ)(시험·시공 구간) - 구간별 진동특성 측정 및 분석(검증)
3차년도			· 정동적 평가(Ⅲ) (시멘트&우레탄) - Sampling이용 - 일축 및 Cyclic Loading Test	· 여굴 깊이 및 주변 암반 조건 고려 · 채움재에 따른 진동특성 분석 및 고찰	

나. 1차년도

① 개발목표

- 주관연구기관(서울과학기술대학교): 자료조사 및 분석, 여굴 크기와 채움재 및 주변 암반 조건에 따른 열차진동특성 분석
- 공동 참여기관 1(대한하이텍 건설): 채움재 정적 및 동적 물성평가(시멘트계)
- 공동 참여기관 2(본이앤씨): 터널 바닥 여굴 정도에 대한 정량적 평가기법 개발

② 개발 내용 및 범위

서울과학기술대학교	(주)대한하이텍건설
자료조사 및 분석	채움재 정적 및 동적 물성 평가
국내외 여굴처리 방안 검토 및 분석 국내 여굴처리 구간 현황 검토 및 문제점 분석  	정적 및 동적 평가(Ⅰ) : 시멘트계 공시체 제작, 일축 및 Cyclic Loading Test 등 실시  
여굴 크기와 채움재 및 주변 암반 조건에 따른 열차진동특성 분석	
현장계측(Ⅰ) (수서~평택 고속철도) 사운딩개발&GPR탐사, 레일&도상 가속도 등 측정  (주)본이앤씨 사운딩개발 : 터널 바닥 여굴 정도에 대한 정량적 평가기법 개발	

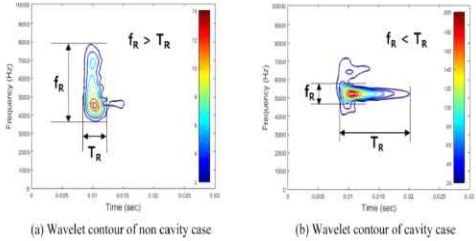
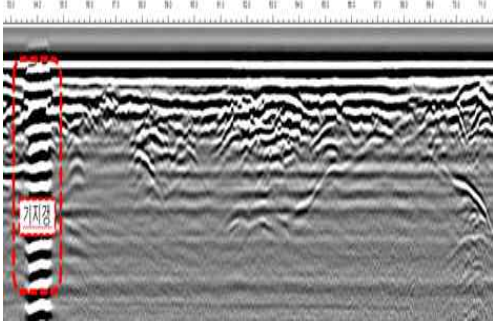
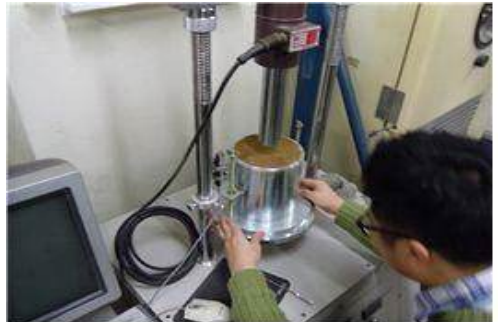
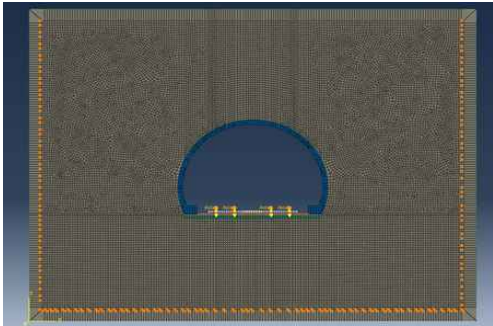
1
차
년
도
(8.4개월)

다. 2차년도

① 개발목표

- 주관연구기관(서울과학기술대학교): 여굴 크기와 채움재 및 주변 암반 조건에 따른 열차진동특성 분석, 수치해석을 통한 터널 바닥 진동특성 분석
- 공동 참여기관 1(대한하이텍 건설): 채움재 정적 및 동적 물성평가(우레탄계)
- 공동 참여기관 2(본이앤씨): 터널 바닥 여굴 정도에 대한 정량적 평가기법 개발

② 개발 내용 및 범위

서울과학기술대학교	(주)대한하이텍건설
여굴 크기와 채움재 및 주변 암반 조건에 따른 열차진동특성 분석	채움재 정적 및 동적 물성 평가
현장계측(Ⅱ) (강릉선) 사운딩개발&GPR탐사, 도상 가속도 등 측정  (a) Wavelet contour of non cavity case (b) Wavelet contour of cavity case (주)본이앤씨 사운딩개발 : 터널 바닥 여굴 정도에 대한 정량적 평가기법 개발 	정적 및 동적 평가(Ⅱ) : 우레탄계 공시체 제작, 일축 및 Cyclic Loading Test 등 실시  
수치해석을 통한 터널 바닥 진동특성 분석	시험시공을 통한 보강방안 제시
현장계측 결과와 실내 시험에 의한 물성치 활용 현장계측 및 수치해석 비교분석 등 	채움재별 현장 시험시공 실시 현장적용성/경제성/안정성(Sampling) 평가 

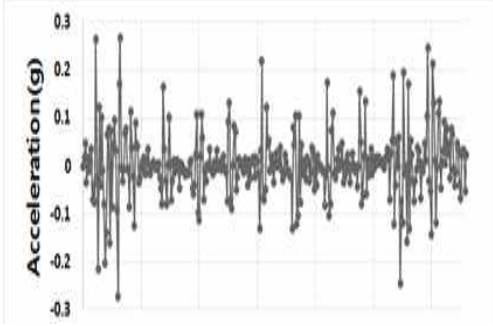
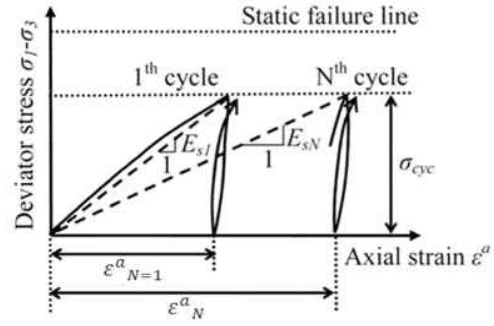
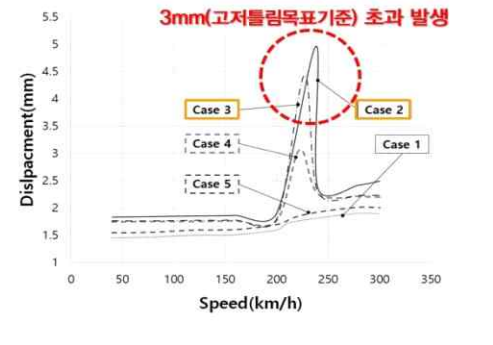
2
차
년
도
(12
개월)

라. 3차년도

① 개발목표

- 주관연구기관(서울과학기술대학교): 시험·시공을 통한 보강방안 제시, 수치해석을 통한 터널 바닥 진동 특성 분석, 배합설계(안) 및 기준과 보강방안 제시
- 공동 참여기관 1(대한하이텍 건설): 채움재 정적 및 동적 물성평가(Sampling)
- 공동 참여기관 2(본이앤씨): 배합설계(안) 및 기준과 보강방안 제시

② 개발 내용 및 범위

서울과학기술대학교	(주)대한하이텍건설
시험·시공을 통한 보강방안 제시	채움재 정적 및 동적 물성 평가
현장계측(Ⅲ) (시험·시공 구간) 구간별 진동특성 측정 및 분석(검증)	정적 및 동적 평가(Ⅲ) : 시멘트&우레탄 Sampling, 일축 및 Cyclic Loading Test 등 실시
 	 
수치해석을 통한 터널 바닥 진동특성 분석	
시험·시공에 의한 물성치 활용 채움재에 따른 진동특성 분석 및 고찰	
	
배합설계(안) 및 기준과 보강방안 제시	
채움재 배합설계(안) 및 기준 제시, 보강방안(방법) 제시	

3
차
년
도
(12
개월)

2) 연구개발과제의 년차별 목표

○ 국내 철도 터널 바닥부 여굴 채움재료에 대한 명확한 기준이 제시되어 있지 않으며, 각 (시멘트계/우레탄계) 재료별 공시체 제작, 정적&동적 물성치 측정을 위한 실내시험과 채움재별 물성치를 활용하여 열차주행에 따른 바닥부의 진동특성 분석을 위한 수치해석을 실시하여 궤도 진동저감에 적합한 여굴 채움재 배합설계(안) 및 기준을 제시하고자 하였다.

○ 국내에서는 아직까지 철도 터널 바닥부 보수방안에 대한 시공사례와 이에 대한 연구는 미흡한 실정이며, 여굴 채움재 배합설계(안)를 토대로 실제 현장에서 시험·시공을 실시하여 최적의 보수방안을 도출하고자 하였다.

구분	연구개발목표	핵심 연구개발성과 (연구개발성과물)	현재 국내·외 기술수준	연구개발 목표치	목표치 설정 근거	가중치 (%)
1년차 (2019)	국내외 여굴처리 방안 검토 및 분석 국내 여굴처리 구간 현황 검토 및 문제점 분석	자료조사 및 분석 (보고서)	-	1건	-	5%
	수도권 고속철도 터널내 레일&도상 등 진동 및 하중전달 특성 및 분석	현장계측	-	2건	-	7.5%
	(시멘트계)공시체 제작 및 실내시험 실시	실내시험	-	10건	-	5%
2년차 (2020)	강릉선 고속철도 터널내 레일&도상 등 진동 및 하중전달 특성 및 분석	현장계측	-	2건	-	7.5%
	(우레탄계)공시체 제작 및 실내시험 실시	실내시험	-	10건	-	5%
	현장계측 결과와 실내시험에 의한 물성치를 활용하여 채움재에 따른 진동특성 분석 및 고찰	수치해석	-	2건	-	7.5%
3년차 (2021)	시험시공에 의한 Sampling 실내시험 실시	실내시험	-	10건	-	5%
	시험시공에 의한 물성치를 활용하여 채움재에 따른 진동특성 분석 및 고찰	수치해석	-	2건	-	7.5%
	채움재 배합설계 및 기준 제시	배합설계(안) 및 기준 (보고서)	-	1건	-	15%
	철도 터널 바닥부에 적용가능한 보수방안 제시	시험시공	-	2건	-	20%
		특허 출원 및 등록	-	1건	-	15%

3) 연구개발과제의 년차별 목표 달성 정도

○ 년차별 목표치에 대한 달성 정도를 확인하였으며, 모든 연구개발 목표치에 달성되었다.

구분	연구개발목표	핵심 연구개발성과 (연구개발성과물)	연구개발 목표치	목표치 달성치(여부)	비고
1년차 (2019)	국내외 여굴처리 방안 검토 및 분석 국내 여굴처리 구간 현황 검토 및 문제점 분석	자료조사 및 분석 (보고서)	1건	1건(달성)	
	수도권 고속철도 터널내 레일&도상 등 진동 및 하중전달 특성 및 분석	현장계측	2건	3건(달성)	
	(시멘트계)공시체 제작 및 실내시험 실시	실내시험	10건	36건(달성)	
2년차 (2020)	강릉선 고속철도 터널내 레일&도상 등 진동 및 하중전달 특성 및 분석	현장계측	2건	2건(달성)	
	(우레탄계)공시체 제작 및 실내시험 실시	실내시험	10건	28건(달성)	
	현장계측 결과와 실내시험에 의한 물성치를 활용하여 채움재에 따른 진동특성 분석 및 고찰	수치해석	2건	2건(달성)	
3년차 (2021)	시험시공에 의한 Sampling 실내시험 실시	실내시험	10건	28건(달성)	
	시험시공에 의한 물성치를 활용하여 채움재에 따른 진동특성 분석 및 고찰	수치해석	2건	2건(달성)	
	채움재 배합설계 및 기준 제시	배합설계(안) 및 기준 (보고서)	1건	1건(달성)	
	철도 터널 바닥부에 적용가능한 보수방안 제시	시험시공	2건	2건(달성)	
		특허 출원 및 등록	1건	1건(달성)	

2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행 내용

1) 여굴 처리방안 관련 국내외 기준 검토

- 터널 굴착시 발생하는 여굴에 관하여 국내외 설계기준에서는 여굴두께 및 처리방안 등을 제시하고 있다. 본 장에서는 국내외 설계기준 내 여굴에 대한 기준 흐름 및 처리방안을 검토하고자 한다.

(1) 국내 여굴 처리방안 기준

- 국내 터널 여굴 관련 기준은 철도설계지침 및 편람, 시방서 및 건설공사 표준품셈 등에 명시되어 있으며, 이와 같은 내용을 정리하면 다음과 같다.

가. 철도설계지침 및 편람(KR Code)

- 국내 철도설계지침 및 편람에서는 여굴에 관련한 설계기준이 2004년부터 2021년까지 지속적으로 변경됨에 따라 터널 설계기준 현황 및 변경사유를 검토하였다.
- 2004년도에 개정된 철도설계편람에서는 건설교통부 표준품셈 기준으로 바닥 및 인버트 여굴두께를 10~15cm 고려하였으나, 공동구 상향 등으로 2011년에 터널 표준단면이 개정되면서 여굴두께에 대한 고려사항이 삭제되었다.
- 2012년부터 설계기준 체계 전면개정으로 인해 철도설계지침 및 편람 KR C-12070에 수록되었으며 2014년도부터 시공사에 대한 애로사항 및 공사비 부족 등의 문제로 여굴에 대한 문제를 수렴하여 두께를 10cm까지 고려하였다. 이후 국가철도공단 자체연구 수행을 통하여 바닥부 여굴에 대하여 15cm의 여굴두께를 고려하며 콘크리트 18MPa로 채우도록 명시하였다.

① 철도설계편람(터널편, 2004)

- 관련기준 : 제7장 굴착 및 계측 / 7.2 굴착공법 / 7.2.3 여굴 / (3) 여굴에 관한 규정 및 허용기준
- 바닥 및 인버트 여굴두께 : 10~15cm 고려

제5편 시공
건교부 표준품셈에 명시된 터널 암뚫기 여굴량 표준 (바닥 및 인버트 : 10~15cm)

② 철도설계편람(노반편, 2011)

- 관련기준 : 제10장 터널 / 10.9 굴착 및 계측)에서 “10.9.2 굴착공법 / (3) 여굴 / ③ 여굴에 관한 규정 및 허용기준
- 바닥 및 인버트 여굴두께 : 고려하지 않음.

제10장 터널
터널 바닥면의 여굴두께는 고려하지 않음을 원칙으로 하며, 고려하는 경우는 바닥 및 인버트의 버력을 제거하여 콘크리트 등으로 채우는 경우에 한하며 이 경우는 암질 및 현장 여건에 따라 별도로 정하여 적용한다.

③ 철도설계지침 및 편람(KR C-12070, 2014)

- 관련기준 : 2. 굴착공법 / 2.3 여굴 / 2.3.3 여굴에 관한 규정 및 허용기준
- 바닥 및 인버트 여굴두께 : 10cm 고려

KR C-12070 굴착
터널 바닥면의 여굴두께는 자갈도상은 고려하지 않고, 바닥버력을 제거하여 콘크리트로 채우는 콘크리트 도상구조와 인버트 구간에 한해 적용한다. 바닥부는 콘크리트 18MPa로 채우며, 인버트 구간은 암질 및 현장여건에 따라 별도로 정하여 적용한다.

④ 철도설계지침 및 편람(KR C-12070, 2017)

- 관련기준 : 2. 굴착공법 / 2.3 여굴 / 2.3.3 여굴에 관한 규정 및 허용기준
- 바닥 및 인버트 여굴두께 : 15cm 고려

KR C-12070 굴착					
터널 바닥면의 여굴두께는 자갈도상은 고려하지 않고, 바닥버력을 제거하여 콘크리트로 채우는 콘크리트 도상구조와 인버트 구간에 한해 적용한다. 바닥부는 콘크리트 18MPa로 채우며, 인버트 구간은 암질 및 현장여건에 따라 별도로 정하여 적용한다.					
구분			천장부	측벽부	바닥부
여굴두께 (cm)	발파 구간	TYPE-1,2	10	10	15
		TYPE-3	15	15	15
		TYPE-4,5,6	20	20	15
	기계굴착 구간		70	70	

나. 관련 시방서

- 국내시방서의 경우 표준시방서, 국가철도공단, 고속도로공사 시방서를 조사하였으며, 여굴 처리방법으로 여굴 발생 부위에 고압살수 등으로 깨끗하게 제거한 후 채움 및 버림 콘크리트로 타설하도록 명시되어 있다.

① 표준시방서(KCS)

- 관련기준 : 3.시공 / 3.2 작업준비
- 관련내용 : 여굴 발생부위를 채움 콘크리트로 타설함.

배수 및 방수(KCS 27 50 05 : 2016)	
(9)	콘크리트라이닝의 기초가 되는 터널하부와 우각부에 쌓인 슬러지는 깨끗이 제거하여야 한다.
(10)	여굴의 발생부위는 반드시 채움 콘크리트를 타설하여 면정리를 하여야 한다.

② 국가철도공단 전문시방서(KRACS)

- 관련기준 : 4.터널굴착 / 4.3 시공 / 4.3.3 발파굴착 / (3) 발파 및 점화
- 관련내용 : 터널 하부 여굴 발생시 버림 콘크리트 또는 동등 이상의 재료로 채우도록 명시됨.

터널공사(KRACS 47 10 70 : 2018)	
⑥	터널하부에 과다굴착으로 인한 여굴이 발생하였을 경우에는 고압살수 등으로 깨끗이 청소한 후 버림 콘크리트 또는 동등 이상의 재료로 채워야 한다.

③ 고속도로공사 전문시방서(EXCS)

- 관련기준 : 3.시공 / 3.2 방수시설 / 3.2.2 사전준비
- 관련내용 : 여굴 발생부위를 채움콘크리트로 타설함.

배수 및 방수(EXCS 27 50 05 : 2018)	
(4)	여굴 발생부위는 원칙적으로 채움 콘크리트를 타설하여 면정리를 하여야 한다. 다만, 지반조건에 따라 다른 재료를 사용할 경우 침하, 지지력 등 구조적인 안정성을 확보할 수 있는 시공계획을 수립하여 공사감독자의 사전승인을 받은 후 시행할 수 있다.

다. 건설공사 표준품셈 및 타기관 기준

① 건설공사 표준품셈

- 건설공사 표준품셈 기준의 경우 2005년부터 현재까지 건설공사 표준품셈(토목, 건축, 기계설비)의 “터널 여굴량”에는 바닥 및 인버트의 여굴두께는 10~15cm를 표준으로 한다고 명시되어있다.

건설공사 표준품셈(토목, 건축, 기계설비)
“터널 여굴량”에는 바닥 및 인버트의 여굴두께는 10~15cm를 표준으로 한다. “바닥 및 인버트” 구간은 ‘버력을 제거한 후 콘크리트 등으로 채우는 경우에 적용하며, 암질에 따라 달리 적용할 수 있다. 다만, 수로터널 등 단면이 적은 경우는 5cm이내에서 현장 여건에 따라 적용할 수 있다.’

② 타기관 기준 - 한국도로공사

- 한국도로공사는 2012년 ‘터널 공동구 기초부 설계 현실화 방안’에 대하여 터널 공동구 하부 여굴채움의 적정성을 연구하였으며, 15cm가 여굴두께를 고려할 것을 명시함에 따라 본 공사에서는 15cm의 여굴채움 콘크리트를 5종 콘크리트($f_{ck}=15\text{MPa}$)을 설계에 반영하고 있다.

터널 공동구 기초부 설계 현실화 방안(2012.10)
공동구 하부에 15cm의 여굴채움 콘크리트(5종 콘크리트, $f_{ck}=15\text{MPa}$) 수량을 설계 반영하고 있다.

(2) 국외 여굴 처리방안 기준

- 국외 터널 여굴 관련 기준에 대하여 조사한 결과, 일본토목학회 및 미연방 도로청에서 발간한 설계기준에서 여굴 관련 내용이 확인되었다. 국외 설계기준의 경우 여굴 처리방법 보다는 여굴 발생을 최소화하기 위해 조절발파를 할 것으로 명시하고 있다.

가. 일본토목학회(터널표준시방서-산악공법)

- 관련기준 : 제5장 굴착 / 제1절 통척 / 제99조 여굴
- 관련내용 : 터널 굴착시 여굴을 가능한 감소시킬 수 있어야 하며, 이를 위해 조절발파의 적용 및 굴착 단면 마킹 시스템 등의 방안이 적용

제5장 굴착
굴착에서는 여굴을 가능한 한 감소시킬 수 있도록 노력해야 한다. (해설) 굴착에서는 굴착면의 요철과 지보공 설치 시의 시공 여유, 시공 오차 등을 고려하여 부득이하게 설계 굴착 단면보다 크게 굴착하게 된다. 이를 여굴이라 한다. 여굴의 양은 암질과 균열 상황, 굴착방식 등에 따라 다르나, 여굴이 많으면 버력 처리와 라이닝 등에 여분의 비용이 들어갈 뿐 아니라 국부적 응력 집중 등의 문제가 발생하므로 가급적 감소시켜야 한다. 또한 막장의 안정성이 떨어지는 지산에서는 보조공법으로 선수공법 등을 사용하는 경우가 있는데, 이러한 시공으로 여굴이 증대하기도 하므로 주의해야 한다. 발파 굴착에서는 단면의 크기, 형상, 굴착 공법에 따라 암질, 균열, 용출수, 풍화 정도 등의 지반조건을 충분히 고려하여 발파 계획을 실행하는데, 여굴을 적게 하려면 천공의 정밀도를 충분히 확보할 수 있는 천공 설비 등을 사용하는 동시에 스무스 블라스팅(조절 발파) 등의 방법을 적용해야 한다. 또한 기계 굴착이라 해도 여굴은 피할 수 없으므로 작업원이 충분히 숙련되게 해 여굴을 되도록 감소시켜야 한다. 최근에는 측량 관리, 여굴 관리 방법으로 레이저 광선을 이용한 굴착 단면 마킹 시스템과 논프리즘 단면측정기 등도 이용되고 있다.

나. 미연방도로청(Rock Blasting and Overbreak Control)

- 관련기준 : 제8장 여굴제어 / 8.1 조절발파
- 관련내용 : 터널 굴착시 여굴 발생량의 감소를 위하여 조절발파공법을 제안

제8장 여굴 제어	
굴착한계 내에서의 여굴의 발생을 제어하기 위하여 몇몇의 폭파 기술이 개발되었다. 실무자는 기술을 선정하기 전, 제어 기술의 최종 목적을 결정하여야 한다. 일부 기술은 암석 덩어리 내의 안정성에 대해 전혀 고려하지 않은 채로 미관적인 벽체 구조물을 조성하는데 사용된다. 그 외의 기술들은 안정성을 주로 고려하여 발파 전에 적용되고 있다. 위의 기술들은 비록 미관적인 벽체를 조성하지 못하는 대신 안정성 관점에서 개발되었으므로 적용시 암석의 안정성이 고려된다. 여굴 관리 공법으로는 다음의 세 가지 공법으로 분류할 수 있다; 프리스플리팅, 트림(쿠션) 블라스팅, 라인 드릴링.	

○ 여굴 처리방안 관련 국내외 기준 검토 소결

- 국내 설계기준의 경우 철도설계 지침 및 편람, 시방서 등을 검토하였으며, 국외설계기준의 경우 일본의 표준시방서(산악공법) 및 미국 미연방도로청 설계기준을 검토하였다.
- 국외 설계기준의 경우 일본 및 미국에서는 표 2.2와 같이 여굴 처리방안 보다는 여굴 발생을 최소화하기 위해 조절발파를 중심으로 제시하고 있으나, 열차고속화 등으로 정량적 기준이 세분화된 국내 설계기준의 경우, 여굴 처리방안으로 표 1.1과 같이 허용 여굴두께(15cm) 이내에 콘크리트로 채우도록 명시되어있다.
- 반면 국내 여굴 처리방안은 여굴두께를 15cm까지 허용하고 있으나 기준(15cm)을 초과하여 여굴이 발생할 경우, 이에 대한 별도의 채움재료 및 방안에 대한 기준은 별도로 명시되어 있지 않다. 따라서 다음 장에서는 15cm 이상의 과굴착이 발생한 구간을 대상으로 여굴 처리방법을 조사하고 그에 따른 문제점 및 원인을 검토하고자 한다.

표 1.1 터널 바닥부 여굴 관련 기준(국내)

항 목	철도설계지침 및 편람				시 방 서			건설공사 표준품셈	타기관	
	철도설계편람		철도설계지침 및 편람		표준 시방서	국가철도 전문시방서	고속도로 공사 전문 시방서		한국 도로 공사	서울 지하철 및 도시철도
	터널편 (2004)	노반편 (2011)	(KR C-12070, 굴착)							
			(2014)	(2017)						
두 께 (cm)	10~15	고려하지 않음	10	15	-	-	-	10~15	15	-
재 료	-	콘크리트	콘크리트	콘크리트	콘크리 트	버림콘크리 트 또는 동등 이상의 재료	콘크리트	콘크리트	콘크리트	-
강도	-	-	18MPa	18MPa	-	-	-	-	15MPa	-

2) 현장 지반상태 조사 및 진동가속도 계측을 통한 열차진동특성 분석

- 수도권 고속철도 00 구간의 경우, 시공성 문제(주 배수관 변경) 및 과다굴착 등을 이유로 배수를 위한 트렌치 형식의 잡석 채움이 기존 설계보다 과다하게 시공되었으며, 강릉선 00 구간의 경우 과굴착 구간이 다수 발생되어 10cm 이상의 범위는 빈배합 콘크리트(5MPa)로 시공하였다. 이와 같이 수도권 및 강릉선 일부 구간에서는 터널 하부 여굴 부분을 잡석 및 빈배합 콘크리트 타설함에 따라 운행선 구간에서 궤도 및 공동구 균열이 발생하므로 승차감 불량, 열차 운행속도 감소 등의 문제점을 겪고 있다. 따라서 본 연구에서는 해당 구간의 지반상태 조사 및 진동가속도 계측을 수행하여 열차 운행에 따른 터널 진동특성을 분석하고자 하였다.

(1) 현장계측 구간 현황

- 본 장에서는 수도권 고속철도 00 구간 및 강릉선 구간에서 발생한 문제점을 근거로 터널의 동적거동을 분석하기 위해 15cm 이상의 과굴착이 발생한 구간을 대상으로 여굴처리방법을 조사하고, 해당 구간의 설계 조건을 고려하여 표 2.1과 같이 분류하였다. 총 5개 구간의 현장 지반조사(GPR 및 음향기법)를 통해 터널 하부 여굴 상태를 검토하였으며, 터널 하부 위치(도상/보조도상/공동구)별 진동가속도를 계측함에 따라 여굴 상태와 터널 하부에 전달되는 진동 전파형태의 관계를 검토하고자 하였다.

표 2.1 계측 구간 분류표

구분	배수구 위치	인버트 설치 유무
수도권 A (인버트)	중앙배수 (인버트 하부에 위치)	설치
수도권 B (측면배수)	측면배수	미설치
수도권 C (중앙배수)	중앙배수	미설치
강릉선 A (중앙배수)	중앙배수	미설치
강릉선 B (중앙배수)	중앙배수	미설치

가. 터널 하부 설계 개요

① 수도권 A(인버트)

- 본 구간은 터널 하부를 인버트로 폐합하였으며 그림 2.1과 같이 콘크리트 라이닝부 안쪽을 콘크리트 ($f_{ck}=27\text{MPa}$) 채움으로 시공하였다. 주배수관은 인버트 하부에 설치하도록 설계되었다.

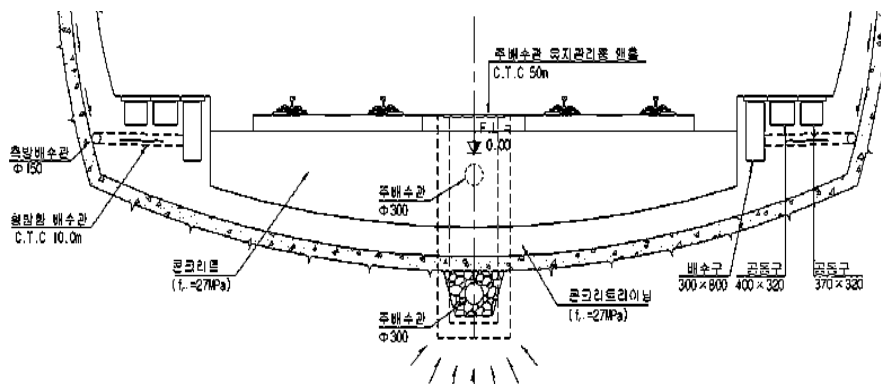


그림 2.1 인버트 구간 터널 하부 단면도

② 수도권 B(측면배수)

- 본 구간은 측면 배수설계로 그림 2.2와 같이 주배수관이 양단 끝에 위치하도록 설계되었으며, 보조도상 콘크리트 및 도상 중앙부 콘크리트 채움 구간은 상·하선 분리 시공되었다.

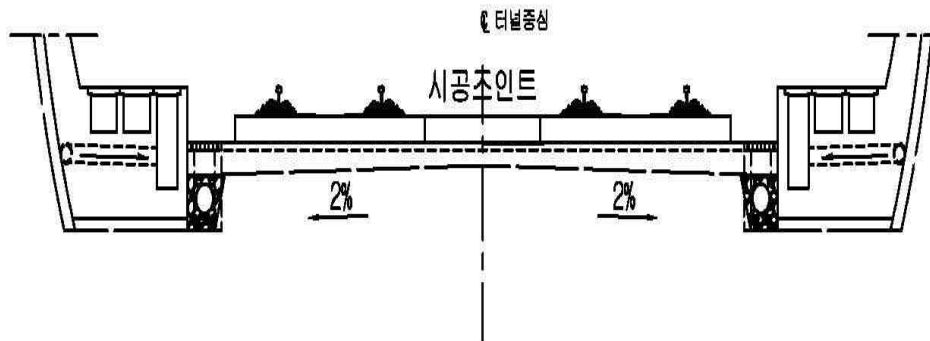


그림 2.2 수도권 B 구간 터널 하부 단면도

③ 수도권 C(중앙배수)

- 본 구간은 중앙 배수설계로 그림 2.3과 같이 주배수관이 도상 중심에 위치하도록 설계되었으며, 보조도상 콘크리트 및 도상 중앙부 콘크리트 채움 구간은 전폭 시공되었다.

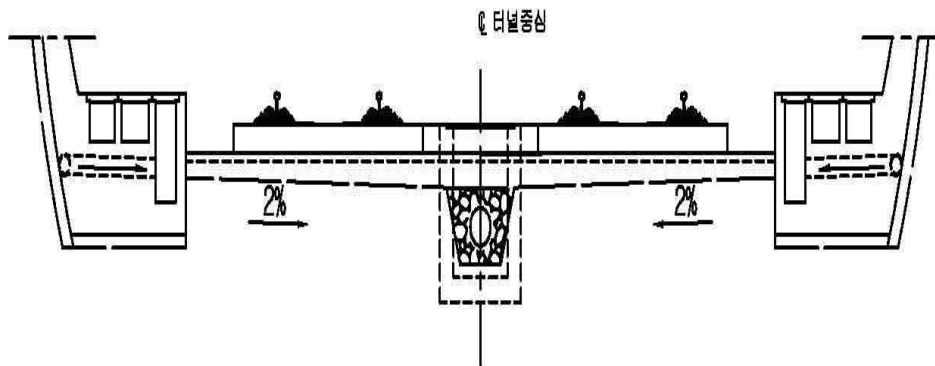


그림 2.3 수도권 C 구간 터널 하부 단면도

④ 강릉선 A, B(측면배수)

- 본 구간은 중앙 배수설계로 그림 2.4와 같이 주배수관이 도상 중심에 위치하도록 설계되었으며, 보조도상 콘크리트 구간은 일체 시공되었으나 중앙부 콘크리트 채움 구간은 시공되지 않았다.

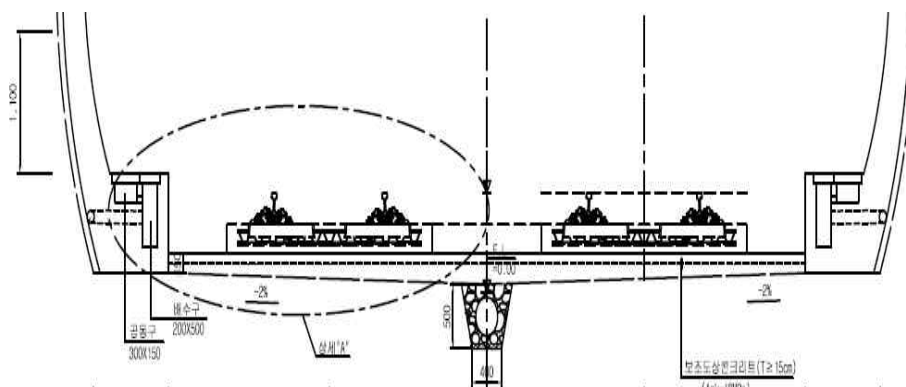


그림 2.4 강릉선 A, B 구간 터널 하부 단면도

나. 바닥부 여굴 발생 현황

- 바닥부 여굴두께 조사 결과, 표 2.2와 같이 나타났으며 인버트 구간의 경우 최소 100cm 깊이까지 콘크리트($f_{ck}=28\text{MPa}$)로 타설함에 따라 별도의 여굴 현황조사는 수행하지 않았다. 수도권 고속철도의 경우

터널 굴착에 따른 최대 여굴두께가 A 구간 약 60cm, B 구간 90cm로 나타났다. 강릉선의 경우 모든 계측 구간에서 터널 굴착에 따른 최대 여굴두께는 약 30cm로 나타났다.

표 2.2 구간별 바닥부 여굴

구분	발생 여굴두께(cm)
수도권 A (인버트)	-
수도권 B (중앙배수)	60
수도권 C (측면배수)	90
강릉선 A (중앙배수)	30
강릉선 B (중앙배수)	30

- 조사된 여굴 현황과 달리 시공과정에서 슬라임 등을 제거하고 배수구 및 공동구 시공 중 파쇄대 지반 및 발파로 인해 암을 제거하는 과정으로 인하여 실제 여굴두께는 더 깊을 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 선정된 계측 구간 내 지반조사를 수행하며 정확한 바닥부 상태 조사를 검토하고자 하였다.

다. 현장계측 위치 선정

- 계측 구간은 인버트를 제외한 모든 구간에서 도상부터 공동구 벽체까지 전체적으로 균열이 발생한 상태였으며, 수도권 고속철도의 경우 보조도상 시공조인트를 기점으로 상·하선 방향 궤도 전체가 반복되어 깨지는 형태가 나타났다. 이에 따라 변상이 과다발생한 구간 중심으로 지반조사 및 진동가속도 계측 위치를 선정하였다.

① 수도권 A(인버트)

- 본 계측 구간은 인버트 하부 중앙배수 설계 구간으로 주변의 궤도 변상 유무를 조사해본 결과, 그림 2.5와 같이 도상에서부터 공동구까지 균열 및 공동구 구조물 탈락 등의 현상은 나타나지 않았다.



그림 2.5 궤도 및 공동구 상태(수도권 A)

- 인버트 구간은 보조도상 하부 깊이 약 1m 이상 콘크리트로 타설하며, 천단부의 라이닝을 하부 인버트까지 연결함에 따라 터널구조를 폐합하는 형태를 가지고 있다. 따라서 상·하선 관계없이 열차운행에 따른 터널 하부의 진동전파 경향은 궤도 하부와 암반의 일체거동으로 인해 안정적인 감쇠현상이 나타날 것으로 판단된다. 따라서 그림 2.6과 같이 상선에서 30m간격을 두고 2지점을 계측위치로 선정하였다.

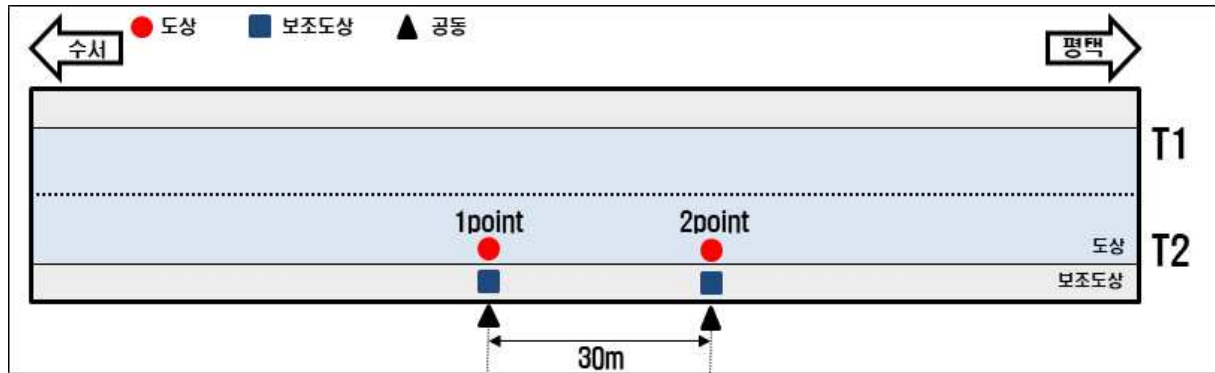


그림 2.6 수도권 A(인버트) 계측 위치

② 수도권 B(측면배수)

- 본 계측 구간은 측면배수 설계 구간으로 주변의 궤도 변상 유무를 조사해본 결과, 그림 2.7과 같이 공동구 탈락 및 도상 균열이 발생하는 등 내구성 저하가 심각한 상태로 조사되었다. 주요 균열 형태로는 공동구의 횡방향 균열을 다수 분포되었으며 보조도상 시공조인트를 중심으로 궤도 하부 전체에 균열이 발생한 것으로 나타났다.



그림 2.7 궤도 및 공동구 상태(수도권 B)

- 측면배수로 설계된 수도권 A 구간은 시공 특성상 중앙콘크리트 부분에 시공조인트가 발생함에 따라 상·하선 도상이 개별거동할 것으로 예상된다. 따라서 상·하선 중 공동구 파괴가 일어난 하선을 계측 구간으로 선정하였으며, 해당 구간의 열차운행에 따른 터널 하부의 진동전파 경향을 검토하고자 그림 2.8과 같이 보조도상 시공조인트 기점으로 좌우 약 1m, 15m 간격으로 총 4지점을 계측 구간으로 선정하였다.

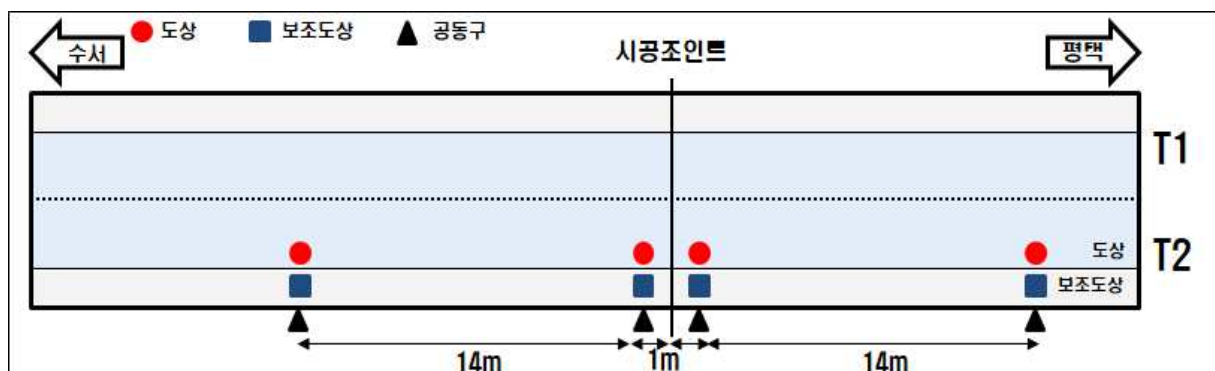


그림 2.8 수도권 B(측면배수) 계측 위치

③ 수도권 C(중앙배수)

- 본 계측 구간은 중앙배수 설계 구간으로 주변의 궤도 변상 유무를 조사해본 결과, 그림 2.9와 같이 공동구 탈락 및 도상 균열이 발생하여 긴급 유지보수를 시행한 것으로 확인되었다. 주요 균열 형태로는 수도권 B 구간과 유사하게 공동구의 균열을 포함하여 보조도상 시공조인트를 중심으로 궤도 하부 전체가 미세하게 균열되는 경향이 파악되었다.

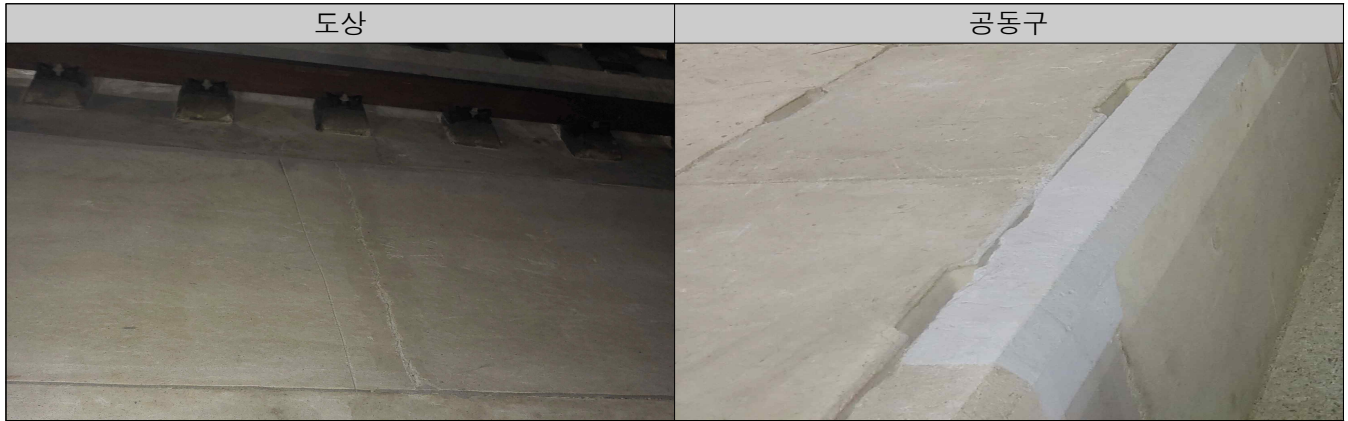


그림 2.9 궤도 및 공동구 상태(수도권 C)

- 중앙배수로 설계된 수도권 C 구간은 보조도상 시공조인트 중심으로 궤도에 발생한 변상 정도에 따라 터널 진동가속도 양상이 다를 것으로 예상된다. 이에 균열이 큰 상선을 계측 구간으로 선정하고 열차운행에 따른 터널 하부의 진동전파 경향을 검토하기 위해 그림 2.10과 같이 보조도상 시공조인트 기점으로 좌우 약 1m, 15m 간격으로 총 4지점을 계측 위치로 선정하였다.

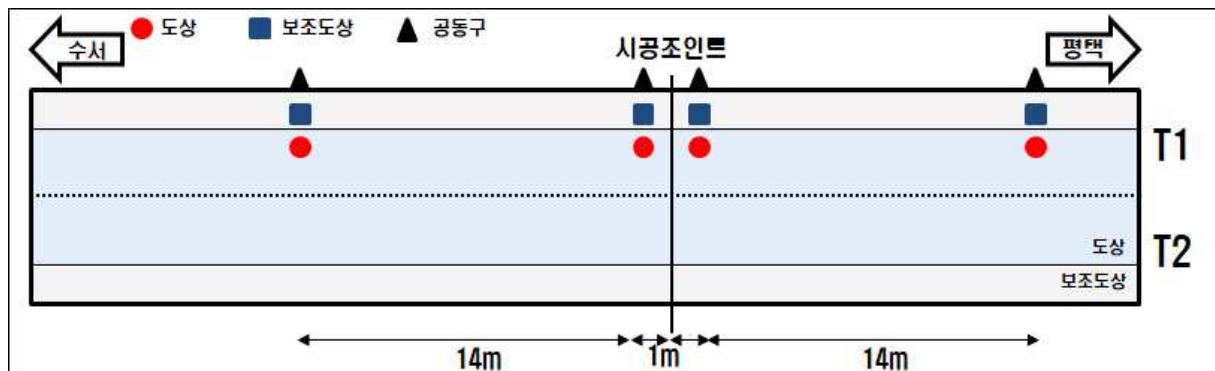


그림 2.10 수도권 C(중앙배수) 계측 위치

④ 강릉선 A(중앙배수)

- 본 계측 구간 주변의 궤도 변상 유무를 조사해본 결과 그림 2.11과 같이 시공조인트를 중심으로 도상 및 보조도상에 균열이 넓게 분포되어 있었으며, 특히 도상과 보조도상 인터페이스에 종방향으로 균열이 발생되어 두 층간의 이격을 파악하였다.



그림 2.11 도상 및 보조도상 상태(강릉선 A 구간)



그림 2.12 도상/보조도상 인터페이스 종방향 균열

- 중앙배수로 설계된 강릉선 A 구간은 궤도의 변상 정도에 따라 터널 진동가속도 양상이 다를 것으로 예상된다. 따라서 보조도상 주요 변상 구간을 중심으로 열차운행에 따른 터널 하부의 진동전파 경향을 검토하기 위해 그림 2.13과 같이 보조도상 시공조인트 기점으로 좌우 약 15m 간격으로 총 3지점을 계측 위치로 선정하였다.

