최종보고서(일반과제용)

보안등급
일반[✔], 보안[ ]

중앙행정기관명	국토교통부	사업명	사업명	국토교통기술촉진연구
전문기관명	국토교통과학기술진흥원		내역사업명	국토교통기술혁신연구
공고번호	공고-제2호	총괄연구개발 식별번호		-
		연구개발과제번호		21CTAP-C153014-03

국가과학기술 표준분류	EI1102	60%	EI0406	20%	EI0307	20%

총괄연구개발명	국문	폴리머 콘크리트와 복합구조 댐퍼를 활용한 친환경 바닥진동저감 기술개발		
	영문	Development of Environment-Friendly Floor Vibration Reduction Using Polymer Concrete and Composite Damper		
연구개발과제명	국문	폴리머 콘크리트와 복합구조 댐퍼를 활용한 친환경 바닥진동저감 기술개발		
	영문	Development of Environment-Friendly Floor Vibration Reduction Using Polymer Concrete and Composite Damper		
주관연구기관	기관명	롯데건설(주)	사업자등록번호	114-81-16377
	주소	(우 06515) 서울특별시 서초구 잠원로14길 29	법인등록번호	110111-0014764
주관연구책임자	성명	김 정 진	직위	수석연구원
	연락처 직장전화	02-3483-7862	휴대전화	010-7736-3134
	연락처 전자우편	jeongjin.kim@lotte.net	국가연구자번호	1012-2819
연구개발기간	전체	2019. 04. 19 - 2021. 12. 31(2년 9개월)		
	1년차	2019. 04. 19 - 2019. 12. 31(9개월)		
	2년차	2020. 01. 01 - 2020. 12. 31(12개월)		
	3년차	2021. 01. 01 - 2021. 12. 31(12개월)		

연구개발비 (단위 : 천원)	정부지원 연구개발비	기관부담 연구개발비		그 외 기관 등의 지원금				합계			연구개발비 외 지원금
				지방자치단체		기타( )					
	현금	현금	현물	현금	현물	현금	현물	현금	현물	합계	
총계	500,000	93,000	422,000	-	-	-	-	593,000	422,000	1,015,000	-
1년차	110,000	25,000	90,000	-	-	-	-	135,000	90,000	225,000	-
2년차	115,000	25,000	90,000	-	-	-	-	140,000	90,000	230,000	-
3년차	275,000	43,000	242,000	-	-	-	-	318,000	242,000	560,000	-
m년차				-	-	-	-				-
n년차				-	-	-	-				-

공동연구기관 등	기관명	책임자	직위	휴대전화	전자우편	비고	
						역할	기관유형
공동연구기관	한양대학교	박준홍	교수	010-4809-4426	parkj@hanyang.ac.kr		대학
위탁연구기관	㈜엔브이시스	안상기	대표이사	010-2371-0321	wavea@naver.com		중소기업
연구기관 외 기관							

연구개발담당자 실무담당자	성명	최 경 석	직위	선임연구원
	연락처 직장전화	02-3483-7963	휴대전화	010-7209-8788
	연락처 전자우편	kyungsuk.choi@lotte.net	국가연구자번호	1102 0845

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

2021년 12월 31일

주관연구책임자 : 김 정 진 (서명)

주관연구기관의 장 : 롯데건설(주) 하 석 주 (직인)

국토교통과학기술진흥원장 귀하

본 서식은 「국가연구개발혁신법」 시행('21.01.01) 이전에 최종 협약하여 '21.01.01 이후에 최종평가를 시행하는 일반과제용 입니다.

< 요 약 문 >

※ 요약문은 5쪽 이내로 작성

<table>
<tr><td colspan="2">사업명</td><td colspan="2">국토교통기술촉진연구</td><td colspan="2">총괄연구개발 식별번호</td><td colspan="2">-</td></tr>
<tr><td colspan="2">내역사업명</td><td colspan="2">국토교통기술혁신연구</td><td colspan="2">연구개발과제번호</td><td colspan="2">21CTAP-C153014-03</td></tr>
<tr><td colspan="2">국가과학기술 표준분류</td><td colspan="6">EI1102 60% EI0406 20% EI0307 20%</td></tr>
<tr><td colspan="2">총괄연구개발명</td><td colspan="6">폴리머 콘크리트와 복합구조 댐퍼를 활용한 친환경 바닥진동저감 기술개발</td></tr>
<tr><td colspan="2">연구개발과제명</td><td colspan="6">폴리머 콘크리트와 복합구조 댐퍼를 활용한 친환경 바닥진동저감 기술개발</td></tr>
<tr><td colspan="2">전체 연구개발기간</td><td colspan="6">2019. 04. 19 - 2021. 12. 31(2년 9개월)</td></tr>
<tr><td colspan="2">총 연구개발비</td><td colspan="6">총 1,015,000천원
(정부지원연구개발비 : 500,000천원, 기관부담연구개발비 : 515,000천원,
지방자치단체 : 천원, 그 외 지원금 : 천원)</td></tr>
<tr><td colspan="2">연구개발단계</td><td colspan="2">기초[ ] 응용[✔] 개발[ ]
기타(위 3가지에 해당되지 않는 경우)[ ]</td><td>기술성숙도</td><td colspan="3">착수시점 기준( )
종료시점 목표( )</td></tr>
<tr><td colspan="2">연구개발과제 유형</td><td colspan="6">지정공모 [✔] 자유공모 [ ]</td></tr>
<tr><td colspan="2">연구개발과제 특성</td><td colspan="6">실용화</td></tr>
<tr><td rowspan="4">연구개발목표 및 내용</td><td>최종 목표</td><td colspan="6">• 콘크리트 슬라브 내부에 설치하여 댐핑을 30% 키울 수 있는 감쇠장치개발
• 현장적용 성능평가를 통해 기존 공법대비 공사비 20% 절감 및 진동성능 Peak 주파수에서 30% 저감
• 바닥포함 2건 이상의 적용처에 대한 설치상세 설계 및 시방서 제작
• 실용적인 생애주기비용을 고려한 친환경 댐퍼 감쇠장치의 경제성분석(보고서)</td></tr>
<tr><td>전체 내용</td><td colspan="6">• 복합구조 댐퍼장치 해석기법 개발 및 성능평가
- 감쇠비가 다른 점성유체와 임팩트 댐퍼를 배치한 복합구조 댐퍼 개발
- 구조물의 고유주파수별 맞춤형 진동저감 댐퍼 개발
- 다양한 재료 특성을 고려한 결합한 비선형 해석모델 개발
- 콘크리트 일체화 댐퍼장치 개발
• 개발된 복합구조(점성유체+임팩트 댐퍼) 댐퍼의 최적화 설계기술 개발
- 개발된 시스템의 해석모델 및 최적설계기법 개발
- 설치위치(바닥슬래브, 벽체, 기초 등)별 맞춤형 최적설계기술 개발
- 최적설치 위치 및 최적 물량산정을 통한 효율의 극대화 및 비용 절감
• 설치상세 및 시공기법 개발
- 기존/신축 구조물에 적용 가능한 댐퍼의 설치상세 및 시공가이드라인 개발
- 개발된 댐퍼장치의 테스트베드를 통한 현장적용 타당성 검토</td></tr>
<tr><td rowspan="2">1년차</td><td>목표</td><td colspan="6">• 차량 주행 시 타이어 형상과 램프 구조에 따른 진동 발생 특성 분석
• 복합 구조체 댐퍼 설계 및 바닥 구조체 적용하여 제진 성능 평가
• 폴리머 콘크리트 진동 저감 성능 측정 및 다양한 형상으로 설계하여 바닥 구조체의 진동 전달 차단 성능 및 구조 강도 최적화</td></tr>
<tr><td>내용</td><td colspan="6">■ 댐핑 구조체 현황 파악 및 램프 인접 세대 내 차량 진동 소음 측정
- 현재 도심지에 적용되어 있는 일반 콘크리트 조면 구조를 파악하고 진동 저감용 바닥 구조체 적용 대상 선정
- 램프에 인접한 세대 내의 차량 진동 소음을 측정하여 현재 발생 되는 소음 수준 파악
- 국내외 관련 규격 및 기준을 조사하여 설계 반영을 위한 성능 설정
■ 램프 구조 및 조면 패턴과 타이어 공진 모드에 따른 소음 진동 발생 특성 파악
- 주차 램프 구조에 따른 소음 발생 영향도가 높은 인자 탐색
- 램프 조면 처리 패턴과 타이어 구조에 따른 특성 진동 소음 특성 파악
- 타이어 블록과 노면과의 마찰에 의한 소음, 타이어 블록의 반경방향 진동에 의한 소음, 사이드 월 굴신에 의한 진동, 벨트/카카스 진동에 의한 소음 등 발생하는 진동</td></tr>
</table>

			소음 정량화 ■ 복합구조 댐퍼 삽입을 통한 친환경 댐핑 램프구조체 설계 - 자동차 주행 시 복합구조 댐퍼가 위치한 층에 발생하는 진동 성분 분석 - 진동 성분에 따른 복합구조 댐퍼 질량비, 간극 등 최적의 제진 성능을 위한 설계 - 바닥 구조에 적용하여 복합구조 댐퍼의 성능 평가 및 실증화를 위한 제작법 고안 ■ 일반 시멘트 콘크리트와 폴리머 콘크리트의 진동 저감 성능 측정 및 비교 - 에폭시, 경화제를 혼합하여 폴리머 콘크리트를 제작한 후 일반 시멘트 콘크리트와 강도 및 손실율 비교 - 폴리머 콘크리트의 진동 저감성능을 극대화하기 위해 다양한 방진재료를 혼합하고 이에 따른 에너지 소산능력 파악
	2년차	목표	• 이동 하중에 대한 해석 모델 제시 및 진동, 소음 전달량 예측 • 폴리머콘크리트 혼입 복합구조댐퍼의 배치를 이용한 주택지 진동전달 차단구조 설계 • 복합 구조 댐퍼 제진 효과를 극대화하기 위한 바닥 구조체 삽입 패턴 개발
		내용	■ 이동하는 차량 하중에 의한 도로 표면 진동 전파 해석 모델 제시 - 다양한 상황에서 발생하는 진동 소음 메커니즘에 대하여 해석 모델 제시 - 해석 모델을 통한 이동 하중에 발생하는 바닥 소음 진동의 파동 특성 파악 ■ 해석 모델을 통한 진동 및 소음 전달량 예측 - 해석 모델을 통한 다양한 주행 조건에서의 진동 및 소음 전달량 예측 - 바닥 구조체의 진동 소음 저감 성능 인자 도출 ■ 폴리머콘크리트 혼입 복합구조 댐퍼의 배치를 이용한 주택지 진동전달 차단구조 설계 - 기존 주차 램프 타설 재료와 폴리머 콘크리트의 물성 및 진동 특성 비교 - 복합구조 댐퍼 적용 시 전체 다층 구조에 미치는 진동 전달 차단 성능 변화 관찰 - 각 레이어/층 두께에 따른 전체 바닥 구조체 진동 차단 성능 변화 및 영향도 파악 - 다양한 형상의 복합구조 댐퍼 설계를 통한 바닥 구조체의 진동전달 차단 성능 및 구조강도 최적화 ■ 복합 구조 댐퍼 삽입 위치 및 패턴 설계를 통한 제진 효과 증대 연구 - 바닥 구조체에서의 삽입 위치나 댐퍼 패턴에 따른 복합구조 댐퍼효과 최적화 - 해석 모델을 통한 하중 이동 속도에 따른 복합구조 댐퍼성능 평가 - 간이 모델 제작 후 실험을 통한 복합구조 댐퍼 제진효과 측정
	3년차	목표	• 실제 바닥 구조체 적용을 위한 현장 시공 기술 개발 및 성능 검증 • 바닥 구조체의 구조적 안전성 및 타 공정과의 상관관계 검증 • 현장 적용을 위한 시방서 및 친환경 댐퍼 시공 가이드라인 제시
		내용	■ 실제 바닥 구조체 적용을 위한 현장 시공기술 개발 및 성능 검증 - 연구결과 적립된 친환경 댐핑 바닥구조체의 시공방법을 규격에 맞게 정리한 시방서 제작 - 개발된 댐퍼장치의 테스트베드를 통한 현장적용 타당성 검토 ■ 바닥 구조체의 구조적 안전성 및 타 공정과의 상관관계 검증 - 구조적 안전성은 기존 구조체와 개발된 구조체에 대한 강도시험을 실시(시편)함으로써 슬래브의 구조적 안전성 검증 및 확보. - 각종 시공환경 조건을 고려하여, 전기공사 등 후속 공사와의 상관관계에 대한 안전성 검증 ■ 현장 적용을 위한 시방서 및 도서 작성 - 연구결과 적립된 친환경 댐핑 바닥구조체의 시공방법을 정리한 시방서 제작 - 추가적으로 각종 환경 조건 및 유지보수 등을 고려하여 다양한 조건에서 시공 시 참고할 수 있는 가이드 도서 작성 ■ 친환경 댐퍼 시공 가이드라인 제시 - 차종 및 환경요인 별 마찰 조건에 따른 메타 구조 고댐퍼 램프의 성능 평가 - 여러 환경에서 발생하는 다양한 요인에서의 친환경 댐퍼 시공 가이드라인 구축

연구개발성과												
	구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설 · 장비	기술요약 정보	소프트웨어	화합물	생명자원		신품종	
									생명 정보	생물자원	정보	실물
	예상성과 (N/Y)	Y	Y	Y	Y	Y	Y	N	N	N	N	N

연구개발성과 활용방안 및 기대효과	• 주차램프와 접촉되는 건물내부의 진동을 줄이기 위한 방진기법으로 활용 • 세대와 연결된 엘리베이터 코어벽체 진동저감 기법으로 활용 • 건물 내 또는 층간에 설치되는 공조실 및 기계실 바닥 마감재 및 기초로 활용
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

연구시설·장비 종합정보시스템 등록 현황	구입기관	연구시설· 장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	ZEUS 등록번호

국문핵심어 (5개 이내)	구조소음	바닥진동	고 댐퍼 구조체	폴리머 콘크리트	방진시스템
영문핵심어 (5개 이내)	structure noise	floor vibration	high damper structure	polymer concrete	Anti-vibration system

〈 목 차 〉

1. 연구개발과제의 개요 ……1

2. 연구개발과제의 수행과정 및 수행내용 ……4

3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도 ……67

4. 목표 미달 시 원인분석(해당 시 작성)

5. 연구개발성과 및 관련 분야에 대한 기여 정도 ……78

6. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획 ……79

별첨자료(참고문헌 등)

1. 연구개발과제의 개요

1) 연구개발과제의 최종 목표

○ **최종 목표**

- 콘크리트 슬라브 내부에 설치 가능한 진동저감 감쇠장치 개발
- 개발된 시스템의 해석모델 및 최적설계기법 개발
- 비선형 해석 및 실험을 통한 진동저감 성능 평가
- 기존 구조물 및 신축 구조물에 대한 설치상세 및 시공 Guideline 제시
- 실용적인 생애주기비용을 고려한 친환경 댐퍼 감쇠장치의 경제성 평가
- 기존 공법대비 공사비 20% 절감, 진동성능 30% 향상

○ **세부 목표**

① 복합구조 댐퍼장치 해석기법 개발 및 성능평가

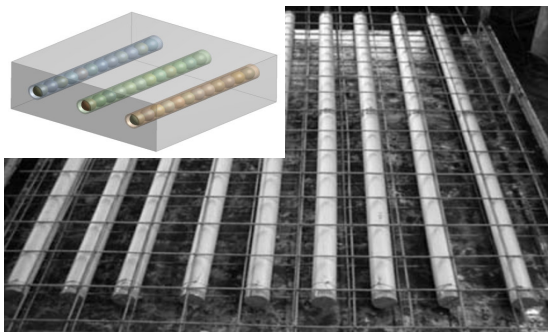
- 감쇠비가 다른 점성유체와 임팩트 댐퍼를 배치한 복합구조 댐퍼 개발
- 구조물의 고유주파수별 맞춤형 진동저감 댐퍼 개발
- 다양한 재료 특성을 고려한 결합한 비선형 해석모델 개발
- 콘크리트 일체화 댐퍼장치 개발
-

② 개발된 복합구조(점성유체+임팩트 댐퍼) 댐퍼의 최적화 설계기술 개발

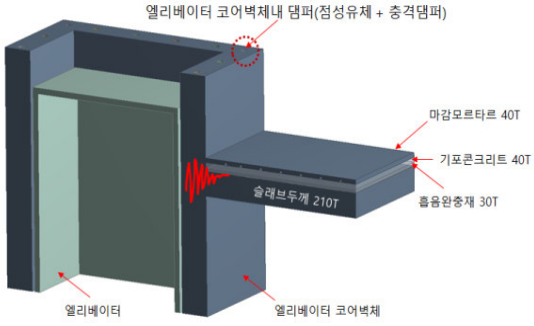
- 개발된 시스템의 해석모델 및 최적설계기법 개발
- 설치위치(바닥슬래브, 벽체, 기초 등)별 맞춤형 최적설계기술 개발
- 최적설치 위치 및 최적 물량산정을 통한 효율의 극대화 및 비용 절감

③ 설치상세 및 시공기법 개발

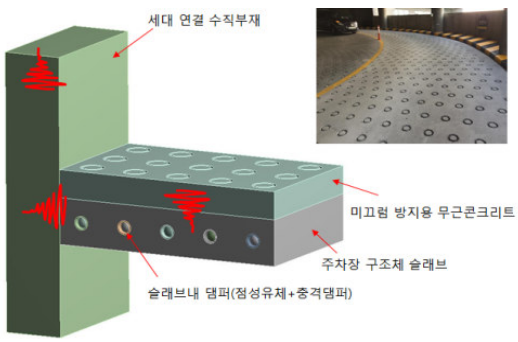
- 기존/신축 구조물에 적용 가능한 댐퍼의 설치상세 및 시공가이드라인 개발
- 개발된 댐퍼장치의 테스트베드를 통한 현장적용 타당성 검토



[복합구조 댐퍼 적용 슬래브]



[엘리베이터 소음/진동 저감용 댐퍼]



[주차장 램프 소음/진동 저감용 댐퍼]



[기계실/공조실 소음/진동 저감용 댐퍼]

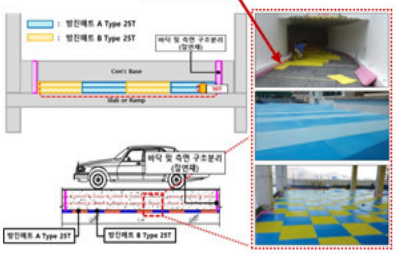
연구의 필요성

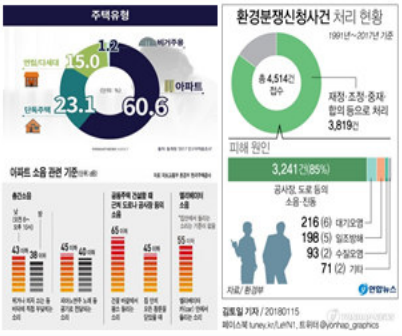
소음/진동에 의한 피해사례 증가 → 저효율/고비용 소음/진동저감기술 → 새로운 소음/진동저감기술의 필요

건축물 소음/진동관련 민원 85% 이상 → 기존 진동저감기법의 부적합/비효율성 → 효율적 진동저감기술 개발의 필요 증가





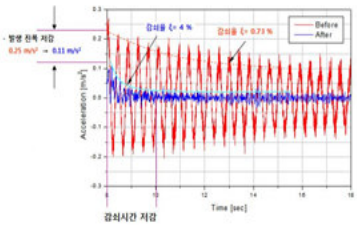








[점성유체 + Impact ball 복합구조 댐퍼]



- 진동성분에 따른 맞춤형 진동저감 기술
- 주차장 램프 주행 시 진동소음 최소화
- 기술적용에 따른 공사비용 최소화
- 기술적용에 따른 공사기간 최소화
- 생애주기 비용의 최소화
- 최소부재로 진동저감효과 극대화

최종 목표 및 기대효과

고효율/저비용 진동저감기술 개발

- 주파수별 맞춤형 진동저감 기술 개발
- 시공일체화를 통한 공사기간 최적화
- 개발된 복합구조 댐퍼의 해석모델 개발
- 효과적인 진동저감 및 구조체 경량화
- 실용적인 생애주기비용 산정기법 개발
- 성능표준화 및 설계/시공 매뉴얼 개발

개발기술의 활용방안 및 기대효과

[활용방안]

- 세대와 연결된 엘리베이터 벽체마감 대체
- 공조실 및 기계실 바닥 마감재 및 기초로 활용
- 중량물 이동 동선에 대한 바닥 마감재로 활용
- 주차램프와 접촉되는 구조부재의 마감재로 활용

[기대효과]

- 친환경 복합구조 댐퍼의 진동저감 효율의 극대화
- 공사기간 단축 및 제진보강 소요비용 절감
- 건축물 내의 구조소음/진동 발생량 30% 이상 개선

개발된 친환경 진동저감 댐퍼의 설치상세 개발, 시공성 및 경제성 분석
성능설계를 위한 설계 및 시공 가이드라인 제시

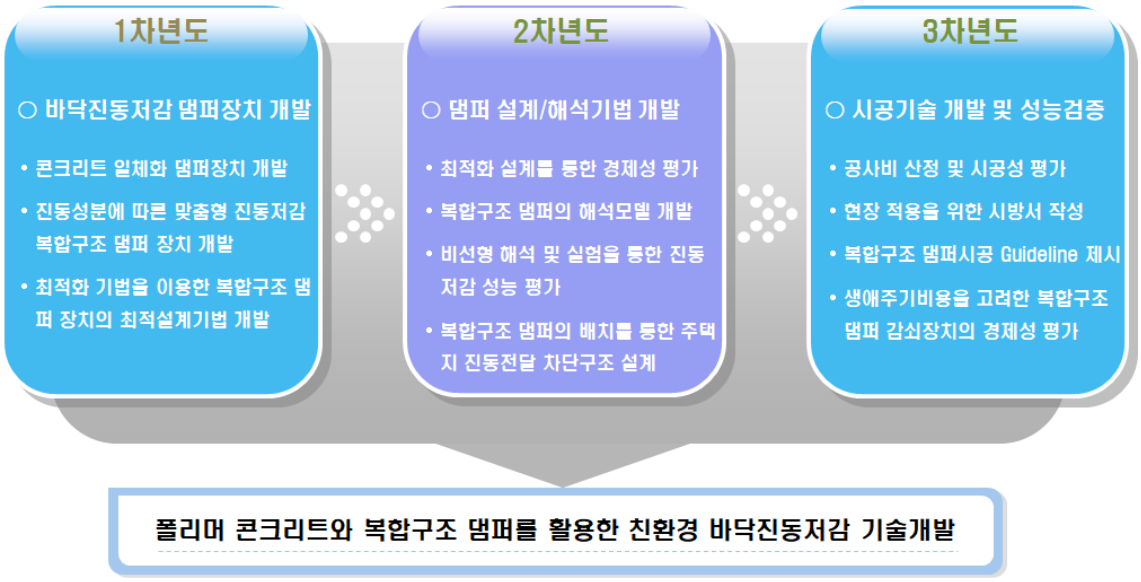
기존 소음진동 저감기술 대비 30% 개선/공사비용 20% 절감

2) 연구개발과제의 년차별 목표

○ 1차년도 연구에서는 점성유체와 폴리머 콘크리트를 포함한 임팩트댐퍼를 결합함으로써 건축물에서의 구조소음/진동을 효과적으로 저감할 수 있는 친환경 바닥진동저감 댐퍼의 설계 및 감쇠장치 개발.

○ 2차년도 연구에서는 점성유체와 폴리머 콘크리트를 포함한 복합구조 댐퍼를 적용하여 건축물에서의 구조소음/진동 저감 성능을 향상할 수 있는 댐퍼 설계/해석 시뮬레이션기법을 개발함.

○ 3차년도 연구에서는 폴리머 콘크리트와 복합구조를 활용한 친환경 바닥진동저감 기술을 실구조물에 적용하여 건축물에서 발생하는 구조소음/진동 30% 이상, 진동저감에 소요되는 공사비의 20% 이상 저감이 가능한 친환경 복합구조 댐퍼의 현장 설치상세 및 시공 가이드라인 구축.



구분	연구개발목표	핵심 연구개발성과 (연구개발성과물)	현재 국내·외 기술수준	연구개발 목표치	목표치 설정 근거	가중치 (%)
1년차 (2019)	복합구조 댐퍼 개발	특허출원	기술개발단계	1건	지적재산권 확보	10
		시작품		1건	개발초기기술 검증필요	5
	콘크리트 일체화 댐퍼장치 개발	논문	기술개발단계	3건	시작품 공개성능검증	10
2년차 (2020)	해석모델 및 최적설계기법 개발	특허출원/등록	연구단계	1건/1건	설계기술 지적재산권확보	10
		논문		2건	공개성능검증	10
	설치위치별 맞춤형 최적설계기술 개발	논문/시제품	연구단계	2건/3건	개발적용기술 검증필요	20
		프로그램		4건	설계간편화 요구	5
3년차 (2021)	현장적용 타당성 검토	논문/시제품	기술개발단계	2건/1건	최종적인 공개성능검증	10
		특허등록		1건	개발기술 지적재산권확보	15
	시공 가이드라인 구축	시공 및 성능평가 가이드라인	없음	현장적용 지침서 제작	현장적용 일원화	5

2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행 내용

○ 1차년도

1. 주차장 램프 입접세대의 진동소음 실태조사

1.1 소음영향 검토기준

- 지하주차장 램프에서 발생되는 소음과 관련한 국내 규준은 마련되어 있지 않음
- 미국냉난방공조학(ASHRAE)의 공조설비에 의한 35~40dB(A) 이하 소음기준이 국내외 대부분의 건축설계에 활용되고 있음.
- 국내 층간소음기준인야간 평균 38dB(A), 야간 최고 52dB(A)보다 엄격함.

표 1. 국내층간소음기준(환경부령제 559호, 2014. 06. 03. 시행)

층간소음의구분		주간 (06:00~22:00)	야간 (22:00~06:00)
직접충격음	1분간 등가소음도(Leq)	43 dB(A)	38 dB(A)
	최고소음도(Lmax)	57 dB(A)	52 dB(A)
공기전달음	5분간 등가소음도(Leq)	45 dB(A)	40 dB(A)

표 2. 2011 ASHRAE handbook-HVAC Applications(실 용도별 소음 권고기준)

Room Type		dB(A)
외부소음 영향	교통소음	45
	항공기소음	45
주거공간	거실	35
	화장실, 주방, 작업실	40
호텔/숙박	객실	35
	연회장	35
	복도/로비	45
사무실	중역실, 개인사무실	35
	회의실	35
	복도/로비	45

1.2 진동영향 검토기준

- 지하주차장 램프에서 발생되는 진동과 관련한 국내 규준은 마련되어 있지 않음
- 주거공간에 대한 진동기준은 ISO 2631-2에서 야간 진동기준을 57dB(V) 이하가 되도록 권고하고 있으며, 국내외 대부분의 건축설계에 활용되고 있음.
- 국내 생활환경소음진동규제기준인 심야시간대기준 60dB(V)보다 엄격함.

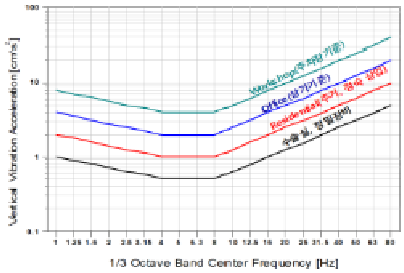
표 3. 생활진동규제기준(생활소음, 진동의 규제기준 제20조 제3항 관련)

대상지역	주간 (06:00~22:00)	야간 (22:00~06:00)
가. 주거지역, 녹지지역, 관리지역 중 취락지구, 주거개발진흥지구 및 관광, 휴양개발진흥지구, 자연환경보전지역, 그밖의지역에 소재한 학교, 종합병원, 공공도서관	65 dB(V) 이하	60 dB(V) 이하
나. 그밖의지역	70 dB(V) 이하	65 dB(V) 이하

표 4. ISO 2631-2 진동 권장기준

구분		연속 혹은 간헐진동	
		가속도 RMS (gal,cm/s²)	진동레벨 dB(V)
수술실 정밀 작업실	작업시	0.5	54
	휴식 시	주거용 기준의 정도	
주거	주간	1.0~2.0	60~66
	야간	0.7	57
사무실	상시	2.0	66
공장/작업장	상시	4.0	72

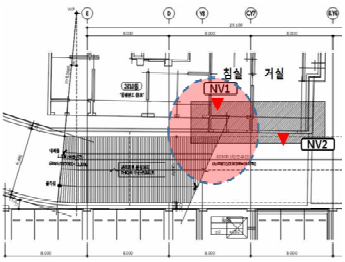
[ISO 2631-2 진동 권장기준]



세대 내 진동 검토기준은 ISO 2631-2의 실별 권장기준을 참고하면 57dB(V)이 검토기준으로 적합.

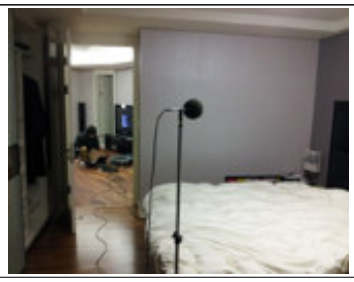
1.3 지하주차장 램프 구조체 현황 파악 및 램프 인접 세대 내 차량 운행 시 진동소음 측정

- 지하주차장 램프 구조체 현황을 파악하고 진동 저감용 바닥 구조체 적용대상 선정
- 램프에 인접한 세대 내의 차량 진동 소음을 측정하여 현재 발생 되는 소음수준 파악
- 램프를 통과하는 차량의 속도는 약 35km/h를 유지(실제 주차장 이용자들의 운행속도 반영)



소음진동 측정 위치





지하주차장 입구 램프인접세대 차량 진동소음 측정 예시

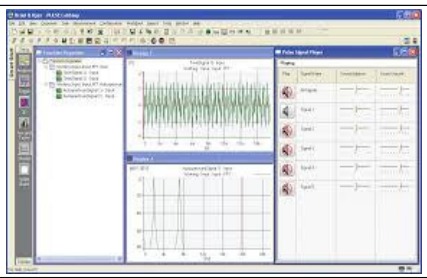
1) 측정 장비



주파수 분석기(B&K 3050-A-060)



가속도계 : PCB 393B31



분석 프로그램 : B&K Pulse Labshop

2) 주요 진동원



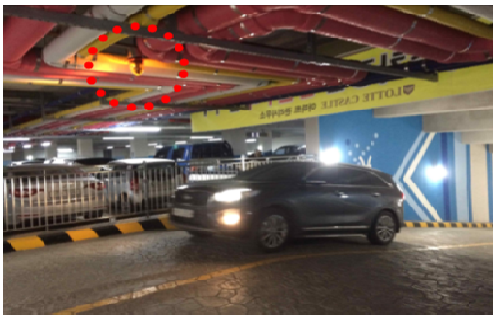
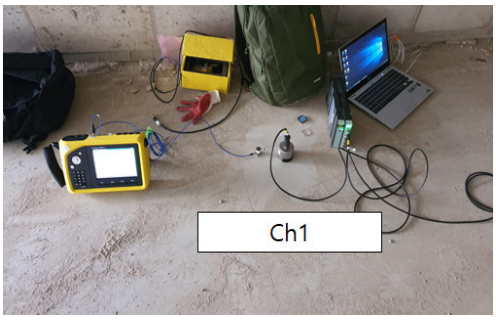
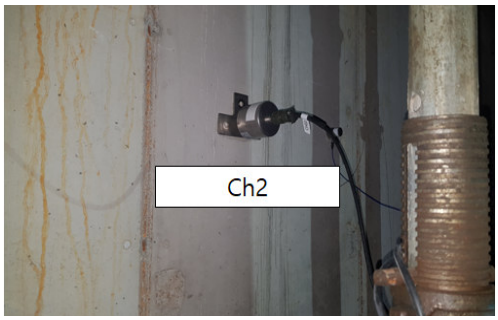


그림 1. 램프 상하단 차량 왕복운행

3) 측정 지점



Ch1 : 램프구간 바닥 수직방향



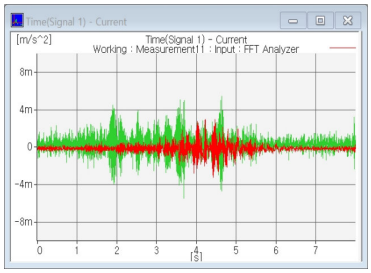
Ch2 : 아파트 지하벽체 수평방향

그림 2. 진동측정 센서 설치 위치

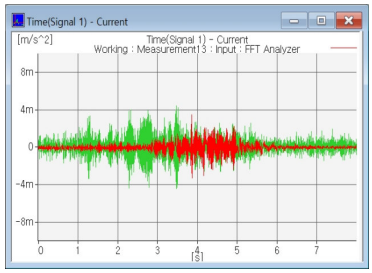
1.4 소음 · 진동 측정 결과 분석

- ○○○○아파트 신축현장 램프구간 진동 측정결과 검토기준 ISO 10137 주거지역의 야간기준보다 충분히 낮은 수준이지만, 세대로 유입되는 소음이 최대 38.1dB(A)로 입주자가 충분히 감지할 수 있는 수준이며, 배경소음대비 20dB(A)까지 증가하는 수준임.
- **램프에서의 소음도는 최대 70.9dB(A)로, 심야 및 새벽시간대 차량통행 시에는 세대 내에서 수면, 휴식 등의 활동에 방해를 받을 수 있는 수준임.**
- 세대 내로 전달되는 구조소음의 지배적 주파수에 대응하는 방음방진구조에 대한 설계대책 수립 필요
- 세대 내 바닥 고유진동수 시뮬레이션 검토를 통한 공진가능성 검토 및 대책수립 필요

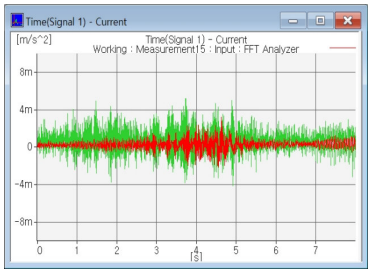
- **시간파형**



1차 측정



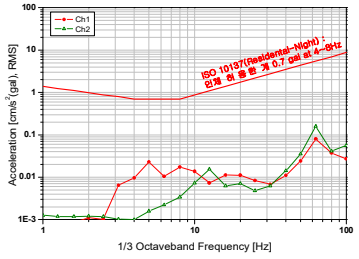
2차 측정



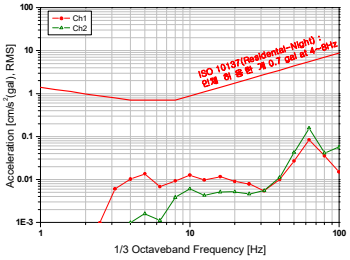
3차 측정

비고)
* 붉은색 선도 : Ch1 램프구간 바닥.
* 녹색 선도 : Ch2 아파트 지하 측벽.
* 지게차 트렌치 방향으로 전진 시 측정데이터. 후진 측정데이터는 신호가 불명확함.

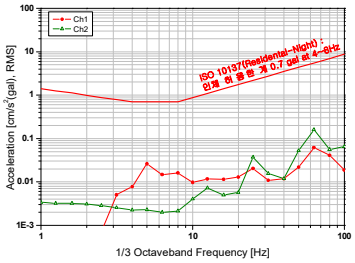
- **주파수 분석**



1차 측정



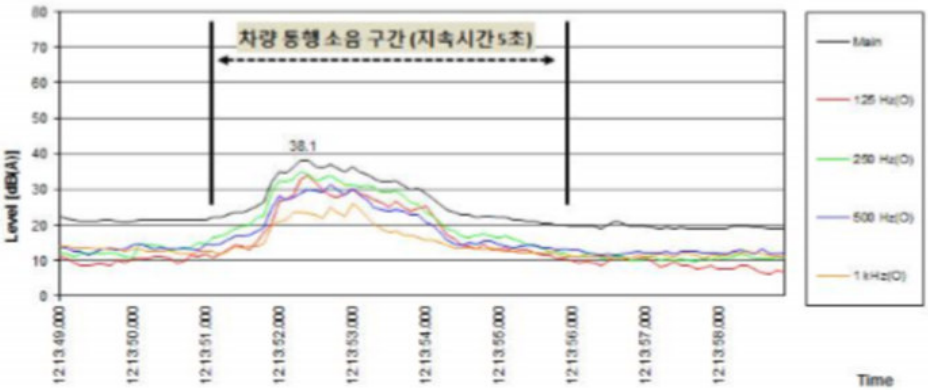
2차 측정

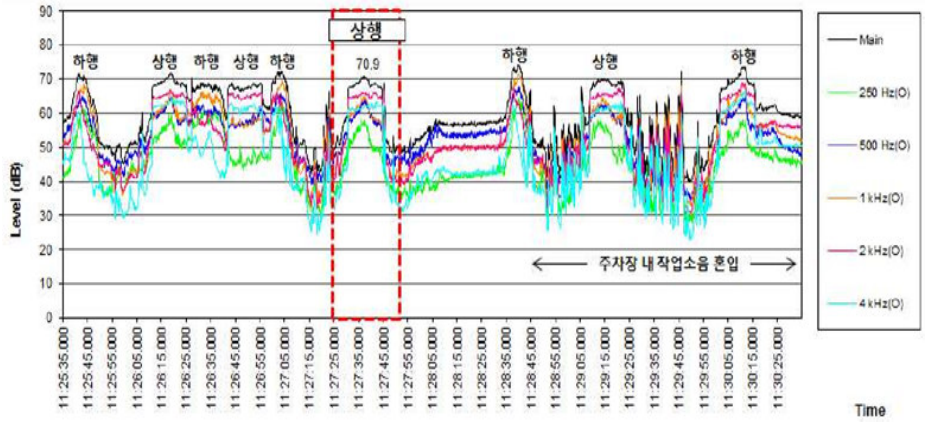


3차 측정

비고)
* 1/3 Octave 분석
* 기준은 아파트 세대내 진동평가를 가정하여 ISO 10137 주거지역 야간 기준을 적용함.

• 세대내 침실지점 소음진동 측정결과





2. 진동성분에 따른 맞춤형 바닥진동저감 댐퍼장치개발

2.1 폴리머 콘크리트의 물리적 특성 및 동적 특성 검토

1) 폴리머 콘크리트 배합 실험 및 시험체 제작

실험에 사용된 골재는 결정의 크기가 다른 4호사(0.85~1.2㎜)와 6호사(0.25~0.6㎜)를 1:2 질량 비율로 혼합한 혼합골재와 일반골재로 구분되며, 에폭시는 주제와 경화제를 5:1의 질량 비율로 혼합하여 에폭시 레진을 제작하였으며, 폴리머 콘크리트는 총 중량 중 에폭시 레진이 차지하는 중량 비율을 혼합비로 하여, 폴리머 혼합비를 10, 15, 20%까지 증가시키며 여러 종류의 폴리머 콘크리트를 제작하였다.

