

16CTAP
-C0981
12-02

스프링-감쇠시스템을 활용하여 진동 5dB(V) 이상
저감이 가능한 철도역사 승강장용 구조시스템 기술 개발

최종 보고서

2017

국토교통부

국토교통과학기술진흥원

국토교통기술촉진연구사업 R&D Report

보안 과제(), 일반 과제() / 공개(), 비공개()
국토교통기술촉진연구사업 제2차 연도 최종 보고서

발간등록번호

11-1613000-002005-01

R&D / 16CTAP-C098112-02

스프링-감쇠시스템을 활용하여 진동 5dB(V)이상 저감이 가능한 철도역사 승강장용 구조시스템기술개발 최종보고서

2017 . 06. 23.

주관연구기관 / 한국교통대학교
협동연구기관 / 에스코알티에스(주)

국토교통부

(전문기관) 국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통과학기술진흥원장 귀하

‘스프링-감쇠시스템을 활용하여 진동 5dB(V)이상 저감이 가능한 철도역사 승강장용 구조시스템기술 개발’(연구개발 기간 : 2015.06.24 ~ 2017.06.23) 과제의 최종보고서 13부를 제출합니다.



06. 23.

주관연구기관명 : 한국교통대학교 (대표자) 백 중 배
협동연구기관명 : 에스코알티에스 (대표자) 조 영 철
참여기관명 : (대표자)



주관연구기관책임자: 최 상 현
협동연구기관책임자: 이 찬 영
참여기관책임자:

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제38조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	16CTAP-C098112-02	해당 단계 연구 기간	2016.06.24.~ 2017.06.23	단계구분	20160624~20170623/ 20150624~20170623
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명				
연구과제명	대과제명	스프링-감쇠시스템을 활용하여 진동 5dB(V)이상 저감이 가능한 철도역사 승강장용 구조시스템기술 개발			
	세부과제명				
연구책임자	최 상 현	해당단계 참여 연구원 수	총: 14 명 내부: 6 명 외부: 8 명	해당단계 연구개발비	정부:200,000천원 기업:70.000천원 정부 외: 천원 계:270,000천원
		총 연구기간 참여 연구원 수	총: 14 명 내부: 6 명 외부: 8 명	총 연구개발비	정부:400,000천원 기업:140,000천원 정부 외: 천원 계:540,000천원
연구기관명 및 소속 부서명	한국교통대학교			참여기업명	(주)에스코알티에스
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위탁연구	연구기관명:			연구책임자:	
이 연구의 목적은 역사 내 승강장을 부가질량으로 고려하여 기존 의 TMD(Tuned Mass Damper, 동조질량감쇠기)개념을 확장하고, 관련 해석기법과 진동저감 기술을 개발하여 Bench Scale 규모의 실험 수행을 통해 최적화 설계기법 개발 및 스프링-감쇠시스템의 성능 검증을 진행함으로써 적용 전 대비 적용후 5dB(V) 이상 진 동 저감효과를 갖는 승강장용 구조시스템 기술 개발하는 것이다. 승강장의 TMD화는 승강장 하부에 스프링-감쇠시스템을 설치하 여 승강장 질량과 일체화시켜 구현하며, 실제 철도역사에 적용성 을 감안하여 Multi TMD 기술에 기반한 알고리즘을 개발하였다. 철도역사 구조물과의 공진을 통해 필연적으로 발생하는 승강장 상부의 진동은 Dual Layer TMD 기술을 이용하여 기존 승강장 수준으로 저감하였다. 철도역사 진동저감 성능은 상용프로그램인 ABAQUS를 이용한 수치해석 및 Bench Scale 실험을 이용하여 검토하였다.				보고서 면수	

〈 국문요약문 〉

연구의 목적 및 내용	■ 연구의 목적 ○ 연구개발 최종목표 역사 내 승강장을 부가질량으로 고려하여 기존의 TMD개념을 확장하고, 관련 해석 기법과 진동저감 기술을 개발하여 bench scale 규모의 실험 수행을 통해 최적화 설계기법 개발 및 스프링-감쇠시스템의 성능 검증을 진행함으로써 적용 전 대비 적용 후 5dB(V) 이상 진동 저감효과를 갖는 승강장용 구조시스템 기술을 개발함. ○ 1차년도 연구목표 - 상호작용 모델링 인터페이스 요소 검토 - TMD화 이론적용 모델작성 및 해석기법 개발 - 스프링-감쇠 장치 개발 - 승강장 스프링-감쇠 시스템 기술 개발 ○ 2차년도 연구목표 - TMD화 이론적용 모델 작성 및 해석기법 개발 - 스프링-감쇠 장치 개발 - 승강장 스프링-감쇠 시스템 기술 개발 ■ 연구의 내용 ○ 상호작용 모델링 인터페이스 요소 검토 - 기존 상호작용해석 조사 및 기법별 분류 - 상호작용 해석을 위한 인터페이스 사항 검토 ○ TMD화 이론적용 모델작성 및 해석기법 개발 - 철도역사 종류별 분류 및 영향인자를 고려한 대표역사 선정 - TMD 이론을 확장한 승강장의 TMD화 해석모델 작성 및 해석 수행 · TMD적용 철도역사 상호해석기법 고도화 · 다양한 역사형식(도시/일반/고속/경전철, 기존/신설)에 따른 적용방안 검토 - 실험을 통한 모델 고도화 · 해석모델 개선기법 조사 및 분석 · 실험데이터를 이용한 해석모델 개선 ○ 스프링-감쇠 장치 개발 - 기존 스프링-감쇠 장치 조사 - 스프링-감쇠 장치 시험품 설계, 제작 및 성능시험 - 스프링강성 및 감쇠계수 설계값 발현도 확인 ○ 스프링-감쇠 승강장 시스템 기술 개발 - Bench scale 시험품 설계 - Bench scale 시험 절차 수립 - Bench 규모 시험체 설계 및 제작 - Bench 규모 시험체 진동 시험 및 진동저감 성능 평가
연구개발성과	○ 상호작용 모델링 인터페이스 요소 검토[논문게재 1건] - 기존 상호작용 해석 조사 및 기법별 분류(조사보고서 1건) - 상호작용 해석을 위한 인터페이스 사항 검토(검토보고서 1건) · 학술지 게재 1건(한국방재학회 논문집 2016년 4월호) ○ TMD화 이론적용 모델 작성 및 해석기법 개발[특허출원 1건, 논문게재 3건] - 철도역사 종류별 분류 및 영향인자를 고려한 대표역사 선정(검토보고서 1건) - TMD화 이론 적용 모델 작성 및 해석 수행(해석보고서 1건, 논문게재 2건) - 실험을 통한 모델 고도화(검토보고서 1건, 논문게재 1건) · 특허 1건(진동저감형 철도역사 및 그 시공방법) · 학술지 게재 3건(한국방재학회논문집 2017년 4월호/10월호, 한국복합신소재구조학회논문집 2017년 6월호) · 학술대회 발표 5건(2016년 방재학회, 철도학회, ART; 2017년 IMAC, 한국복합신소재구조학회) ○ 스프링-감쇠 장치 개발[특허출원 1건] - 기존 스프링-감쇠 장치 조사(조사보고서 1건) - 스프링-감쇠 장치 시험품 설계, 제작 및 성능시험(특허출원 1건) - 스프링강성 및 감쇠계수 설계값 발현도 확인(성능시험평가보고서 1건) · 특허 1건(진동저감형 철도역사 및 이를 위한 스프링-마찰댐퍼) ○ 승강장 스프링-감쇠 시스템 기술 개발[특허출원 1건, 논문게재 1건] - Bench scale 규모 시험체 설계 및 제작(시험체 1건, 특허출원 1건) - Bench scale 규모 시험체 진동 시험 및 진동저감 성능 평가(성능시험평가보고서 1건, 보고서(설계도) 1건, 논문게재 1건) · 특허 1건(철도승강장 설치구조와 이를 갖는 철도역사 및 철도승강장의 이종동조질량감쇠 진동감쇠방법) · 학술지 게재 1건(한국복합신소재구조학회 논문집 2017년 6월호)

연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	○ 다양한 역사구조물과 승강장 형식에 대하여 수치해석을 통한 승강장의 동조질량감쇠기화 설계 기법 개발은 기존의 역사 진동저감방안 관련 연구내용과 연계하여 현장에 적용이 가능함 ○ 철도역사와 승강장의 형식 조사 및 분석을 통하여 기존 역사의 현장여건에 따른 분류 및 설계안을 제시하고, 공사비용 등을 고려하여 우선적으로 개선해야 할 순위 제공에 활용 가능함 ○ 기존 방진 기술은 운용 중인 역사에 적용 시 열차운행을 중단하거나 영업에 큰 불편함이 있었으나, 본 과업의 결과물은 열차운행 지장이 적고 시공비용도 경제적임 ○ 경제수준의 향상에 따른 국민들의 정온한 환경에 대한 요구가 커짐에 따라 소음·진동의 민원이 증가하고 있음을 감안할 때, 주요역사와 소음·진동 레벨이 높은 역사에 개발될 시스템을 적용할 경우 높은 부가가치를 얻을 수 있을 것으로 예상됨. ○ 기존 역사의 소음·진동 저감을 위한 기존 기술의 비용이 과대함으로 인하여 많은 수의 역사가 개선의 어려움을 겪고 있음. 본 과업을 통하여 개발된 진동저감 기술을 적용 시 저비용, 고효율의 방진시공이 가능할 것으로 기대됨. ○ 방음·방진기술은 강소 중소기업형의 기술로 본 과업을 통하여 개발된 기술의 이전을 통한 관련 중소기업의 기존 역사 개량 사업 수행 시 큰 액수의 시장창출 가능. ○ 본 과업을 통하여 개발될 진동저감시스템은 기존 및 신설역사 모두 적용 가능하므로 사업화에 대한 국내 시장규모는 상당함				
핵심어 (5개 이내)	철도역사	승강장	진동저감	스프링-감쇠시스템	동조질량감쇠기