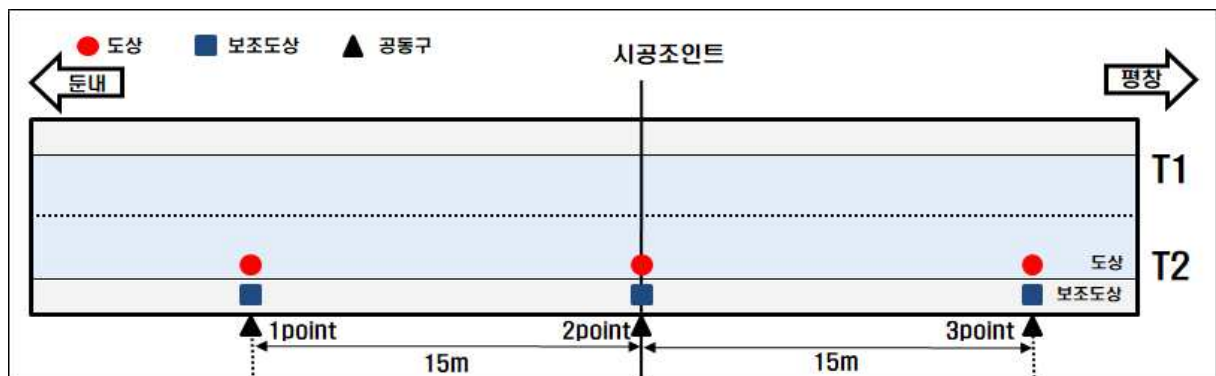


그림 2.13 강릉선 A(중앙배수) 계측 위치

㉟ 강릉선 B(중앙배수)

- 본 계측 구간 주변의 궤도 변상 유무를 조사해본 결과 그림 2.14와 같이 도상 및 보조도상에 전반적으로 균열이 발생함에 따라 내구성 저하가 심각한 상태로 조사되었다. 주요 균열 형태로는 보조도상 시공조인트를 중심으로 궤도 전체가 균열된 것을 경향을 파악하였다.



그림 2.14 궤도 상태(강릉선 B 구간)

- 중앙배수로 설계된 강릉선 B 구간은 강릉선 A 구간과 마찬가지로 궤도의 변상 정도에 따라 터널 진동 가속도 양상이 다를 것으로 예상된다. 따라서 보조도상 주요 변상 구간을 중심으로 열차운행에 따른 터널 하부의 진동 전파경향을 검토하기 위해 그림 2.15와 같이 보조도상 시공조인트 기점으로 좌우 약 20m 간격으로 총 3지점을 계측 위치로 선정하였다.

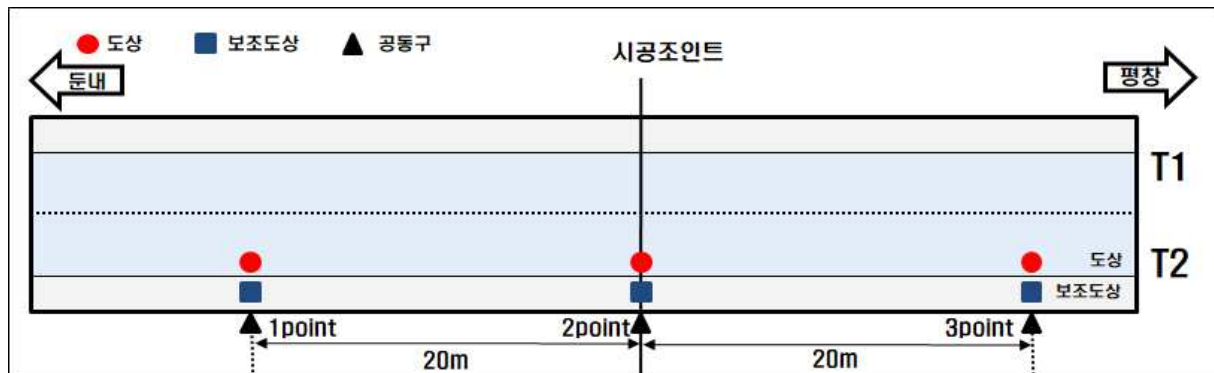


그림 2.15 강릉선 B(중앙배수) 계측 위치

(2) 현장 지반상태 조사

- 본 장에서는 현장 지반상태를 조사하기 위해 GPR 탐사 및 음향계측을 수행하였다. GPR 탐사를 통해 여굴의 두께 및 매질층의 균열상태를 검토하였으며, 추가로 비파괴검사 중 하나인 음향계측을 수행함에 따라 계측 위치별 건전지수를 산정하여 정량적인 터널하부 지반상태를 정량적으로 평가하였다.

가. GPR 시험을 통한 지반상태 조사

- 지표투과레이다(Ground Penetration Radar) 탐사는 현재 상업적으로 이용되는 물리탐사 기술 중 그 해상도가 가장 뛰어난 물리 탐사기술 중의 하나이며 국내에서도 최근에 매설물 탐지나 지반조사 분야에서 지하 정밀 영상화를 위해 거의 빠짐없이 사용되고 있다. 레이다 탐사는 고주파수의 (수십 MHz ~ 수 GHz) 전자기파를 이용하므로 큰 의미의 전자탐사에 속하나, 전자탐사가 일반적으로 지하의 전자기유도 현상에 근거하는데 반해, 레이다 탐사는 원리상 탄성과 탐사와 마찬가지로 파동의 전파, 반사 및 굴절 성질 등을 이용하므로 전자탐사와 구분하여 다루고 있다.

① 탐사원리

- 레이다탐사(GPR 탐사)는 송신 안테나로부터 전자기파가 발사된 후, 지하의 임의의 매질에서 반사되거나 혹은 투과되어 수신 안테나에 감지된 전자기파의 도달 주시를 이용하여 지반 구조, 지하 매설물 등을 영상화하여 지하 매설물의 위치 혹은 지하구조 등을 추정하는 물리탐사법이다. 레이다탐사는 지표에서 수행하는 지표 레이다탐사와 시추공 레이다탐사로 구분할 수 있으며 지표레이다탐사가 가장 많이 사용된다.

- 레이다탐사는 수십 MHz 에서 수 GHz 에 걸친 고주파수 전자기파를 사용하는데, 펄스 형태의 전자기파를 이용하는 시간영역 탐사가 주를 이루며, 상용화된 대부분의 레이다탐사기 또한 펄스형 전자기파를 사용한다.
- 레이다탐사에서 중요한 물리적인 성질은 지하의 전기비저항과 유전율의 차이이다. 금속 매설물이나 매설 전선과 같이 지반과의 전기비저항 차이가 매우 큰 지하 경계면을 제외하면, 전자기파의 반사는 유전율이 다른 경계면에서 주로 발생한다.
- 탐사자료처리 및 해석에 영향을 미치는 전자기파의 전달 속도는 유전상수의 영향을 받으며 파의 감쇠는 주로 전기전도도에 영향을 받는다.
- 파의 전달 속도는 유전상수의 제곱근에 반비례하며, 감쇠는 전기전도도에 비례하고 유전상수에 반비례하는 특성을 가진다. 일반적으로 전기전도도는 매질 내 수분함량과 전도성 물질의 함량에 영향을 받으며 유전상수는 매질이 균질한 경우 수분함량과 공극률에 영향을 받게 된다.
- 지표 레이다탐사는 지표에 특정한 손상을 가하지 않고 탐사하기 때문에 비파괴 검사법이라고 볼 수 있으며, 아스팔트나 콘크리트 위에서도 측정이 가능하다. 그림 2.16은 GPR 탐사의 모식도를 보여주고 있으며, 각 매질별 전기적 물성에 따라 전자기파의 전파속도가 다르게 나타난다.

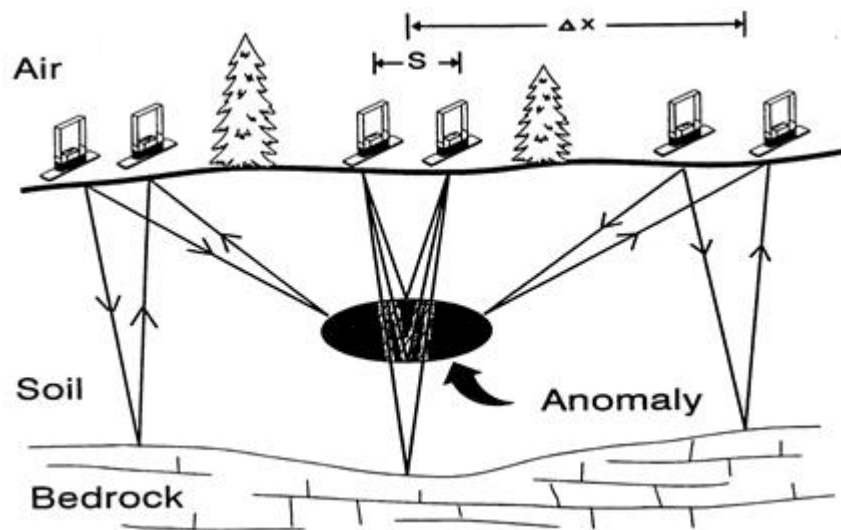


그림 2.16 GPR 탐사 모식도

② 장비제원

- 본 연구에서 사용한 GPR 탐사 장비 제원은 표 2.3과 같다. 노반에 대한 GPR 탐사를 위하여 강화노반층 및 상부노반의 층다짐 상태 등 비교적 심도가 낮은 구간에 대한 상세한 조사를 위하여 심도 투과율이 우수한 450MHz 안테나를 선정하였다.



그림 2.17 GPR 탐사 장비 및 실험 전경

표 2.3 GPR 시스템 제원

구 분	구 성 품	모델 및 규격	비 고
주장치 (MALA GX Controller)	Control/ Display Module	MALA GX Controller	전자기파 송신 및 수신, 전자기파 반사 데이터 화상처리 및 표시, 이미지 조정, 데이터 필터링
측정 안테나 (전자기파 송수신기)	450MHz 안테나	MALA GX450 HDR	1~5m 깊이까지 탐사 가능
실내 분석 장치	퍼스널 컴퓨터	Intel i7	데이터 분석 및 저장

③ 터널내 GPR탐사 결과

- 인버트 구간을 제외한 바닥부 여굴 현황자료에 따르면, 계측당시 공동구 하부는 원지반 상태였으며, 보조도상 하부는 시공기계 주행성을 위해 암버력으로 채워진 상태인 것으로 조사되었다. 따라서 조사된 여굴 현황 중에서 공동구 하부의 여굴은 일치하나 보조도상 하부의 여굴은 계측된 자료 보다 깊을 것으로 판단된다. 이에 실제 시공된 여굴두께 및 채움재료를 검토하기 위해 보조도상 층을 중심으로 GPR탐사를 수행하였다.

㉞ 수도권 A(인버트)

- 본 구간은 인버트 하부 중앙배수 설계 구간으로, 보조도상 30cm 하부에 콘크리트로 타설한 약 100cm정도의 깊이가 확인되었다. 이는 인버트 설계시 하부 구간을 콘크리트($f_{ck}=27\text{MPa}$)로 채움으로써 균일한 층이 형성된 것으로 판단된다.

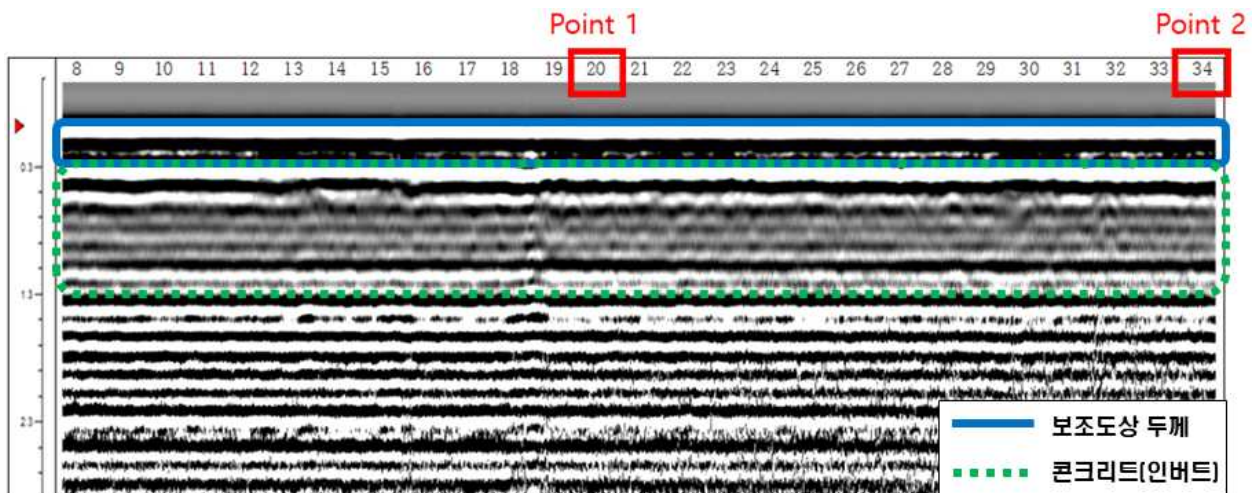


그림 2.18 수도권 A(인버트) GPR 탐사 결과

㉟ 수도권 B(측면배수)

- 본 구간은 측면배수 설계 구간으로 상·하선 모두 콘크리트 보조도상 설계두께와 동일하게 30cm로 시공된 것을 확인하였으며, 보조도상 하부 약 90cm 깊이까지 균일하지 않은 탐사 결과가 나타났다. 사전 조사된 여굴 발생 두께는 60cm이나 본 구간은 조사된 여굴두께보다 약 30cm까지 깊게 손상영역으로 나타남에 따라 암반과 궤도가 일체화되지 않은 것으로 판단된다.

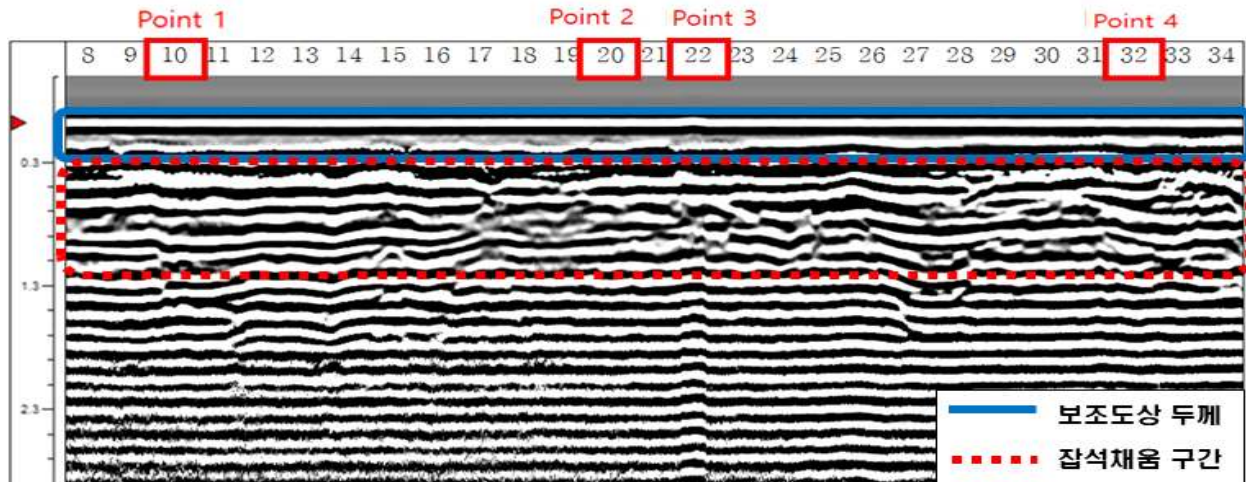


그림 2.19 수도권 B(측면배수) GPR 탐상 결과

㉔ 수도권 C(중앙배수)

- 본 구간은 중앙배수 설계 구간으로 상·하선 모두 콘크리트 보조도상 설계두께와 동일하게 30cm로 시공된 것을 확인하였으며, 상선의 경우 약 110cm 깊이까지 균일하지 않은 탐상 결과가 나타났다. 따라서 암반과 궤도가 일체화되지 않은 것으로 판단된다. Point 2~3 지점에 시멘트가 혼합된 것으로 보이는 일부 연속적 탐상 형태가 나타났으며 이는 수도권 B 구간보다 궤도 하부의 강성이 소폭 증가할 것으로 판단된다.

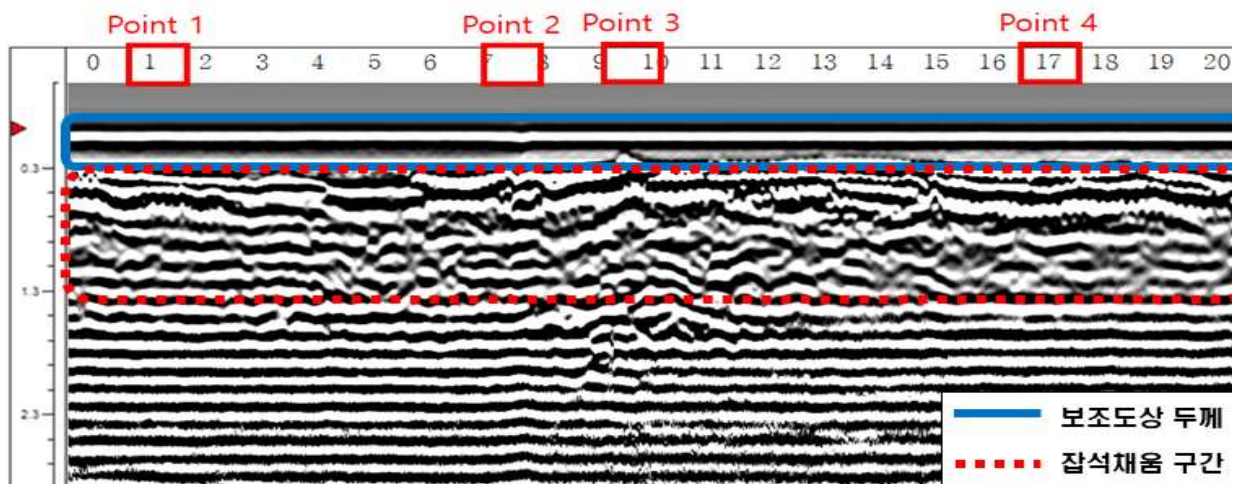


그림 2.20 수도권 C(중앙배수) GPR 탐상 결과

㉕ 강릉선 A(중앙배수)

- 본 구간은 중앙배수 설계구간으로 콘크리트 보조도상 두께는 설계두께와 동일하게 30cm로 시공된 것을 확인하였으며, 계측 구간의 경우 전체적으로 균일하지 않은 탐상 결과가 110cm 깊이까지 나타났다. 사전 조사된 여굴 발생 두께는 30cm이나 본 구간은 조사된 여굴두께보다 약 80cm 깊게 손상영역으로 나타남에 따라 암반과 궤도가 일체화되지 않은 것으로 판단된다.

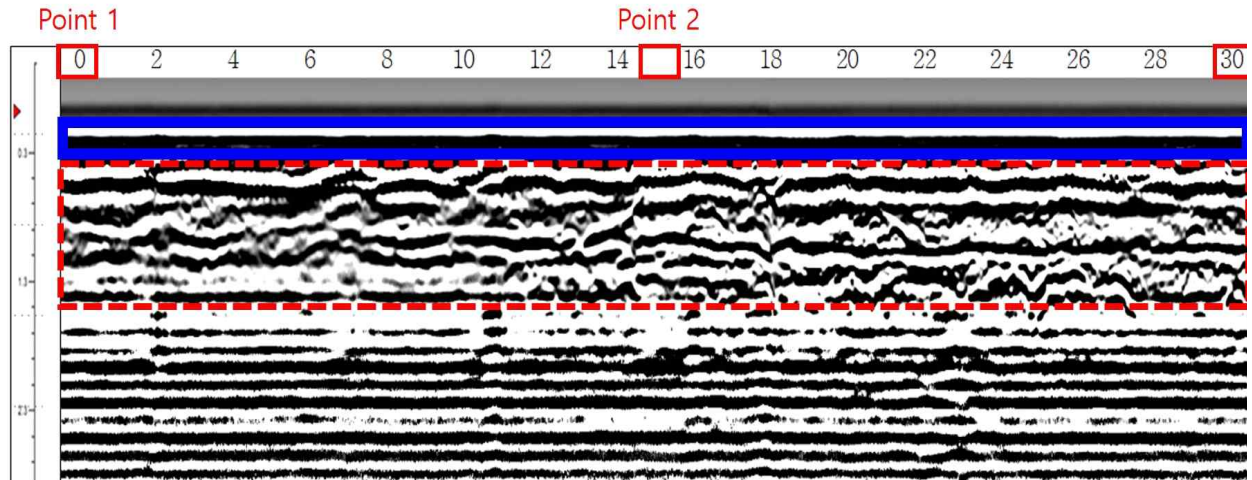


그림 2.21 강릉선 A(중앙배수) GPR 탐상 결과

㉞ 강릉선 B(중앙배수)

- 본 구간은 강릉선 A 구간과 마찬가지로 콘크리트 보조도상 두께는 설계두께와 동일하게 30cm로 시공된 것을 확인하였다. 강릉선 B 구간의 경우 보조도상 시공조인트를 기점으로 비균일 탐상결과가 나타났다. Point 1~Point 2 구간은 90cm, Point 2~Point 3 구간은 110cm까지 손상영역으로 나타났다. 사전 조사된 여굴 발생 두께는 30cm이나 본 구간은 조사된 여굴두께보다 약 60~80cm까지 깊게 손상영역으로 나타남에 따라 암반과 궤도가 일체화되지 않은 것으로 판단된다.

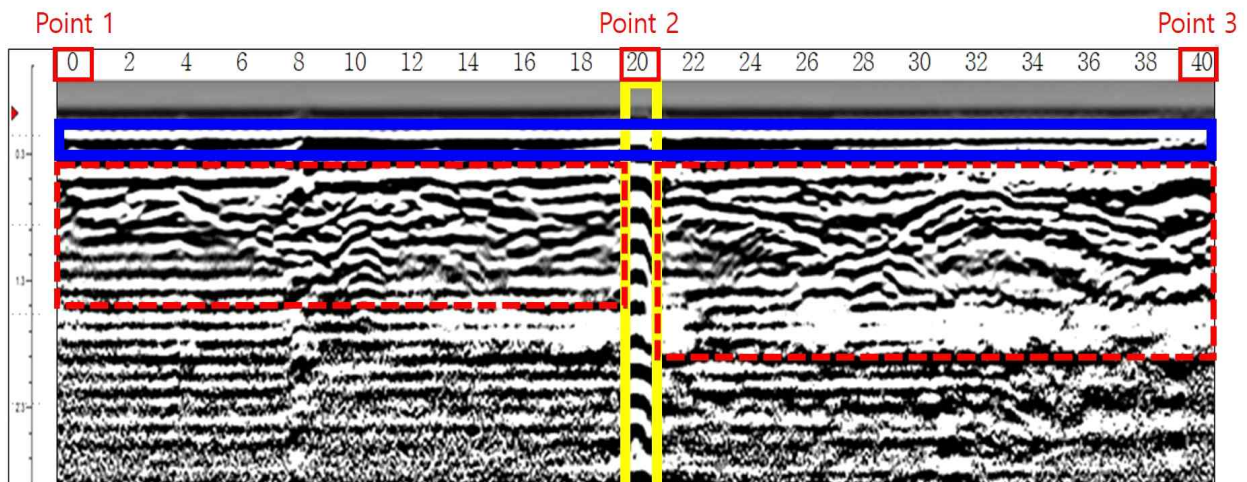


그림 2.22 강릉선 B(중앙배수) GPR 탐상 결과

나. 음향파 분석에 따른 지반상태 평가

① 음향센서를 통한 지반상태 조사 개요

- GPR탐사를 통해 여굴에 따른 궤도 하부상태 검토만으로는 터널하부상태와 열차 반복하중에 따른 동적거동간의 관계 분석에 한계가 있다. 따라서 타격음을 이용하여 터널 바닥부의 상태를 평가하고자 시제품화 된 일본 Sonalyser를 활용하였다. 음향장비를 통해 터널 계측 구간 내 하부 건전지수를 산출하고, 음향파 Wavelet 분석을 수행하여 터널 하부 건전도 평가기법에 대한 평가를 수행하고자 한다.

② 음향계측원리

- 음향방출(AE)이란 고체가 변화 또는 파괴할 때 소리가 발생하는 현상으로, 어떠한 재료일지라도 하중 등이 작용하여 어떤 응력이나 변형이 발생하여 결과적으로 균열 등의 부분적인 파괴 등이 발생하는 경우 파괴면의 형성과 함께 각종 에너지가 방출된다. 이러한 에너지는 운동에너지, 열, 빛 등이 포함되며 그 가운데 하나로 소리가 존재한다. 이러한 소리는 탄성파로서 항상 사람이 들을 수 있는 가청주파수 범위(20~2,000kHz)에 존재하는 것은 아니며, 일반적으로 AE법으로 취급하는 것은 보다 높은 주파수의 탄

성파(1kHz~2MHz)가 많다. AE를 계측함에 따라 고체 내부의 여러 가지 변화를 감지하는 수법으로 통상의 방법으로는 검출 할 수 없는 형상 등을 조사할 수 있는 비파괴 검사방법의 하나이다.

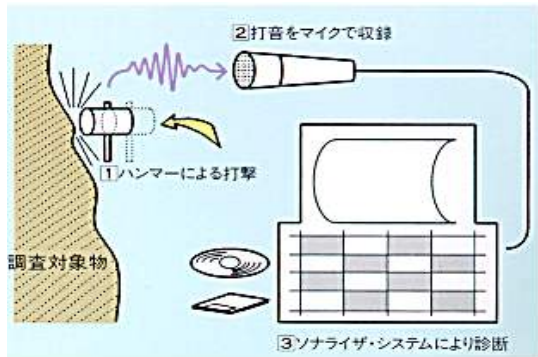


그림 2.23 음향계측 원리 및 시험사례

③ Sonalyser를 이용한 터널하부 계측

- 본 연구에 사용된 Sonalyser는 그림 2.24와 같이 마이크를 통하여 수집된 해머 타격음을 컴퓨터로 분석처리하고 대상면의 건전지수를 즉시 알 수 있도록 화상으로 표시하여 그 특징을 수치화 할 수 있는 장비이다. 그 결과는 시간-주파수 영역에 음압파형 및 웨이블릿 해석에 따른 스카로그래프로 정리된다.



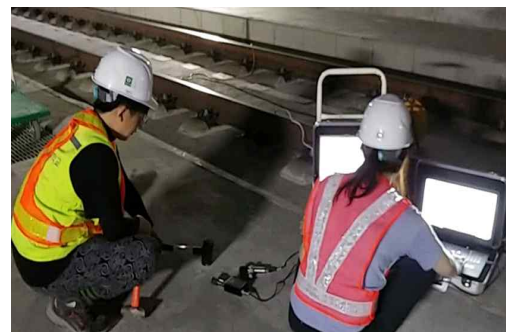
(a) 데이터 로거



(b) 음향측정 마이크



(c) 타격해머(1kg)



(d) 현장계측

그림 2.24 Sonalyser를 통한 음향계측 장비 및 실험 전경

④ 계측위치 도면

- 터널 바닥부 건전도 상태를 검토하기 위해 그림 2.25와 같이 크게 도상 중앙부와 보조도상을 나누어 계측하였다. 보조도상의 경우 약 700mm 너비에서 한 포인트 당 3개의 라인(1(도상측), 2(보조도상측), 3(공동구측))으로 세분화하여 터널 하부 내 총 28개 지점의 음향계측을 통해 계측터널 바닥부의 건전지수를 평가하고자 한다.

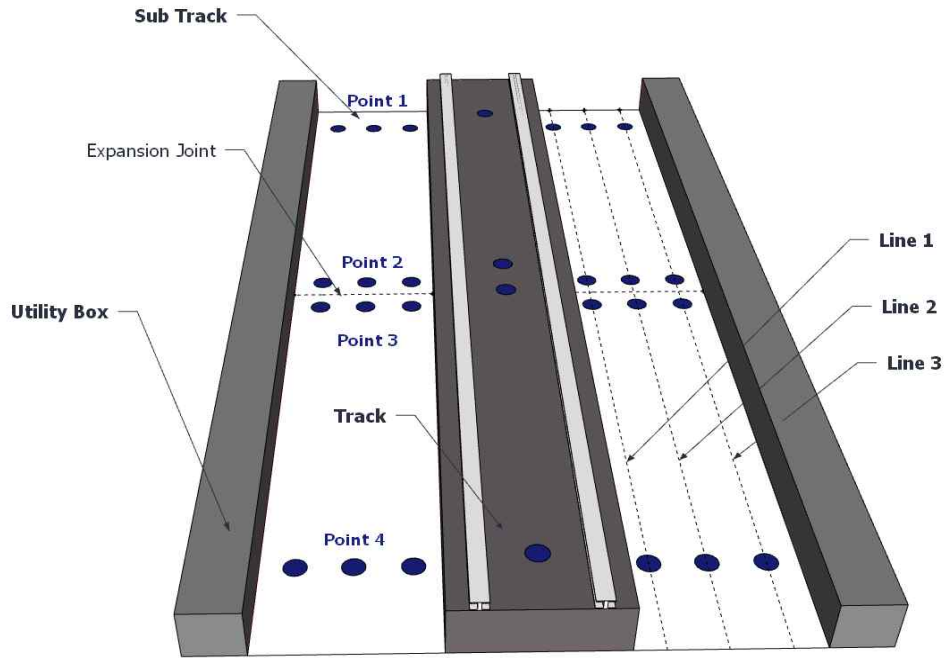


그림 2.25 음향계측 위치 도면

㉔ 수도권 A(인버트)

- 수도권 A 구간의 계측위치는 그림 2.26과 같이 터널 하부지점을 세분화하여 상선에서 총 8개 지점을 계측하였다. 그에 따른 인버트 구간의 터널 하부상태 평가는 아래와 같다.

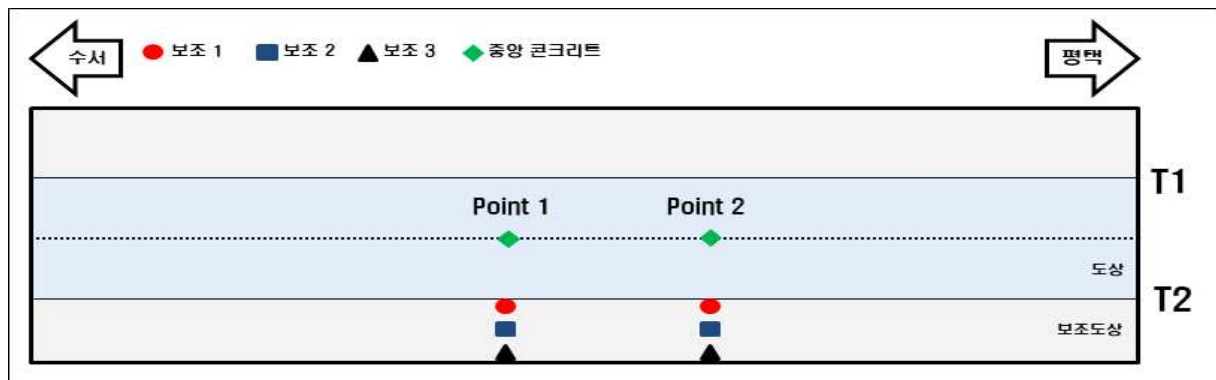


그림 2.26 수도권 A(인버트) 음향계측 위치

- 계측지점별 건전지수 결과를 표 2.4와 같이 산출하였다. 음향분석기법을 이용한 지하구조물 비파괴 조사 기술개발(2002)에 따르면 콘크리트 30cm 두께 기준으로 건전부 건전지수는 약 88.5~91.5이며, 결함 및 공동부는 그 이하의 값이 산정되었다. 이를 기준으로 인버트 구간의 하부상태를 평가한 결과, 건전부 건전지수는 약 91~96으로 나타났으며 매우 건전 상태로 나타났다.

표 2.4 계측지점별 건전지수 평가(수도권 A)

건전지수 / 계측지점		1point	2point
도상 중앙부		96	96
보조도상 (상선)	도상 인접부	94	91
	중심부	93	95
	공동구 인접부	94	92
수도권 A 평균 건전지수		측정(94.2) / 기준(88.5이하) : 건전상태(O.K)	

- 보조도상의 경우 하부채움 콘크리트 두께는 100cm로, 평균 건전지수가 93.2로 나타났으며, 도상의 경우 평균 건전지수가 96.0으로 나타났다. 인버트 구간 시공 특성상 콘크리트 채움으로 인해 건전부 기준보다 평균 건전지수가 높게 측정된 것으로 판단되었다. 그 외 도상 중앙부의 경우 콘크리트 두께 차이로 인하여 보조도상의 평균 건전지수 보다 큰 값으로 측정되었다.

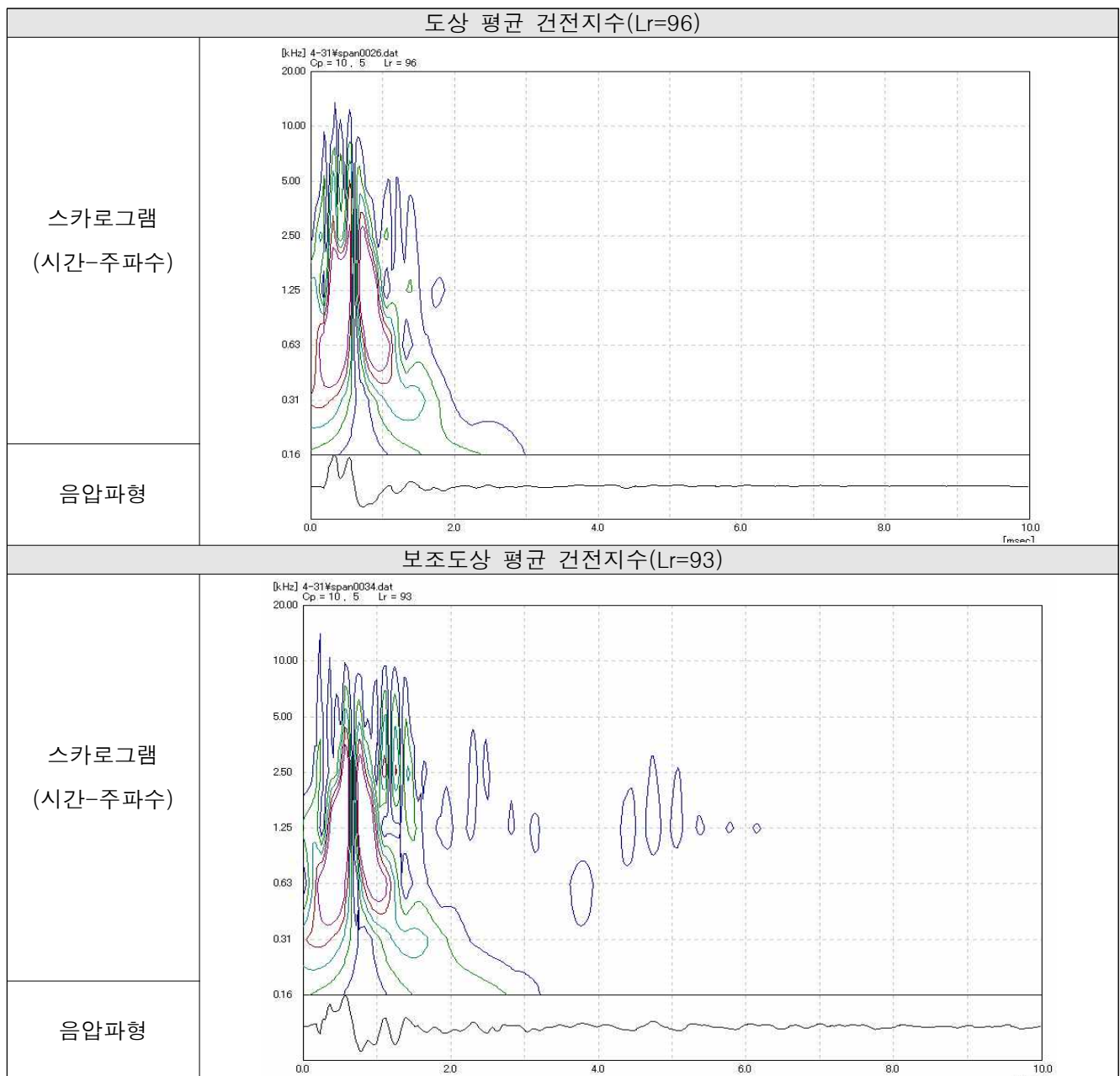


그림 2.27 음향계측 평균값 결과(수도권 A)

㉔ 수도권 B(측면배수)

- 수도권 B 구간은 보조도상 시공조인트를 기점으로 그림 2.28과 같이 Point 1~4 범위 내 도상 중앙부와 보조도상 지점을 세분화하여 총 16개 지점을 계측하였다. 그에 따른 수도권 B 구간의 터널 하부 상태 평가는 아래와 같다.

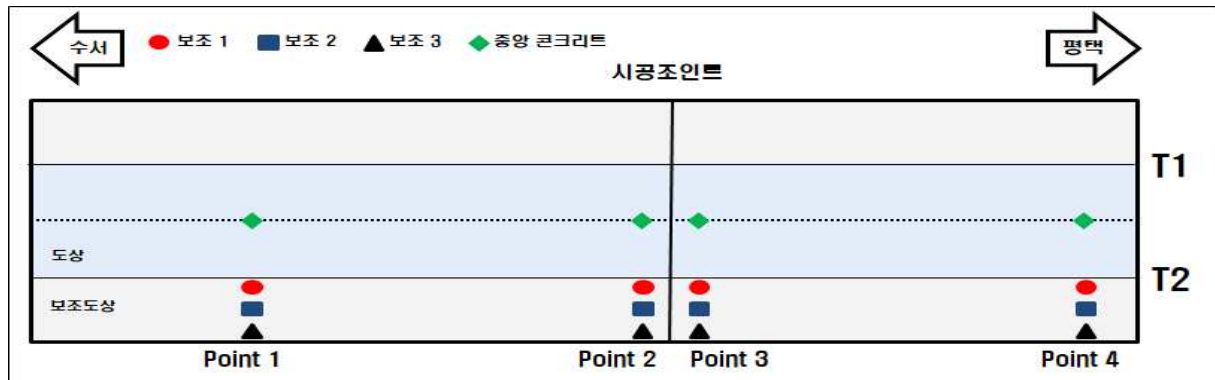


그림 2.28 수도권 B(측면배수) 음향계측 위치

- 계측지점별 건전지수 평가를 표 2.5와 같이 산출하였다. 콘크리트 30cm 두께 기준으로 건전지수가 88.5이하의 값이 측정될 경우, 터널 하부의 결함 및 공동부가 예상된다. 이를 기준으로 본 구간의 상태를 검토하였을 때 평균 건전지수가 86.8로 측정됨에 따라 터널 하부의 결함 및 공동부가 존재할 것으로 판단된다.

표 2.5 계측지점별 건전지수 평가(수도권 B)

건전지수 / 계측지점		1point	2point	3point	4point
도상 중앙부		90	90	90	90
보조도상 (하선)	도상 인접부	83	83	83	83
	중심부	96	88	78	88
	공동구 인접부	96	88	79	79
수도권 B 보조도상 평균 건전지수		측정(85.3) / 기준(88.5이하) : 결함 및 공동부 예상(N.G)			

※ 건전도 불안정 기준(빨강) : 음향분석기법을 이용한 지하구조물 비파괴 조사 기술개발(2002) 참조

- 수도권 B 경우 잡석채움 두께 90cm, 평균 건전지수가 85.3으로 나타났다. 그 외 도상 중앙부의 경우 하선 보조도상의 평균 건전지수 보다 큰 값으로 측정되었으며, 평균 건전지수는 90으로 나타났다.

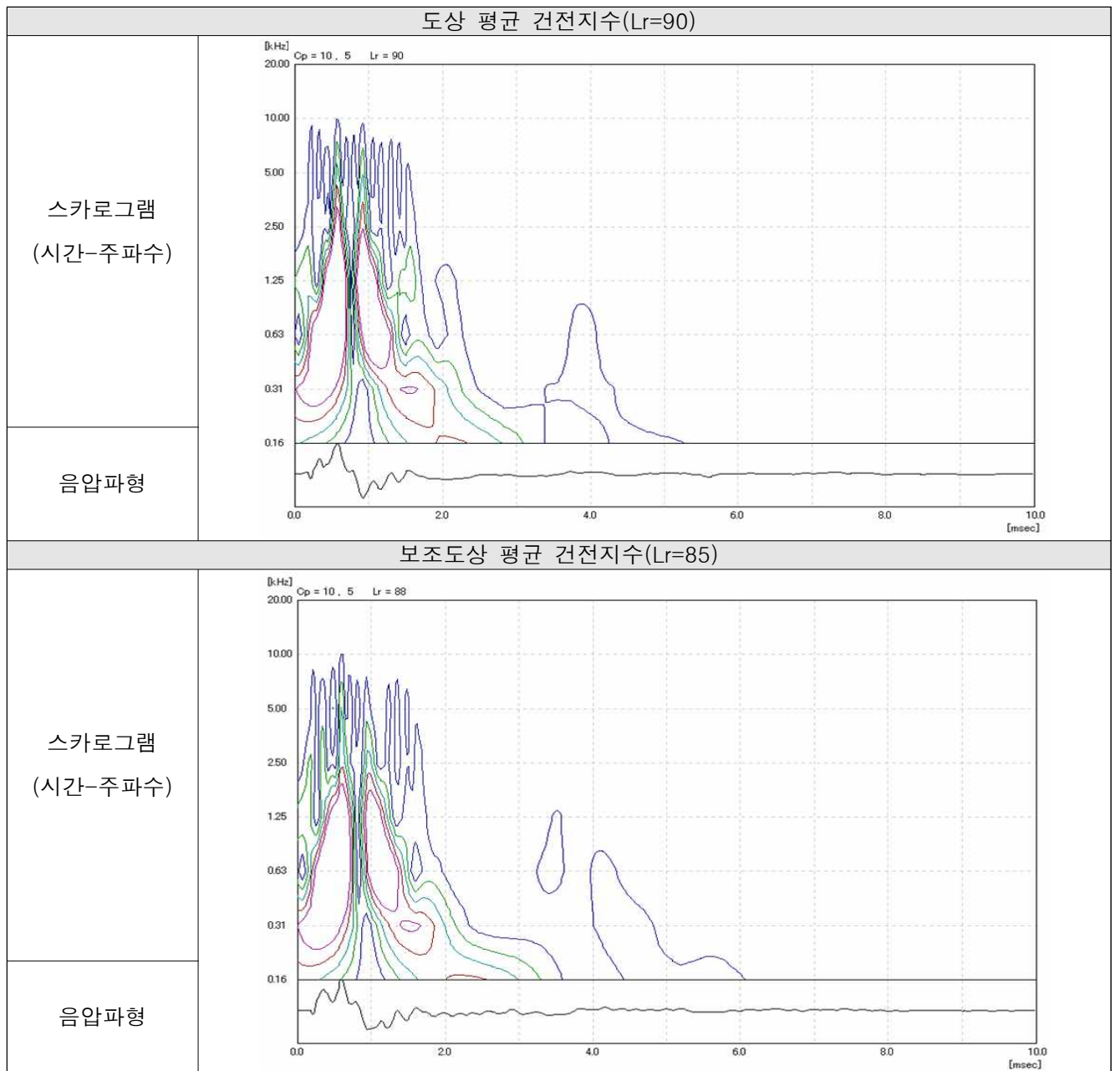


그림 2.29 음향계측 평균값 결과(수도권 B)

㉠ 수도권 C(중앙배수)

- 수도권 C 구간은 시공조인트를 기점으로 그림 2.30과 같이 도상 및 보조도상 지점을 세분화하여 총 16개 지점을 계측하였다. 그에 따른 수도권 C 구간의 터널 하부상태 평가는 아래와 같다.

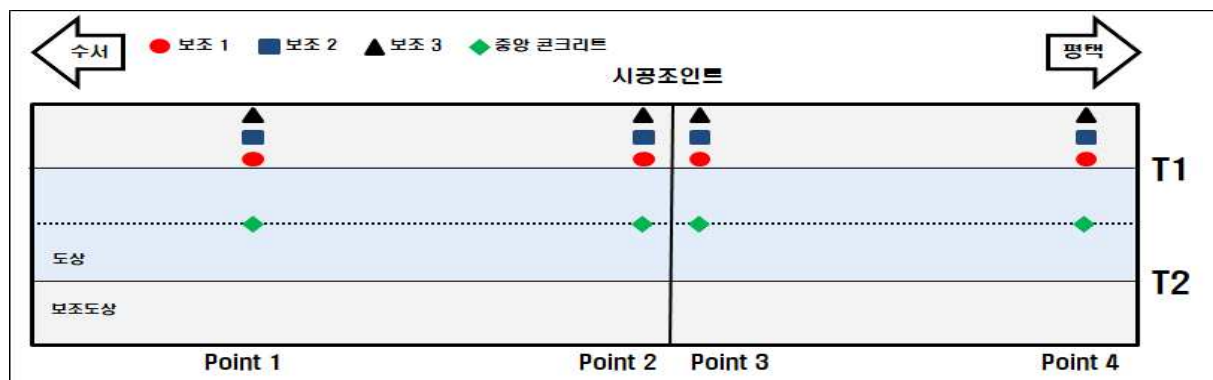


그림 2.30 수도권 C(중앙배수) 음향계측 위치

- 계측지점별 건전지수 평가를 표 2.6과 같이 산출하였다. 건전지수가 88.5 이하의 값이 측정됨에 따라 대부분이 건전부 기준에 미달된 상태이나, 수도권 B 구간에 비해 전체적으로 상향된 경향을 보였다. 이는 GPR 결과와 같이 Point 2~3 지점에 일부 시멘트가 혼합된 형태가 나타남에 따라 수도권 B 구간 보다 건전도가 높은 것으로 판단된다.