표 5. 폴리머(에폭시) 콘크리트 배합 (단위 : kg/m^3)

Type	Mixing ratio	Cement	Epoxy	Aggregate Type			Water
				Sand	Silica sand #4	Silica sand #6	
Plain	1:3	200	-	600	-	-	130
P-10	1:9	-	50	-	150	300	-
P-15	1.5:8.5	-	75	-	150	300	-
P-20	2:8	-	100	-	150	300	-

표 6. 에폭시의 물리적 특성

Density (g/cm^3)	Adhesive strength [N/mm^2]	Tensile strength [N/mm^2]	Compressive strength [N/mm^2]	Bending strength [N/mm^2]
1.03	3.7	2.3	4.1	2.5



그림 3. 폴리머 콘크리트 시험체 제작

2) 폴리머 콘크리트의 정적 및 동적특성 측정

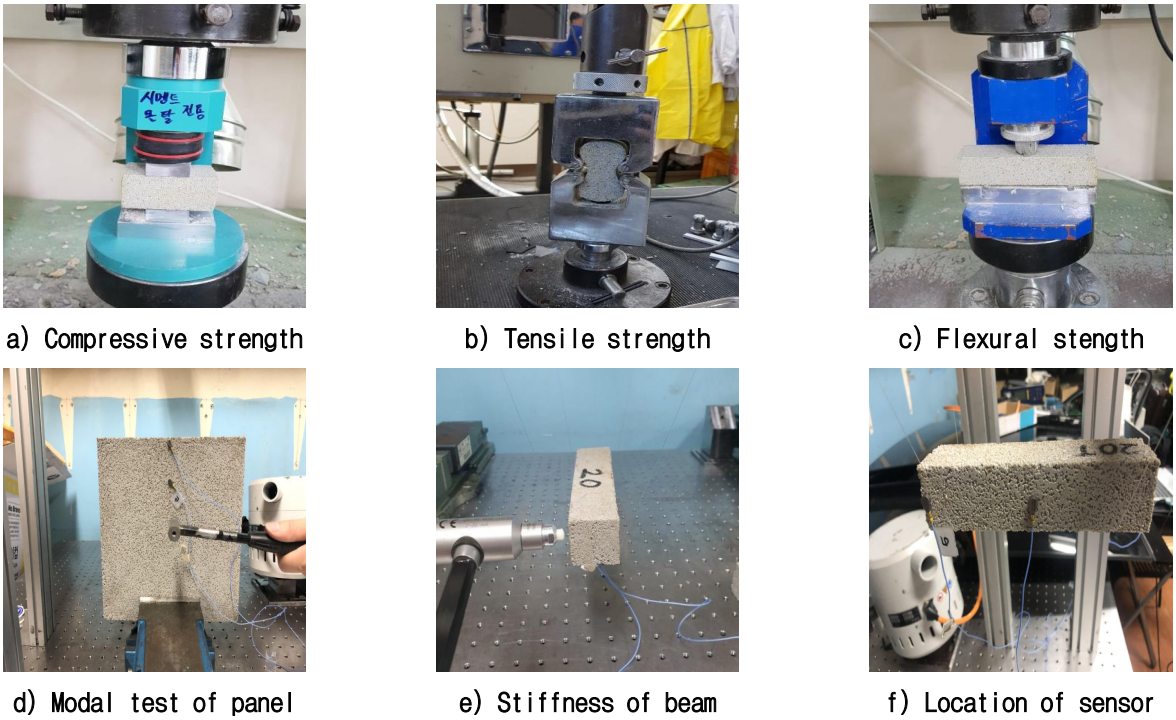


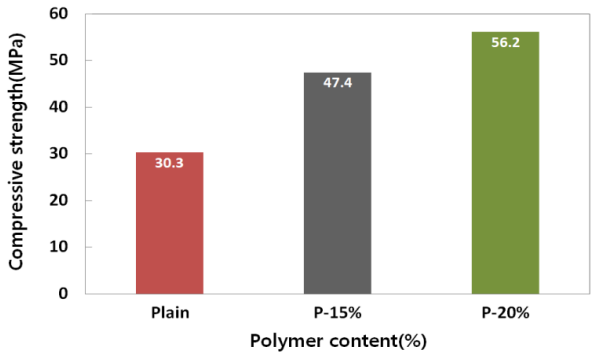
그림 4. 폴리머 콘크리트의 정적 및 동적특성 측정

3) 폴리머 콘크리트의 물리적 특성 및 동적 특성 측정결과

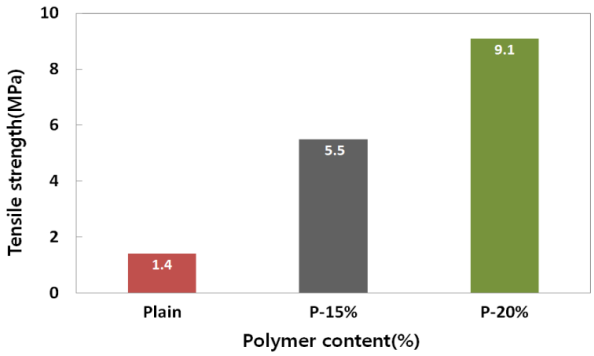
• 폴리머 콘크리트의 물리적 특성 측정결과

압축강도는 Plain이 30.3MPa로 가장 작은 값을 나타냈으며, **폴리머(에폭시)를 15% 혼입한 경우가 47.4MPa, 20%는 56.2MPa로 폴리머 혼입율이 증가할수록 강도가 증가**하는 것으로 나타났다. 또한, **인장강도는** 폴리머 혼입율이 증가할수록 **Plain에 비해 4~6.5배** 정도, **휨강도는 Plain 대비 3~4.5배** 정도로 큰 폭으로 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 폴리머 콘리트의 휨강도 성능은 동적 특성에도 영향을 미쳐, 폴리머 콘크리트의 동적 특성을 향상 시킬 수 있을 것으로 사료된다.

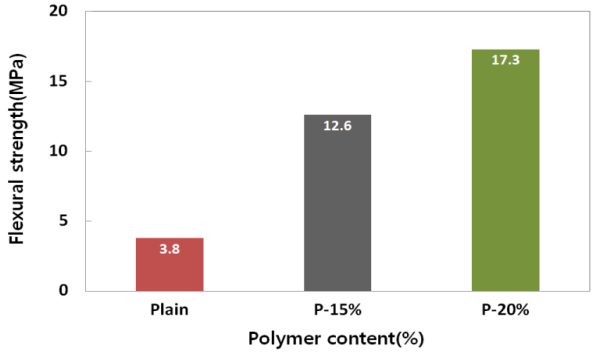
한편, 부착강도는 Plain이 0.7MPa로 나타났으며, 폴리머 콘크리트는 1.3~1.6MPa로 측정되어, Plain 대비 부착강도가 2~2.5배 정도 크게 나타났으며, 미끄럼 저항성은 폴리머 혼입율 15%는 60BPN, 20%는 64BPN으로, **Plain 대비 미끄럼 저항성이 50%~60% 증가**하여, 폴리머 콘크리트가 미끄럼 저항성면에서 우수한 것으로 나타났다. 따라서, **지하주차장 램프 등의 경사면에 적용할 경우는, 미끄럼방지용 요철 감소 등이 가능해, 진동저감 효과가 클 것으로 사료된다.** 마모감량은 Plain이 5,984mg으로 가장 큰 값을 나타냈으며, 폴리머 혼입율이 증가할수록 마모감량이 Plain 대비 50~10% 수준까지 작아지는 것으로 나타났다. 따라서, 이러한 폴리머 콘크리트를 마모가 예상되는 외부노출 바닥구조체 등에 적용하는 것이 가능할 것으로 사료된다.



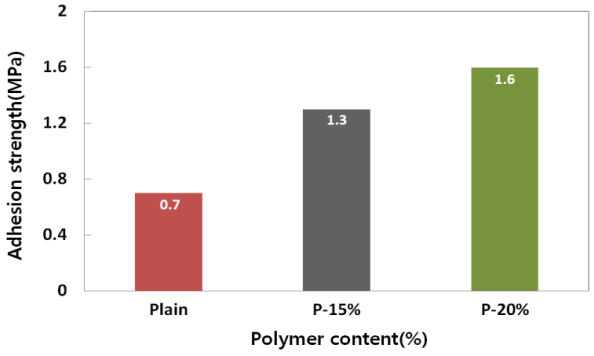
[Compressive strength by polymer content]



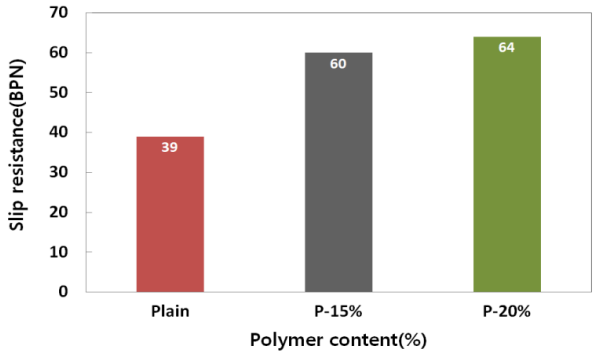
[Tensile strength by polymer content]



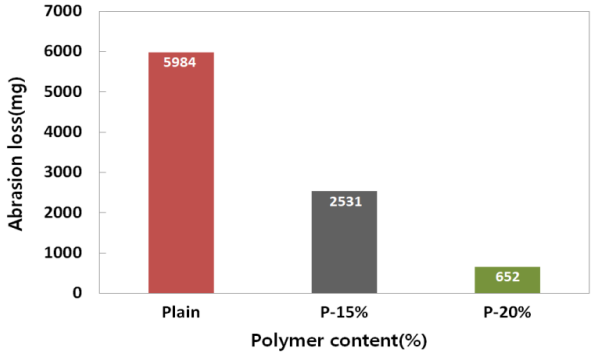
[Flexural strength by polymer content]



[Adhesion strength by polymer content]



[Slip resistance by polymer content]



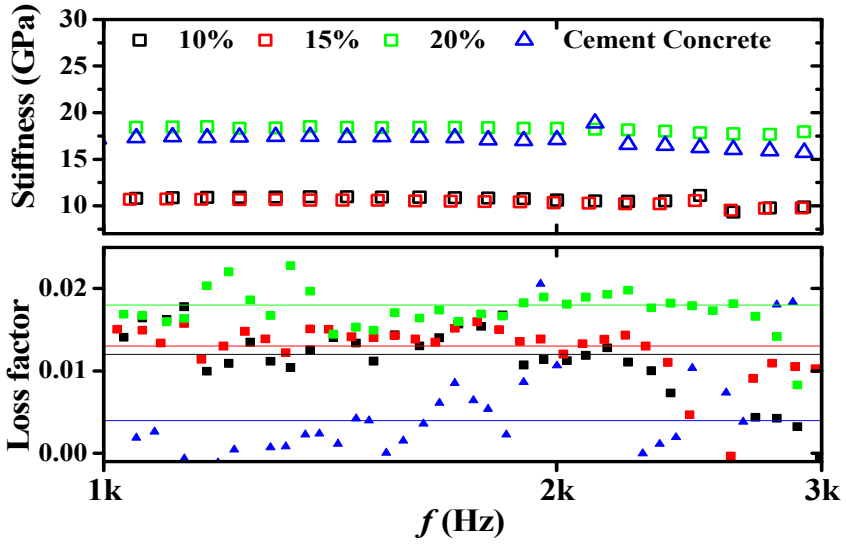
[Abrasion loss by polymer content]

그림 5. 폴리머 콘크리트의 물리적 특성

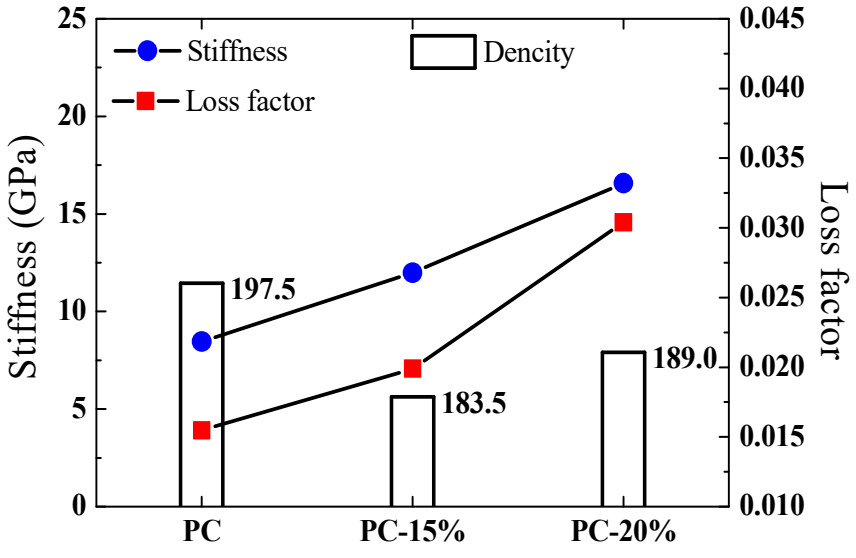
- **폴리머콘크리트의 동적 특성 측정결과**

주파수별 파수를 활용하여 구한 주파수별 동적 강성 측정결과는 주파수에 따라 결과값이 분포하기 때문에 혼합비에 따른 물성 변화를 파악하기가 쉽지 않으므로, 1k~3kHz 구간의 측정결과를 평균 낸 값을 활용하여 혼합비에 따른 동적 물성을 비교하였다. 폴리머 혼입율에 따른 동적 물성 측정결과를 정적 물성 측정결과와 같이 비교 분석한 결과, **동적 강성 및 손실률은 정적 물성과 같이 폴리머 혼입율이 증가할수록 증가하는 경향을 나타내었으며, 특히, 손실률은 폴리머 혼입율 20% 가 가장 높았다.**

전달함수 방법을 이용하여 측정한 주파수별 동적 강성 및 손실률을 폴리머 혼입율에 따라서 분석한 결과, 혼입율이 증가하면 동적 강성 및 손실률이 모두 증가하였다. 일반 콘크리트와 비교하여 폴리머 혼입율 20% 시편은 동적 강성이 높고 손실률도 2배 이상 증가하였다. 폴리머콘크리트의 동적 강성과 손실률에 실제 측정한 혼합비 20%의 폴리머콘크리트와 일반 콘크리트의 물성을 적용하여 해석 검토한 결과이다. **폴리머 콘크리트의 동적 강성은 일반 콘크리트의 동적 강성보다 20% 높고, 손실률은 약 3배 정도 높은 것으로 나타났다.**



[Dynamic stiffness By frequency and loss factor]



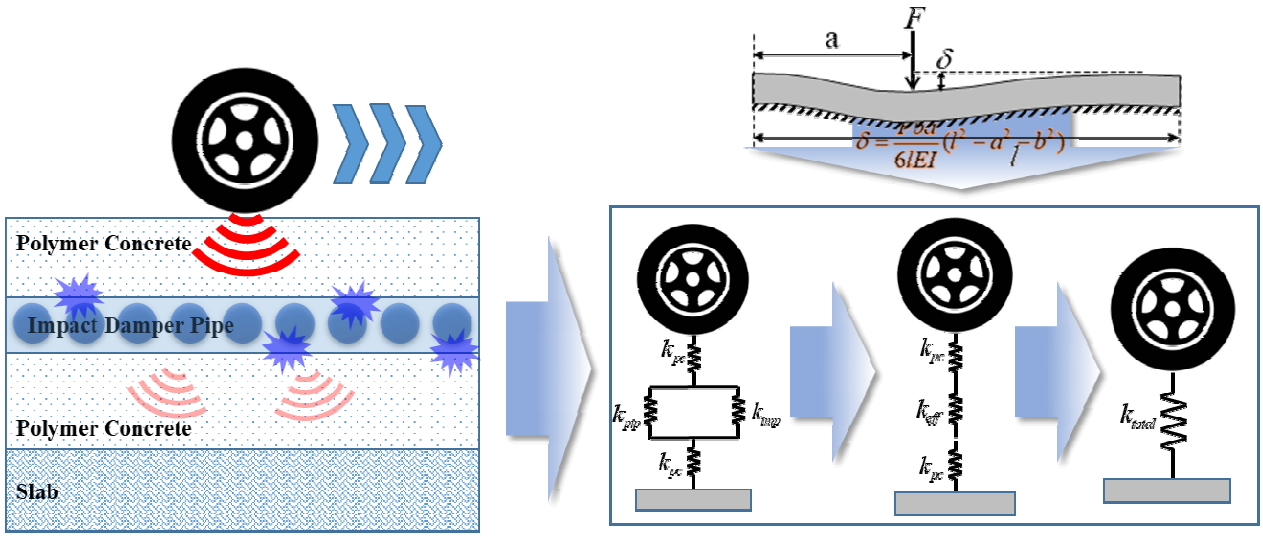
[Average dynamic stiffness and loss factor]

그림 6. 폴리머콘크리트의 동적 특성

2.2 차량 주행시 타이어 형상과 램프구조에 따른 진동분석

1) 차량 하중에 의한 폴리머콘크리트의 굽힘 거동 예측해석 모델

- 주차장 램프 구조에 따른 소음 발생 영향도가 높은 인자 탐색
- 차량 타이어의 구름 하중에 대한 응답을 수치적으로 계산하기 위한 모델링 실시
- 하중의 위치 및 굽힘강성을 통해 최종 보의 굽힘 변형량 계산
- 폴리머콘크리트와 그 안에 포함된 충돌댐퍼 파이프를 각각에 대한 강성으로 모델링하고, 최종적으로 복합 강성으로 합쳐 k_total 값을 도출

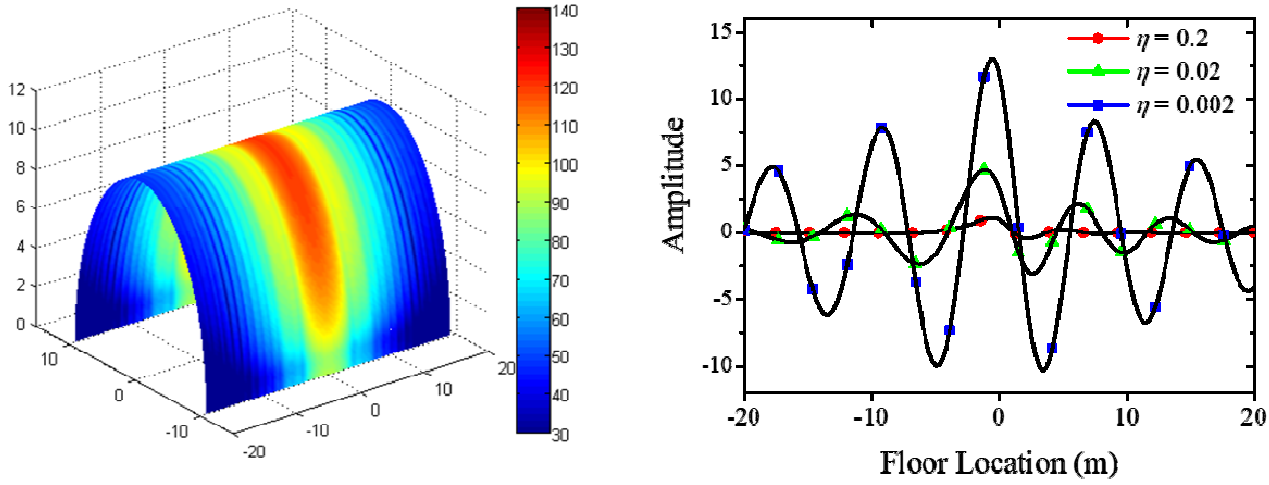


[폴리머콘크리트와 슬라브의 단면 구조] [폴리머콘크리트와 슬라브의 구름 방사 해석 모델링]

그림 7. 차량 하중에 의한 폴리머콘크리트의 굽힘 거동 예측해석 모델

2) 주차장 램프에서의 타이어 구름 소음방사 예측

- 폴리머콘크리트의 손실율이 증가하는 경우에 대해 매우 작은 범위에서 크게 증강시켜 해석 수행
- 손실률을 변화시킬 경우 구름소음의 주요 대역 1kHz 부근 음압이 가장 크게 변화
- Overall dB로 합산하여 비교한 결과, 폴리머콘크리트를 적용한 경우 방사소음이 4.22 dB 감소함.
- 폴리머콘크리트의 손실률에 따른 응답크기가 크게 변화함을 확인



[표면동적 하중에 따른 구름소음 위치별 방사음파 비교] [손실률에 따른 동적하중에 대한 응답 비교]

그림 8. 주차장 램프에서의 타이어 구름 소음방사 예측

3) 음향블랙홀 파동 전달 특성을 이용한 굽힘진동 충돌 댐퍼 모델 구축

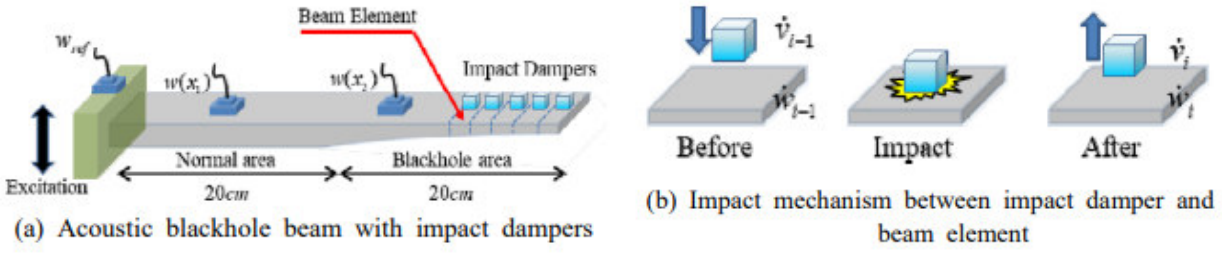
- **충돌 댐퍼가 있는 빔 모델링**

충돌 댐퍼는 충돌체와 진동 저감이 요구되는 구조체의 상호 진동 연성에 의해 비탄성 효과로 전달되는 진동에너지를 마찰 및 열에너지, 음향에너지로 소산시킴으로써 진동 감쇠가 발생하게 한다. 이런 충돌댐퍼가 음향블랙홀형상을 가진 보와 충돌을 하게 되면 음향블랙홀이 없는 경우보다 더 큰 에너지 소산을 유도할 수 있다. 충돌이 일어나기 위해서는 초기 발생되는 진동의 크기가 중요하고 따라서 진동에너지가 응집되는 음향블랙홀로 인하여 충돌체에 더 큰 충돌을 일으킬 수 있게 된다. 이를 통하여 광대역 주파수 범위에 대해 효율적인 감쇠 효과를 가져올 수 있다. 충돌댐퍼는 감쇠 효과의 극대화를 위해 주 진동계 전체 면적에 분포할 때 큰 저감효과를 가져올 수 있으나 음향블랙홀이 적용된 보의 경우 음향블랙홀 영역에만 적용하여 큰 저감효과를 가져올 수 있다.

- **음향블랙홀에 의한 진동 전달 및 반사계수 계측**

음향블랙홀은 구조체의 단면 두께가 지수 법칙에 따라 감소하면서 진행파가 반사되지 않도록 설계된 구조이다. 보의 한 쪽에서 가진 되어 발생한 진동파는 전달되면서 단면이 변화하는 형상 부분에서 반사되지 않고 길이 방향으로 계속 진행하게 되고 주파수 별 진동에너지가 누적되어 한 방향으로 영구적인 진행을 하는 구조이다. 결국 진동체의 끝에서 두께가 0이 되는 경우 최종적으로 진동이 반사되지 않고 한곳에 응집이 된다. 그러나 두께가 매우 작은 구조물은 제작에 한계가 있어서, 진동에너지는 다시 반사되어 나오게 된다. 음향블랙홀의 이런 단점을 보완하기 위해, 음향블랙홀에 제진재를 추가하여 진동을 감쇠하는 연구가 있다.

- **FEM해석 기법을 이용한 감쇠 결과 비교를 통한 성능 검증**



(a) Acoustic blackhole beam with impact dampers

(b) Impact mechanism between impact damper and beam element

그림 9. 음향블랙홀 부분에 충돌 댐퍼 부착 설계

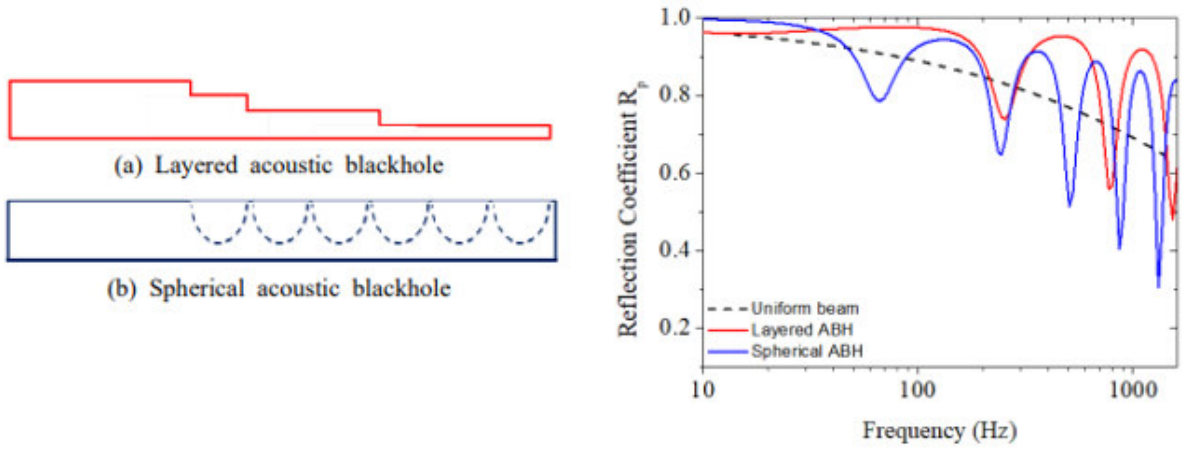


그림 10. FEM을 이용한 음향블랙홀의 형상에 따른 감쇠성능 비교

2.3 폴리머콘크리트와 복합구조 댐퍼설계 및 제진성능 평가

1) 폴리머콘크리트와 일반 콘크리트 배합 설계

실험에 사용된 골재는 결정의 크기가 다른 4호사(0.85~1.2mm)와 6호사(0.25~0.6mm)를 1:2 질량 비율로 혼합한 혼합골재와 일반골재로 구분되며, 에폭시는 주제와 경화제를 5:1의 질량 비율로 혼합하여 에폭시 레진을 제작하였으며, 폴리머 콘크리트는 총 중량 중 에폭시 레진이 차지하는 중량 비율을 혼합비로 하여, 폴리머 혼합비를 10, 15, 20%까지 증가시키며 여러 종류의 폴리머 콘크리트를 제작하였다.

한편, Mock-up 시험체의 비교군인 콘크리트 시험체는 표 8의 25-24-150 규격의 일반 레미콘을 사용하여 제작하였다.

표 7. 폴리머(에폭시) 콘크리트 배합 (단위 : kg/m^3)

Type	Mixing ratio	Cement	Epoxy	Aggregate Type			Water
				Sand	Silica sand #4	Silica sand #6	
P-10	1:9	-	50	-	150	300	-
P-15	1.5:8.5	-	75	-	150	300	-
P-20	2:8	-	100	-	150	300	-

표 8. 일반 콘크리트 배합 (단위 : kg/m^3)

W/B (%)	S/A (%)	Water	Binder		Aggregate Type			Ad. (B%)
			C	F/A	S1	S2	G	
45.3	50.2	176	298	53	542	305	1,092	0.9

표 9. 폴리머콘크리트의 동적특성 측정 개요

Mock-up Test 측정 개요	
시편크기	900mm X 900mm x 300mm
Mock-up 시편 경계조건	Free-free
응답 측정 시간	3.2 [s]
주파수응답 함수	1 ~ 500 [Hz]
시편 가진 조건	Impact Hammer
주파수 계산 평균 횟수	3

2) 폴리머콘크리트 동특성 Mock-up Test



[시험체 전경]



[콘크리트 타설]



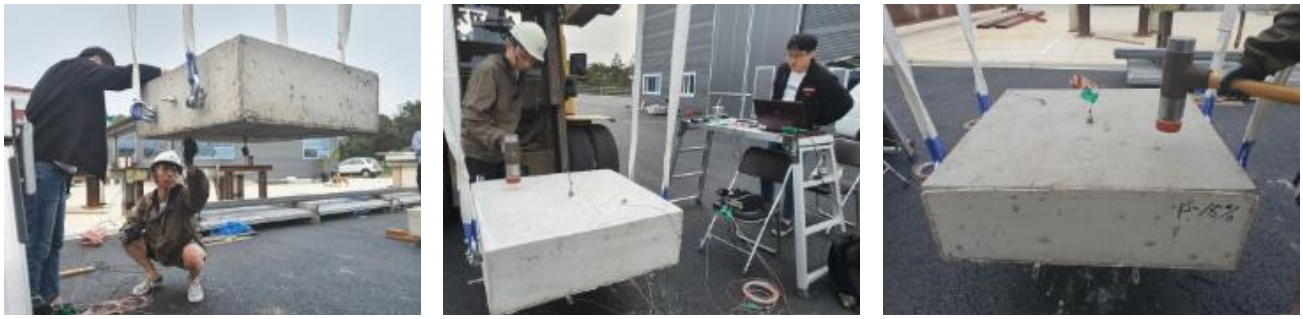
[폴리머콘크리트 패드 설치]

그림 11. 폴리머콘크리트 Mock-up 시험체 제작



[시험체 이동 및 설치] [측정센서 위치 설정] [동특성 측정 프로그램 설정]

그림 12. 폴리머콘크리트 Mock-up 시험 준비

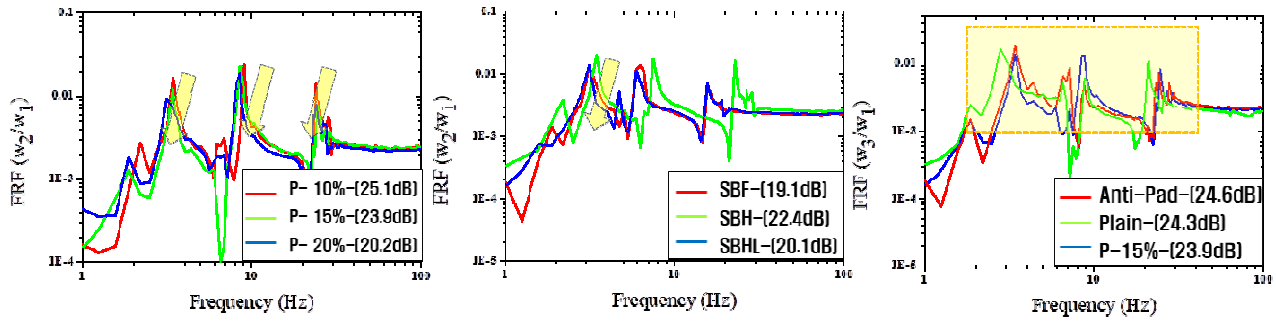


[측정센서 설치] [측정장비 설정] [동적 특성 측정]

그림 13. 폴리머콘크리트 동적 특성 측정

3) 폴리머콘크리트와 복합구조 댐퍼적용 Mock-up 시험 결과

- **<u>폴리머 콘크리트의 비율이 증가할수록 감쇠가 뚜렷하게 나타나며 최대 1차 모드에서 3dB, 3차 모드에서 5dB 감소</u>**
- 구슬이 가득 차있는 경우가 가장 큰 감쇠성능을 보이며, 액체가 차있는 경우는 질량변화 외에 큰 변화가 없음
- 폴리머 콘크리트의 경우가 방진 패드의 경우보다 뛰어난 성능을 보임
- Mock-up 시험체의 동적특성 측정결과, P-15 SBF 시편의 제진 성능이 가장 우수한 것으로 관찰됨



[주파수응답 크기 비교] [구슬배치 및 구조에 따른 비교] [Plain 및 패드와의 비교]

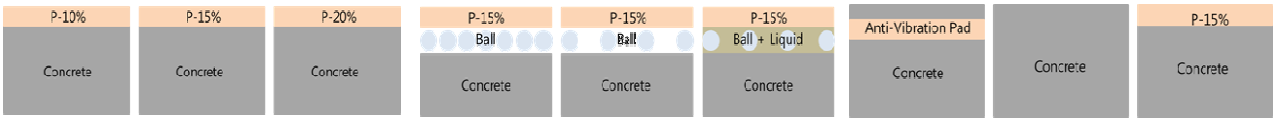


그림 14. 폴리머콘크리트 동적 특성 측정

○ 2차년도

1. 이동하는 차량 하중에 의한 도로표면 진동전파 해석모델 제시

1.1 폴리머 콘크리트 적용 바닥구조 진동 특성

- 다양한 상황에서 발생하는 진동소음 메커니즘에 대하여 해석모델 제시
- 해석모델을 통한 이동 하중에 발생하는 바닥 소음 진동의 파동 특성 파악
- 하중에 따른 패드의 물성 변화 고찰 및 모델 구성

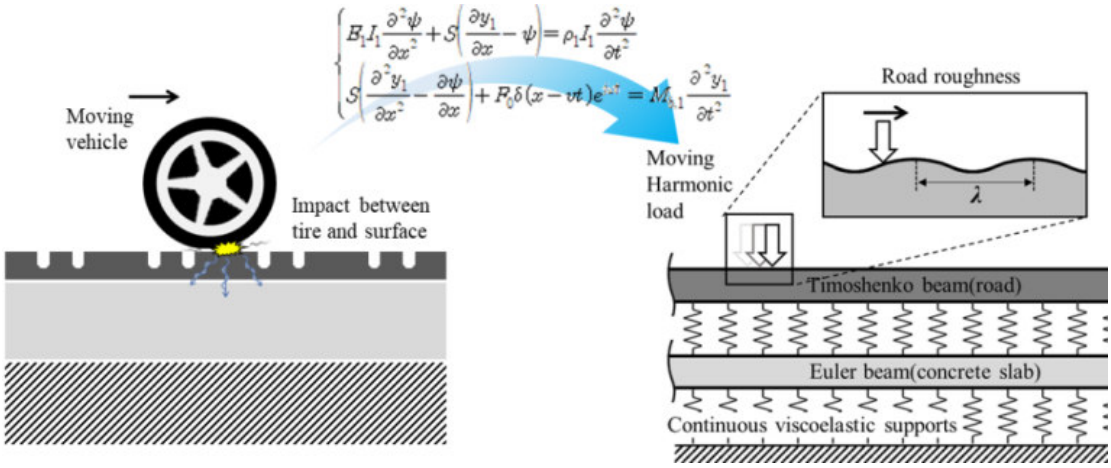
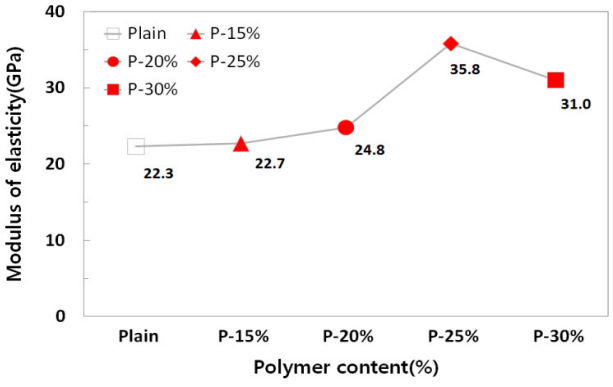


그림 1. 이동 하중에 의한 노면진동 해석모델 도출

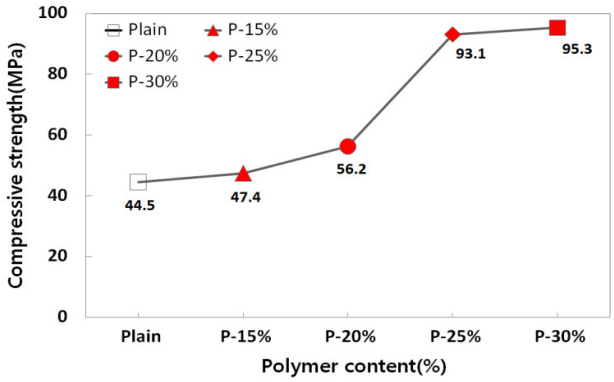
1.2 폴리머 콘크리트의 진동 특성 검토

1) 물리적 특성 실험결과

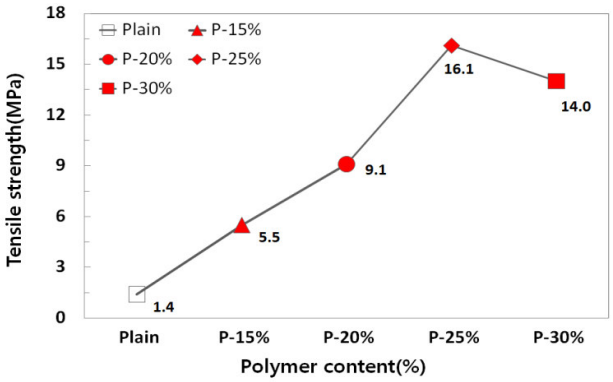
- <u>탄성계수는 Plain이 22.3GPa</u>로 나타났으며, 폴리머(에폭시) 혼입률 15~25%까지는 22.7~35.8GPa로 점증적으로 증가하였으나, 30%에서는 다소 감소하는 경향으로 나타났다.
- <u>압축강도는 Plain 콘크리트가 44.5MPa</u>로 가장 작은 값을 나타냈으며, 폴리머를 15~30% 혼입한 경우, 47.4~95.3MPa로 <u>폴리머 혼입율이 증가할수록 압축강도가 크게 증가</u>하는 것으로 나타났다.
- 인장강도는 Plain에 비해 폴리머 혼입율이 증가할수록, <u>인장강도가 4~11.5배, 휨강도는 3.3~9.3배 증가</u>하는 것으로 나타났다.



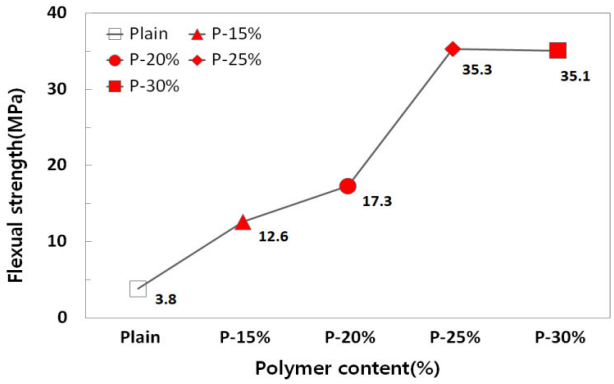
[Modulus of elasticity by polymer content]



[Compressive strength by polymer content]



[Tensile strength by polymer content]



[Flexural strength by polymer content]

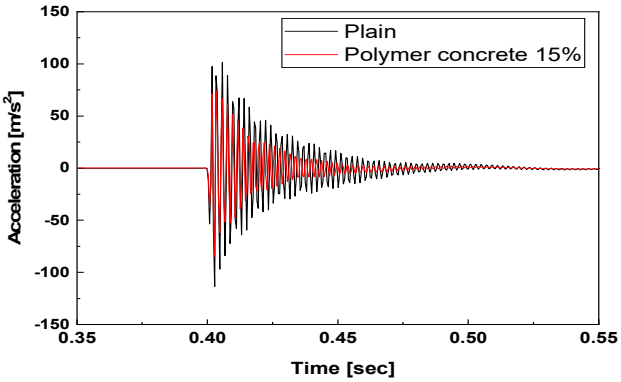
그림 2. 폴리머콘크리트의 물리적 특성

2) 폴리머 콘크리트의 동적 특성 결과

- **폴리머 콘크리트의 동적강성 및 감쇠성능을 측정**하기 위해, 양끝이 자유단인 경계조건에서 임팩트 해머로 충격 가진한 뒤, 가속도 응답에 대한 전달함수를 측정
- **일반 콘크리트**와 폴리머 콘크리트에 대한 가속도 시간이력과 스펙트럼을 나타내는 것으로 **진동이 상대적으로 긴 시간동안 지속되는 것을 보여준다.**
- Plain과 폴리머 콘크리트의 감쇠비를 비교한 결과, Plain의 경우 1.34%, 폴리머 콘크리트 15%의 경우 2.84~3.92%로 감쇠비가 약 2~3배 증가하는 것으로 나타났다.



[Measurement of dynamic properties]

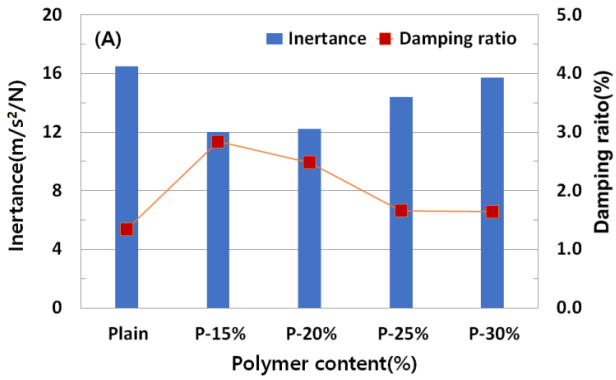


[Modal properties of Plain and Polymer concrete]

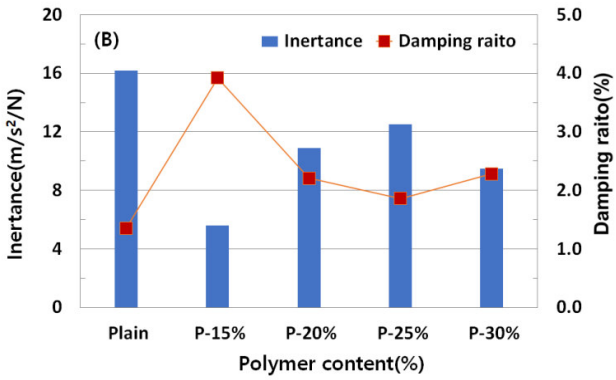
그림 3. 폴리머콘크리트의 동적 특성

3) 진동 특성 실험결과

- 전달함수 방법을 이용하여 측정한 주파수 응답함수 및 감쇠비를 분석한 결과, 주파수 응답함수는 Plain이 가장 큰 것으로 나타났으며, **폴리머를 15% 혼입한 경우가 가장 작은 값**을 나타내었다.
- 한편, **일반 콘크리트와 폴리머 콘크리트가 복합체로 구성된 경우가 성능이 우수**한 것으로 나타나, 고감쇠 콘크리트를 일반 콘크리트와 결합하여 구조물에 적용할 경우, 진동저감 효과가 클 것으로 사료된다.