◁ SUMMARY ▷

Purpose & Contents	■ Objective of the Research ○ Final objective of research and development Developing the structural system technique for a platform in a railway station, able to decrease the vibration level over 5dB(V), by extending existing TMD concept via considering the platform as an additional mass, developing vibration reduction technique with related analysis as well as optimized design methods, and verifying the performance of the spring-damper system via conducting bench-scale tests. ○ First year research objective - Reviewing interaction modeling and interface factor - Constructing theoretical TMD model and developing analysis technology - Developing a spring-damper device - Developing spring-damper platform system technology ○ Second year research objective - Developing a model based on TMD theory and analysis method - Developing a spring-damping device - Developing platform spring-damping system technique ■ Contents of the Research ○ Reviewing interaction modeling and interface factor - Investigating and classifying existing interaction analysis methods - Reviewing interface factors for interaction analysis ○ Developing a model based on TMD theory and analysis method - Constructing a model based on TMD theory and conducting analysis - Upgrading interaction analysis technique for a railway station with TMD - Reviewing application method for various railway stations - Updating a model using test data - Investigating and analyzing model updating methods - Updating a model using test data ○ Developing a spring-damper device - Investigating existing spring-damper devices - Designing and building a spring-damper device and conducting a performance test - Conducting a performance test for the spring-damper device ○ Developing a spring-damper platform system technology - Designing and Constituting a bench-scale test specimen - Performing dynamic test on the bench-scale test specimen - Evaluating vibration reduction performance
Results	○ Reviewing interaction modeling and interface factor [1 paper] - Investigating and classifying existing interaction analysis methods (1 review report) - Reviewing interface factors for interaction analysis (1 paper, 1 review report) ○ Developing a model based on TMD theory and analysis method [1 patent applications, 3 papers] - Classifying railway station types and selecting a representative station considering influence factors (1 report) - Constructing a model based on TMD theory and conducting analysis (1 report, 2 papers) - Updating a model using test data (1 paper, 1 review report) ○ Developing a spring-damper device [1 patent application] - Investigating existing spring-damper devices (1 review report) - Designing and building a spring-damper device (4 specimens, 1 patent application) - Conducting performance test for the spring-damper device (1 performance test report) ○ Developing a spring-damper platform system technology [1 patent application, 1 paper] - Constituting a bench-scale test specimen (1 specimen, 1 patent application) - Performing dynamic test on the bench-scale test specimen (1 performance test report) - Evaluating vibration reduction performance (1 report with drawings, 1 paper)
Expected Contribution	○ For various railway station structures and platforms, the developed platform TMD design method based on numerical analysis is applicable to field relating to existing research results on station vibration measures. ○ Using the investigation result on railway stations and platforms, existing stations can be classified and appropriate design can be proposed. Also, considering construction costs, application order can be determined. ○ Unlike most existing anti-vibration methods only applicable during train operation interruption or causing disruption, the developed system can be applied with little inconvenience and cost-effective. ○ Considering increment of noise and vibration related complaints as demand for silent environment grows due to economic level improvement, the developed system can add value to major stations and stations with high noise and vibration level. ○ The developed system allows low cost and high effective anti-vibration construction, while existing techniques has difficulties in wide-application due to high cost. ○ The anti-noise and vibration technology belongs to strong small business, and, through technology transfer, big market creation is possible for medium and small businesses. ○ Since the anti-vibration system to be developed in this project is applicable to existing and new stations, if commercialized, considerable domestic market would be created.
Keywords	railway station platform vibration reduction spring-damper system tuned mass damper

< CONTENTS >

1. Introduction	9
2. Status of Domestic and Foreign Technical Development	13
3. Contents and Result of the Research	22
4. Objective Attainment and Contribution to Related Area	100
5. Use Plan of the Research Result	102
6. Obtained Foreign Technical Information during Research	104
7. Security Level of Research Result	104
8. Equipment Status Registered to National Science and Technology System	104
9. Safety Measure Performance to Lab. during Research	104
10. Representative Research Result of the Research Project	105
11. Miscellaneous	106
12. References	106

< 목 차 >

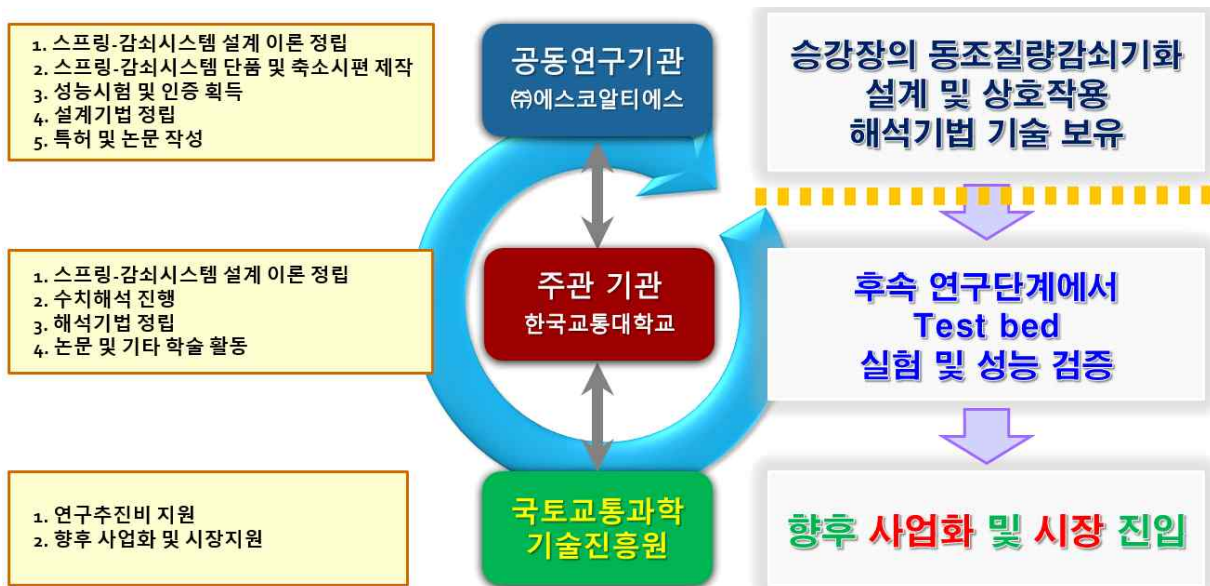
1. 연구개발과제의 개요	9
2. 국내외 기술 개발 현황	13
3. 연구 수행 내용 및 성과	22
4. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	100
5. 연구개발성과의 활용 계획	102
6. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보	104
7. 연구개발성과의 보안등급	104
8. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황	104
9. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적	104
10. 연구개발과제의 대표적 연구 실적	105
11. 기타 사항	106
12. 참고 문헌	106

제1장. 연구개발과제의 개요

1. 연구개발 목적

□ 이 연구의 목적은 역사 내 승강장을 부가질량으로 고려하여 기존의 TMD(Tuned Mass Damper, 동조질량감쇠기) 개념을 확장하고, 관련 해석기법과 진동저감 기술을 개발하여 Bench Scale 규모의 실험 수행을 통해 최적화 설계기법 개발 및 스프링-감쇠시스템의 성능 검증을 진행함으로써 적용 전 대비 적용후 5dB(V) 이상 진동 저감효과를 갖는 승강장용 구조시스템 기술을 개발하는 것임.

- 상호작용 모델링 인터페이스 요소 검토
- TMD화 이론적용 모델 작성 및 해석기법 개발
- 스프링-감쇠 장치 개발
- 스프링-감쇠 승강장 시스템 기술 개발



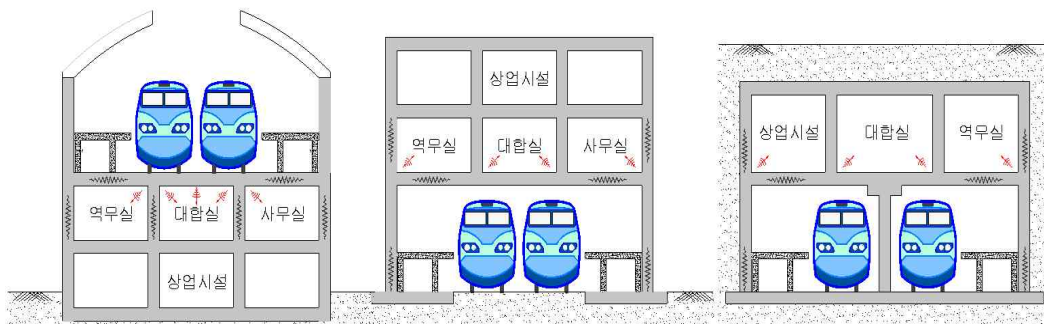
2. 연구개발의 필요성

- 가. 국가 경제가 발전하고 인구의 도시 집중이 심화됨에 따라 도심 지역의 교통 문제를 완화하기 위한 대책의 일환으로 정시성과 대량수송성, 에너지효율성 등의 장점을 갖춘 도시철도망이 꾸준히 확충되어 왔음.
- 나. 철도는 도로 산업에 비해 에너지 효율성 및 환경오염에 대한 사회적비용 등 경제적 가치뿐만 아니라, 타 교통수단에 비하여 지형, 생태 등 자연환경에 대한 영향 측면에서도 많은 이점이 있으나, 최근 열차의 고속화 및 증편, 콘크리트 궤도로의 점진적인 교체, 신설 및 개량노선의 증가로 소음·진동에 대한 민원이 증가하는 추세임.
- 다. 도시에 건설된 철도에 대한 대부분의 소음관련 민원은 진동에 의한 구조소음 (Structure Borne Noise)이며, 열차통과로 인한 구조물의 진동이 주요원인으로 나타난 바 있음(이흥기 등, 2014).
- 라. 특히 철도역사의 경우 역사 공간 활용차원에서 다양한 상업(백화점, 마트 등), 업무시설 등이 증가하고 있으며, 열차 이용객 및 종사자의 환경에 대한 만족도 기대수준이 높아지고 있어 역사 내부의 소음·진동 대책이 시급한 상황임.



<주요 역사 진동현황 (신정열 등, 2012)>

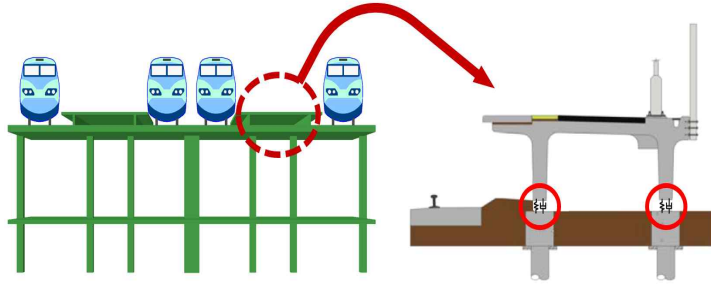
- 마. 진동 문제는 건물에 미치는 직접적인 피해뿐만 아니라 2차적인 소음 문제를 유발하는 원인이 되고 있으므로 초기 설계단계 및 개통 이후에도 이러한 현상에 대한 예측 및 방지 기술을 확보할 경우 정온한 환경 유지를 통하여 역사 내부 뿐 아니라 인접 건물에 대한 민원을 최소화하고 공간가치 상승 등 경제적인 효과를 극대화할 수 있음.



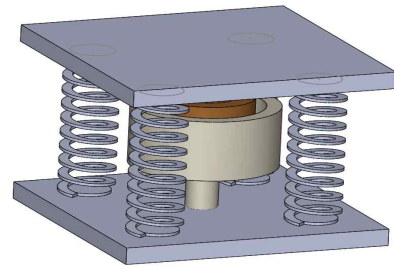
<철도역사 형식별 진동전달 특성 (좌측부터 선하, 선상, 지하 역사)>

바. 철도역사의 소음·진동을 저감하기 위하여 플로팅궤도, 진동절연 등 궤도와 구조물에 적용할 수 있는 진동저감 공법에 대한 연구가 완료 또는 진행되고 있으나, 열차운행 지장, 과도한 시공비용 등의 단점으로 제한적으로 적용되고 있음.