표 2.6 계측지점별 건전지수 평가(수도권 C)

건전지수 / 계측지점		1point	2point	3point	4point
도상 중앙부		93	91	88	94
보조도상 (상선)	도상 인접부	87	89	89	86
	중심부	89	88	89	85
	공동구 인접부	82	86	85	80
수도권 C 보조도상 평균 건전지수		측정(86.2) / 기준(88.5이하) : 결함 및 공동 예상(N.G)			

※ 건전도 불안정 기준(빨강) : 음향분석기법을 이용한 지하구조물 비파괴 조사 기술개발(2002) 참조

- 수도권 C 경우 손상영역 110cm, 평균 건전지수가 86.2로 나타났다. 그 외 도상 중앙부의 경우 상·하 선 보조도상의 평균 건전지수 보다 큰 값으로 측정되었다.

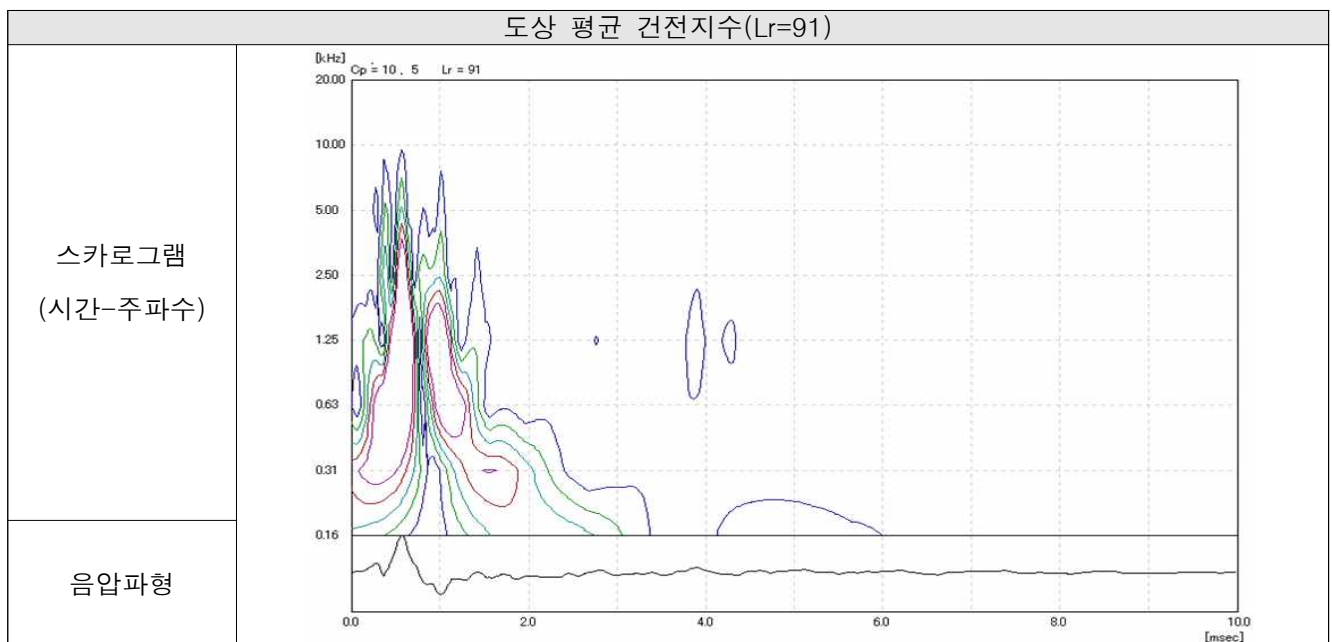


그림 2.31 음향계측 평균값 결과(수도권 C)

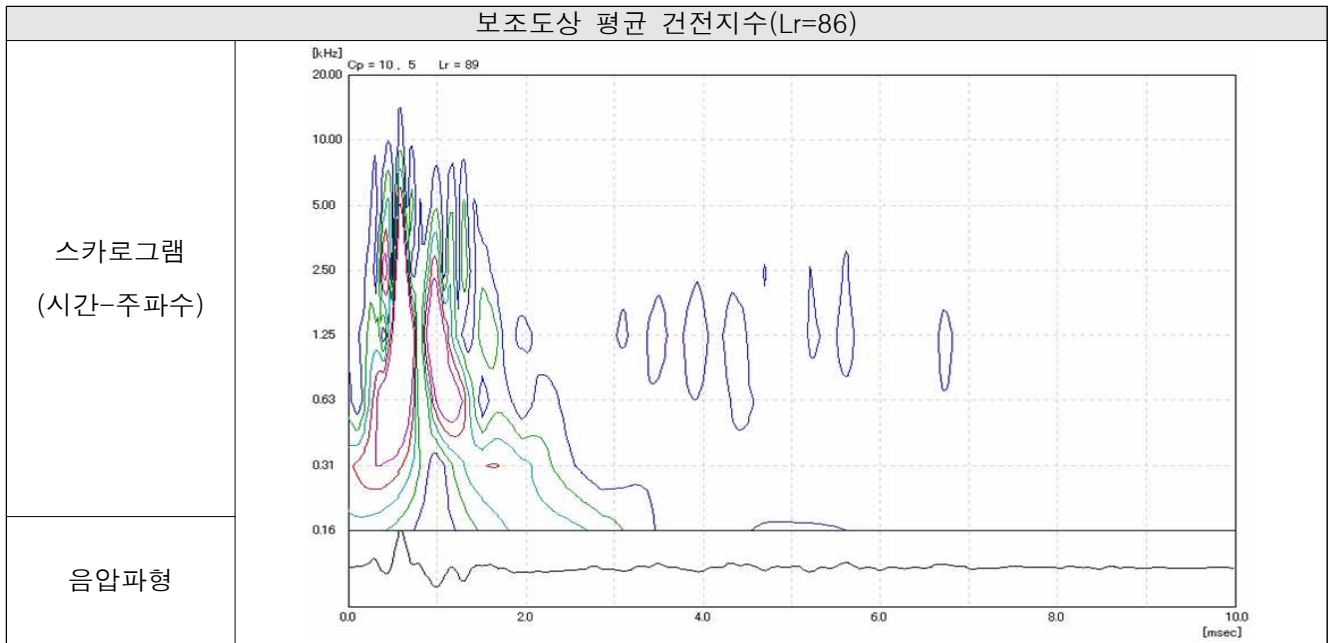


그림 2.31 음향계측 평균값 결과(수도권 C)(계속)

㉔ 강릉선 A(중앙배수)

- 강릉선 A 구간 보조도상 시공조인트를 기점으로 그림 2.32와 같이 Point 1~3 범위 내 도상 중앙부와 보조도상 지점을 세분화하여 총 12개 지점을 계측하였다. 그에 따른 강릉선 A 구간의 터널 하부상 태평가는 아래와 같다.

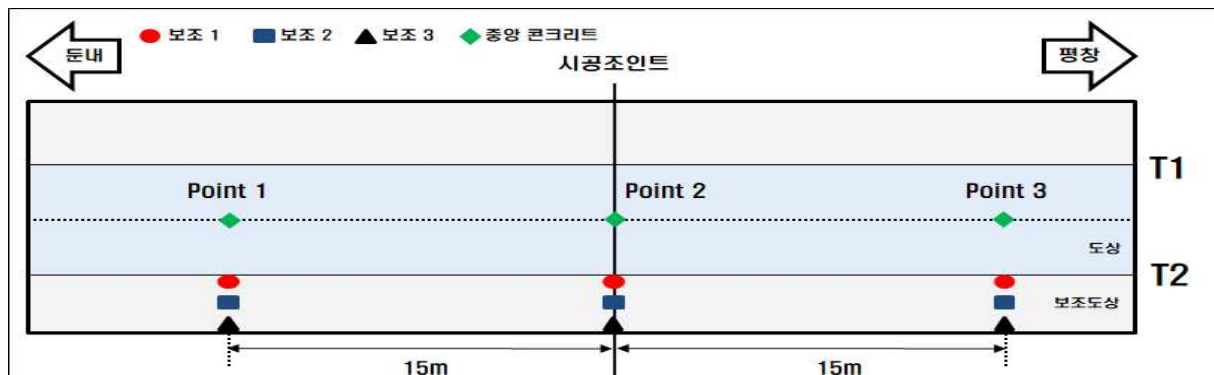


그림 2.32 강릉선 A(중앙배수) 음향계측 위치

- 계측지점별 건전지수 평가를 표 2.7과 같이 산출하였다. 본 구간은 건전지수 88.5의 값보다 낮은 평균 건전지수가 85.8로 측정되어 터널 하부의 결함 또는 공동이 존재할 것으로 판단된다.

표 2.7 계측지점별 건전지수 평가(강릉선 A)

건전지수 / 계측지점		1point	2point	3point
도상 중앙부		95	91	95
보조도상 (하선)	도상 인접부	89	84	86
	중심부	87	88	87
	공동구 인접부	88	75	89
강릉선 A 보조도상 평균 건전지수		측정(85.8) / 기준(88.5이하) : 결함 및 공동 예상(N.G)		

※ 건전도 불안정 기준(빨강) : 음향분석기법을 이용한 지하구조물 비파괴 조사 기술개발(2002) 참조

- Point 2번의 건전지수가 82.3으로 다른 계측지점의 건전지수보다 상대적으로 작게 나타났다. 이는 구간 내 여굴 처리방식이 동일하므로 Point 2번의 여굴두께가 다른 계측지점 대비 깊을 것으로 사료된다.

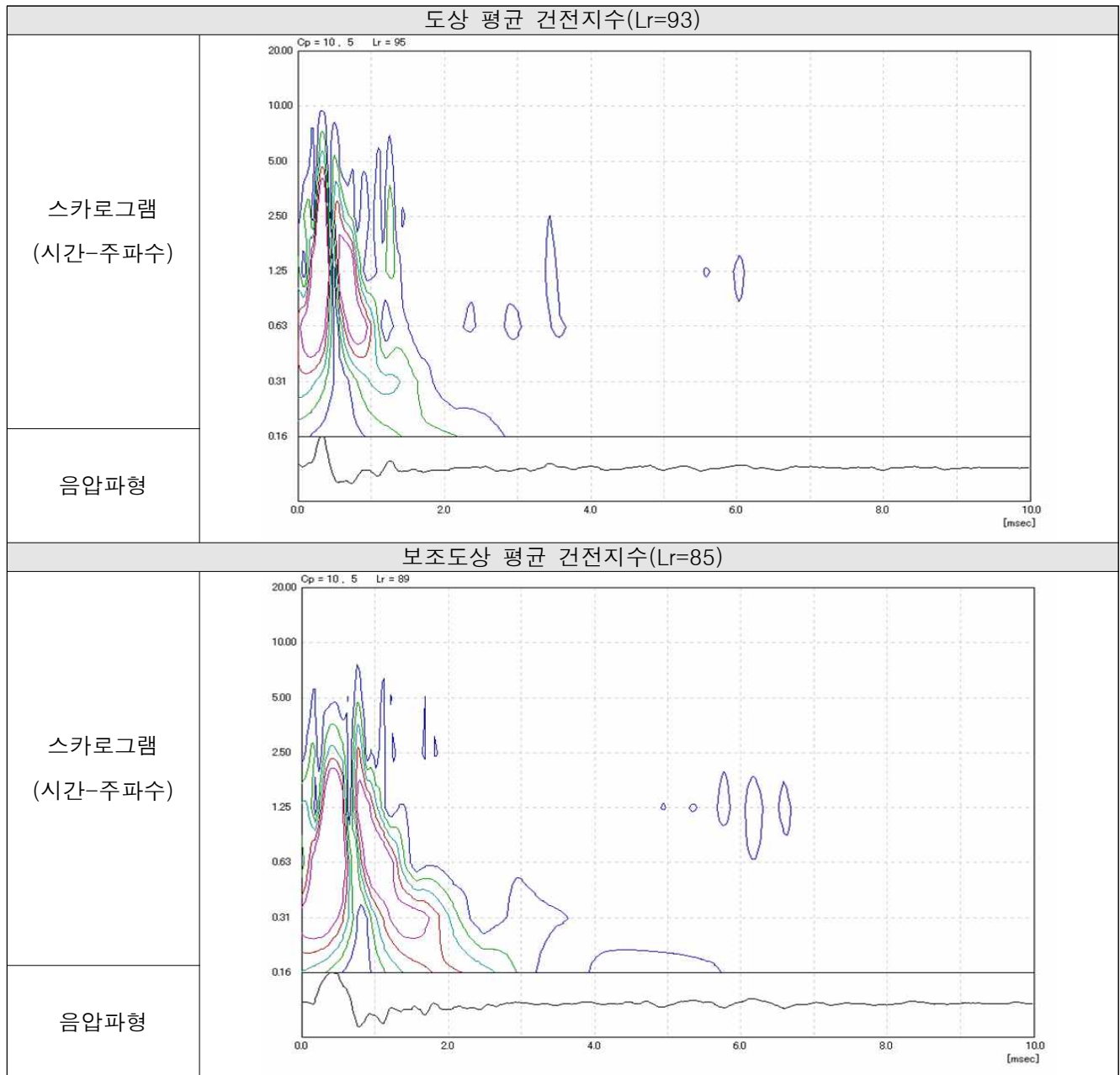


그림 2.33 음향계측 평균값 결과(강릉선 A)

㉠ 강릉선 B 구간(중앙배수)

- 강릉선 B 구간은 시공조인트를 기점으로 그림 2.34와 같이 도상 및 보조도상 기점을 세분화하여 총 12개 지점을 계측하였다. 그에 따른 강릉선 B 구간의 터널 하부상태 평가는 아래와 같다.



그림 2.34 강릉선 B(중앙배수) 음향계측 위치

- 계측지점별 건전지수 평가를 표 2.8과 같이 산출하였다. 보조도상의 건전지수가 88.5이하의 값이 측정됨에 따라 대부분이 건전부 기준에 미달된 상태이며, 특히 최대 손상영역 깊이가 나타난 point 3 구간의 건전지수가 타 지점에 비해 상대적으로 낮은 경향을 보였다. GPR 결과와 같이 손상영역이 깊을수록 건전지수가 낮게 나타남에 따라 추후 건전지수를 통한 손상영역 상대평가에 활용 가능할 것으로 판단된다.

표 2.8 계측지점별 건전지수 평가(강릉선 B)

건전지수 / 계측지점		1point	2point	3point
도상 중앙부		94	95	92
보조도상 (하선)	도상 인접부	90	87	81
	중심부	89	81	80
	공동구 인접부	88	81	81
강릉선 A 보조도상 평균 건전지수		측정(86.5) / 기준(88.5이하) : 결함 및 공동 예상(N.G)		

※ 건전도 불안정 기준(빨강) : 음향분석기법을 이용한 지하구조물 비파괴 조사 기술개발(2002) 참조

③ Short-Time Fourier Transform(STFT) 분석을 이용한 터널하부상태 정량화 기법 개발

- 앞서 GPR탐사 및 Sonalyser를 활용하여 현장계측 구간으로 선정된 구간의 건전지수 파악을 수행하였으나, 손상영역 구간 깊이에 따른 터널 하부상태 정량화를 통한 비교·분석을 수행하기에 어려운 실정이다. 이에 본 연구에서는 궤도 하부(콘크리트층)를 타격하였을 때 발생하는 음향파를 계측하고, 계측된 음향파를 시간-주파수 해석기법인 STFT(Short-Time Fourier Transform)로 분석함에 따라 중심주파수를 비교하여 값을 정량화 하고자 하였다.

㉠ Short-Time Fourier Transform(STFT) 이론적 배경

- 콘크리트와 같은 면밀한 구조의 고체에 충격을 가하면 타격점으로부터 음향파가 퍼져나가며, 이 때 퍼져나가는 속도는 재료의 강성과 단위중량에 의해 결정된다. 그러나 음향파가 퍼져나가면서 콘크리트 내부 및 하부에 공동, 잡석 등과 같은 다른 재료의 존재가 나타날 경우 일부의 파들은 반사가 되어 내부에서 공진이 일어나게 된다. 이를 이용하여 궤도 하부에 콘크리트 채움이 아닌 다른 재료의 두께를 정량화하고자 하였다.

- 푸리에 변환(Fourier Transform)은 신호처리방법 중 가장 흔하게 사용되는 기법으로 계측된 신호를 각각의 주파수 성분으로 분리하여 여러 개의 정현파로 나누는 방법이다. 일반적인 푸리에 변환에서는 계측된 데이터를 그림 2.35와 같이 총 주파수 영역에서 평균적인 주파수 특성을 평가하게 되므로 타격하였을 순간 주파수 변화 특성을 분석하기에 부적합하다. 따라서 본 연구에서는 시간 정보 및 주파수 정보를 동시에 해석할 수 있는 시간-주파수 해석 기법인 STFT를 사용하였다.

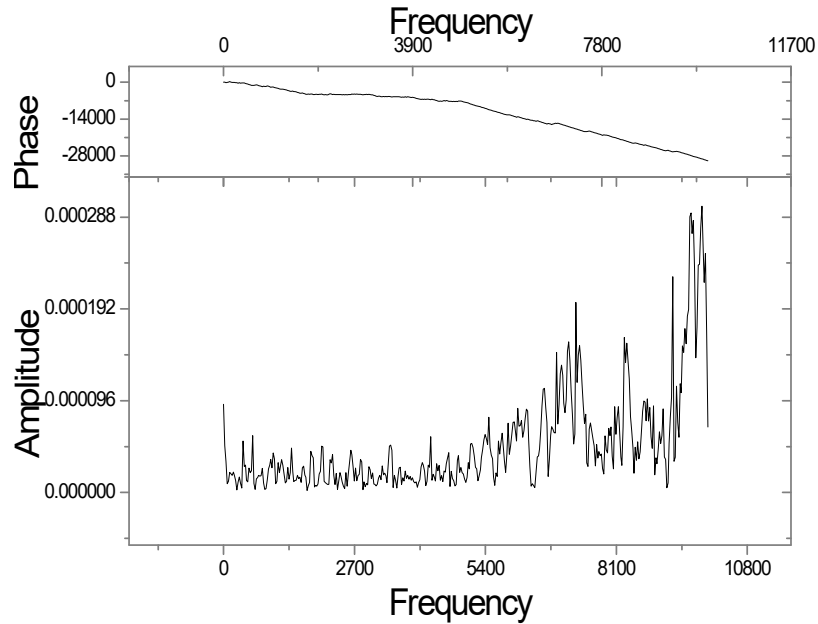


그림 2.35 푸리에 변환 결과 예시

- STFT는 시간에 따른 주파수 특성을 나타내기 위하여 시간 대역별 윈도우 함수를 적용시켜 필터링된 함수를 통해 푸리에 변환을 수행하는 기법이다.
- 시간-주파수 해석을 통해 나타난 스펙트럼 변화율은 아래 식 2.1을 통해 산출되며, 스펙트럼 밀도 함수는 전 구간에서 시간영역 신호의 평균 제곱값을 적분하여 산출한다. 산출된 음향계측 데이터 분석은 Origin 프로그램을 이용하여 변환하였다.

$$S(f) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{|X_T(f)|^2}{T} \quad (2.1)$$

여기서, $S(f)$: 스펙트럼 밀도
 T : 시간 (sec)
 $X_T(f)$: 푸리에 변환 값

- 본 연구에 사용된 음향 계측기는 마이크로폰의 일종인 CRY-2301 장비로 그림 2.36과 같이 이용하였으며 관련 제원은 다음 표 2.9와 같다.



그림 2.36 마이크로폰 계측기 사진

표 2.9 마이크로폰 계측기 제원

구분	제원
측정 범위(dBA)	25~130dBA
측정 주파수 범위	0~20kHz
센서 크기	24.5×115mm
ADC Sample rate	48kHz@24bit

- 음향파 계측기를 활용한 터널 바닥부의 건전도 상태를 검토하기 위해 Sonalyser 계측 구간과 동일한 위치에 계측을 수행하였다. 균열 발생지점을 중심으로 총 4개 포인트를 선정함에 따라 터널 바닥부에는 총 12개 지점에 대한 계측 및 건전도 평가를 수행하였다.

㉠ 수도권 A(인버트)

- 수도권 A구간은 인버트 구조로 바닥부를 폐합하였으며 터널 하부는 콘크리트 재료로 채움시공을 하였다. 해당 구간은 인버트 설치 구간으로 궤도 하부 또한 콘크리트 채움으로 형성되어 전달 재료로 인한 파의 손실이 없을 것으로 판단하여 평균 중심주파수 12.003kHz를 기준으로 궤도 하부의 결함 및 공동 여부를 파악하고자 하였다.

표 2.10 계측지점별 중심주파수(수도권 A)

건전지수 / 계측지점		1point	2point
보조도상 (상선)	도상 인접부	12.010kHz	12.034kHz
	중심부	12.037kHz	12.057kHz
	공동구 인접부	12.003kHz	12.043kHz
평균 중심주파수		12.031kHz	

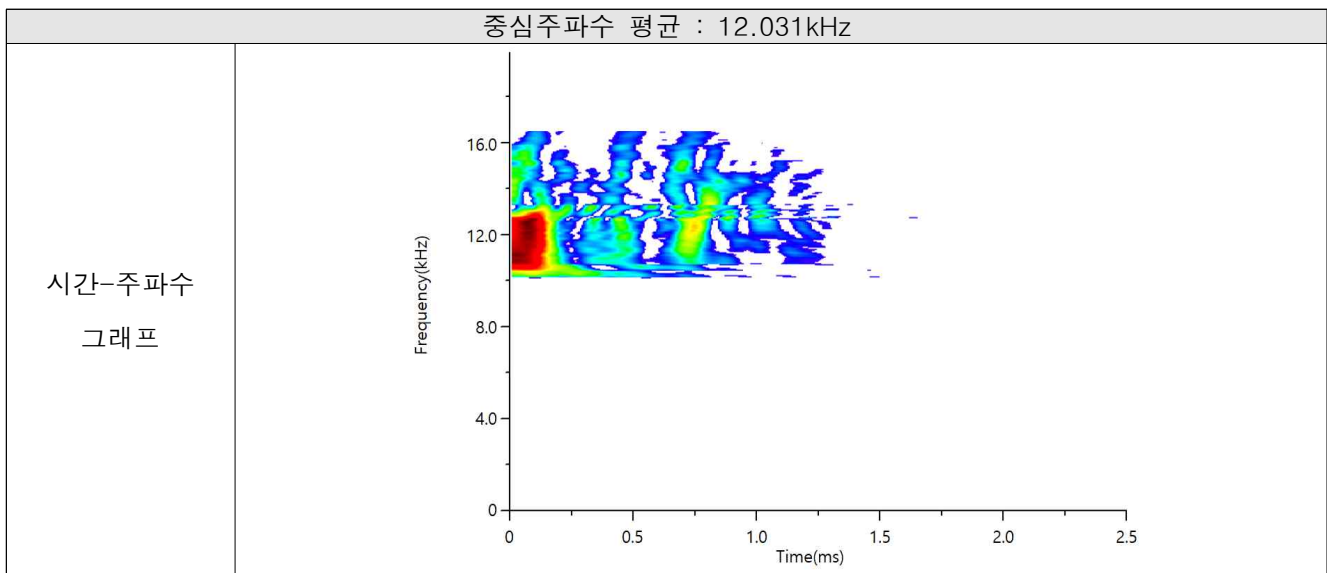


그림 2.37 음향계측 평균값 결과(수도권 A)

㉔ 수도권 B(측면배수)

- 계측지점별 중심진동수 결과를 표 2.11과 같이 산출하였다. 해당 구간의 손상영역이 GPR 조사 결과 90cm까지 나타났으며 중심주파수 평균 8.642kHz로 기준값 12.031kHz보다 현저히 낮게 나타났다.

표 2.11 계측지점별 중심주파수(수도권 B)

건전지수 / 계측지점		1point	2point	3point	4point
보조도상 (상선)	도상 인접부	8.656kHz	8.602kHz	8.693kHz	8.658kHz
	중심부	8.606kHz	8.613kHz	8.629kHz	8.690kHz
	공동구 인접부	8.616kHz	8.638kHz	8.640kHz	8.662kHz
평균 중심주파수		손상영역 90cm 측정(8.642kHz) / 기준(12.031kHz) : 결함 및 공동 예상(N.G)			

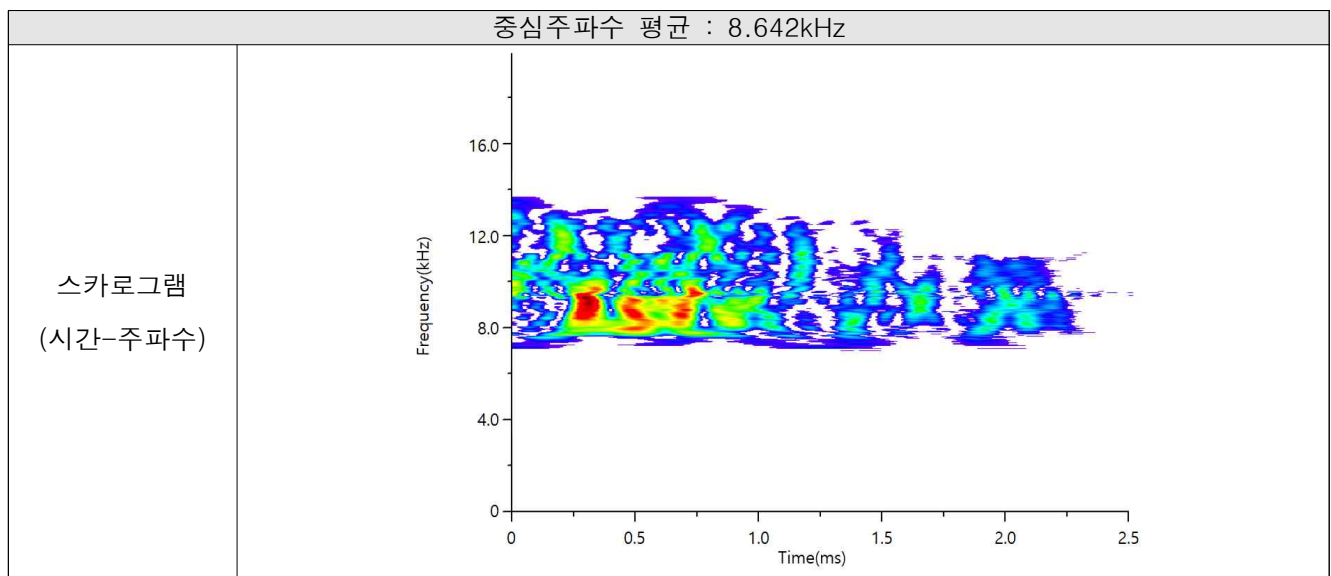


그림 2.38 음향계측 평균값 결과(수도권 A)

㉕ 수도권 C(중앙배수)

- 계측지점별 중심진동수 결과를 표 2.12와 같이 산출하였다. 해당 구간의 손상영역이 GPR 조사 결과 110cm까지 나타났으며 중심주파수 평균 7.952kHz로 기준값 12.031보다 현저히 낮게 나타났다.

표 2.12 계측지점별 중심주파수(수도권 C)

건전지수 / 계측지점		1point	2point	3point	4point
보조도상 (상선)	도상 인접부	7.930kHz	7.998kHz	7.952kHz	7.950kHz
	중심부	7.938kHz	7.940kHz	7.909kHz	7.922kHz
	공동구 인접부	7.994kHz	7.990kHz	7.992kHz	7.908kHz
평균 중심주파수		손상영역 110cm 측정(7.952kHz) / 기준(12.031kHz) : 결함 및 공동 예상(N.G)			

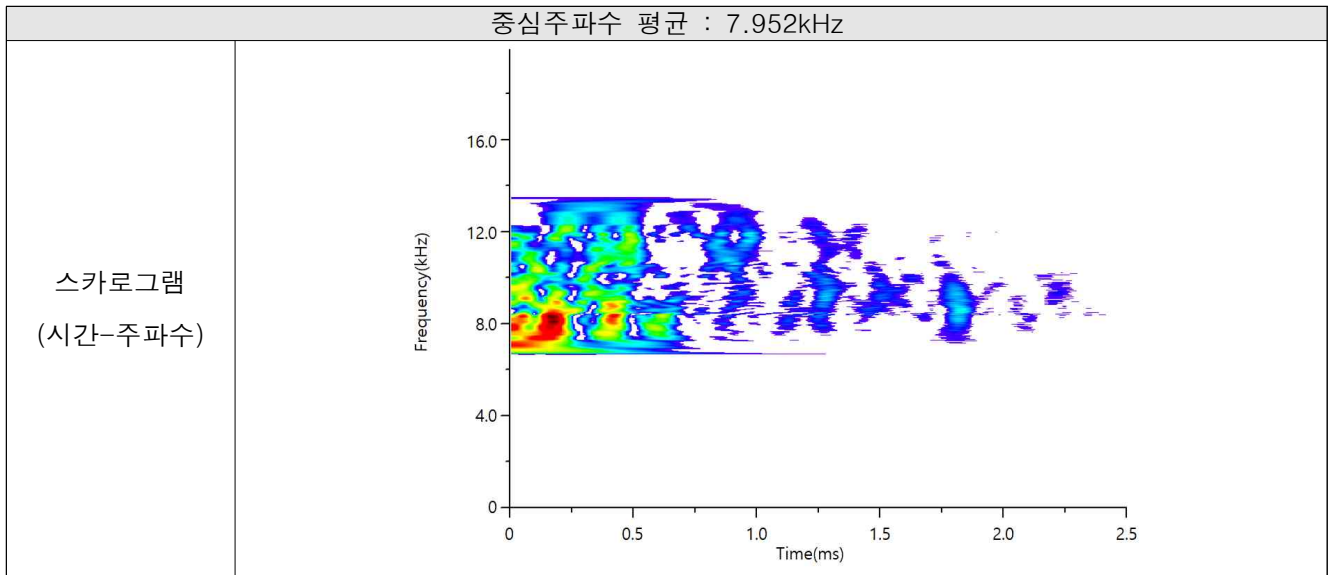


그림 2.39 음향계측 평균값 결과(수도권 C)

㉠ 강릉선 A(중앙배수)

- 계측지점별 중심진동수 결과를 표 2.13과 같이 산출하였다. 해당 구간의 손상영역이 GPR 조사 결과 110cm까지 나타났으며 중심주파수 평균 8.053kHz로 기준값 12.031보다 현저히 낮게 나타났다. 또한 손상영역 110cm 구간인 수도권 C 구간 평균 중심주파수 7.952와 비슷한 값을 나타냈다.

표 2.13 계측지점별 중심주파수(강릉선 A)

건전지수 / 계측지점		1point	2point	3point	4point
보조도상 (상선)	도상 인접부	8.095kHz	8.093kHz	8.036kHz	8.082kHz
	중심부	8.046kHz	8.047kHz	8.072kHz	8.008kHz
	공동구 인접부	8.045kHz	8.005kHz	8.059kHz	8.049kHz
평균 중심주파수		손상영역 110cm 측정(8.053kHz) / 기준(12.031kHz) : 결합 및 공동 예상(N.G)			

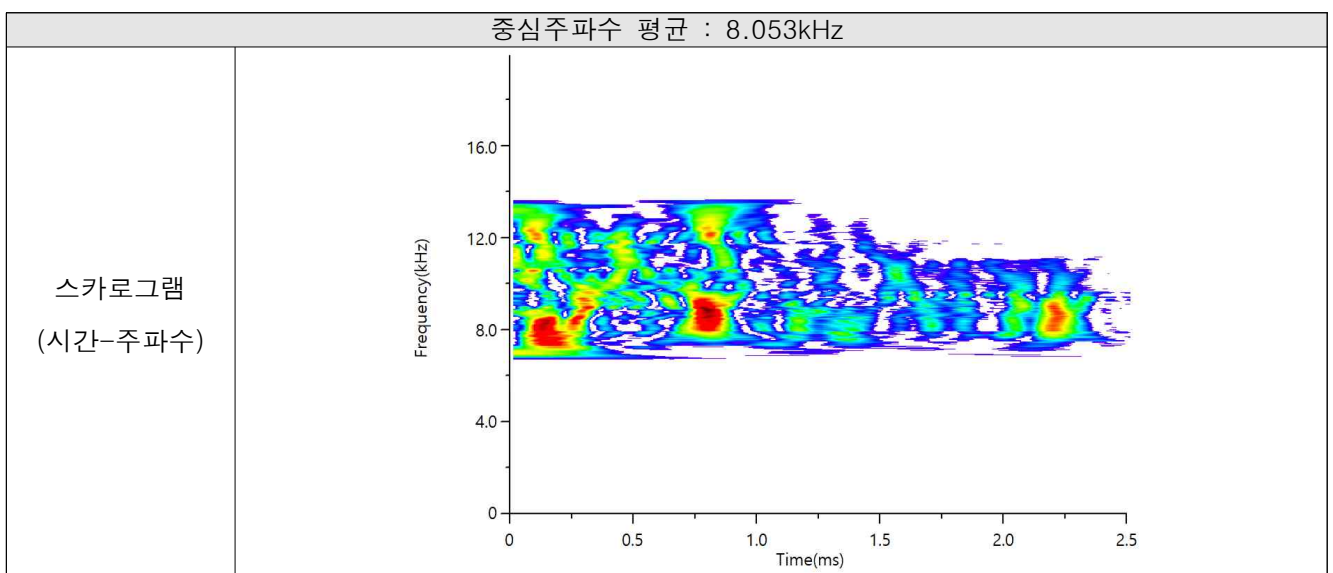


그림 2.40 음향계측 평균값 결과(강릉선 A)

㉠ 수도권 C(중앙배수)

- 계측지점별 중심진동수 결과를 표 2.14와 같이 산출하였다. 해당 구간의 손상영역이 GPR 조사 결과 Point 1번측은 90cm, Point 4번측은 110cm까지 나타났으며, 중심주파수 평균 8.076kHz로 기준값 12.031보다 현저히 낮게 나타났다. Point 4번의 경우 평균 8.076로 Point 1~3 대비 중심주파수 영역이 크게 나타났으며 이는 손상영역 깊이의 차이로 인해 나타나는 차이로 판단된다.

표 2.14 계측지점별 중심주파수(강릉선 B)

건전지수 / 계측지점		1point	2point	3point	4point
보조도상 (상선)	도상 인접부	7.866kHz	7.856kHz	7.970kHz	8.644kHz
	중심부	7.827kHz	7.841kHz	8.000kHz	8.534kHz
	공동구 인접부	7.875kHz	7.888kHz	7.924kHz	8.664kHz
수도권 A 평균 중심주파수		손상영역 90cm/110cm 측정(8.076kHz) / 기준(12.031kHz) : 결함 및 공동 예상(N.G)			

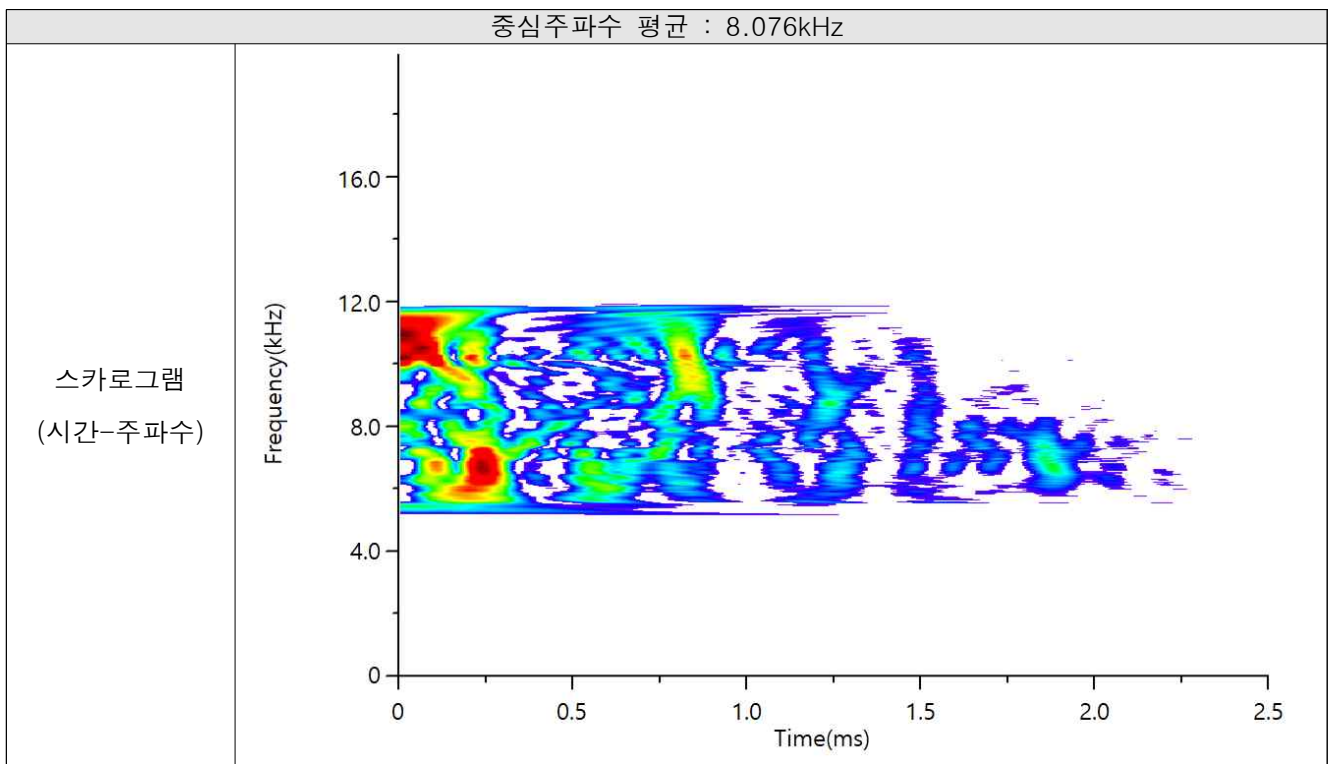


그림 2.41 음향계측 평균값 결과(강릉선 B)

○ 현장 지반상태 조사 소결

- 본 장에서는 여굴두께 및 상태를 검토하고자 시공자료, GPR 탐사, 음향파 분석을 수행하였으며 그 결과는 다음과 같다.
- 수도권 및 강릉선 시공자료에 따르면 여굴 발생 두께 30~90cm로 조사되었으나 실제 GPR 탐사 결과 각 구간에서의 깊이 90~110cm까지 손상영역으로 나타났다. 이는 발파 후 슬라임 등을 제거하고 시공 중 파쇄대 지반 및 발파로 인해 기반암을 제거하는 과정에서 늘어났을 것으로 판단된다.
- GPR 탐사를 통해 여굴 발생에 따른 손상영역 깊이 검토만으로는 터널하부상태와 열차 반복하중에 따른 동적거동간의 관계를 분석하는데 한계가 있다. 이에 기존 ‘음향분석기법을 이용한 지하구조물 비파괴 조사 기술개발(2002)’에 의해 선행된 Sonalyser를 통한 건전지수 평가를 수행하였다. 해당 보고서에 따르면 콘크리트 30cm 두께 기준으로 건전부 건전지수는 88.5~91.5이며, 결함 및 공동부는 그 이하의 값이 산정되었

다. 본 계측 구간의 경우 보조도상이 30cm 두께로 일괄되게 시공됨에 따라 본 기준 값을 이용하여 구간별 터널하부의 건전지수를 평가하였다.

- 계측결과 인버트 구간의 건전지수는 94.2로 건전부에 해당되었으나, 손상영역 90~110cm로 조사된 수도권 및 강릉선 문제 구간의 경우 평균 건전지수가 75~89로 기준 91.5에 만족되는 값을 보이지 못했다. 이에 수도권 및 강릉선 문제 구간 모두 결함 또는 공동 예상 구간으로 판정되었다.

- 또한 추가적으로 여굴두께에 따른 정량화 기법 개발을 목표로 STFT(Short Time Fourier Transform)를 추가적으로 수행하였으며, 그 결과 궤도 하부가 콘크리트로 이루어진 인버트 구간의 중심주파수 12.031kHz 대비 수도권 및 강릉선 문제 구간의 중심주파수는 7~9kHz로 현저히 낮게 나타났다. 이는 콘크리트 하부의 잡석채움 및 공동의 존재로 인해 타격에 의한 음향파가 일부 반사되어 손실되어 나타난 결과로 판단된다. 또한 수차례의 계측결과로 인해 콘크리트 채움의 경우 12kHz, 손상영역 90cm의 경우 중 8kHz, 손상영역 110cm의 경우 8.5kHz 정도 영역에서 중심주파수를 형성하였다. 이를 통해 추후 궤도 하부상태 평가에 참고하면 될 것으로 판단된다.

○ 본 절에서는 구간별 계측지점의 궤도 하부상태 평가를 통해 터널 하부상태를 평가하였다. 다음 절에서는 선정된 계측지점을 중심으로 터널 하부 위치(도상/보조도상/공동구)별 진동가속도를 계측함에 따라 여굴 부지반상태에 따른 터널하부에 전달되는 진동 전파형태의 관계를 검토하고자 하였다.

(3) 열차운행에 따른 진동가속도 계측

- 열차에 의해 발생된 진동은 궤도 및 하부지반을 통해 전달되는데, 안정적인 구조에서는 기하학적인 전파와 감쇠현상 등으로 인해 진동원에서 거리가 멀어질수록 진동이 점차 감소하는 형태로 나타난다. 터널의 경우 표면파가 진동원에서 터널 벽체로 이동하면서 비균질한 매체를 만나거나, 터널 하부 강성도가 낮을수록 진동에 대한 구조물 변상 가능성은 높아진다.

- 본 연구에서는 터널 설계 방법에 따른 각 구간별 터널 하부 위치(도상/보조도상/공동구)의 진동가속도를 계측함에 따라 여굴부 상태와 터널하부에 전달되는 진동 전파형태의 관계를 비교 검토하고자 하였다.

가. 현장계측 개요

㉠ 열차 진행에 따른 진동방향 정의

- 현장 가속도 계측을 통해 진동의 전파 형태를 분석하고자 3차원에서의 방향은 나타내었으며 열차진행 방향을 기준으로 그림 2.42와 같이 정의하였다. 열차 진행방향을 x방향, 공동구 벽체까지 전달되는 방향을 y방향, 수직으로 거동하는 방향을 z방향으로 지정하고, 열차 운행에 따라 진동의 전파 방향들을 분류하여 분석하였다.

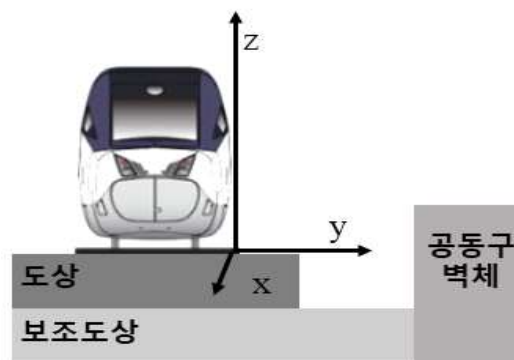


그림 2.42 열차 진행에 따른 방향 정의

㉡ 계측지점 및 장비제원

- 열차운행에 따라 발생하는 터널의 동적거동은 진동방향에 따라 나눌 수 있는데, 열차 운행방향과 동일한 압축파형 보다는 전단방향의 파형에 대한 영향이 크게 발생함에 따라 수직방향(z)에 따른 수평방향(y)의 거동을 검토하고자 아래 그림 2.43과 같이 위치별 진동가속도계를 설치하였으며, 각 방향에 대한 진동 파형형태를 검토하고자 하였다.

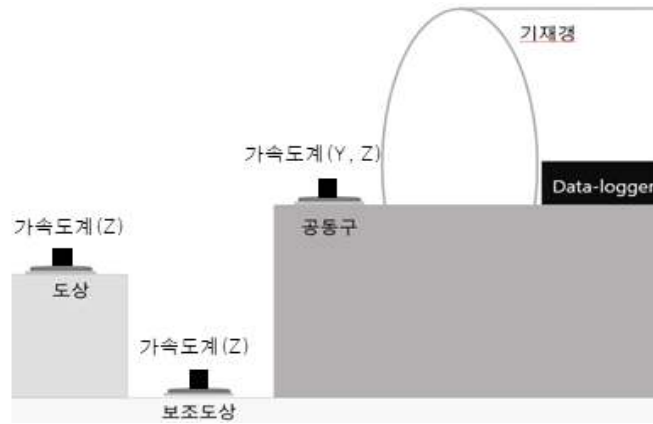


그림 2.43 터널하부 위치별 가속도계 방향

- 열차운행에 따른 진동파형 형태를 검토하기 위해 터널 하부 위치별 가속도계를 설치하였으며, 열차의 차량 편성수, 속도, 레일저부응력 등을 검토하기 위해 레일 저부에 1축 스트레인 게이지를 부착하였다. 본 연구에서 사용한 계측장비와 설치 전경은 다음의 그림 2.44에 나타냈으며, 계측장비 제원은 그림 2.45, 표 2.15~2.17에 나타내었다.