[5x5x50cm (Plain and Polymer concrete)]



[4x4x50cm(Plain) + 1x1x50cm(Polymer concrete)]

그림 4. 폴리머콘크리트의 진동 특성 실험결과

4) 진동 특성 해석결과

- 폴리머 콘크리트의 모드 해석

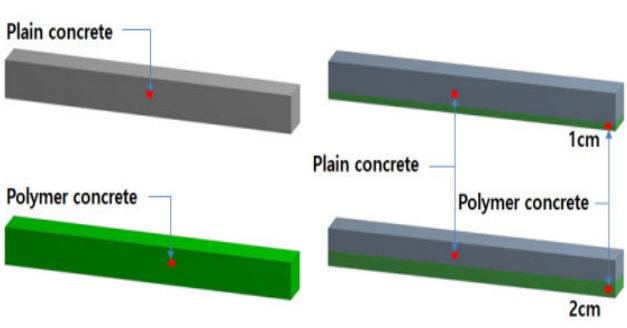
모드 해석은 해당 구조체의 주파수 응답함수(Frequency Response Function, 이하 FRF)를 측정하기 위한 것으로, 운동은 변위, 속도 및 가속도로 나타낼 수 있는데, 이에 상응하는 주파수 응답함수를 컴플라이언스(compliance), 모빌리티(mobility), 이너턴스(inertance)라 하며, 아래 식 (1)~(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{Compliance(변위/힘)} : H(\omega) = \frac{X(\omega)}{F(\omega)}\left[\frac{m}{N}\right] \quad (1)$$

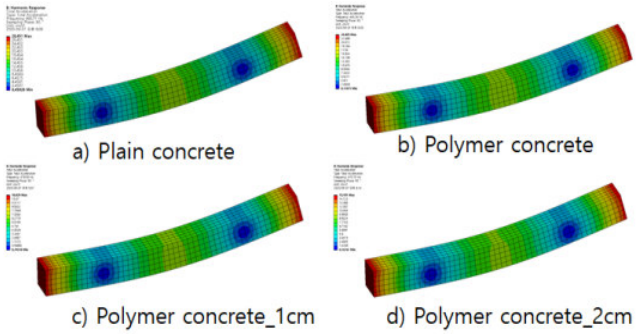
$$\text{Mobility(속도/힘)} : M(\omega) = \frac{j\omega X(\omega)}{F(\omega)}\left[\frac{ms^{-1}}{N}\right] \quad (2)$$

$$\text{Inertance(가속도/힘)} : A(\omega) = \frac{(j\omega)^2 X(\omega)}{F(\omega)}\left[\frac{ms^{-2}}{N}\right] \quad (3)$$

폴리머 콘크리트의 수치해석을 위해, ANSYS ver.2021_R2을 이용하여 수행하였으며, 각 시험체의 형상별로 유한요소모델을 수립하여, 양끝이 자유단인 경계조건에서 가진력을 입력하여 유한요소 해석을 실시하였으며, 해석 결과는 측정결과와 유사한 경향을 보였는데, **폴리머 콘크리트의 주파수 응답함수는 Plain 콘크리트에 비해 20~30% 정도 감소**하는 것으로 나타났으며, **감쇠비는 폴리머 콘크리트와 일반 콘크리트를 복합체로한 경우가 46~65% 정도 감소**하는 것으로 나타났다.



[plain and polymer concrete]

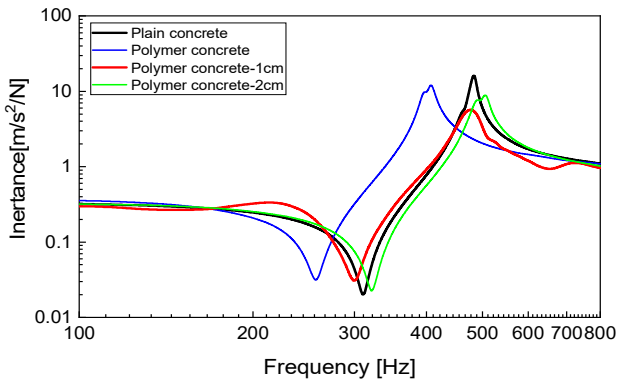


[Mode analysis of plain and polymer concrete]

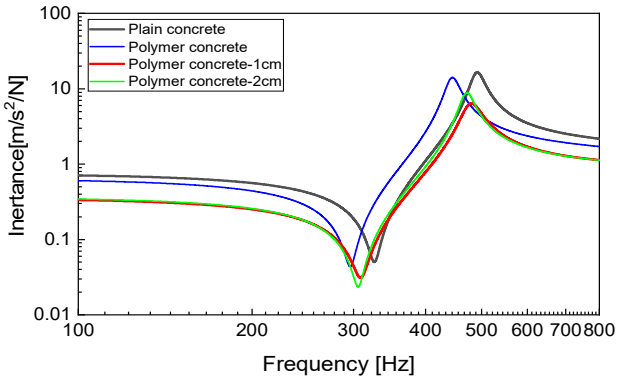
그림 5. 폴리머콘크리트의 진동특성 해석결과

- 폴리머 콘크리트의 동적 물성 해석 검토

유한요소 해석 결과는 고유진동수 500Hz 대역에서의 실측정한 감쇠비를 적용한 결과로서, **Plain 콘크리트는 주파수 응답함수가 16.6으로, 실측정치 16.2와 가장 유사한 값**을 보였으며, **폴리머 콘크리트 1㎝와 일반 콘크리트 4㎝의 결합 시험체의 해석치가 6.4로 실측정치인 5.7과 유사한 값**을 보여, 해석모델에 대한 검증이 이루어졌으며, **폴리머 콘크리트 복합체의 경우가 진동저감성능이 60% 정도 성능이 우수한 것으로 나타났다.**



[Inertance by measurement of Plain and Polymer]



[Inertance by FEM analysis of Plain and Polymer]

그림 6. 폴리머 콘크리트의 동적물성 해석검토

2. 해석 모델을 통한 진동 및 소음 전달량 예측

2.1 해석 모델을 통한 진동 및 소음 전달량 예측

- 해석 모델을 통한 다양한 주행 조건에서의 진동 및 소음 전달량 예측
- 바닥 구조체의 진동 소음 저감 성능 인자 도출

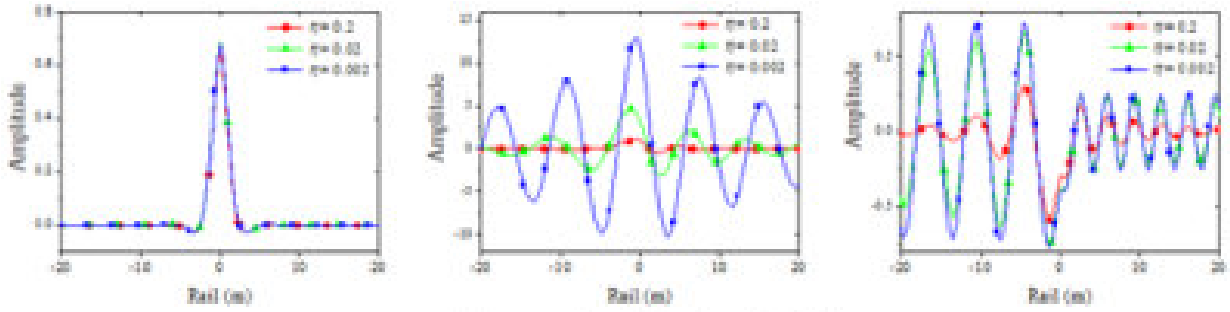


그림 7. 노면 진동 전파 해석

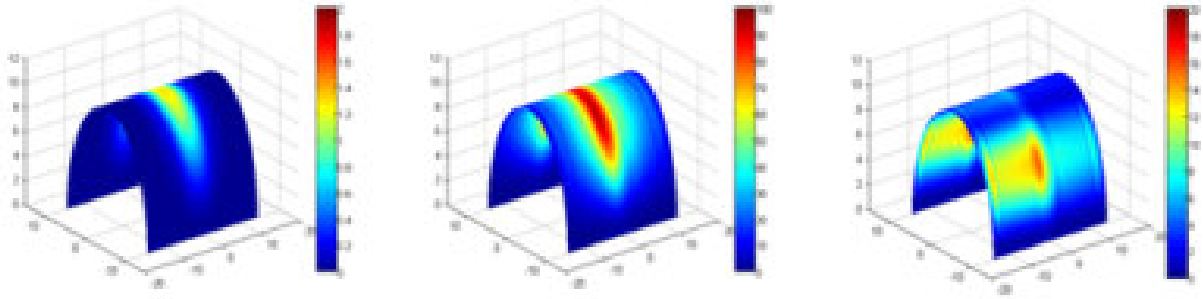


그림 8. 노면 소음 방사 해석

2.2 파동 전파 특성 분석을 통한 등가 동적 물성 예측

- 하중에 따른 패드의 물성 변화 고찰 및 모델 구성
- 슬라브 궤도의 침목 등가 강성 도출 및 수치 해석을 통한 도출
-

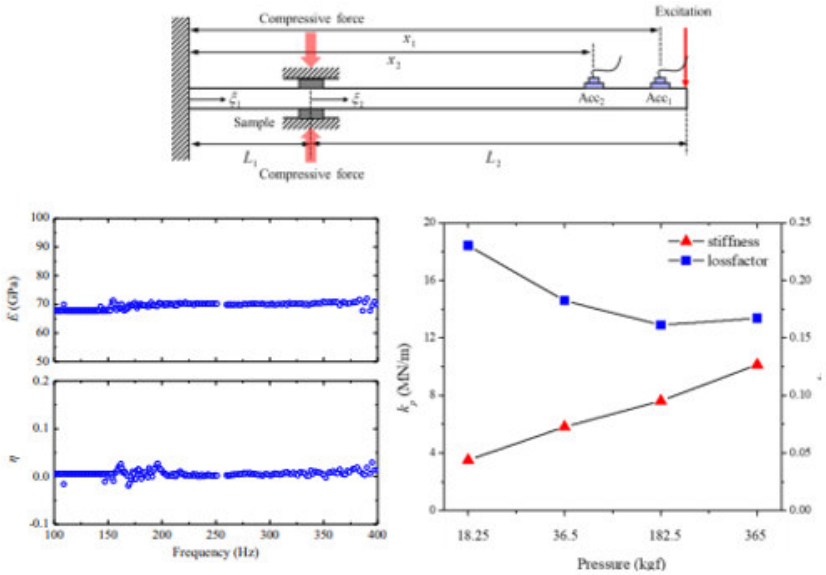


그림 9. 하중에 따른 진동 물성 차이를 위한 모델 구성 및 손실률 변화 검토

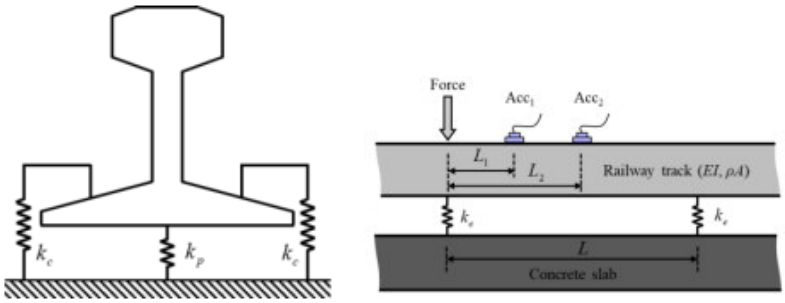


그림 10. 등가 강성 모델 구축 및 레일패드 모델 구축

2.3 흠음재를 통한 구조체의 진동전감 성능 연구

- 건축물의 외부 소음의 실내 투과 차단을 위해 사용하는 흠읍재의 진동 감쇠율 검증
- 빔 전달함수법을 이용하여 구조물의 진동 저감 성능 정량화 수행

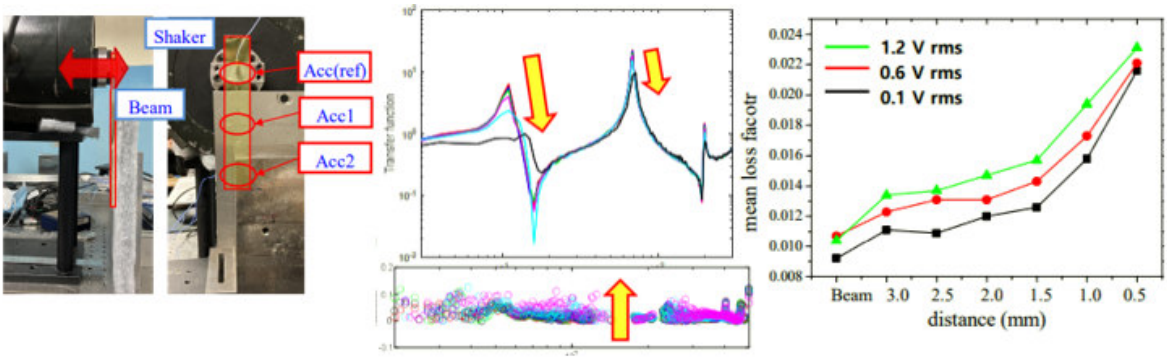


그림 11. 수치해석 기법을 통해 흡음재가 구조물에 미치는 손실계수 도출

3. 폴리머 콘크리트 혼입 복합구조 댐퍼의 배치를 이용한 진동전달 차단 구조 설계

- 일반 콘크리트 재료와 폴리머 콘크리트의 물성 및 진동특성 비교
- 복합구조 댐퍼 적용 시 전체 다층 구조에 미치는 진동전달 차단 성능 변화 관찰
- 각 레이어/층 두께에 따른 전체 바닥 구조체 진동 차단 성능 변화 및 영향도 파악
- 다양한 형상의 복합구조 댐퍼 설계를 통한 바닥 구조체의 진동전달 차단 성능 및 구조 강도 최적화

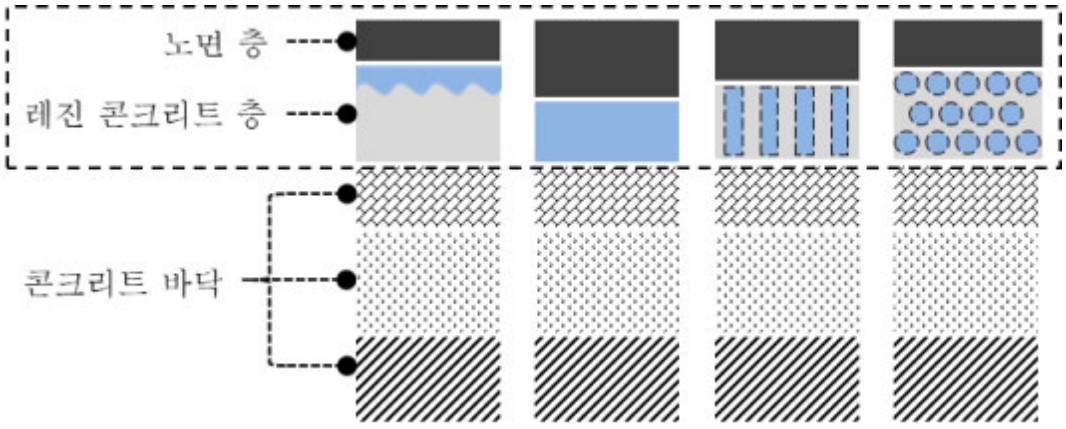


그림 12. 복합구조 댐퍼의 적층 구조 변경을 통한 진동 전달 차단 구조 설계

3.1 폴리머 콘크리트의 물리적 특성 및 동특성 측정실험

1) 물리적 특성 시험체 제작 및 물리적 특성 측정

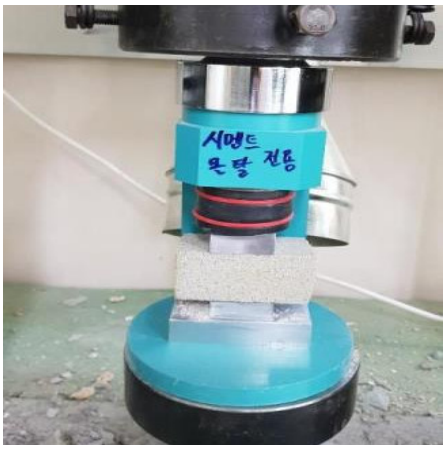
폴리머 콘크리트를 진동 및 소음 저감용 댐퍼로 활용하기 위해서, KS F-2403(콘크리트의 강도 시험용 공시체 제작 방법)에 의거하여 시험체를 제작한 후, 측정시험 기준인 KS F-2438(탄성계수), KS F-2405(압축강도), KS F-2408(휨강도), KS F-2423(인장강도)을 참고하여 물리적 특성을 측정하였다.



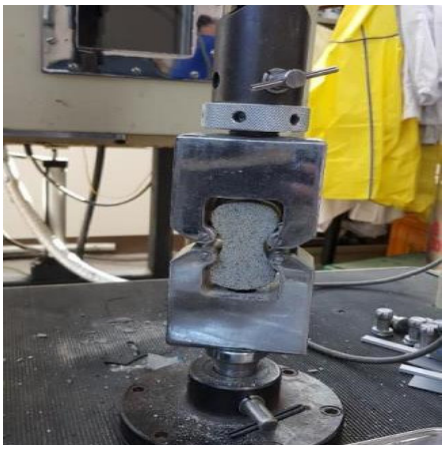
그림 13. 물리적 특성 및 동특성 측정용 시험체



a) 탄성계수 측정



b) 압축강도 측정



c) 인장강도 측정



d) 휨강도 측정

그림 14. 물리적 특성 측정시험

2) 동특성 시험체 제작 및 동적 특성 측정

폴리머 콘크리트의 동적 특성을 측정하기 위한 시험체로 폴리머 콘크리트뿐만 아니라, **내부에 파이프와 임팩트볼을 설치한 시험체**를 그림과 같이 제작한 후, 센서를 설치하여 KS B ISO 7626-1:2011(기계적 진동 및 충격), KS B ISO 7626-5:1994(진동 및 충격)의 일반 진동측정 방법 기준에서 임팩트 해머를 이용한 시험 및 결과 분석기준을 참고하여 시험체의 강성 및 동적 특성을 측정하였다.



그림 15. 동특성 시험체 제작



그림 16. 동특성 시험체 동적 특성 측정

3) 폴리머 콘크리트와 복합구조 댐퍼의 진동감쇠 원리

- 감쇠는 진동하는 물체의 진폭이 감소하는 과정으로, 외부에서 가해진 에너지가 물체의 내부에서 열이나 마찰 등에 의해서 손실되는 것을 의미한다.
- 외력에 의해 생성된 에너지가 소비되면서 감쇠비가 증가한다. 이력거동에서 재료의 반응에 의한 면적이 넓을수록 감쇠성능이 우수하다고 할 수 있다.
- 점성감쇠에 의해 소산되는 에너지()는 조화하중에 의한 하중-변위이력곡선의 면적과 같다고 할 수 있다 (Lee et al., 2007; Cho et al., 2013).
- 폴리머 콘크리트는 감쇠 성능이 우수하여, 진동과 소음을 줄일 수 있는 건설재료로 활용이 가능한데, 에폭시 수지와 골재만으로 복합체를 형성함으로써, 강성 증대를 통한 진동 감쇠 및 골재 사이의 마찰과 맞물림 작용에 의한 에너지 소산을 통해 진동 감쇠가 이루어진다.

$$K_a = \frac{P_m}{\delta_m}, (\text{단위} : kN/mm) \tag{4}$$

$$E_D = \int f_D \cdot d\delta = \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} \left(c\frac{d\delta}{dt} \right) \frac{d\delta}{dt} dt = \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} c\left(\frac{d\delta}{dt} \right)^2 dt \tag{5}$$

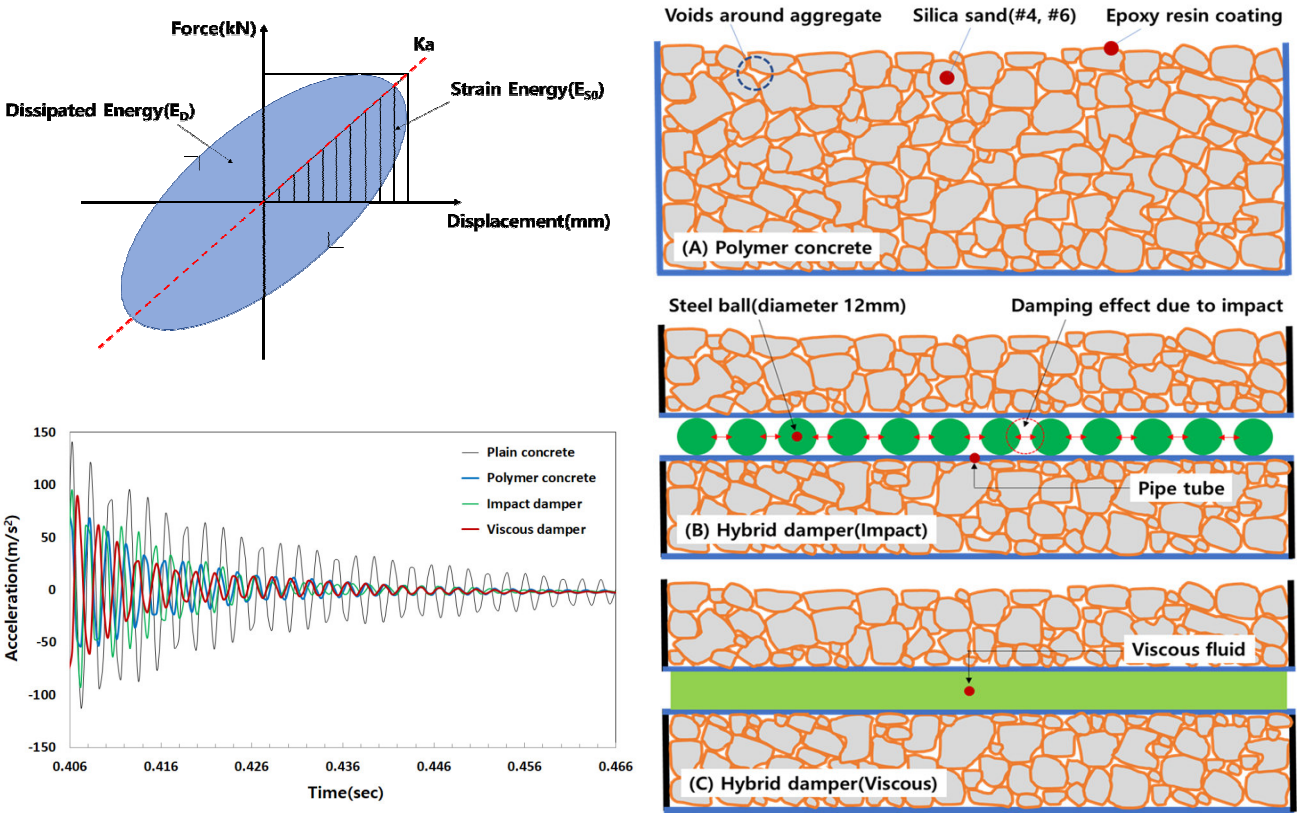
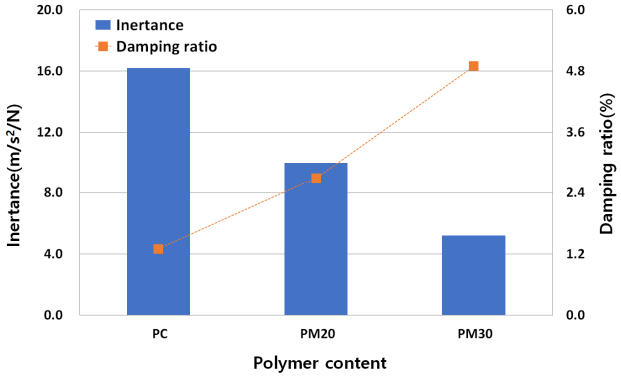


그림 17. Specimem of polymer concrete with hybrid damper

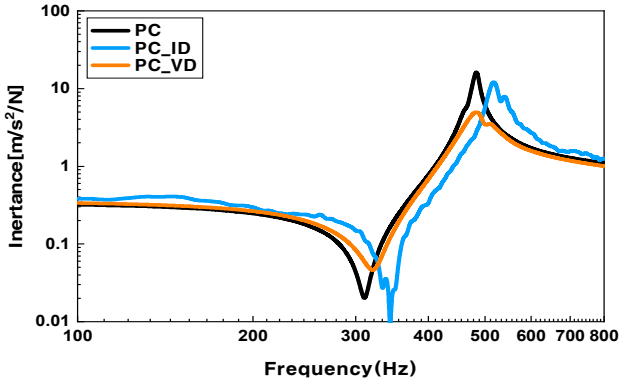
4) 폴리머 콘크리트와 복합구조 댐퍼의 동적 특성

- 주파수 응답함수(Inertance) 및 감쇠비(Damping ratio)를 비교한 결과, 주파수 응답함수는 PC가 16.2로 가장 큰 것으로 나타났으며, PM30이 가장 작은 값을 나타내었다.
- **감쇠비의 경우는, PC가 1.35로 가장 낮은 것으로 나타났으며,** 폴리머 혼입율이 증가함에 따라 높아지는 것으로 나타났다. 특히, **PM30의 경우는 감쇠비가 4.9로 PC에 비해 3.5배정도로 크게 증가하여, 진동감쇠 성능이 우수한 것으로 나타났다.**

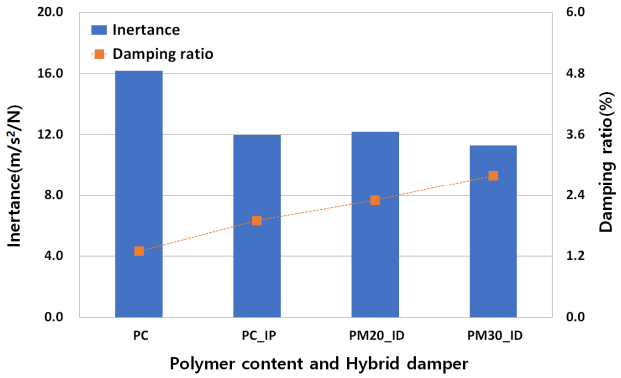
- PC의 경우는 고유주파수가 488Hz로 나타났는데, 충돌 댐퍼를 적용하게 되면 강성이 다소 증가하여 고유주파수가 518Hz로 증가하면서 주파수 응답함수는 26%정도 감소하는 것으로 나타났다. 또한, **<u>점성 댐퍼를 적용한 경우</u>**는 고유주파수는 478Hz로 유사하지만, **<u>주파수 응답함수는 5.1로 70%정도 크게 감소하는 것으로 나타나, 진동감쇠 성능이 크게 증가</u>**하는 것으로 나타났다.
- Plain 콘크리트는 고유주파수가 488Hz 대역이지만, 폴리머 콘크리트와 복합구조 댐퍼를 함께 적용한 경우는 강성이 크게 증가하여 578~603Hz 대역으로 나타났고, 주파수 응답함수도 25~59%정도로 크게 감소하여, 진동감쇠 성능면에서 PC대비 우수한 것으로 나타났다. 따라서, **<u>폴리머 콘크리트와 복합구조 댐퍼를 동시에 적용하면 구조물의 변형저항성과 진동감쇠 성능을 크게 향상 시킬 수 있을 것으로 사료된다.</u>**



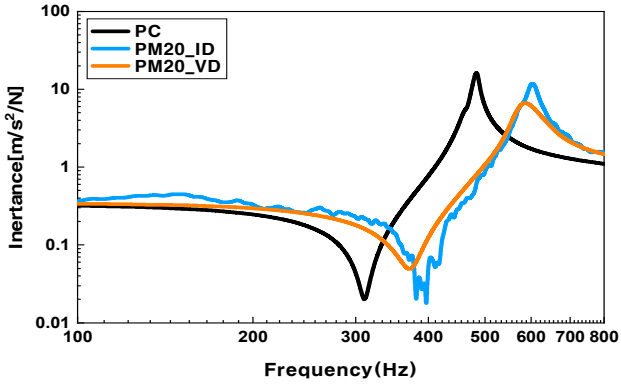
[Dynamic properties of Polymer content]



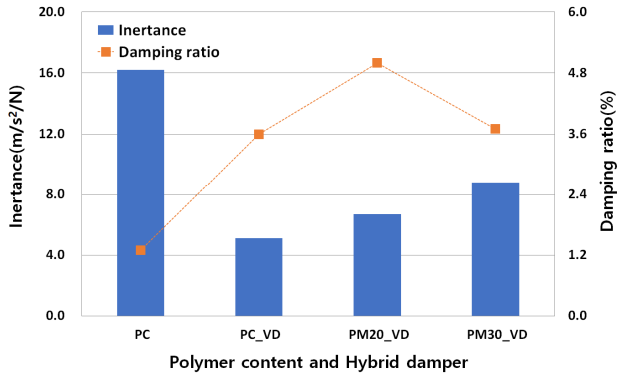
[Dynamic properties of Hybrid damper]



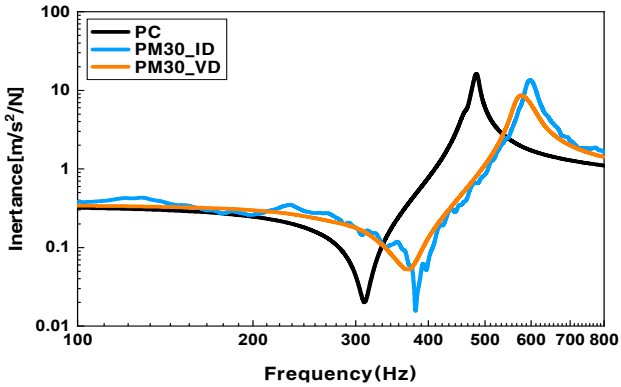
[Dynamic properties of Impact damper]



[Dynamic properties of Hybrid damper]



[Dynamic properties of Viscous damper]



[Dynamic properties of Hybrid damper]

그림 18. 폴리머 콘크리트와 복합구조 댐퍼의 동적 특성

5) 대형 Mock-up 시험체 제작

엘리베이터 코어월 및 수평/수직 보의 진동저감 성능 검토를 위한 대형 Mock-up 시험체를 아래과 같이 제작하였다.



a) 엘리베이터 코어월 시험체 거푸집 제작



b) 엘리베이터 코어월 시험체 콘크리트 타설



c) 수평보 시험체 거푸집 제작



d) 수평보 시험체 폴리머 & 일반 콘크리트 타설



e) 엘리베이터 코어월 시험체



f) 수평보 시험체

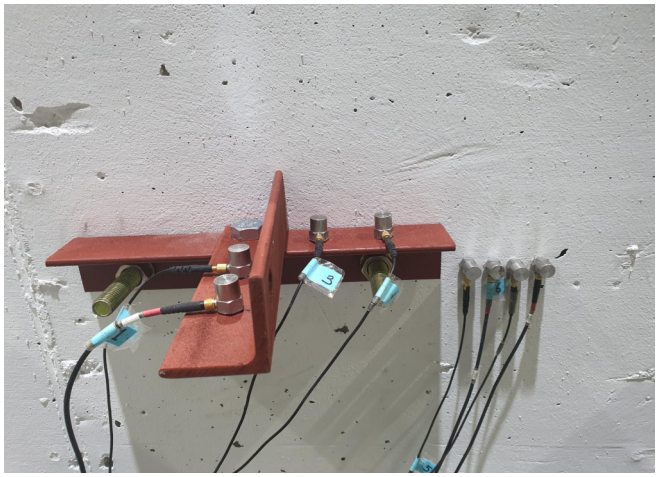
그림 19. Mock-up 대형 시험체 제작

6) 대형 Mock-up 시험체 동적 특성 측정(엘리베이터 코어월)

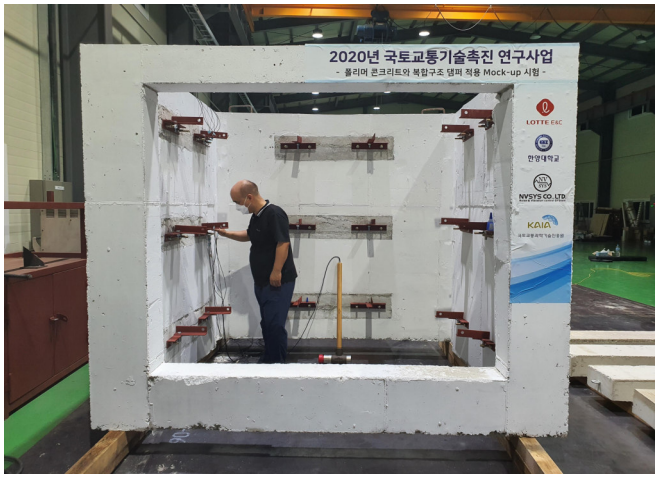
엘리베이터 코어월의 진동저감 성능 검토를 위하여 그림 6과 같이 센서를 설치하여 강성 및 동적 특성을 측정하였다.



a) 동특성 측정 센서 설치(엘리베이터 코어월)



b) 센서 설치 상세



c) 센서설치 이상 유무 점검



d) 임팩트 해머 가진에 의한 동특성 측정(A)



e) 임팩트 해머 가진에 의한 동특성 측정(B)



f) 임팩트 해머 가진에 의한 동특성 측정(C)

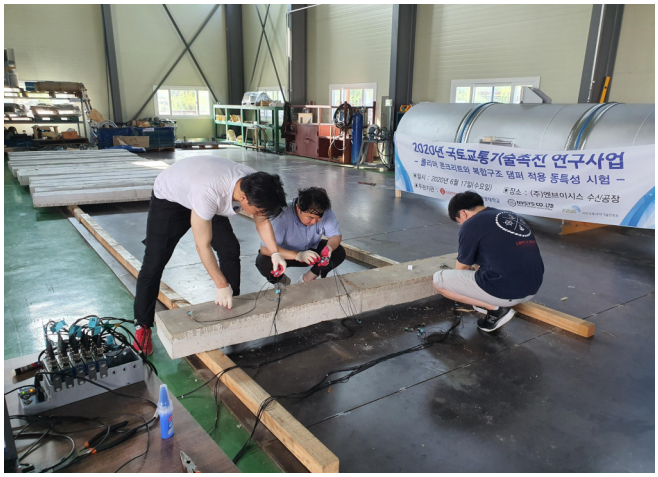
그림 20. 엘리베이터 코어월 Mock-up 대형 시험체 동특성 측정

7) 대형 Mock-up 시험체 동적 특성 측정(수평 및 수직 보)

수평 및 수직 보 콘크리트의 진동저감 성능 검토를 위하여 아래의 그림과 같이 센서를 설치하여 강성 및 동적 특성을 측정하였다.



a) 동특성 측정 센서 설치(수평방향)



b) 센서 설치 상세(수평방향)



c) 센서설치 이상 유무 점검(수평방향)



d) 임팩트 해머 가진에 의한 동특성 측정(A)



e) 센서설치 이상 유무 점검(수직방향)



f) 임팩트 해머 가진에 의한 동특성 측정(B)

그림 21. 수평 및 수직 보 콘크리트 Mock-up 대형 시험체 동특성 측정

① 수평 및 수직 보 콘크리트의 동특성 실험 결과

- 폴리머 콘크리트의 비율을 다르게 하여 여러개의 시편을 제작한 후, 취득한 시간데이터의 기울기는 진동감쇠율을 검토할 수 있기 때문에 대형 Mock-up 시험체에 15개의 가속도계를 부착하여 시간데이터를 취득 후 envelope을 수행하여 가속도계 별 진동에너지의 크기를 도출하고 다음과 같은 수식을 이용하여 감쇠비 도출하였다.

$$\Lambda = \ln(\frac{X_1}{X_2}), \quad \Lambda = 2\pi\zeta \tag{6}$$

- 가속도계의 위치별 비교를 통해 가진 점에서 멀어질수록 가진에 의한 진동에너지가 감쇄되는 것으로 나타났으며, 일반 콘크리트에 대해 굽힘 진동이 뚜렷하고 대략 2초정도까지 진동감쇠가 빠르게 일어나는 것으로 나타났다. 3번 가속도계를 통해 시편 별 데이터를 검토한 결과, 일반 콘크리트보다 폴리머 콘크리트와 같이 제작된 시편의 진동 감쇠 기울기가 크게 나타났다.
- 모든 가속도에 대해 **폴리머콘크리트의 경우, 폴리머 혼입율이 증가할수록 감쇠성능이 증가**하는 것으로 나타났다. 방진마운트의 경우보다 폴리머 콘크리트의 비율이 30%인 경우가 더욱 좋게 나타났으나 비용적인 측면을 고려하였을 때, 폴리머 콘크리트의 비율을 목적에 맞는 진동감쇠 정도로 설정하게 된다면 적은 비용과 재료로 보다 좋은 성능을 발휘할 수 있다고 기대된다.

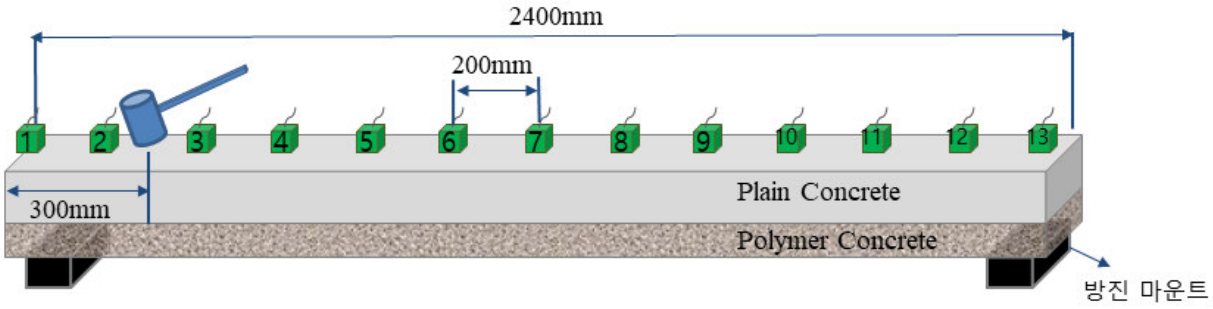
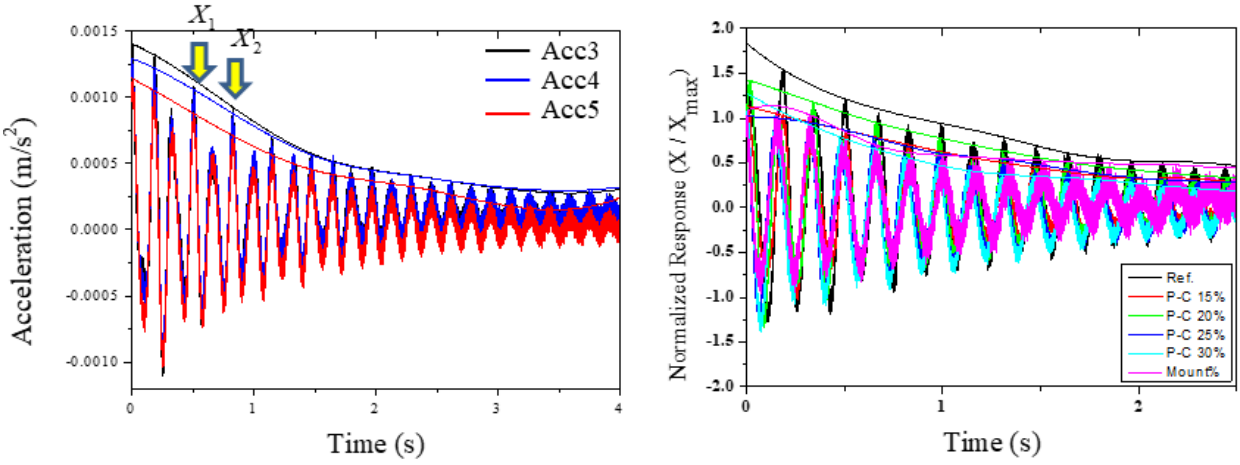
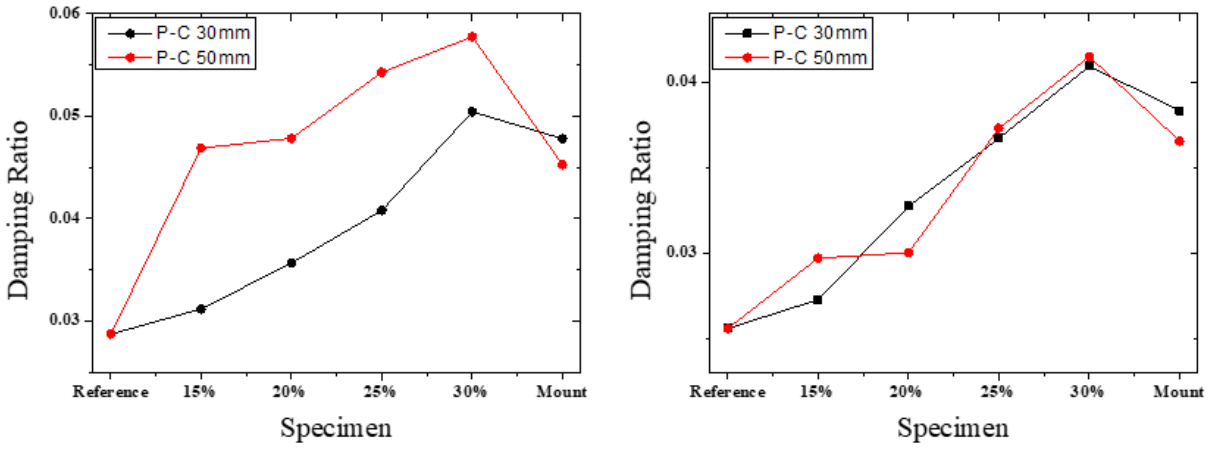


그림 22. 대형 Mock-up 시험체 가속도계 설치



[가속도계 별 시간데이터] [시편 별 3번 가속도계의 시간데이터]

그림 23. 수평 및 수직 보 콘크리트의 동특성 실험 결과

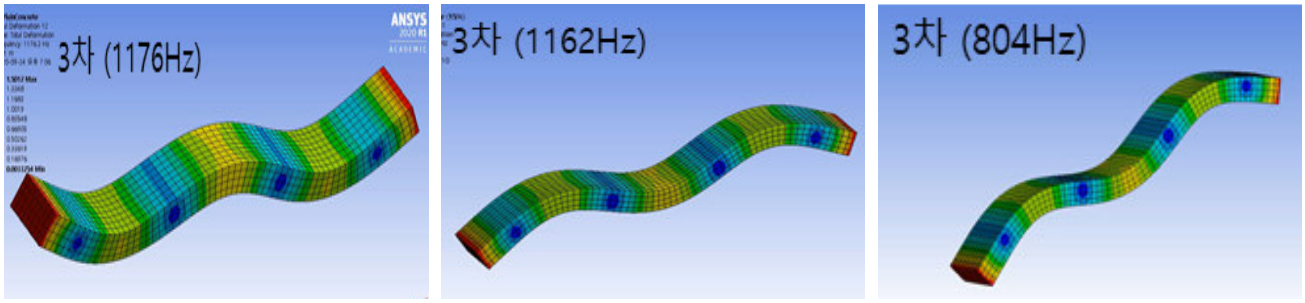


[2번 가속도계 감쇠율] [5번 가속도계 감쇠율]

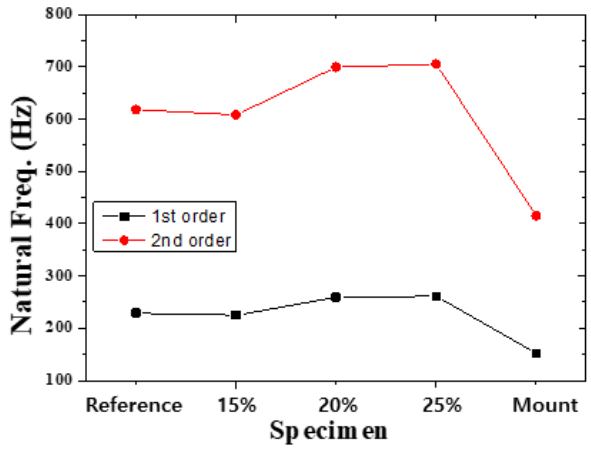
그림 24. 수평 및 수직 보 콘크리트의 동특성 실험 결과

② FEM해석을 통한 고유주파수 도출

- 일반 콘크리트와 폴리머 콘크리트-15%의 경우는 매우 비슷한 공진주파수를 갖는 것으로 나타났으며 폴리머 콘크리트 경화제의 비율이 증가할수록 공진주파수가 증가하는 것으로 나타난다. 마운트로 제작된 경우 일반 콘크리트 보다 공진주파수가 낮게 나타났다.