사. 이 연구는 철도역사의 승강장과 승강장 기초 사이에 스프링-감쇠 시스템을 적용하고 승강장의 질량을 이용한 TMD화 하여 철도역사의 진동을 저감시키는 방법으로 기존 및 신설, 지상 및 지하, 선하 및 선상 등 모든 종류의 역사에 적용 가능한 기술임.



<철도역사 승강장의 TMD화 적용 개념도>



<스프링-감쇠시스템 개념도>

자. 부가질량을 적용한 TMD 기법은 건축/교량 구조물의 진동을 저감시키기 위해 널리 사용되어온 간편하며 효율적인 진동제어 방법으로 부가적인 전원 및 에너지 소산이 없어 가장 신뢰성이 높은 방법임.

차. TMD 기술을 철도 승강장에 적용 시 별도의 부가질량 설치가 필요 없어 간편하게 적용 가능하며, 단순 구조체였던 승강장을 적극 활용할 수 있어 기술적인 가치가 크고 전 세계적으로 적용된 바 없는 독보적인 기술이므로 국내 뿐 아니라 해외 시장으로의 진출 가능성도 높음.

3. 연구개발 범위

□ 이론적 배경조사

- 기존 TMD 이론과 적용사례 조사 및 정리
- TMD설계 및 적용기법 검토
- 승강장과 역사구조물 상호인터페이스 핵심 기술 도출
- 승강장을 부가질량으로 고려하여 기존의 TMD 개념 확장
- 설계시 고려되는 영향인자 분석 및 정리

□ 수치해석 모델 작성

- 철도역사 종류별 분류
- 대표 역사 구조 선정 및 근거 제시
- 승강장 형식 조사 및 분석
- 스프링-감쇠시스템의 개수 및 배치 간격에 따른 다양한 해석모델 작성
- 실제 역사크기에 적용할 스프링 감쇠시스템 모델 작성
- Bench Scale 실험을 수행할 대상역사의 수치해석 모델 작성

□ 시뮬레이션을 통한 성능실험용 스프링-감쇠 시스템의 설계 및 실험

- 다양한 해석모델형상에 열차하중을 주어 진동해석 수행
- 여러 모델의 해석결과를 비교하여 진동저감효과에 영향을 주는 결정인자 검토
- 시스템의 효과적인 진동저감성능을 발휘하기 위한 형상 설계
- 성능검증용 시제품 제작 및 실험 수행
- 강성 및 감쇠계수의 설계 값 발현도 확인

□ Bench Scale규모의 스프링-감쇠시스템 설계 및 실험

- 시뮬레이션을 통해 Bench Scale실험 모형에 적용할 스프링-감쇠시스템의 강성, 감쇠계수 등 물성치 결정
- 실험에 적용할 스프링 감쇠시스템의 개수 및 배치간격 산정
- 실내실험을 수행하고 스프링 감쇠시스템 적용 전·후를 비교하여 진동저감효과 검토

□ Bench Scale규모의 실험결과를 이용한 수치해석 모델 개선

- 수치해석에서 고려한 영향인자와 실제 실험을 통해 얻은 영향인자 비교
- 실험결과로 얻은 결과값을 이용하여 수치해석 모델 개선

□ 스프링-감쇠시스템 최적화 설계 및 해석기법 개발

- 수치해석 및 실험을 통하여 승강장의 TMD화를 위한 스프링 감쇠시스템의 강성, 감쇠계수, 시스템 개수 및 간격을 결정하는 최적화 설계 기법 개발
- 다양한 역사구조 및 승강장 형태에 따른 상호작용 효과 검토와 최적화 설계 및 해석기법 개발

제2장. 국내외 기술 개발 현황

1. 관련 분야의 국내외 연구동향 및 학술적 성과

가. 국가 연구개발사업 유사연구 실적

(1) 연구개발과제의 중복방지를 위한 조사 및 검토결과 (단위 : 억원)

부처명	사업명	과제명	예산	비 고
국토해양부	차세대 고속철도 기술개발사업	저진동 궤도(플로팅 슬래브 궤도) 개발 및 특수교량 성능향상 기술개발	36.5	'07.7~' 12.09
국토해양부	건설기술 연구사업	건물을 통과하는 도로 및 철도 진동의 방진설계 및 방진재료개발 연구	2.4	'00.09~' 03.09
국토해양부	철도기술 연구사업	역사 구조물 소음/진동 저감기술 개발	40	'13.12~' 17.12

(2) 연구개발과제의 차별화 방안

유사과제명	주요내용	차별성
저진동 궤도 (플로팅 슬래브 궤도) 개발 및 특수교량 성능향상 기술개발	- 함안정거장에서 이산지지형의 고무 방진마운트와 전면지지 방식의 고무매트 방식의 플로팅 슬래브를 적용하여 비교 분석 - 순수 국내 기술을 바탕으로 하는 플로팅 슬래브 궤도용 방진시스템 개발을 위한 방진마운트 최적설계 및 제작, 방진장치 시공성, 교체성 등을 고려한 시스템 개발	- 다양한 종류의 철도역사의 구조적 진동을 저감할 수 있는 방진시스템 설계기법 개발 - 역사 내 승강장과 승강장 기초 사이에 스프링과 감쇠시스템을 적용하여 승강장의 질량을 이용한 TMD화 하여 철도역사의 진동을 저감시키는 시스템 설계기법 개발
건물을 통과하는 도로 및 철도 진동의 방진설계 및 방진재료개발 연구	- 도로 교통에 대한 건물의 진동 해석 및 방진매트 적용	- 도로 교통이 아닌 철도 교통을 중심으로 철도역사에 대한 진동 해석과 실내시험을 하는 연구로 기존 연구와 차별화하여 수행
역사 구조물 소음/진동 저감기술 개발	- 선하역사 소음/진동 저감 기술 개발 - 역사 소음/진동 기준 및 평가기술 개발	- 기존 연구는 선하역사의 소음 진동저감을 위하여 프리케스트플로팅 궤도와 구조진동절연(기동역상방진)을 적용하는 과제로 기존 승강장을 부가 질량화 하여 진동을 저감하는 기술과 차별화 - 본 과제는 기존 승강장을 부가질량화 하여 철도역사의 진동을 저감하는 기술로 모든 종류의 역사에 적용 가능

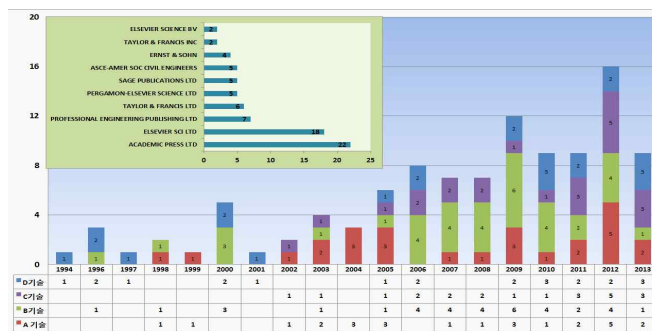
나. 관련분야의 국내외 연구동향 및 학술적 흐름 분석

□ 국내 연구동향 및 학술적 흐름

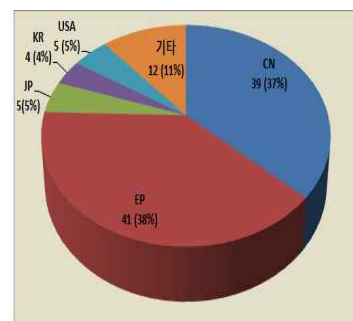
- TMD는 구조 및 원리가 단순하고 우수한 진동제어성능을 나타내며, 기계진동과 같이 특정한 진동수 성분의 동하중에 대하여 우수한 성능을 나타내는 것으로 알려져 있다. 이러한 우수한 성능 때문에 TMD 기술은 점차로 건물 구조물에 적용되기 시작하고 있으나, 열차와 사람의 이동, 내부 구조물의 변동에 따라 하중 변동 등이 심하게 발생하는 철도 역사에 이 기술을 적용하기 위해서는 더 많은 연구가 필요함.
- 논문을 통해 살펴본 국내 TMD 기술의 추세는 TMD 단독으로 사용할 때의 단점을 개선하거나 보완하기 위해 다른 기술과 조합 또는 연동하는 기술, 예를 들면, MR(Magnetorheological) 감쇠기와 TMD를 조합한 준능동 TMD의 제어기법, TLC(Tuned Resonant Chamber) 감쇠기 기술을 함께 이용하는 기술 등이 TMD 분야 기술의 추세인 것으로 파악됨.

□ 국외 연구동향 및 학술적 흐름

- 철도시설물의 방진시스템에 대한 연구는 주로 유럽위주로 다수 수행되었으며, 역사 구조물 소음진동 저감 기술 개발 분야 논문 추이를 살펴보면, 1990년부터 현재까지 총 106건의 논문이 발표되고 있으며 최근 증가하는 추세를 보이고 있으며, 유럽의 저널에서 많은 논문이 발표되고 있음
- 역사 구조물 소음진동 저감 기술 개발 분야 논문은 특허와 달리 유럽의 기관에서 가장 많이 발표(38%)되고 있으며, 한국은 4%에 불과하여 논문 실적이 낮은 상황임.



<연도별 논문발표추이 및 주요 등재 저널 >



<논문발표 주요국가>

2. 국내외 관련 기술 특허 동향

가. 국내 기술개발 수준 비교·분석

- 철도기술은 전체적으로 선진국의 74% 수준으로 분석되고 있으나, 분야별 편차가 큰 편임. 철도차량, 궤도·토목 기술은 선진국의 80~90% 수준으로 기술격차가 비교적 작은 편이나, 소음·진동 저감기술, 시스템 엔지니어링, 안전·방재, 전철·전력, 신호통신의 기술수준은 선진국의 60~70% 수준에 불과하여 여전히 극복해야 할 과제로 남아 있음.
- 2009년 기준 국내 소음·진동 환경 분야의 기술수준은 64.5% 수준으로 분석되고 있으나, 이러한 수준도 환경분야 전체에 대하여 산정한 값으로 철도 소음·진동 분야로 한정하면 이보다 훨씬 못 미치는 수준으로 파악됨.

<2009년 기준 국내 철도기술수준>

(단위 : %)

구분	운영 관리	궤도 토목	전철 전력	신호 통신	안전 방재	철도 환경	역무 자동화	차량
선진국 대비	72.3	80.5	77.0	70.5	64.7	64.5	76.8	76.8

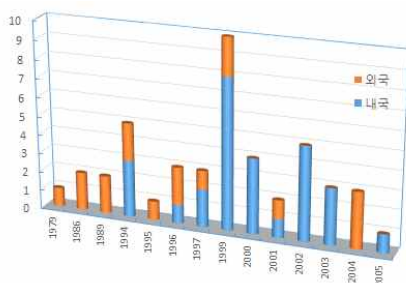
* 자료 : 건설교통기술평가원

- 국내에서는 일부 시스템 해석기술과 방진효율성 평가기술은 확보된 상태이며, 고무패드 또는 코일스프링 방진재 등 진동제어 제품 또한 국내 생산기술을 확보하고 있는 것으로 판단되나, 대부분 해외 시스템과 관련 부품을 그대로 수입에 의존 실정임.