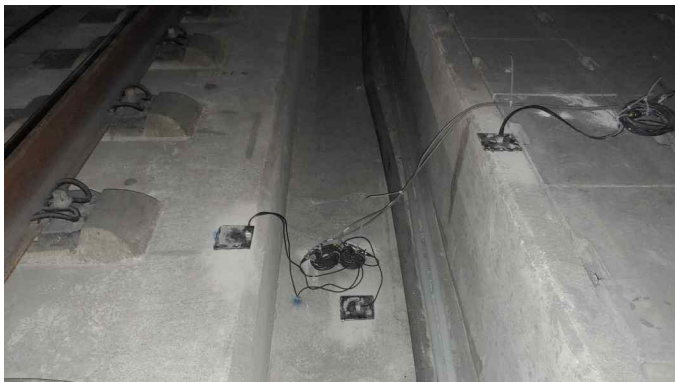


그림 2.44 터널내 계측장비 설치전경



(a) 가속도계



(b) Strain gauge



(c) Data Logger

그림 2.45 계측장비

표 2.15 가속도계 제원

Model	4610-010-060	Sensitivity	1000
Range(g)	±2	Non linearity(%FSO)	±0.5
Natural Frequency(Hz)	700	Frequency response(Hz)	0 ~ 200Hz
Shock Limit(g)	10000	Output resistance(Ω)	<100
Excitation Voltage(mV)	8 to 36	Operating Temperature	-55 to 125 °C

표 2.16 Strain Gauge 제원

Model	FCA-5-11	Calibration coefficient	2.11±1%
Input resistance(Ω)	120±0.5	Output resistance	±0.1%

표 2.17 DATA Logger 제원

Model	A.bloxxA107		
Channel	24	Power	AC 220V
Measure Hz	S channel/sec	Program	S/W Test.commander

② 터널하부 진동가속도 계측 및 분석

- 여굴 처리방법 및 터널 하부상태와 관련하여 열차운행시 발생하는 터널의 거동을 검토하기 위해 터널 설계 방안에 따라 나누어 검토하였으며 그에 따른 진동의 파형은 다음과 같다.

㉞ 수도권 A(인버트)

- 인버트 구간의 경우 인버트 하부 중앙배수로 설계되었으며, 하부 깊이 100cm 이상 콘크리트 채움으로 시공됨에 따라 상·하선 관계없이 열차운행에 따른 진동이 보조도상과 하부지반의 일체거동으로 인해 안정적인 감쇠가 이루어 질 것으로 판단된다. 따라서 그림 2.46과 같이 상선의 30m 간격을 두고 총 2 지점을 계측하였다.

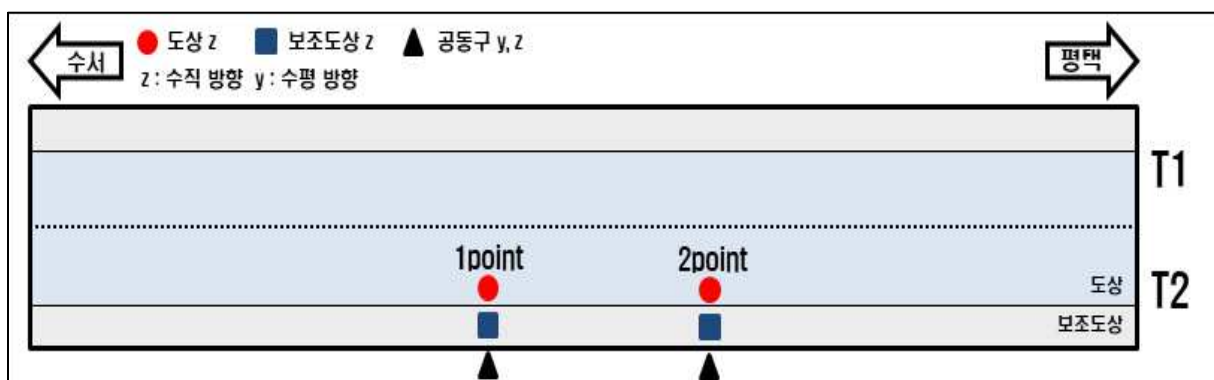


그림 2.46 수도권 A(인버트) 가속도 계측 위치

- 본 구간의 운행되는 열차의 편성수 및 열차속도 등을 검토하기 위해 레일저부에 1축 스트레인 게이지를 부착하여 계측하였다. 그 결과, 그림 2.47과 같이 주로 170km/h 시속의 열차가 운행하고 있으며 객차는 총 7량으로 편성되어 있고, 저부 응력은 35.7~37.8MPa로 측정되었다.

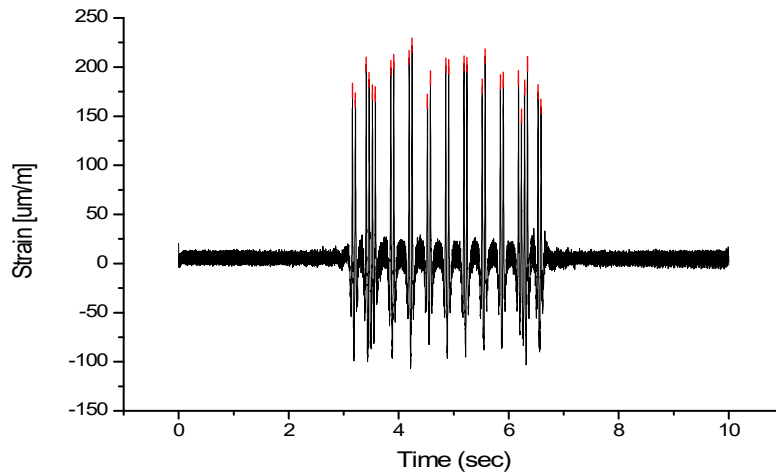


그림 2.47 레일 변형률 계측 결과(수도권 A)

- 계측 위치별 진동가속도 계측결과, 그림 2.47과 같이 열차운행에 따른 진동원이 터널 벽체로 이동하면서 진동가속도는 0.1g 이하의 값으로 감소됨에 따라 열차진동이 점차적으로 감쇠되는 경향이 나타났다.

- 본 구간은 터널하부를 최소 100cm 이상 콘크리트로 타설하였으며, 지반조사 결과 평균 건전지수는 93.2로 터널 하부상태가 매우 양호할 것으로 판단된다. 또한 열차진동에 따른 진동가속도는 터널 벽체로 이동하면서 감쇠되는 파형을 나타남에 따라 여굴에 따른 안정적인 구조 형태의 계측자료로 활용이 가능할 것으로 판단된다.

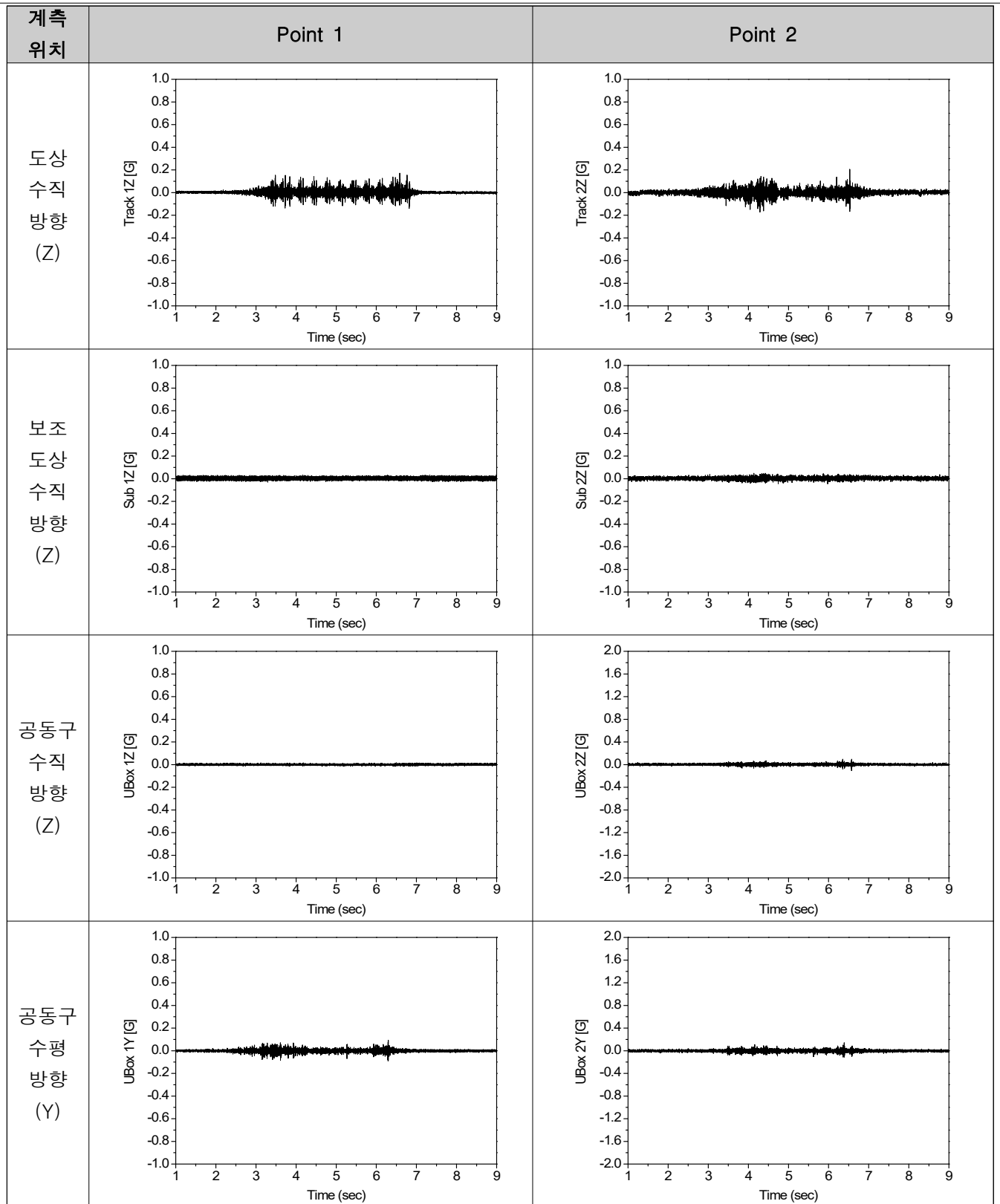


그림 2.48 수도권 A(인버트) 가속도 계측 결과

㉔ 수도권 B(측면배수)

- 수도권 B 구간의 경우 공기의 문제로 인해 측면배수로 설계되었으며, 보조도상 시공조인트를 중심으로 궤도 하부 전체가 균열됨에 따라 그림 2.49와 같이 변상 구간을 기점으로 좌우 약 1m, 15m 간격으로 총 4지점을 계측하였다.

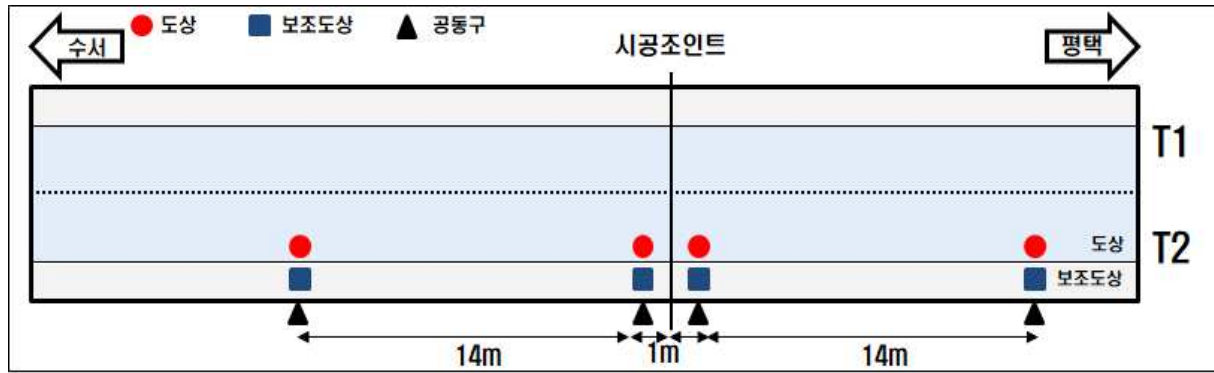


그림 2.49 수도권 B(측면배수) 가속도 계측 위치

- 본 구간의 운행되는 열차의 편성수 및 열차속도 등을 검토하기 위해 레일저부에 1축 스트레인 게이지를 부착하여 계측하였다. 그 결과, 그림 2.50과 같이 주로 170km/h 시속의 열차가 운행하고 있으며 객차는 총 7량으로 편성되어 있고, 저부 응력은 35.7~42MPa로 측정되었다.

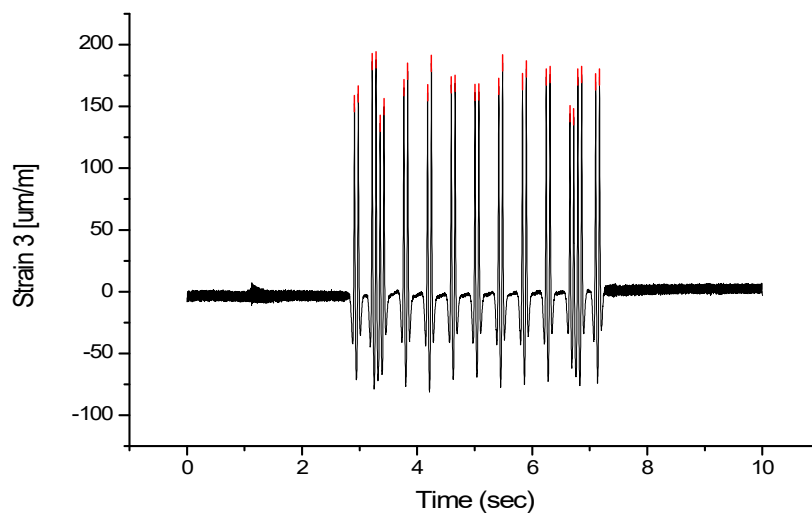


그림 2.50 레일 변형률 계측 결과(수도권 B)

- 계측 위치별 진동가속도 계측결과, 그림 2.51과 같이 하선 변상 구간 열차운행에 따른 진동원이 터널 벽체로 이동하면서 수직방향으로 전파되는 진동가속도는 점차적으로 감소되어 나타났다. 그러나 공동구 지점에서 수평방향 진동가속도가 수직방향에 비해 약 2.8~4.6배 정도 크게 나타났으며, 이는 궤도 하부가 측면배수로 설계됨에 따라 잡석 구간을 진동가속도가 전파하면서 열차진동에 따른 공동구 수평방향의 진동이 증폭되었을 것으로 판단된다.

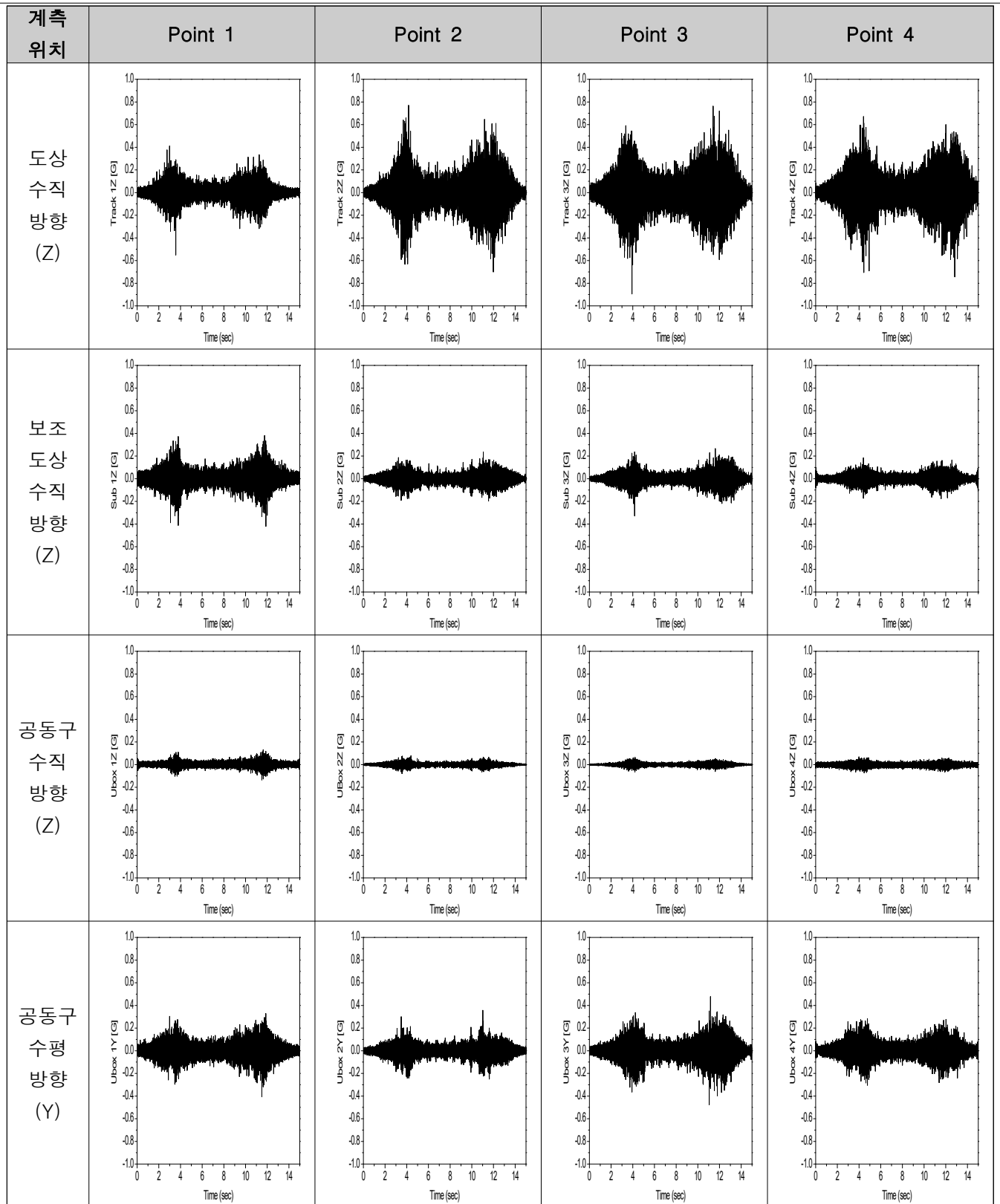


그림 2.51 수도권 B(측면배수) 가속도 계측 결과

㉔ 수도권 C(중앙배수)

- 수도권 C 구간의 경우 중앙배수로 설계되었으며, 보조도상 시공조인트를 중심으로 궤도 하부 전체가 미세하게 균열됨에 따라 그림 2.52와 같이 변상 구간을 기점으로 좌우 약 1m, 15m 간격으로 총 4지점을 계측하였다.

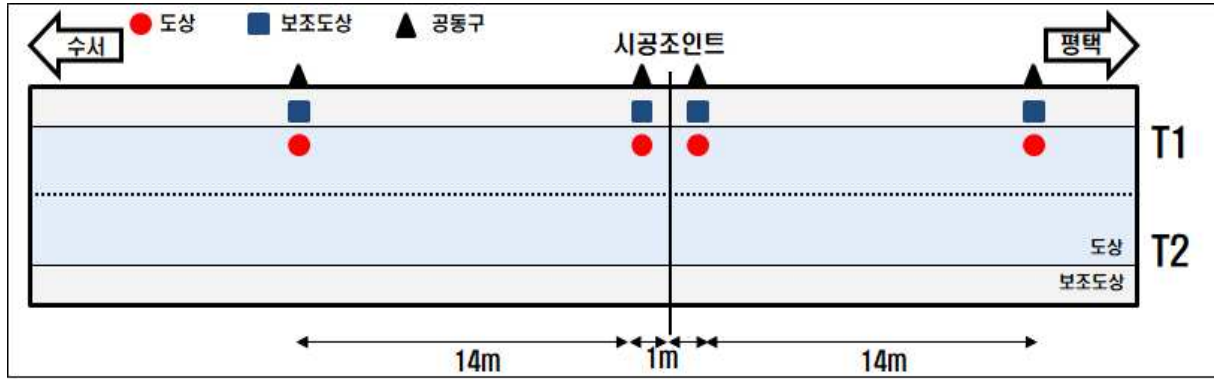


그림 2.52 수도권 C(중앙배수) 가속도 계측 위치

- 본 구간의 운행되는 열차의 편성수 및 열차속도 등을 검토하기 위해 레일저부에 1축 스트레인 게이지를 부착하여 계측하였다. 그 결과, 그림 2.53과 같이 주로 170km/h 시속의 열차가 운행하고 있으며 객차는 총 7량으로 편성되어 있고, 저부 응력은 35.7~37.8MPa로 측정되었다.

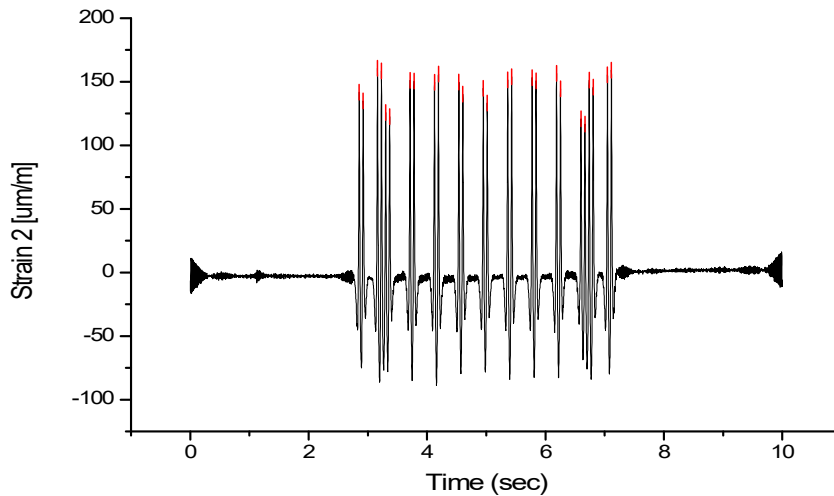


그림 2.53 레일 변형률 계측 결과(수도권 C)

- 계측 위치별 진동가속도 계측결과, 그림 2.54와 같이 상선 변상 구간 열차운행에 따른 진동원이 터널 벽체로 이동하면서 수직방향으로 전파되는 진동가속도는 점차적으로 감소되어 나타났다. 그러나 공동구 지점에서 수평방향 진동가속도가 수직방향에 비해 약 1.9~3.6배 정도 크게 나타났으며, 이는 궤도 하부가 손상영역 110cm 존재로 인해 진동가속도가 전파하면서 열차진동에 따른 공동구 수평방향의 진동이 증폭되었을 것으로 판단된다.

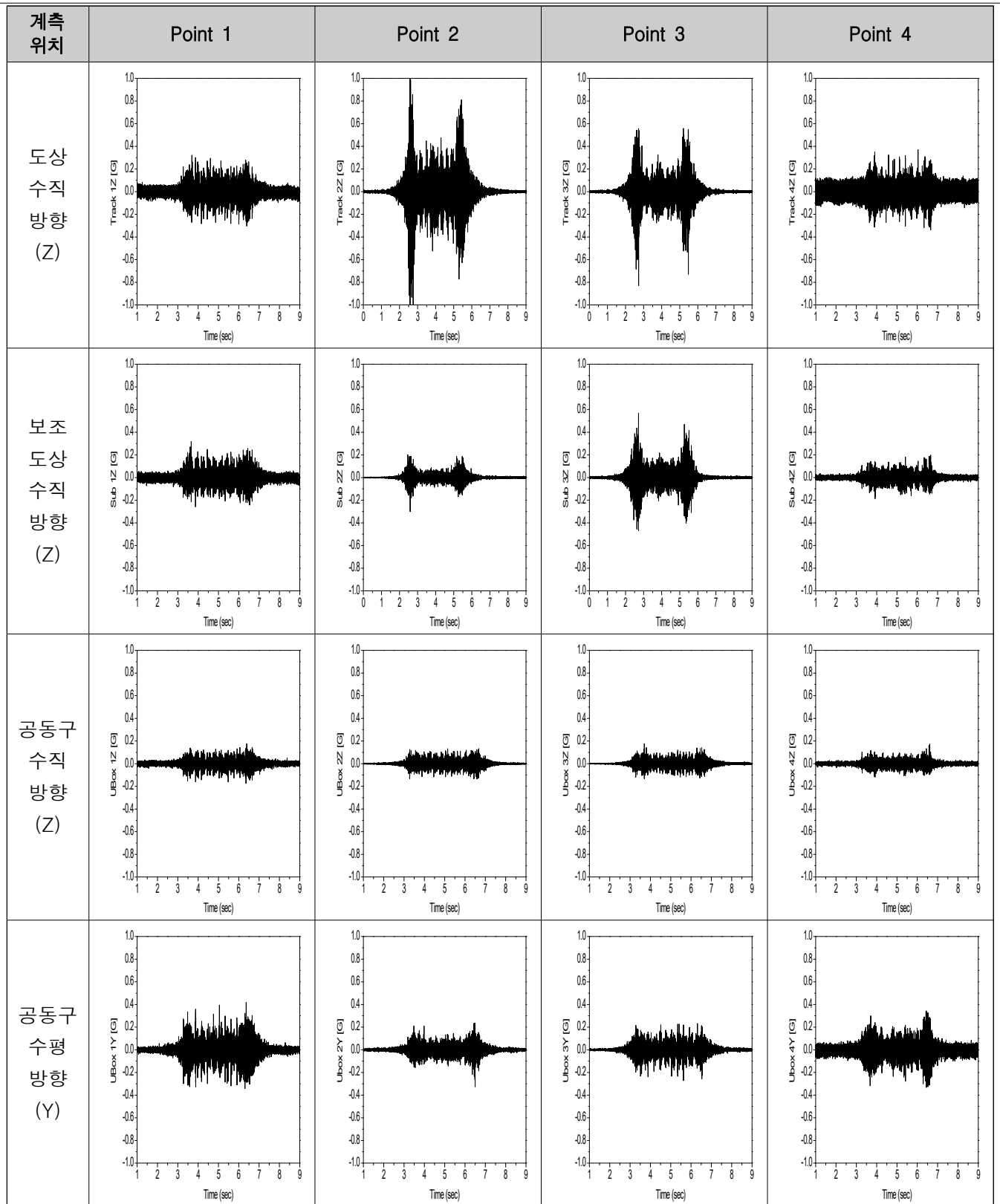


그림 2.54 수도권 C(중앙배수) 가속도 계측 결과

㉠ 강릉선 A(중앙배수)

- 강릉선 A 구간의 경우 보조도상 시공조인트 인근의 궤도 하부 전체가 균열됨에 따라 그림 2.55와 같이 보조도상 시공조인트를 기점으로 좌우 약 15m 간격으로 총 3지점을 계측하였다.

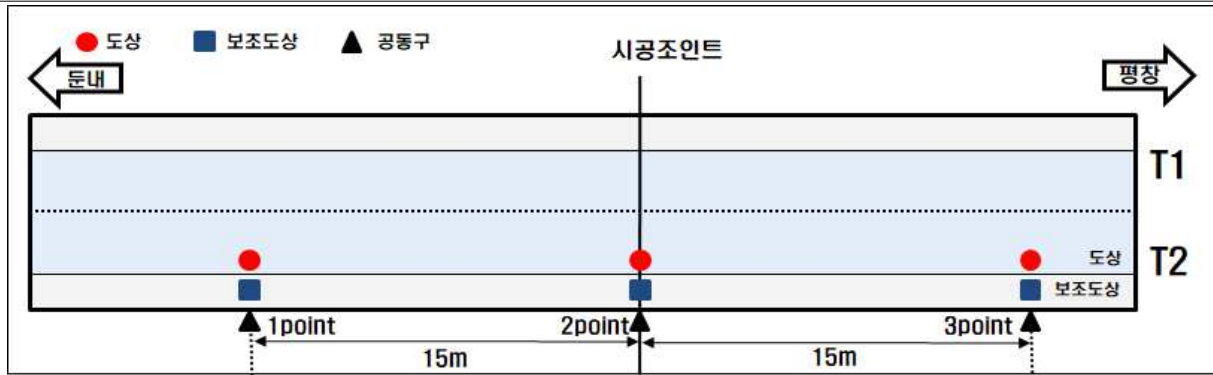


그림 2.55 강릉선 A(중앙배수) 가속도 계측 위치

- 본 구간의 운행되는 열차의 편성수 및 열차속도 등을 검토하기 위해 레일저부에 1축 스트레인 게이지를 부착하여 계측하였다. 그 결과, 그림 2.56과 같이 주로 140km/h 시속의 열차가 운행하고 있으며 객차는 총 7량으로 편성되어 있고, 저부 응력은 24.8~45.5MPa로 측정되었다.

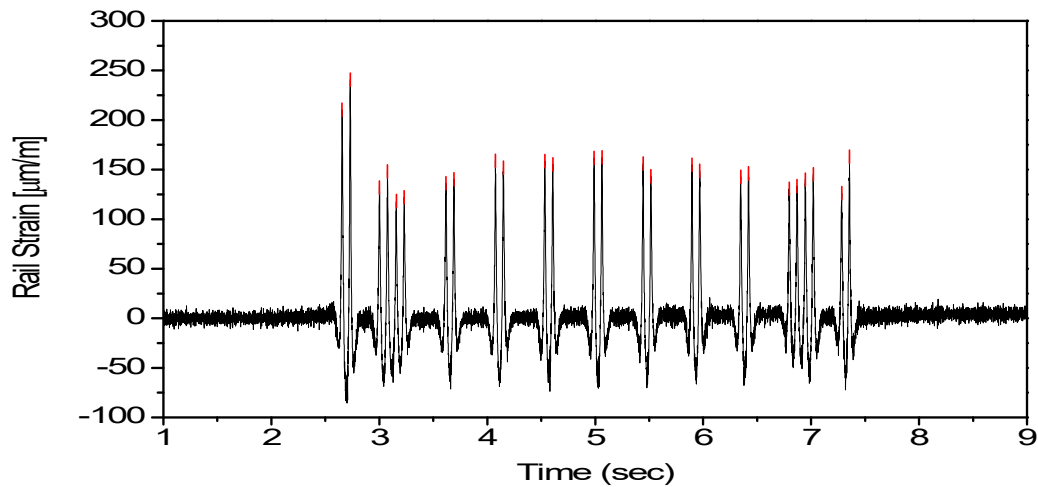


그림 2.56 레일 변형률 계측 결과(강릉선 A)

- 궤도 진동가속도 계측결과 그림 2.57과 같이 나타났으며 열차운행에 따른 진동원이 터널 벽체로 이동하면서 점차적으로 가속도가 감소하는 경향으로 나타날 것으로 예상하였으나 도상과 보조도상의 이격으로 인해 보조도상의 가속도가 거의 감소되지 않았다. 특히 Point 3 구간의 경우 보조도상 가속도가 더 크게 나타났으며 이는 두 층간의 충격이 진동가속도 증폭으로 이어진 것으로 사료된다.

- 그림 2.57과 같이 공동구 진동가속도 계측결과 궤도 하부 손상영역 존재로 진동가속도가 증폭되면서 공동구 지점에서 수평방향 진동가속도가 수직방향에 비해 약 2.3~4.0배 정도 크게 나타났다.

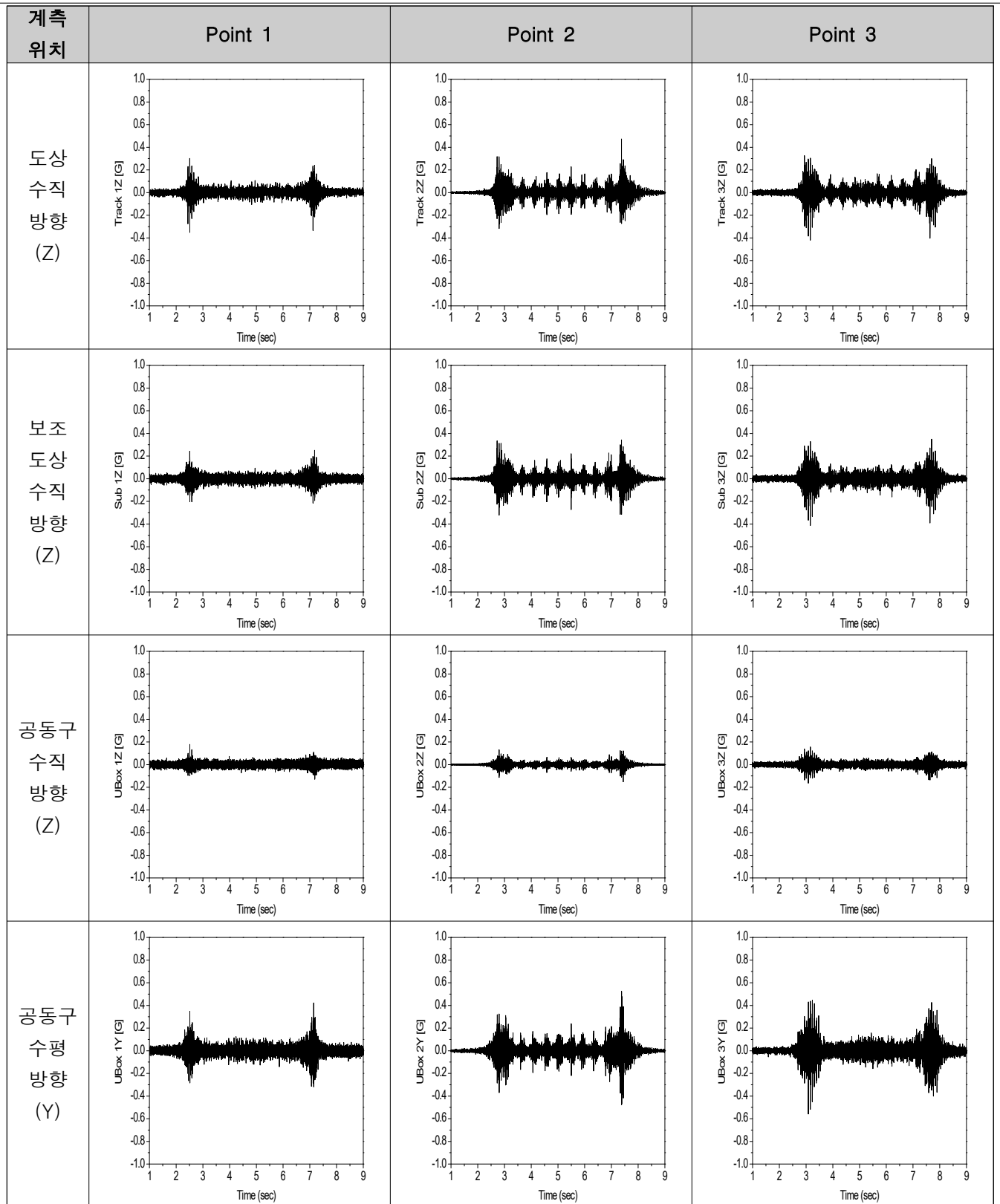


그림 2.57 강릉선 A(중앙배수) 가속도 계측 결과

㉠ 강릉선 B(중앙배수)

- 강릉선 B 구간의 경우 보조도상 시공조인트를 중심으로 궤도 하부 전체가 균열됨에 따라 그림 2.58 과 같이 보조도상 시공조인트를 기점으로 좌우 약 20m 간격으로 총 3지점을 계측하였다.

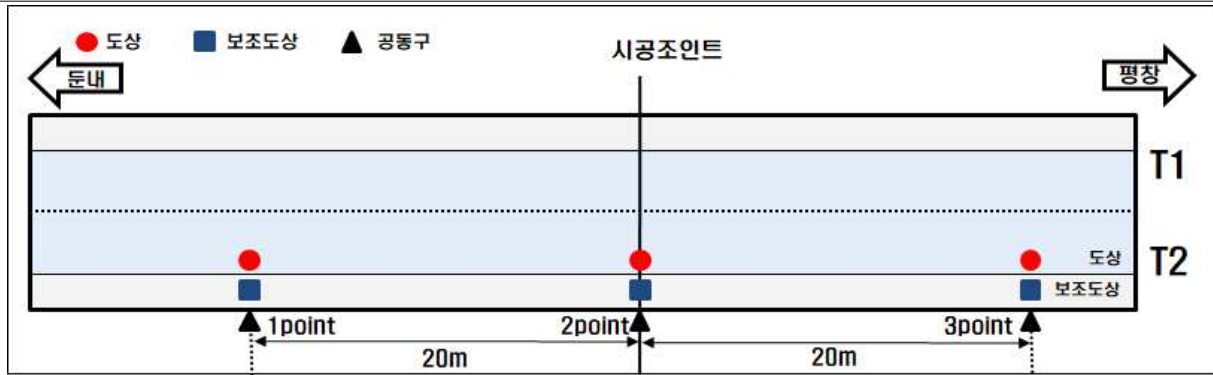


그림 2.58 강릉선 B(중앙배수) 가속도 계측 위치

- 본 구간의 운행되는 열차의 편성수 및 열차속도 등을 검토하기 위해 레일저부에 1축 스트레인 게이지를 부착하여 계측하였다. 그 결과, 그림 2.59와 같이 주로 220km/h 시속의 열차가 운행하고 있으며 객차는 총 7량으로 편성되어 있고, 저부 응력은 25.3~38.8MPa로 측정되었다.

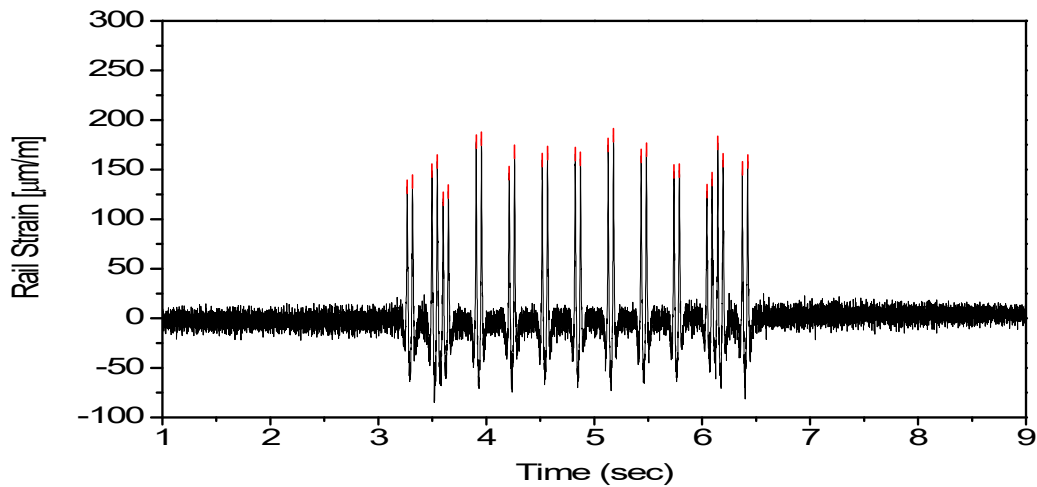


그림 2.59 레일 변형률 계측 결과(강릉선 B)

- 궤도 진동가속도 계측결과 그림 2.60과 같이 나타났으며 계측 구간 모두 열차운행에 따른 진동원이 터널 벽체로 이동하면서 점차적으로 가속도가 감소되는 것으로 나타났다. Point 2~Point 3 구간의 경우 손상영역 깊이가 늘어남에 따라 궤도에 전달되는 진동가속도가 증폭되어 나타났다.

- 그림 2.60과 같이 공동구 구간의 진동가속도 계측결과 강릉선 A 구간과 마찬가지로 궤도 하부 손상 영역의 존재로 진동가속도가 증폭되면서 공동구 지점에서 수평방향 진동가속도가 수직방향에 비해 약 1.7~2.9배 정도 크게 나타났으며 강릉선 B 구간 계측 구간내 손상영역 두께 최소 지점인 Point 1에서 수평/수직 진동가속도 비가 1.7배로 최소로 나타났다.

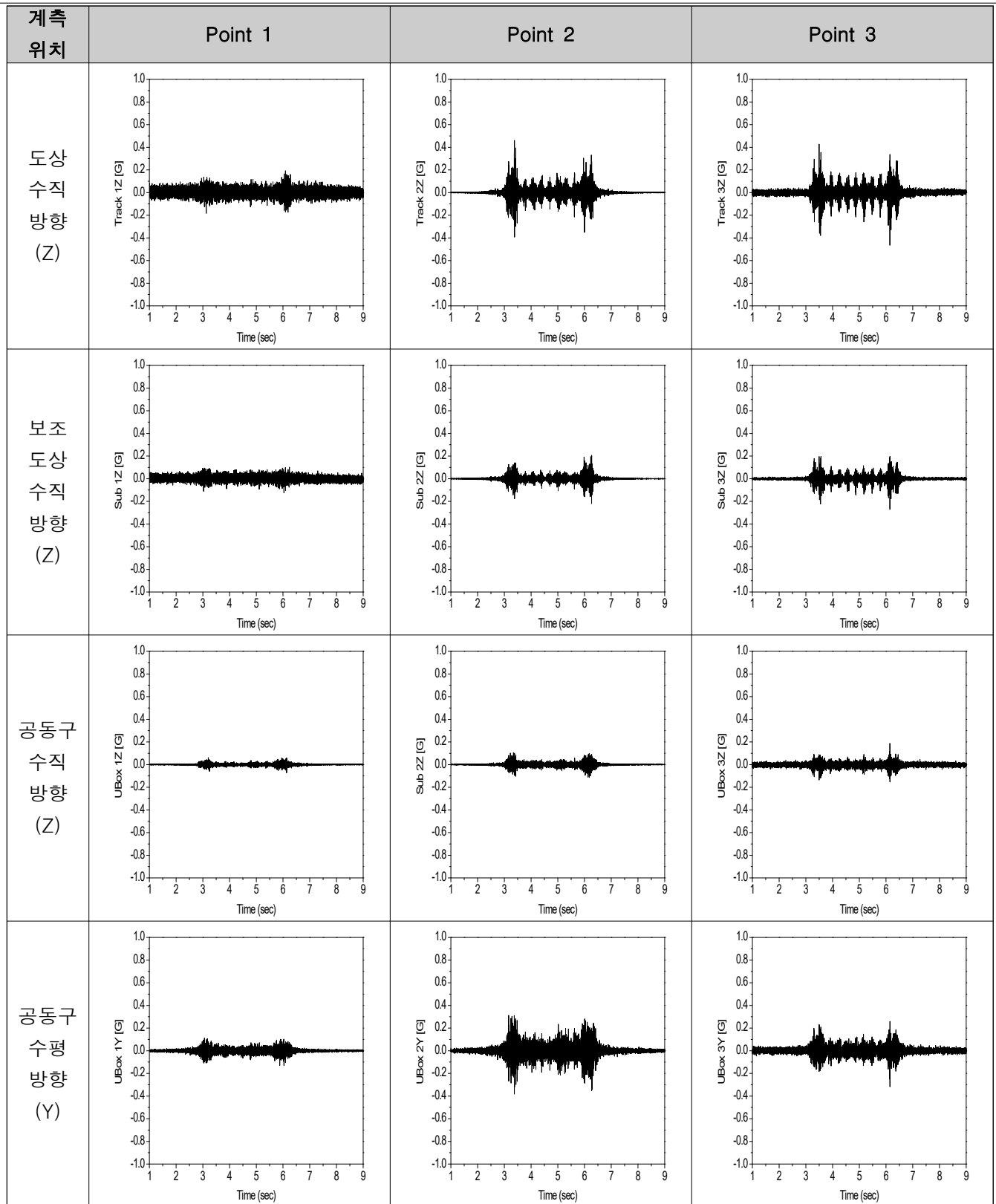


그림 2.60 강릉선 B(중앙배수) 가속도 계측 결과

○ 열차운행에 따른 진동가속도 계측 소결

- 본 절에서는 여굴 채움재에 따른 터널의 동적거동을 검토하기 위해 여굴 처리시 잡석을 사용한 구간과 콘크리트를 사용한 인버트 구간으로 분류하였으며 각 구간별 터널 하부 지반상태를 토대로 열차 운행에 따른 진동가속도를 계측함에 따라 터널 하부 여굴 채움재에 따른 진동 증폭의 크기를 검토하고자 하였다.
- 구간별 레일응력을 계측한 결과, 총 7량으로 구성된 열차를 평균 시속 약 170km/h로 운행하였으며, 계측한 5개 구간 모두 저부응력이 약 30~45MPa 이내로 측정되었다. 따라서 가진원에 대한 진동파형의 변화는 없는 것으로 판단된다.

- 인버트 구간의 경우 시공 특성상 보조도상(30cm) 하부에 콘크리트 채움을 최소 100cm 이상 균일한 매질로 시공함에 따라 열차진동에 따른 증폭크기가 궤도에서 공동구를 지나 터널 하부 지반까지 적절한 감쇠현상을 보였다.
- 터널의 동적거동을 분석한 결과, 전체적으로 여굴 처리방법을 잡석 채움을 타설할 경우 도상에서부터 공동구 벽체까지 전달되는 진동의 파형은 수직방향(Z)으로 감쇠하는 형상을 보이거나, 공동구 벽체에서 수평거리(y)에서 증폭하는 형태를 보이게 된다. 이는 터널 여굴 부분에 잡석으로 타설함에 따라 보조도상과 터널 하부 지반이 일체거동하지 않으며, 터널 하부 지지력 저하에 의해 진동이 증폭되는 것으로 판단된다.
- 여굴 처리를 잡석으로 처리한 문제 구간의 경우 각 구간별 손상영역 구간이 깊을수록 건전지수가 낮게 평가되었다, 또한 열차운행에 따라 터널 끝단으로 전달되는 진동은 공동구 수직방향에 대한 수평방향의 비가 최대 약 2~4배로 증폭되는 경향으로 나타났다. 이는 여굴 처리 방식에 따른 지반 강성 부족으로 인해 진동의 특정부분(공동구) 증폭을 초래하는 것으로 나타남에 다음 절에서는 앞서 분석된 결과를 이용한 수치해석을 통해 궤도 하부 여굴 채움재에 따른 진동특성 분석하고자 하였다.