[Plain concrete] [Plain-Polymer concrete] [Plain-Mount concrete]



Order	Specimen	Modal Freq.(Hz)
1차	Reference	229
	Polymer 15%	225
	Polymer 20%	259
	Polymer 25%	261
	Mount	152
2차	Reference	618
	Polymer 15%	608
	Polymer 20%	699
	Polymer 25%	705
	Mount	415

그림 25. 시편 별 공진주파수

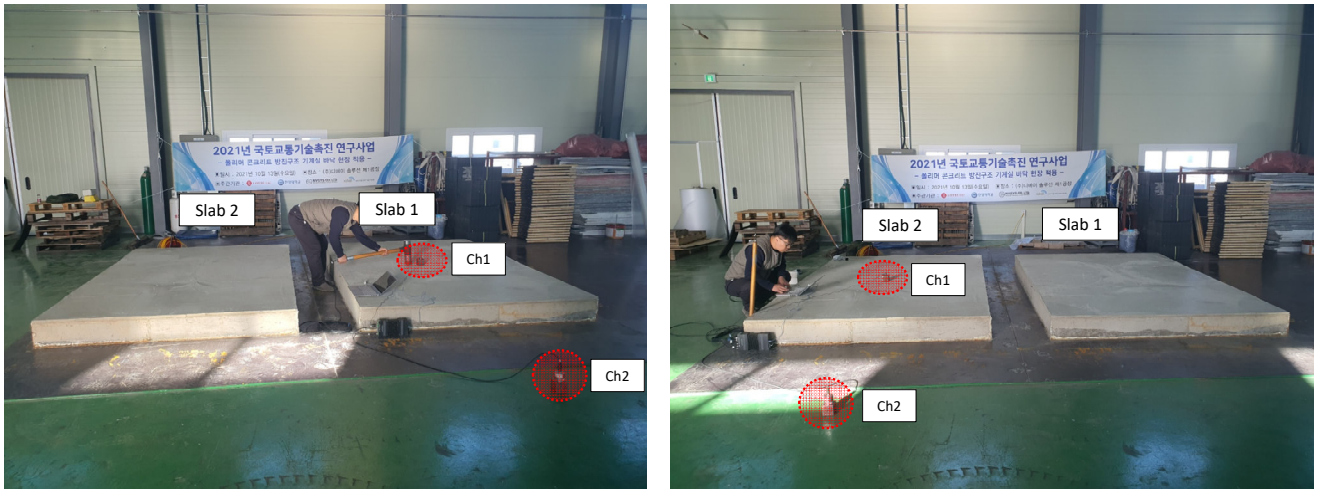
8) 기계실 바닥 콘크리트 해석모델 검토 및 실측정 결과 비교

① 기계실 기초바닥 콘크리트의 동특성 비교 결과

진동저감 성능검토 시험을 위해 일반 콘크리트 기초바닥과 폴리머 콘크리트 패드를 적용한 기초바닥 시험체에 대한 가진시험을 수행하였다. 가진시험은 임팩트 해머를 사용하여 시편에 충격을 가한 후 시편 상단(Ch1)과 시편이 안착된 바닥(Ch2)에서 각각 진동응답을 측정하는 방식으로 수행하였다.

전달률은 전달력/외력의 비로 값이 낮을수록 진동전달이 작아 진동저감 성능이 높은 것을 의미하는데, **Slab1(일반 콘크리트)과 Slab2(폴리머 혼입율 20% 콘크리트 패드 적용)의 전달률을 도출하여 비교한 결과 Peak 주파수 55Hz, 360Hz, 420Hz 대역에서 Slab2의 전달률이 15~20%정도 더 낮은 것으로 확인되었으며, 진동가속도의 경우는 35~40% 정도로 우수한 성능을 보였다**.

$$T = \frac{\text{전달력}}{\text{외력}} = \frac{ch2}{ch1}$$



일반 콘크리트 적용 기초바닥 시험체(Slab 1) 폴리머 콘크리트 적용 기초바닥 시험체(Slab 2)

그림 26. 기계실 바닥 콘크리트 시험체

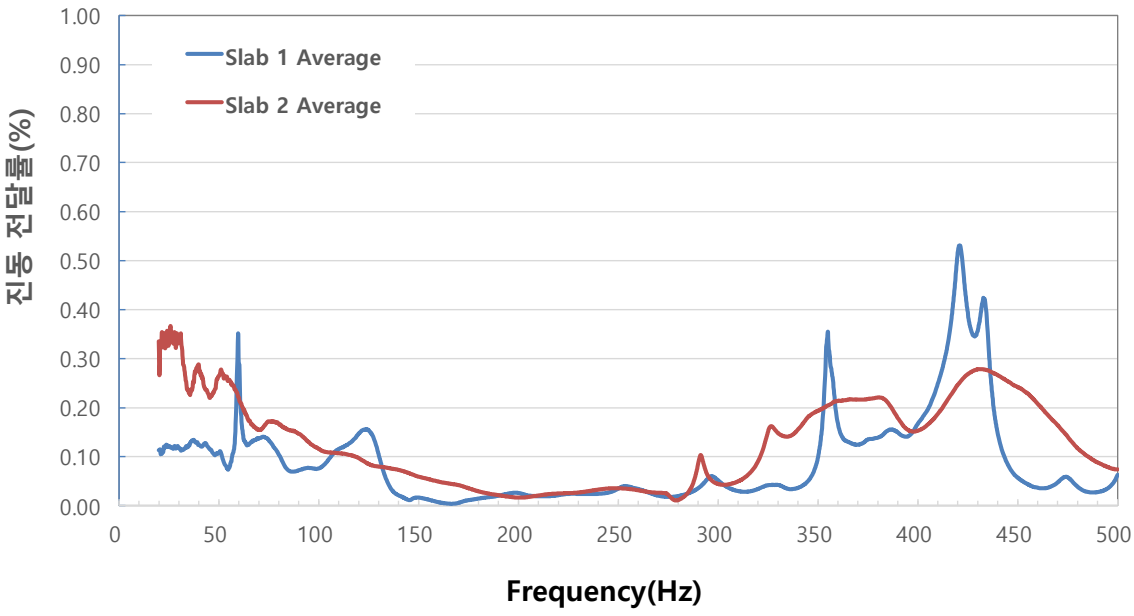


그림 27. 기계실 기초바닥 콘크리트 시험체 진동전달률 비교 결과

② 기계실 기초바닥 콘크리트 해석모델 검토

기계실 기초바닥 콘크리트의 진동저감 성능에 대한 실 측정 검토 결과를 참고하여, 기계실 바닥 콘크리트의 해석 모델 수립을 아래 그림과 같이 수립하였다. 실 측정 검토결과를 적용한 해석모델의 해석결과, **폴리머 콘크리트 패드를 적용한 경우가 상부의 기계설비의 진동전달 차단 성능이 우수한 것으로 평가되었으며, 진동가속도 실측정 결과인 35~40%와 해석결과가 36% 정도로 유사한 경향을 보였다.**

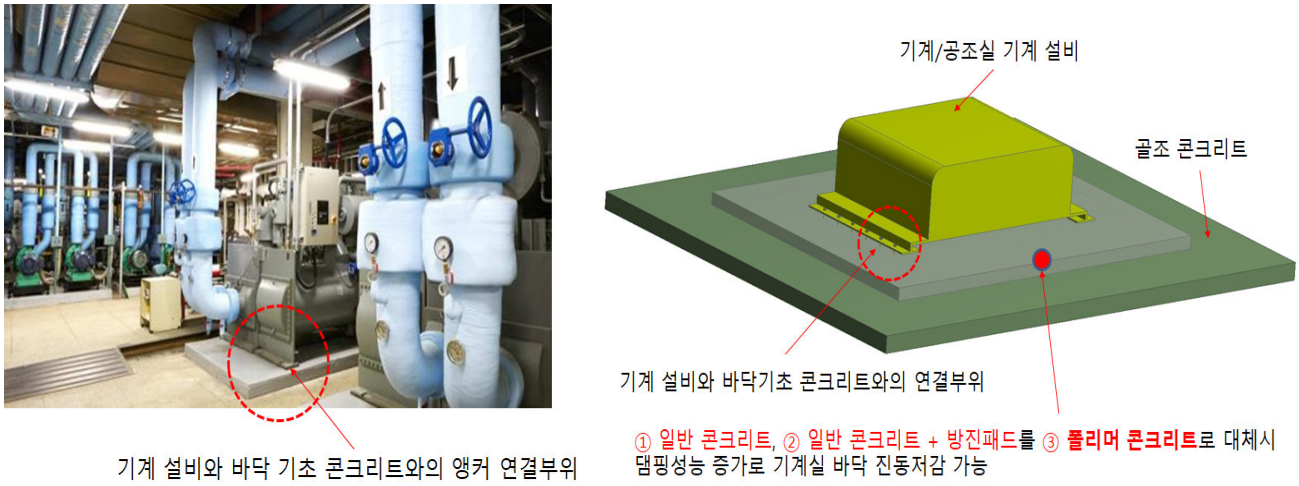
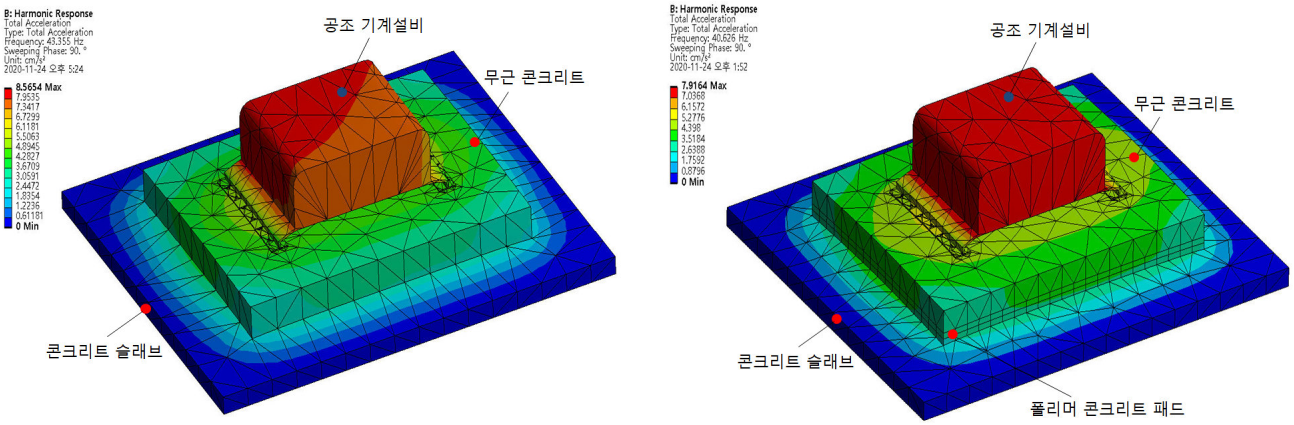


그림 28. 기계실 바닥 콘크리트의 상세 모델링



일반 콘크리트 물성적용 해석 모델　　폴리머 콘크리트 물성적용 해석 모델

그림 29. 기계실 바닥 콘크리트의 해석 모델 수립

표 1. 기계실 기초바닥 콘크리트의 해석 결과

구분		두께 (㎜)	고유주파수 (Hz)	진동가속도레벨(㎝/sec^2)				비고
				기계설비	기초바닥 상부	콘크리트 슬래브	저감비	
일반 콘크리트		200	21.03	51.36	12.70	4.27	100%	폴리머 혼입율 20% 시험체 기준으로 평가함
개발 기술	일반 콘크리트	170	20.91	32.6	8.46	2.73	64%	
	폴리머 콘크리트 패드	30						

부록 I. 임피던스 측정 및 평가 방법

I.1 측정 장비

임피던스 측정을 위해 다음과 같은 장비를 사용하였다.

(1) ENDEVCO Model 2305 impact hammer (저주파수용)

- Frequency range: 0 - 1kHz (medium tip)
- Head Weight: 15 lb (6.8kg)
- Sensitivity: 0.227 mV/N

(2) Accelerometer: (B&K, Type 4384)

(3) Charge Amp (B&K, Nexus Type 2690)

(4) Analyzer: B&K Pulse 3560B

I.2 측정 방법

(1) 가진은 Impact hammer를 사용하여 가진한다.

(2) 측정시 최소 3회 이상 가진하여 coherence가 0.9 이상 되도록 한다.

(3) 임피던스의 정의는 다음과 같이 주어진다 .

$$Z = F/V \qquad (I.1)$$

여기서, F = Impact force, V = velocity를 의미한다.

임피던스 측정결과는 다음과 같이 표시하였다.

$$L_z = 20log\left(\left| Z/Z_o \right|\right), \text{ dB} \qquad (I.2)$$

여기서, $Z_o = 1\,Ns/m$로 정의된다.

(4) 힘은 임팩트 해머로부터 측정가능하나 속도는 측정하기가 어려우므로 가속도계(accelerometer)를 사용하여 가속도를 측정한 후 $v = a/2\pi f$를 이용하여 임피던스를 구한다.

$$L_z = 20log\left(\left| Z/Z_o \right|\right) = 20log\left(2\pi f\right) - 20log\left(\left| a/F \right|\right) \qquad (I.3)$$

(5) Coherence와 Inertance는 narrow band로 1 Hz 간격으로 측정한다.

(6) 각 가속도계 위치에 대해 측정한 N개의 모빌리티를 식(I.4)와 같이 평균하고(energy average), 최종적으로 역수를 취해 임피던스를 구할 수 있다.

$$M_{average} = \left[1/Z_1 + 1/Z_2 + \cdots + 1/Z_N\right]/N \qquad (I.4)$$

$$Z_{avergae} = 1/M_{average} \qquad (I.5)$$

(7) 식 (I.4), (I.5)의 모빌리티 평균대신 식 (I.6)처럼 임피던스의 평균을 바로 구하는 방법도 있다.

$$Z_{averqage} = [Z_1 + Z_2 + \cdots + Z_N]/N \qquad (I.6)$$

(8) 두 방법을 비교하면 여러 개의 임피던스 (또는 모빌리티)가 큰 차이 없이 대등하면 식 (I.5)와 (I.6)은 같은 결과를 나타내며, 임피던스가 주파수대역에서 날카로운 dip 또는 peak를 가지면 두 식은 무시할 수 없는 차이를 보이게 된다. 일반적으로 다음 관계가 성립하며 식 (I.5)는 임피던스의 하향값을 나타낸다.

$$Z_{avg} \geq Z_{avg\_Mobil} \qquad (I.7)$$

(9) 1/3-옥타브 밴드로의 변환은 식 (I.4)에서 구한 1 Hz 협대역 임피던스 값을 다음과 같이 밴드폭을 고려하여 log 합산하여 구할 수 있다.

$$L_{Z\_band} = 10\log\left[\left(\sum_i 10^{L_{Zi}/10}\right)/\Delta f\right] \qquad (I.8)$$

여기서 $\triangle f$=bandwidth를 의미한다.

부록 II. 마운트와 바닥의 임피던스를 고려한 해석

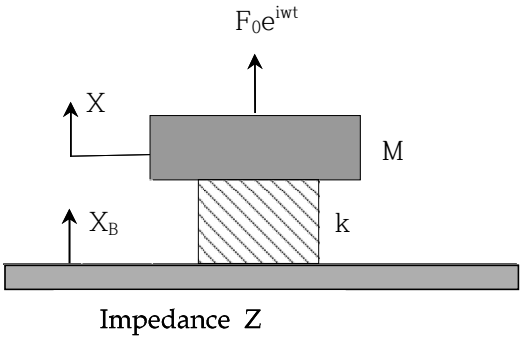


그림 30. Mass-spring system on the elastic floor with impedance Z

그림과 같이 장비(질량 : M)가 스프링상수 k인 마운트위에 놓여있고 바닥의 임피던스가 Z이면, 장비가 작동에 의해 진동하면(가진력 : F_o) 운동방정식은 다음과 같이 된다.

$$(k-\omega^2 M)X - kX_B = F_0 \quad (II.1)$$

$$k(X - X_B) = Zj\omega X_B = F_{floor} \quad (II.2)$$

마운트하단에서 바닥에 가하는 힘을 F_{floor}라고 하면 두 힘의 비는 다음과 같이 된다.

$$\frac{F_0}{F_{floor}} = 1 - \frac{\omega^2 M}{k}\left(1 + \frac{k}{Zj\omega}\right) \quad (II.3)$$

식 (II.3)에서 임피던스가 커질수록 강성이 큰 바닥을 의미한다. 스프링상수와 임피던스의 비가 식 (II.3)의 $q = |k/Zi\omega|$ 에 미치는 영향을 살펴보면 다음과 같다.

표 2. 임피던스와 마운트 스프링상수의 비가 가진력 비에 미치는 영향

주파수	$\|k/Z\|$	$q = \|k/Zi\omega\|$
31.5 Hz	1/5	0.00101
	1/10	0.00051
63 Hz	1/5	0.00051
	1/10	0.000255

바닥의 임피던스가 마운트 스프링상수의 5배만 되어도 오차는 31.5 Hz에서 0.1%에 불과하다. 따라서 마운트의 성능이 제대로 발휘되는 임피던스의 값은 다음 식과 같이 주파수에 반비례하며 -20log(f)의 기울기를 갖는다.

$$|Z| = C\frac{k}{2\pi f} \quad (II.4)$$

한편, 식 (II.1), (II.2)에서 바닥의 변위와 가진력은 다음 관계를 갖는다.

$$X_B = \frac{F}{-\omega^2 M + (Zj\omega/k)(k - \omega^2 M)} \approx \frac{k}{Zj\omega}\frac{F}{k - \omega^2 M} \quad (II.5)$$

식 (II.5)에서 임피던스가 클수록 마운트 하단의 진동크기(X_B)는 작아진다.

부록 Ⅲ. 기계실 기초바닥의 방진

1. 기계실 기초바닥의 방진

不평형력 및 충격력을 가지고 있는 각종 기계설비로부터 발생하는 진동은 기계 본체뿐만 아니라 기계를 지탱하는 기초바닥에 전달되어 진다. 이렇게 발생한 진동은 기초 밑에 있는 지반까지 전달되어지는 동시에 파동으로 변환되어 지반 중으로 전파, 확산함으로써 기계설비가 설치되어 있는 시설부근에 거주하는 주민에게 심리적으로 불쾌감을 주고 정밀기계에도 악영향을 미칠 수 있다.

한편, 발생하는 진동의 정도가 큰 경우에는 주변의 가옥과 사람에게 진동공해로서 문제를 일으키는 경우가 많은데, 기계-기초-지반으로 이루어진 진동전달계의 방진대책은 기계가 설치된 설비주변의 환경보전에 매우 중요하다. 또한 기계자체의 진동발생 상태를 감소시켜 기계의 기능을 충분히 유지함으로써 안정된 제품의 제조 공정을 보장할 필요가 있고 시설내에서 작업중인 사람들의 신체적, 생리적 장애 및 불쾌감을 방지하여 작업능률의 저하를 방지하는 목적도 달성할 수 있다. 이와 같은 기계진동의 설계조건은 정하중에 대해서 안정하고 동하중에 대해서도 안정해야 하므로, 기초자체의 진폭이 충분히 작아야 하며 동시에 기초의 침하가 일어나서는 안되는 구조이어야 한다.

2. 기계실 기초바닥의 방진방법

a. 기초바닥과 지반 또는 받침대 사이에 **방진고무(폴리우레탄, 고무)** 또는 금속 스프링, **폴리머 콘크리트** 등의 방진재를 넣어서 진동절연을 하는 **탄성지지 방법**이 있다.

b. 고정기초에 의한 **진동억제방법**이 있다.

1) 방진에 관한 기초 지식

일반적인 기초의 강제진동은 질량의 상부에 외력이 작용하는 경우, 지반에서의 진동이 기계기초에 전달되는 경우로 크게 구별할 수 있다. 기초가 지반에 고정된 경우도 질량의 상부에 외력이 작용하는 경우로 생각할 수 있는데, 기계 기초의 강제진동을 단순화하여 기초의 질량을 m, 지반의 탄성계수를 k, 감쇠계수를 c라 하면 1자유도계로 표시할 수 있으며 그림의 진동계로 나타낼 수 있다. 질량 m의 상부에 $F = F_0 \cos \omega t$의 진동외력이 작용하는 경우 이 계의 운동방정식은 다음과 같이 표시 된다.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_0 \cos \omega t$$

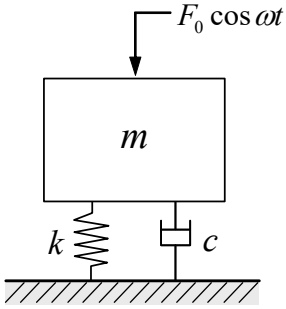


그림 31. 기계의 진동

감쇠에 의한 저항이 없고, 계의 관성력 $m\ddot{x}$와 탄성력 kx만 존재하는 경우 이 계의 고유진동수는 $\omega_n = \sqrt{k/m}$이며 감쇠가 있을 경우 감쇠고유진동수는 $\omega_d = \omega_n \sqrt{1-\zeta^2}$이다. 그리고 $c_c = 2\sqrt{mk}$로 임계감쇠상수라고 하고 $\zeta = c/c_c$를 감쇠비라 하여 무차원화된 감쇠량을 표시한다. 이 운동방정식의 일반해는 외력

이 작용하지 않을 때의 자유진동의 해와 외력에 의한 강제진동의 해의 합으로 나타난다. 자유진동은 시간이 경과함에 따라 소멸되며 이를 과도진동이라 하고 외부 가진력에 의한 진동만이 남아 정상상태의 운동을 나타낸다. 정상상태 운동은 가진력이 존재하는 한 계속된다. 정상상태에서의 운동에 대한 해를 $x = X\cos(\omega t - \phi)$라 가정하면 진동진폭과 위상각은

$$X = \frac{F_0/k}{\sqrt{(1-\eta^2)^2 - (2\zeta\eta)^2}}, \qquad \phi = \tan^{-1}\left(\frac{2\zeta\eta}{1-\eta^2}\right)$$

로 표시된다. 여기서 $\eta = \omega/\omega_n$로서 진동수 비를 나타내며 F_0/k는 일정한 힘 F_0에 의한 정적변위량 X_0이다. 운도의 동적 진폭의 정적 진폭에 대한 비 X/X_0를 확대계수(magnification factor), 증폭계수(amplification factor) 또는 진폭배율(amplitude magnification factor)이라고 하고 μ로 표시한다. ζ를 변수로 하여 진동수비에 대한 진폭배율을 표시하면, 그림 2와 같이 되고 다음과 같은 사실을 알 수 있다.

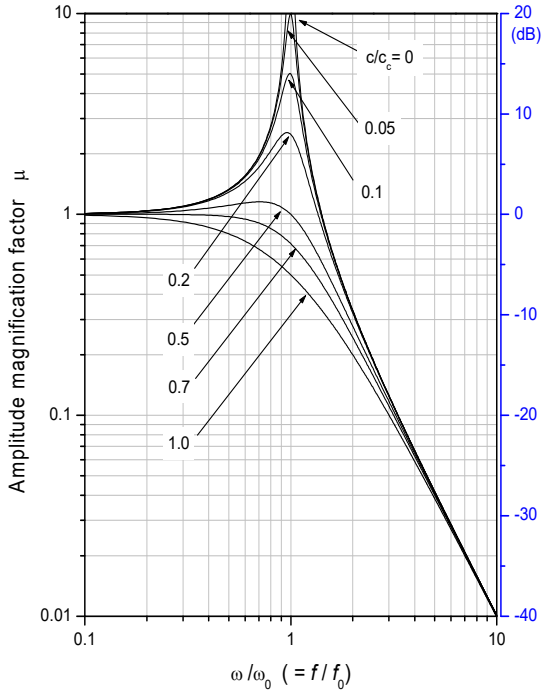


그림 32. 진폭 배율

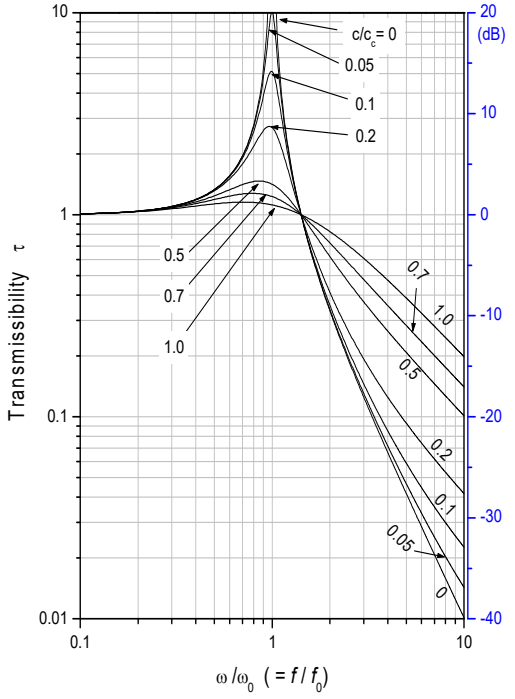


그림 33. 진동 전달률

- $\zeta = 0$인 비감쇠계의 경우 위상각 $\phi = 0$ 이다.
- 감쇠는 모든 가진 진동수에서 진폭비를 감소시킨다.
- 최대 진폭비는 $\eta = \sqrt{1-2\zeta^2}$에서 발생하고 그 값은 $(X/X_0)_{\max} = 1/2\zeta\sqrt{1-\zeta^2}$이다.
- $\zeta > 1/\sqrt{2}$ 일때 진폭비는 1보다 작다
- $\zeta \ll 1$ 이고 $\omega = \omega_n$ 일때 진폭비는 $1/2\zeta$ 로 되어 공진현상이 일어나며 응답은 감쇠에 따라 달라진다.
- $\omega/\omega_n \ll 1$ 에서 진폭비 $kX/F_o = 1$이 되어 스프링의 강성에 따라 지배되고 $(\omega/\omega_n) \gg 1$에서는 $kX/F_o = 1/(\omega/\omega_n)^2 = k/m\omega^2$이 되어 질량에 따라 변한다. 고정점에 전해지는 전달력 $F_t = c\dot{x} + kx$이므로 F_0와의 비의 절대치를 진동전달률(transmissibility)이라고 하여 다음 식을 표시한다.

$$\tau = \frac{F_t}{F_0} = \sqrt{\frac{1+(2\zeta\eta)^2}{(1-\eta^2)^2+(2\zeta\eta)^2}}$$

이 식은 그림 3과 같이 표시되며 다음과 같은 특징을 나타낸다.

- $\omega/\omega_n > \sqrt{2}$ 에서는 감쇠계수에 관계없이 전달률 $\tau < 1$ 이므로 방진효과가 있으나 감쇠량을 크게 하면 τ 가 증가하여 방진에 역효과를 유발하고, $\omega/\omega_n < \sqrt{2}$ 에서는 전달률 $\tau > 1$ 이므로 방진효과를 기대하기 어렵다.
- 진동수비 $\eta < 0.4$ 에서는 전달률이 1에 가깝지만, $\omega/\omega_n < \sqrt{2}$ 영역에서 기계의 기동 및 정지시 공진점을 통과하므로 진폭이 아주 커지지 않도록 해야하며 이를 위해서 적당한 감쇠량이 필수적이다.
- $\omega/\omega_n = 1$ 에서는 공진상태가 되며 특히 감쇠계수가 작은 경우 기초에 전달되는 힘은 매우 크게 된다.

그림 4와 같이 스프링과 감쇠저항의 밑쪽의 지지점에 $y = Y\cos\omega t$의 변위가진을 주었을 때의 질량 m의 변위 X와의 비는 힘의 전달률 τ에 대한 식과 같이 표현되며 주어진 변위의 진동전달률이라고 한다. 계측장비와 같이 외부 진동으로부터 보호해야 할 기계를 방진할 때는 이 원리에 따른다. 또한 질량 m과 지지점과의 상대변위 $X' = X - Y$와 지지점 Y의 비를 상대 변위 전달률이라하며, 다음식으로 표시된다.

$$\gamma = \frac{X'}{Y} = \frac{\eta^2}{\sqrt{(1-\eta^2)+(2\zeta\eta)^2}}$$

이 식에서는, 스프링이나 감쇠에 의한 저항이 아닌 자체질량 m에서 발생하는 힘, 예를 들면, 질량 불평형에 의한 힘 F_0로 인한 진폭 $A = F_0/m\omega^2$에 대한 진폭배율(자유진폭배율)이 γ와 같다는 것을 나타낸다. 이 관계를 도시하면 그림 5와 같이 된다. 이 그래프는 지진측정기의 원리의 설명이나 고정기초의 고유진동수의 설계 등에 사용된다.

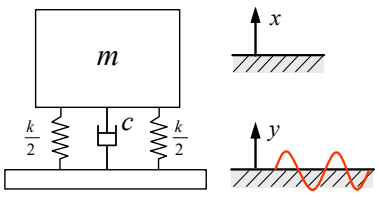


그림 34. 기초의 진동

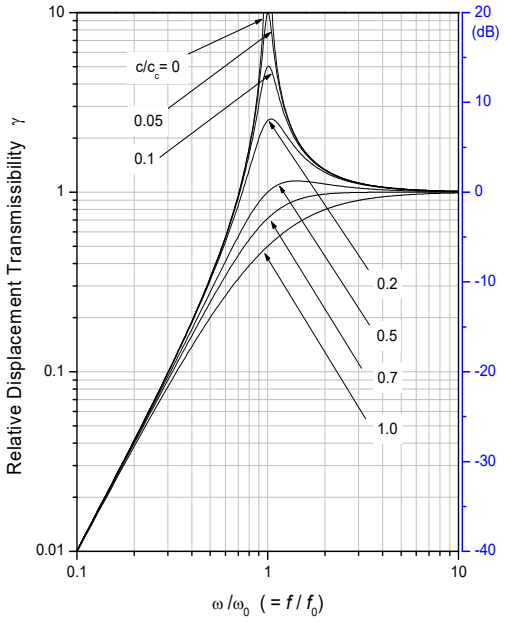
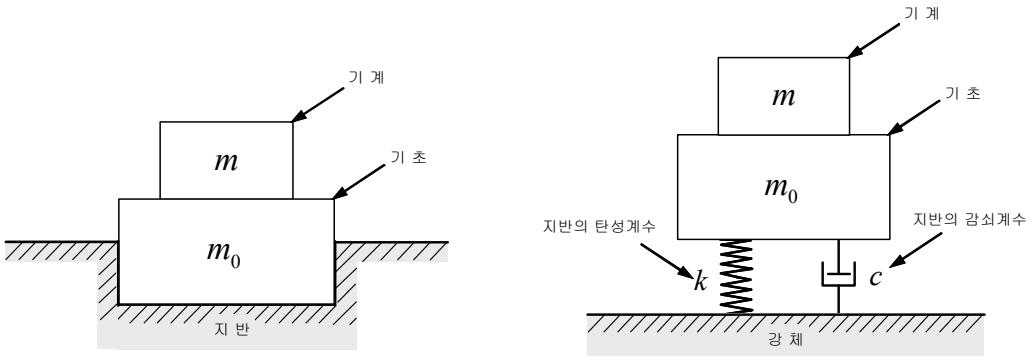


그림 35. 상대변위 전달률

2) 고정기초의 방진

여기서 언급하는 고정기초란 기계가 기초에 고정되어 있고 그 기초가 직접 지반 위에 설치 된 경우를 의미한다. 그림 6과 같이 기계와 기초가 같이 수직방향으로 진동하는 경우, 지반의 탄성계수를 k, 감쇠 계수를 c, 기계 및 기초의 질량을 각각 m, m_0 두 빌량의 합을 M_0라 하면 고유진동수는 다음과 같다.



(a) 지반에 설치한 기계 (b) 진동해석 모델

그림 36. 고정 기초

표 3. 지반의 특성

토양의 종류	k_0' (kg/cm²)	ζ	비 고
흙 표 면	3~5	0.06	k0'는 질량이 무거울수록 커지고 진폭이 클수록 작아진다.
롬	3~5	0.10	
모 래 층	8~10	0.15	
자 갈 층	11~13	0.20	

$$\omega_n = \sqrt{k/M_0} = \sqrt{k_o A/M_0} = \sqrt{k_0 Ag/W}$$

여기서 k_0는 지반계수 또는 단위면적당 탄성계수이며 A는 기초와 진반이 접촉하는 면적으로 $k=k_0A$의 관계가 있다. g는 중력가속도, W는 기초와 기계의 중량이다. k_0는 흙의 종류 및 기초바닥면적에 따라 달라지며 바닥면적이 클수록 작아진다. k_0는 다음과 같은 식으로도 표시되며 그 값은 표 1과 같다.

$$k_0 = k_0'(0.5/A)^{1/2-2/5}$$

질량 M_0에 $F = F_0\cos\omega t$가 가해졌을 때 진동가속도 실효값은 $a = \gamma F_0/\sqrt{2}M_0$이다. 윗 식의 양변을 상용대수로 취하고 20을 곱한 후 100을 더하면 진동가속도 레벨은

$$L_a = 20\log_{10}(F_0/M_0) + 97 + 20\log_{10}\gamma$$

이다.

기초의 진동 저감을 검토할 때 다음 값을 구하여야 한다.

- 기초에 쓰이는 흙의 종류와 바닥 면적으로부터 τ와 k_0를 구한다.
- 질량 M_0를 구하고 이를 이용하여 고유진동수 ω_n을 구한다.
- F_0와 ω 등을 이용하여 진동가속도레벨 L_a를 구한다. 진동가속도레벨이 진동규제 기준 값 보다 큰 경우

다음과 같이 저감대책을 수립하여야 한다.

- $\omega/\omega_n < 1$ 인 경우 ω_n을 크게 하기 위해서 기초 바닥면적 A를 증가시키거나 기초의 질량 m_0를 작게 한다.
- $\omega/\omega_n > 1$ 인 경우 ω_n을 작게 하기 위해서 기초 바닥면적 A를 감소시키거나 m_0를 크게 한다. 단 m_0를 크게 함으로써 지반침하가 일어나지 않도록 한다.
- $\omega/\omega_n > \sqrt{2}$ 인 경우 m_0를 크게 함으로써 불균형이 생길 우려가 있을 때 기계와 기초 사이에 탄성체를 넣고 진동절연을 한다. 만약에 질량 M_0를 n배로 하는 겨우 M_0는 nM_0가 되고 $\omega_n/\sqrt{n} = \sqrt{k/nM_0}$ 지반침하가 일어나지 않도록 한다.

따라서, 질량가속도레벨은

$$L_a' = 20\log_{10}(F_0/nM_0) + 97 + 20\log_{10}\gamma'$$

이고 γ'는 다음식으로 표시 된다.

$$\gamma' = \frac{n\eta^2}{\sqrt{(1-n\eta^2)+n(2\zeta\eta)^2}}$$

그러므로, M_0를 n배하면 기초의 진동가속도레벨의 저감량 ΔL_a는 다음과 같다.

$$\Delta L_a = L_a - L_a = 20\log_{10}\sqrt{\frac{(1-n\eta^2)^2+n(2\zeta\eta)^2}{(1-\eta^2)^2+(2\zeta\eta)^2}}$$

만약 감쇠가 없고 ω/ω_n=0.8, n=0.5 즉 M_0가 절반으로 감소하면

$$\Delta L_a = 20\log_{10}\frac{(1-n\eta^2)}{(1-\eta^2)} = 20\log_{10}\frac{1-(0.5)(0.8)^2)}{(1-(0.8)^2)} = 6[dB]$$

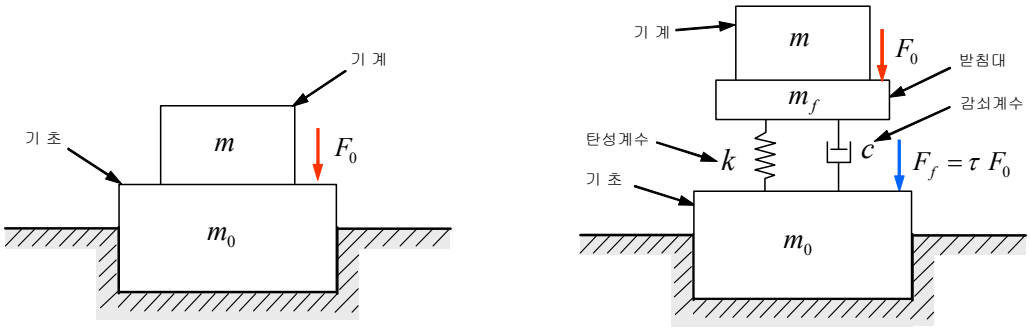
즉, 6 dB 감소한다. 반대로 n=0.2, 즉 질량 M_0가 2배가 되면

$$\Delta L_a = 20\log_{10}\frac{1-(2)(0.8)^2}{1-(0.8)^2} = -2[dB]$$

즉, 2dB 증가한다. 이와 같은 고정기초에서의 진동억제법은 기계의 진동이 6Hz 정도 이상 되면, 특히 매립지 및 지반이 연약한 지역에는 적용이 곤란하다. 실용적으로는 기초와 지반계의 고유진동수를 설정하기 위한 조건에 일단은 한계가 있고, 3~4Hz 정도의 비교적 진동수가 낮은 공기압축기 및 저속의 디젤기관 등에 유효한 방법이다.

3) 탄성지지를 이용한 방진

앞에서 설명한 바와 같이 $\omega/\omega_n > \sqrt{2}$인 경우 기초의 질량을 증가시켜 진동을 저감시킬 수 있지만, 지반이 연약하면 지반침하가 생기며 기초가 불안정하여 기초가 이동할 위험이 있다. 이때에는 기초의 질량을 증가시키는 대신 기초로 전달되는 가진력을 감소시키는 것이 좋다. 일반적으로 진동 발생원인 기계로부터 기초에 전달되는 진동을 작게하기 위해서는 진동을 발생시키는 기계와 기초사이 또는 기초와 지반과의 사이에 방진고무, 금속스프링, 또는 공기스프링과 같은 탄성지지물을 삽입하여 방진효과를 얻을 수 있다.