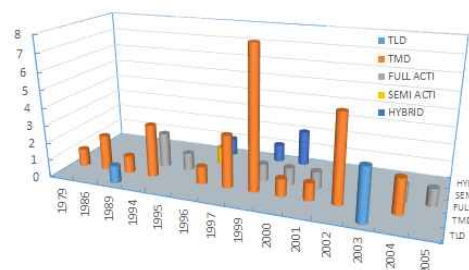
나. 국내 기술개발 수준 비교·분석

□ 국내 특허기술 동향

- 1975년 이후 출원된 특허를 중심으로한 연도별 출원동향을 보면, 빌딩 등의 구조물에 적용되는 매스(MASS)를 이용한 제진장치에 관한 최초 특허출원은 1994년 삼성중공업에서 출원한 흡진장치로 조사되었으며 그 후 주요 기술선진 국가의 기술을 개량한 기술들이 조금씩 출원되고 있음.



<한국 연도별 출원동향>



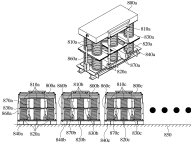
<기술별 출원동향>

- 실제 한국에서의 진동제어에 관한 본격적인 연구는 1990년대 들어와 시작되었고 1997년

설립된 한국지진공학회를 중심으로 본격적인 연구활동을 하고 있으나, 특허 출원수는 이웃 일본에 비해 아직까지 미흡한 상황임.

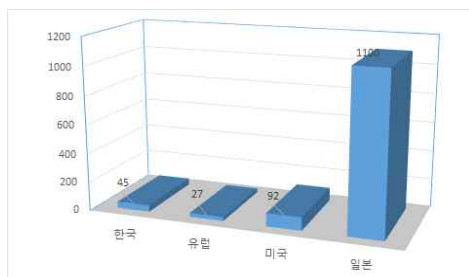
- 아직까지 역사 구조물을 특정하여 직접적으로 TMD기술을 적용한 형태의 국내 특허출원은 발견되지 않았으며, 대부분 층간소음, 교량구조물의 진동 제어, 고층빌딩 진동 저감을 목적으로 한 것이며, 주로 스프링의 탄성력에 다양한 형태의 댐퍼를 적용하는 방법으로 TMD가 개발되어 출원됨.
- 본 기술에서 적용될 동조질량을 제외한 스프링-댐퍼 요소는 일반적 TMD에 적용되는 스프링 요소와 유사함.

<유사 특허 명칭 및 기술내용>

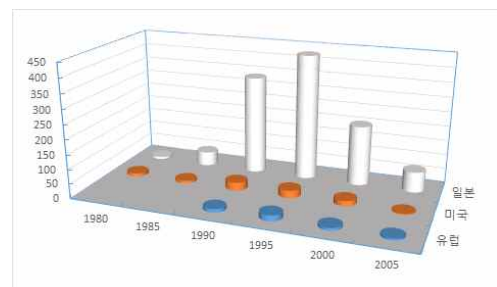
No	명칭	출원번호 / 발명자	기술내용	국적
1	건설구조물의 진동제어 장치	10-20120 150335 서주원 외 8	 구조물의 적어도 일부에 장착되고, 진동수를 상기 구조물의 고유진동수에 동조시켜 외부조건에 의한 상기 구조물의 진동을 감소시키는 복수의 동조질량 감쇠장치(TMD)로 강성이 변화되는 스프링 부재로 진동을 제어하는 장치	한국

□ 해외 특허기술 동향

- 일본과 미국을 중심으로 1990년대 초반부터 많은 출원을 하고 있는데 이는 세계적으로 많은 초고층 빌딩들이 세워 지면서 제진장치에 관한 연구개발도 활발히 진행 되었고 특히 일본의 경우 주기적으로 반복되고 있는 강진의 영향이 큰데서 기인함.
- 해외의 경우에도 일반 구조물에 TMD기술을 적용하여 구조물의 진동을 감쇠하는 기술에 대한 특허출원이 주를 이루고 있으며, 지진의 피해를 많이 입고 있는 일본에서 TMD 관련 특허출원이 많이 이루어지고 있는 것으로 파악되고, 주로 전통의 TMD에 유압댐퍼나 에어마운트 등의 여타의 부가기술을 조합하여 진동 감쇠 효율을 높이는 기술이 TMD기술의 추세인 것으로 판단됨.



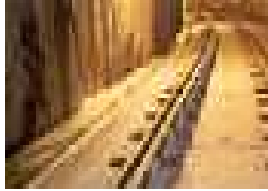
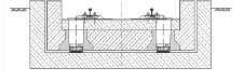
<국가별 특허출원수>



<각국 연도별 출원동향>

- 국외의 경우 철도에서 발생하는 진동 저감을 위해서 다양한 플로팅 슬래브케도가 개발 및 적용되었고, 방진장치 종류에 따라서는 코일스프링-댐퍼시스템을 적용하는 공법과 방진고무를 사용하는 공법으로 나눌 수 있음. 독일의 Gerb의 코일스프링-댐퍼시스템과 방진고무방식인 독일 Getzner社, Heitkamp社의 플로팅 케도시스템이 대표적이고 지지방법에 따라 전면지지, 선지지, 이산지지로 나눌 수 있음. 위의 진동저감 방안들과 달리 본 연구에서 개발하는 진동저감 시스템은 기존 역사 내 시설물을 이용하여 진동을 저감하며 기존 및 신설 역사 구분없이 시스템 적용이 용이함.

<국외 주요 플로팅 슬래브궤도 공법>

종류	국 가	부설전경	특 징
홍콩 West Rail Precast FST	홍콩 (KCRC) 컨설팅 영국 AEA Tech.		- 궤도 전구간의 44% 부설실적 - 프리캐스트 콘크리트 슬래브 - 탄성패드 사용 (이산지지시스템, 호주 Trelleborg Queensland Rubber Co.) - 구조물 발생 소음 10dB(A) 감소
Railtech Precast FST	프랑스 (Railtech)		- 스페인, 이탈리아 등지 부설실적 - 프리캐스트 콘크리트 슬래브 - 방진고무 탄성패드 사용 (이산지지시스템) - 평균 24dB의 진동 저감 - Independent Blocks, Stopper 사용
Züblin	독일 (Züblin)		- 총 6개소에 104km의 부설 실적 - 평균 10dB 이상의 진동 저감 - 연속 슬래브 방식(현장타설)으로 슬래브 설치 후 Jack-up 베어링(방진고무, Getzner社) 설치
Gerb	독일 (Gerb)		- 저진동수 진동 및 소음 제어 탁월 - 스프링 이용 post-alignment 용이 - 연속 타설식, track bed이용
HEITKAMP HISO TRACK	독일 (Heitkamp Rail)	 	- 방진고무 방식 플로팅 슬래브궤도 20dB 이상의 방진효과 - 특수고안된 방진고무마운트 (독일 Calenberg社)와 프리캐스트 콘크리트 유닛 적용 → 방진장치 설치, 유지보수 용이
Floating Ladder (방진장치식)	일본 (RTRI)		- 약 20dB의 진동저감효과 - 방진 장치가 Stopper 역할 1.5m간격으로 Ladder 침목 지지
Floating Ladder (방진장치식)	일본 (RTRI)		- 약 20dB의 진동저감효과 - 슬래브 및 침목 돌기(Stopper) 1.5m간격으로 Ladder 침목 지지

3. 국내외 시장분석 및 산업동향

가. 시장환경

□ 국내 시장 환경분석

- 선하역사의 증가 및 열차속도의 증가로 진동, 소음에 대한 민원이 지속적으로 제기되고 있으며 이에 따라 방진시스템의 시장규모도 2006년 이후로 지속적으로 증가하고 있음.

(단위:억원)

분야	국내 연간 예측시장 규모		
	5년	10년	15년
방진시스템 개발 (방진궤도, 방진체결구, 방진침목 포함)	500 (10km부설)	750 (15km부설)	1,000 (20km부설)

※ floating 시스템의 방진장치, 슬래브, 엔지니어링 비 포함 500만원/m 기준

- 도심지 경전철사업에 따라 여러 경전철사업이 추진되고 있으며, 주변 상가지역 및 택지 지역의 환경소음 및 진동으로 인한 민원이 예상되고 있어 방진시스템에 대한 수요가 클 것으로 예상

□ 해외 시장 환경분석

- 방진시스템관련 선진기술은 일본과 영국이 주로 보유, 이들은 국내시장 대비 약 7배 정도 규모를 지니고 있으며 국내와 마찬가지로 2006년 이후 시장규모가 지속적으로 증가하고 있음

(단위:억원)

구분		연도별 주요국 연간 시장 수요규모				
		2006년	2007년	2008년	2009년	2010년
방진 시스템	일본	400	450	500	550	600
	영국	400	400	450	500	600

- 선진국의 친환경적 환경에 대한 수준이 높아지고 있고, 아시아를 포함한 개발도상국에서의 철도 건설시장 규모의 지속적인 확대로 방진시스템의 세계시장 규모는 점차 확대 될 것으로 전망

- 전 세계적인 방진시스템의 예측 시장 규모는 다음과 같음

(단위:억원)

분야	예측시장 규모		
	5년	10년	15년
방진시스템 개발	4,000	6,000	10,000

나. 주요 기술 선도업체

구 분	주요 업체	비 고
국 내	유니슨엔지니어링, 에스코알티에스, 알엠에스 테크놀로지, NSV, 에스피씨 테크놀로지, 대명산업 노비스코리아, (주)브이원, 화인테크폴리머 등	방진제품 설계/생산, 방진재료 생산 및 Engineering Service
해 외	독일 GERB, 오스트리아 Getzner, 벨기에 CDM, 독일 Continental Contitech, 영국 Ferrabyrne 등	

다. 해외 시장 진출 방안

□ 참신한 수주전략 개발 및 수주활동 강화

- 각국별 시장조사 등을 통해 맞춤형 진출 전략을 마련하고, 수주지원단을 현지 에 파견하는 등 적극적 수주활동 전개
- 철도건설, 운영, 적극적 기술이전, 역세권 개발 등 패키지 형태 상품을 개발하 여 수주가능성과 수익성 동시에 제고
- 지속적 R&D를 통해 기술이전으로 인한 부메랑 효과는 충분히 예방

□ 브라질을 포함한 남미 신흥국가와 미국 등에서 향후 고속철도망을 계획함에 따라 대형 철도사업이 적극 추진될 예정이며, 본 연구에서 개발된 설계기술 및 제품과 시공기술의 진출이 가능할 것으로 판단됨