(4) 수치해석을 통한 터널 바닥 진동특성 분석

가. 수치해석 개요

- 수도권 고속철도 및 강릉선 터널 시공 중 발생한 여굴에 대하여 버림콘크리트와 잡석을 병행한 채움으로 처리한 구간의 궤도 하부상태와 열차진동에 따른 궤도 진동특성 검토를 수행하였다. 그 결과 여굴 채움재의 강성이 낮거나 두께가 깊을수록 열차진동에 따른 터널 하부 진동이 증폭되는 현상을 확인하였다.
- 본 장에서는 계측된 현장계측값을 바탕으로 수치해석 검증을 수행하고 여굴 채움재(잡석/콘크리트/우레탄)에 따른 동적거동 영향 평가를 수행하고자 하였다. 해당 모델링을 통해 열차에 의한 궤도 진동 증폭이 변상 구간의 응력 초과 현상에 대한 규명을 수행하고자 한다.
- 앞선 데이터 분석을 수행한 수도권 고속철도 터널내 계측 구간을 대상으로 열차진동에 따른 진동전파 형상을 검토하기 위하여 MIDAS GTS NX 프로그램을 사용하여 수치해석을 수행하였다. 또한 열차하중에 의해 발생한 진동이 터널 주변 암반으로 전파되는 영향을 고려하여 터널 외부 주변 암반층 범위를 터널 상하좌우로 터널 반경의 6배 만큼까지 고려하여 모델링하였다.

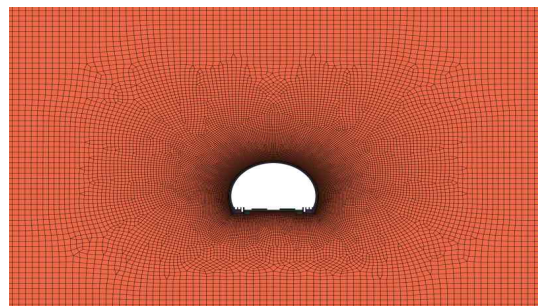
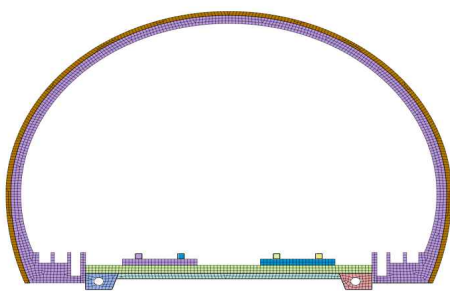


그림 2.61 수치해석 모델링

- 지반조건과 터널 단면은 계측 구간과 동일하게 수도권 고속철도 기존 설계 자료를 토대로 표 2.18과 같이 적용하였으며, 터널내 궤도 콘크리트 구조물 탄성계수는 콘크리트 구조설계기준(2012)을 이용하여 설계 강도에 따라 각각 산정하여 적용하였다. 또한 여굴부 구간 물성치는 해당 구간의 터널 바닥부 여굴 처리방안인 잡석 채움의 실내실험값으로 적용하였다.

표 2.18 수치해석 적용 물성치

구간	Model Type	단위중량 (kN/m ³)	탄성계수 (MPa)	포아송비	점착력 C(kPa)	내부마찰각 $\phi(^{\circ})$
Level V Rock	Mohr Coulomb	21	1,000	0.3	100	33
레일	Elastic	78.5	210,000	0.3	-	-
도상	Elastic	25	27,500	0.2	110	31
보조도상	Elastic	23.5	21	0.2	-	-
공동구	Elastic	24	26,700	0.2	-	-
콘크리트 라이닝	Elastic	24	26,700	0.2	-	-
여굴부	Mohr Coulomb	19	160	0.3	30	33

- 여굴부의 빈배합 시멘트 구간은 실제 터널 현장에서 수치해석 모델링처럼 정방형으로 이루어지지 않으며 비균일한 형태로 형성되어 있다. 이에 본 해석에서는 그림 2.62와 같은 비균일단면(Tapered Section) 적용을 통해 지정한 영역내의 임의형상을 변수로 두어 단면을 설정하였다.

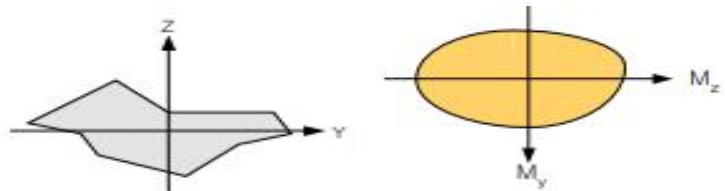


그림 2.62 비균일단면 형상

나. 현장계측값을 통한 수치해석 모델링 검증

① 수치해석 모델링 진동가속도 검증

- 궤도 하부에 따른 궤도 진동특성 검토를 위한 모델링 검증 수행을 하고자 궤도 하부 채움재 이외의 변수들을 제거하였으며 이에 사전에 계측하였던 수도권 고속철도내 측면배수로 설계된 구간의 상선 계측값을 사용하였다.
- 해당 구간의 터널 바닥부 여굴 발생 구간 조사 결과 보조도상 하부 손상영역 90cm로 조사되었으며 본 수치해석 모델링에서도 동일하게 90cm로 설정하였다.
- 수도권고속철도의 평균열차속도 170km/h를 적용시키는 것만으로 실제 터널내 궤도에 전달되는 진동가속도 구현이 어려움에 따라 터널 현장의 여러 환경 조건을 고려하여 그림 2.63과 같이 변상 구간에서 계측된 레일 응력을 수치해석상에 동일하게 적용하였다. 수치해석 모델링 열차 단선 운행 시 나타나는 진동가속도의 평균치와 실제 현장 진동가속도를 일치시켜 모델링 검증을 수행하였으며, 이에 따라 여굴부 구간의 채움 방식에 따른 궤도 진동특성을 분석하고자 하였다.

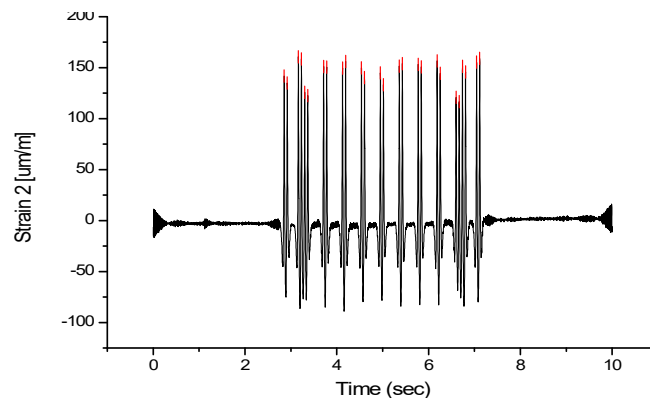


그림 2.63 수치해석 적용 레일응력

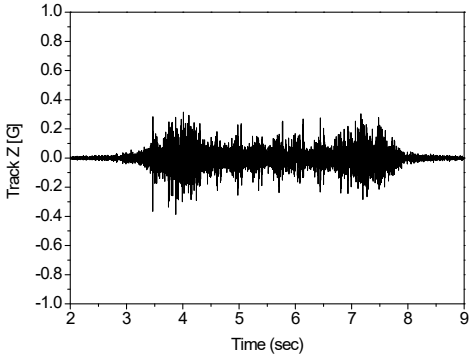
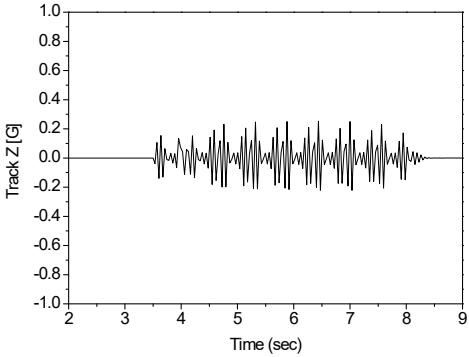
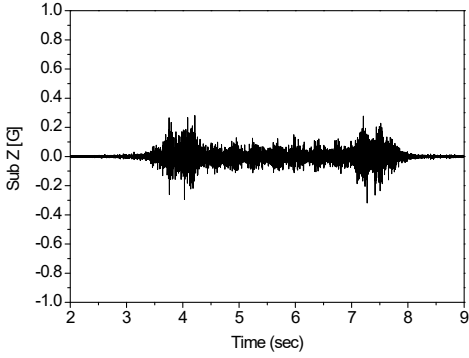
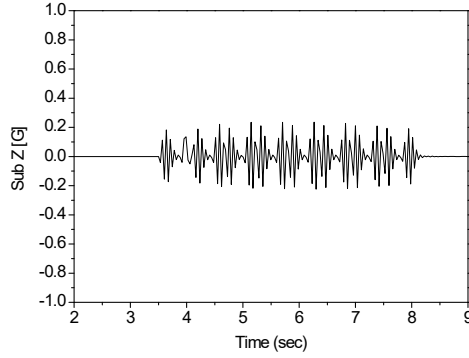
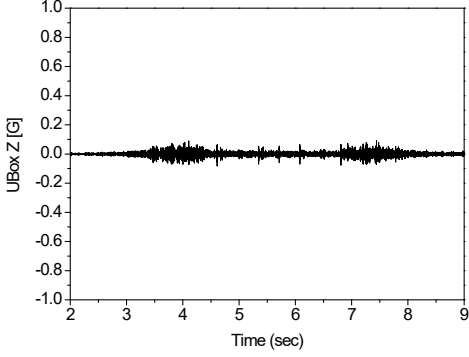
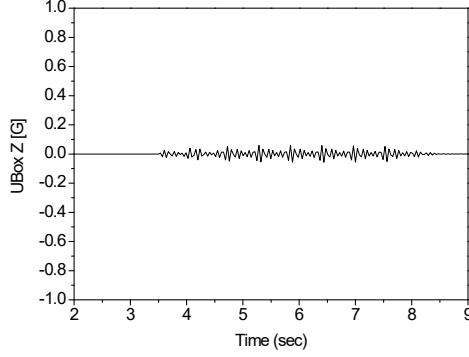
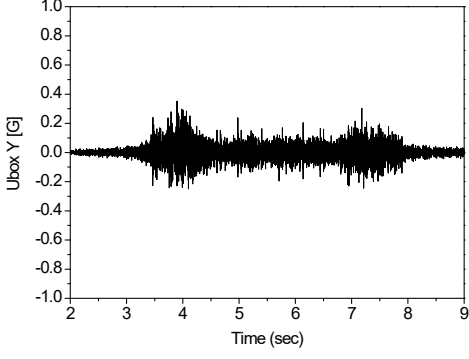
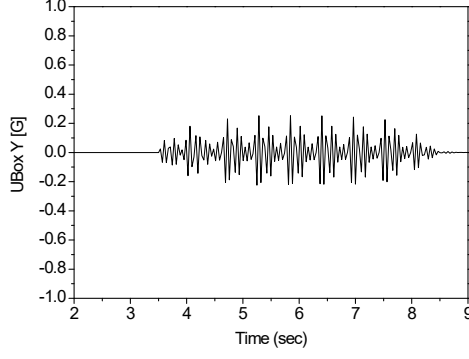
계측위치	현장계측	수치해석
도상 수직 방향 (Z)		
보조 도상 수직 방향 (Z)		
공동구 수직 방향 (Z)		
공동구 수평 방향 (Y)		

그림 2.64 수치해석 검증 결과

표 2.19 현장계측 및 수치해석 진동가속도 평균

위치(방향)	현장계측(G)	수치해석(G)
도상(Z)	0.121	0.120
보조도상(Z)	0.119	0.120
공동구(Z)	0.015	0.016
공동구(Y)	0.350	0.345

- 수행된 모델링의 수직 진동가속도는 그림 2.64와 같이 실제 계측값과 동일하게 터널 벽체로 이동함에 따라 감소되어 나타났으며, 궤도 하부 여굴부에 상대적으로 불균형한 매질층 존재로 인해 공동구 지점에 서 수평방향/수직방향 최대 진동가속도 비가 약 4.27배 크게 나타났다.

② 터널내 현장 구현 모델링 응력 검토

- 수치해석을 위한 모델링은 계측된 자료로 검증하였으며, 검증된 모델링을 이용하여 공동구 파손에 대한 원인을 분석하고자 하였다. 터널내 구조물에 작용 응력 증가로 이어져 구조물 파괴현상이 발생할 것으로 사료된다. 앞선 진동가속도 분석 결과 공동구 수평방향 진동가속도가 증폭되어 나타났으며, 공동구 벽체의 연성거동이 취성파괴로 이어지는 가능성을 고려하여 공동구 벽체 상부에 가해지는 전단응력 검토를 추가적으로 수행하였다.

- 국내 철도설계기준 및 콘크리트구조설계 기준에 따르면 설계강도 24MPa 무근콘크리트의 전단내하력은 표 2.20과 같이 산정되며, 모델링상에 터널내 열차 단선 운행 시 공동구 벽체 상부에 가해지는 전단응력은 그림 2.65와 같이 나타났다.

표 2.20 국내 설계기준에 따른 공동구 전단내하력

철도설계기준 및 콘크리트구조설계기준에 따른 전단내하력	
계산식	① $V_c(\text{공칭전단강도})$ $1/6 \cdot \sqrt{f_{ck}} = 1/6 \cdot \sqrt{(24)} = 0.816\text{MPa}$
	② $\phi V_c(\text{설계전단강도})$ $0.75 V_c = 0.75 \cdot 1/6 \cdot \sqrt{(24)} = 0.612\text{MPa}$
	국내 설계기준에 따른 공동구 전단내하력 = 0.612MPa

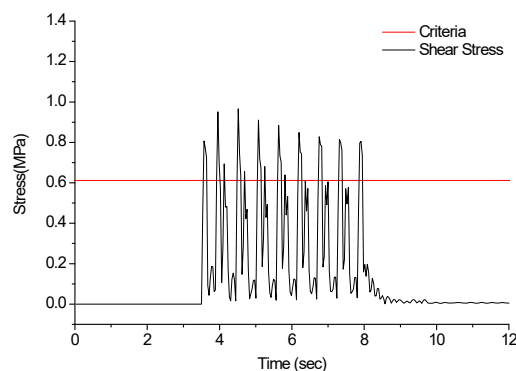


그림 2.65 수치해석 모델링을 통한 공동구 벽체상부 작용 전단응력

- 공동구 벽체 상부에 작용하는 최대 전단응력은 1.001MPa로 국내 설계기준에 따른 전단내하력 0.612MPa를 초과하는 것으로 나타났다. 따라서 전단내하력 초과로 인해 그림 2.66과 같이 철도 터널내 계측 구간의 공동구 균열에 영향을 끼친 것으로 사료된다.



그림 2.66 계측 구간내 공동구 벽체 상부 균열

○ 수치해석을 통한 터널 바닥 진동특성 소결

- 본 장에서는 터널내 궤도 하부 불량으로 인한 변상 구간의 현장계측값을 통해 수치해석 모델링 검증을 수행하였으며 각 계측위치별 현장 진동가속도를 그대로 모델링에 구현시켜 터널 하부 여굴 채움재에 따른 동적 거동 검토를 수행하였다.
- 수치해석 검증결과 시속 170km/h 열차 단선运行时 계측위치별 현장 진동가속도와 수치해석 진동가속도의 평균값을 일치시켰으며, 이에 모델링 검증이 적절히 이루어진 것으로 판단된다.
- 추가적으로 구간내 공동구 상단 파괴현상을 규명하기 위해 검증된 수치해석 모델링의 응력 검토를 수행한 결과 공동구 벽체에 작용하는 진동가속도 증폭으로 인해 공동구 벽체 상부 전단응력이 국내설계기준에 따른 무근콘크리트의 전단내하력을 초과하는 것으로 나타났다.
- 검증된 수치해석 모델링을 통해 다음 장에서는 채움재 실내시험 물성치 적용 및 안정성 검증을 수행하고 여굴 채움재에 적합한 배합설계(안) 기준을 제시하고자 하였다.

(5) 400km/h 증속에 대한 공진대역 수치해석

가. 수치해석 개요

- 앞 장에서는 여굴 채움재에 따른 터널의 진동 영향 평가를 수행하였다. 터널에서 열차운행 시 발생하는 진동과 그 진동의 전파 또는 증폭 등은 여굴 채움재 뿐만 아니라 열차의 속도와 궤도형식 및 궤도 하부 조건에 따라 상이하며, 만일 열차진동으로 인해 궤도에서 공진현상이 발생하면 궤도에 심각한 손상을 유발하므로 이에 대한 사전 검토가 필요하다. 본 장에서는 400km/h 증속시 발생하는 궤도의 진동영향을 검토를 위해 3D FEM(Finite Element Method) 프로그램을 사용하여 터널내 열차진동에 의한 궤도의 동적 거동을 궤도 하부 조건에 따라 분석하였다.
- 터널내 동적거동 분석을 위해 현재 터널내 궤도형식으로 사용되는 Rheda 2000에 대하여 고유치해석을 수행하여 진동수와 진동모드 형상을 파악한 후 비선형 시간이력해석을 수행하여 궤도에 전달되는 진동가속도를 분석하였다. 궤도 하부조건에 대한 해석은 도상 및 보조도상만을 시공하는 기존 설계단면과 보조도상 하부에 인버트 콘크리트를 적용하는 변경 설계단면으로 나누어 검토하였다.

나. 수치해석 조건

- 적용 프로그램 : LUSAS FEM(Finite Element Method) Program
- 해석 범위 : 열차하중에 의해 발생한 진동이 터널 주변 암반으로 전파되는 영향을 고려하여 터널 외부 주변 암반층 범위를 무한경계 및 2.0D까지 설정하여 동해석을 수행하였다. 분석 범위는 궤도에 대한 진동가속도를 검토하였다.

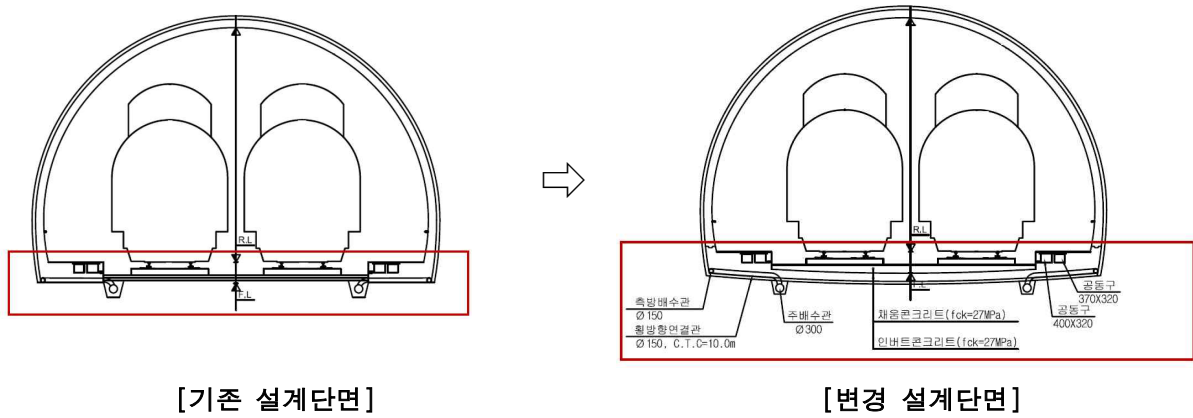


그림 2.67 궤도형식 단면

- 본 궤도 모델링의 모든 요소는 3차원 입체 형상으로 Solid요소로 모델링하였으며, 궤도 구조물은 레일, 탄성패드, 침목, TCL(Track Concrete Layer), 보조도상 순으로 모델링하여 탄성모델을 적용하였으며, 주변지반은 3등급 화강암으로 Mohr-Coulomb 모델을 적용하였다. 레일은 UIC 60kg의 물성을 적용하였으며, surface defects를 고려하지 않고 모델링하였다. 침목은 Rheda 2000용 bi-block 형식을 기준으로 크기 및 간격을 설정하였다. 침목 패드는 질량이 없는 스프링-댐퍼 커플의 조합으로 모델링하였다.
- 동적해석 수행시 경계면에서의 진동 흡수와 달리 해석영역 내에서 지반운동의 형상에 따른 기하학적인 감쇠(Geometric Damping), 매질의 역학적 특성에 의한 재료감쇠(Material Damping)에 의해 열차운행으로 인한 진동 진폭이 감소하는 현상을 적절히 고려할 필요가 있다. 연속체역학에 근거한 동적해석 수행시 시스템의 자유진동을 감쇠시키고 거리에 따른 감쇠현상을 고려하기 위해 일반적으로 레일리 감쇠비(Layleigh Damping Ratio)가 사용되며, 본 해석에서는 일반적으로 사용되는 레일리 감쇠비에서 콘크리트 및 암반에 대해 2%, 5%를 적용하여 해석을 수행하였다.
- 해석에 사용된 물성치는 표 2.21과 같다.

표 2.21 3D 수치해석 물성치

구 분	Model type	단위중량 (kN/m ³)	탄성계수 (MPa)	포아송비	C (kPa)	ϕ (°)
Level III rock	Mohr - Coulomb	25	8,000	0.25	1,200	38
Rail	Elastic	78	210,000	0.30	-	-
TCL	Elastic	24.0	29,000	0.20	-	-
Concrete	Elastic	24.0	26,700	0.20	-	-

다. 고유치해석

- 궤도형식에 대해 고유진동수를 파악하고 재료의 동적물성치를 적용하기 위해 고유치해석을 수행하였다. 해석 수행시 재료·시공 특성에 따라 궤도가 공동구 및 여굴부와 비일체거동하는 것을 고려하였다.
- 열차하중에 의한 구조물의 동적거동은 구조물의 고유 동적특성과 차량의 동적운동에 의해 결정된다. 열차의 운행진동수와 구조물의 고유진동수가 일치할 경우 공진현상이 발생되고, 이는 구조물의 내구성 피해를 유발함에 따라 차량의 속도에 따른 임계속도를 수치해석을 통하여 산정하였다.
- 고유치해석을 수행한 궤도 모델 단면은 그림 2.68과 같다.

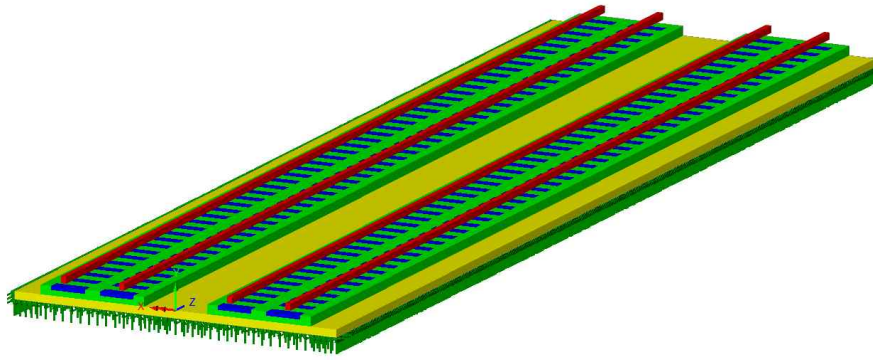


그림 2.68 고유치해석 모델링 단면

- 궤도 모델에 대한 고유치해석 결과, 표 2.22와 같이 궤도 고유진동수에 대한 KTX 열차 운행의 임계속도는 389 km/h로 산정되었다.

표 2.22 궤도 모델에 대한 고유치해석 결과

Case	고유진동수	임계속도	1차 부임계속도	2차 부임계속도
궤도 모델 단면	5.79 Hz	389 km/h	195 km/h	130 km/h

다. 동해석

- 고유치해석을 통해 도출된 동적물성치를 적용하여 주변 지반을 포함한 전체 단면에 대해 동해석을 수행하였다. 열차속도는 임계속도 주변 50km/h 내외 간격으로 250km/h에서 500km/h 범위 내로 설정하여 해석을 수행하였다. 해석시간 간격은 열차속도에 따른 하중 재하시간에 맞게 산정하였으며 정확한 결과도출을 위해 비선형 시간이력해석을 수행하였다. 진동 가속도 결과는 해석 수행 전체 Time step 중 열차진동에 의해 궤도에 전달되는 가장 큰 진동가속도를 산정하여 분석하였다.

① 기존 설계단면

- 기존 설계단면의 해석모델링은 TCL 두께 0.24m, 보조도상 두께 0.2m로 설정하였다. 또한, 재료·시공 특성에 따라 궤도가 공동구 및 여굴부와 비일체거동하는 것을 고려하기 위해 궤도모델에 Joint 요소를 반영하여 비선형 시간이력해석을 수행하였다.

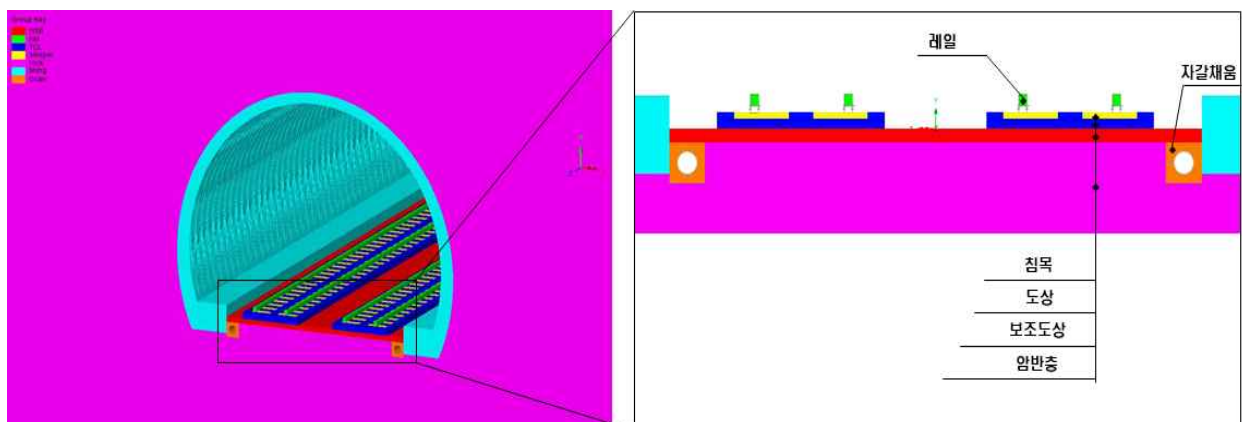


그림 2.69 기존 설계단면 모델링

- 열차속도에 따른 궤도의 최대 진동가속도는 그림 2.70과 같이 나타났다.

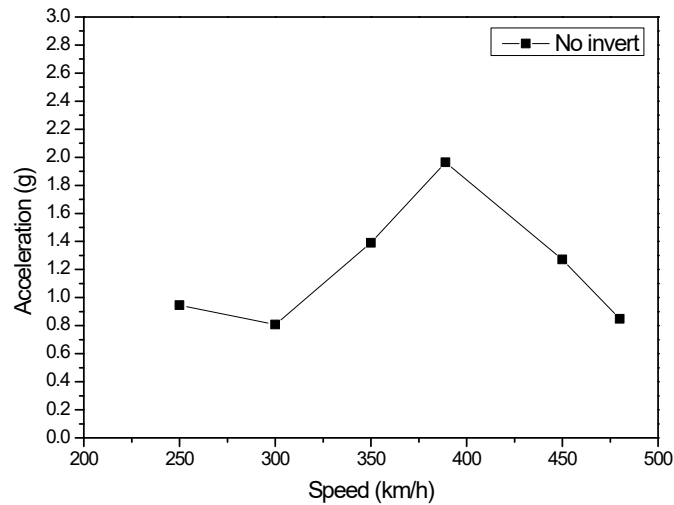


그림 2.70 열차속도에 따른 최대 진동가속도(기존 설계단면)

- 기존 단면 모델링 해석결과, 389km/h 부근에서 공진에 의한 진동가속도의 증폭이 발생하여 400km/h 내 임계속도로 운행시 공진발생에 따른 궤도손상이 우려된다.

② 변경 설계단면

- 변경 설계단면의 해석모델링은 TCL 두께 0.24m, 보조도상 두께 0.2m로 설정하였다. 또한, 보조도상 하부에 인버트콘크리트 0.3m를 추가로 적용하였다. 인버트콘크리트 적용으로 인한 두께 증가 및 폐합된 콘크리트 간의 일체화를 궤도모델 요소에 반영하여 비선형 시간이력해석을 수행하였다.

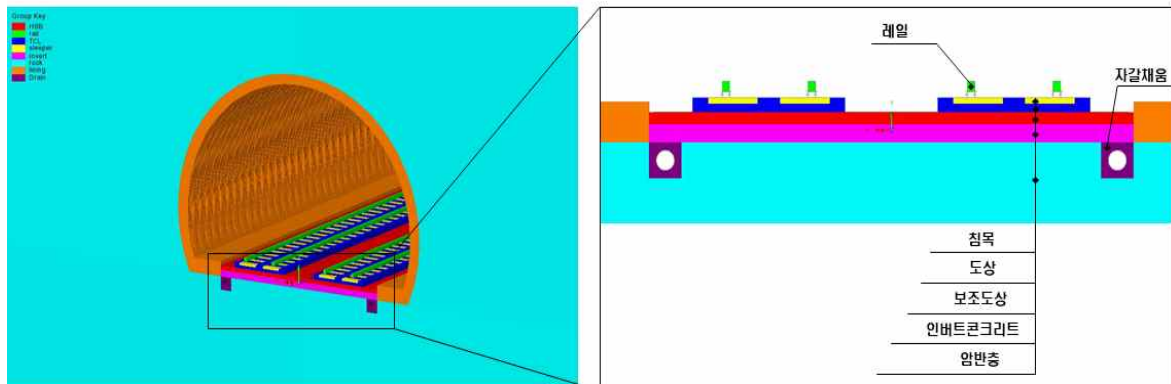


그림 2.71 변경 설계단면 모델링

- 열차속도에 따른 궤도의 최대 진동가속도는 그림 2.72와 같이 나타났다.

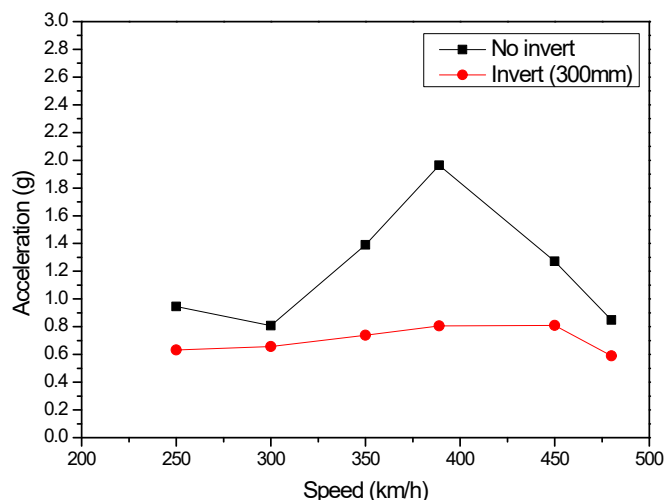


그림 2.72 열차속도에 따른 최대 진동가속도(변경 설계단면)

-
- 보조도상 하부에 인버트콘크리트 0.3m를 적용함에 따라 열차 운행속도 내 공진대역이 없는 것으로 분석되어 400km/h 내에서 동적응답에 대한 주행안정성은 확보된 것으로 판단된다.

○ 400km/h 증속에 대한 공진대역 수치해석 소결

- 본 장에서는 400km/h 증속시 발생하는 궤도의 진동영향을 검토를 위해 3D FEM(Finite Element Method) 해석을 통해 터널내 열차진동에 의한 궤도의 동적거동을 궤도 하부 조건에 따라 분석하였다.
 - 수치해석은 궤도모델에 대한 고유치해석 및 주변지반을 포함한 전체 모델의 비선형 시간이력해석을 수행하였으며, 기존 설계단면 해석결과 389km/h 부근에서 공진에 의한 진동가속도의 증폭이 발생하는 것으로 나타났다. 이는 400km/h 내 임계속도로 운행시 공진발생에 따른 궤도손상이 우려된다.
 - 보조도상 하부에 인버트콘크리트를 적용한 변경 설계단면의 해석결과, 열차 운행속도 내 공진대역이 없는 것으로 분석되었다. 따라서, 400km/h 증속시 궤도의 동적응답에 대한 주행안정성을 확보하기 위해 궤도 하부 인버트 폐합 시공 등과 같이 기존 터널 설계·시공과 다른 궤도 하부구조를 고려해야 될 것으로 판단된다.
-

3) 진동 저감에 적합한 여굴 채움재 배합설계(안) 및 기준 제시

- 터널 바닥부 여굴 관련 설계기준을 검토한 결과, 자갈도상을 제외한 콘크리트 도상구조의 경우 콘크리트 또는 동등 이상의 재료로 압축강도 18MPa 이상 채우도록 명시하고 있다. 그러나 허용 여굴두께(10~15cm) 이상 발생시 별도의 채움재 기준이 마련되어 있지 않는 상태이다.
- 수도권 고속철도 및 강릉선 터널의 경우 발생한 여굴에 대하여 버림콘크리트와 잡석을 병행한 채움을 실시하고 있으나, 궤도 하부의 불연속체로 인해 관련한 피해가 잇달아 발생함으로써 현재 적용중인 하부 채움재의 안정성 검토가 필요하다.
- 본 시험은 하부 채움재의 강도 및 장기안정성을 평가하기 위해 채움재에 따라 Case별 공시체를 제작한 후 정·동적 실내시험을 수행하였으며 그 결과를 비교·분석하여 하부 채움재의 물성특성을 고찰하였다.

(1) 보통 시멘트계 채움재 정·동적 실내시험을 통한 물성 평가

- 본 시험에서는 일축압축 강도시험 및 반복재하시험을 통한 하부 채움재료의 정·동적 탄성계수를 종합적으로 검토하고자 한다.
- 현재 원주~강릉 복선전철 터널에서 바닥여굴 채움에 사용된 빈배합 콘크리트(시멘트 5%+ 혼합골재)를 사용한 사례가 있고, 일반적으로 시멘트 함량 18% 이상시 콘크리트로 간주하기 때문에 빈배합과 콘크리트의 시멘트 함량 사이 값인 7%, 9%, 11% 및 13%를 시험에 선정하였다.
- 현재 국내에서는 터널 하부 채움재에 대한 골재 입도분포 규정이 없는 실정이다. 따라서 아래의 표 3.1과 같이 철도설계기준 노반편(2014) 강화노반 재료의 입도 규정을 참고하여 입도조정 부순골재 중 최대입도 25mm인 M-25 골재 질량 백분율의 평균치를 본 시험에 적용하였다.

표 3.1 강화노반 입도 기준

구분	체를 통과하는 물질의 질량 백분율(%)											
종류	호칭명	입도 범위	표준망체(mm)									
			53	37.5	31.5	26.5	19.0	13.2	4.74	2.36	0.425	0.075
입도 조정 부순 골재	M-40	40~0	100	100~95	-	-	90~60	-	65~30	50~20	30~10	10~2
	M-30	30~0		100	100~95	-	90~60	-	65~30	50~20	30~10	10~2
	M-25	25~0			100	100~95	-	85~55	65~30	50~20	30~10	10~2

가. 공시체 제작 및 물/시멘트비 산정

① 공시체 제작

- 각 시멘트 함량에 따른 Case(7%, 9%, 11%, 13%)마다 총 7개(일축압축강도 시험 3개, 반복재하시험 3개, 예비시편 1개)의 공시체를 제작한 후 28일간의 수중양생을 실시하였다.
- 본 연구에서는 콘크리트의 강도 시험용 공시체 제작방법(KS F 2403) 기준에 따라 일축압축시험 시편은 H×D(200mm ×100mm), 반복재하시험 시편은 H×D (150mm×100mm)로 제작하였다.
- 몰드는 비흡수성으로 시멘트에 침식되지 않는 재료로 만들어진 것으로 하였으며 콘크리트를 다져 넣기 전에 광물성 기름 또는 비반응성 박리제를 발라 탈형시 원활하도록 하였다.
- 보수적인 측면에서의 채움재 강도를 산정하고자 다짐봉을 이용하여 3층으로 나누어 다짐을 수행하였다. 이때 재료가 분리될 염려가 있어 분리를 일으키지 않을 정도로 다짐 횟수를 25회로 고정하여 진행하였다.
- 다짐 후 콘크리트 강도발현을 위해 시멘트 모르타르가 어느 정도 굳은 후 28일 수중양생을 진행하였다.



(a) 재료준비 및 개량



(b) 몰드에 이형제 바르기



(c) 배합



(d) 다짐 후 일정강도 발현



(e) 몰드 타설 및 양생



(f) 압축강도 시험 진행

그림 3.1 시멘트 공시체 형성

② 적정 물/시멘트비 산정

- 공시체 제작시 고려사항으로 골재의 입도분포, 시멘트 함량(7%, 9%, 11%, 13%), 물/시멘트비 등을 고려하여 공시체 배합비를 다음과 같이 산정하였다.

표 3.2 체가름별 골재 잔존 용량

체가름(mm)	잔존 용량(g)
26.5	84
13.2	924
4.74	756
2.36	420
0.425	504
0.075	470.4
pan	201.6
계	3,360

- 적절한 공시체 성형을 위해 시멘트 함량에 따른 물/시멘트비 산정 사전 시험을 진행한 결과, 다음 표 3.3과 같이 공시체 시멘트 함량(Case)별 물/시멘트 비(%)를 다음과 같이 산정하였다.

표 3.3 공시체 Case별 시멘트 및 물/시멘트비

구분	시멘트(g)	물/시멘트비(%)
7%	235.2	130
9%	302.4	100
11%	369.6	70
13%	436.8	70

- 모든 공시체의 정밀도는 지름에서 0.5%, 높이에서 5% 이내로 하였으며, 공시체 재하면의 평면도는 지름의 0.05% 이내로 하였음. 또한 재하면과 모션 사이의 각도는 $90 \pm 0.5^\circ$ 로 하였다.



그림 3.2 공시체 몰드 타설 후 모습

나. 일축압축강도 시험을 통한 정적물성 평가

① 일축압축강도 시험방법

㉠ 시험 개요

- 일축압축 시험기는 변형 제어식 압축 장치, 하중계 및 변위계로 구성되며 본 시험에서는 HCT-DC 100장비를 사용하였다.
- 시멘트 배합비에 따른 정적물성 평가를 위해 일축압축강도 시험을 수행함으로써 채움재의 강도를 추정하고자 콘크리트의 압축강도 시험방법(KS F 2405)기준을 준용하여 시험을 진행하였다. 시험에 앞서 모든 공시체의 단위중량(kg/m^3)을 측정하였으며, 그 결과는 표 3.4와 같다.



그림 3.3 일축압축 시험기(HCT-DC 100)

표 3.4 공시체의 단위중량

단위중량(kg/m ³)	7%	9%	11%	13%
1차	2268.91	2295.59	2373.96	2394.76
2차	2294.70	2351.48	2339.51	2403.24
3차	2293.61	2307.30	2355.37	2413.31
평균	2285.74	2318.12	2356.28	2403.77

㉔ 시험 순서

1. 공시체의 상하 끝면 및 상하의 가압판의 압축면을 청소한다.
2. 공시체를 공시체 지름이 1% 이내의 오차에서 그 중심축이 가압판의 중심과 일치하도록 놓는다.
3. 시험기의 가압판과 공시체의 끝면은 직접 밀착시키고 그 사이에 쿠션재를 넣어서는 않는다.
4. 공시체에 충격을 주지 않도록 똑같은 속도로 하중을 가한다. 하중을 가하는 속도는 압축응력도의 증가율이 매초 $0.6 \pm 0.4 \text{MPa}$ 가 되도록 한다.
5. 공시체가 급격한 변형을 시작한 후에는 하중을 가하는 속도의 조정을 중지하고 하중을 계속 가한다.
6. 공시체가 파괴될 때까지 시험기가 나타내는 최대하중을 유효숫자 3자리까지 읽는다.



(a)시멘트 7%



(b)시멘트 9%



(c)시멘트 11%



(d)시멘트 13%

그림 3.4 시험 후 시멘트 함량별 공시체 파괴형상

㉔ 시험결과에 따른 정적 물성 도출

- 본 시험은 압축강도의 신뢰성 확보를 위해 시멘트 함량(7%, 9%, 11%, 13%) Case별 공시체를 각 3번에 걸쳐 일축압축강도 시험을 수행하였다.
- 일축압축강도 결과는 아래 표 3.5, 그림 3.5와 같으며, 시멘트 함량이 증가함에 따라 일축압축강도가 비례하여 증가하는 경향을 나타냈다. 그 중 시멘트 함량이 13%일 경우, 국내 터널 바닥부 여굴 관련 설계기준인 18MPa이상의 압축강도를 발현하는 것으로 나타났다.

표 3.5 일축압축강도 시험 결과

압축강도(MPa)	7%	9%	11%	13%
1차	7.53	10.99	15.05	20.12
2차	8.47	12.05	17.40	17.97
3차	8.51	12.28	17.11	18.53
평균	8.17	11.77	16.52	18.88

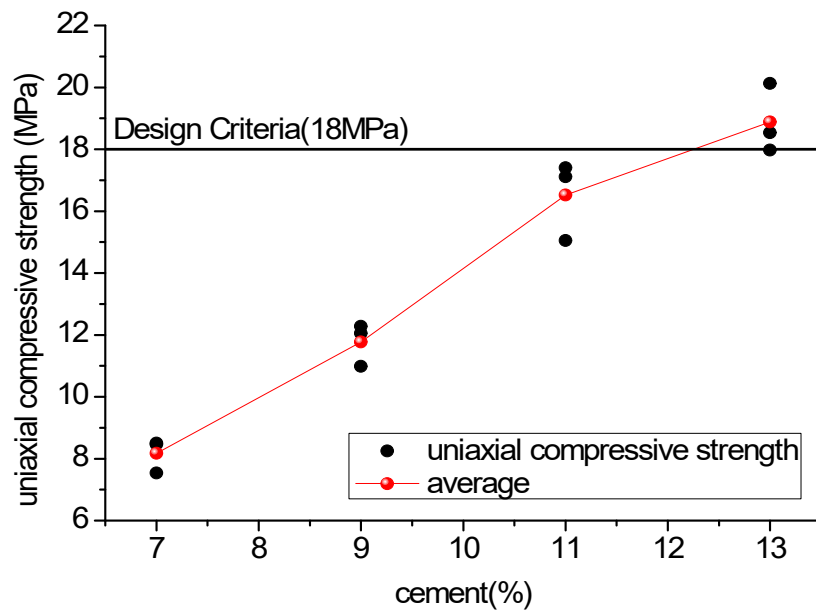


그림 3.5 시멘트 함량에 따른 공시체 압축강도 결과

- 공시체별 압축파괴시의 수직변형률과 수직응력으로 정·탄성계수를 산출하였으며 식 3.1을 준용하여 각 공시체별 탄성계수를 표 3.6과 같이 나타냈다. 시멘트 함량의 증가로 인해 공시체의 탄성계수 또한 증가하는 것을 확인하였다.

$$\sigma = E\epsilon \quad (3.1)$$

여기서, σ : 수직응력
 E : 정적탄성계수
 ϵ : 수직변형률

표 3.6 일축압축강도 시험 결과에 따른 정적탄성계수

Case	시멘트 함량(%)	압축강도 (MPa)	정적탄성계수 (MPa)	평균 탄성계수 (MPa)
1-1	7	7.53	19,203	19,552
1-2	7	8.47	19,711	
1-3	7	8.51	19,732	
2-1	9	10.99	20,958	21,316
2-2	9	12.05	21,440	
2-3	9	12.28	21,543	
3-1	11	15.05	22,701	23,271
3-2	11	17.40	23,599	
3-3	11	17.11	23,492	
4-1	13	20.12	24,559	24,131
4-2	13	17.97	23,806	
4-3	13	18.53	24,007	

- 또한 횡방향 변형률과 종방향 변형률을 측정하여 공시체의 포아송비를 산출하였으며, 그 결과는 아래 표 3.7과 같이 나타났다. 시멘트 함량별 포아송비를 검토한 결과, 7%일 경우 혼합골재의 포아송비 값과 유사한 경향으로 나타났으며, 시멘트 함량이 증가할수록 콘크리트 탄성체에 가까운 포아송비 값으로 산출되는 것을 확인 할 수 있었다.

표 3.7 공시체의 포아송비

시멘트 함량	7%	9%	11%	13%
포아송비	0.30	0.29	0.26	0.22

다. 반복재하시험을 통한 동적물성 평가

① 반복재하시험방법

㉠ 시험 개요

- 본 시험 또한 압축강도시험과 같이 시멘트 함량(7%, 9%, 11%, 13%) Case별 공시체를 각 3번에 걸쳐 반복재하시험을 수행하였으며, 열차 운행에 대한 채움재의 동적거동 및 피로거동을 파악하기 위해 sin(정현)파 형태의 반복하중 재하가 가능한 시험기를 이용하여 진행하였다.
- 실험에 앞서, 실제 열차하중 재하시 채움 구간의 응력을 고려하기 위해 원지반해석을 통한 구속응력과 열차의 복선운행 시 발생하는 채움 구간의 최대 수직응력을 통해 축차응력을 산출하였다. 해당 축차응력을 하중조건으로 고려하여 재료 시멘트 함량별 동적물성을 평가하였다.

④ 열차운행에 따른 하중 빈도수

- 시멘트 함량에 따른 재료별 동적 물성을 검토하기 위하여 하중의 빈도수를 0.5Hz부터 5Hz까지 진행하였으며, 하중주파수는 식 3.2를 이용하여 열차속도별 빈도수를 표 3.8과 같이 산출하였다. 이때 열차 타격거리는 국가건설기준 KDS 47-10-45를 준용하여 표준 열차하중인 EL-18하중의 유효타격거리 18m를 사용하였다.

$$f = \frac{v}{d} \quad (3.2)$$

여기서, f : 하중 빈도수 (Hz)
 v : 하중 재하속도 (m/s)
 d : 하중 타격거리 (m)

표 3.8 열차속도대역별 빈도수

열차속도	32 km/h	65 km/h	130 km/h	194 km/h	260 km/h	324 km/h
빈도수	0.5 Hz	1 Hz	2 Hz	3 Hz	4 Hz	5 Hz

- 열차 운행횟수를 고려하기 위하여 표 3.9와 같이 KTX 및 일반열차 운행현황을 조사하였으며, 주중의 경우 KTX는 약 200회, 일반열차는 346회 정도로 운행하는 것으로 확인되었다.