(a) 기계기초 (b) 진동해석 모델

그림 37. 탄성지지를 이용한 방진

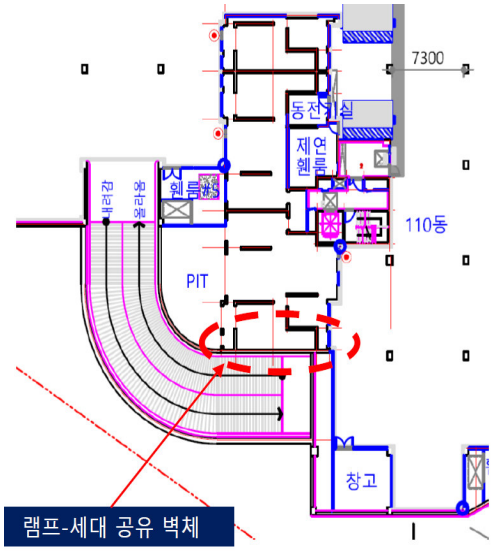
이 경우 진동계가 상하진동만 한다고 가정하면 기계-기초계와 기초-지반계의 2자유도계가 된다. 일반적으로 강체의 운동은 직교3축 방향의 각 좌표에 대한 병진운동과 회전운동이 수반되는 다자유도계가 되어 방향의 운동이 상호연성을 일으키는 경우가 많으며 이의 해석방법은 매우 복잡하다. 따라서 이와 같은 상태를 피하려면 처음부터 진동계가 비연성이 되도록 하는 것이 좋다. 그러나 실제의 탄성지지체의 탄성계수와 비교해서 지반의 탄성계수는 매우 크다고 생각할 수 있으므로 지반의 탄성계수를 무한대라 하면, 단순화시켜 해석하여도 결과에는 큰 영향이 없다. 즉 앞에 설명한 진동전달률에 대한 그림 3으로부터 $\omega/\omega_n < \sqrt{2}$에서는 전달률 τ가 1보다 크게 되고 $\omega/\omega_n > \sqrt{2}$ 경우에는 τ가 1보다 작게 되므로 전달률이 감소하여 방진효과가 있다. 더욱 방진효과를 높게 하기 위해 지지탄성 아주 작게 하여 ω_n을 감소시키는 것이 좋다. 그러나 탄성계수를 너무 작게 하면 기계 자체의 진동변위가 크게 되어 기계가 불안정한 상태가 되므로 주의가 필요하다. 이로부터 일반적인 방진설계에 관하여 $\omega/\omega_n > 3$으로 하면, $\tau < 0.1$ 정도 되어 합리적이라 할 수 있다.

9) 주차장 램프 바닥 해석모델 수립 및 해석 검토

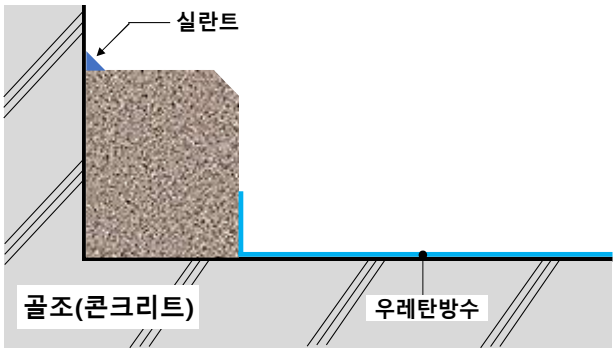
주차장 램프 바닥의 진동저감 성능에 대한 실 측정 검토 결과와 폴리머 콘크리트의 물리적 특성 측정결과를 적용하여, 지하주차장 램프 바닥 해석모델 수립하여 해석 검토를 수행하였다.

① 검토 조건

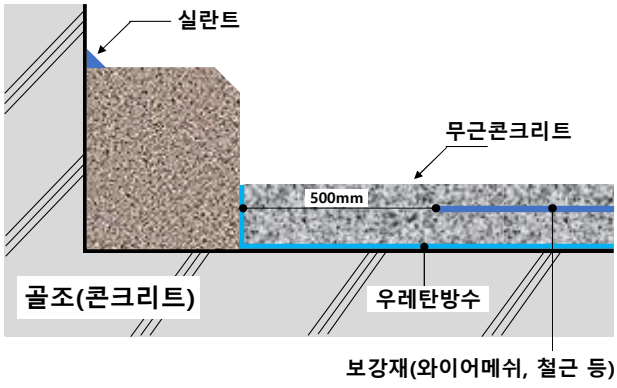
주차장 램프 바닥의 진동저감 성능에 대한 실 측정 검토 결과를 참고하여, 기계실 바닥 콘크리트의 해석모델 수립 및 해석 검토를 수행하였다.



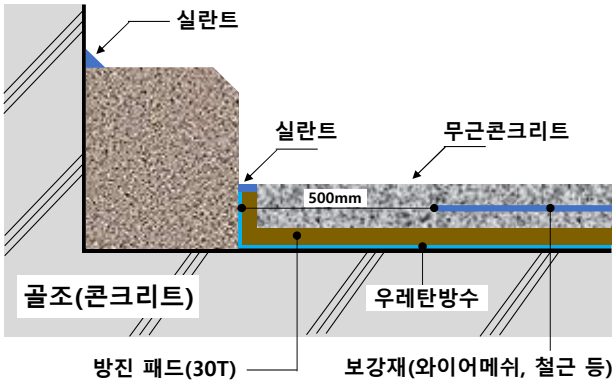
OO동 하부 주차장 램프 도면



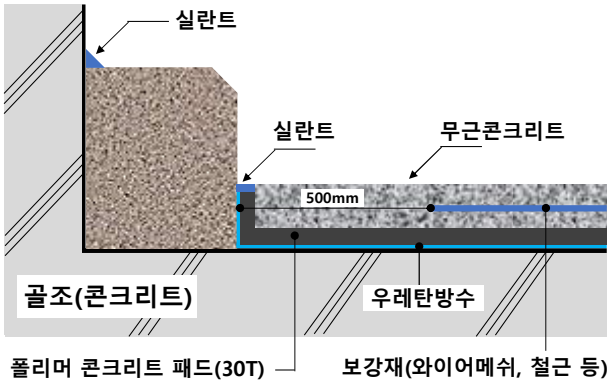
콘크리트 골조



골조 + 무근 콘크리트 100T



골조 +방진패드 30T + 무근콘크리트 70T



골조 + 폴리머 콘크리트 30T + 무근콘크리트 70T

그림 38. 주차장 램프구조 상세

② 검토 조건

- 재료의 물성조건

설계에 적용된 재료의 물성조건은 아래 표 4와 같다.

표 4. 재료의 물성조건

재료	밀도	탄성계수	프와송비
콘크리트(골조)	2,400kg/m^3	2.7e^{10} Pa	0.18
콘크리트(무근)	2,300kg/m^3	2.0e^{10} Pa	0.18
방진패드	101kg/m^3	5.0e^{6} Pa	0.42
폴리머 콘크리트 패드	2,000kg/m^3	3.5e^{10} Pa	0.18

③ 허용 기준(국제표준기구(ISO)의 바닥진동기준)

건물의 사용 용도에 따른 허용 기준은 그림 39와 같다. 지하주차장 램프구간은 “작업장” 으로 판단할 수 있으며, 허용 기준으로는 4.0 gal을 적용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 한편, 세대내에서의 진동 허용 기준은 주거기준 중 야간조건으로 0.7gal을 만족해야 할 것으로 판단된다.

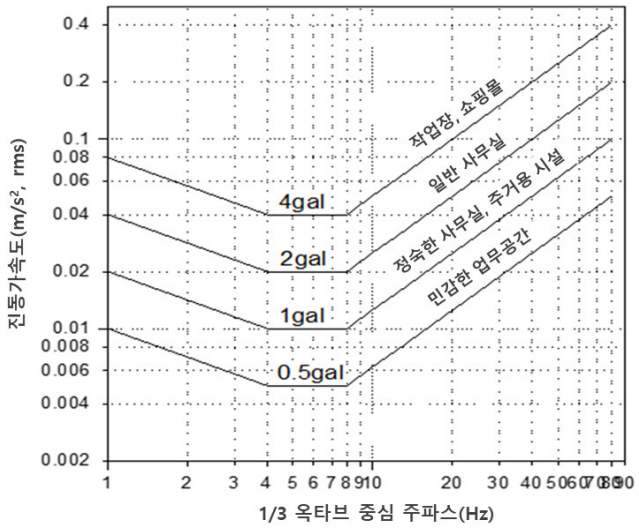
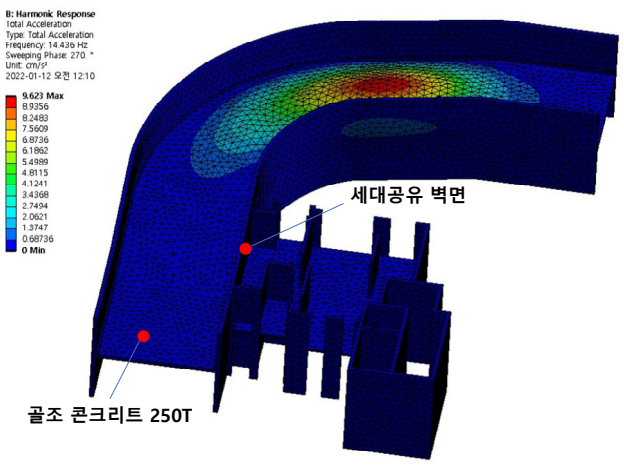
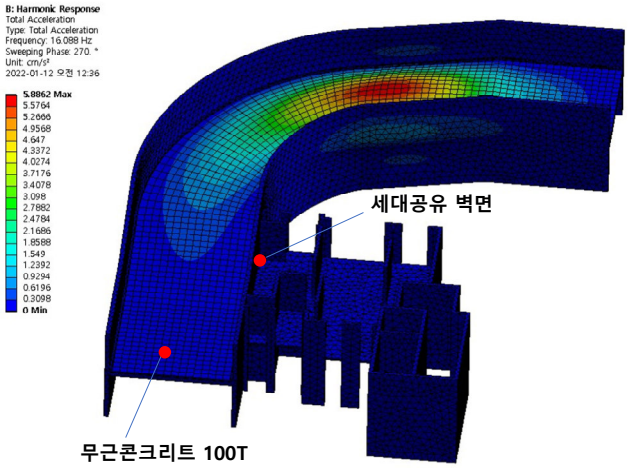


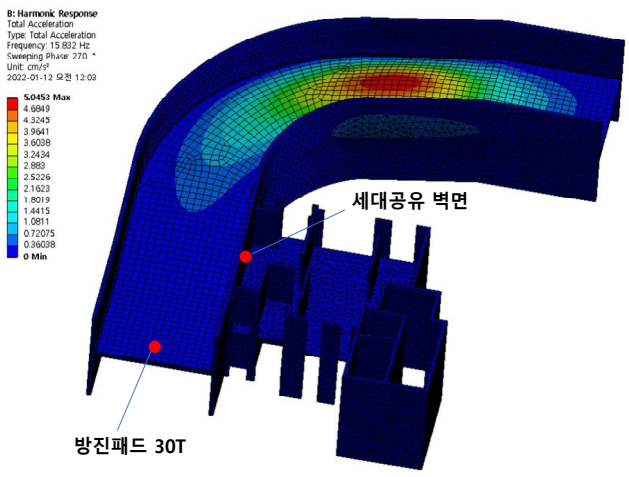
그림 39. ISO 10137 : 수직방향 진동(작업장 기준)

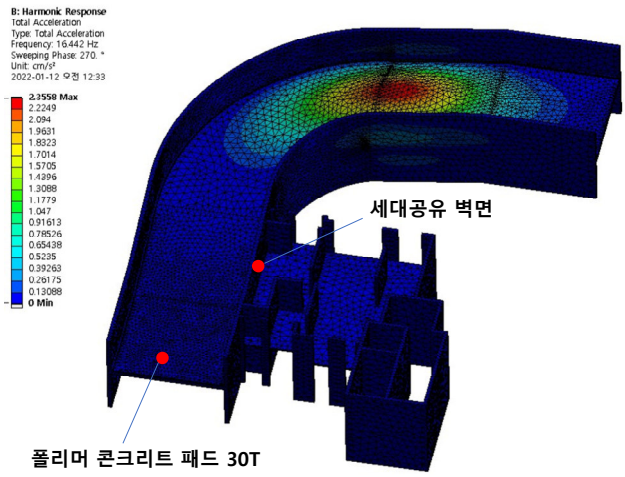


골조콘크리트 램프바닥 해석 모델



골조+무근콘크리트 100T 해석 모델





방진패드 물성적용 해석 모델　　폴리머 콘크리트 패드 물성적용 해석 모델

그림 40. 주차장 램프 바닥의 진동특성 해석모델 검토

표 5. 고유진동수 및 진동가속도, 진동가속도레벨 해석결과

구분	고유진동 주파수	진동 가속도	진동레벨 dB(V)	비고
골조	14.44Hz	9.86gal	79.9dB(V)	해석 결과값이므로, 실측정을 통한 추가적인 검토 및 관리가 필요함.
골조 + 무근 100T	16.08Hz	6.13gal	75.7dB(V)	
골조 + 무근 100T (폴리우레탄 패드 30T)	15.83Hz	4.68gal	73.4dB(V)	
골조 + 무근 100T (폴리머콘크리트 패드 30T)	16.44Hz	2.38gal	67.5dB(V)	

④ 결론

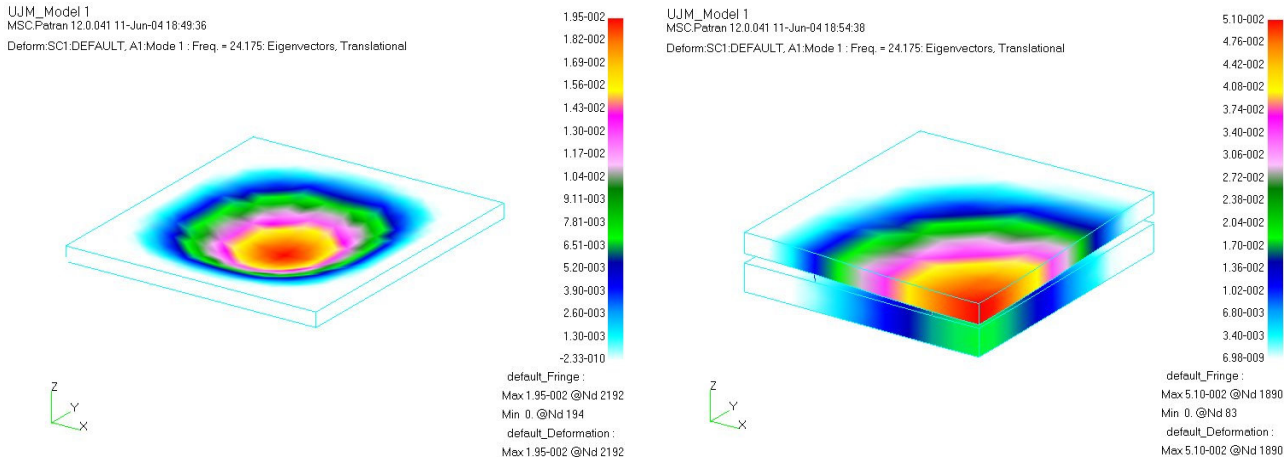
① 고유진동주파수는 골조의 경우 14.44Hz로 가장 작아서 강성이 작은 것으로 판단되며, 무근콘크리트 추가한 경우는 16.08Hz, 방진패드 30T 추가한 경우는 15.83Hz, 폴리머 콘크리트 패드 30T 추가한 경우는 16.44Hz로 고유주파수가 가장 큰 것으로 확인되어, 강성이 가장 큰 것으로 판단된다.

② 진동가속도레벨(Vibration level, VL)은 골조의 경우 79.9dB(V)로 무근콘크리트가 설치 전인 공사중에는 진동이 크게 발생할 것으로 판단된다. 무근콘크리트 100T가 추가된 경우는 75.7dB(V)로 골조보다는 진동가속도레벨이 38% 정도 감소하지만, 차량통행 하중에 대해서 허용기준(작업장기준, 4.0gal line)을 다소 만족하지 못하는 것으로 평가되었다. 방진패드로 폴리우레탄 패드 30T를 추가한 경우는 73.4dB(V)로 무근콘크리트보다 20% 정도 진동가속도레벨이 개선되어, 허용기준을 만족하지만, 차량통행 하중이 증가할 경우는 진동이 발생하여, 세대내 공유벽체에서의 진동영향이 있을 것으로 판단된다.

폴리머 콘크리트 패드 30T를 추가한 경우는 진동가속도레벨이 67.5dB(V)로 무근콘크리트 대비 61%, 방진패드 대비 49% 정도 개선되는 것으로 평가되어, 허용기준을 만족함과 동시에 세대내 공유벽체에서도 허용기준(주거 기준 야간, 0.7gal line)을 만족하는 것으로 확인되었다. 다만, 미끄럼방지용 요철에 의한 이상진동이 발생할 경우, 세대내에서의 진동 및 구조소음 증가의 원인이 될 수 있으므로 실측정을 통한 지속적인 검토관리가 필요할 것으로 판단된다.

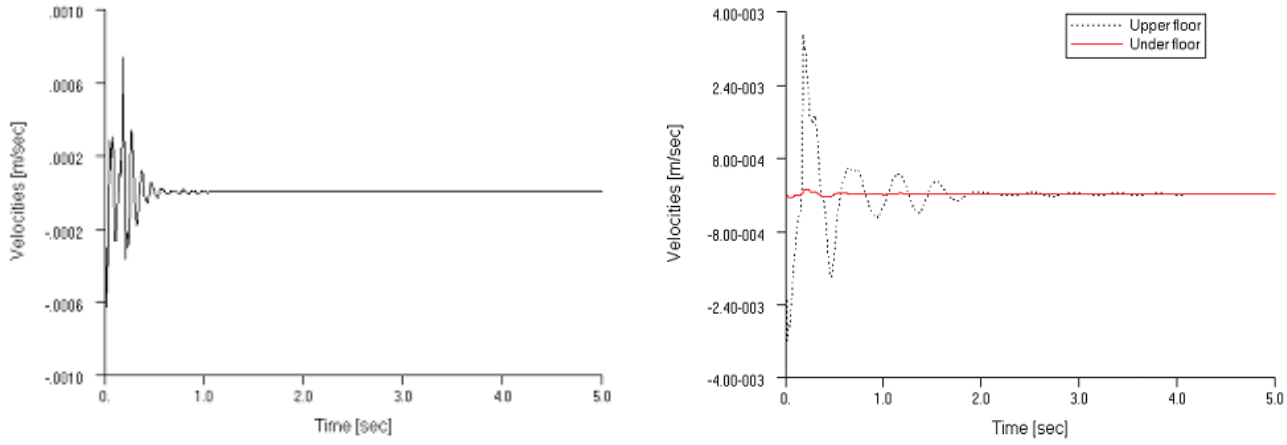
5. 이중바닥구조를 이용한 대책

이중바닥구조대책은 충격을 줄이기 위한 방진대책 중 가장 효과가 뛰어난 방법이다. 일반적으로 이중바닥구조를 사용하면 단일바닥구조에서의 진동을 약 85%에서 90%까지 줄일 수 있는 것으로 알려져 있으며, 이를 본 현장에 적용하면 87.60dB(V)에서 53.97dB(V)까지 진동을 줄일 수 있을 것으로 판단된다. 이러한 이중바닥구조대책은 건물 신축 시에는 효과적으로 적용할 수 있으나, 사후 대책으로 이용하기에는 시공이 까다롭고 일정기간 동안 장비 가동을 중단해야 하는 단점이 있다. 그림 41에는 단일 바닥구조와 이중바닥구조의 응답스펙트럼을 나타내었고, 그림 42에는 바닥에 가해진 충격력과 이 충격력에 대한 상/하부 바닥의 진동응답을 나타내었다.



(a) 단일 바닥구조 (b) 이중바닥구조

그림 41. 단일바닥과 이중바닥구조의 진동응답 스펙트럼



(a) 바닥에 가해진 충격력 (b) 상부바닥과 하부바닥의 진동응답레벨

그림 42. 바닥에 가해진 충격력과 이 충격력에 대한 상/하부 바닥의 진동응답

■ **마운트의 동특성 도출을 위한 프로그램 개발**

- 정강성 도출
- 마운트 공기층 모델링
- 감쇠비 도출
- 전달함수법을 이용한 시편의 동적 강성 도출

■ **스펙트럼 요소법을 활용하여 체결부의 진동 전달 특성 분석**

- 건축물, 자동차 등 Panel housing 구조가 적용된 기계시스템의 구동 중 체결부의 Rattle소음 고려
- 빔 구조의 간이 실험을 통해 진동 전달 경향 파악
- 체결 구조의 유효 인자 및 경향성 도출

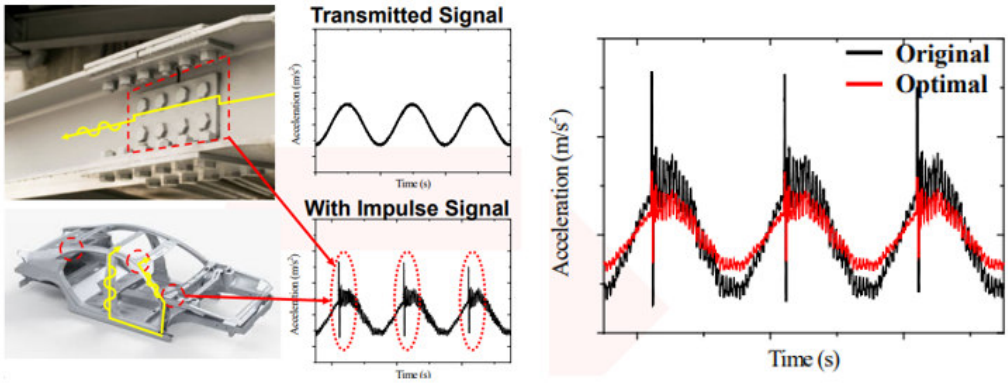


그림 43. 구조소음 및 체결부의 소음 발생 구조 및 유효인자 도출

■ **기계시스템의 볼트부 축력을 구조파를 이용하여 비파괴적 측정방법 제시**

- 체결부의 구조파 가진을 통해 신호를 측정하여 축력별 차이 검토
- 딥러닝 알고리즘(LSTM)을 이용하여 축력별 차이를 판별하는 프로세스 개발

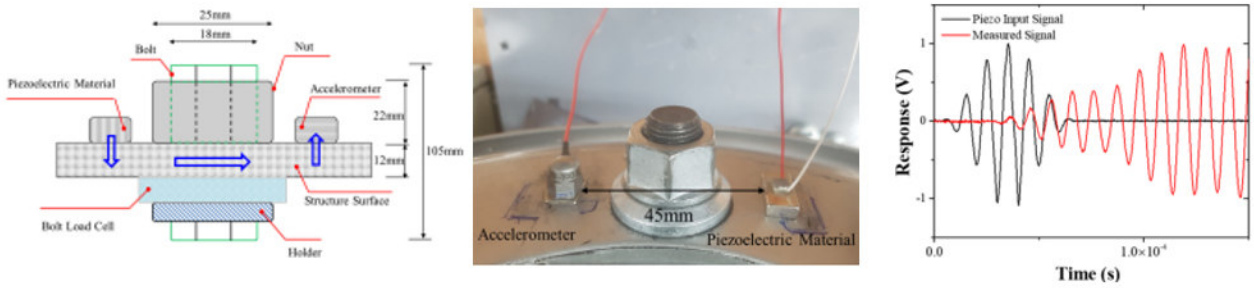


그림 44. 볼트와 너트 주변 표면을 통해 신호 측정

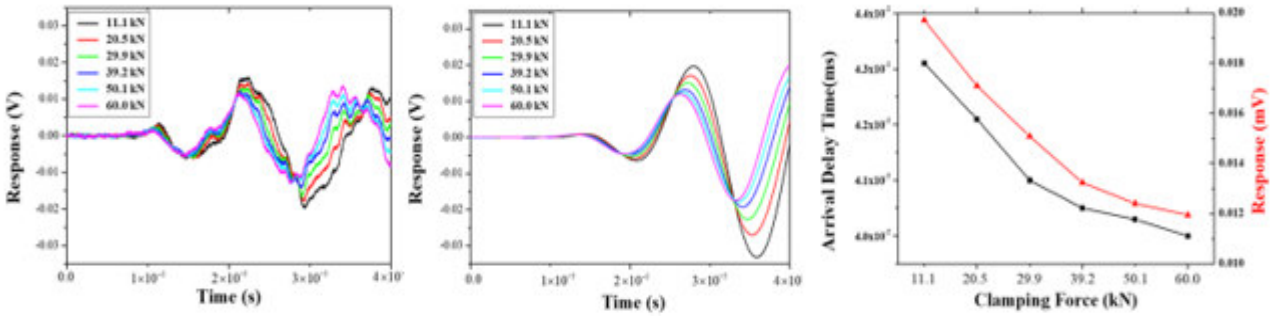


그림 45. 딥러닝 프로세스에 적용할 모델 생성을 위한 신호처리 수행

○ 3차년도

1. 실제 바닥 구조체 적용을 위한 현장 시공 기술 개발 및 성능 검증

1.1 테스트베드를 통한 현장적용 타당성 검토

- 연구결과 적립된 친환경 댐핑 바닥 구조체의 시공 방법을 규격에 맞게 정리한 시방서 제작
- 개발된 댐퍼장치의 테스트베드를 통한 현장적용 타당성 검토

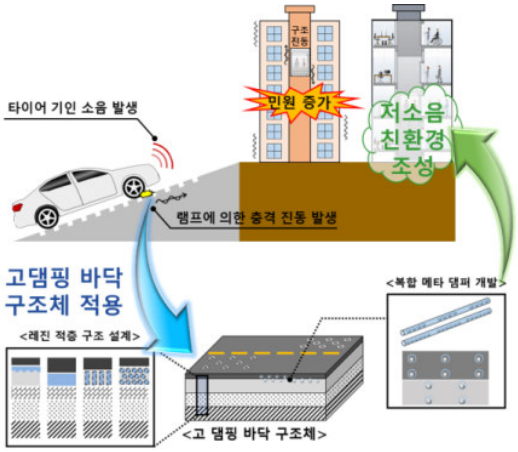
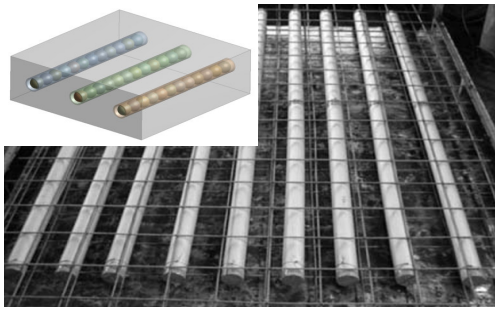
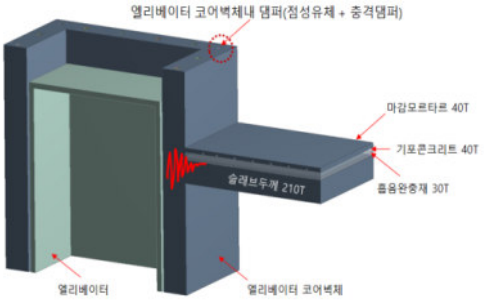


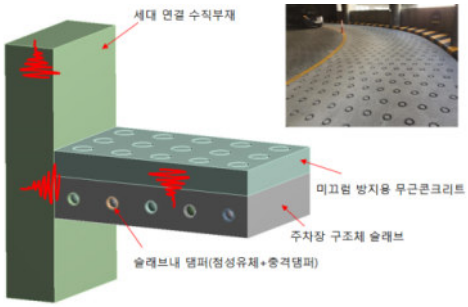
그림 1. 복합구조 댐퍼 현장 적용 및 성능 검증 개념



[복합구조 댐퍼 적용 슬래브]



[엘리베이터 소음/진동 저감용 댐퍼]



[주차장 램프 소음/진동 저감용 댐퍼]



[기계실/공조실 소음/진동 저감용 댐퍼]

그림 2. 개발된 친환경 댐퍼장치의 현장적용 및 테스트베드

1.2 바닥 구조체의 구조적 안전성 및 타 공정과의 상관관계 검증

- 구조적 안전성은 기존 구조체와 개발된 구조체에 대한 강도시험을 실시(시편)함으로써 슬래브의 구조적 안전성 검증 및 확보.
- 각종 시공환경 조건을 고려하여, 전기공사 등 후속공사와의 상관관계에 대한 안전성 검증

1.3 폴리머 콘크리트를 활용한 지반진동 현장적용 실험

① 지면의 진동

지표면을 전파하는 주된 진동파는 종파와 횡파 및 레일리파가 있는데, 이는 매질 입자의 진동 방향과 진행 방향이 일치하는 종파(P파, Primary wave)와 매질의 진동 방향과 파의 진행 방향이 직각을 이루는 횡파(S파, Secondary wave), 진동파의 진폭이 지표면에서의 깊이가 깊어짐에 따라 급격히 작아지는 레일리파(R파, Rayleigh wave)로 구분할 수 있다. 한편, 지표면에서 발파 작업 시, 발생하는 탄성파 에너지는 R파가 전체 에너지의 67%를 차지하지만, 횡파와 종파는 각각 26%, 7%로 탄성파 에너지가 작다. 따라서, Table 1과 같이 진동공해의 문제에 있어서는 R파가 가장 중요한 의미를 가지므로 R파를 감소시키는 것이 진동저감의 핵심이라 할 수 있다.

표 1. Types and characteristics of vibration waves

Classification	Vibration Energy	Damping	Velocity
P-wave	7%	$\frac{1}{r^2}$(Surface) $\frac{1}{r}$(Underground)	C_p>2.5C_s
S-wave	26%	$\frac{1}{r^2}$(Surface) $\frac{1}{r}$(Underground)	C_s
R-wave	67%	$\frac{1}{\sqrt{r}}$	C_R=0.92 ~0.97C_s

C_p : Velocity of P-wave, C_s: Velocity of S-wave, C_R: Velocity of R-wave

P파, S파, R파의 속도 관계는 포아송비(ν)에 따라 변화하는데, Fig 1은 ν=0.25의 경우에 대하여, 지상에서 원형의 충격을 가했을 때, 파의 전파 상황을 나타낸 것이다.

먼저, P파가 구면상으로 빠르게 전파되고, 뒤를 따라 S파가 P파와 동일한 구면파로서 전달되며, R파는 가장 늦게 원통파 형태로서 전달된다. P파는 매질의 체적변화에 대한 저항이 원인이 되어 생기는 파로서, 기체 중의 음파에 해당하는 압축파, 소밀파로도 불리며, 전파속도가 가장 빠른 특징이 있다. 또한, 파의 진폭은 지중에서는 거리 r에 반비례하여 감쇠하고, 지표면에서는 거리의 제곱 r^2에 반비례하여 작아진다.

한편, S파는 P파와 유사한 특징을 보이는데, 지표면에 연하여 S파가 전달될 때, 매질이 연직 방향으로 진동하게 되면서 발생하는 파를 SV파, 수평방향으로 진동하면서 발생하는 파를 SH파로 구별하기도 하며, 이러한 P파와 S파를 총칭하여 실체파라고 부른다.

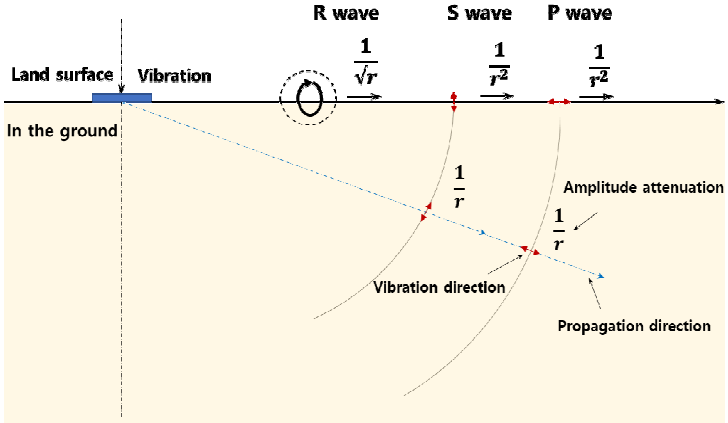


그림 3. Wave propagation condition in case of impact on ground

지표면은 일반적으로 암석 및 토양의 종류에 따라 균일하지 않기 때문에 지면을 균일한 진동 전파매질로 생각할 수 없는 경우가 많다. 따라서, P파, S파, R파는 진동전파매질의 최대 입자속도의 감쇠 영향을 받아서 파의 속도가 달라진다. 또한, 표면파인 R파는 표면을 따라 전파하는데, 1~2파장 정도만 겨우 땅속으로 침투되므로, 지표면에서의 깊이가 깊어짐에 따라 진폭이 급격히 감소하는 특징을 보인다.

표 2. Vibration velocity in the ground

Division	Type of medium		P wave speed	S wave speed	poission ratio	Density (kg/m³)
layered	clay soil sandy soil gravel		250~700	80~160 60~200 250~350	0.35~0.50	1,200~1,600 1,600~1,800 1,800~2,000
diluvium	loam		1,000~2,000	140~200		1,400~1,600
	clay soil sandy soil gravel			160~250 200~350 300~600		1,400~1,600 1,700~1,900 1,800~2,000
rock	soft rock	mudstone sandstone	2,000~3,000 2,000~3,500	600~1,000 700~2,000	0.30~0.40	2,200~2,600 2,500~2,700
	hard rock	granite basalt	4,000~5,700 4,400~6,700	2,100~3,300 2,500~3,800	0.25~0.35	2,600~2,800 2,800~3,000

② 진동파의 거리감쇠

진동원으로부터의 거리 감쇠는 진동파의 종류나 지반의 상태 등에 따라 달라질 수 있는데, 일정한 지반에 대해서 진동파의 전달에 따른 에너지의 분산과 지반매질의 마찰에 따른 감쇠를 고려하여 식 (1)에 대입하여 계산할 수 있다.

$$L_r = L_0 - 8.7\lambda(r - r_0) - 20\log_{10}(\frac{r}{r_0})^n \quad (1)$$

여기서, L_r은 거리 r만큼 떨어진 점의 진폭, L_0는 거리 r_0만큼 떨어진 점의 진폭, λ는 지반의 감쇠정수, n은 표면파(1/2)이다.

③ 시험체 제작 및 실험 방법

일반 콘크리트를 이용하여, Photo 1의 a)와 같이 가로 2.4m, 세로 2.0m, 높이 2.5m, 내부 벽체 두께 0.2m의 구조시험체를 제작하였다. 시험체 종류로 폴리머 콘크리트는 PC(Polymer Concrete), 폴리우레탄 패드는 PU_M(Polyurethane Mat), 고무 패드는 RU_M(Rubber Mat), CN(Plain)로 표기하였다.
폴리머 콘크리트는 형틀을 이용하여 b)와 같이 0.5x1.0m 크기로 제작하여, c)와 같이 구조시험체의 외부 벽면에 설치하였으며, PU_M, RU_M도 d)와 같이 부착하여 제작하였다.


a) 시험체 전경


b) 폴리머콘크리트 패드 제작


c)폴리머콘크리트 패드 설치


d) 방진패드 설치

그림 4. 지반진동 동특성 시험체 제작

한편, Photo 2 a), b)는 제작된 시험체를 설치하기 위한 지반 조성작업과 시험체 이동과정을 나타내며, 제작된 시험체는 c)와 같이 지반 내부에 안착시킨 후, d)와 같이 시험체 주변에 흙을 매립하여 시험체 주변에 지반을 형성하였다. e)는 PC, PU_M, RU_M이 부착된 시험체 및 CN을 포함한 시험체의 설치 현황을 나타내며, f)는 지반가진에 의한 진동측정용 센서 부착과정을 나타낸다. g)는 100kg의 하중추를 낙하시켜 가진하는 과정을 나타내며, h)는 본 시험에 사용된 지반가진기(APS 400 with APS 0412)로 각 위치에서 가진하는 과정을 나타낸다.



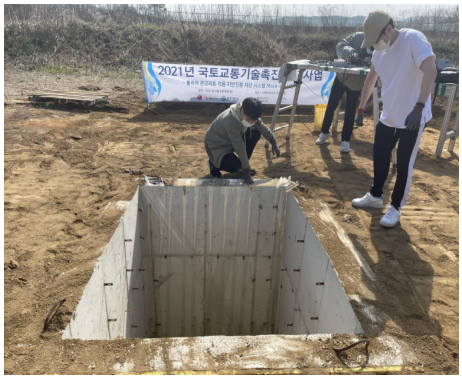
a) Preparing to install specimen



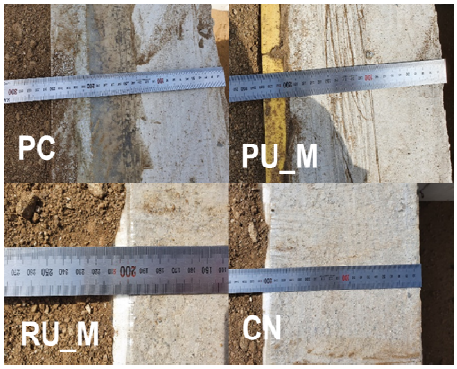
b) Movement to install specimen



c) Specimen installation



d) Complete burying of specimen



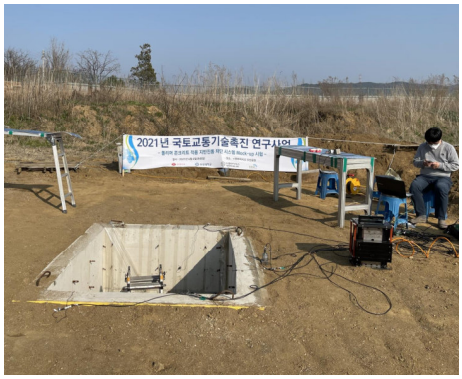
e) Inspection of specimen



f) Check sensor installation



g) Applying an impact load



h) Applying an vibration exciter

그림 5. Experiment method

Photo 3 a)는 본 실험에서 충격가진을 위해 100kg 무게로 300x300x600 크기이며, 일반적인 강철 재료를 이용하여, 제작하였다. b)는 본 실험에서 실제 지반진동을 모사하기 위해 도입한 가진장치(APS 400 with APS 0412)로 상세 사양은 Table 9와 같다.

표 3. Specifications of ground vibration device

Division	Force (N)	Velocity (mm/s)	Stroke (mm)	F.Q (Hz)	Weight (kg)	Dimension (LxWxH)
Shaker	445	1,000	158	200	73	526x314x178
load cell	-	-	-	-	100	300x300x600

무게추와 가진장치는 Photo 4와 같이 각 시험체로부터 2.0m 떨어진 위치에서 가진하며, 각 시험체의 진동가속도 및 주파수를 측정하기 위해, 가진 위치로부터 1.0, 2.0m 위치에 Sensor 1, 2를 설치하였다. 각각의 방진시스템이 부착된 콘크리트면 내측에 센서를 Photo 4와 같이 설치하였으며, 무게추에 의한 가진 시험의 경우는 도르레와 밧줄을 이용하여, 높이 1.5m까지 들어올린 후에, 목재 하중판(300×500×150mm)에 자유낙하시키는 방식으로 지반에 충격을 가하도록 하였다.