□ 해외철도 진출 통합지원 기관인 SYSTRA(프랑스), JARTS(일본)과 같은 국가차원의 조직과 지원이 필요하며, 현지 관공서 또는 관련 기업과 접촉을 통한 기술 설명회 개최, 국제전람회 참석 등을 통하여 고난도·고부가가치의 기술 홍보

□ 2022년 월드컵을 대비한 카타르 도하 메트로 공사가 본격적으로 시작되어 총 350억 달러 규모의 카타르 통합철도 프로젝트가 진행 중에 있으며, 이를 한국 대형 건설사가 수주에 성공하였음. 이에 본 연구에서 개발된 제품 및 설계 기술 등을 수주사와 연계할 수 있다면, 현재 진행 중인 프로젝트를 비롯한 추가 진행되는 건설 공사에 진출이 가능함

4. 종합결론

가. SWOT분석

강점 (Strength)	약점 (Weakness)
1. 저비용으로 열차 운행에 따른 역사 진동을 저감 할 수 있는 신기술. 2. 추가구조 없이 기존 승강장 구조의 중량을 동조 질량으로 활용함으로 전체 역사 구조에 영향이 적음. 3. 가설 중에도 철도 운행 및 역사 내 편의·상업 시설 운영이 가능하며 철도운행에도 지장을 주지 않는 기술. 4. 열차-승객간 인터페이스 용도의 단순 기능의 승강장 구조를 진동제어 시스템으로 활용하는 기술은 전세계적 독보적 기술로서 기술적 가치가 커 시장 확보 가능성 높음. 5. 승강장을 활용하는 기술의 특성으로 기존 및 신설, 지상 및 지하 등 역사형식에 따른 제약이 적어 적용성이 우수함.	1. 기존 선하역사를 철도운행에 지장 없이 부설가능한 방음·방진시스템의 개발은 국내 외 연구사례 전무함. 2. 제품이 개발되어 상용화 되어진다고 하여도 시공사례 부족으로 인한 시장 형성 지연. 3. 방음·방진 관련 기업은 대부분은 중소기업으로 영세하며 전문 인력 확보 미흡 4. 철도 소음·진동 기준은 해외기준을 도입하는 단계로 국내 환경에 적합한 기준 정립에 대한 연구 부족. 5. 전문연구/기술개발 인력 부족.
기회 (Opportunity)	위협 (Threat)
1. 소음·진동 저감에 대한 사회인식의 확대로 철도시설의 방진·방음 시장 확대 2. FTA체결로 해외 철도시장의 발판 가능 3. 수출 성장성이 큰 산업 4. 철도 부지 확보의 한계로 방음·방진이 요구되는 선하, 선상역사가 지속적으로 증가 5. 수요시장으로서 성장 속도가 빠른 중국 시장과 인접 6. 국내 건설기계업체들의 글로벌화 촉진	1. 방진시스템 개발 및 시공에 대한 성능 신뢰도 미흡 2. 방음, 방진시스템의 기술개발에 대한 해외업체의 견제. 3. 글로벌 경쟁 업체의 국내 진입과 저가격 공세 4. 국내시장 확대 및 해외진출을 체계적 지원조직 미비. 5. 신기술 개발에 대한 전문인력 및 자원 부족 6. 글로벌 기업의 국내 시장 잠식. 7. 연구 완료단계는 개념적 기술의 실험실 시험을 통한 검증 수준으로 기술 상용화를 위해서는 추가 연구를 통한 지속적인 연구가 필요하나 이에 대한 계획 미비

나. 연구추진 내용 및 일정

구분	연구과제명 (연구수행기관)	관련 성과목표/지표			세부추진내용 (연구수행 Activity)	Activity별 산출물	소요 연구비 (백만원)	1차년도				2차년도				
		핵심성과	단위성과	질적 성과지표				1/4	2/4	3/4	4/4	1/4	2/4	3/4	4/4	
주관	스프링-감쇠 시스템을 활용하여 진동 5dB(V)이상 저감이 가능한 철도역사 승강장용 구조 시스템 기술 개발 한국교통대 산학협력단	A	A-1	A-1-①	기존 상호작용해석 조사 및 기법별 분류	조사보고서	22	22								
			A-1	A-1-②	상호작용 해석을 위한 인터페이스 사항 검토	검토보고서	22	22								
			A-2	A-2-①	철도역사 종류별 분류 및 영향인자를 고려한 대표역사 선정	검토보고서	18		18							
			A-2	A-2-②	TMD이론을 확장한 승강장의 TMD화 해석 모델 작성 및 해석수행	simulation 해석보고서	63		28			35				
			A-2	A-2-③	Bench scale실험 데이터를 반영한 해석모델 및 기법 고도화	해석기법 보고서	55						55			
공동	스프링-감쇠시스템 최적화 설계 기법 개발 (주)에스코 알티에스	B	B-1	B-1-①	기존 一조사(적용기법)	조사보고서	19	19								
				B-1-①	스프링-감쇠 장치 시험품 설계	설계도면	36	20		1		6				
				B-1-①	스프링-감쇠 장치 시험품 제작	시험품	75		30		30		15			
				B-1-②	스프링-감쇠 장치 성능시험	시험성적서	42		19		15			8		
				B-1-②	특허 출원	출원서	19				19					
			B-2	B-2-①	Bench Scale 시험품 설계	설계도면	16				6	10				
				B-2-①	Bench Scale시험 절차수립	시험계획서	12				6		6			
				B-2-①	Bench Scale시험체 제작	시험체	59					6	53			
				B-2-②	Bench Scale 시험	시험성적서	49								49	
				B-2-②	특허출원	출원서	17									17
				B-2-③	스프링-감쇠 시스템 설계절차 수립	설계절차서	16									16
계							540	270				270				

제3장. 연구 수행 내용 및 성과

1. 기존 상호작용해석 조사 및 기법별 분류

가. 개요

- 이동하는 물체에 의해서 구조물에 발생하는 진동은 구조물 자체 뿐 아니라 물체의 물리적인 특성의 영향을 받으며, 특히 구조물 위를 주행하는 열차와 같이 질량이 큰 이동체는 구조물의 진동에 무시할 수 없는 영향을 미치게 되므로 진동해석 시 상호작용에 대한 검토가 필요하다. 이 연구에서는 열차 주행 시 발생하는 차량-궤도-구조물 및 승강장-구조물 간의 상호작용에 대한 조사 및 분류를 수행하였다.
- 열차 운행으로 인하여 발생하는 역사구조물의 진동과 관련한 상호작용으로는 차량-구조물, 열차-궤도 간의 상호작용이 있다. 승강장의 경우 역사구조물 위에 시공되므로 상호작용에 대한 기존 연구 결과는 없으나, 유사한 연구 결과를 조사하였으며, 동조질량감쇠기화할 경우의 상호작용에 대한 검토를 수행하였다. 동조질량감쇠기화는 승강장과 역사구조물의 연결부에 스프링-감쇠시스템을 도입하여 완성되므로 승강장의 질량이 부가질량화하여 스프링과 감쇠기로 역사구조물과 연결된 모델로 검토하였다.

나. 상호작용 해석기법

(1) 차량 모델링

- 일반적으로 도로의 경우 차량의 질량은 구조물의 질량에 비하여 매우 작다. 따라서 구조물에 비하여 차량의 관성효과는 매우 작으므로 주로 이동하중을 이용하여 모델링한다. 그러나 철도차량과 같이 관성이 무시할 정도로 작지 않은 경우에는 보다 현실적인 모델을 사용해야 한다.
- 일반적으로 철도의 경우 차량-구조물 시스템은 차량의 차륜과 레일간의 두 개의 서브시스템으로 모델화되고, 일반적인 도로차량에서는 타이어와 노면으로 모델링된다. 차량과 구조물의 기하학적 조건과 힘의 평형으로 두 개의 운동방정식을 유도할 수 있다.

(가) 이동하중

- 이동하중은 최초의 가장 간단한 차량 모델이며, 아직까지도 차량 하중을 고려한 해석에서 널리 사용되고 있다. 이동 하중 모델은 많은 연구자들에 의해 사용되었으며 1922년 티모센코는 이동하중을 받는 간단한 빔 문제로 대략적인 해결방안을 유도하였다.
- 이동하중은 구조물에서 높은 정확도의 응답을 얻을 수 있어 많은 연구에서 사용되고 있으나, 차량의 관성효과와 차륜과 구조물의 접촉에 의한 효과가 무시되기 때문에 구조물의 무게와 비교하여 차량의 무게가 비교적 무거울 때, 고속으로 차량이 통과할 때 모델의 정확성이 감소하게 된다.

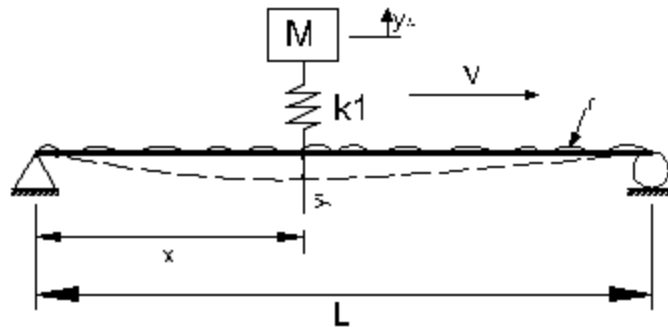
(나) 이동질량

- 이동질량은 질량이 구조물에 비하여 비교적 크고 높은 속도로 이동하는 경우 사용하며, 초기 관성효과도 고려해야 한다. 이동질량 모델은 1929년에 Jeffcott에 의해서 개발되었다.
- 이동질량에 대한 일반적인 알고리즘작업은 Ting, Genin 등에 의해 수행되었다. 1964년에 Biggs와 1996년에 Lee에 의해 보의 중앙지점에 대한 moving mass를 계산하여 도출하였다. 2001년에 Whittaker 등, 1989년에 Akin과 Mofid, 1997년에 Esmailzadeh와 Ghorashi에 의해 수치프로그램으로도 수행되었다.