표 3.9 KTX 및 일반열차 운행현황('14.8월 현황, 코레일)

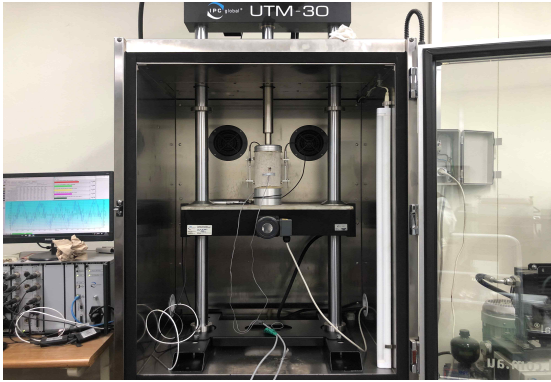
구분	1일 열차운행 횟수	
	주중	주말
KTX	197~203	222~227
일반열차	346	343~349
운행횟수(회)	543~549	568~571

- 하중 재하 사이클 수는 시험장비 및 환경적 조건 등을 고려하여 KTX 및 일반열차 혼용 구간을 기준으로 최소 운행횟수 500회로 산정하였으며, 시험의 신뢰성을 확보하기 위해 각 시멘트 함량(Case)별로 3회씩 수행하였다.

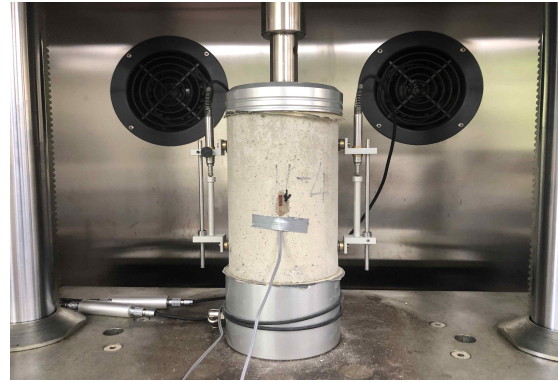
표 3.10 반복재하시험을 통한 동탄성계수 측정 시험조건

조 건	값					
Cycle	각 하중빈도수 당 500 회					
축차응력($\sigma_1 - \sigma_3$)	80kPa					
하중 빈도수	0.5 Hz	1 Hz	2 Hz	3 Hz	4 Hz	5 Hz

- 본 시험에서는 $\mu\text{m/m}$ 의 저변형률 영역에서의 변형률을 측정하기 위해 변형률 게이지를 시편에 추가로 부착하여 시험을 진행하였다. 변형률 게이지에 수신된 신호를 FFT(Fast Fourier Transform) 변환을 통해 전기신호 등 노이즈를 제거하여 신뢰도 높은 변형률을 산출하고자 하였다.



(a) 시험장비 전경

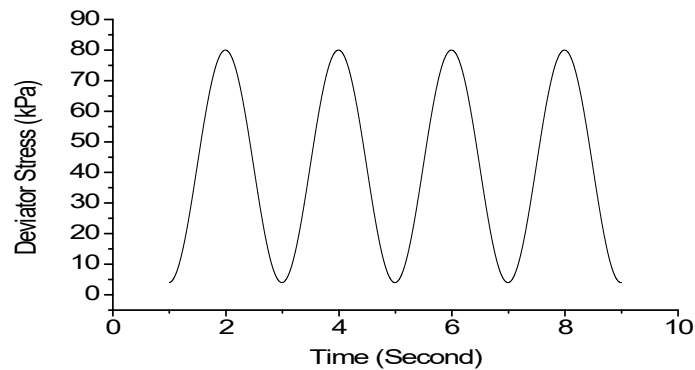


(b) 스트레인 게이지 부착한 시편

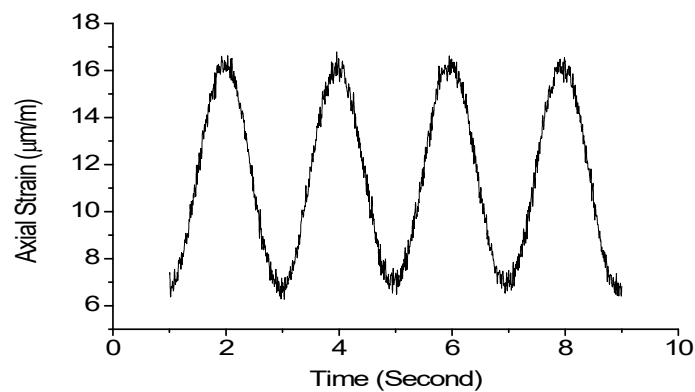
그림 3.6 Cycle Loading 시험장비(UTM-30)

② 시험결과에 따른 동적 물성치 도출

- 반복재하시험 결과, 시간에 따른 정현파 하중과 그에 상응하는 변형률을 그림 3.7과 같이 나타내었으며, 정현파 하중이 재하됨에 따라 그에 따른 변형률도 정현파 형태로 나타났다.



(a) 응력선도



(b) 변형률 선도

그림 3.7 시간에 따른 응력 및 변형률 그래프

- 응력-변형률 관계 그래프를 통해 시멘트 함량(7%, 9%, 11%, 13%)별 제작된 공시체는 흙의 거동과 달리 초기 소성영역에서의 변형이 거의 일어나지 않고 탄성영역에서의 변형상태로 나타났다. 이러한 거동에서의 응력-변형률 그래프 할선 기울기를 통해 조건에 따른 채움재의 동탄성계수를 표 3.11과 같이 산정하였다. 시멘트 함량이 높을수록 변형률에 따른 동탄성계수가 높게 나타나는 것으로 보아 열차속도 324km/h 이하에서 공진에 대한 문제는 없는 것으로 나타났다.

표 3.11 시멘트 함량과 하중 빈도수에 따른 동탄성계수 시험결과

시멘트 함량	동탄성계수(MPa)					
	0.5 Hz	1 Hz	2 Hz	3 Hz	4 Hz	5 Hz
	32km/h	65km/h	130km/h	194km/h	260km/h	324km/h
7%	5,265.6	5,267.8	5,326.2	5,397.4	5,415.8	5,445.0
9%	7,736.8	7,812.0	7,851.0	7,926.3	8,094.3	8,132.4
11%	10,035.1	10163.4	10315.7	10,471.6	10,731.9	10,822.5
13%	13,081.4	13,262.8	13,423.5	13,634.1	13,849.9	14,066.0

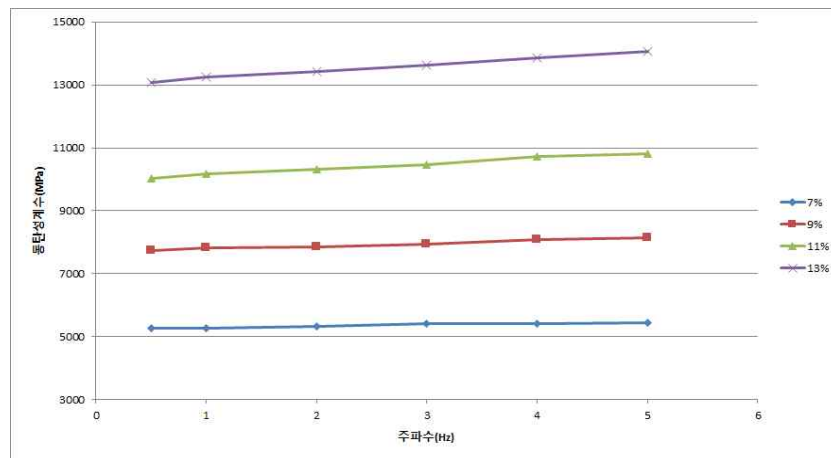


그림 3.8 하중주파수에 따른 동탄성계수

○ 보통 시멘트계 채움재 정·동적 실내시험을 통한 물성 평가 소결

- 일축압축시험을 통해 시멘트 함량별 정적 물성치를 도출하였으며, 국내 설계기준에서 제시한 여굴 채움재 압축강도($f_{ck}=18\text{MPa}$)와 비교하였을 때 시멘트 함량 13%를 제외한 나머지 Case들은 기준에 미흡한 것을 확인 할 수 있었다.
- 압축강도에 따른 수직변형률을 측정하여 각 시멘트 함량별 평균 탄성계수를 산정하였으며, 시멘트 함량이 높을수록 변형률에 따른 탄성계수가 높게 산정되었다. 또한 수직변형률에 대한 수평변형률을 산정함에 따라 시멘트 함량별 포아송비를 도출하였으며, 7%에서는 흙에 유사한 포아송비의 값이, 13%에서는 콘크리트에 유사한 포아송비의 값이 나타났다. 이는 시멘트 함량이 높을수록 일축압축 강도 및 탄성계수가 증가되며, 수직에 대한 수평변형률이 낮게 측정됨에 따라 콘크리트에 가까운 물성의 값이 나타난 것으로 판단된다.
- 또한 보통 시멘트계 채움재의 동적거동을 파악하기 위해 $\sin(\text{정현})$ 파 형태의 반복하중 재하가 가능한 시험기를 이용하여 진행하였다. 시멘트 함량에 따른 반복재하시험결과, 시멘트 함량이 높아질수록 동탄성계수가 증가하였다. 또한, 하중주파수가 높아질수록 미소하게나마 동탄성계수가 증가하는 것을 알 수 있다. 이를 통해 보통 시멘트계 채움재의 경우 열차속도 324km/h 이하 영역에서의 공진 발생 문제는 없는 것으로 나타났다.
- 본 시험에서는 시멘트 함량이 7%일 때 하중주파수의 영향이 미소하며, 13%일 때는 약 1,000MPa까지 증가하는 경향을 나타냈다. 따라서 시멘트 함량이 증가함에 따라 탄성거동에 가까운 형태로 나타나는 것을 알 수 있었다.
- 반복재하시험을 통해 시멘트 함량별 동적 물성치를 도출하였으며, 열차속도별에 따른 재료의 동탄성계수

를 검토할 수 있었다. 따라서 이를 근거로 추후 수치해석시 터널 하부채움 물성치를 적용하고 보통 시멘트계 채움재의 궤도 진동 저감 효과를 확인하고자 하였다.

(2) 우레탄계 채움재 정·동적 실내시험을 통한 물성 평가

- 앞 절에서의 연구 수행 결과 시멘트계 채움재에 대해 시멘트 함량별 정·동적 물성 평가를 수행하였으며, 추후 이와 더불어 수치해석시 각 재료별 터널 하부채움 물성치 활용을 위해 국내에서 지반보강 및 복원 목적으로 사용되고 있는 우레탄계 채움재에 대한 검토를 수행하고자 하였다.
- 본 시험은 철도 터널 하부 우레탄계 채움재의 강도를 평가하기 위해 우레탄계 주입 형태를 고려한 공시체 제작을 수행하였으며, 우레탄계 공시체의 강도특성을 고려한 정·동적 실내시험 수행 결과를 비교·분석하여 하부 채움재로써의 물리특성을 고찰하였다.

가. 우레탄계 채움재 개요

- 우레탄은 다른 주입 재료들과 다르게 기본물성, 주입특성 등의 이유로 비교적 넓은 범위에 자유로이 시공 가능하여 해외에서는 고강도 폴리우레탄(Polyurethane) 계열의 팽창재로서 연약지반이 많은 핀란드에서 개발되어 영국, 호주 등 유럽의 여러 국가에서 도로, 철도 등의 구조물 지반보강과 건물 인상에 사용되고 있다.
- 하지만 국내에서 생산되는 우레탄은 차수와 단열을 목적으로 하여 주로 사용되고 있으며, 일반적으로 지반강도 증진의 목적으로 시멘트 현탁액이 보편적으로 이용되고 있다. 시멘트 현탁액은 비용이 적게 들고 일정한 강도를 보장하지만 경화기간이 길고 하중이 크므로 주입시 문제를 가지고 있다.
- 최근 들어 지반의 보강·복원을 목적으로 우레탄계 재료를 통한 다양한 접근이 시도되고 있으며, 특히 공동연구기관인 (주)대한하이텍건설에서 연구개발하고 있는 폴리우레탄 소재의 재료를 시험에 사용하였다. 이와 같은 우레탄계 채움재는 주재의 이소시아네이트기(B액)와 경화재의 폴리올수산기(A액)를 주입기 내에 장착된 고정 믹서기를 통해 혼합하여 생성된다. 배합비의 경우 지반 공극률, 지질조건에 따라 배합비를 달리하나 본 시험에서는 주재, 경화재의 배합비를 보편적으로 사용되고 있는 1:4로 배합하였다.
- 우레탄계 채움재의 경우 주입 초기에 일정한 점성을 가진 액체이나 시간이 지남에 따라 팽창하며, 콘크리트와 달리 주입재 초기 경화는 10초 이내로 소요되며 완전 강도 발현까지 약 10분 이내로 경화된다. 또한, 우레탄계 재료의 특성상 팽창시 팽창압에 따라 강도 발현이 다르게 나타난다. 이에 본 시험에서는 철도 터널내 바닥부 여굴 구간에 우레탄계 채움재 주입시 발생하는 팽창압을 수계산을 통해 산출하여 시험에 적용하고자 하였다.

나. 공시체 제작 및 몰드내 팽창압 평가

① 공시체 제작

- 철도 터널내 여굴부 우레탄계 채움재 주입시 초기에는 액체 흡입자 사이의 공간을 매개체로 하여 할렬 주입 형태로 퍼져 나간다. 그러나 시간이 지남에 따라 일정한 공간을 확보하며 팽창해 나간다. 이 때 흡입자 사이의 공간 크기가 우레탄계 채움재의 팽창 반경보다 크게 형성되었다면 구속에 의한 강도 증가가 이루어지지 않는다. 하지만 실제 지반 보강 및 복원시 우레탄계 채움재가 공동을 가득 채우고 그림 3.9와 같이 팽창압으로 인해 궤도 침하가 복원될 때까지 주입을 진행한다. 이와 같이 우레탄계 채움재의 팽창압은 팽창 반경내의 궤도하중을 부담하게 된다.

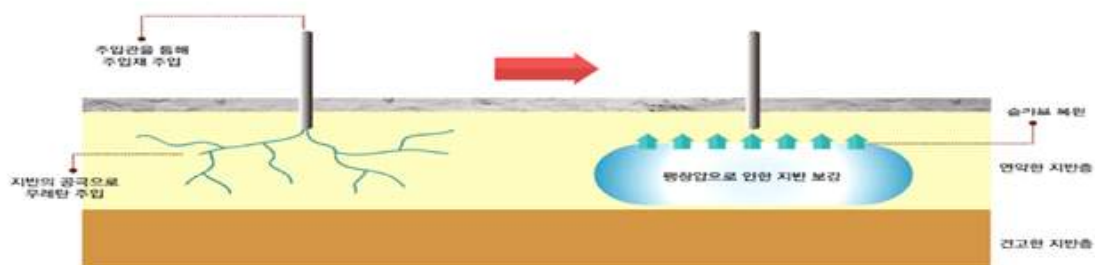


그림 3.9 지반 보수·보강시 우레탄계 채움재 팽창압

- 우레탄계 채움재가 실제 터널내 궤도 하부에 주입되는 경우의 팽창압을 산정하고자 1차년도 현장 진동가속도 계측 구간인 수도권 고속철도 그림 3.10과 같은 터널 대표 단면에 대한 연직하중을 계산하였다.

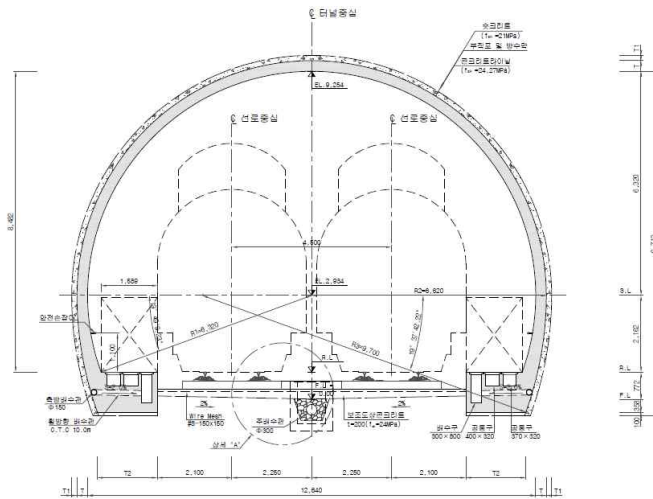


그림 3.10 수도권 고속철도 현장계측 구간 터널 표준단면도

- 보조도상콘크리트(HSB층) 하부면에 주입을 가정하여 HSB층을 포함하여 상단에 위치하는 우레탄계 채움재의 팽창 반경 궤도 연직하중은 아래와 같이 산정되었다. 이 때 우레탄계 채움재의 팽창 반경은 공동연구기관 (주)대한하이텍건설에서 수행한 선례 실험대형 모형 시험을 토대로 확산반경(r) 1.25m~1.5m로 산정하였다.

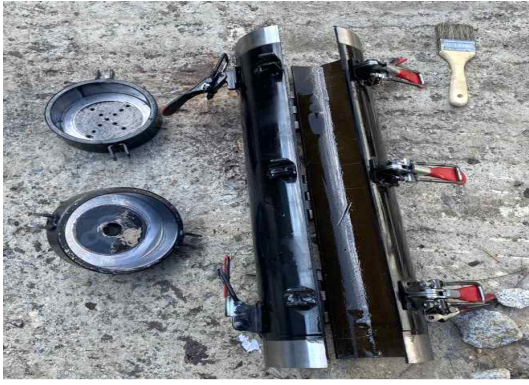
○ 확산 반경(1.25m) 기준

- 레일 : $60kgf/m \times 2.5m \times 2EA = 300kgf$
- 도상콘크리트 : $2450kgf/m^3 \times 4.909m^2 \times 0.24m = 2886kgf$
- 보조도상콘크리트 : $2400kgf/m^3 \times 4.909m^2 \times 0.2m = 2356kgf$
- 반경내 우레탄계 채움재에 작용하는 하중 : $5542kgf$
- 궤도 복원에 필요한 최소 팽창압 : $\frac{5542kgf}{49087cm^2} = 0.1129kg/cm^2 = 11.29kPa$

○ 확산 반경(1.5m) 기준

- 레일 : $60kgf/m \times 3m \times 2EA = 360kgf$
- 도상콘크리트 : $2450kgf/m^3 \times 7.069m^2 \times 0.24m = 4156kgf$
- 보조도상콘크리트 : $2400kgf/m^3 \times 7.069m^2 \times 0.2m = 3393kgf$
- 반경내 우레탄계 채움재에 작용하는 하중 : $7909kgf$
- 궤도 복원에 필요한 최소 팽창압 : $\frac{7909kgf}{70686cm^2} = 0.1119kg/cm^2 = 11.19kPa$

- 앞서 산출된 최소 팽창압 이상의 팽창압이 작용된 공시체를 제작하고자 그림 3.11과 같이 3차원 구속이 가능한 몰드를 제작하였다. 특히 주입시 발생하는 공기압을 제거하고자 바닥부분에 일정 크기 구멍을 내었으며, 1회 제작시 일축압축시험 및 반복재하시험 시편을 제작하고자 H×D(600mm×100mm)로 제작하였다. 몰드를 통해 형성된 공시체 상단 및 하단의 일부를 일축압축시험의 시편은 H×D(200mm×100mm), 반복재하시험 시편은 H×D(150mm×100mm)만큼 잘라내어 제작하였다.



(a) 몰드 해체시



(a) 몰드 조립시

그림 3.11 3차원 구속이 가능한 자체제작형 몰드

- 자체제작한 몰드를 통해 총 9개(일축압축강도 시험 4개, 반복재하시험 4개, 예비시편 1개)의 공시체를 제작한 후 실내시험을 실시하였다.
- 몰드는 비흡수성으로 우레탄에 침식되지 않고 제작시 방출되는 고온에 저항할만한 재료로 제작하였으며 우레탄 주입 전에 광물성 기름 또는 비반응성 박리제를 발라 탈형시 원활하도록 하였다. 모든 공시체의 정밀도는 지름에서 0.5% 이내, 높이 5% 이내로 하였으며 공시체 재하면의 평면도는 지름의 0.05% 이내로 하였다. 또한, 재하면과 모선 사이의 각도는 $90 \pm 0.5^\circ$ 로 하였다.



(a) 몰드에 이형제 바르기



(b) 팽창압 계측기 부착



(c) 우레탄 주입



(d) 몰드 타설후 공시체 형성

그림 3.12 우레탄계 공시체 형성 과정

② 몰드내 팽창압 평가

- 우레탄 주입은 주입기가 일정 압력 이상에 도달되어야만 주입되기 시작하며, 이로 인해 주입기의 압력 조절에 따른 공시체 제작 수행에 어려움이 있다. 따라서 3차원으로 구속된 몰드 상단 내부에 1축 압력 게이지를 부착하여 우레탄 주입시 몰드내 팽창압을 측정하였다. 부착한 1축 압력게이지의 제원은 표 3.12와 같으며, 측정방법은 계측기내 6개의 변형률 게이지를 통해 1축 방향으로의 압력을 측정하는 방식이다.

표 3.12 1축 압력게이지 제원

Rated capacity	Calibration coefficient	Sensitivity	resistance	Gauge factor
2kg/cm ²	0.00215285kgf/cm2/×10 ⁻⁶ st	0.4645mV/V	350Ω±1%	2.0Ω±1%

- 각 공시체 제작시 몰드 상단부에 팽창압 계측기를 부착하였으며 총 4번의 주입을 통해 팽창압(Case) 별 공시체를 제작하였다. 계측 수행결과, 팽창압은 아래와 같이 나타났으며 또한 시험에 앞서 각 공시체의 단위중량을 측정하여 표 3.13에 나타내었다. 이 때 팽창압의 경우 정확한 조절이 시험과정상 불가능하여 확산반경 1~1.25m를 기준으로 산출된 팽창압 범위 11.19~11.29kPa의 오차범위 ±20% 범위인 8.95~13.55kPa 이내로 도달되었을 시 주입을 중지하고 우레탄 팽창 구속을 수행하였다.



그림 3.13 몰드내 팽창압 계측기 부착 사진

표 3.13 공시체 Case별 최대 팽창압 및 단위중량

Case	공시체 최대 팽창압(kPa)	단위중량(kg/m ³)
1	10.08	51.02
2	10.45	55.84
3	11.45	63.20
4	11.48	60.64

공시체 1번	공시체 2번	공시체 4번	공시체 4번

그림 3.14 공시체 몰드 탈형 후 모습

다. 일축압축강도 시험을 통한 정적물성 평가

① 일축압축강도 시험방법

㉠ 시험 개요

- 일축압축 시험기는 변형 제어식 압축 장치, 하중계 및 변위계로 구성되며 본 시험에서는 제일정밀사의 JI-105A를 사용하였다. 본 시험기는 유압을 이용해 시험소재에 하중을 전달하여 상단의 재하 포인트가 소재에 접촉하였을 때의 높이를 측정한 후 하중재하 속도에 따른 시험소재 변위량을 통해 실시간으로 그래프가 디스플레이 되는 방식이다.

- 몰드내 팽창압에 따른 정적물성 평가를 위해 일축압축강도 시험을 수행함으로써 채움재의 강도를 추정하고자 하였으나 기존의 우레탄 압축강도 시험법이 없어 콘크리트 압축강도 시험방법(KS F 2405)을 참조하여 시험을 진행하였다. 단, 우레탄의 압축강도를 고려하여 압축응력도의 증가율은 $0.05 \pm 0.02 \text{MPa/sec}$ 로 하였다.



그림 3.15 일축압축 시험기 전경(JI-105A)

㉠ 시험 순서

1. 공시체의 상하 끝면 및 상하의 가압판의 압축면을 청소한다.
2. 공시체를 공시체 지름이 1% 이내의 오차에서 그 중심축이 가압판의 중심과 일치하도록 놓는다.
3. 시험기의 가압판과 공시체의 끝면은 직접 밀착시키고 그 사이에 쿠션재를 넣어서는 않는다.
4. 공시체에 충격을 주지 않도록 똑같은 속도로 하중을 가한다. 하중을 가하는 속도는 압축응력도의 증가율이 $0.05 \pm 0.02 \text{MPa/sec}$ 가 되도록 한다.
5. 공시체가 급격한 변형이 시작되면 하중 가하는 속도를 점차적으로 감소시킨다.
6. 동일 하중에서 공시체의 변형이 진행되지 않을 경우 하중을 다시 증가시키며 공시체 일부가 터지기 시작할 때 파괴로 간주하여 시험을 중지한다.



그림 3.16 시험 후 공시체 파괴형상

㉡ 시험결과에 따른 정적 물성 도출

- 본 시험은 압축강도의 신뢰성 확보를 위해 총 4 Case에 대한 몰드 내 팽창압 평가를 사전 수행하였으며 Case별 공시체에 대한 일축압축강도 시험을 수행하였다. 시험 결과 Case별 공시체의 응력-변형률 그래프는 그림 3.17과 같이 나타났다.
- 우레탄 공시체 시험 결과 모든 공시체에서 최대 강도에 도달할 때까지 탄성으로 거동하며 응력-변형률 그래프가 선형으로 증가하는 형태로 나타났다. 이에 하선 최대 강도까지의 하선 기울기를 통해 정탄성계수를 산정하였다. Case별 공시체 정적 물성치 시험 결과를 표 3.14에 정리하였다. 우레탄계 채움재

확산반경 1.25~1.5m 내의 팽창압 작용 시 공시체의 평균 정탄성계수는 18.11MPa로 나타났다.

표 3.14 Case별 정적 물성치 시험 결과

Case	몰드내 최대 팽창압(kPa)	단위중량(kg/m ³)	일축압축강도 (MPa)	탄성계수 (MPa)
1	10.08	51.02	0.76	15.72
2	10.45	55.84	0.82	18.19
3	11.45	63.20	0.90	19.50
4	11.48	60.64	0.93	19.01

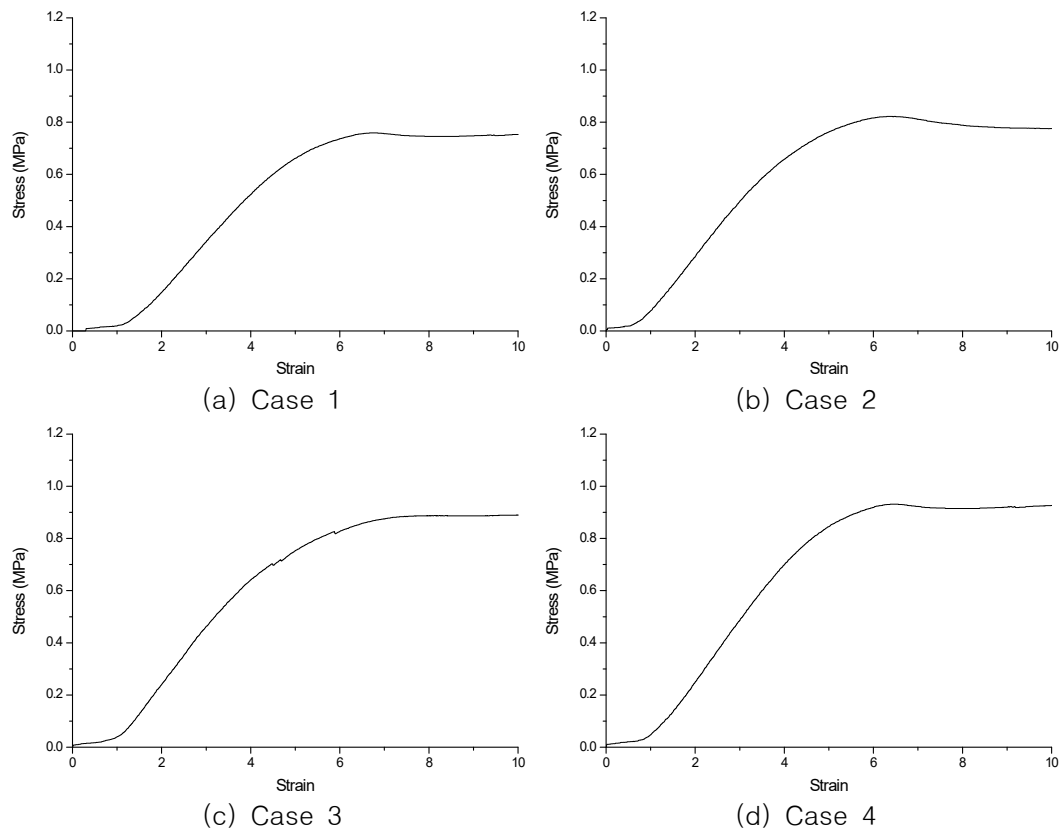


그림 3.17 Case별 응력-변형률 그래프

라. 반복재하시험을 통한 동적물성 평가

① 반복재하시험방법

㉞ 시험 개요

- 본 시험 또한 압축강도시험과 같이 몰드내 팽창압 평가에 따른 Case별 공시체를 총 4번 걸쳐 반복 재하시험을 수행하였으며, 열차 운행에 대한 채움재의 동적거동을 파악하기 위해 그림 3.18과 같이 sine(정현)파 형태의 반복하중 재하가 가능한 만능재료시험기 UTM(Universal Testing Machine)-30을 이용하여 진행하였다.

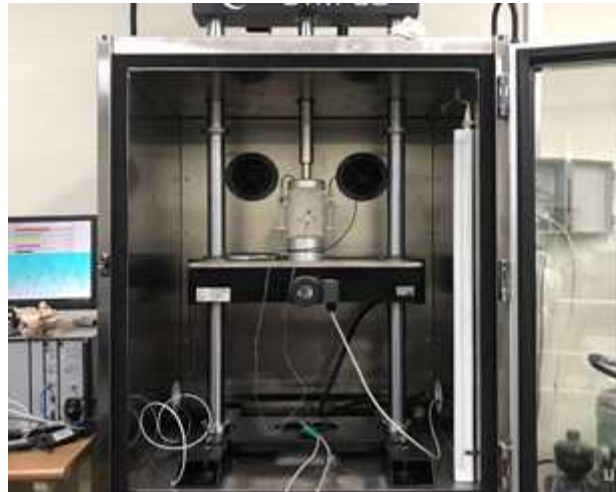


그림 3.18 UTM(Universal Testing Machine)-30

- 실험에 앞서, 실제 열차하중 재하시 채움 구간의 응력을 고려하기 위해 원지반해석을 통한 구속응력과 열차의 복선운행시 발생하는 채움 구간의 최대 수직응력을 산출하고, 그에 대한 축차응력을 하중조건으로 적용하여 우레탄계 채움재의 몰드내 팽창압별 동적물성을 평가하였다.

㉔ 열차운행에 따른 하중 빈도수

- 우레탄계 채움재의 동적 물성을 검토하기 위하여 하중의 빈도수를 0.5Hz부터 5Hz까지 진행하였으며, 하중주파수는 식 3.3을 이용하여 열차속도별 빈도수를 표 3.15와 같이 산출하였다. 이때 열차 타격거리는 국가건설기준(KDS 47-10-45)을 준용하여 표준 열차하중인 EL-18하중의 유효타격거리 18m를 사용하였다.

$$f = \frac{v}{d} \quad (3.3)$$

여기서, f : 하중 빈도수 (Hz)
 v : 하중 재하속도 (m/s)
 d : 하중 타격거리 (m)

표 3.15 열차속도대역별 빈도수

열차속도	32 km/h	65 km/h	130 km/h	194 km/h	260 km/h	324 km/h
빈도수	0.5 Hz	1 Hz	2 Hz	3 Hz	4 Hz	5 Hz

- 열차 운행횟수를 고려하기 위하여 표 3.16과 같이 KTX 및 일반열차 운행현황을 조사하였으며, 주중의 경우 KTX는 약 200회, 일반열차는 346회 정도로 운행하는 것으로 확인되었다.

표 3.16 KTX 및 일반열차 운행현황('14.8월 현황, 코레일)

구분	1일 열차운행 횟수	
	주중	주말
KTX	197~203	222~227
일반열차	346	343~349
운행횟수(회)	543~549	568~571

- 하중 재하 사이클 수는 시험장비 및 환경적 조건 등을 고려하여 KTX 및 일반열차 혼용 구간을 기준으로 최소 운행횟수 500회로 산정하였다.

표 3.17 반복재하시험을 통한 동탄성계수 측정 시험조건

조 건	값					
Cycle	각 하중빈도수 당 500 회					
축차응력($\sigma_1 - \sigma_3$)	80kPa					
하중 빈도수	0.5 Hz	1 Hz	2 Hz	3 Hz	4 Hz	5 Hz

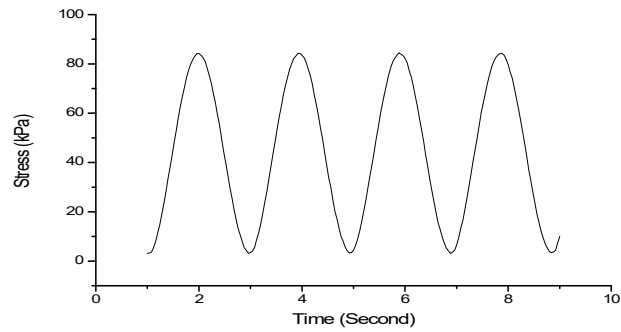
- 본 시험에서는 $\mu\text{m}/\text{m}$ 의 저변형률 영역에서의 변형률을 측정하기 위해 변형률 게이지를 시편에 추가로 부착하여 시험을 진행하였다. 변형률 게이지에 수신된 신호를 FFT(Fast Fourier Transform) 변환을 통해 전기신호 등 노이즈를 제거하여 신뢰도 높은 변형률을 산출하였다.



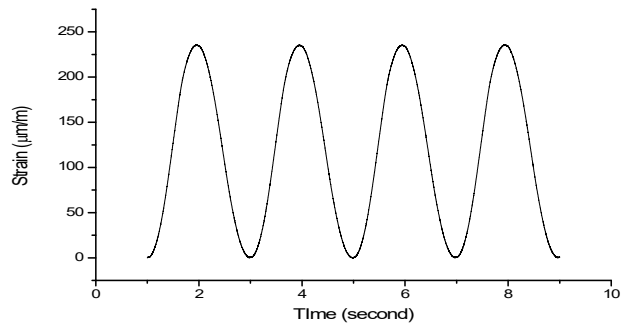
그림 3.19 스트레인 게이지 부착한 시편

② 시험결과에 따른 동적 물성치 도출

- 반복재하시험결과, 시간에 따른 정현파 하중과 그에 상응하는 변형률을 그림 3.20과 같이 나타내었으며, 정현파 하중이 재하됨에 따라 그에 따른 변형률도 정현파 형태로 나타났다.



(a) 응력선도



(b) 변형률 선도

그림 3.20 시간에 따른 응력 및 변형률 그래프

- 하중빈도수에 따른 우레탄계 채움재의 변형에 대해 검토하고자 500회 하중 재하 결과값 중 1 cycle의 최대변형률 평균값을 정리하여 그림 3.21에 나타내었다. 하중 빈도수 2Hz에서 최대 변형이 발생했으며 이를 보아 하중빈도수 2Hz영역에서 우레탄계 채움재의 고유진동수와 일치하는 것으로 판단된다.

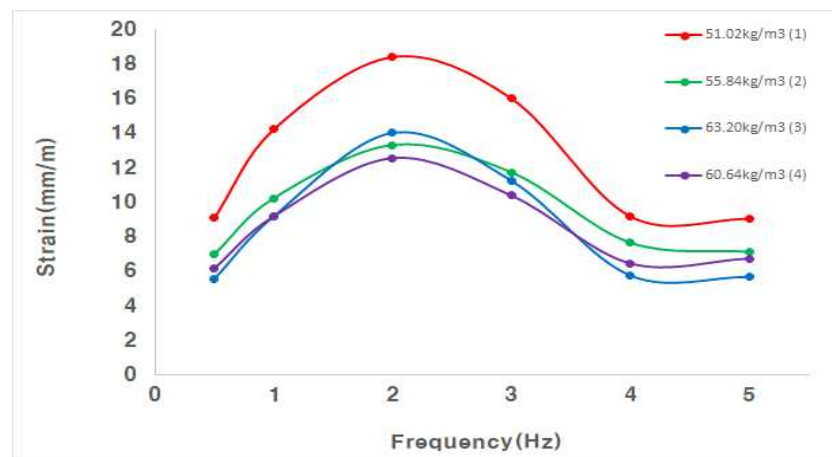


그림 3.21 하중주파수에 따른 평균 최대변형률

- 응력-변형률 관계를 통해 Case별 제작된 공시체는 압축강도 이전까지 탄성영역의 변형상태로 나타나며, 이러한 거동에서 응력-변형률 그래프의 할선 기울기를 통해 채움재의 동탄성계수를 표 3.18과 같이 산정하였다.

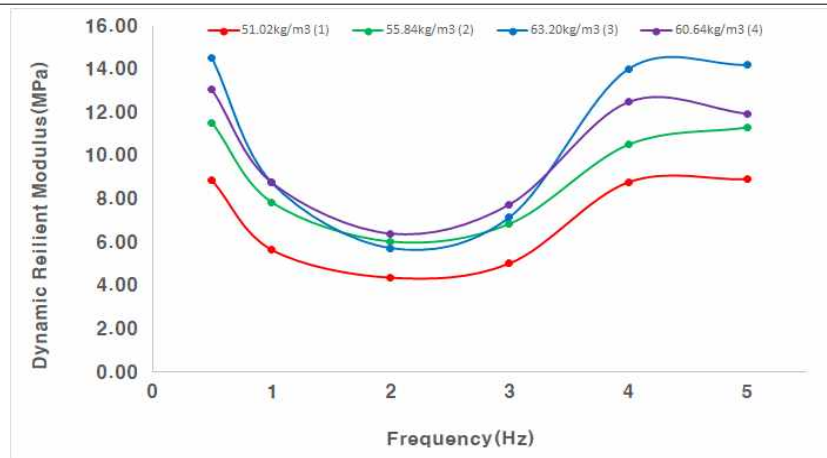


그림 3.22 하중주파수에 따른 동탄성계수

표 3.18 몰드내 팽창압과 하중 빈도수에 따른 동탄성계수 시험결과

Case	팽창압 (kPa)	단위중량 (kg/m ³)	동탄성계수(MPa)					
			0.5 Hz	1 Hz	2 Hz	3 Hz	4 Hz	5 Hz
			32km/h	65km/h	130km/h	194km/h	260km/h	324km/h
1	10.08	51.02	8.85	5.65	4.36	5.01	8.76	8.90
2	10.45	55.84	11.51	7.85	6.03	6.85	10.50	11.29
3	11.45	63.20	14.49	8.75	5.73	7.15	13.99	14.19
4	11.48	60.64	13.04	8.75	6.39	7.74	12.47	11.93

○ 우레탄계 채움재 정·동적 실내시험을 통한 물성 평가 소결

- 몰드내 팽창압에 따른 우레탄계 채움재의 정적 물성을 평가하였으며, 우레탄계 채움재 강도는 0.76~0.93MPa로 나타났다.
- 추가적으로 열차 운행에 대한 채움재의 동적거동을 파악하기 위해 sin(정현)파 형태의 반복하중 재하가 가능한 시험기를 이용하여 진행하였다.
- 반복재하시험결과, 2Hz 주파수일 때 동탄성계수가 최저로 나타났으며, 속도대역 130km/h 영역에서 공진현상이 발생한 것으로 판단된다. 이는 우레탄계 채움재의 고유진동수 영역에 근접하여 공진 효과에 의해 변형량이 늘어난 것으로 판단된다.
- 반복재하시험을 통해 우레탄계 채움재 동적 물성치를 도출하였으며, 열차속도에 따른 재료의 동탄성계수를 검토하였다. 그러나 우레탄계 채움재의 경우 15cm 이하 여굴 채움 기준 일축압축강도 18MPa에 현저히 낮은 강도값을 보였으며, 속도대역 130km/h 영역에서 공시체 내 고유진동수 일치로 인해 변형량 증가가 일어나 여굴 채움재료의 활용이 불가능할 것으로 판단된다.

(4) 실내시험 물성치를 활용한 진동특성 분석

- 앞 장에서 수행된 수치해석 모델링을 통해 시멘트계 채움재의 현장 적용성을 검토하고자 추가적으로 궤도 바닥부 여굴 구간의 채움재 물성치에 따른 진동특성을 분석하였다. 이 때 우레탄계 채움재의 경우 정적 일축강도 평균값 0.85MPa로 15cm 두께 이하 여굴 발생 구간 채움 기준 18MPa에 현저히 낮은 강도값을 보였으며, 열차 운행속도 약 130km/h 영역에서 고유진동수 일치로 인해 여굴 채움재료의 활용이 불가능할 것으로 판단되어 수치해석 대상에서 제외하였다.

가. 시멘트계 채움재 적용에 따른 궤도 진동특성

- 연구 수행 결과 시멘트 함량에 따른 콘크리트 채움재의 정·동적 물성치는 표 3.19와 같이 나타났다. 앞서 검증한 모델링을 바탕으로 여굴부 시멘트계 채움재 물성치를 참고하여 다음과 같이 적용하였다. 탄성계수의 경우 열차속도 170km/h를 고려하여 열차빈도수 3Hz에 대한 동탄성계수 값으로 적용하였다. 또한 반복재하실험 결과 모든 공시체에서 탄성거동에 가까운 형태로 나타났으며 이에 모델타입은 Elastic으로 적용하였다.