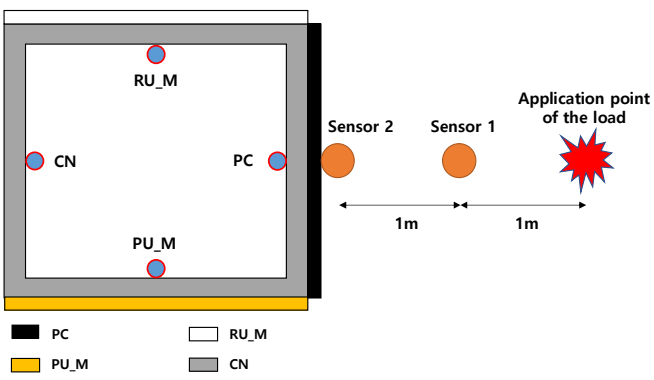


a) Impact load device



b) Ground vibration exciter

그림 6. Excitation device for ground vibration measurement



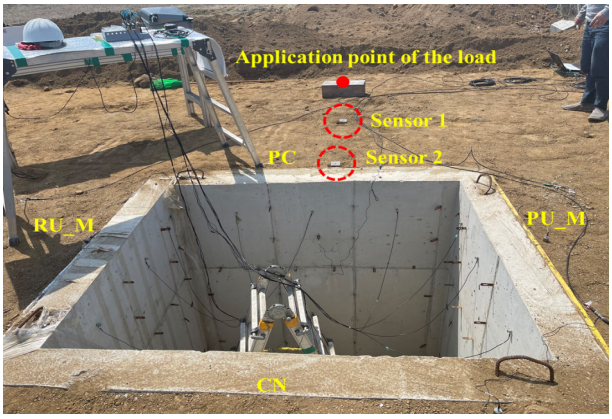


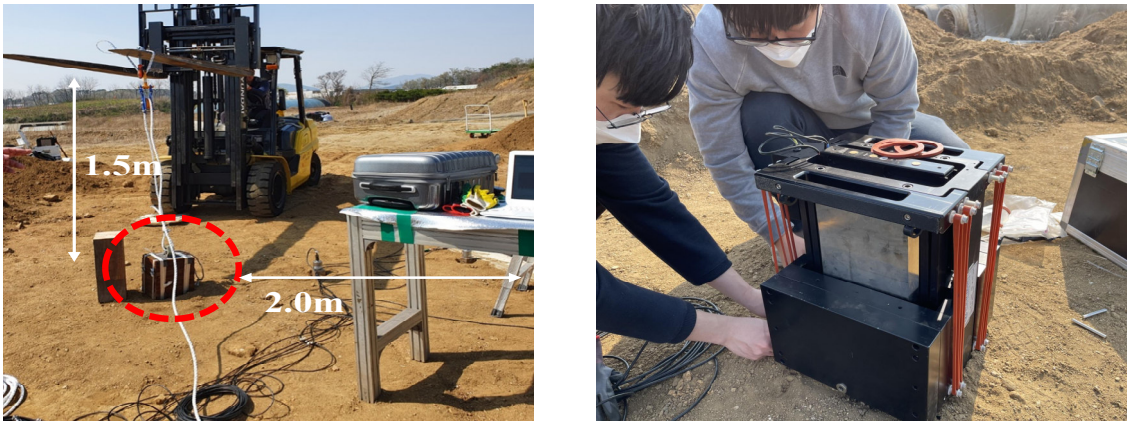
그림 7. Sensor installation to measure ground vibration

④ 충격가진 방식에 따른 지반진동 특성

Photo 5의 a)는 지반에 매립된 시험체로부터 수평으로 2.0m 및 높이 1.5m 위치에서 100kg의 추를 자유낙하시켜, 지반을 진동 가진하는 방식을 나타낸다.

Fig. 2는 충격가진에 의한 시험체 종류별 진동가속도를 나타낸 것으로, 시편의 감쇠능력을 시간응답으로 구하는 방법 중에는 Peak에서 다음 Peak로 넘어갈때 그 진폭의 크기를 통해 직관적으로 알아보는 방법이 가장 적합하다. 측정결과, PC는 진동레벨이 54.65dB(V)로 에너지 흡수능력이 가장 컸으며, RU_M, PU_M, CN 순으로 작아지는 것으로 나타났다. CN의 경우 77.03dB(V)로 PC에 비해 진동레벨이 23dB(V) 이상 크게 나타나 진동저감 성능이 제일 작은 것으로 나타났다.

Fig. 3은 Fig. 2에 나타난 응답을 FFT(Fast Fourier Transform) 하여 주파수별 크기에 따라 나타낸 그래프로, 각각의 시험체에 대해 3회에 걸쳐 동일한 측정을 진행하였다. 측정결과, PC, PU_M, RU_M, 그리고 CN의 30~200Hz 범위에 대한 각 실험차수의 dB Sum 평균은 26.6, 33.4, 35.1, 46.1dB로 나타났다. PC의 경우, CN에 비해 20dB정도 줄어들었으며 다른 시편에 비해서도 7~9dB 더 우수한 진동저감 성능을 보였다. 이로써 패드재료에 형성된 기공의 감쇠성능보다 폴리머와 규사의 결합에 의한 성능이 더 우수한 것임을 확인할 수 있다.



a) Applying an impact load　　b) Applying an vibration exciter

그림 8. Ground vibration measurement by impact load

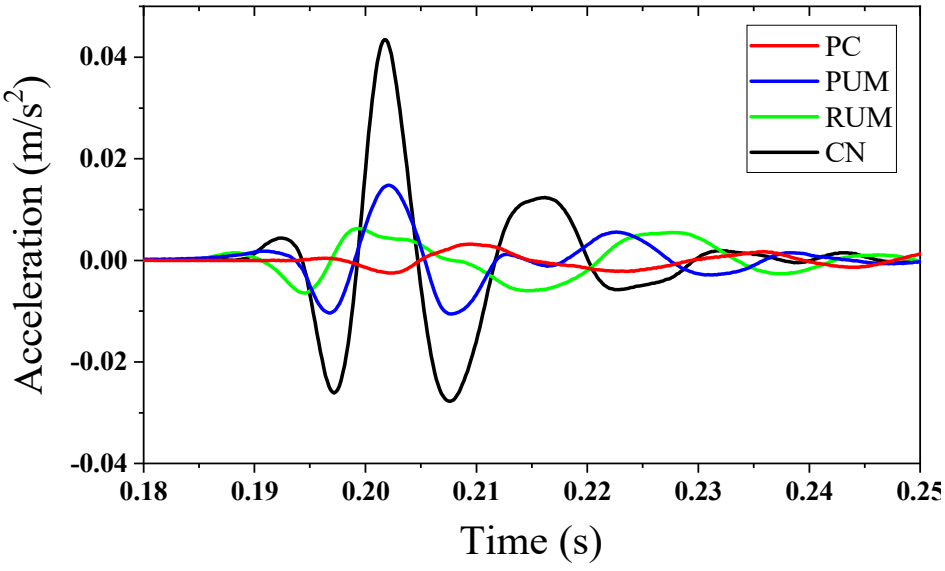


그림 9. Vibration acceleration change by specimen type

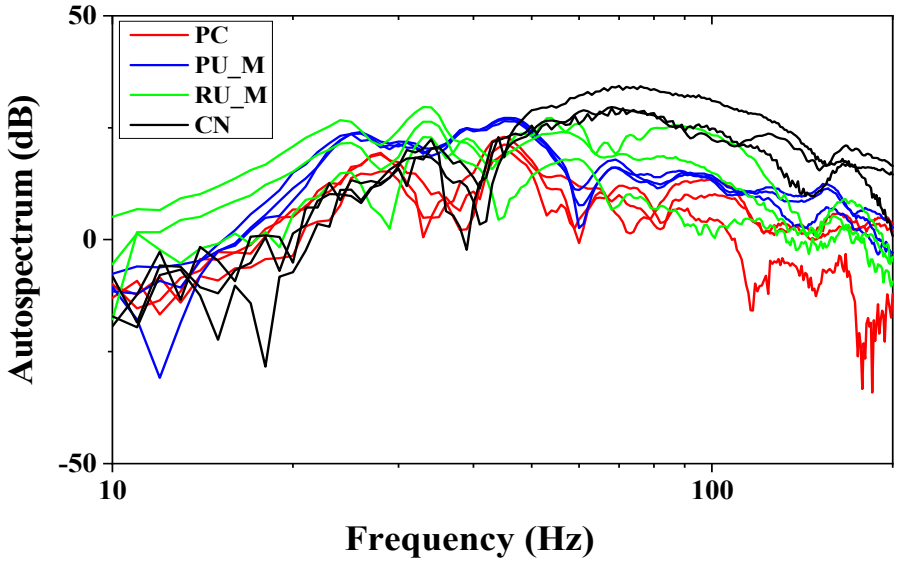


그림 10. Autospectrum magnitude change by specimen type

⑤ 동적가진 방식에 따른 지반진동 특성

Photo 4의 b)는 CN을 포함한 PC, PU_M, RU_M 각각의 방진시험체가 부착된 시험체를 지반에 매립한 후, 시험체로부터 2.0m 떨어진 위치에서, 지반가진기(APS 400 with APS 0412)로 지반을 진동가진하는 방식을 나타낸다.

Fig. 4는 지반가진기에 의한 시험체 종류별 진동가속도를 구조전달음 관점 평가 방법 중 바닥충격음 평가 방법 KS F 2863과 비교 검토를 하기 위해 1/1 옥타브로 변환하여 나타내었다.

검토 결과 PC의 경우가 시공 벽체의 진동 수준이 가장 낮은 것으로 확인되었으며, 콘크리트 벽체인 CN과 비교할 경우, 63~125Hz 보다는 250~500Hz 대역에서 진동저감 성능이 더 큰 것으로 나타났다. 한편, 방진패드 중 RU_M은 250~500Hz 대역에서는 CN보다 더 높은 진동수준이 확인되어 적용 시 추가적인 검토가 필요할 것으로 판단된다.

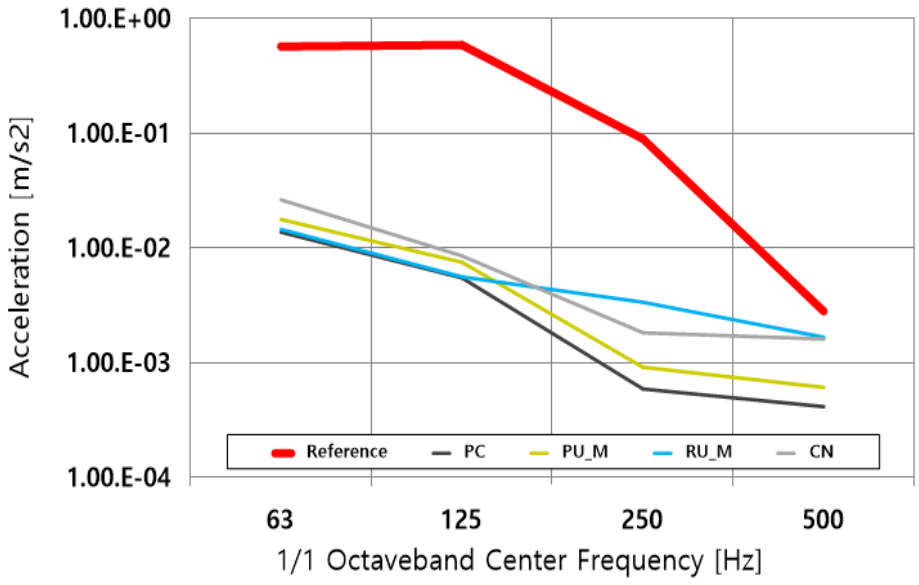


그림 11. Vibration acceleration by specimen type

Fig. 5는 지반가진기에 의한 시험체 진동가속도를 주파수별로 구분하여 나타낸 것으로, PC의 경우는 63~500Hz 전대역에서 진동레벨(Vibration level, VL)이 32.0~62.9dB(V)로 가장 낮은 것으로 나타나, 진동저감 성능이 가장 우수한 것으로 확인되었다. PU_M의 경우는 63~125Hz 대역에서는 58.1~65.1dB(V)로 진동레벨이 다소 높은 경향을 보였으나, 250~500 Hz 대역에서는 PC와 유사한 경향을 보였다.

한편, RU_M은 PU_M과는 반대로 63~125Hz 대역에서는 진동레벨이 PC와 거의 유사한 성능을 보였으나, 250~500 Hz 대역에서 진동레벨이 44.6~50.6dB(V)로 CN보다도 큰 값을 보였다. CN의 경우는 진동레벨이 전 주파수대역에서 44.1~68.3dB(V)로 대체적으로 높게 나타나, 진동저감 성능은 가장 낮은 것으로 확인 되었다. 따라서, 지반으로부터 전달되는 진동을 차단하기 위해서는 일반적인 콘크리트 구조체만으로는 원하는 성능을 얻기 어려우므로, 토압 등을 받는 상황에서의 지반진동 저감을 위해서는 폴리머 콘크리트와 같은 추가적인 방진시스템이 필요할 것으로 사료된다.

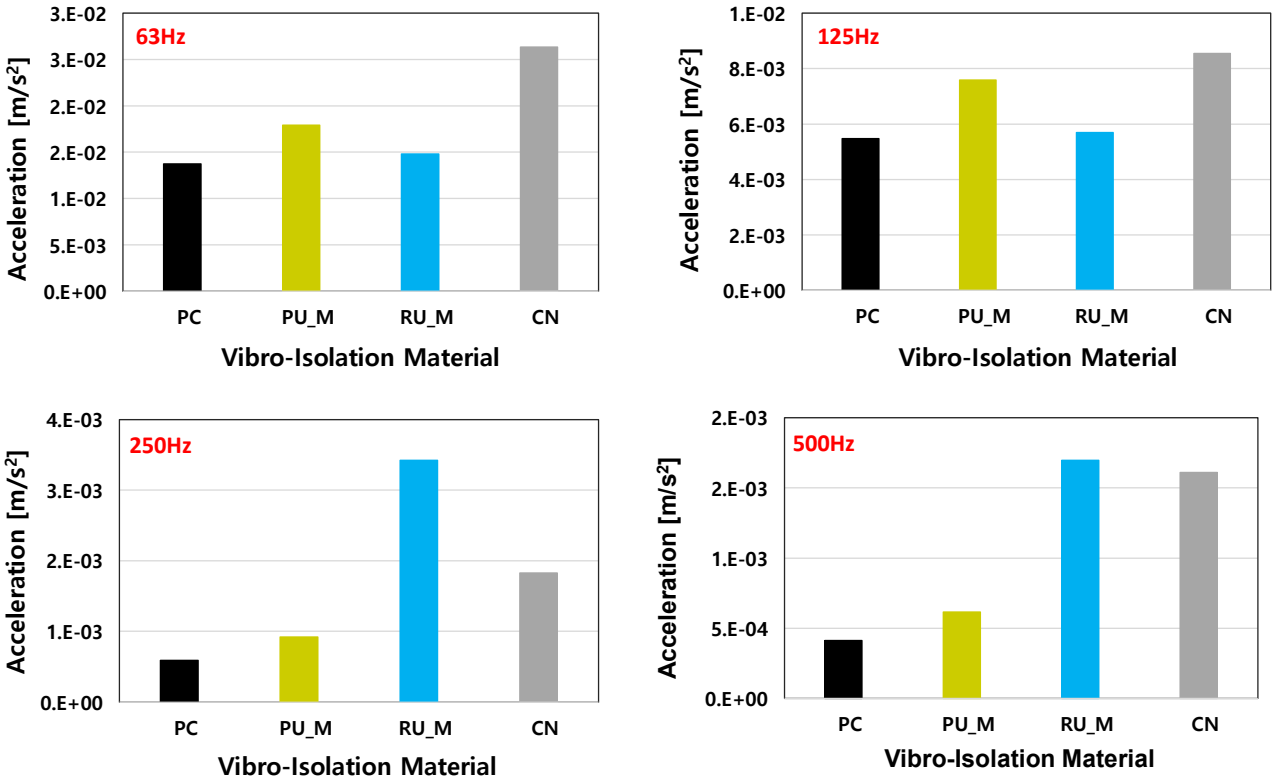


그림 12. Vibration acceleration by frequency

1.4 폴리머 콘크리트를 활용한 엘리베이터 구조 현장적용 실험

① 엘리베이터 구조시험체 제작

엘리베이터 구조물은 시멘트와 폴리머 콘크리트를 이용하여 200 cm x 200 cm x 200 cm 크기로 Fig. 3(a)와 같이 제작하였다. 엘리베이터의 레일이 주행 중 가이드레일에 진동을 발생시키고 가이드레일과 결합되어 있는 브래킷을 통해 진동이 전달된다. 또한, 브래킷을 통해 전달되는 진동이 콘크리트 후면을 거쳐 거주공간 내로 들어가기 때문에 브래킷 후면부에 폴리머 콘크리트를 위치하여 진동 저감 성능을 측정하였다.

적은 양의 폴리머 콘크리트로 진동 감쇠를 유도하기 위하여 Fig. 3(a)에 표시된 것처럼 일부분만 삽입하는 형상으로 제작하였는데, 이를 위해, 시멘트 콘크리트로 구조물을 제작할 시에 폴리머 콘크리트를 넣을 100 cm x 25 cm x 15 cm 크기의 거푸집으로 공간을 분리한 후, 시멘트 콘크리트가 들어가지 않도록 막은 후 제작하였다. 그 후 폴리머 콘크리트를 이미 만들어 놓은 빈 공간에 채워 넣는 방식으로 시험체를 제작하였으며, 이후 레일용 브래킷을 설치하여 엘리베이터 구조시험체를 제작 완료하였다.



그림 13. 엘리베이터 코어월 Mock-up 대형 시험체]

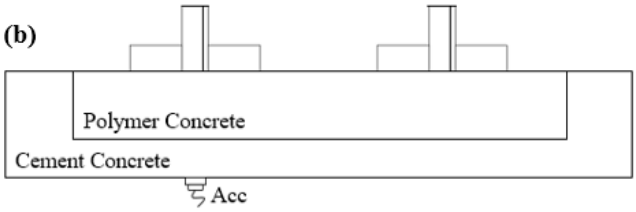




그림 14. 엘리베이터 코어월에 폴리머 콘크리트 설치

② 가속도계를 이용한 진동전달 측정 실험

엘리베이터가 주행하면서 레일의 떨림이 발생하여 가이드레일에 진동이 전달되며 이는 가이드레일과 부착되어 있는 브래킷을 타고 주거공간으로 전달되어 문제를 야기한다. 따라서 진동이 전달되는 주된 경로의 데이터를 받기 위하여 그림 13과 같이 브래킷의 각 위치와 구조물의 후면부에 가속도계(BW 14200E)를 설치하여 데이터를 취득하였다. 또한, 브래킷에 진동을 가해주기 위하여 해머(Dytran 5803AT)를 사용하였다.



그림 15. 레일용 브래킷과 센서 설치 및 동특성 측정

브래킷과 가이드레일은 서로 수직하게 설치가 되기 때문에 가이드레일로 전달되는 진동은 브래킷에 횡방향으로 들어오게 되는데, 전달되는 진동 방향을 고려하여 그림 14와 같이 브래킷의 측면에 충격 신호를 가하여 진동을 발생하였다. 가속도계와 해머 데이터는 NI 사의 cDAQ-9178장비 모델을 사용하여 시간 데이터의 형태로 수집하였다.

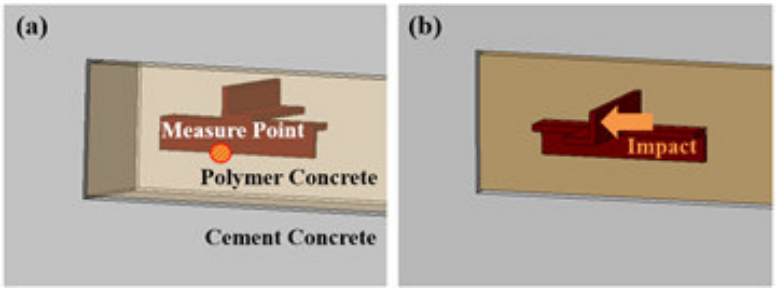


그림 16. 엘리베이터의 진동 전달 경로를 고려하여 횡방향 가진

③ 시간데이터를 이용한 진동저감 성능 비교

측정을 통해 수집한 시간 데이터를 기반으로 진동저감 성능을 검증하였다. 그림 15(a)는 4종류의 시편에 대한 실험결과로 충격 신호가 발생하고 난 후, 진폭이 0으로 수렴되는 것을 통해 진동이 소멸되는 것을 알 수 있으며, 모든 시편에서 1초 이내로 진동 신호가 소멸되는 것을 확인할 수 있다.

한편, 시간 데이터가 사라지는 기울기를 통해서 감쇠율을 검토할 수 있으나, 해머로 가한 충격 신호는 랜덤 신호와 달리 진폭의 크기가 일정하게 들어오는 것이 아니기 때문에 비교하기에 앞서 정규화 과정이 필요하므로 각 시편에서 취득된 시간 데이터의 가장 큰 값으로 전체 데이터를 나누어 정규화를 진행하였다. 시편 별로 진행하기에 기울기에는 영향을 끼치지 않음을 알 수 있으며, 정규화를 거친 데이터의 기울기를 찾기 위해서 최댓값들의 envelope를 Matlab을 이용하여 도출하였다. 도출한 envelope의 기울기를 알기 위하여 지수함수를 이용하여 곡선 맞춤을 수행하였는데, 이러한 과정은 그림 15(b)에 표시되어 있다.

지수함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y = Ae^{Bt} \tag{5}$$

여기서 y는 envelope, A는 amplitude, B는 기울기를 나타내며 t는 시간 변수를 나타낸다. 최대치들을 지수함수로 표현하는 과정이다.

지수함수의 기울기는 감쇠를 나타내는 모델로 사용할 수 있다. 4종류 시편의 데이터들은 위와 같은 동일한 과정을 거쳐 기울기를 도출하여 감쇠율에 대한 비교를 진행하였다.

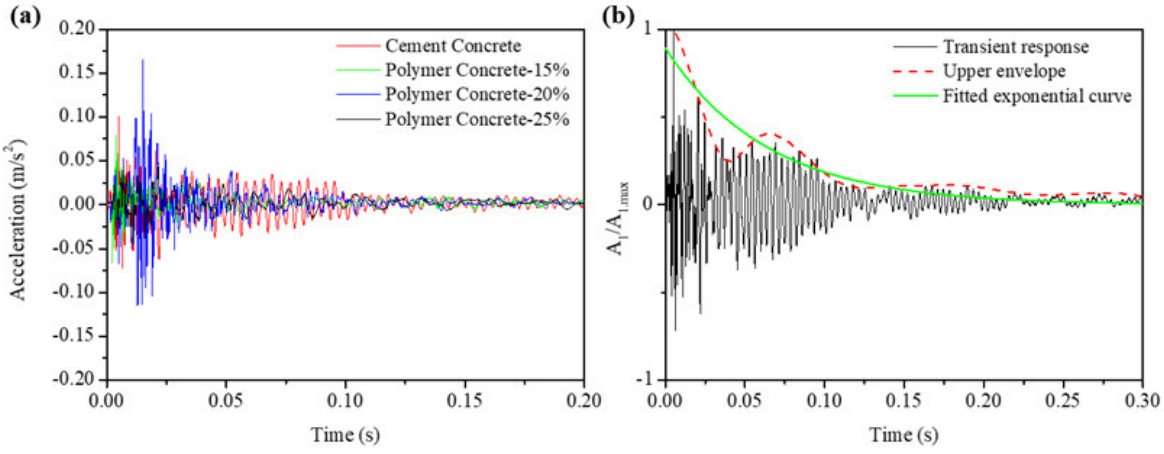


그림 17. 시간데이터를 이용한 진동저감 성능 비교

④ 실험 결과 분석

측정된 시간 데이터를 검토하였을 때 1초 이내로 발생한 진동 데이터가 소산되는 것을 알 수 있어, 4가지 조건이 다른 구조물의 진동 감쇠율을 비교하기 위해 1초의 시간 데이터만을 검토하여 비교를 진행하였다. 시멘트 콘크리트만으로 만들어진 구조물의 경우 지수함수의 기울기가 가장 작은 것을 보이며 진동감쇠가 가장 느리게 되는 것을 알 수 있다. 폴리머 콘크리트의 혼합 레진 비율이 증가할수록 기울기가 증가하여 25%일 경우 가장 빠르게 진동감쇠가 일어나는 결과는 표 1에서 확인할 수 있다.

시간 데이터뿐만 아니라 주파수 영역의 데이터를 검토하기 위하여 주파수 성분을 도출하여 비교하였는데, 그 결과는 Fig. 6에서 확인할 수 있으며 주파수 영역에서도 시멘트 콘크리트만 사용된 구조물보다 폴리머 콘크리트가 삽입된 구조물의 값이 더욱 작은 것을 알 수 있다. 주파수응답의 결과를 보면 주요 응답은 30 - 50 Hz대역에서 가장 크게 발생하는 것을 볼 수 있으며 이러한 부분은 폴리머 콘크리트를 사용하면서 저감이 되는 것을 알 수 있다. 특히 혼합 레진 비율이 25%로 제작된 폴리머 콘크리트의 경우 거의 소산된다. Roh, el al. (2019)에 의하면 승강기가 운행될 때 가이드레일의 브래킷에서 발생하는 주요 진동 주파수는 100 - 200 Hz 대역이며 본 연구 결과에서도 104 Hz와 144 Hz에서 발생하는 것을 보인다. 이러한 부분에서 시멘트 콘크리트 대비 폴리머 콘크리트의 4 - 17 dB까지 감소하는 것을 보여 실제 승강기 운동을 통해 발생하는 진동 저감에 기여할 수 있다.

표 4. 시험체의 진동감쇠 기울기

Type	Slope
CC	5.31
PC-15%	15.28
PC-20%	30.98
PC-25%	48.50

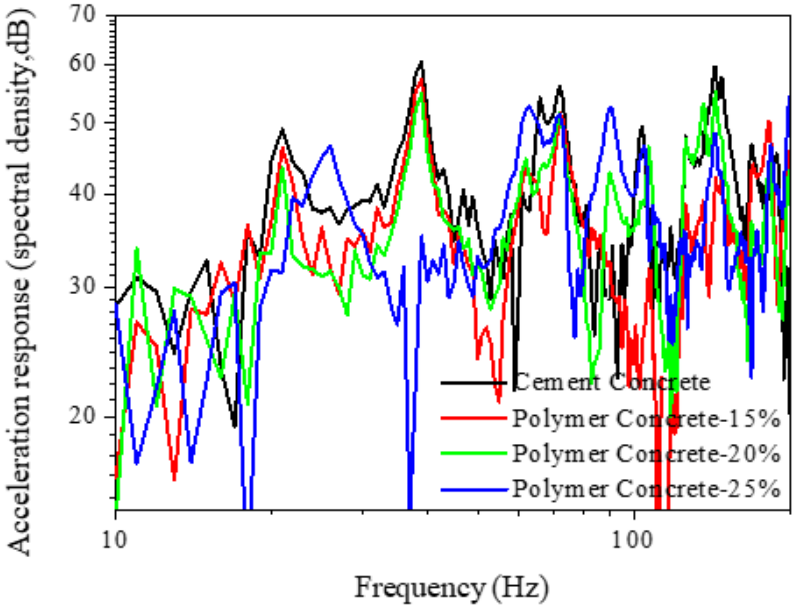


그림 18. 시험체의 진동응답 분석을 위한 주파수 응답 분석

2. 현장 적용을 위한 시방서 및 도서 작성

- 연구 결과 적립된 친환경 댐핑 바닥 구조체의 시공 방법을 규격에 맞게 정리한 시방서 제작
- 추가적으로 각종 환경 조건 및 유지 보수 등을 고려하여 다양한 조건에서 시공 시 참고할 수 있는 가이드 도서 작성



그림 19. 복합구조 댐퍼의 현장적용을 고려한 시방서 및 도서 작성

2.1 친환경 댐퍼 시공 가이드라인 제시

- 차종 및 환경요인 별 마찰 조건에 따른 메타 구조 고댐퍼 램프의 성능 평가
- 여러 환경에서 발생하는 다양한 요인에서의 친환경 댐퍼 시공 가이드라인 구축

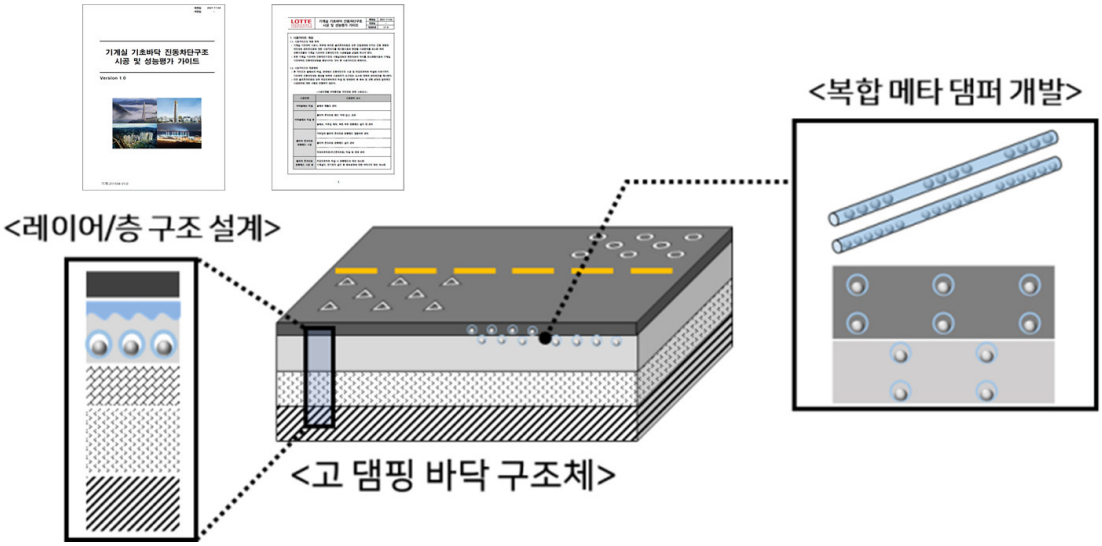


그림 20. 다양한 요인을 고려한 친환경 댐퍼 시공 가이드라인

2.2 기계실 기초바닥 진동차단구조 시공 및 성능평가 가이드

1) 시공가이드 개요

① 시공가이드의 적용 목적

• 기계실 기초바닥 시공시, 하부에 위치한 골조콘크리트와 상부 인접세대에 미치는 진동 영향과 차단성능 관리포인트에 대한 시공가이드를 제시함으로써 현장별 시공편차를 최소화 하여 건축구조물의 기계실 기초바닥 진동차단구조 시공품질을 균일화 하고자 한다.

또한 기계실 기초바닥 진동차단구조의 시험실성능과 현장성능의 차이를 최소화함으로써 기계실 기초바닥의 진동차단성능을 향상시키는 것이 본 시공가이드의 목적이다.

② 시공가이드의 적용 범위

• 본 가이드는 슬래브의 타설, 양생에서 진동차단구조 시공 및 마감모르타르 타설에 이르기까지 기초바닥 진동차단성능 향상을 위하여 시공관리가 요구되는 요소에 대하여 관리방안을 제시한다. 다만 골조콘크리트와 상부 마감모르타르의 타설 및 양생관리 등 후속 및 선행 공정의 일반적인 시공관리에 대한 사항은 포함하지 않는다.

표 5. 시공단계별 바닥충격음 차단성능 관련 시공요소

시공단계	시공관리 요소
바닥슬래브 타설	슬래브 평활도 관리
바닥슬래브 타설 후	폴리머 콘크리트 패드 자재 입고, 보관
	슬래브, 거푸집 제작, 벽면 하부 완충패드 설치 면 관리
폴리머 콘크리트 완충패드 시공	거푸집과 폴리머 콘크리트 완충패드 접합여부 관리
	폴리머 콘크리트 완충패드 설치 관리
	마감모르타르(무근콘크리트) 타설 및 양생 관리
폴리머 콘크리트 완충패드 시공 후	마감모르타르 타설 시 완충패드의 파손 최소화 기계설치, 전기장치 설치 등 후속공정에 의한 바닥구조 파손 최소화

2) 진동기준

① 인체관점 진동기준(ISO 2631-2)

ISO 2631-2에서 규정하는 건물 사용용도별 진동기준은 1/3 옥타브밴드 기준곡선(4~8Hz) 0.5gal(cm/sec2)에 주거지는 1.4(day time)~2(night), 사무실은 4.0을 곱하여 사용하고 있다. 그림 2.1에는 ISO 2631-2에서 제안하는 기준곡선과 건물용도에 따른 변수를 고려한 수직방향 진동허용기준을 나타내었으며, 표 2.1에는 노출시간이나 지속성 등을 고려해 국내에서 사용하고 있는 진동기준을 제시하였다.

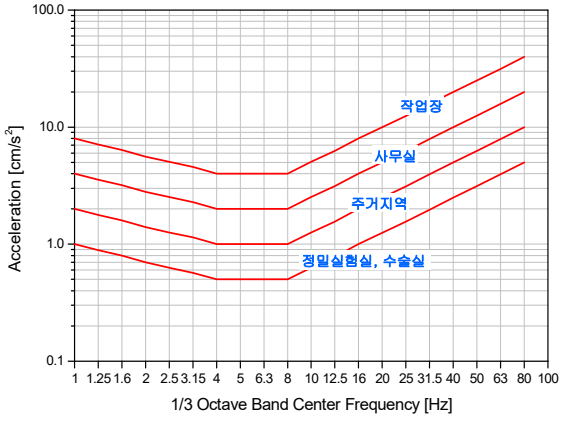


그림 21. 가속도에 대한 건물의 수직진동 증가반응곡선

표 6. 인체 응답에 대한 건물의 진동범위

지역	시간	연속진동 (gal, cm/sec^2, rms)	진동가속도레벨(VAL)
병원의 수술실, 정숙을 요하는 지역	-	0.5 gal	50.97dB
주 거 지	낮	2.0 gal	63.01dB
	밤	1.0 gal	56.99dB
사 무 실	-	4.0 gal	69.03dB
공장, 작업장	-	8.0 gal	75.05dB

※ 건물에 대한 피해시점의 상한으로 6㎜/s (충격에는 5~30㎜/s)를 제시함.
여기서 진동기준치는 rms, 가속도(㎜/s²)를 dB로 나타냄

② 구조물 진동 기준

- 표 2.3은 구조물에서의 진동기준을 나타낸다.

표 7. 구조물 진동기준

Contents	Level of Vibration Criteria		Source
Structural Damage Criteria	5 mm/s		DIN 4150-3
Perception Criteria by Use (workshop)	Hor.	2.88 cm/s^2	ISO 2631-2
	Vert.	4.0 cm/s^2	

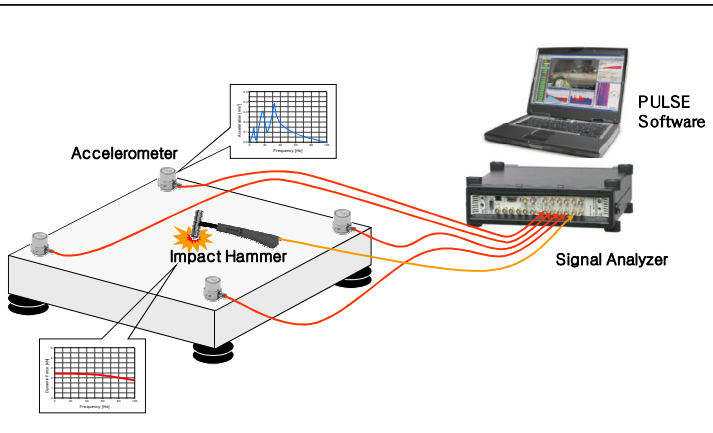
※ ISO 2631 vibration criteria proposed in the table are the lowest vibration level within the band range of 1~80Hz, and the graph (left) shows the applied vibration levels by frequency.

3) 진동측정 및 평가

① 측정 개요

시험체에 대한 동특성 측정은 2021년 10월 13일~29일에 걸쳐 수행하였으며, 측정 및 분석장비는 B&K사의 Pulse 3560C 장비를 이용하였다. 일반 콘크리트 및 폴리머 콘크리트 기초바닥시스템의 목업에 대한 진동시험은 임팩트 해머 시험을 수행하여 동특성 및 전달율을 측정하였다.

표 8. 진동측정 및 분석장비

장비명	주요 사양	
분석시스템	B&K Pulse 3560C	
가속도계	Dytran 3191A 5V/G Dytran 3191A1 10V/G	
임패트해머	Dytran 5803A 힘센서: 0.225 mV/N	

② 시험체 제작 개요

폴리머 콘크리트 Test bed의 진동특성을 분석하기 위해 폴리머 콘크리트 기초바닥시스템의 목업을 제작하여 진동시험을 수행하였다.



그림 22. 폴리머 콘크리트 기초바닥시스템 제작 및 동특성 측정

4) 기계실 기초바닥 진동차단구조의 개요

기계실 기초바닥 진동차단구조는 골조 콘크리트 슬래브를 포함하여 상부에 우레탄방수, 폴리머 콘크리트 완충재 패드와 마감모르타르(무근콘크리트)로 구성된다. 다음은 당사에서 사용하는 대표적인 기계실 기초바닥 진동차단구조시스템의 예시이다.
(사업이나 현장 특성에 따라 변경될 수 있음.)

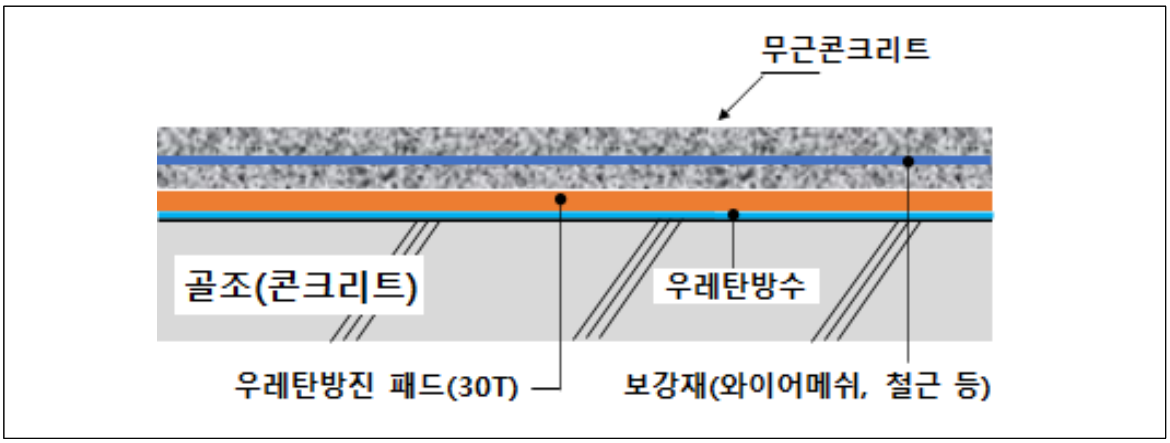


그림 23. 기계실 기초바닥진동차단구조(우레탄 방진패드 적용)

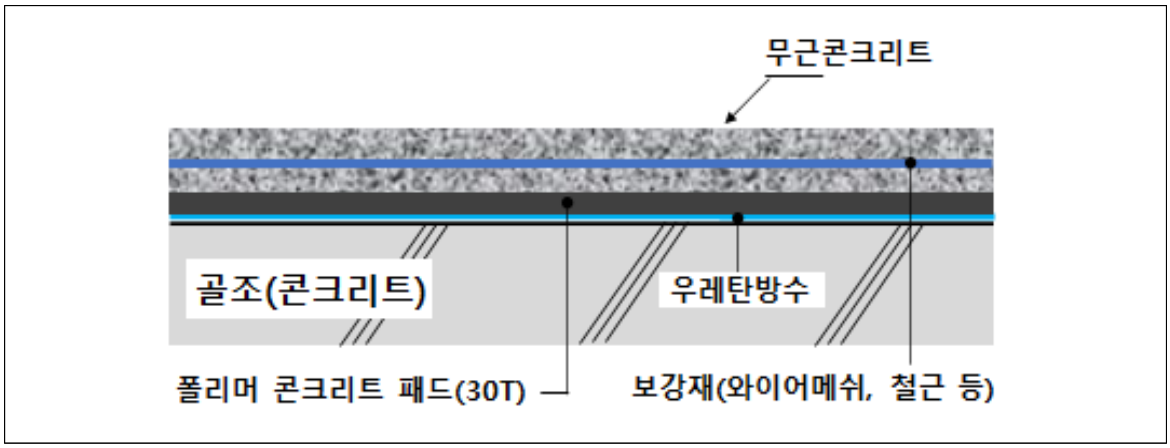


그림 24. 기계실 기초바닥진동차단구조(폴리머 콘크리트 패드 적용)

- 기초바닥 진동차단구조 본연의 성능을 구현하기 위해서는 우선 슬래브 평활도가 확보되어야 한다. 이는 완충패드와 슬래브가 밀착되기 위한 요건이며, 이에 따라 상부의 마감모르타르의 두께와 레벨을 균일하게 시공할 수 있기 때문이다.

- 슬래브 상부의 완충패드를 설치함에 있어서는 완충패드와 수직 거푸집 설치물 사이를 밀실하게 테이핑하고 충진하여 마감모르타르가 완충패드(우레탄 방진패드와 폴리머 콘크리트 패드의 하부로 침투하지 않도록 하는 것이 중요하다.