(다) Sprung Mass

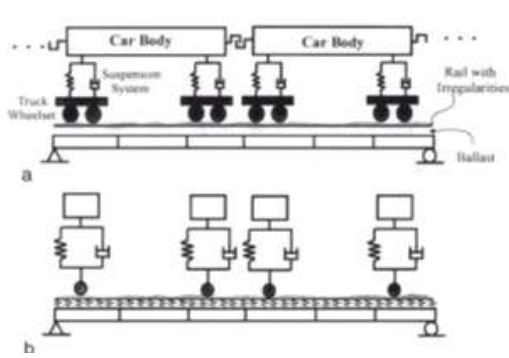
- 이동하중과 이동질량 모델은 서스펜션(suspension)시스템의 강성과 감쇠효과, 궤도틀림, 접촉력을 고려하지 않아서 차량응답을 알 수 없다. 이 경우 sprung mass라는 가장 간단한 모델을 이용해서 해결할 수 있다.
- 아래 그림과 같은 단순보에서 강성 k_1 의 스프링 지지를 받는 Moving mass M 에 의해 빔에 발생하는 질량의 접촉력은 다음 식 (1)과 같다. 참고로 y_w 는 질량 M 에 의한 처짐, y_r 은 교량접촉지점의 처짐, r_0 는 접촉지점의 표면 틀림이다.

$$P = Mg + K_1(y_w - y_r - r_0) \quad (1)$$

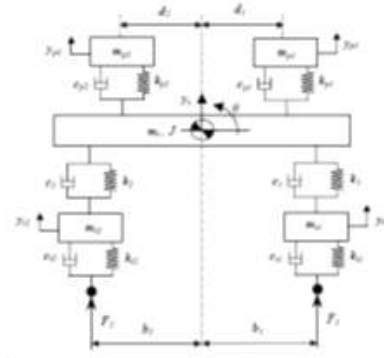


<Sprung Mass 모델 개념도>

- 보다 현실적인 차량모델은 그림 (a)와 같이 댐핑효과, 서스펜션 시스템, 하나의 차륜 대신에 여러 축의 윤하중과 같이 다양한 요소들이 추가되어야 한다. 타이어가 있는 차량은 서스펜션시스템을 스프링 또는 스프링-감쇠기 요소를 이용하여 모델링한다.
- Esmailzadeh와 Jalili는 6자유도의 평면 half-car 모델을 아래 그림 (b)와 같이 표현했다. 몸체(sprung mass), 2축(unsprung masses) 그리고 운전자와 승객으로 구성한다. 이 모델에서는 서스펜션에 의해 차량전체가 위/아래로 진동하는 것과 앞뒤가 교대로 진동하는 효과를 무시한다.



(a) 스프링-질량 모델



(b) 6 자유도 차량모델

<Sprung Mass 모델>

(2) 접촉

- 차륜과 레일은 복잡하고 불완전하게 연결되어 있으며, 차량과 교량간의 상호작용 관계식을 만드는데 있어 해결해야할 가장 근본적인 문제이다.
- 차륜과 레일이 서로 접촉할 때의 모양에 따라서 서로 균일하게 접촉하는 것과 그렇지 않은 것으로 분류된다. 만약에 두 형상이 함께 고정되어 접촉하면 균일접촉이라 하고 반면에 접촉형상이 점, 선 또는 접촉형상과 비교하여 닿는 면적이 좁을 경우 비균일 접촉이라 한다. 차륜과 레일은 형상에 차이가 있으므로 대체로 서로 비균일 접촉을 한다.
- 기존연구 사례를 보면 차륜과 레일간의 접촉은 수직방향과 접선방향 움직임을 갖는다. 접선방향 힘은 두 물체간의 운동에 의해 발생하고, 수직방향 힘은 차량의 중력에 의해 발생한다. 수직방향 움직임은 Hertz 이론을 따르고 길이방향 움직임은 Carter 이론을 따른다. 가장 최근에는 Polach 방정식, Johnson과 Kalker이 만든 방정식도 사용되고 있다.

(3) 차량-구조물 상호작용

- 일반적으로 구조물과 구조물 상부를 주행하는 차량 간의 상호작용은 연계 비선형 문제이다 (Yang et al., 2004). 열차가 구조물 위를 주행하게 되면 차량의 차륜과 레일의 접촉부를 통해 발생하는 상호작용에 의해 복잡한 진동을 하게 된다. 철도의 노반면을 제공하는 구조물의 경우 특히 활하중의 비중이 높으므로 이러한 상호작용의 영향이 더욱 커질 수 있다.
- 구조물과 차량의 상호작용을 이상화하기 위한 수치모델은 기본적으로 이동집중하중모델 (moving constant force), 단순이동질량모델 (simple moving mass), 무질량가이드웨이모델 (massless guideway), 차량의 현가장치를 포함한 이동질량모델 (sprung mass model)의 4가지가 있다 (한국철도기술연구원, 2006).
- 이동집중하중모델은 가장 단순하며 근래에도 교량, 건물 등 구조물의 거동만을 구하기 위한 해석에 흔히 사용되며, 이동질량모델은 차량의 운동을 모사하는 가장 발달된 방법으로 차량 현가장치의 역학적 특성을 선형(또는 비선형)스프링, 감쇠장치 및 마찰장치를 이용하여 모사하고, 차량 자체의 관성효과를 집중질량을 통해 모사한다.

(4) 차량-궤도 상호작용

- 궤도의 동적해석 모형은 크게 연속지지모델(continuous support model)과 이산지지모델(discrete support model)로 분류할 수 있다.
- 연속지지모델은 실제로 이산되어 있는 침목을 연속 분포된 것으로 가정하여 레일을 분포된 질량과 강성을 가진 보(beam)로 침목을 휨강성이 없는 연속 질량체로 그리고 기초를 연속 스프링으로 모형화하는 방법이며, 이산지지모델은 레일과 기초를 연속지지모델과 같은 방법으로 모형화하나 이산되어 있는 침목을 개개의 강체로 모형화하는 방법이다. 연속지지모델은 주로 저주파수 궤도진동해석에 대하여 해석에 잘 적용할 수 있고 해석과정이 편리한 장점이 있다.

(5) 차륜-레일 상호작용

- 열차 차륜의 플랫(flat), 레일의 마모, 용접불량, 파상마모(corrugation) 등으로 인하여 불규칙한 레일 표면을 주행하는 것과 같은 상태의 경우 차륜이 레일표면에 대하여 상대적인 운동을 하게 되고 차량과의 상호작용에 의하여 궤도에 이동축중 이외의 조도하중이 추가적으로 작용하게 된다.
- 상호작용력 F_H 는 접촉강성모델로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다. 식 (2)에서 y_r, A_r 은 레일의 변위 및 어드미턴스(admittance); y_w, A_w 는 차륜의 변위 및 어드미턴스; K_H 는 차륜과 레일의 접촉면에서의 헤르쯔안(Hertzian) 스프링 계수; $y_{r/w}$ 는 차륜과 레일의 상대표면조도이다.

$$F_H \frac{y_r}{A_r} = - \frac{y_w}{A_w} = K_H (y_w - y_r - r_{r/w}) \quad (2)$$

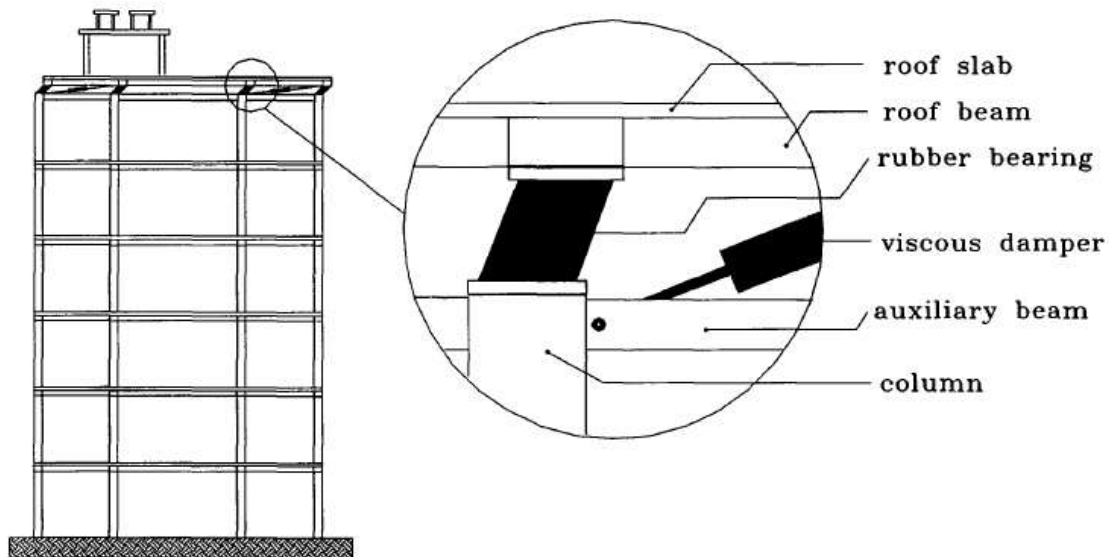
- 상호작용력은 다음과 같이 나타낼 수 있으며, 상호작용력을 계산하기 위해서는 차륜과 레일의 상대표면조도, 차륜과 레일의 어드미턴스, 그리고 접촉강성 등의 계산이 필요함을 알 수 있다.

$$F_H = - \frac{y_{r/w}}{A_w + 1/K_H + A_r} = - \frac{y_{r/w}}{A_r} \quad (3)$$

(6) 승강장-구조물 상호작용

(가) 기존 부대시설을 격리한 상호작용 해석

- Villaverde(1998)는 그림과 같이 일반적인 건물에서 지붕과 최상부슬래브를 분리하여 서로 다른 시스템으로 고려하고 두 시스템 간에 Spring과 Damper를 이용하여 지붕부의 질량을 이용한 진동흡수장치를 고안하였으며 제안한 지붕격리시스템의 수치해석예제를 이용하여 진동저감효과를 검토하였다.
-



<지붕격리시스템이 적용된 건물의 개념도>

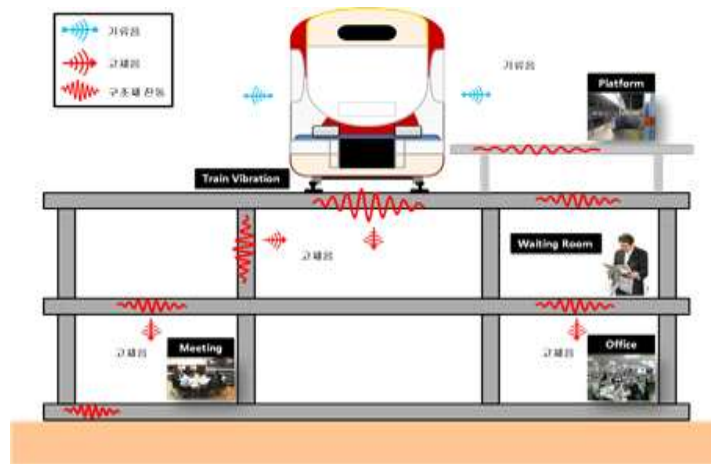
(나) 승강장-역사구조물 상호작용

- 국내에서 승강장의 진동저감 방법을 위한 연구로 홍갑표 등(1998)은 지반과 구조물의 상호 작용(Soil-Structure Interaction) 해석기법을 이용하여 대표역사 승강장의 제진대책 적용에 따른 열차하중에 의한 진동저감 대책방안을 검토하였다. 이는 승강장이 수치해석 모델 작성 시 일반적인 건물과 비교하여 고려해야할 특별한 요인이 없음을 보여준다.
- 국외에서 선하역사 형식의 고속철도역사의 승강장의 진동 특성 분석 연구로 Wang et al.(2013)은 열차-역사 구조물 상호작용 해석을 수행하였다. 이때 역사 구조물의 승강장은 일반적으로 건물 해석 시 사용하는 부가질량 기법을 사용하지 않고 형상과 물성치를 반영한 수치해석 모델을 작성하여 승강장 슬래브의 위치에 따른 응답을 비교하여 진동 특성을 분석하였다. 이 연구에서도 승강장의 수치해석 모델 작성 시 일반적인 건물과 비교하여 특별한 요소 및 제한사항이 없었다.