표 3.19 실내시험 결과 및 수치해석 적용 물성치(시멘트계 채움재)

시멘트 함량	Model type	단위중량 (kg/m ³)	압축강도 (MPa)	탄성계수		포아송비
				정탄성계수 (MPa)	동탄성계수 (MPa)	
7%	Elastic	2,286	8.17	19,552	5,397	0.3
9%	Elastic	2,318	11.51	21,316	7,926	0.29
11%	Elastic	2,356	16.52	23,271	10,471	0.26
13%	Elastic	2,404	18.87	24,131	13,634	0.22

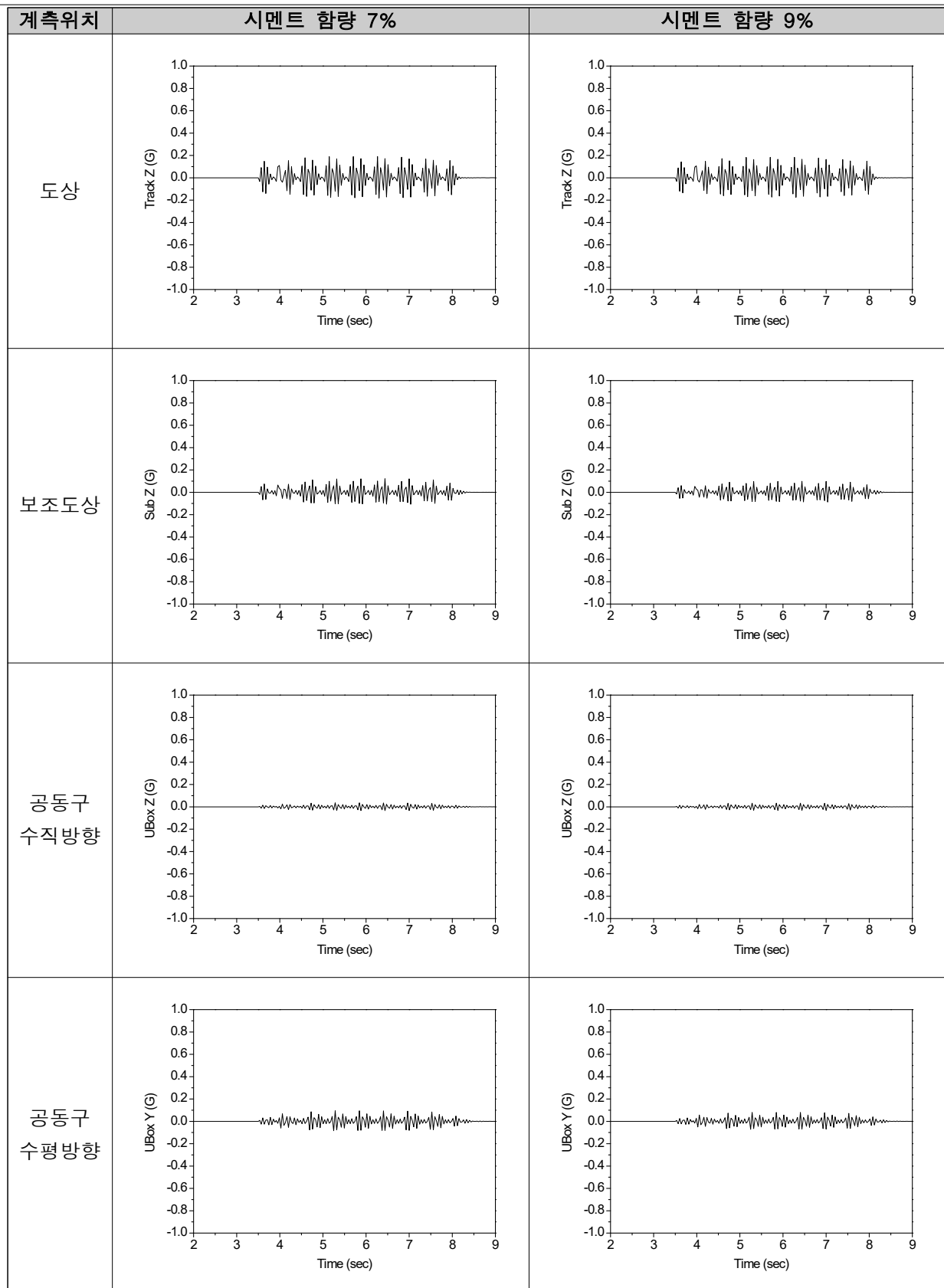


그림 3.23 시멘트계 채움재 수치해석 결과(시멘트 함량 7~9%)

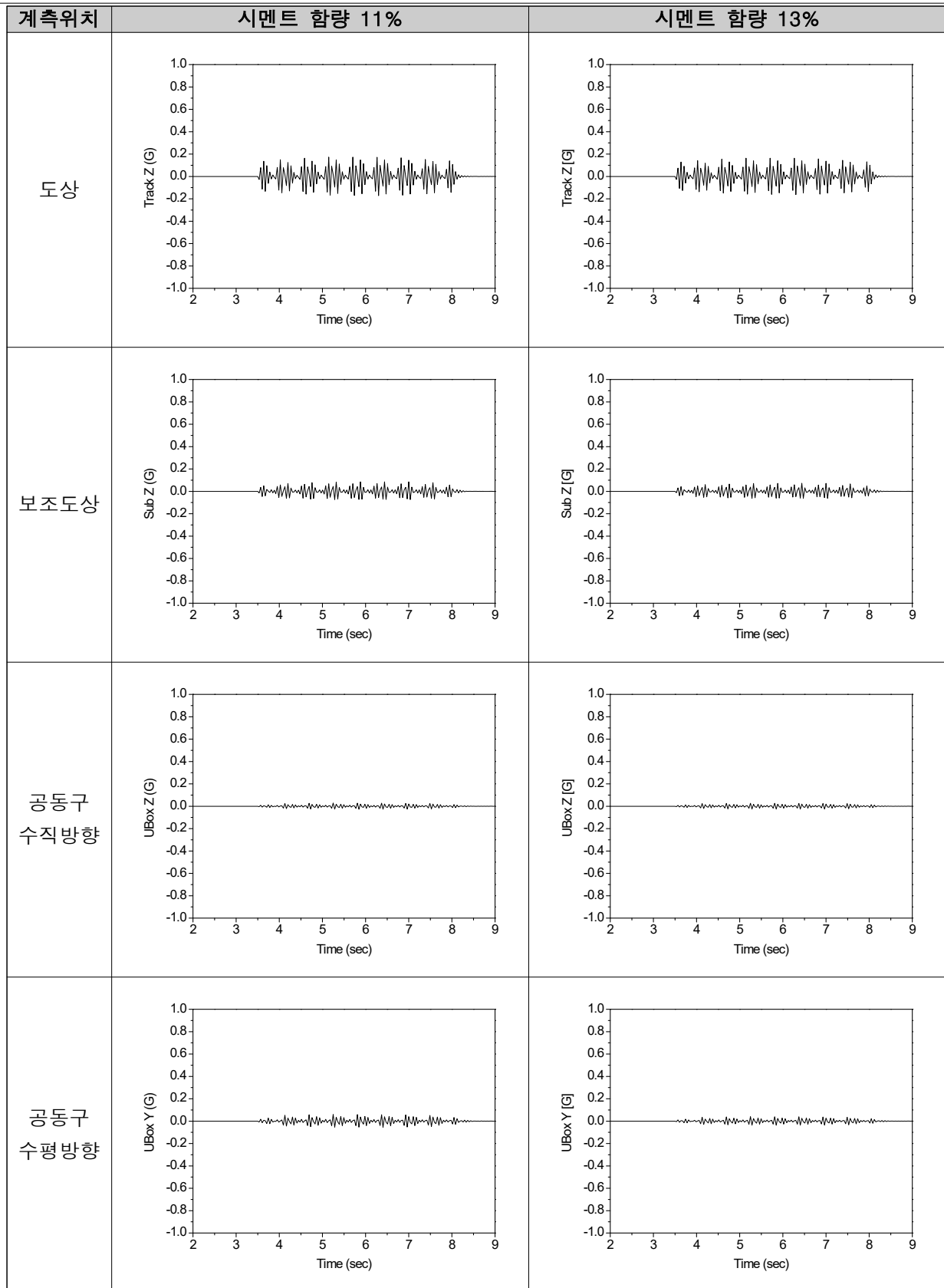


그림 3.24 시멘트계 채움재 수치해석 결과(시멘트 함량 11~13%)

- 수치해석 결과 궤도 바닥부 여굴부 물성치 적용에 의해 전체적으로 궤도에 전달되는 진동가속도가 감소하였으며 이는 잡석채움 대비 시멘트계 채움재의 강성이 더 높아 나타난 결과로 판단된다. 특히 공동구에 작용되는 수평방향 및 수직방향 진동 가속도가 모든 시멘트 배합비에서 0.1G 이하로 현저하게 감소되었으며 궤도와 균일한 매질층 형성으로 구조물 감쇠가 적절히 이루어진 것으로 판단된다. 추가적으로 수평방향/수직방향 최대 가속도 비를 검토한 결과 1.49~2.6배로 나타났으며, 시멘트 배합비 13%에서 1.49배로 최저로 나타났다. 이를 보아 궤도 하부 구간의 강성 변화에 따라 수평방향 진동가속도가 더 큰 영향

을 받는 것으로 나타났다.

- 시멘트계 채움재 적용시 진동특성을 확인하고자 최대 진동가속도를 정리하여 표 3.20에 나타내었으며, 채움재의 진동 감쇠효과를 확인하기 위해서 실제 잡석 채움시의 수치해석값 및 인버트 구간 현장계측값을 추가적으로 나타내었다. 모든 시멘트계 채움재에서 잡석채움 대비 진동 감쇠효과를 확인하였다.

표 3.20 최대 진동가속도(G)

여굴 채움재		도상(Z)	보조도상(Z)	공동구(Z)	공동구(Y)
수 치 해 석	잡석채움	0.253	0.235	0.059	0.253
	시멘트 7%	0.190	0.122	0.036	0.094
	시멘트 9%	0.183	0.099	0.033	0.080
	시멘트 11%	0.173	0.085	0.028	0.060
	시멘트 13%	0.163	0.072	0.027	0.040
인버트 구간 현장계측		0.205	0.049	0.014	0.010

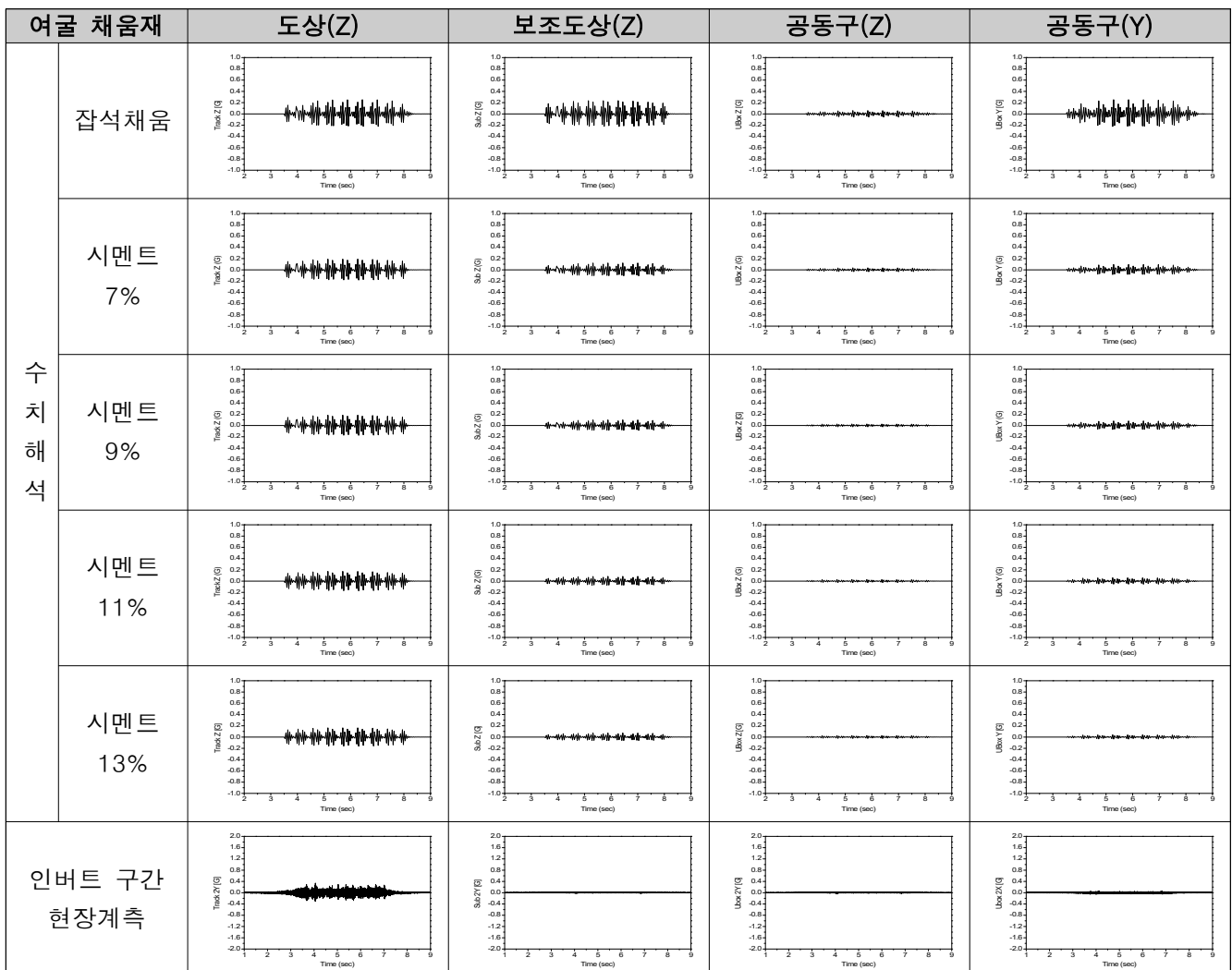
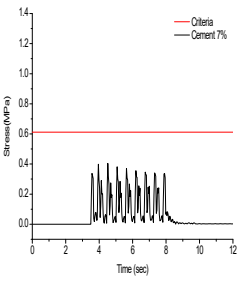
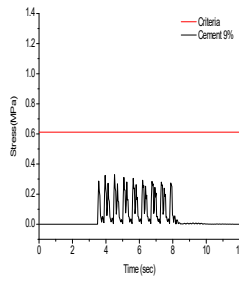
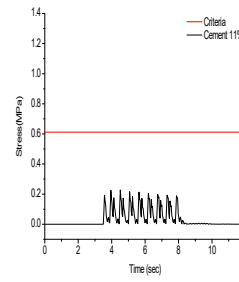
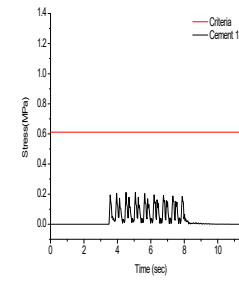


그림 3.25 진동가속도 비교

나. 시멘트계 채움재 적용에 따른 터널내 응력 검토

- 앞 절에서 검토되었듯이 궤도 바닥부 여굴에 대해 잡석채움 시공시 공동구에 작용하는 진동가속도로 인하여 공동구 벽체 상부 전단응력이 강도값을 초과하였다. 따라서 해당 여굴 구간에 대해 시멘트 채움재를 적용하였을 경우 공동구 벽체 상부 작용 전단응력을 검토하고자 하였다.

표 3.21 시멘트 채움재별 공동구 벽체 전단응력 검토 결과

구분(MPa)	시멘트 함량 7%	시멘트 함량 9%	시멘트 함량 11%	시멘트 함량 13%
전단응력 그래프				
최대 전단응력	0.404	0.329	0.228	0.211
초과 여부	$0.404 < 0.612$ O. K	$0.329 < 0.612$ O. K	$0.228 < 0.612$ O. K	$0.211 < 0.612$ O. K

- 검토 결과 시멘트계 채움재의 시멘트 함량 증가에 따라 전단응력이 감소되는 것을 확인하였으며, 시멘트 함량 7% 이상일 때 궤도 바닥부 강성 증가로 인해 공동구에 작용하는 전단응력이 국내설계기준에 따른 전단내하력 0.612MPa를 초과하지 않는 것으로 나타났다.

○ 실내시험 물성치를 활용한 진동특성 분석 소결

- 본 절에서는 터널내 궤도 하부 불량으로 인한 변상 구간의 현장계측값을 통해 모델링 검증을 수행한 수치해석을 활용하여 궤도 하부 여굴부 채움재로서 시멘트계 채움재의 효과를 확인해보고자 실내시험 물성치를 적용시켰으며, 동일 터널내 인버트 구간 현장계측값에 비해 큰 진동이 발생하였으나 모든 시멘트 함량에서 충분한 진동 감소 효과가 나타났다. 특히 잡석채움시 공동구 수평 진동가속도는 0.253G로 나타났으나 시멘트계 채움재의 경우 공동구에 수평 진동가속도 0.1G 이하로 궤도 하부 강성 증가로 인한 충분한 진동 감소 효과를 확인하였다.
- 시멘트 함량 7~13%의 시멘트계 채움재 적용시 열차진동이 터널 벽체로 이동함에 따라 충분한 감쇠가 이루어지는 것을 확인하였으며, 추가적으로 공동구 벽체 상부 전단응력을 검토해본 결과 국내설계기준에 따른 무근콘크리트의 전단내하력 0.612MPa 이내로 나타났다.
- 그러나 제시한 보통 시멘트 채움재의 경우 현재 운행선 문제 구간에 활용하기에는 현장시공성 등의 문제점을 고려하면 부적절할 것으로 판단된다. 이에 다음 장에서는 철도 터널 바닥부에 적용 가능한 보수방안에 대한 추가적인 검토를 수행하고자 하였다.

4) 철도 터널 바닥부에 적용 가능한 보수방안 제시

- 앞서 제시한 배합설계(안)과 달리 수도권 고속철도 및 강릉선과 같은 운행선 문제 구간의 보강재료의 활용이 어려움에 따라 본 연구에서는 현장 시공성을 고려한 채움재 및 보수방안에 대해 제시하고자 하였다.
- 수도권 고속철도 내 과다 변상 구간을 대상으로 현장을 선정하여 보수를 수행하고, 해당 구간의 보강 전·후 진동가속도 비교·분석을 통해 시험시공 구간에 대한 검증울 수행하고자 하였다. 또한 보강방안을 모사한 수치해석을 수행하고 보강시 활용한 채움재 공시체 실내시험 물성치를 활용하여 진동특성 분석 및 고찰을 수행하였다.

(1) 보수방안 검증을 위한 시험시공 현황

가. 보강 구간 현황

- 현장 진동가속도 분석 결과 수도권 고속철도 구간 중 측면배수 구간에서 공동구 수평방향 진동가속도가 최대로 나타남에 따라 공기단축 및 시공성 등을 이유로 터널 일부 구간 주배수관을 중앙에서 측면으로 변경한 구간을 시험시공 구간으로 2개 구간 선정하였다. 또한 보조도상 콘크리트와 도상 중앙부 콘크리트 채움 구간은 터널 바닥부 상·하선 분리 시공되었다.

① 바닥부 여굴 현황

- 보수 구간으로 선정된 구간은 배수설계 변경 등으로 인해 측면배수 주변의 잡석 채움 범위를 계획보다 넓게 포설하여 시공하면서 여굴 처리방안에 문제가 드러나고 있다. 실제 해당 구간의 시추 조사 결과 그림 4.1과 같이 보조도상까지의 깊이 0.4m 이후 잡석 또는 공동으로 인해 궤도 하부 지반 불량을 확인하였다. 바닥부 여굴 조사 결과 표 4.1과 같이 나타났으며, 도상과 인접하여 발생한 여굴두께가 A, B 구간 모두 50cm까지 나타났다.



그림 4.1 보수 구간 궤도 하부 시추 조사 결과

표 4.1 보수 구간 바닥부 여굴

구 분	여굴두께
A 구간	50cm
B 구간	50cm

② 현장계측 위치 선정

- 보수 구간으로 선정된 2개 구간의 변상 유무를 조사해본 결과, 그림 4.2와 같이 TCL과 보조도상 층분리 및 공동구 손상이 발생하는 등 내구성 저하가 심각한 상태로 조사되었다. 따라서 해당 구간의 보조도상 시공조인트를 중심으로 보강 전·후 진동가속도 계측을 수행하고자 하였다.



그림 4.2 보수 구간 변상 상태

- 측면배수로 설계된 보수 구간은 시공 특성상 중앙콘크리트 부분에 시공조인트가 발생함에 따라 상·하 선 도상이 개별거동 할 것으로 예상된다. 보수 구간 변상 발생 구간 20m 구간에 보수를 수행하였으며 좌우 약 10m 구간을 천이 구간으로 고려하여 추가 보수를 수행함에 따라 총 40m 구간을 보수하였다. 그림 4.3과 같이 보강 구간 20m 및 천이 구간 10m 내에 위치한 보조도상 시공조인트를 기준으로 좌우 약 1m, 총 8지점을 계측 구간으로 선정하였다.

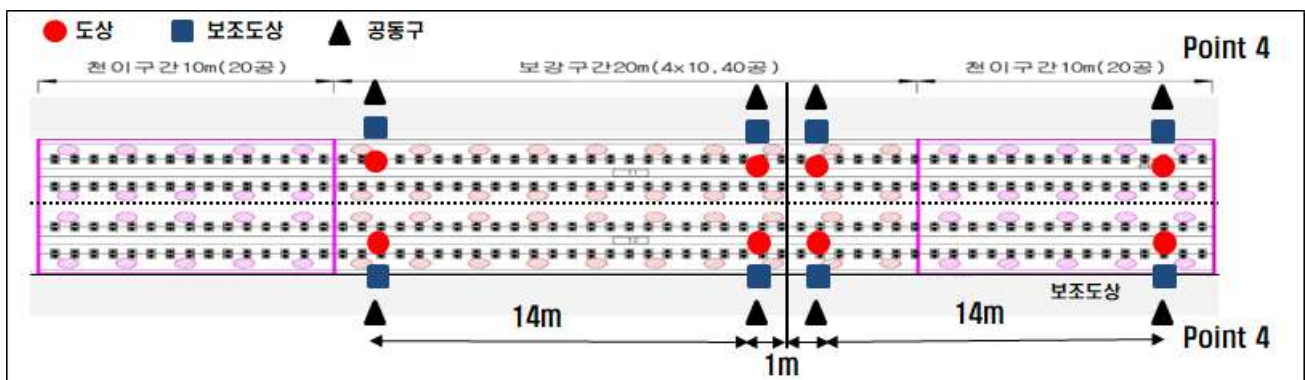
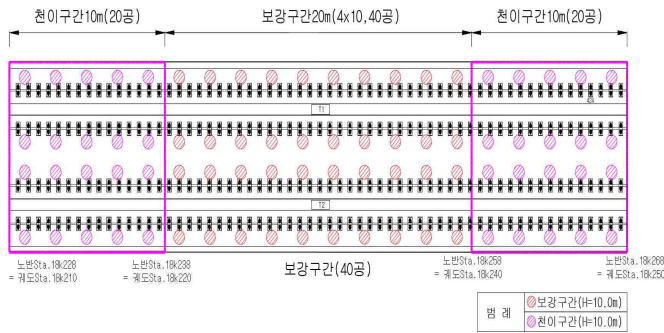


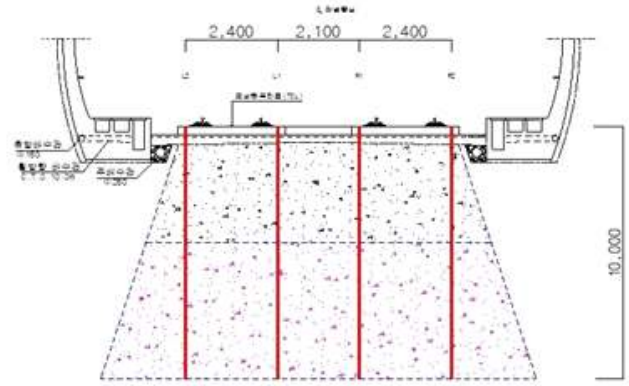
그림 4.3 보수 구간 계측 위치

나. 보수 방안 개요

- 보수 구간 내 변상에 대한 다양한 보수·보강이 존재하지만 운영 중에 시행하여야 하는 공법 선정에는 많은 제약이 따른다. 보수 구간은 궤도 하부 여굴두께 50cm 발생 구간으로 궤도와 지반의 일체화가 되지 않은 점을 고려하여 말뚝의 주면마찰력을 통한 TCL, 보조도상 및 지반의 일체화를 목표로 활동억지말뚝공(Micro Pile)을 궤도 하부 보수 방안으로 채택하였다.
- 본 구간에 적용하고자 하는 보강방안은 활동억지말뚝공(Micro Pile)으로 강재로 보강된 소구경(일반적으로 직경 300mm 이하)의 비번위 말뚝 형태의 활동억지말뚝의 주면마찰력 등의 지지력을 통해 적정 크기의 하중에 저항할 수 있도록 하는 공법이다. 현장에 적용하고자 하는 평면도 및 단면도는 그림 4.4와 같다.



(a) 평면도



(b) 단면도

그림 4.4 보강방안 평면도 및 단면도

① 시공절차 및 방법

- 활동역지말뚝공의 주요공정의 시공절차 및 방법 그림 4.5와 같이 진행되며 상세 내용은 아래와 같다.

 1. 코어천공 : 시공 위치 마킹 → 콘크리트 도상(약 50cm) 150mm 천공한다.
 2. 장비 이동 및 천공 : 장비 이동 후 트로리를 고정 후 세팅한다.
 3. 강봉삽입 : 2m 단위로 절단한 50mm 강봉을 천공 깊이까지 커플러로 연결하여 강봉을(L=10.0m) 삽입한다, 이 때 선단부 확장형 내하체를 설치하여 하부 선단 지지력 확보하난.
 4. 압력 그라우팅 : 공 입구부 발포우레탄 패커를 강봉에 제작 설치 후 그라우팅 실시한다.
 5. Nut 및 Plate 체결 : 도상콘크리트 위에 지압판을 위치하고 볼트로 체결한다.
 6. 천공 흙 무수축 Mortar 작업



그림 4.5 활동역지말뚝공 상세 시공 순서

(2) 초속경 시멘트계 채움재 정·동적 실내시험을 통한 물성 평가

- 본 절에서는 시험시공 구간의 보강방안으로 선정된 활동역지말뚝공 적용 시 압력 그라우팅제 초속경시멘트에 대한 정·동적 실내시험을 실시하였다.

가. 공시체 제작 및 배합비

- 초속경 시멘트 그라우팅제 배합비는 표 4.2와 같으며, 배합 후 경화시간 30~40분 경과시 컵 등을 이용하여 그라우팅제를 받아내어 경화정도를 확인 후 주입하게 된다.

표 4.2 초속경 시멘트 배합비

구 분	시멘트	물	비고
1m ³ 기준	800kg	734L	분말도 5.760

- 위와 같은 배합비를 통해 총 9개(일축압축강도 시험 4개, 반복재하시험 4개, 예비시험 1개)의 공시체를 제작한 후 28일간의 양생을 실시하였다. 단, 초속경 시멘트의 경우 물과 맞닿을 시 강도 저하가 일어남에 따라 자연양생으로 진행하였다.

- 본 연구에서는 콘크리트의 강도 시험용 공시체 제작방법(KS F 2403) 기준에 따라 일축압축시험 시편은 H×D(200mm ×100mm), 반복재하시험 시편은 H×D (150mm×100mm)로 제작하였다.

- 몰드는 비흡수성으로 시멘트에 침식되지 않는 재료로 만들어진 것으로 하였으며 콘크리트를 다져 넣기 전에 광물성 기름 또는 비반응성 박리제를 발라 탈형시 원활하도록 하였다.

- 초속경 시멘트의 경우 경화가 진행됨에 따라 공시체 상단에 약 20mm정도 물이 고여 면이 고르게 형성되지 않아 공시체 탈형 후 그림 4.6과 같이 연마 작업을 실시하였다.



그림 4.6 초속경 시멘트 상·하면 연마 작업 전경



그림 4.7 공시체 몰드 타설후 모습

나. 일축압축강도 시험을 통한 정적물성 평가

① 일축압축강도 시험방법

㉞ 시험 개요

- 일축압축 시험기는 변형 제어식 압축 장치, 하중계 및 변위계로 구성되며 본 시험에서는 HCT-DC 100 장비를 사용하였다.
- 초속경 시멘트 공시체 정적물성 평가를 위해 일축압축강도 시험을 수행함으로써 채움재의 강도를 추정하고자 하였으며, 공시체 규격에 약 20cm정도 모자란 규격으로 인해 콘크리트 코어 압축강도 시험 방법(KS F 2422) 기준을 준용하여 시험을 진행하였다. 시험에 앞서 모든 공시체의 단위중량(kg/m^3)을 측정하였으며 그 결과는 표 4.3과 같다.



그림 4.8 일축압축 시험기(HCT-DC 100)

표 4.3 공시체의 단위중량

공시체 번호	1	2	3	4
단위중량(kg/m^3)	1376.04	1369.34	1367.84	1304.40
평균	1354.41			

㉟ 시험 순서

1. 공시체의 상하 끝면 및 상하의 가압판의 압축면을 청소한다.
2. 공시체를 공시체 지름이 1% 이내의 오차에서 그 중심축이 가압판의 중심과 일치하도록 놓는다.
3. 시험기의 가압판과 공시체의 끝면은 직접 밀착시키고 그 사이에 쿠션재를 넣어서는 않는다.
4. 공시체에 충격을 주지 않도록 똑같은 속도로 하중을 가한다. 하중을 가하는 속도는 압축응력도의 증가율이 매초 $0.6 \pm 0.4 \text{MPa}$ 가 되도록 한다.
5. 공시체가 급격한 변형을 시작한 후에는 하중을 가하는 속도의 조정을 중지하고 하중을 계속 가한다.
6. 공시체가 파괴될 때까지 시험기가 나타내는 최대하중을 유효숫자 3자리까지 읽는다.



(a) 공시체 1번



(b) 공시체 2번



(c) 공시체 3번



(d) 공시체 4번

그림 4.9 시험 후 공시체 파괴형상

② 시험결과에 따른 정적 물성 도출

- 본 시험은 압축강도의 총 4번에 걸쳐 일축압축강도 시험을 수행하였으며, 일축압축강도 결과는 아래 표 4.4와 같이 나타났다.

표 4.4 일축압축강도 시험 결과

공시체 번호	1	2	3	4
압축강도(MPa)	10.60	10.20	8.62	8.75
평균	9.54			

- 수치해석 수행 시에 활용할 정탄성계수 산출을 위해 추가적으로 콘크리트 정탄성계수 시험방법(KS F 2438) 기준을 준용하여 시험을 진행하였으며, 최종적으로 시험 결과에 따른 초속경시멘트 공시체 정적 물성치는 표 4.5와 같이 나타났다.

표 4.5 시험 결과에 따른 정적 물성치

Case	압축강도 (MPa)	정탄성계수 (MPa)	평균 정탄성계수 (MPa)
1	10.60	7,040	6,785
2	10.20	6,840	
3	8.62	6,580	
4	8.75	6,680	

- 횡방향 변형률과 종방향 변형률을 측정하여 공시체의 포아송비를 산출하였으며, 그 결과는 아래 표 4.6과 같이 나타났다.

표 4.6 공시체의 포아송비

공시체 번호	1	2	3	4
포아송비	0.25	0.24	0.25	0.24
평균	0.25			

다. 반복재하시험을 통한 동적물성 평가

㉠ 반복재하시험방법

㉡ 시험 개요

- 본 시험 또한 압축강도시험과 같이 각 4회에 걸쳐 반복재하시험을 수행하였으며, 열차 운행에 대한 채움재의 동적거동 및 피로거동을 파악하기 위해 sin(정현)파 형태의 반복하중 재하가 가능한 시험기를 이용하여 진행하였다.
- 실험에 앞서, 실제 열차하중 재하시 채움 구간의 응력을 고려하기 위해 원지반해석을 통한 구속응력과 열차의 복선운행시 발생하는 채움 구간의 최대 수직응력으로 산출하여 축차응력을 하중조건으로 적용하여 재료 시멘트 함량별 동적물성을 평가하였다.

㉢ 열차운행에 따른 하중 빈도수

- 시멘트 함량에 따른 재료별 동적 물성을 검토하기 위하여 하중의 빈도수를 0.5Hz부터 5Hz까지 진행하였으며, 하중주파수는 식 4.1를 이용하여 열차속도별 빈도수를 표 4.7과 같이 산출하였다. 이때 열차 타격거리는 국가건설기준 KDS 47-10-45를 준용하여 표준 열차하중인 EL-18하중의 유효타격거리 18m를 사용하였다.

$$f = \frac{v}{d} \quad (4.1)$$

여기서, f : 하중 빈도수 (Hz)
 v : 하중 재하속도 (m/s)
 d : 하중 타격거리 (m)

표 4.7 열차속도대역별 빈도수

열차속도	32 km/h	65 km/h	130 km/h	194 km/h	260 km/h	324 km/h
빈도수	0.5 Hz	1 Hz	2 Hz	3 Hz	4 Hz	5 Hz

- 열차 운행횟수를 고려하기 위하여 표 4.8과 같이 KTX 및 일반열차 운행현황을 조사하였으며, 주중의 경우 KTX는 약 200회, 일반열차는 346회 정도로 운행하는 것으로 확인되었다.

표 4.8 KTX 및 일반열차 운행현황('14.8월 현황, 코레일)

구분	1일 열차운행 횟수	
	주중	주말
KTX	197~203	222~227
일반열차	346	343~349
운행횟수(회)	543~549	568~571

- 하중 재하 사이클 수는 시험장비 및 환경적 조건 등을 고려하여 KTX 및 일반열차 혼용 구간을 기준으로 최소 운행횟수 500회로 산정하였으며, 시험의 신뢰성을 확보하기 위해 4회씩 수행하였다.

표 4.9 반복재하시험을 통한 동탄성계수 측정 시험조건

조 건	값					
Cycle	각 하중빈도수 당 500 회					
축차응력($\sigma_1 - \sigma_3$)	80kPa					
하중 빈도수	0.5 Hz	1 Hz	2 Hz	3 Hz	4 Hz	5 Hz

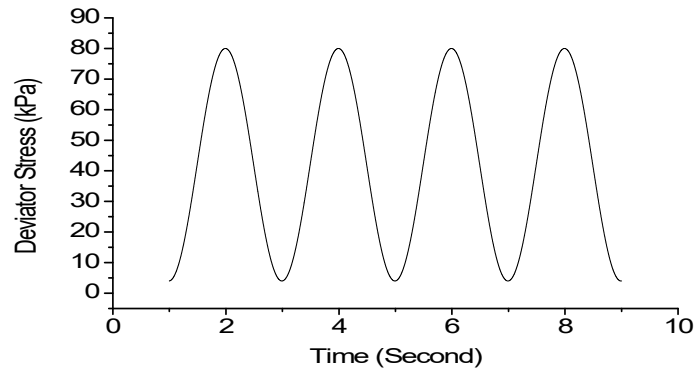
- 본 시험에서는 $\mu\text{m}/\text{m}$ 의 저변형률 영역에서의 변형률을 측정하기 위해 변형률 게이지를 시편에 추가로 부착하여 시험을 진행하였다. 변형률 게이지에 수신된 신호를 FFT(Fast Fourier Transform) 변환을 통해 전기신호 등 노이즈를 제거하여 신뢰도 높은 변형률을 산출하고자 하였다.



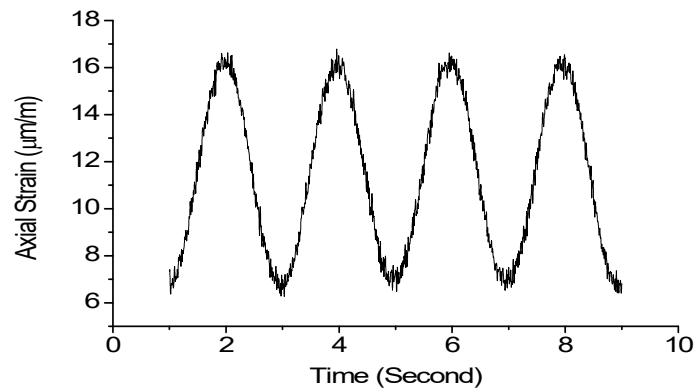
그림 4.10 Cycle Loading 시험 전경

② 시험결과에 따른 동적 물성치 도출

- 반복재하시험 결과, 시간에 따른 정현파 하중과 그에 상응하는 변형률을 그림 4.11과 같이 나타내었으며, 정현파 하중이 재하됨에 따라 그에 따른 변형률도 정현파 형태로 나타났다.



(a) 응력선도



(b) 변형률 선도

그림 4.11 시간에 따른 응력 및 변형률 그래프

- 응력-변형률 관계 그래프를 통해 공시체는 탄성영역에서의 변형상태로 나타난다. 이러한 거동은 응력-변형률 그래프의 할선 기울기를 통해 조건에 따른 채움재의 동탄성계수를 표 4.10과 같이 산정하였다.

표 4.10 초속경 멘트 하중 빈도수에 따른 동탄성계수 시험결과

공시체 번호	동탄성계수(MPa)					
	0.5 Hz	1 Hz	2 Hz	3 Hz	4 Hz	5 Hz
1	4918.8	4920.9	4975.4	5041.9	5059.1	5086.4
2	5016.7	5065.5	5090.7	5139.6	5248.5	5273.2
3	4636.1	4695.3	4765.7	4837.7	4957.9	4999.8
4	5287.9	5361.3	5426.2	5511.4	5598.6	5685.9

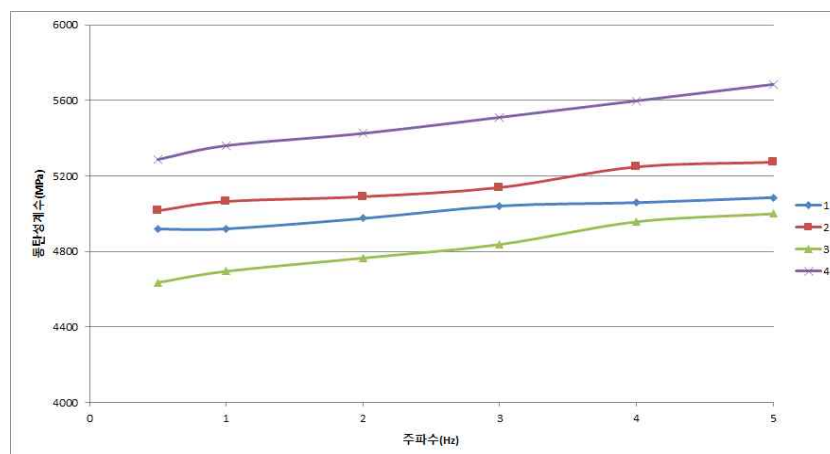


그림 4.12 하중주파수에 따른 동탄성계수(초속경시멘트)

○ 초속경 시멘트계 채움재 정동적 실내시험을 통한 물성 소결

- 초속경 시멘트계 정적 압축강도 시험 결과 8.62~10.60MPa로 나타났으며, 여굴 채움 기준 18MPa 미치지 않으나 보통 시멘트계 채움재 시멘트함유량 7%~9%의 압축강도값과 유사한 강도의 결과값이 나타났다.
- 초속경 시멘트계 채움재의 동적거동 및 피로거동을 파악하기 위해 sin(정현)파 형태의 반복하중 재하가 가능한 시험기를 이용하여 진행하였으며, 반복재하시험결과, 하중주파수가 증가할수록 동탄성계수가 증가하는 것을 알 수 있었다. 이를 통해 초속경 시멘트의 공진 발생 영역의 속도대역은 열차속도 324km/h 이상에서 나타날 것으로 판단된다.
- 다음 절에서는 초속경 시멘트계 채움재 실내시험 물성치를 통해 수치해석시 보강재 물성치에 적용하고 시험시공 구간의 터널내 보강 효과를 확인하고자 하였다.

(3) 시험시공 구간 보강 전·후 현장 진동가속도 계측을 통한 보강방안 안정성 검증

- 본 절에서는 활동역지말뚝공 적용 전·후 시험시공 구간 터널 하부 위치(도상/보조도상/공동구)의 진동가속도를 계측함에 따라 진동 전파형태의 비교·검토하고 보강방안 안정성 검증을 수행하고자 하였다.

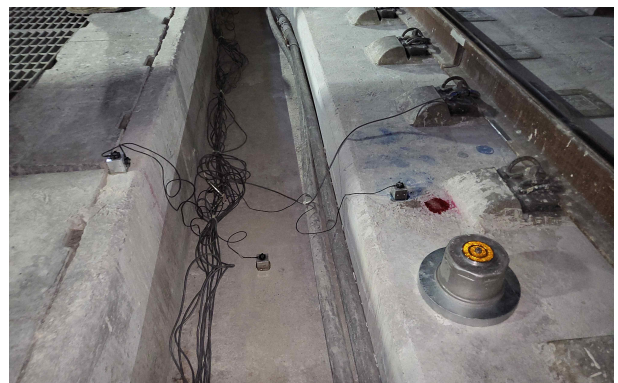
① 현장계측 개요

㉠ 계측지점 및 장비제원

- 열차운행에 따라 발생하는 터널의 동적거동은 진동방향에 따라 나눌 수 있는데, 열차 운행방향과 동일한 압축파형 보다는 전단방향의 파형에 대한 영향이 크게 발생함에 따라 수직방향(z)에 따른 수평방향(y)의 거동을 검토하고자 위치별 진동가속도계를 설치하였으며, 각 방향에 대한 진동 파형형태를 검토하고자 하였다.
- 열차운행에 따른 진동파형 형태를 검토하기 위해 터널 하부 위치별 가속도계를 설치하였으며, 열차의 차량 편성수, 속도, 레일저부응력 등을 검토하기 위해 레일 저부에 1축 스트레인게이지를 부착하였다. 본 연구에서 사용한 계측장비는 앞 장에서의 제원과 동일하며, 시험시공 구간의 터널내 계측장비 설치 전경은 그림 4.13과 같다.



(a) 보강 전



(b) 보강 후

그림 4.13 터널내 계측장비 설치전경

② 터널하부 진동가속도 계측 및 분석

- 보강 전·후 열차운행시 발생하는 터널의 거동을 검토하기 위해 진동가속도 및 레일응력 계측을 수행하였으며 보강 구간으로 선정된 A, B 구간의 계측 위치는 궤도 구조의 상·하선 분리시공으로 인해 동일 구간에 상·하선으로 나누어 그림 4.14와 같이 총 8지점을 계측하였다. Point 4번의 경우 다른 Point와 달리 천이 구간의 끝자락에 위치하는 것으로 보아 열차진동 저감효과가 다소 떨어질 것으로 사료된다.

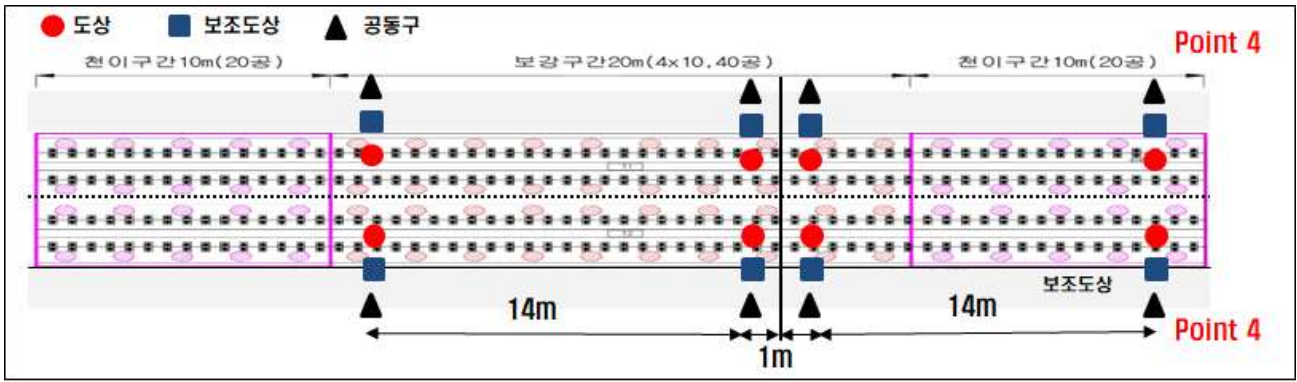


그림 4.14 보강 구간 A, B 가속도 계측 위치

- 본 구간의 운행되는 열차의 편성수 및 열차속도 등을 검토하기 위해 레일저부에 1축 스트레인 게이지를 부착하여 계측하였다. 계측 구간의 열차속도는 주로 170km/h 시속의 열차가 운행하고 있으며 객차는 총 7량으로 편성되어 있고, 저부 응력은 38~43MPa로 측정되었다.

㉞ 보강 전 A 구간(상선)

- 계측 위치별 진동가속도 계측결과, 그림 4.15와 같이 상선 변상 구간 열차운행에 따라 진동원이 터널 벽체로 이동하면서 수직방향으로 전파되는 진동가속도는 점차적으로 감소되어 나타났다. 그러나 공동구 지점에서 수평방향 진동가속도가 수직방향에 비해 약 2.3~4.7배 정도 크게 나타났으며, 이는 궤도 하부잡석 구간의 존재로 인해 진동가속도가 전파하면서 열차진동에 따른 공동구 수평방향의 진동이 증폭되었을 것으로 판단된다. 또한 일부 구간에서의 도상 수직방향 진동가속도가 최대 1.0G 이상의 진동이 나타난 것으로 보아 TCL과 보조도상층의 분리 현상으로 인해 도상의 진동가속도가 증폭된 것으로 판단된다.

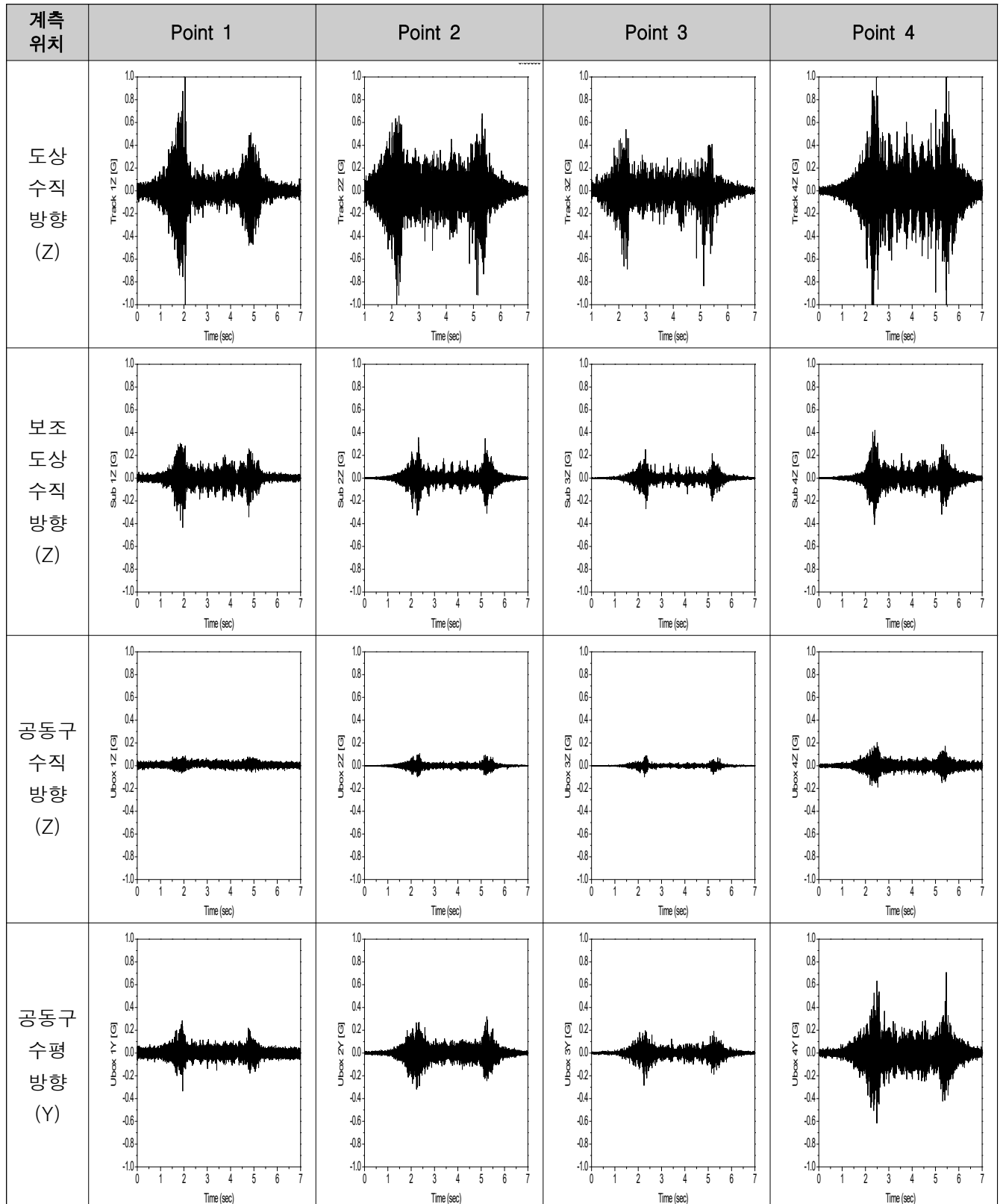


그림 4.15 보강 전 A(상선) 가속도 계측 결과

㉔ 보강 전 B 구간(하선)

- 계측 위치별 진동가속도 계측결과, 그림 4.16과 같이 하선 변상 구간 열차운행에 따라 진동원이 터널 벽체로 이동하면서 수직방향으로 전파되는 진동가속도는 점차적으로 감소되어 나타났으나, 일부 구간에서 보조도상 최대가속도가 0.5G를 초과하여 나타났다. 또한 보강 구간 A와 마찬가지로 공동구 지점에서 수평방향 진동가속도가 수직방향에 비해 약 1.5~3.9배 정도 크게 나타났다. 또한 일부 구간에서의 도상 수직방향 진동가속도가 최대 1.0G 이상의 진동이 나타난 것으로 보아 TCL과 보조도상층의 분리 현상으로 인해 도상의 진동가속도가 증폭된 것으로 판단된다.