5) 진동차단구조 시공 프로세스

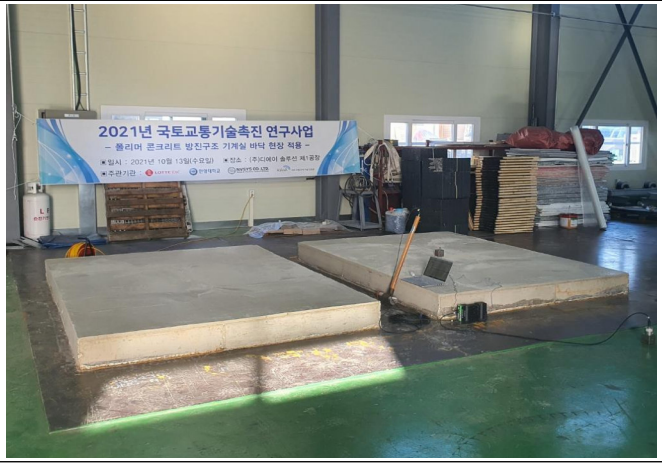
- 기계실 기초바닥 진동차단구조는 콘크리트 슬래브 상부에 폴리머 콘크리트 패드를 시공한 후 마감모르타르를 타설하여 시공하며 시공순서는 아래와 같다.
  - 슬래브 타설 및 양생
  - 폴리머 콘크리트 패드 시공
  - 마감모르타르 타설 및 양생

- 콘크리트 슬래브 타설은 제외하고, 기계실 기초바닥 거푸집 제작에서부터 폴리머 콘크리트 패드 제작 및 마감모르타르 타설까지의 진동차단구조 시공 예시를 순서대로 사진으로 나타내었다.

<기계실 기초바닥 진동차단구조 시공프로세스>

시공순서	시공사진
1. 기초바닥 거푸집 제작	
2. 폴리머 콘크리트 배합	
3. 폴리머 콘크리트 패드 제작	

<공동주택 바닥충격음 차단구조 시공프로세스-계속>

시공순서	시공사진
4. 폴리머 콘크리트 패드 보관 및 운반	
5. 폴리머 콘크리트 패드 설치	
6. 마감모르타르 시공	
7. 기계실 기초바닥 진동차단구조 완성	

6) 시공 프로세스별 현장 유의사항

① 슬래브 바탕면 관리 기준

- 슬래브 바탕면 처리는 콘크리트표준시방서(국토교통부, 2016)의 3.7 표면마무리 절에서 제시하는 [콘크리트 마무리의 평탄성 표준 값]에 따라 3m 당 7㎜ 이하가 되도록 관리하여야 한다.

② 슬래브 평활도 확보 방안

- 양호한 슬래브 바탕면의 평활도를 확보하기 위한 대표적인 방안은 다음과 같다.
  - 슬래브 타설 시 각 실의 중앙에 레벨봉이나 철근 등을 이용하여 레벨 마커 설치
  - 슬래브 타설 직후 큰칼을 이용하여 쇠흙손 마감
  - 레벨측정 및 요철 제거
- 양호한 평활도를 확보하기 위해서는 골조와 미장공정에서 품질 확보를 위한 노력이 필요하며, 이와 같은 사항을 입찰단계에서부터 특별 시방에 명시하고 현장에서는 이를 준수 할 수 있도록 관리감독하여야 한다.
- 현장에서는 레이저 수평레벨기로 평활도를 검측하고, 부적합한 부위가 있는 경우 파취하여 면정리가 이루어 질 수 있도록 한다.



슬래브 타설면 쇠흙손 마감



요철 제거 및 평활도 측정

그림 25. 슬래브 바탕면의평활도 개선 방안

7) 결언

- 본 시공가이드에서는 기계실 기초바닥 진동차단시스템 시공과 관련하여 완충시스템(폴리머 콘크리트 패드) 시공전과 시공중 단계를 중심으로 문제점과 개선안을 제시하였다.
- 완충시스템(폴리머 콘크리트 패드) 시공 전 단계에서 주요 관리사항으로는 슬래브 바탕면의 평활도에 대한 관리가 중점적으로 이루어 져야 할 것이다.
- 완충시스템(폴리머 콘크리트 패드) 시공 중 단계에서 주요 관리사항으로는 폴리머 콘크리트 패드와 거푸집 벽면 등에 밀실하게 시공될 수 있도록 관리가 이루어 져야 할 것이다.

○ 연구개발 추진 전략 및 방법

- 본 연구과제를 추진하기 위한 연구진의 구성은 1개의 주관연구 기관(롯데건설) 및 1개의 공동연구 기관(한양대학교 산학협력단)과 1개의 위탁연구 기관((주)엔브이시스)으로 편성함
- 바닥 구조체가 적용된 현황을 파악하고 동특성 평가
  - 위탁연구기관((주)엔브이시스)은 규격 및 표준 조사를 통하여 바닥 구조체가 주거지에 적용되어 있는 현황을 파악하고 정확한 연구 목표의 대상 설정 담당
  - 위탁연구기관((주)엔브이시스)은 현재 바닥 구조체가 적용 혹은 미적용된 주거지에서 바닥 진동과 구조진동 소음 전달량 측정 담당
  - 상업시설/아파트 해석모델의 설계, 실험체 설계 및 제작 담당

- 복합구조 댐퍼의 상세구조 설계
  - 공동연구기관(한양대학교 산학협력단)은 복합 메타구조 댐퍼를 바닥구조에 적용하기 위한 설계 변수를 선정하고 바닥구조체에서 문제가 되는 주파수 영역에서 높은 감쇠 성능을 보일 수 있는 설계 담당
  - 공동연구기관(한양대학교 산학협력단)은 폴리머 콘크리트의 성능을 파악하고 첨가제 등을 적용하여 제진 성능을 극대화 할 수 있는 복합구조 댐퍼 개발 담당

- 개발된 복합구조 댐퍼의 현장적용 및 테스트베드
  - 주관연구기관(롯데 건설)은 개발된 복합구조 댐퍼를 현장 환경에 맞게 시공법을 설정하고 성능 및 효율 모두 우수한 방향으로 복합구조 댐퍼의 구조체 적용 및 구조 설계 담당
  - 연구 수행과정에서 각 연구기관이 유기적인 관계를 구축하여 상업시설 및 노후 아파트에 적용 가능한 친환경 바닥진동 저감 댐퍼기술을 개발할 예정임.

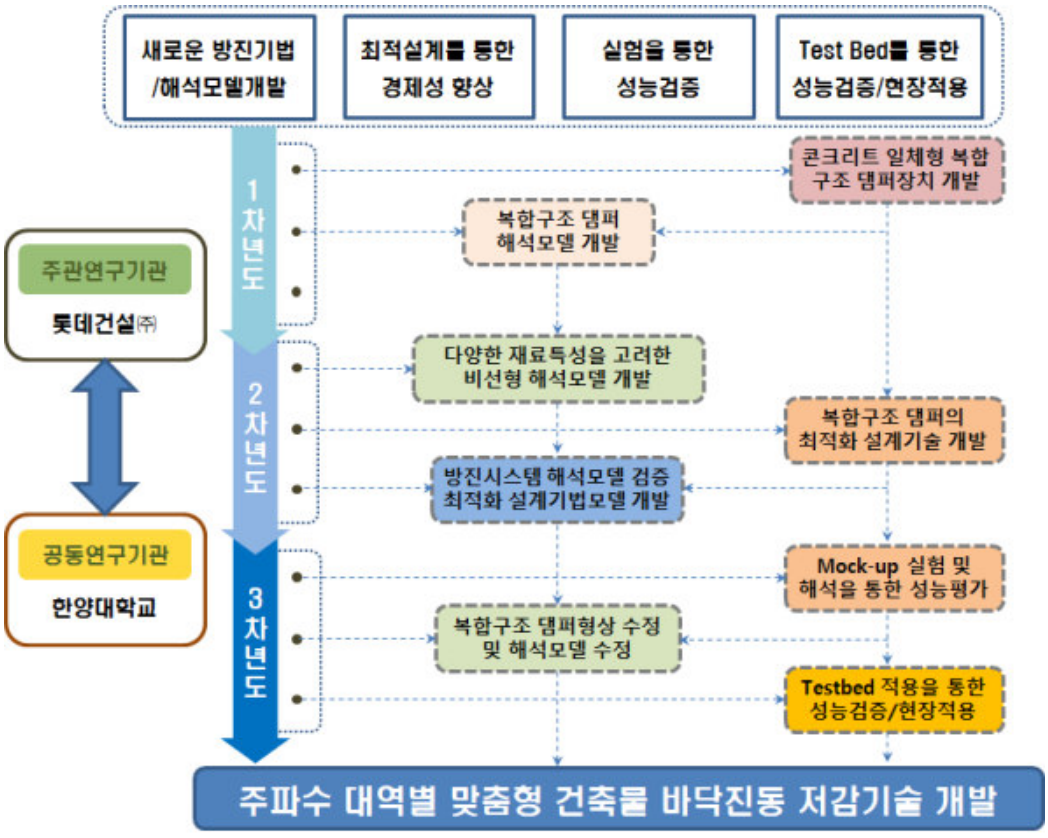


그림 26. 연구개발 추진전략 및 방법

○ 연구개발 추진 체계

연구개발과제		총 참 여 연 구 원
과제명	폴리머 콘크리트와 복합구조 댐퍼를 활용한 친환경 바닥진동저감 기술개발	주관연구책임자 김정진외 총 28명

기 관 별 참 여 현 황		
구 분	연구기관수	참여연구원수
대 기 업	1	18
중견기업		
중소기업	1	3
대 학	1	7
국공립(연)		
출 연 (연)		
기 타		
계		

주관연구기관(롯데건설)
폴리머 콘크리트와 복합구조 댐퍼를 활용한 친환경 바닥진동저감 기술개발
김 정진 외 17명
담당기술개발내용
• 4개발된 복합구조 방진기술의 설치상세 및 시공매뉴얼 • 개발된 댐퍼장치의 Test Bed를 통한 현장적용 타당성 검토 • 실용적인 생애주기비용 산정기법 개발을 통한 복합구조 댐퍼 감쇠장치의 경제성 평가기법

공동연구기관(한양대학교 산학협력단)
폴리머 콘크리트와 복합구조 댐퍼를 활용한 바닥진동 최적화 설계기술
박 준홍 외 6명
담당기술개발내용
• 콘크리트 슬라브 내부에 설치 가능한 진동저감 감쇠장치 개발 • 구조물의 고유주파수별 맞춤형 진동저감 댐퍼 개발 • 개발된 복합구조(점성유체+임팩트 댐퍼) 댐퍼의 최적화 설계기술 개발

위탁연구기관((주)엔브이시스)
복합구조 댐퍼 적용 방진시스템 해석모델 및 방진성능 평가
안 상기 외 2명
담당기술개발내용
• 개발된 시스템의 해석모델 및 최적설계기법 개발 • 비선형 해석 및 실험을 통한 진동저감 성능 평가 • 아파트 해석모델의 설계, 실험체 제작 및 실험을 통한 개발기술의 성능평가

○ 연구개발 추진 일정

일련번호	연구내용	추진 일정												연구개발비 (단위: 천원)	책임자 (소속기관)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
1차년도															
1	응용대상별 현황파악 및 자료조사													20,000	롯데건설
2	콘크리트 일체형 댐퍼장치 기술개발													10,000	한양대학교
3	복합구조 댐퍼 적용 해석모델 개발													30,000	엔브이시스
4	복합구조 댐퍼를 활용한 진동차단 구조설계													10,000	한양대학교
2차년도															
1	재료특성을 고려한 비선형 해석모델 개발													25,000	엔브이시스
2	복합구조 댐퍼의 최적화 설계기술 개발													40,000	한양대학교
3	응용현장 별 시공방법개발													30,000	롯데건설
4	복합구조 댐퍼적용 시험체 제작, 실험 및 성능검증													25,000	엔브이시스
3차년도															
1	현장적용을 위한 사전조사													10,000	롯데건설
2	Mock-up 실험 및 해석을 통한 성능평가													40,000	엔브이시스
3	적용현장에 적합한 복합구조 댐퍼 현장적용													30,000	롯데건설
4	개발기술 적용 후 성능검증 및 평가													30,000	한양대학교
5	복합구조 댐퍼형상 수정 및 해석모델 수정													10,000	엔브이시스
6	시제품 시방 및 시공도서 작성													10,000	롯데건설
7	최종보고서 및 성과홍보													20,000	롯데건설

3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도

1) 연구수행 결과 및 목표 달성도

(1) 정성적/정량적 연구개발성과

	핵심 성과물 (CTE)		성과목표		성과지표	성과검증기준				가중치	달성평점 (1~5)
						목표수준		측정 방법	검증 방법		
						목표치	달성치				
성과 질적 목표 점검	A	점성유체와 중량체를 결합한 복합구조 댐퍼시스템 해석/설계기술 및 최적설계 기술 개발	A-1	복합구조 댐퍼장치의 형상개발	복합구조 댐퍼장치의 해석모델 검증을 통한 형상개발	1건	1건	실험을 통한 효과분석	특허출원	2.0	5
			A-2	실험을 통한 성능검증	진동성분 및 주파수에 따른 실험 및 성능 검증	1건	1건	시험체 측정	시험성적서	1.0	5
			A-3	구조물별 맞춤형 최적화 설계	진동성분 및 주파수에 따른 구조물 별 맞춤형 최적화 설계	3건	3건	시뮬레이션	논문	2.0	5
			A-4	복합구조 댐퍼장치 적용 바닥구조체 개발	시험체 제작 및 성능평가	진동 30% 저감	30% 저감	시험평가	특허출원 보고서	4.0	5
			A-5	댐퍼적용 최적 설치위치 선정법 개발	진동성분 및 주파수에 따른 적용처 별 최적 설치위치 선정	2건	2건	설치위치별 성능 비교	논문	2.0	5
	B	제진향상 구조에 적절한 복합구조 댐퍼장치 형상 개발	B-1	제진구조 형상설계	제진구조체 설계	1건	3건	시뮬레이션	논문 프로그램	2.0	5
			B-2	제진구조 성능평가	제진구조 시험체 제작 및 실험	1건	3건	실험 및 보고서	논문 프로그램	2.0	5
	C	설치/시공 기술개발	C-1	현장적용 및 시험체 성능시험 평가	현장적용 및 시험체 성능시험 평가	30% 저감	30% 저감	현장측정	논문	2.0	5
			C-2	생애주기비용 산정 및 평가	생애주기비용 및 기존 공법 대비 공사비 평가	20% 저감	20% 저감	시험평가	논문	2.0	5
			C-3	시공 및 유지보수 매뉴얼	시공시방 및 유지보수 매뉴얼	1건	1건	시공지침서	결과보고서	1.0	5
	계									20	100

		목표		목표 건수	달성 건수	달성율 (%)	가중치	달성 평점
성과 양적 지표 점검	사업연계 지표	공공적 성과	설계기준, 시공가이드, 지침	0	1	100		
		기술적 성과	국내외 특허 출원	2	3	150		
			국내외 특허 등록	1	2	200		
			소프트웨어 등록	4	4	100		
			시제품 제작	2	4	200		
		학술적 성과	국내 학술지 게재	8	8	100		
			국외 SCI(E)학술지 게재	1	1	100		
			국내외 학술회의 발표	0	10	1000		
		경제적 성과	사업화/제품화(매출실적)	-	-	-		
			일자리 창출	0	1	100		
		기타 성과	현장시험 및 검증	0	2	200		
종합점수 = ∑(성과별 달성율 x 가중치)							20	100

• 1차년도 연구성과 목표 및 달성도

구분	핵심 성과물 (CTE)		단위 성과물		성과점검기준						양적성과 현황
					질적 성과지표		목표치	측정 방법	검증 방법	가중치	목표치
주관	A	점성유체와 중량체를 결합한 복합구조 댐퍼시스템 해석/설계기술 및 최적설계기술 개발	A-1	복합구조 댐퍼장치의 형상개발	①	복합구조 댐퍼장치의 해석모델 검증을 통한 형상개발	1건	실험을 통한 효과분석	특허출원	20	특허 : 출원 1건 등록 건 논문(SCI) : 건 논문(비SCI) : 건 시제품 : 건 S/W : 건
			A-2	실험을 통한 성능검증	①	진동성분 및 주파수에 따른 실험 및 성능 검증	1건	시험체 측정	시험성적서	10	특허 : 출원 건 등록 건 논문(SCI) : 건 논문(비SCI) : 건 시제품 : 건 S/W : 건
			A-3	구조물별 맞춤형 최적화 설계	①	진동성분 및 주파수에 따른 구조물별 맞춤형 최적화 설계	3건	시뮬레이션	논문	10	특허 : 출원 건 등록 건 논문(SCI) : 건 논문(비SCI) : 건 시제품 : 건 S/W : 건
			A-4	복합구조 댐퍼장치 적용 바닥구조체 개발	①	시험체 제작 및 성능평가	진동 30% 저감	시험평가	특허출원 보고서	20	특허 : 출원 건 등록 건 논문(SCI) : 건 논문(비SCI) : 1건 시제품 : 1건 S/W : 건
			A-5	댐퍼적용 최적 설치위치 선정법 개발	①	진동성분 및 주파수에 따른 적용처별 최적 설치위치 선정	2건	설치위치별 성능 비교	논문	15	특허 : 출원 건 등록 건 논문(SCI) : 건 논문(비SCI) : 건 시제품 : 건 S/W : 건
공동	B	제진 향상 구조에 적절한 복합구조 댐퍼장치 형상 개발	B-1	제진구조 형상설계	①	제진구조체 설계	3건	시뮬레이션	논문 프로그램	15	특허 : 출원 건 등록 건 논문(SCI) : 1건 논문(비SCI) : 건 시제품 : 건 S/W : 건
			B-2	제진구조 성능평가	①	제진구조 시험체 제작 및 실험	3건	실험 및 보고서	논문 프로그램	10	특허 : 출원 건 등록 건 논문(SCI) : 건 논문(비SCI) : 1건 시제품 : 건 S/W : 건
계										100	특허 : 출원 1건 등록 건 논문(SCI) : 1건 논문(비SCI) : 2건 시제품 : 1건 S/W : 건

• 2차년도 연구성과 목표 및 달성도

구분	핵심 성과물 (CTE)		단위 성과물		성과점검기준						양적성과 현황
					질적 성과지표		목표치	측정 방법	검증 방법	가중치	목표치
주관	A	점성유체와 중량체를 결합한 복합구조 댐퍼시스템 해석/설계기술 및 최적설계기술 개발	A-1	복합구조 댐퍼장치의 형상개발	①	복합구조 댐퍼장치의 해석모델 검증을 통한 형상개발	1건	실험을 통한 효과분석	특허출원	20	특허 : 출원 1건 등록 건 논문(SCI) : 건 논문(비SCI) : 건 시제품 : 건 S/W : 건
			A-2	실험을 통한 성능검증	①	진동성분 및 주파수에 따른 실험 및 성능 검증	1건	시험체 측정	시험성적서	10	특허 : 출원 건 등록 건 논문(SCI) : 건 논문(비SCI) : 건 시제품 : 건 S/W : 건
			A-3	구조물별 맞춤형 최적화 설계	①	진동성분 및 주파수에 따른 구조물별 맞춤형 최적화 설계	3건	시뮬레이션	논문	10	특허 : 출원 건 등록 건 논문(SCI) : 건 논문(비SCI) : 1건 시제품 : 2건 S/W : 건
			A-4	복합구조 댐퍼장치 적용 바닥구조체 개발	①	시험체 제작 및 성능평가	진동 30% 저감	시험평가	특허출원 보고서	20	특허 : 출원 1건 등록 건 논문(SCI) : 건 논문(비SCI) : 건 시제품 : 건 S/W : 건
			A-5	댐퍼적용 최적 설치위치 선정법 개발	①	진동성분 및 주파수에 따른 적용처별 최적 설치위치 선정	2건	설치위치별 성능 비교	논문	15	특허 : 출원 건 등록 건 논문(SCI) : 건 논문(비SCI) : 1건 시제품 : 1건 S/W : 건
공동	B	제진 향상 구조에 적절한 복합구조 댐퍼장치 형상 개발	B-1	제진구조 형상설계	①	제진구조체 설계	2건	시뮬레이션	논문 프로그램	15	특허 : 출원 건 등록 건 논문(SCI) : 건 논문(비SCI) : 1건 시제품 : 건 S/W : 1건
			B-2	제진구조 성능평가	①	제진구조 시험체 제작 및 실험	2건	실험 및 보고서	논문 프로그램	10	특허 : 출원 건 등록 건 논문(SCI) : 건 논문(비SCI) : 1건 시제품 : 건 S/W : 1건
계										100	특허 : 출원 2건 등록 건 논문(SCI) : 건 논문(비SCI) : 4건 시제품 : 3건 S/W : 2건

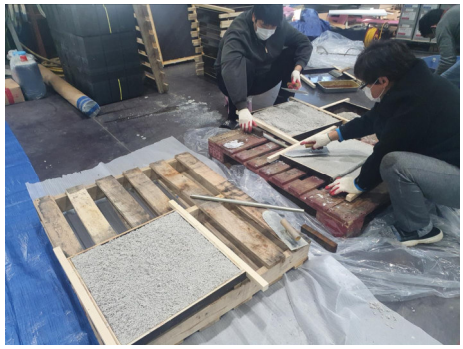
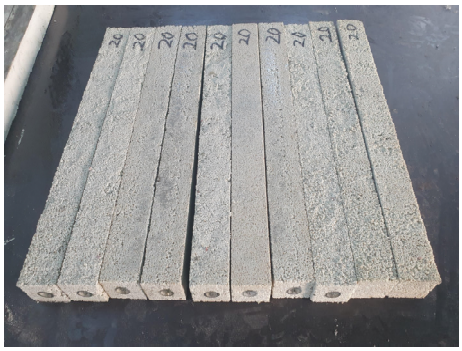
- 3차년도 연구성과 목표 및 달성도

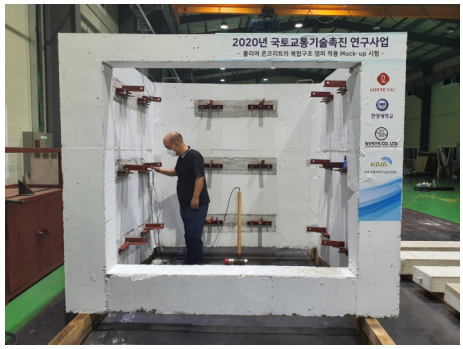
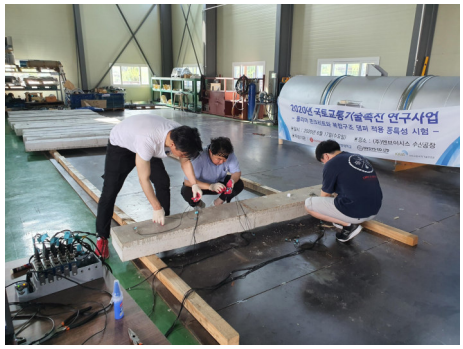
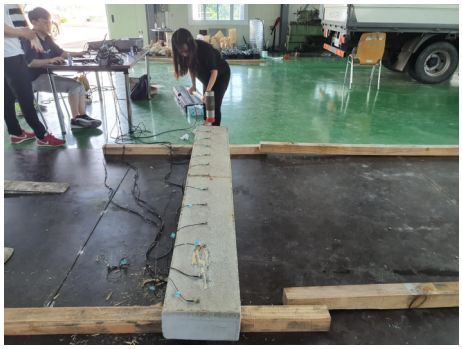
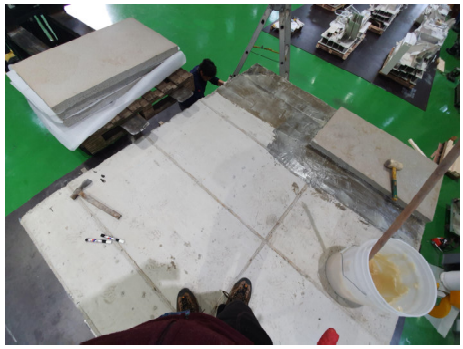
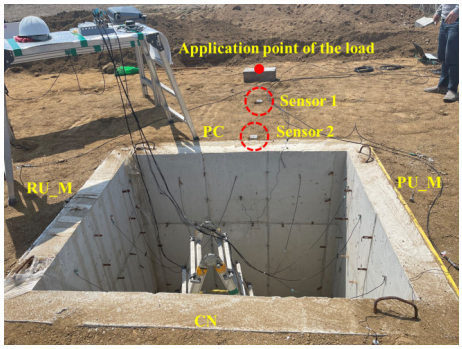
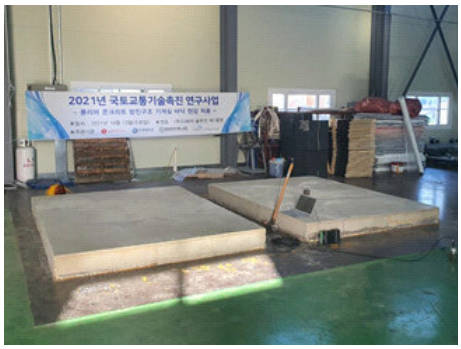
구분	핵심 성과물 (CTE)		단위 성과물		성과점검기준						양적성과 현황
					질적 성과지표		목표치	측정방법	검증방법	가중치	목표치
주관공통	C	설치/시공 기술개발	C-1	현장적용 및 시험체 성능시험 평가	①	현장적용 및 시험체 성능시험 평가	30% 저감	현장측정	논문 특허등록	40	특허 : 출원 건 등록 2건 논문(SCI) : 건 논문(비SCI) : 1건 시제품 : 1건 S/W : 건
			C-2	생애주기비용 산정 및 평가	①	생애주기비용 및 기존 공법 대비 공사비 평가	20% 저감	시험평가	논문 프로그램	40	특허 : 출원 건 등록 건 논문(SCI) : 건 논문(비SCI) : 1건 시제품 : 건 S/W : 1건
			C-3	시공 및 유지보수 매뉴얼	①	시공시방 및 유지보수 매뉴얼	1건	시공지침서	시방도서 프로그램	20	특허 : 출원 건 등록 건 논문(SCI) : 건 논문(비SCI) : 건 시제품 : 건 매뉴얼 : 1건 S/W : 1건
계										100	특허 : 출원 건 등록 2건 논문(SCI) : 건 논문(비SCI) : 2건 시제품 : 1건 매뉴얼 : 1건 S/W : 2건

(2) 정량적 연구성과 목표 및 달성도 (요약)

구분		목표	달성	비고
국외논문 게재	SCI	1	1	
	비SCI			
	계	1	1	
국내논문 게재	SCI			
	비SCI	8	8	
	계	8	8	
특허출원	국내	2	3	
	국외			
	계	2	3	**1건 초과달성**
특허등록	국내	1	2	
	국외			
	계	1	2	**1건 초과달성**
인력양성	학사			
	박사			
	계			
등록·기탁 대상 성과물	소프트웨어	4	4	
기타	시제품	2	4	**2건 초과달성**
	학술회의	0	10	**10건 초과달성**
	성과 홍보			
	일자리 창출	0	1	**1건 초과달성**

(3) 시작품 및 시제품

일련번호	명칭	증빙 사진
1	폴리머 콘크리트와 복합구조 댐퍼 적용 기초바닥 시스템	 
2	폴리머 콘크리트 패드	 
3	폴리머 콘크리트와 임팩트 댐퍼 적용 시스템	 
4	음향블랙홀 파동 전달 특성을 이용한 굽힘진동 댐퍼 시스템	 
5	폴리머 콘크리트 방진 마운트 시스템	

6	폴리머 콘크리트를 이용한 엘리베이터 진동저감 시스템	 
7	폴리머 콘크리트를 이용한 수평보 진동저감 시스템	 
8	폴리머 콘크리트를 이용한 기계실 기초바닥 진동저감 시스템	 
9	폴리머 콘크리트를 이용한 기계실 기초바닥 진동저감 시스템	 

(4) 세부 정량적 연구개발성과

[과학적 성과]

□ 논문(국내외 전문 학술지) 게재

번호	논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행기관	SCIE 여부 (SCIE/비SCIE)	게재일	등록번호 (ISSN)	기여율
1	음향블랙홀 파동 전달 특성을 이용한 굽힘 진동 저감용 충돌 댐퍼	한국 소음진동 공학회 논문집	성연욱	Vol.29 No.5	대한민국	한국 소음진동 공학회	비SCIE	2019.09.30	1598-2785	100%
2	Effective vibration test planning method for equipment with high slenderness ratio	Journal of Mechanical Science and Technology	Inki Park	Vol.33 No.12	South Korea	Springer Nature	SCIE	2019.10.04	1976-3824	100%
3	폴리머 콘크리트의 진동저감 특성에 대한 실험적 연구	한국구조물 진단유지관 리공학회 논문집	김정진	Vol.23 No.7	대한민국	한국구조물진 단유지관리공 학회	비SCIE	2019.12.02	2234-6937	100%
4	고 감쇠 폴리머 콘크리트의 진동 특성에 관한 해석적 연구	한국구조물 진단유지관 리공학회 논문집	김정진	Vol.24 No.5	대한민국	한국구조물진 단유지관리공 학회	비SCIE	2020.10.30	2234-6937	100%
5	복합구조 댐퍼를 적용한 고 감쇠 폴리머 콘크리트의 진동 특성에 관한 연구	한국구조물 진단유지관 리공학회 논문집	김정진	Vol.24 No.5	대한민국	한국구조물진 단유지관리공 학회	비SCIE	2020.10.30	2234-6937	100%
6	구조파를 이용한 체결구조 축력 비파괴측정 시스템 연구	한국비파괴 검사 학회 논문집	성연욱	Vol.40 No.6	대한민국	한국비파괴검 사 학회	비SCIE	2020.11.24	1225-7842	100%
7	철로의 파동 전파 특성 분석을 통한 무한 레일의 등가 동적 물성 예측	한국 소음진동 공학회 논문집	김걸	Vol.30 No.6	대한민국	한국 소음진동 공학회	비SCIE	2020.12.20	2287-5476	100%
8	고 감쇠 폴리머 콘크리트를 활용한 지반진동 저감기술에 대한 연구	한국구조물 진단유지관 리공학회 논문집	김정진	Vol.25 No.6	South Korea	한국구조물진 단유지관리공 학회	비SCIE	2021.12.30	2234-6937	100%
9	폴리머 콘크리트를 이용한 엘리베이터 기인 구조 진동저감 성능 연구	한국구조물 진단유지관 리공학회 논문집	염지혜	Vol.25 No.6	대한민국	한국구조물진 단유지관리공 학회	비SCIE	2021.12.30	2234-6937	100%

□ 국내 및 국제 학술회의 발표

번호	회의 명칭	발표 내용	발표자	발표 일시	장소	국명
1	한국소음진동공학회 학술발표대회	폴리머 콘크리트와 복합구조 댐퍼의 진동저감 성능에 대한 연구	김정진	2019.10.23	해비치호텔&리조트 제주	대한민국
2	일본소음진동공학회 학술발표대회	ぽりマーを混入したコンクリートの振動低減性能に関する実験的研究	이재만	2019.11.02	일본대학 Surugadai캠퍼스	일본
3	3rd International Conference on Functional Materials and Chemical Engineering	Evaluation on the Damping Performance of the Polymer Concrete by Using Pipe Structure	위준우	2019.12.17	University of Chulalongkorn	태국
4	ICCS23 &MECHCOMP6	A study of Acoustic Noise Reduction for Wide Frequency Range Using Composite Meta-materials	성연욱	2020.09.01	University of Porto	포르투갈
5	한국소음진동공학회 학술발표대회	공극이 존재하는 흡음재 처리된 구조물의 진동저감 성능 연구	염지혜	2020.11.16	라마다프라자 제주호텔	대한민국
6	한국소음진동공학회 학술발표대회	웨이블릿 변환을 이용한 금속 간 마찰의 접촉력에 따른 음향 특징 분석	이동현	2020.11.16	라마다프라자 제주호텔	대한민국
7	한국소음진동공학회 학술발표대회	스펙트럼 요소법을 활용한 체결 조건에 따른 체결부의 Rattle 소음 및 진동 전달 특성 분석	전종훈	2020.11.16	라마다프라자 제주호텔	대한민국
8	한국소음진동공학회 학술발표대회	벨크로 소재 체결 조건에 따른 기계 구조물 진동 전달 저감 연구	권세민	2020.11.16	라마다프라자 제주호텔	대한민국
9	한국소음진동공학회 학술발표대회	폴리머 혼입율에 따른 콘크리트의 진동 저감 성능에 대한 실험적 연구	위준우	2020.11.18	라마다프라자 제주호텔	대한민국
10	한국소음진동공학회 학술발표대회	폴리머 콘크리트의 진동저감 성능에 관한 실험적 연구	위준우	2021.11.25	라마다프라자 제주호텔	대한민국

[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	특허	주차장 램프의 방진구조 시공방법	대한민국	롯데건설	2019.10.29	10-2019-0135093	롯데건설	2021.07.14	10-2279547	100%	
2	특허	건물 엘리베이터실의 방진구조 및 그 시공방법	대한민국	롯데건설 ㈜엔브이시스	2020.10.15	10-2020-0133102	롯데건설 ㈜엔브이시스	2021.05.06	10-2251018	100%	
3	특허	건물 기계실의 방진구조	대한민국	롯데건설	2020.10.19	10-2020-0135143	-	-	-	100%	

□ 저작권(소프트웨어, 서적 등)

번호	저작권명	창작일	저작자명	등록일	등록번호	저작권자명	기여율
1	Chip(가공폐기물)의 정강성 도출	2020-09-11	한양대학교 산학협력단	2020.09.11	C-2020-035427	한양대학교 산학협력단	100%
2	Chip-Mount(가공폐기물 마운트) 공기층 모델링	2020-09-09	한양대학교 산학협력단	2020.10.15	C-2020-035424	한양대학교 산학협력단	100%
3	Damping Ratio(감쇠비) 도출	2020-09-17	한양대학교 산학협력단	2020.10.15	C-2020-035426	한양대학교 산학협력단	100%
4	전달함수법을 이용한 chip(가공폐기물)의 동적 강성 도출	2020-09-03	한양대학교 산학협력단	2020.10.15	C-2020-035425	한양대학교 산학협력단	100%

[경제적 성과]

□ 시제품 제작

번호	시제품명	출시/제작일	제작업체명	설치장소	이용분야	사업화 소요 기간	인증기관 (해당 시)	인증일 (해당 시)
1	복합구조 댐퍼적용 수평바닥 부재 Mock-up 시험체 제작	2019.10.19	(주)선엔지니어링	(주)엔브이시스 제1공장	지하주차장 램프바닥 및 기계실 기초바닥 수평부재			
2	엘리베이터 코어월 대형 Mock-up 시험체 제작	2020.09.18	한국품질관리기술원	(주)엔브이시스 제1공장	엘리베이터 코어월의 진동저감 기술분야			
3	주차장 및 기계실 수평바닥 부재 대형 Mock-up 시험체 제작	2020.09.22	한국품질관리기술원	(주) 엔브이시스 제1공장	주차장 램프바닥및 기계실 기초바닥 진동저감 분야			
4	지하구조물 외벽 진동차단 검토용 시험체 제작	2020.10.05	한국품질관리기술원	(주)엔브이시스 제1공장	지하구조물 지하외벽 철도교통 진동차단			
5	기계실 기초바닥 진동특성 검토용 시험체 제작	2021.10.13	대진대학교 한국품질관리기술원	(주)디에이솔루션 제1공장	기계실 기초바닥 진동저감 분야			

□ 현장적용(시험)

번호	적용기술명	적용일	발주기관명	적용 연구개발기관명	적용 현장명(장소)
1	폴리머 콘크리트를 활용한 지반진동 저감성능 검증 시험	2021년 4월 6일	롯데건설(주)	롯데건설(주)	㈜엔브이시스 수신공장
2	폴리머 콘크리트를 활용한 기계실 기초바닥 진동성능 검증 시험	2021년 10월 13일	롯데건설(주)	롯데건설(주)	㈜디에이 솔루션 제1공장

□ 설계 기준/설명서(시방서)/지침/안내서에 반영

번호	구 분 (설계 기준/설명서/지침/안내서)	활용 구분 (신규/개선)	설계 기준/설명서/ 지침/안내서 명칭	반영일	반영 내용
1	설명서(시방서)	신규	설명서(시방서)	2021.11.04	기계실 기초바닥 진동차단구조 시공 및 성능평가 가이드

□ 신진연구자 채용

번호	채용 연구개발기관명	채용일	근로기간	채용인원(명)	채용인원 중 청년인력(명)
1	㈜엔브이시스	2020.05.01	2020.05.01.~2020.12.31	1	1

<참고 1> 연구개발성과 실적 증빙자료 예시

성과유형	첨부자료 예시
연구논문	논문 사본(저자, 초록, 사사표기를 확인할 수 있는 부분 포함, 연구개발과제별 중복 첨부 불가)
지식재산권	지식재산권 등록증(또는 출원서) 사본(발명인, 발명의 명칭, 연구개발과제 출처 포함)
제품개발(시제품)	제품개발사진 등 시제품 개발 관련 증빙자료
기술이전	기술이전 계약서, 기술실시 계약서, 기술료 입금 내역서 등
사업화 (상품출시, 공정개발)	사업화된 제품사진, 매출액 증빙서류(세금계산서, 납품계약서 등 매출 확인가능 내부 회계자료) 등

<참고 2> 「국가연구개발혁신법」 시행령 제33조 제4항 및 별표 4에 따른 연구개발성과의 등록·기탁 대상과 범위

구분	대상	등록 및 기탁 범위
등록	논문	국내외 학술단체에서 발간하는 학술(대회)지에 수록된 학술 논문(전자원문 포함)
	특허	국내외에 출원 또는 등록된 특허정보
	보고서원문	연구개발 연차보고서, 단계보고서 및 최종보고서의 원문
	연구시설 ·장비	국가연구개발사업을 통하여 취득한 3천만 원 이상(부가가치세, 부대비용 포함) 연구시설·장비 또는 공동활용이 가능한 모든 연구시설·장비
	기술요약정보	연차보고, 단계보고 및 최종보고가 완료된 연구개발성과의 기술을 요약한 정보
	생명자원 중 생명정보	서열·발현정보 등 유전체정보, 서열·구조·상호작용 등 단백체정보, 유전자(DNA)칩·단백질칩 등 발현체정보 및 그 밖의 생명정보
	소프트웨어	창작된 소프트웨어 및 등록에 필요한 관련 정보
	표준	「국가표준기본법」 제3조에 따른 국가표준, 국제표준으로 채택된 공식 표준정보(소관 기술위원회를 포함한 공식 국제표준화기구(ISO, IEC, ITU)가 공인한 단체 또는 사실표준화기구에서 채택한 표준정보를 포함)
기탁	생명자원 중 생물자원	세균, 곰팡이, 바이러스 등 미생물자원, 인간 또는 동물의 세포·수정란 등 동물자원, 식물세포·종자 등 식물자원, DNA, RNA, 플라스미드 등 유전체자원 및 그 밖의 생물자원
	화합물	합성 또는 천연물에서 추출한 유기화합물 및 관련 정보
	신품종	생물자원 중 국내외에 출원 또는 등록된 농업용 신품종 및 관련 정보

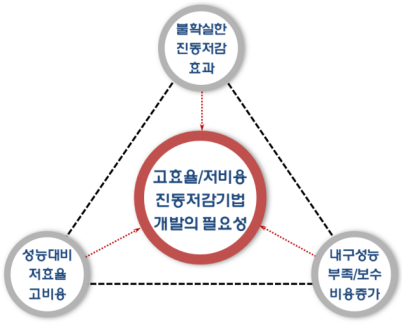
2) 목표 달성 수준

연 구 개 발 목 표	달 성 내 용	달성도(%)
○ 복합구조 댐퍼장치의 형상개발	○ 복합구조 댐퍼적용 수평바닥 대형 Mock-up 시험체 제작 및 물성시험, 동특성 시험을 통해 진동저감 성능 검토를 실시함 ○ 특허출원 2건 ○ 시제품 보고서 1건	100
○ 진동성분 및 주파수에 따른 실험 및 성능 검증	○ 폴리머 콘크리트 적용 시험체의 물리적 시험과 동적 시험을 통해 진동저감에 효과적임을 입증함 ○ 시험성적서 2건	100
○ 구조물별 맞춤형 최적화 설계	○ 효과적인 바닥진동 저감효과를 위해서 폴리머 콘크리트의 형상, 위치, 혼합비율을 변화시켜 구성한 실구조체와 해석모델 비교검토를 통해 최적설계안 도출 ○ 논문 게재 1건 ○ 시제품 보고서 1건	100
○ 복합구조 댐퍼장치 적용 바닥구조체 개발	○ 폴리머 콘크리트와 복합구조 댐퍼(충돌댐퍼) 적용 시험체의 동적 특성 시험을 통해 진동저감 성능 분석과 복합구조 댐퍼장치 적용 바닥구조체 개발함 ○ 특허출원 1건 ○ 논문 게재 1건 ○ 시제품 보고서 2건	100
○ 댐퍼적용 최적 설치위치 선정법 개발	○ 폴리머 콘크리트와 복합구조 댐퍼(충동댐퍼)를 혼합한 구조체의 동특성 시험 및 해석을 통해 폴리머 콘크리트 및 댐퍼적용 최적 설치위치 선정법 개발함 ○ 논문 게재 1건	100
○ 제진구조 형상설계	○ 구조파를 이용한 체결구조 축력 비파괴측정 시스템 연구를 통한 제진구조체 형상설계 최적화 방안 분석함 ○ 논문 게재 2건 ○ 프로그램 등록 1건	100
○ 제진구조 시험체 제작 및 실험	○ 폴리머 콘크리트를 활용 음향블랙홀 파동전달 특성을 이용한 굽힘진동 댐퍼 시스템의 진동저감에 효과적임을 시험을 통해 입증함 ○ 논문 게재 2건 ○ 프로그램 등록 1건	100
○ 현장적용 및 시험체 성능시험 평가	○ 일반 콘크리트, 방진패드(폴리우레탄, 방진고무)와 폴리머 콘크리트 패드적용 시험체의 진동전달률 비교시험을 통해 폴리머 콘크리트의 진동저감 효과를 시험을 통해 입증함 ○ 특허등록 2건 ○ 논문 게재 1건 ○ 시제품 보고서 1건	100
○ 생애주기비용 및 기존 공법 대비 공사비 평가	○ 일반 콘크리트와 폴리머 콘크리트 패드적용 기초바닥 시험체의 진동전달률 비교시험을 통해 폴리머 콘크리트의 진동저감 효과와 공사비 절감효과를 분석함 ○ 논문 게재 1건 ○ 프로그램 등록 1건	100
○ 시공시방 및 유지보수 매뉴얼	○ 폴리머 콘크리트 패드적용 기초바닥 시험체의 공사시방서 및 유지관리 가이드라인 수립 ○ 시공지침 메뉴얼 1건 ○ 프로그램 등록 1건	100

5. 연구개발성과의 관련 분야에 대한 기여 정도

공동주택 등의 거주형 구조물의 소음진동 문제는 대부분 층간소음문제에 국한되어 있어, 관련기술도 대부분 층간소음 저감을 위한 분야에 집중되어 있는 실정이다. 한국기계연구원은 신축 아파트나 다가구 주택뿐만 아니라 이미 지어진 건물에도 적용할 수 있는 음향 메타물질을 이용한 층간소음 저감 기술을 개발하고, 최근에는 상용화를 목표로 효율이 높은 공명기 형태와 싼값에 만들 수 있는 격자형 구조를 개발 중이나, 설치 위치 및 형상에 따라 진동소음 저감 효과가 크게 달라지는 문제가 있다.