2. 상호작용해석을 위한 인터페이스 사항 검토

가. 개요

- 도시와 같은 인구 밀집 지역에 위치한 철도역사의 경우 공간 활용에 대한 요구가 증가하고, 역사 내 정온시설의 입점이 늘어남에 따라 고도의 진동 제어 대책이 더욱 필요한 상황이다.
- 철도역사에 발생하는 소음은 그림과 같이 대부분 차량, 궤도에서 발생되어 선로 및 접속교량을 통해 기둥, 슬래브, 벽체 등 역사의 주요 부재로 전달되는 진동으로 인하여 발생하는 고체소음(structure borne noise)으로 역사의 구조형식에 따라 다양한 메커니즘이 존재할 수 있으므로 보다 효율적인 진동 저감 대책의 수립을 위해서는 역사의 구조 형식, 부재 및 재료 등의 구성 요소에 따른 구조적 거동 및 감쇠 특성의 파악이 중요하다.



<철도역사의 진동 전달>

- 특히 진동을 발생시키는 주요 원인인 열차와 열차의 하중을 일차적으로 지지하는 궤도 및 철도역사의 인터페이스 검토를 통하여 역사 진동 발생원의 특성을 파악하는 것은 보다 효과적인 방음·방진 대책을 수립하는데 필수적인 요소이다.
- 이 연구의 목적은 승강장 TMD화를 통한 철도역사 진동저감시스템 개발 시 요구되는 상호작용 해석을 위하여 철도역사의 진동에 영향을 미치는 인터페이스(IF, interface)를 파악하고, 상호작용에 영향을 미치는 IF 사항을 도출하는 것이다. 이러한 목적의 달성을 위하여 철도역사 내 진동과 관련한 IF 요소를 도출하고, 이들 요소 중 TMD화를 위한 차량-궤도-구조물 간 및 역사구조물-승강장 간 상호작용 해석에 영향을 미치는 IF 사항을 검토하였다.

나. 철도역사의 진동관련 인터페이스 사항

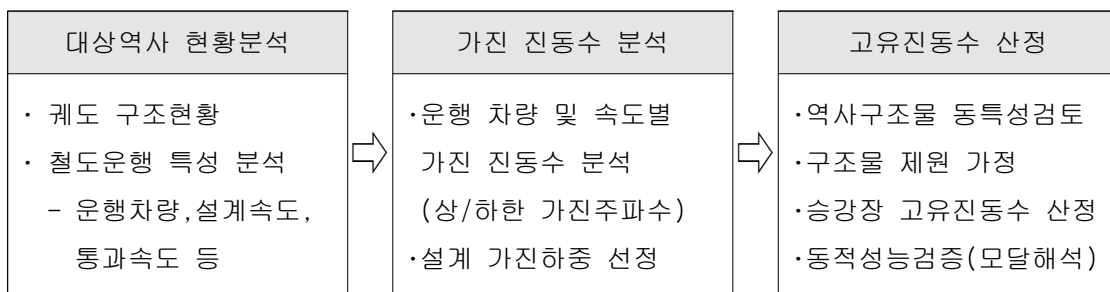
- 철도역사의 진동 특징은 가진원 특성 뿐 아니라 전달경로가 되는 선로구조물과 역사건물의 접속 특성, 역사 건물의 재료적 및 구조적 특성 등 다양한 조건들이 복합적으로 작용하여 나타나게 된다. 효과적이고 효율적인 진동 저감을 위한 시스템 개발을 위하여 주요 인자로 고려되어야 할 IF 도출을 위한 검토 사항은 다음과 같다(장승엽, 2008).

- 궤도 구성용품의 역학적 특성 (레일, 체결구, 침목 등)
- 차량의 동적특성 (현가장치, 대차, 질량 등)
- 노반구조물의 역학적 특성
- 차량-궤도-구조물 간 인터페이스 특징에 따른 진동특성 (가진진동수 등)
- 환경 영향에 따른 동적특성의 안정성
- 도상의 구조적 안전성 (기하학적/재료적 특성 등)
- 궤도 상태 (레일의 조도, 궤도틀림 등)
- 역사구조물 시·종점부와 궤도 강성변화 특성
- 설계속도 및 역사통과속도
- 선로의 선형조건 (선형변화구간 또는 슬랙 및 캔트 영향)
- 접속교량 특성 (교량받침 포함)
- 승강장-역사구조물 연결 특성 (승강장 형식 포함)

□ 상기 검토 항목 중 차량-궤도, 궤도-구조물 및 승강장-역사구조물 간 IF 검토 항목에 관련된 내용을 살펴보면 다음과 같다.

(1) 고유진동수

- 승강장의 TMD화를 통한 역사구조물 진동저감기법의 가장 중요한 핵심사항은 역사구조물과 승강장 TMD의 고유진동수이다. 역사구조물의 경우 상가 및 역무 시설의 존재 등으로 해석 모델 작성이 쉽지 않으며, 환경특성 변화에 따른 고유진동수의 변동성을 감안할 때 설계 시 역사구조물의 고유진동수를 정확히 파악하는 것은 쉽지 않다.
- 특히 역사구조물의 경우 구조물의 규모가 커서 인위적인 동적하중 재하를 통한 동적특성 파악이 어려우며, 열차하중은 수직방향으로 재하되나 수평방향의 모드가 우선 하므로 상시 진동 측정을 통한 동적특성 추출도 용이하지 않다. 그러므로 설계 시 보다 정확한 고유진동수 파악을 위한 해석기법의 고도화가 필수적이며, 모달실험을 통한 실제 고유진동수 측정도 필요하다. 철도역사 및 승강장의 고유진동수를 산정하기 위해 사전 검토해야할 사항 및 절차는 다음 표와 그림과 같다.



<고유진동수 산정 절차>

<고유진동수 관련 IF 사항>

설계요소	설계기준 및 기법	검토대상 IF
시스템 고유진동수	- 시스템 고유진동수 결정 - 역사구조물과 공진 고려 → 가진특성, 궤도 및 하부구조물의 Mobility에 따라 조정	운행차량-궤도간 구조물 동특성

(2) 선로의 궤간 및 선형조건

- 선로는 표준궤간 1,435mm 이외에 궤도구조, 궤도재료, 곡선반경에 따른 캔트와 슬랙 등 다양한 조건을 제시한다. 철도역사 내에 궤도 평면선형이 곡선일 경우 조건에 따라 캔트와 슬랙을 두어 주행안전성 및 승차감을 확보하여야 한다.
- 곡선구간의 궤도에 주는 압력을 균등하게 하기 위하여 제시된 공식에 의하여 산출된 캔트를 두어야 하며, 이때 설정캔트 및 부족캔트를 제시하였다. 곡선반경이 작을 경우 외측 레일에 과도한 횡압 작용을 방지하고 소음발생 원인이 되는 차륜 플랜지-레일을 방지를 목적으로 슬랙을 두도록 하고 있다.

(3) 궤도형식

- 철도역사의 진동 특성 파악을 위하여 궤도의 종류를 정확히 고려하는 것은 매우 중요하다. 자갈궤도의 경우 도상두께는 열차-궤도 접촉부에서 전달되는 진동의 특성 및 크기에 직접적인 영향을 미치게 된다. 일반적 자갈궤도의 도상두께(R.L-F.L)의 공칭값은 설계속도를 고려하여 아래 표의 기준에 따라 적용된다. 다만, 레일의 종별이나, 침목형상, 레일패드 등의 변경에 따라 이 값은 바뀔 수 있다.

<자갈궤도의 두께>

항 목	설계기준 및 적용기법				비 고
자갈궤도의 두께 기준	· 설계속도에 따른 도상두께 기준(자갈궤도)				철도의 건설기준에 관한 규정 제 16조
	설계속도 V (km/hr)	레일 (kg/m)	최소도상 두께(mm)	R.L.-F.L. (mm)	
	200<V≤350	60	350 (도상매트포함)	740	
	120<V≤200	60	300	680	
	70<V≤120	50	270 (장대레일구간 300)	630	
	V≤70	50	250	610	
					철도설계지침 (궤도편)5.4.4

- 콘크리트궤도의 경우 자갈궤도와 달리 다양한 시스템에 대한 진동 전달 특성이 상이할 수 있으므로 해석모델 작성 시 철도역사에 부설된 콘크리트궤도 시스템과 시스템 파라미터에 대한 정확한 고려가 필수적으로 수반되어야 한다.

(4) 승강장 이격거리

- 승강장 이격거리는 철도역사에 대한 해석모델 작성 시 뿐 아니라 승강장의 TMD화 기법 적용을 위한 스프링-감쇠시스템의 설계파라미터 결정에도 영향을 미친다. 승강장 이격 거리와 관련한 설계기준은 다음 표에 제시하였다.

<궤도-승강장 이격거리 관련 설계기준>

항 목	설계기준	비 고
궤도-승강장 이격 거리	•직선구간 - 일반여객열차용 낮은 승강장의 경우는 1,675mm - 일반열차와 전동차 혼용구간의 높은 승강장은 1,700mm로 한다. - 전동차전용선인 구간으로 콘크리트도상인 경우에는 1,610mm로 한다. (차량 끝단에서 승강장 연단까지 거리는 50mm이내) •곡선구간 - 곡선인 경우 확대량 적용 - 내궤측 승강장 $K = W + S + C \frac{h}{g}$ - 외궤측 승강장 $K = W - C \frac{h}{g}$	철도설계지침 및 편람 KR C 13030

(5) 접속구간 (궤도시스템과의 연계)

- 이형의 궤도구조 접속구간에서의 강성의 급격한 변화는 열차 운행시 충격이 발생의 원인이 되며 이는 궤도구조에 손상을 줄 수 있으며 역사구조물 진동의 증폭을 야기할 수 있다. 그러므로 접속구간 강성 완충방안 마련하고 궤도-구조물 상호작용을 반영한 해석을 통한 구조안정성확보가 필요하다.
- 특히 콘크리트궤도 부유궤도의 접속부는 탄성거동과 특히 침하거동이 매우 다른 상부 구조물이 서고 만나게 되므로 특수한 방법들을 사용하여 거동이 전체적으로 큰 차이가 없도록 조절하여야 한다. 자갈궤도와 접속구간에서는 자갈막이판을 설치하여 자갈의 유실로 인한 접속구간에 연한 침묵에서의 지지력 저하가 일어나지 않도록 해야 한다.