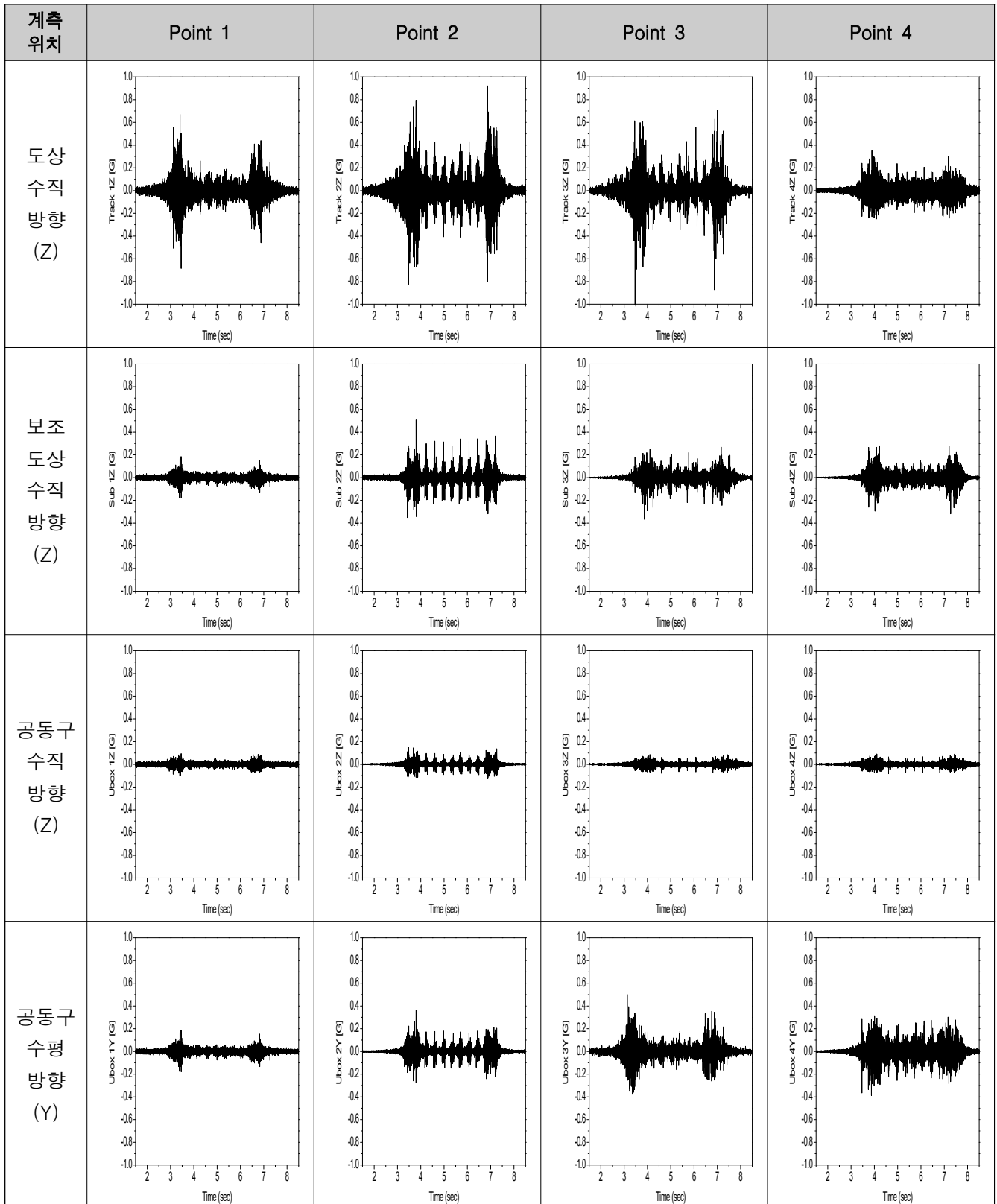


그림 4.16 보강 전 B(하선) 가속도 계측 결과

㉔ 보강 후 A 구간(상선)

- 계측 위치별 진동가속도 계측결과, 그림 4.17과 같이 상선 변상 구간 열차운행에 따라 진동원이 터널 벽체로 이동하면서 수직방향으로 전파되는 진동가속도는 점차적으로 감소되어 나타났다. 앞선 보강 전 계측 결과 대비 공동구 지점 수평가속도가 약 37~76% 감소되어 나타났다. 이는 마이크로파일의 존재로 인해 열차의 진동이 전파되면서 감소한 것으로 판단된다. 그러나 보강 구간에 위치한 Point 1~3 번과 달리 천이 구간의 Point 4번의 경우 공동구 수평가속도가 0.5G 이상의 높은 진동가속도 값을 나타는 것으로 보아 천이 구간의 진동 저감 효과가 다소 떨어지는 것을 확인하였다.

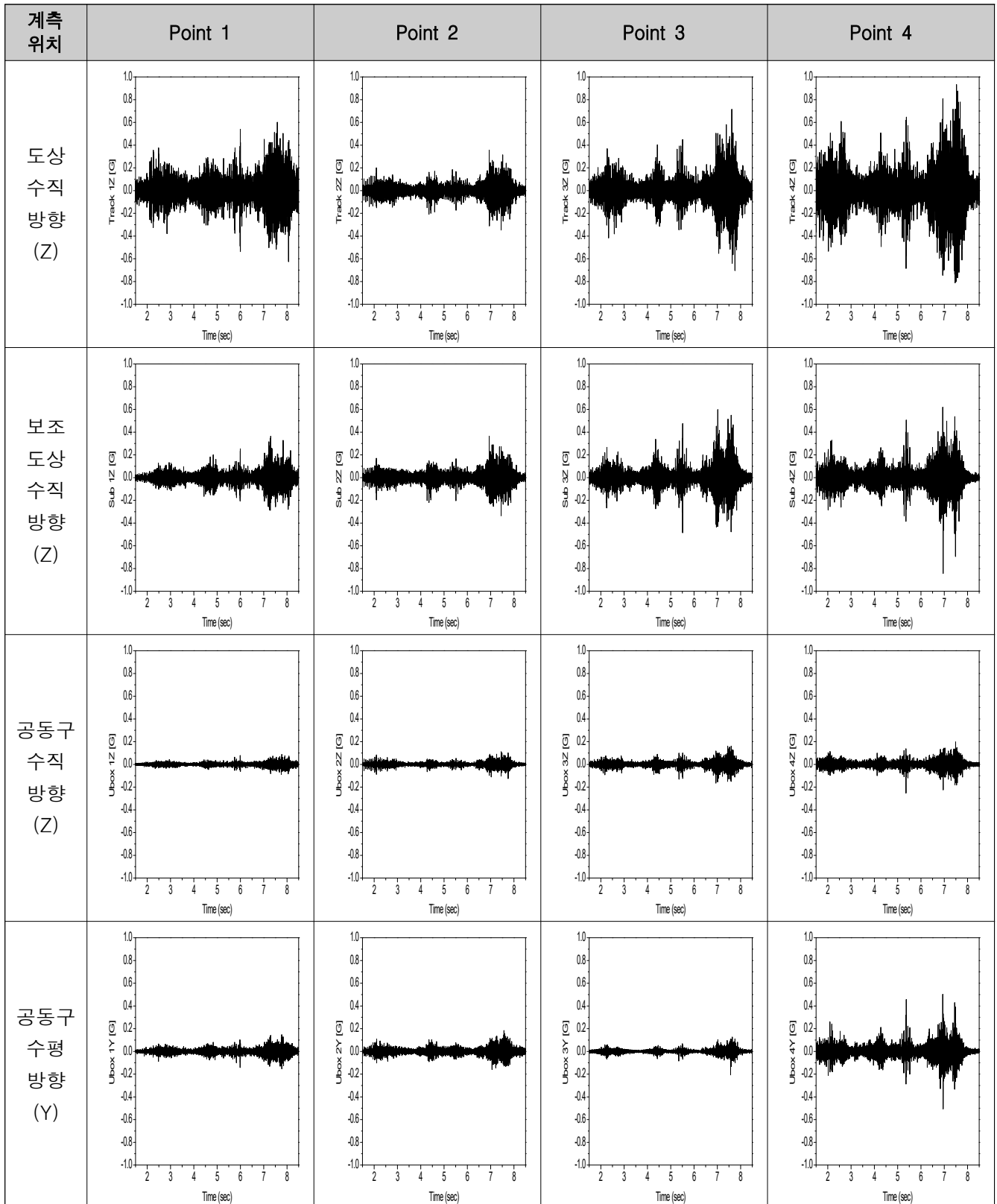


그림 4.17 보강 후 A 가속도 계측 결과

㉔ 보강 후 B 구간(하선)

- 계측 위치별 진동가속도 계측결과, 그림 4.18과 같이 상선 변상 구간 열차운행에 따라 진동원이 터널 벽체로 이동하면서 수직방향으로 전파되는 진동가속도는 점차적으로 감소되어 나타났다. 앞선 보강 전 계측 결과 대비 공동구 지점에서 공동구 수평가속도가 약 53~71% 감소되어 나타났다. 이는 마이크로파일의 존재로 인해 열차의 진동이 전파되면서 감소한 것으로 판단된다. 또한 보강 수행전 0.5G를 초과하던 진동가속도 또한 감소하여 나타났다. 또한 A 구간과 마찬가지로 Point 4번의 진동 저감 효과가 떨어져야 했다. 그러나 보강 수행 전 열차로부터 최초로 발생되는 도상 가속도가 0.4G 이하의 미약한 값으로 나타나 보강 수행 후 Point 4번의 진동가속도가 전체적으로 약 0.23G 이하로 작게 나타났다.

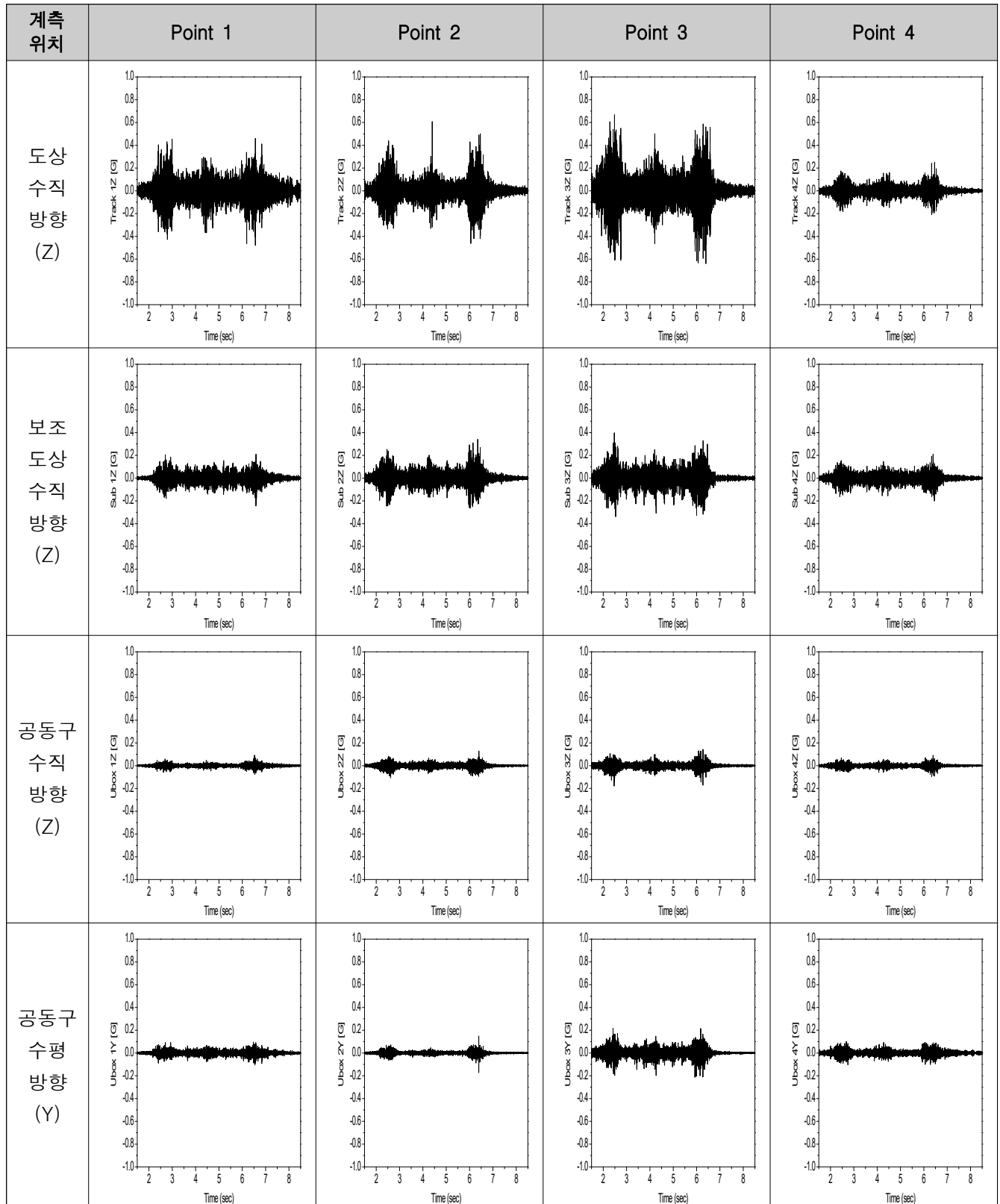


그림 4.18 보강 후 B 가속도 계측 결과

○ 시험시공 구간 보강 전·후 현장 진동가속도 계측을 통한 보강방안 안정성 검증 소결

- 본 절에서는 보강방안 시공후 터널의 동적거동을 검토하기 위해 시험시공 구간의 각 구간별 열차 운행에 따른 진동가속도를 계측함에 따라 진동 증폭의 크기를 검토하고자 하였다.
- 구간별 레일응력을 계측한 결과, 총 7량으로 구성된 열차를 시속 170km/h로 일괄 운행하였으며, 계측 구간내 저부응력이 약 38~43MPa 이내로 측정되었다.
- 보강 수행전 일부 구간에서 보조도상 최대가속도가 0.5G를 초과하여 나타났으며, 보강 구간 A, B 구간 모두 공동구 지점에서 수평방향 진동가속도가 수직방향에 비해 약 1.5~4.7배 정도 크게 나타났다. 또한 일부 구간에서의 도상 수직방향 진동가속도가 최대 1.0G 이상의 진동이 나타난 것으로 보아 TCL과 보조도상층의 분리 현상으로 인해 도상의 진동가속도가 증폭된 것으로 판단된다.
- 보강 수행후 앞선 보강 전 계측 결과와 달리 공동구 지점에서 수평방향 진동가속도가 현저히 감소되어 나타났다. 이는 마이크로파일의 존재로 인해 열차의 진동이 전파되면서 감소한 것으로 판단된다. 그러나 일부 구간에서 공동구 수평가속도가 0.5G 이상의 높은 진동가속도 값을 나타내는 것으로 보아 천이 구간의 진동 저감 효과가 다소 떨어지는 것을 확인하였다.

(4) 수치해석을 통한 시험시공 구간 검증 수행

- 앞 절에서 수행되어진 실내시험을 통한 보강재 물성치 및 현장 진동가속도 계측값을 통해 시험시공 구간의 수치해석 모델링을 수행하고, 구현된 모델링을 통해 보강공법 적용 전·후 공동구 전단응력 비교·분석을 통해 시험시공 구간 검증을 수행하고자 한다.

가. 수치해석 개요

- 시험시공 구간을 대상으로 사전에 계측된 각 위치별 진동가속도를 통해 터널 비선형 동해석을 수행하고자 하였으며, 이를 위해 FEM 소프트웨어인 Lusas 프로그램을 사용하여 수치해석을 수행하였다. 열차 하중에 의해 발생한 진동이 터널 주변 암반으로 전파되는 영향을 고려하여 터널 외부 주변 암반층 범위를 터널 상하좌우로 터널 반경의 6배 만큼까지 고려하여 모델링하였다. 이 때 터널 암반은 잔류응력에 따라 강도가 달라지므로 동해석 수행 전 그림 4.19와 같이 지반의 초기조건을 구현한 정해석을 수행하여 터널 굴착 후 터널에 작용되는 지중응력을 추가적으로 고려하였다.

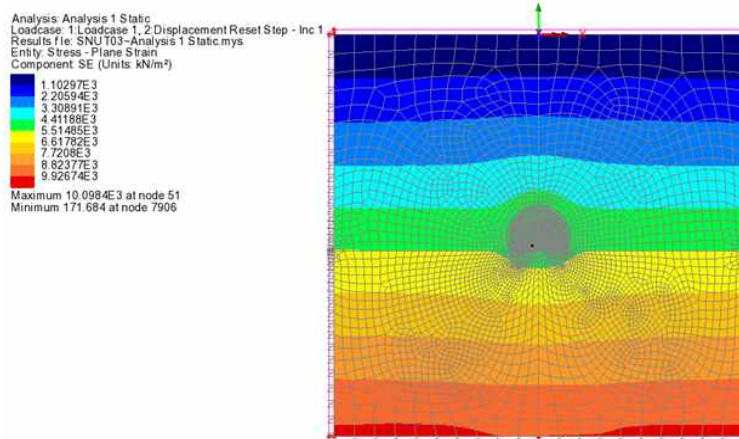


그림 4.19 지반 초기 응력 세팅

Analysis: Analysis 1 Static
Loadcase: 11 Deactivation Tunnel, 3 Increment 3
Results File: SNU103-Analysis 1 Static.mys
Entity: Displacement
Component: RSLT (Units: m)
0.0
7.74225E-3
0.0154845
0.0232267
0.030969
0.0387112
0.0464535
0.0541957
0.061938
Maximum: 0.0696802 at node 3176
Minimum: 0.0 at node 1

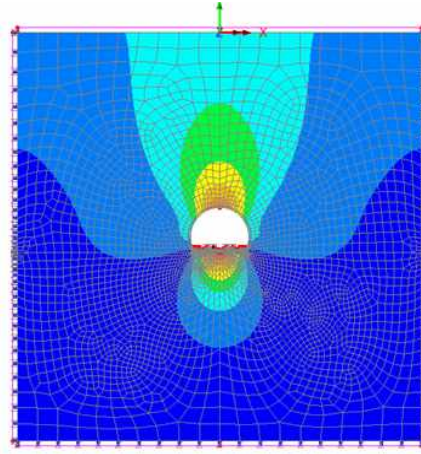


그림 4.20 터널 굴착 후 최초 발생 처짐

- 보강 구간의 중요 변상 대상인 공동구의 응력 검토를 위해 터널에 작용되는 지중응력을 구현시킨 후 보강 전 계측된 진동가속도 및 레일응력을 각 측정 위치에 작용시켰다. 이 때 작용되는 계측데이터는 보강 전 A 구간의 데이터 중 전체 진동가속도 최대값이 계측된 Point 4번 데이터를 사용하였다. 또한 기존 설계 자료를 토대로 표 4.11과 같이 적용하였으며, 터널내 궤도 콘크리트 구조물 탄성계수는 콘크리트 구조설계기준(2012)을 이용하여 설계 강도에 따라 각각 산정하여 적용하였다. 또한 여굴부 구간 물성치는 해당 구간의 터널 바닥부 여굴 처리방안인 잡석 채움의 실내실험값으로 적용하였다.

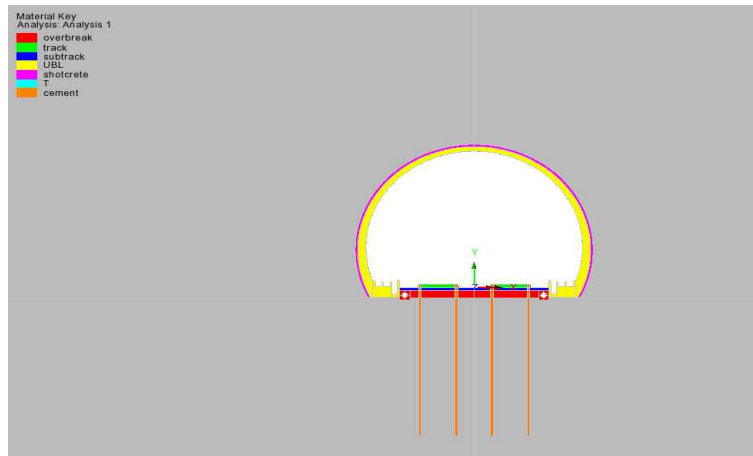


그림 4.21 수치해석 모델링

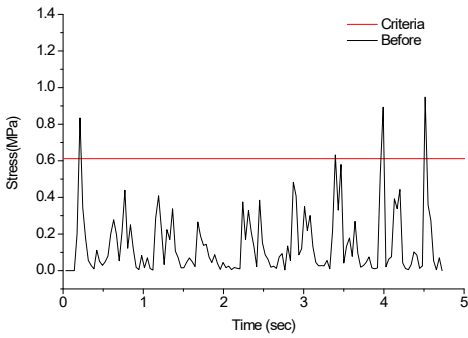
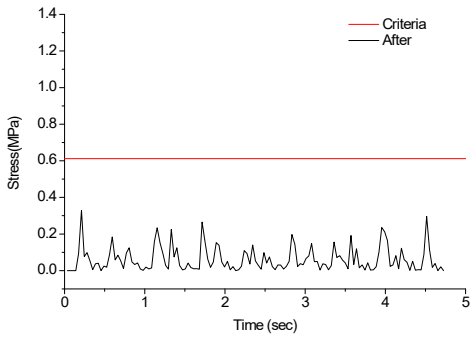
표 4.11 수치해석 적용 물성치

구간	Model Type	단위중량 (kN/m ³)	탄성계수 (MPa)	포아송비	점착력 C(kPa)	내부마찰각 $\phi(^{\circ})$
Level V Rock	Mohr Coulomb	21	1,000	0.3	100	33
레일	Elastic	78.5	210,000	0.3	-	-
도상	Elastic	25	27,500	0.2	110	31
보조도상	Elastic	23.5	21	0.2	-	-
공동구	Elastic	24	26,700	0.2	-	-
콘크리트 라이닝	Elastic	24	26,700	0.2	-	-
여굴부(여굴두께 50cm)	Mohr Coulomb	19	160	0.3	30	33-
마이크로파일	Elastic	13	4,636	0.25	-	-

나. 보강 전·후시험시공 구간 수치해석을 통한 공동구 응력 검토 결과

- 터널 비선형 동해석 수행을 통해 예측된 현장 데이터값 적용 결과 공동구 벽체 상부에 작용되는 최대 전단응력은 표 4.12와 같이 나타났다. 보강 수행 전 최대 전단응력은 0.948MPa로 나타났으며, 이는 무근콘크리트의 전단내하력 0.612MPa를 초과하는 값으로서 공동구 상단 변상 결과로 이어진 것으로 판단된다. 또한 마이크로 파일 시공을 추가한 보강 후 모델 결과값은 0.329MPa로 보강방안 적용에 따른 응력감소 효과를 확인하였다.

표 4.12 시멘트 채움재별 공동구 벽체 전단응력 검토 결과

구분(MPa)	보강 전	보강 후
전단응력 그래프		
최대 전단응력	0.948	0.329
초과 여부	0.948 > 0.612 N. G	0.329 < 0.612 O. K

○ 수치해석을 통한 시험시공 구간 검증 수행 소결

- 본 절에서는 사전에 수행된 실내시험을 통한 보강재 물성치 및 현장 진동가속도 예측값을 통해 시험시공 구간의 수치해석 모델링을 수행하고, 구현된 모델링을 통해 보강공법 적용 전·후의 공동구 전단응력을 비교·분석하여 시험시공 구간 검증을 수행하고자 하였다.
- 보강 수행 전 최대 전단응력은 0.948MPa로 나타났으며, 이는 무근콘크리트의 전단내하력 0.612MPa를 초과하는 값으로서 공동구 상단 변상 결과로 이어진 것으로 판단된다. 또한 마이크로 파일 시공을 추가한 보강 후 모델 결과값은 0.329MPa로 보강방안 적용에 따른 응력감소 효과를 확인하였다.

3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도

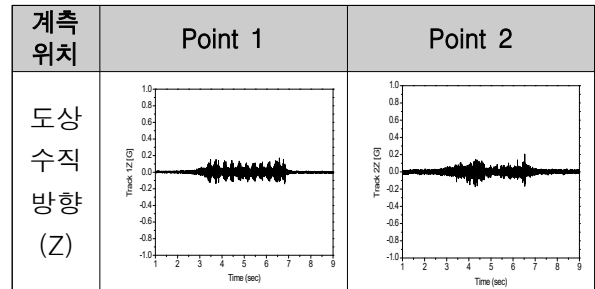
1) 연구수행 결과

(1) 정성적 연구개발성과

- 기존 터널내 발생한 균열 및 파괴원인 분석
 - 국내외 여굴처리 방안 및 국내 여굴처리 구간 현황 검토 및 문제점 보완
- 여굴 크기와 채움재 및 주변 암반조건에 따른 열차진동특성 분석
 - 수도권 고속철도 터널내 레일&도상 등 진동 및 하중전달 특성 및 분석
 - 강릉선 고속철도 터널내 레일&도상 등 진동 및 하중전달 특성 및 분석

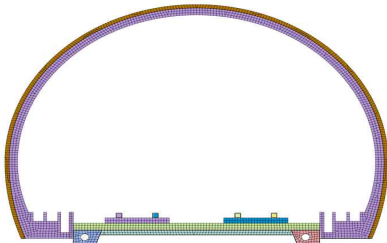


[수도권 및 강릉선 현장계측]

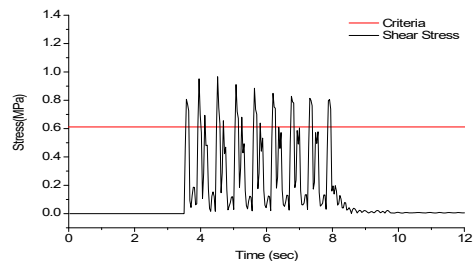


[열차운행시 진동특성 분석]

- 수치해석을 통한 터널 바닥 진동특성
 - 현장계측 결과와 실내시험에 의한 물성치를 활용하여 채움재에 따른 진동특성 분석 및 고찰
 - 시험시공에 의한 물성치를 활용하여 보강방안 적용에 따른 진동특성 비교·분석 및 고찰



[터널 바닥 진동해석]



[해석을 통한 공동구 벽체 전단응력 분석]

- 수치해석을 통한 터널 바닥 진동특성
 - 채움재 배합설계 및 기준 제시
 - 철도 터널 바닥부에 적용 가능한 보강방안 제시

(2) 정량적 연구개발성과

○ 채움재 정·동적 물성 평가

- (시멘트계)공시체 제작 및 실내시험 실시
- (우레탄계)공시체 제작 및 실내시험 실시
- 시험시공에 의한 Sampling 실내시험 실시



[시멘트 및 우레탄 공시체 제작]



[공시체 압축강도 시험]

[과학적 성과]

□ 논문(국내외 전문 학술지) 게재

번호	논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행기관	SCIE 여부 (SCIE/비SCIE)	게재일	등록번호 (ISSN)	기여율
1	TBM터널 궤도 하부 채움재와 궤도진동과의 상관관계 분석	한국방재 학회 논문집	조국환	제19권 7호	대한민국	한국방재학회	비SCIE	2019년 12월	2287-6723	100%
2	Analysis of Dynamic Characteristics of Deformed Concrete Slab Track on Transition Zone in High-Speed Train Line According to Train Speeds	Applied Sciences	Kook-Hwan , Cho	10(20)	Switzerland	MDPI	SCIE	2020년 10월	2076-3417	100%

□ 국내 및 국제 학술회의 발표

번호	회의 명칭	발표 내용	발표자	발표 일시	장소	국명

□ 기술 요약 정보

번호	연도	기술명	요약 내용	기술 완성도	등록 번호	활용 여부	미활용사유	연구개발기관 외 활용 여부	허용방식

□ 보고서 원문

번호	연도	보고서 명	발간일	등록 번호

□ 생명자원(생물자원, 생명정보)/화합물

번호	생명자원(생물자원, 생명정보)/화합물 명	등록/기탁 번호	등록/기탁 기관	발생 연도

[기술적 성과]

☐ 지식재산권(특허, 실용신안, 의장, 디자인, 상표, 규격, 신품종, 프로그램)

번호	구분	지식재산권 등 명칭 (건별 각각 기재)	국명	출원			등록			기여율	활용 여부
				출원인	출원일	출원번호	등록인	등록일	등록번호		
1	발포성 우레탄을 포함하는 도상 하부 보강 및 복원에 관한 조성물 및 이를 이용한 시공방법	대한민국	(주)대한하 이텍건설, 서울과학 기술대학교 산학협력단	2020년 11월16일	2020-01528 34	1-1-2020 -1224639 -58	(주)대한하 이텍건설, 서울과학 기술대학교 산학협력단	2021년 04월28일	제2248 273호	100%	-

○ 지식재산권 활용 유형

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

☐ 저작권(소프트웨어, 서적 등)

번호	저작권명	창작일	저작자명	등록일	등록번호	저작권자명	기여율

☐ 신기술 지정

번호	명칭	고시일	보호기간	지정번호

☐ 기술 및 제품 인증

번호	인증 분야	인증기관	인증 내용		인증 획득일	국가명
			인증명	인증번호		

☐ 표준화

○ 국내표준

번호	인증구분	인증여부	표준명	표준인증기구명	제안주체	표준종류	제안/인증일자

○ 국제표준

번호	표준화단계 구분	표준명	표준기구명	표준분과명	의장단 활동여부	표준특허 추진여부	표준개발 방식	제안자	표준화 번호	제안일자

[경제적 성과]

☐ 시제품 제작

번호	시제품명	출시/제작일	제작업체명	설치장소	이용분야	사업화 소요 기간	인증기관 (해당 시)	인증일 (해당 시)

☐ 현장적용

번호	적용기술명	적용일	발주기관명	적용 연구개발기관명	적용현장명(장소)

☐ 기술 실시(이전)

번호	기술 이전 유형	기술 실시 계약명	기술 실시 대상 기관	기술 실시 발생일	기술료	
					발생 연도	발생액(천원)

☐ 사업화 투자실적

번호	연도	투자 자금 성격*	추가 연구개발 투자(천원)	설비 투자(천원)	기타 투자(천원)	합계(천원)

☐ 사업화 현황

번호	사업화 방식	사업화 형태	지역	사업화명	내용	업체명	매출액		매출 발생 연도	기술 수명
							국내 (천원)	국외 (달러)		

☐ 매출 실적(누적)

번호	사업화명	발생 연도	매출액		합계	산정 방법
			국내(천원)	국외(달러)		
합계						

□ 사업화 계획 및 무역 수지 개선 효과

성과					
사업화 계획	사업화 소요기간(년)				
	소요예산(천원)				
	예상 매출규모(천원)		현재까지	3년 후	5년 후
	시장 점유율	단위(%)	현재까지	3년 후	5년 후
		국내			
		국외			
향후 관련기술, 제품을 응용한 타 모델, 제품 개발계획					
무역 수지 개선 효과(천원)	수입대체(내수)	현재	3년 후	5년 후	
	수출				

□ 고용 창출

번호	사업화명	사업화 업체명	고용창출 인원(명)		합계(명)
			yyyy년	yyyy년	
합계					

□ 고용 효과

구분			고용 효과(명)
고용 효과	개발 전	연구인력	
		생산인력	
	개발 후	연구인력	
		생산인력	

□ 비용 절감(누적)

번호	사업화명	발생 연도	산정방법	비용 절감액(천원)
합계				

□ 경제적 파급 효과

(단위 : 천원/년)

구분	사업화명	수입 대체	수출 증대	매출 증대	생산성 향상	고용 창출 (인력 양성 수, 명)	기타
해당 연도							
기대 목표							

□ 산업 지원(기술지도)

번호	내용	기간	참석 대상	장소	인원(명)

□ 기술 무역

(단위 : 천원)

번호	계약 연월	계약 기술명	계약 업체명	계약업체 국가	총 계약액	기 징수액	해당 연도	징수액	향후 예정액	수출/수입

[사회적 성과]

□ 법령 반영

번호	구분 (법률/시행령)	활용 구분 (제정/개정)	명 칭	해당 조항	시행일	관리 부처	제정/개정 내용

□ 정책활용 내용

번호	구분 (제안/채택)	정책명	관련 기관 (담당 부서)	활용 연도	채택 내용

□ 설계 기준/설명서(시방서)/지침/안내서에 반영

번호	구 분 (설계 기준/설명서/지침/안내서)	활용 구분 (신규/개선)	설계 기준/설명서/ 지침/안내서 명칭	반영일	반영 내용

□ 신진연구자 채용

번호	채용 연구개발기관명	채용일	근로기간	채용인원(명)	채용인원 중 청년인력(명)

□ 전문 연구 인력 양성

번호	분류	연도	현황(명)										
			학위별				성별		지역별				
			박사	석사	학사	기타	남	여	수도권	충청권	영남권	호남권	기타
1	석사	2019		✓			✓		✓				

□ 산업 기술 인력 양성

번호	연도	프로그램명	프로그램 내용	교육 기관	교육 개최 횟수	총 교육 시간	총 교육 인원

☐ 다른 국가연구개발사업에의 활용

번호	연도	중앙행정기관명	사업명	연구개발과제명	연구책임자	연구개발비(천원)

☐ 국제화 협력성과

번호	구분 (유치/파견)	기간	국가	학위	전공	내용

☐ 홍보 실적

번호	홍보 유형	매체명	제목	홍보일

☐ 포상 및 수상 실적

번호	종류	포상명	포상 내용	포상 대상	포상일	포상 기관

[인프라 성과]

☐ 연구시설·장비

번호	구축 기관	연구시설/ 연구장비명	규격 (모델명)	개발여부 (○/×)	연구시설·장비 종합정보시스템* 등록여부	연구시설·장비 종합정보시스템* 등록번호	구축일자 (YY.MM.DD)	구축비용 (천원)	비고 (설치 장소)

2) 목표 달성 수준

연구 개발 목표	달 성 내 용	달성도 (%)
○ 자료조사 및 분석 ○ 여굴 크기와 채움재 및 주변 암반 조건에 따른 열차진동특성 분석 ○ 채움재 배합설계(안) 및 기준 제시 - 여굴 채움재 정적 및 동적 물성 평가 - 수치해석을 통한 터널 바닥 진동특성 분석 ○ 시험시공을 통한 보강 방안 제시	○ 국내외 여굴처리 방안 검토 및 분석 ○ 국내 여굴처리 구간 현황 검토 및 문제점 분석 ○ 정량적 사운딩 기법 개발 ○ GPR탐사, 음향기법을 이용한 여굴 특성 및 주변 지반조건 검토 ○ 터널 도상/보조도상/공동구 가속도계 및 레일응력 측정 ○ 시멘트계 공시체 정·동적 테스트 실시 ○ 우레탄계 공시체 정·동적 테스트 실시 ○ 시험시공에 의한 Sampling 정·동적 테스트 실시 ○ 터널내 현장 조건에 따른 수치해석 수행 ○ 현장계측값을 통한 수치해석 검증 ○ 채움재 및 현장조건에 따른 터널 진동특성 분석 ○ 시험시공에 의한 물성치를 활용하여 채움재에 따른 진동특성 분석 및 고찰 ○ 철도 터널 바닥부에 적용가능한 보수방안 제시	100

4. 연구개발성과의 관련 분야에 대한 기여 정도

○ 진동저감에 적합한 터널 설계방안 제시

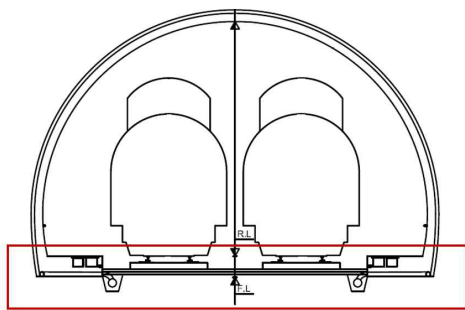
- 본 연구결과를 토대로 열차진동에 대한 문제 제기를 통해 호남고속철도 2단계 설계에서 터널 바닥부 여굴 발생시 18MPa 이상의 콘크리트 채움을 시행하도록 하고 있다.

· 구간 및 연장 : 광주송정~목포 구간 / 총 70.5km
 · 사업 현황 : 광주송정~고막원(26.4km) 구간은 기존선 고속화 완료
 고막원~목포(44.1km) 구간은 2021년 8월 착공 진행

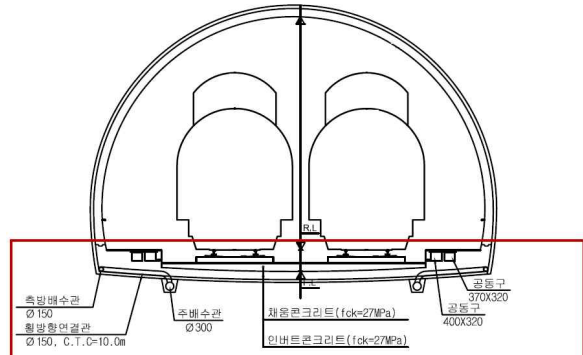
- 평택~오송 구간은 열차 400km/h급 운행노선으로 설계함에 따라 본 연구를 통해 도출된 해석방법들을 활용하여 터널 바닥부 설계방안 및 진동 안정성 분석내용을 제시하였다.

· 구간 및 연장 : 평택~오송 구간 / 총 46.4km 복선전철 건설 예정
 · 사업 기간 : 2020년~2027년(착공예정 : 2023년 01월)

- 당초 무인버트 터널로 설계하였으나 운행속도 증속을 고려하여 바닥부 부분이 라이닝과 폐합되는 인버트 터널로 설계변경을 제안하였다.
- 따라서 기존 및 변경 설계단면에 대한 고유치 및 동적해석을 수행하여 열차속도에 따른 터널 바닥부 최대 진동가속도를 검토하였다.

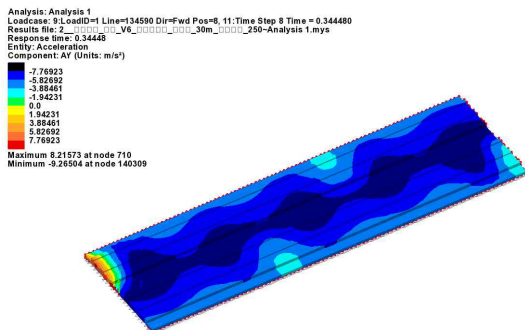


[기존 설계단면]

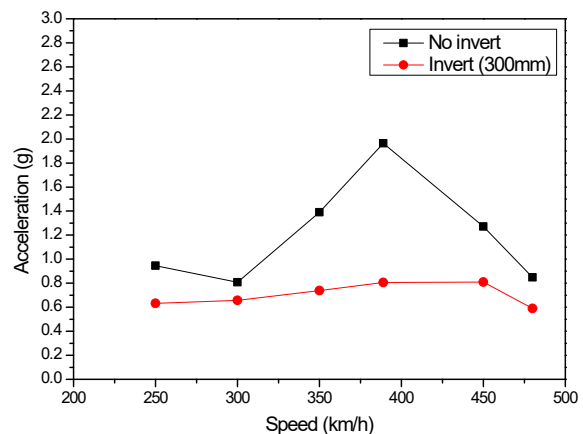


[변경 설계단면]

- 각 설계단면별 고유치해석 및 동해석을 수행하여 열차속도에 따른 터널 바닥부 최대 진동가속도를 검토하였다. 그 결과 기존 설계단면에서는 389km/h 부근에서 공진에 의한 진동가속도 증폭이 발생하였으며, 변경 설계단면의 경우 열차 운행속도 내 공진이 발생하지 않는 것으로 나타났다.



[입계속도 컨투어]



[열차속도에 따른 최대 진동가속도]

- 연구성과를 기반으로 열차 400km/h급 설계시 터널 동적해석을 수행함에 따라 바닥부에 발생하는 최대 진동가속도를 검토하였으며, 공진대역 여부에 따른 구조물 안정성 검토가 가능하다.
- 이와 같은 동적 안정성 분석을 통해 터널 바닥부 설계시 보조도상 두께 및 인버트 설치 여부 등에 대한 설계방안을 개선하였다.

5. 연구개발성과 관리 및 활용 계획

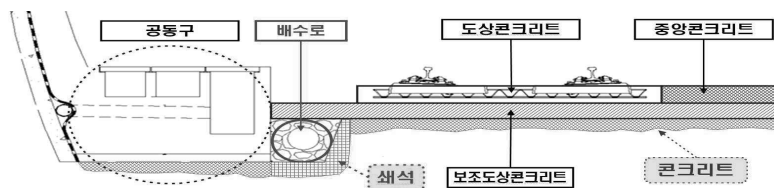
○ 진동저감에 적합한 터널 기준 개선

- 율현터널의 경우 설계 및 시공에 대한 감사원 지적을 받았으며, 이에 대한 조치사항의 일환으로 여굴 및 여굴채움 관련 추가 또는 신설 항목은 다음과 같다.

율현터널 감사 지적사항(배수로 여굴 관련)

[철도전문시방서 상 터널 바닥부 여굴 처리방법 부적정]

철도터널 구간의 암반 상태에 따른 배수로 여굴 처리기준을 마련하지 않은 채 율현터널 배수로 여굴부를 쇄석으로 채워 터널 공동구 균열 등 손상심화 초래



- 본 과제 분석결과에 따르면 터널 시공시 여굴채움이 불량한 경우 열차진동의 증폭 및 구조물 균열 등을 초래할 수 있다. 이에 기준 제·개정이 요구되는 ‘터널 여굴채움재료 및 시공’에 대한 자문을 수행하였다.
- 현재 터널 설계기준의 경우 바닥 맨암거(배수로 인근) 여굴처리기준에 대한 시방기준은 없는 실정이다. 본 과제를 통해 제시된 여굴채움관련 기준사항을 중심으로 관련기준 필요성 및 터널 동적 안정성 문제에 대해 자문의견을 제시하여 현재 기준 개정사항에 대한 검토가 진행 중이다.

터널 설계기준 자문 검토 및 제개정 사유 제시

- 터널 설계기준 및 표준시방서 검토 : KCS 27 20 00 터널 굴착 외 2건

KCS 27 20 00 터널 굴착(예시)

항목	현행	제·개정 근거 / 사유
3.4.1	3.4.1 여굴	
	(4) 여굴이 과대하게 발생한 곳은 응력 집중에 따른 불안정 상태가 발생하지 않도록 숏크리트와 록볼트 등으로 보강하는 대책을 수립하고 잔여 부분은 모르타르 또는 콘크리트로 치밀하게 채워야 한다.	< 개정사유 > [추가] 문구 추가 o 천장부 및 측벽부로 문구를 명확히 기술

KCS 27 40 05 현장타설 라이닝(예시)

항목	현행	제·개정 근거 / 사유
3.3	3.3 시공기준	3.3 시공기준
		< 개정사유 > [신설] o 터널기초 여굴부 채움관련 근거기준 마련을 위하여 채움관련 기준 신설

- 철도설계기준(KR CODE), 전문시방서(KRACS), 도로공사 전문시방서(EXCS) 등 여굴관련 기준사항 검토 및 제·개정 근거를 제시함

6. 참고 문헌

-
- 1) 김두기. (2013). “구조동역학”, 구미서관, pp. 206-208.
 - 2) 배상만. (2017). “철도터널 바닥부 여굴처리 방법에 대한 안정성 검토”, 석사학위논문, 서울과학기술대학교 철도전문대학원.
 - 3) 서재원. (2018). “철도터널 하부 여굴처리 방법에 대한 정적 및 동적 안정성연구, 박사학위논문, 서울과학기술대학교 철도전문대학원
 - 4) 이동훈. (2001). “철도 인접 건축물의 수직 진동 동특성 변화에 관한 연구”, 석사학위논문. 연세대학교 대학원.
 - 5) 박진옥. (2016). “GPR을 이용한 콘크리트 궤도 하부노반 상태평가”, 석사학위논문. 서울과학기술대학교 대학원.
 - 6) 고려대학교(2002). “음향분석기법을 이용한 지하구조물 비파괴조사 기술개발”, 건설교통부, 연구보고서
 - 7) “Sonalyser에 의한 타격음 조사”, Nippon Geophysical Prospecting Co., Ltd. 홈페이지, 2019.07.08., <https://n-buturi.co.jp/contact/pamphlet/pdf/sonalyser72.pdf>

< 별첨 >

별첨 자료

2. 총 연구개발기간 성과점검기준표 및 증빙자료

구분	핵심 성과물 (CTE)	단위 성과물	성과점검기준								양적성과 현황			
			질적 성과지표		목표치	달성치	측정 방법	검증 방법	가중치	해당 기관	예산 (백만원)	목표치	달성치	가중치
주관	A	배합설계(안) 기준	A-1	자료조사 및 분석	①	국내외 여굴처리 방안 검토 및 분석	기초보강방안 적정성 평가	1건	보고서	보고서	5.0	서울과학 기술대학교	40.1	특허: 출원 1건 등록: 0건 논문(SO): 1건 논문(SC): 0건 특허: 출원 1건 등록:

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통과학기술 연구개발사업 ‘철도 터널내 바닥 여굴 채움재에 따른 궤도 진동영향 저감방안 제시’ 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.