동일한 댐퍼(감쇠장치)라도 설치위치에 따라 진동저감 성능이 크게 달라질 수 있으므로, 최소 비용으로 목적하는 성능목표를 만족시킬 수 있는 최적 진동저감 기술의 선정이 중요하다고 할 수 있다. 현재 진동저감 기술의 경제성은 초기 설치비용을 바탕으로 판단하고 있으나, 자동차, 기차 주행 및 간헐적인 충격 등 큰 하중에 대해서는 초기 투자비용 뿐만 아니라, 피해 발생 후 복구(보수)비용까지 확률적으로 고려한 생애주기비용을 기반으로 진동저감 공법의 경제성을 평가하는 것이 필요하다.



건축구조물의 규모 및 용도, 재료의 동적 특성, 생애주기비용 등 다양한 설계변수를 고려하여 최적 진동저감 기술을 최적 위치에 적용함으로써, 저효율 고비용인 기존 진동저감 기술의 단점을 보완하고 장점을 극대화 할 수 있는 새로운 고효율 저비용 진동저감 기술에 관한 연구가 필요하다. 이러한 댐퍼장치의 위치, 형상, 재질 등에 따라 진동저감에 보다 효과적임을 입증함과 동시에 이에 대한 실험 및 연구가 활발히 진행되었는데, 2019년 한양대는 폴리머 콘크리트와 복합구조 댐퍼가 음향블랙홀 형상을 가진 구조체와의 충돌로 인해 큰 에너지 소산이 일어나, 구조물에서의 진동전달 저감효과를 극대화할 수 있다는 연구결과를 발표하였다.

한편, 기존 진동저감 기술과 비교하여 본 연구에서 제안하는 친환경 복합구조 진동저감 기술의 장점은 다음과 같다. 지하 주차장입구에 위치하는 램프는 미끄럼 방지 등 안전을 위해서 바닥면에 돌출물을 설치하는데, 이러한 돌출돌기와 자동차 바퀴면과의 마찰로 인해, 미끄럼 등은 방지될 수 있지만, 진동이 크게 발생하는 원인이 되고 있어, 이로 인한 민원발생이 늘고 있는 상황이다. 기존의 바닥진동 저감용 소재인 우레탄 패드, 방진고무 패드 등의 방진재는 단순히 높은 감쇠율을 갖는 재료로, 구조물의 상부 또는 하부에 방진재를 위치시켜 바닥구조체에 발생하는 진동을 저감하는 방식으로 설계되었다.

반면, 본 연구에서 제안하는 폴리머 콘크리트는 탄성계수, 압축강도, 인장강도, 휨강도, 마찰저항성 등이 일반 콘크리트 대비 탄성계수는 2~40%, 압축강도는 10~100% 이상, 휨강도, 인장강도는 3~10배 정도 우수한 값을 나타내고, 동특성도 1~3배 이상 우수하므로, 지하에서 토압을 받는 지하구조물의 외벽이나, 하중이 큰 기계설비의 기초바닥, 지하주차장 램프바닥 하부 등 압력을 크게 받는 위치와 엘리베이터 이동구간의 레일지지 위치에 적용할 경우, 일반 폴리우레탄 패드, 고무 패드의 경우처럼 압착현상으로 인해 성능이 크게 떨어지는 등의 문제가 발생하지 않아, 구조체의 안전성과 진동을 획기적으로 저감할 수 있는 기술이라고 할 수 있다. 이러한 토압 등 압력하중을 크게 받는 지하구조물에서의 진동저감에 보다 효과적임을 입증한 뒤, 이에 대한 실험 및 연구가 활발히 진행되었는데 그 결과, 2021년 롯데건설은 지반진동의 중요한 감쇠요인은 구조체의 물리적 특성(압축, 인장, 휨강도)과 동특성으로 탄성계수 및 감쇠계수임을 논문을 통해 발표하였으며, 2021년 한양대는 엘리베이터 구조체에서 엘리베이터의 이동에 의한 진동전달 저감효과에 폴리머 콘크리트의 감쇠성능이 진동차단성능에 영향을 미친다는 연구결과를 발표하였다. 또한, 폴리머 콘크리트와 복합구조 댐퍼를 적용한 시제품 시험체의 연구를 통해, 주차장 램프의 방진구조 시공방법, 건물 엘리베이터실의 방진구조 및 그 시공방법과 관련한 특허 등록을 획득하는 성과를 이루었다. 이러한 점을 감안할 때 본 연구의 개발성과 및 요소기술은 추후 국내 방진재 개발시장에 새로운 패러다임으로 작용할 것으로 판단된다.

6. 연구개발성과 관리 및 활용 계획

최근 생활환경과 경제가 급격히 변화하면서, 경제성과 시공성이 뛰어난 초고층 복합빌딩과 공동주택에 포함되는 건축기술은 미래의 건설시장에서 필수적으로 요구되는 기술이라고 할 수 있다. 특히, 사무공간과 거주공간이 고층화되어감에 따라 실내 환경에 대한 질적 수준의 요구도 급격히 증가하고 있는 추세인데, 이러한 요구조건을 모두 만족하는 고층건축물을 실현하려면, 보다 많은 공간이 필요해 각층에 소용되는 구조층이나 설비층을 슬림화해야만 하므로, 결국은 구조물의 진동저감 성능이 감소하게 된다.

한편, 최근 급격한 도시화로 인해 도심에서의 교통체증이 날로 심각해지고 있는 가운데, 지하철 등 지하공간을 활용한 교통수단이 증가하고 있는 추세이며, 이러한 지하 교통수단으로 인해 발생하는 지반진동 등이 문제로 대두될 수 있다. 지반진동은 지진과 같은 자연적인 원인에 의해 발생할 뿐만 아니라 인위적인 원인에 의해서도 발생하는데, 이러한 지반의 진동에 구조물이 노출될 경우는 진동의 강도 및 주파수, 그리고 구조물의 고유주파수 등에 따라서 큰 손상을 받을 수도 있다. 최근에는 도심속에서 공사가 진행되는 경우가 크게 늘고 있는데, 이로 인해 기존 구조물 인근에서 공사에 의한 인위적인 진동이 자주 발생하기도 하고, 산업단지의 경우는 주변 기계류 작동 등에 의해서도 진동이 야기되어 문제가 발생하기도 한다.

구조물을 구성하고 있는 일반 콘크리트의 경우, 진동에 대한 감쇠성능이 작아, 지반진동과 같이 외부로부터 구조물로 전달되는 다양한 진동을 차단하는데 어려움이 따른다.

따라서, 본 연구과제를 통하여 개발된 폴리머 콘크리트와 복합구조 댐퍼를 적용한 진동저감 기술은 고층건축물에서 슬림화된 설비층에서의 진동과 큰 압력하중을 지탱하면서 진동을 차단해야하는 지하구조물에서의 진동저감 기준을 만족시킬 수 있는 획기적인 대안으로 활용되어 질 수 있다.

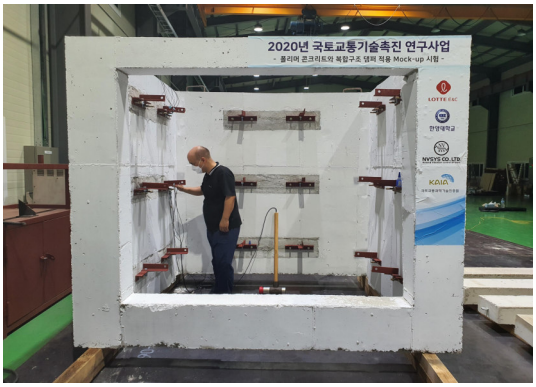
기존의 방식들은 콘크리트 슬래브 또는 벽면의 하부와 전면부에 위치하여, 약간의 변형을 발생하는 환경에서 진동을 저감시키는 경향이 있었으나, 대형 기계설비와 콘크리트의 하중 또는 상당히 큰 토압을 받는 구조에서는 기존 방진재의 물리적인 특성상 진동을 감쇠하기가 현실적으로 어려웠다. 그러므로, 본 기술개발을 통하여 기존 방진구조의 변환 없이 현재의 진동저감 기준을 만족시킬 수 있는 방안으로 사용되어 질 수 있으며, 종래의 일반 콘크리트와 방진소재에 비하여 물리적특성(탄성계수, 압축강도, 인장강도, 휨강도, 미끄럼저항성 등)이 뛰어날 뿐만 아니라 동특성도 우수하므로, 진동차단 효과가 우수한 바닥구조 시스템을 개발할 수 있을 것으로 판단된다. 이에 따라 비용의 절감 및 시공의 편리성 등으로 인하여 초고층 복합빌딩과 공동주택뿐만 아니라, 일반적인 건축물에도 광범위하게 적용이 가능할 것으로 판단된다.

다음은 본 과제로 도출된 기술의 활용방안을 분야별로 정리한 것이다.

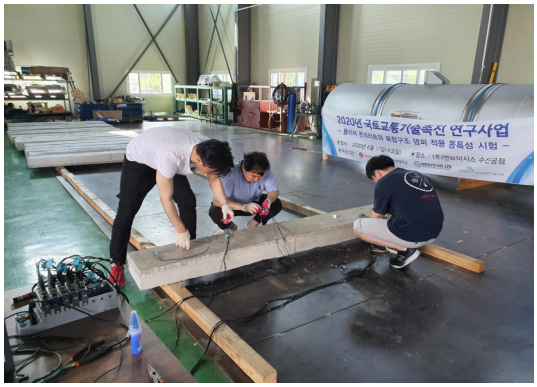
제 1 절 기술적인 측면

- 진동을 저감할 수 있는 폴리머 콘크리트와 복합구조 댐퍼를 개발함으로서 고층건물 및 지하구조물에서의 바닥구조시스템 및 지반진동 저감 벽체시스템이 가능하다.
  - 지하주차장 램프와 접촉되는 건물 내부의 진동을 줄이기 위한 마감재나 바닥재로 활용
  - 세대와 연결된 엘리베이터 벽체마감 및 대체재로 활용
  - 건물 내 또는 층간에 설치되는 공조실/기계실 바닥 마감재 및 기초로 활용
  - 교통으로 인한 지반진동전파 차단을 위한 복합구조댐퍼 진동저감 기술 실용화

- 본 연구로 개발된 바닥구조시스템은 진동성분 및 주파수에 따른 효과적인 진동 차단성능을 발휘할 수 있다.
- 본 연구의 결과는 사전 시뮬레이션 예측기술과 소음진동 측정기술을 총 집약하여 향후 초고층 복합빌딩과 공동주택의 설계 및 시공시 소음진동의 예측 및 방지설계를 통한 적재적소에 최적의 방진시스템 적용을 위해 긴요하게 이용될 수 있다.
- 기존의 방진재와 진동원에 대한 총괄적인 데이타베이스를 구축함으로서 향후 이 분야의 연구 확대에 귀중한 자료로 이용될 수 있을 것으로 판단된다.



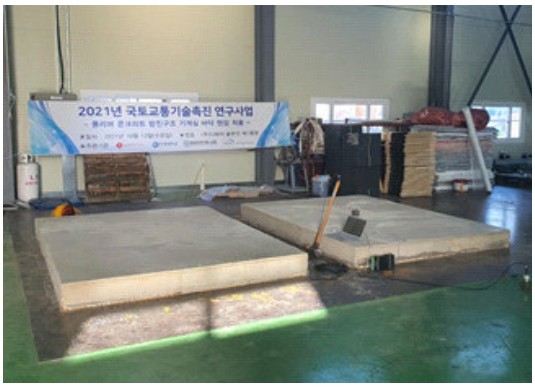
[엘리베이터 소음/진동 저감용 댐퍼]



[주차장 램프 소음/진동 저감용 댐퍼]



[지반진동 저감용 댐퍼]

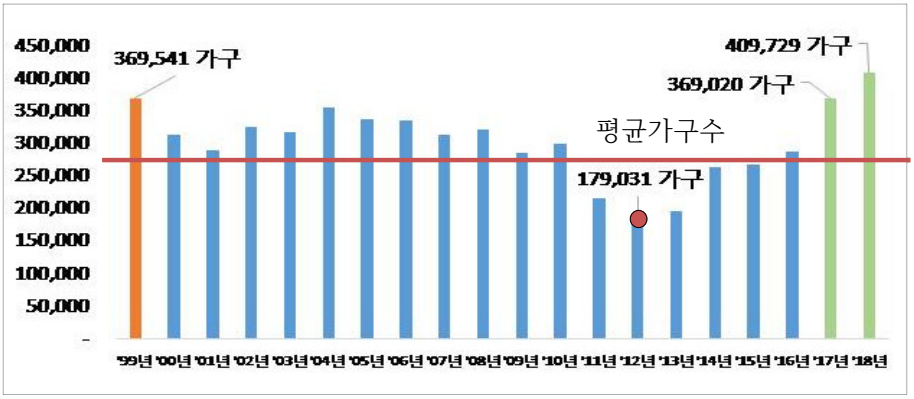


[기계실/공조실 소음/진동 저감용 댐퍼]

[개발된 친환경 댐퍼장치의 현장적용 Mock-up 시험]

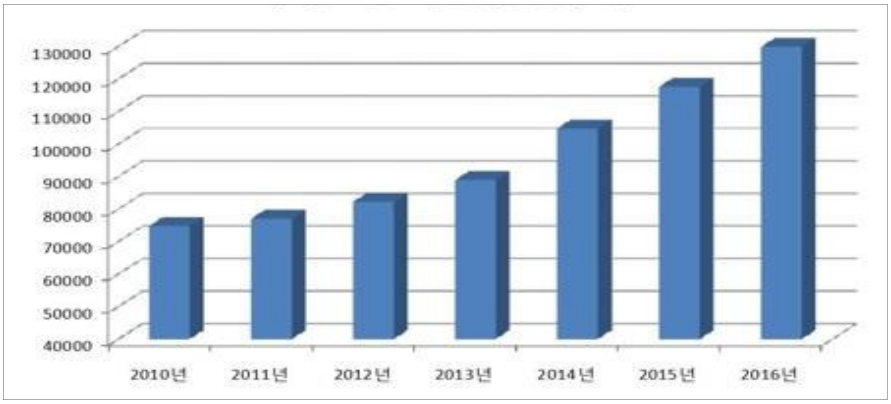
제 2 절 경제 · 산업적인 측면

1990년대까지 초고속 성장세를 보이던 국내건설시장이 2000년 초부터 본격적인 성숙기에 진입하면서, 건축물에 대한 내구성과 안전성에 관심이 높아지고 있다. 본 기술은 일반 콘크리트 구조물에 비해 균열 및 화악약품에 대한 저항성능이 뛰어나, 내구성이 3배 이상 우수하며, 특히, 구조소음과 진동저감 측면에서 2배 이상 우수하므로, 개발제품인 친환경 바닥구조체의 현장공급을 통해 소음진동으로 인해 제한받는 건축시공 현장에 대한 다변화 및 활성화가 가능하다. 개발 기술은 아파트, 호텔, 오피스텔 등의 지하주차장 램프 구간, 자동차 주행로, 엘리베이터 홀과 세대간 이음벽체, 객실 연결통로 바닥, 기계실 및 공조설비실 등의 구조소음과 진동발생이 예상되는 개소에 적용함으로써, 생활환경질 개선을 통한 친환경구현이 가능하다.



[전국 아파트 연도별 입주물량][1)] (단위 : 개)

1) 부동산 빅데이터 플랫폼 부동산 114

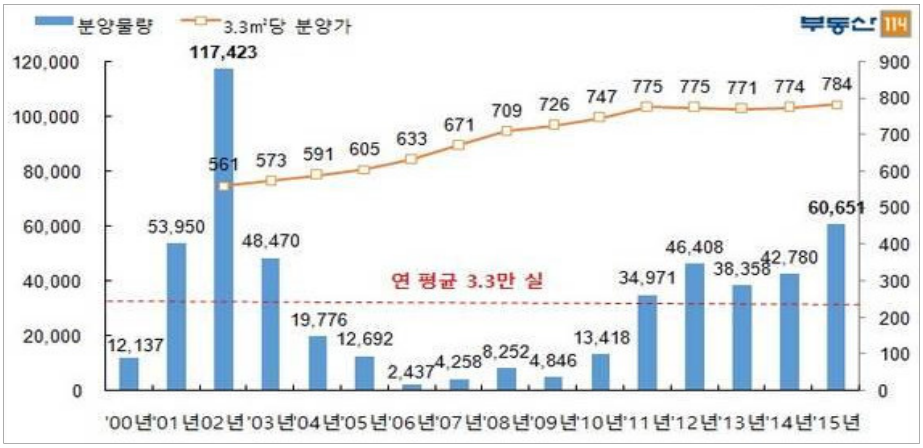


[국내 호텔 객실수][2] (단위 : 실, 만원)

[전국 아파트 입주물량과, 국내 호텔 객실수, 전국 오피스텔 분양물량]

그림은 연도별 전국 아파트 입주물량과, 국내 호텔 객실수, 전국 오피스텔 분양물량을 나타낸 것으로, 개발 기술이 적용될 수 있는 다양한 건축물로, 향후, 개발기술 시공, 품질관리, 성능 검측, 유지관리 등 관련 분야 일자리 창출이 가능할 것으로 예측된다.

표 1은 전국 아파트 연도별 입주물량을 대상으로, 본 기술을 적용했을 경우의 시장성 분석결과로, 매년 10% 성장하여 최대 80억까지 성장 잠재력이 있는 것으로 분석된다.



[전국 오피스텔 분양물량 및 분양가][3]

표 1. 폴리머 콘크리트 및 복합구조 댐퍼 방진재 현장적용 시장성 분석

검토대상(통계자료 추출)			친환경 진동저감 방진시스템 물량 산정				전체비용 (백만원)	시장성분석 전체물량 x 30%
			엘리베이터홀	지하주차장 램프면적	바닥면적 합계	물량		
아파트	최저가구수	179,000	537,000m^2	43,441m^2	580,441m^2	58,044m^2	5,224	1,567백만원/년
	평국가구수	270,000	810,000m^2	65,525m^2	875,525m^2	87,552m^2	7,880	2,364백만원/년
산정 기준	엘리베이터 홀 단위면적		6m^2	2호 조합 1개 사용 엘리베이터 홀 기준				
	지하주차장 램프 바닥면적		243m^2	2,000세대당 1개소 지하주차장 램프, 지하 2개층이 아파트 본동에 영향을 미치는 것으로 가정				
	메타복합 방진재 비용		90,000원/m^3	무근 콘크리트 대비 약 1.5배 산정				
	- 메타복합 방진시스템 물량은 100mm 무근콘크리트를 대체하는 것으로 최소 물량으로 고려함 - 시장성 분석은 소요물량 중 고급주택에 해당하는 상위 30% 주거시설에 적용하는 것을 기준 - 호텔을 포함한 오피스 시설, 오피스텔에서의 추가 물량은 고려하지 않음 - 매년 10% 성장하여 최대 80억까지 성장 잠재력이 있는 것으로 분석됨							

2) 문화체육관광부 자료
3) 부동산 빅데이터 플랫폼 부동산 114

제 3 절 사업화 방안

본 연구개발의 성과물은 기존의 일반 콘크리트와 방진패드(폴리우레탄, 고무)시스템과는 차별적인 진동차단 성능을 배경으로 이루어진 결과로써, 향후 초고층 복합빌딩과 공동주택의 진동차단 성능공사에 효과적인 진동차단 바닥구조시스템으로 활용할 수 있을 것이다. 특히, 본 개발의 성과물은 기계실 기초바닥 및 지하구조물 외벽 시공현장에 직접 적용되는 기술인만큼 경제성 및 시공의 용이성을 면밀히 검토하여 사업화 계획을 추진하고자 한다.

다음의 표 1은 기계실 기초바닥구조체의 시공가격을 일반 콘크리트 하부에 일반 방진패드와 폴리머 콘크리트 패드를 사용하였을 때로 구분해 시공가격을 비교하였다. 적용처에 따라 비용은 차이가 발생하겠지만, 일반적인 기계실 기초바닥 기준, 기존 방식대비 60%정도 경제성이 개선될 것으로 나타났다.

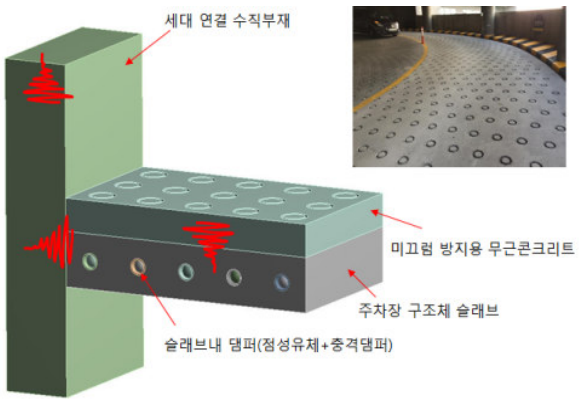
표 1. 진동저감 기초바닥구조체의 시공법에 따른 시공가격 비교 (단위 : 원/㎡)

구분	구조	시공가격		
		일반 콘크리트	방진패드 적용	폴리머 콘크리트 적용
재료	기초 바닥콘크리트 200㎜	16,000원	16,000원	16,000원
	방진패드 30㎜	-	180,000원	-
	폴리머 콘크리트 패드 30㎜	-	-	60,000원
총 계		16,000원	196,000원	76,000원

본 연구개발의 성과물로는 건물 기계실의 방진구조, 주차장 램프의 방진구조 시공방법, 건물 엘리베이터실의 방진구조 및 그 시공방법으로 3건의 특허출원과 2건의 특허 등록으로 기술을 보호받고 있는 상태이다. 본 연구개발 제품을 현장에 적용할 경우(표 1 참조), 기계실 기초바닥 기준으로 기존의 방진패드(폴리우레탄, 고무 등) 대비, 40~65% 이상 비용을 절감할 수 있다. 따라서, 본 연구의 성과기술은 추후 시공성 향상 등 현장 적용성을 향상시키기 위한 기술개발을 추가적으로 진행할 예정이다.

○ **지하주차장 램프와 접촉되는 건물 내부의 진동을 줄이기 위한 마감재나 바닥재로 활용**

- 안전을 위한 바닥 돌출 형상으로 인해 진동이 크게 발생, 이로 인한 구조 소음 민원 발생 증가 추세
- 지하주차장 램프바닥의 미끄럼 방지용 돌출을 없애지 않아, 안전성을 확보함과 동시에 진동저감 성능을 모두 만족하는 기술개발을 통한 특허기술 확보 및 기술이전을 통한 사업화 추진



[바닥 요철 형상에 따른 타이어 공진 모드와 노면 간의 상관관계 파악]

○ **세대와 연결된 엘리베이터 벽체마감 및 대체재로 활용**

- 시공 특성상 세대 벽체에 가이드 레일 고정이 필수적, 이로 인한 지속적인 구조소음 문제 발생
- 운행 안정성을 떨어뜨리지 않고 진동저감 가능 및 별도 방진 시공이 필요 없어 경제성 확보 가능
- 본 연구 성과를 적용한 엘리베이터 코어 설계시스템 실용화 및 기술이전을 통한 사업화 추진



[엘리베이터 소음/진동 저감용 친환경 댐핑구조체 적용 예]

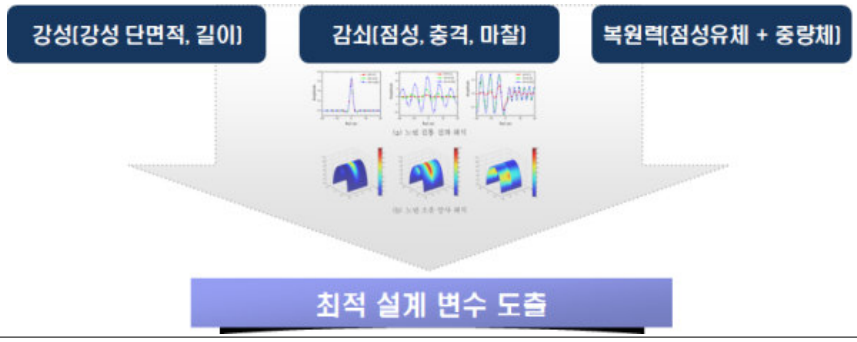
○ **복합구조 댐퍼적용 방진시스템의 최적화 설계기법**

- 본 연구를 통하여 개발될 복합구조 댐퍼적용 방진시스템은 강성, 감쇠력, 복원력 등 다양한 방진요소가 유기적으로 결합되어 있으며, 최소의 비용으로 목표 성능수준을 확보하기 위해서는 각 재료요소의 조합, 대상 구조물의 동적인 특성, 감쇠장치 설치가능 위치, 목표성능 등 다양한 설계변수를 고려한 합리적 설계가 필수적임.



○ **건물 내 또는 층간에 설치되는 공조실/기계실 바닥 마감재 및 기초로 활용**

- 진동이 지속적으로 발생해 세대내에 진동 영향을 주고 기계장비 방진 시, 공간 부족 등 제약사항 발생 증가
- 기계장비 방진과 더불어 효율적인 구조소음 저감 가능, 별도의 방진 공간이 필요 없어 다양한 기계에 적용 가능

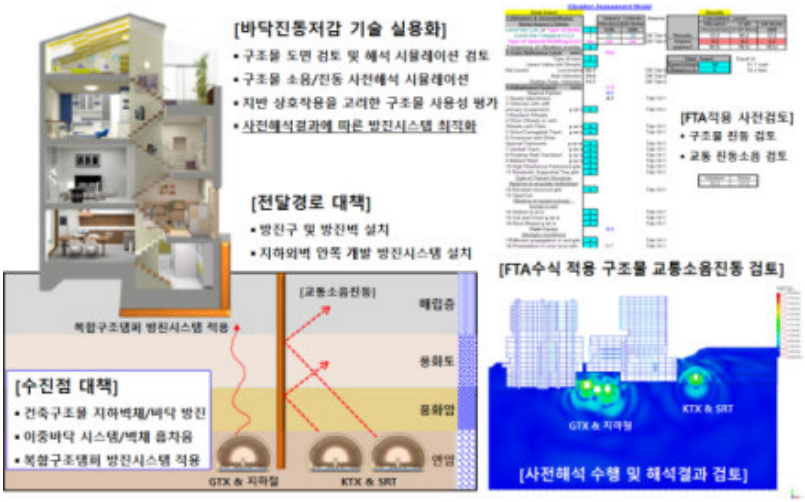


○ **다수의 인원과 운반차량 등의 이동동선에 대한 바닥 마감재로 활용성 확대**

- 별도의 구조 보강이나 진동 대책을 적용해야하나, 기존 기술은 바닥 높이 증대 등의 제약이 큼
- 본 기술은 이동동선에만 효율적으로 적용 가능하고, 바닥 높이 등 제약 사항을 최소화 하여 적용 가능

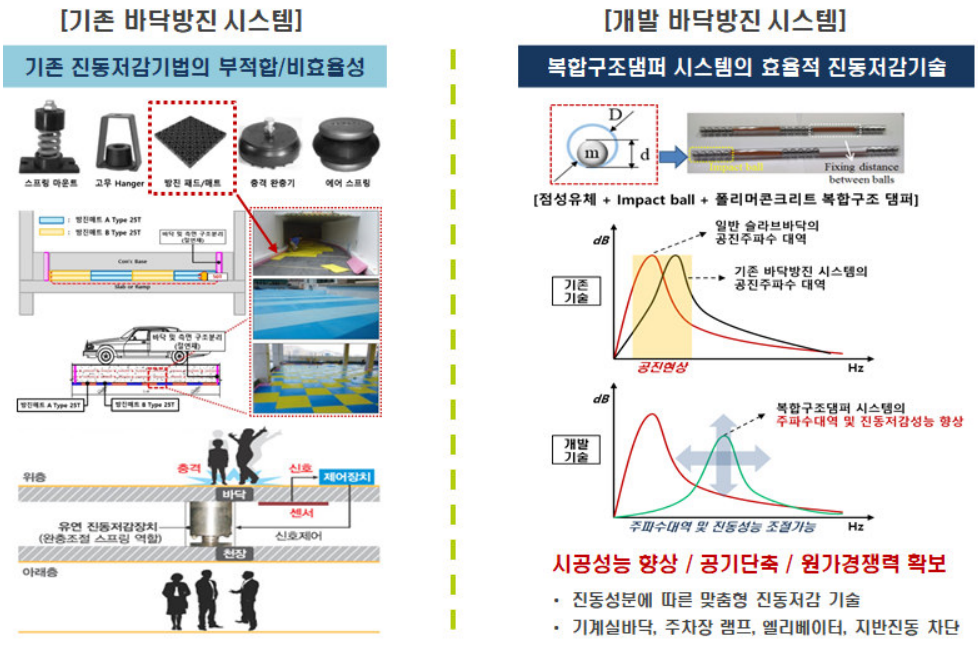
○ **교통으로 인한 지반진동전파 차단을 위한 복합구조댐퍼 바닥진동저감 기술 실용화**

- 국내에서 철도나 도로 인근 공동주택 구조물에 지반진동 영향이 발생함에 따라, 대부분의 공동주택 신설시, 방진매트를 건물벽체 외부에 설치하고 있으나, 효과가 미비하고, 시공시 제약이 있음
- 본 연구에서 제안하는 친환경 복합구조 댐퍼는 고속전철 및 GTX 지하철 등 교통시설 운행과정에서 발생할 수 있는 저주파 진동 및 충격을 저감할 수 있는 시스템으로, 방진매트 대체 사업화 추진



○ **개발된 폴리머 콘크리트와 복합구조댐퍼 진동저감 바닥방진시스템의 기술이전**

- 본 연구를 통하여 개발될 바닥방진시스템의 특허를 출원하고, 바닥방진기술을 필요로하는 기업에 이전함으로써, 개발된 기술의 실용화를 도모함.
- 개발된 폴리머 콘크리트와 복합구조댐퍼의 맞춤형 진동저감 바닥방진시스템의 현장적용을 통하여 시공성능 향상, 공기단축 및 원가절감을 실현함으로써 본 기술의 사업화를 실현함.



< 별첨 >

1. 참고문헌

1. W. G. Wong, Ping Fang, J. K. Pan. (2003), Dynamic properties impact toughness and abrasiveness of polymer-modified pastes by using nondestructive tests, Cement and Concrete Research, 33(9), 1371-1374.

2. F. Cortes and G. Castillo. (2007), Comparison between the dynamical properties of polymer concrete and grey cast iron for machine tool applications, Material and Design, 28(5), 1461-1466.

3. I.Y.Jang, H.B.Lee, K.J.Byun. (1992), Experimental study on the material characteristics and flexural behavior of ultra high strength concrete, Journal of the Korea Concrete Institute, 4(2), 111-118.

4. J. Wongpa, K. Kiattikomol, C. Jaturapitakkul, Chindaprasirt. (2007), Compressive strength, modulus of elasticity, and water permeability of inorganic polymer concrete, Material and Design, 31(10), 4748-4754.

5. Rajoria, H., and Jalili, N. (2005), Passive Vibration Damping Enhancement Using Carbon Nanotube-epoxy Reinforced Composites, Composites Science and Technology, 65(14), 2079-2093.

6. Jeon, W., and Lee, J. Y. (2016), Efficient Damping of Vibration Using and Acoustic Black Hole, Proceedings of the KSNVE 2016 annual Spring Conference, 202-203.

7. Yoo, S. Y., Yeon, J. O. and Jeon, J. Y.(2009), Analysis and Evaluation of Impact Sound Insulation of Concrete Floor Structures in Response to Characteristics of Heavy-weight Impact Sources, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, 19(10), 1062-1068.

8. Lee, W. H., Ivan, R., Haan, C. H., Han, S. H. (2009), Pilot Experiments of Estimated Proper Ratio of Latex Polymer Concrete for Reducing Floor Impact Sound, Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, 532-533.

9. Cho, H. N.(2000), Flexural Behavior of Damaged Reinforced Concrete Beams repaired wity Epoxy Mortar, Master's Thesis of Ewha University.

10. Kwon, S. M, Ahn, S. K, Koh, H, I and Park, J, H. (2018), Analysis of Dynamic characteristics of complex polymer concrete according to structure of polymer concrete, Proceedings of the KSNVE 2018 annual Spring Conference, 202.

11. C. Y. Park and B. Y. Sohn.(1997), Estimation of loss energy from the measurement returning time of rebound for carbon black-filled natural rubber compounds, Journal of Korean Inst. Chem. Eng, 35, 154.

12. Saliba, J., Roziere, E., Grondin, F., and Loukill, A. (2011), Influence of Shrinkage-Reducing Admixture on Plastic and Long-Term Shrinkage, Cement and Concrete Composites, 33(2), 209-217.

13. Kobayashi, T and Ohama Y. (1984), Low-Temperature Curing of Polymethyl Methacrylate Polymer Concrete, Transportation Research Record 1003, Transportation Research Board(ISSN: 0361-1981),15-18.

14. Ahn, N., Park, D. K,. Lee, J and Lee, M. K. (2009), Structureal Test of Precast Polymer Concrete, Journal of Applied Polymer Science, 114(3), 1370-1376.

15. Ahmad, S., Elahi, A., Barbhuiya, S. A., and Farid, Y. (2012), Use of Polymer modified mortar in controlling cracks in reinforced concrete beams, Construction and Building Materials, 27, 91-96.

16. Joo, M. J., Lee, Y. S., Hong, G. S., Hong, Y. K., and Choi, O. C. (1997), An Evaluation on the Flexural Strength of Concrete Beams Repaired by Polymer resin, Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, 1(10, 107-112.

17. Sheng, X., Jones, C. J., and Petyt, M. (1999), Ground Vibration Generated by a Load Moving along a Railway Track, Journal of Sound and Vibration, 228(1), 129-156.

18. Kim, J. J., and Kim, J.(2020), Analytical Study on Vibrational Properties of High Damping Polymer Concrete, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, 24(5), 119-125.

19. Lee, J. S., Lee, J. H. (2006), Development of Ventilation Isolation Design and Material for Vibration Reduction of Road Passing through Buildings, Noise and Vibration Engineering, 2006(1), 991-996.

20. Igolkin, A., Rodionov, L., Balyaba, M., & Rodionova, E. (2020, September). Elevator Equipment Noise Reduction in Multi-Apartment Buildings. In 2020 International Conference on Dynamics and Vibroacoustics of Machines (DVM) (pp. 1-5). IEEE.

21. Oh, Y., Kang, M., Lee, K., & Kim, S. (2020). Construction management solutions to mitigate elevator noise and vibration of high-rise residential buildings. Sustainability, 12(21), 8924.

22. Ahn, S., Jeon, E. B., Koh, H. I., Kim, H. S., & Park, J. (2016). Identification of stiffness distribution of fatigue loaded polymer concrete through vibration measurements. Composite Structures, 136, 11-15.

23. Ahn, S., Kwon, S., Hwang, Y. T., Koh, H. I., Kim, H. S., & Park, J. (2019). Complex structured polymer concrete sleeper for rolling noise reduction of high-speed train system. Composite Structures, 223, 110944.

24. Kim, J. J., & Shim, H. B. (2019). Experimental Study on Vibration Reduction Characteristics of Polymer Concrete. Journal of the Korea institute for structural maintenance and inspection, 23(7), 58-65.

25. Bedi, R., Chandra, R., & Singh, S. P. (2014). Reviewing some properties of polymer concrete. Indian Concrete Journal, 88(8), 47-68.

26. Golestaneh, M., Amini, G., Najafpour, G. D., & Beygi, M. A. (2010). Evaluation of mechanical strength of epoxy polymer concrete with silica powder as filler. World Applied Sciences Journal, 9(2), 216-220.

27. Niaki, M. H., Fereidoon, A., & Ahangari, M. G. (2018). Experimental study on the mechanical and thermal properties of basalt fiber and nanoclay reinforced polymer concrete. Composite Structures, 191, 231-238.

28. Jeon, E. B., Ahn, S., Lee, I. G., Koh, H. I., Park, J., & Kim, H. S. (2015). Investigation of mechanical/dynamic properties of carbon fiber reinforced polymer concrete for low noise railway slab. Composite structures, 134, 27-35.

29. Park, J. (2005). Transfer function methods to measure dynamic mechanical properties of complex structures. Journal of sound and vibration, 288(1-2), 57-79.

30. Roh, S. K., Kim, E., Oh, J. S., & Cho, J. U. (2019). An Analysis on the Effect of Application on Vibration Isolation Liner of Elevator Guide Rail Bracket. Journal of the Korea Convergence Society, 10(8), 145-151.

31. C. Song, S. Lee, and Y. Cho. (2007). An experimental study of friction coefficient variation due to vibration for bolted joint. Tribology and Lubricants, Vol. 23, No. 2, pp. 61-65.

32. M. Kim, S. Choi, W. Ahn, S. Lee, and I. Yang. (2020). Experimental study on the clamping force of torque shear type high strength bolts according to the temperature. Journal of Korean Society of Steel Construction, Vol. 32, No. 1, pp. 23-30.

33. H. Lee, H. Nah, K. Kim, S. Kim, and S. Kim. (2010). Development of the method for inspecting the clamping force of torque shear bolts using the electricity energy of electric torque wrench. Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, Vol. 14, No. 6, pp. 162-170.

34. H. Nah, H. Lee, J. Kim, K. Kim, and W. Kim. (2009). Method for estimating the clamping force of high strength bolts subjected to temperature variation. International Journal of Steel Structures, Vol. 9, No. 2, pp. 123-130.

35. R. Miao, R. Shen, S. Zhang, and S. Xue. (2020). A review of bolt tightening force measurement and loosening detection. Sensors, Vol. 20, No. 11, pp. 3165.

36. K. Jhang, H. H. Quan, J. Ha, and N. (2006). Kim. Estimation of clamping force in high-tension bolts through ultrasonic velocity measurement," Ultrasonics, Vol. 44, e1339-1342.

37. Thompson, D. J. (2008). A continuous damped vibration absorber to reduce broad-band wave propagation in beams, Journal of Sound and Vibration, Vol. 311, pp. 824-842.

38. Bae, Y. H. and Kim, M. C. (2013). Conformity assessment of vertical static stiffness test method for rail pad, Journal of the Korean Society for Railway, Vol. 18, pp. 33-42.

39. Park J. H. (2005). Transfer function methods to measure dynamic mechanical properties of complex structures, Journal of Sound and Vibration, Vol. 288, pp. 57-79.

40. Kim S. J. and Park J. H. (2006). Measurement of dynamic properties of concrete structures using beam transfer function method, Korean Society for Noise and Vibration Engineering, KSNVE06A-29-05, pp. 913-916.

41. Ryue J. S. and Jang S. H. (2013). Comparison of track vibration characteristics for domestic railway tracks in the aspect of rolling noise, Journal of the Korean Society for Railway, Vol. 16, pp. 85-92.

[뒷면지]

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통과학기술 연구개발사업 '폴리머 콘크리트와 복합구조 댐퍼를 활용한 친환경 바닥진동저감 기술개발' 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.