(6) 접속교량 (교량받침과의 연계)

- 철도역사 중 선하역사의 경우 구조적 특성으로 인하여 종방향으로 교량이 접속하고 있으며, 교량 접속부에는 교량받침이 설치된다. 철도역사에 진출입을 위하여 교량 위를 열차가 주행할 경우 교량의 진동은 교량의 주형을 통하여 교량받침으로 전달되며, 최종적으로 역사구조물로 전달된다.
- 철도역사에 접속되는 교량의 형식으로는 아래 그림과 같이 철도역사와 강철된 라멘교가 가장 흔하며, 이외에 콘크리트교 또는 강교 등의 교량이 있을 수 있다. 일부 선하역사의 경우는 토공부가 접속되기도 한다. 교량받침으로는 힌지받침, 포트받침, 디스크받침, 탄성받침 등이 있다.



(a) 라멘형식



(b) 교량형식

<철도역사 접속교량 형식>



(a) 힌지



(b) 고력활동받침



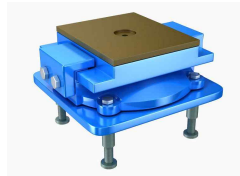
(c) 마찰형 포트받침



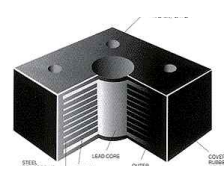
(d) 디스크받침



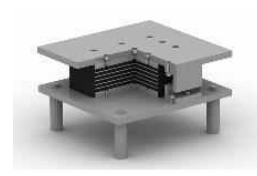
(e) 마찰형 디스크받침



(f) 스페리컬받침



(g) LRB



(h) 고감쇠탄성받침

<철도교량에 적용되는 교량받침 형식>

다. 승강장-역사구조물 상호작용 관련 인터페이스 사항

- 승강장 TMD를 통한 철도역사의 진동 저감을 위해서는 승강장 TMD와 철도역사 간의 IF 사항에 대한 검토가 필수적이다. 앞서 검토된 IF 사항 중 승강장 TMD를 적용한 상호작용 해석을 위하여 추가적으로 고려되어야 할 IF 사항은 다음과 같다.

- 역사구조물과 승강장의 동적특성
- 승강장 TMD의 고유진동수 범위

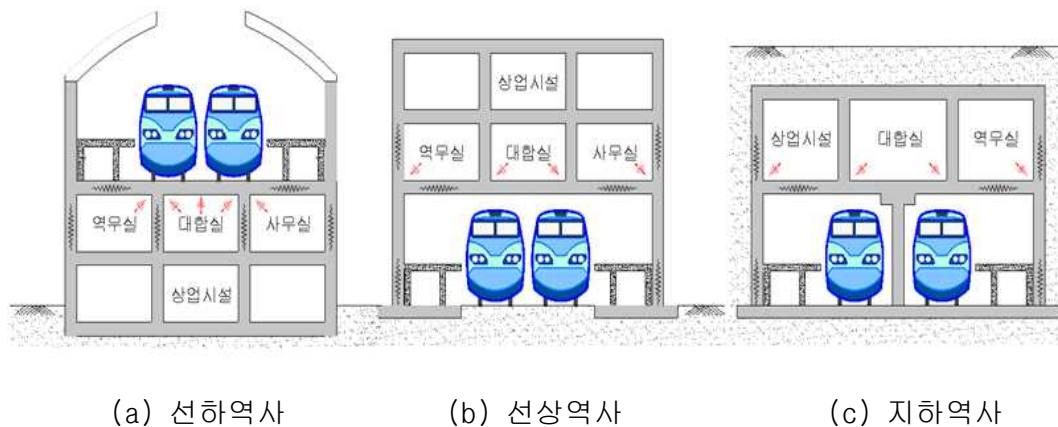
-
- 승강장 TMD의 설치 위치
 - 승강장과 역사구조물의 질량비

- 철도역사에 설치되는 대부분의 승강장은 출입구가 연결되어 있어 승강장 전체를 TMD화하기는 용이하지 않다. 또한 앞서 기술된 바와 같이 철도역사의 고유진동수는 해석적으로 구하기 어렵고 환경의 영향을 받으므로 승강장의 TMD 설계는 단일 고유진동수에 초점을 맞추기 보다는 보다 탄력적으로 일정 범위의 철도역사 고유진동수에 공진할 수 있도록 하는 것이 필요하다. 이러한 설계는 단순 TMD로는 어려우며 일정 범위의 고유진동수에 공진할 수 있도록 다수의 TMD를 설치하는 Multi TMD 기법의 적용을 통하여 수행될 수 있다.
- 승강장의 일부만 TMD화하는 부분 TMD 기술 적용 시 승강장 TMD의 설치 위치가 고려되어야 한다. 특히 Multi TMD 기술 적용을 위해서는 부분 TMD가 필수적이므로 철도역사에 설치되는 TMD의 위치를 결정하는 것은 매우 중요하다. 승강장과 역사구조물의 질량비는 TMD의 진동저감성능을 결정하는 중요 변수이다.

3. 철도역사 종류별 분류 및 영향인자를 고려한 대표역사 선정

가. 철도역사의 종류 및 현황

- 철도역도 역사의 구조형식은 지상역사와 지하역사로 분류할 수 있으며, 지상역사는 선하역사와 선상역사로 구분할 수 있다. 그림은 역사 종류별 개요도이다.
- 지상역사는 역사가 선로와 인접하여 지상에 설치되는 가장 일반적인 역사형식이다. 주로 편측접근이며, 선로 반대쪽에서 접근하기 위해서는 연결통로가 필요하다. 또한 선로사이 또는 역사 반대편 승강장에 접근하기 위해서도 여객통로가 필요하다.
- 선상역사는 역사가 선로 상부에 설치되는 형식으로 양방향 접근이 용이하고 지상의 역사 부지를 최소화할 수 있다. 따라서 역사부지 확보가 어려운 도심지형 또는 도시연접형에서 주로 사용하고, 이용수요에 따라 선로상부에 일부 또는 전부를 이용하여 설치가 가능하다.
- 선하역사는 선로이설 및 신설시 선로를 고가로 건설할 경우 하부공간을 활용하여 건설하며, 소음·진동, 영구음영 등에 대한 환경적 고려가 필요하다.
- 지하역사는 선로 및 역사를 지하에 설치하는 형식으로 주로 도시 및 광역철도에서 이용하는 형식이며 철도선로로 인한 지역단절이 없고 차량 및 보행자 동선이 자유로우나 환경적, 방재적 고려가 필요하다(공유주 등, 2015).



<철도역사 구조형식에 따른 대표도>

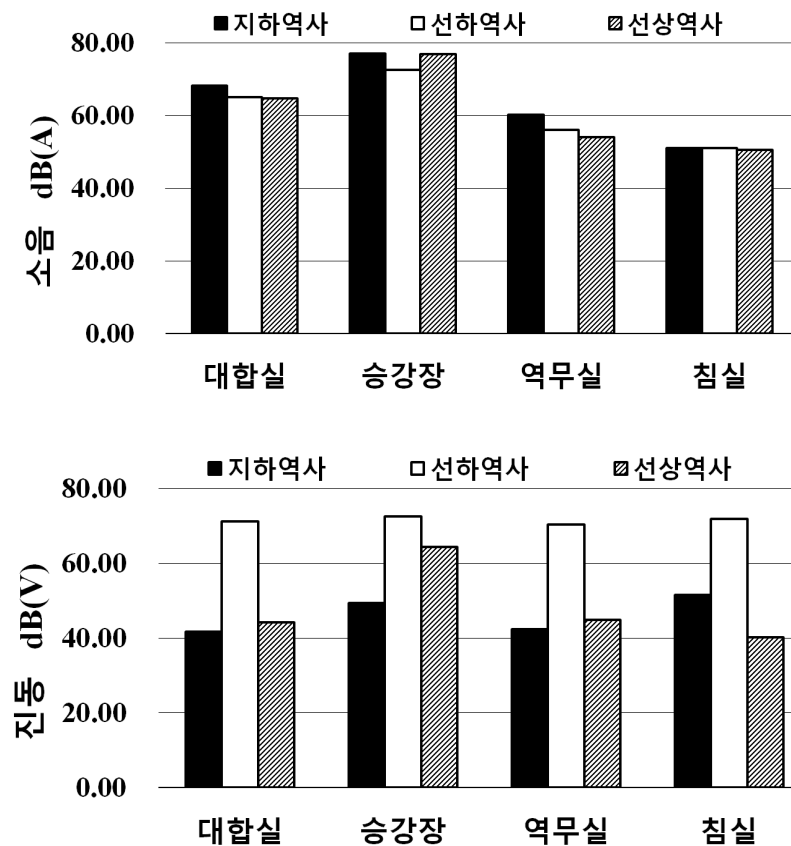
- 현재 국내에는 표와 같이 고속철도, 일반철도, 도시철도 및 경전철을 포함하여 총 1,300개의 역사가 운영 중이며, 이중 소음·진동 수준이 다른 구조형식보다 높은 선하역사는 전체 역사의 약 11.5%인 150여개소가 운영 중이다. 이 연구에서는 각 역사 구조형식별 소음·진동 측정 자료를 분석하고, 이를 기반으로 승강장 TMD화 기술의 성능을 검토할 대표역사를 선정하였다.

<국내 철도역사 현황>

	고속철도 (경부+호남)	일반철도	도시철도		경전철
			수도권	지방	
선하역사	3	56	18	21	51
선상역사	3	344	246	32	0
지하역사	0	51	283	185	0
계	12(6+6)	451	547	238	51

나. 철도역사 종류에 따른 소음·진동 측정 결과 분석

- 한국철도공사(2014)제시된 역사 형식별 소음·진동 측정 결과에 대한 평균값을 비교한 도표이다. 그림에서 역사 형식에 따른 소음 레벨 차이는 크게 없으나, 진동의 경우 선하역사가 뚜렷이 크게 나타난 것을 알 수 있다.



<역사 구조형식별 소음·진동 측정 결과 비교>

- 선하역사는 차량-궤도에서 발생하는 하중 및 진동이 역사구조물로 직접 전달되는 구조적 한계로 인하여 진동과 소음이 다른 역사형식에 비하여 높게 발생할 수 밖에 없는 구조형식이며, 소음도 대부분 전달되는 진동으로 인하여 발생하는 구조진동(structure borne noise)이다.

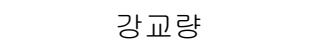
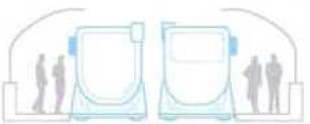
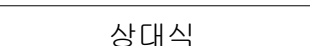
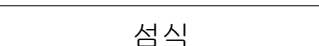
- 그림에서 특히 주목할 점은 열차가 직접 주행하는 선로 슬래브 뿐 아니라 대합실, 역무실, 침실을 포함한 실내에서도 높은 진동 수준이 측정된 점이다. 이 연구에서는 이러한 점을 감안하여 선하역사에 초점을 맞추어 대표역사 선정에 대한 분석을 수행하였다.

다. 영향인자를 고려한 철도역사 분석

(1) 영향인자 선정

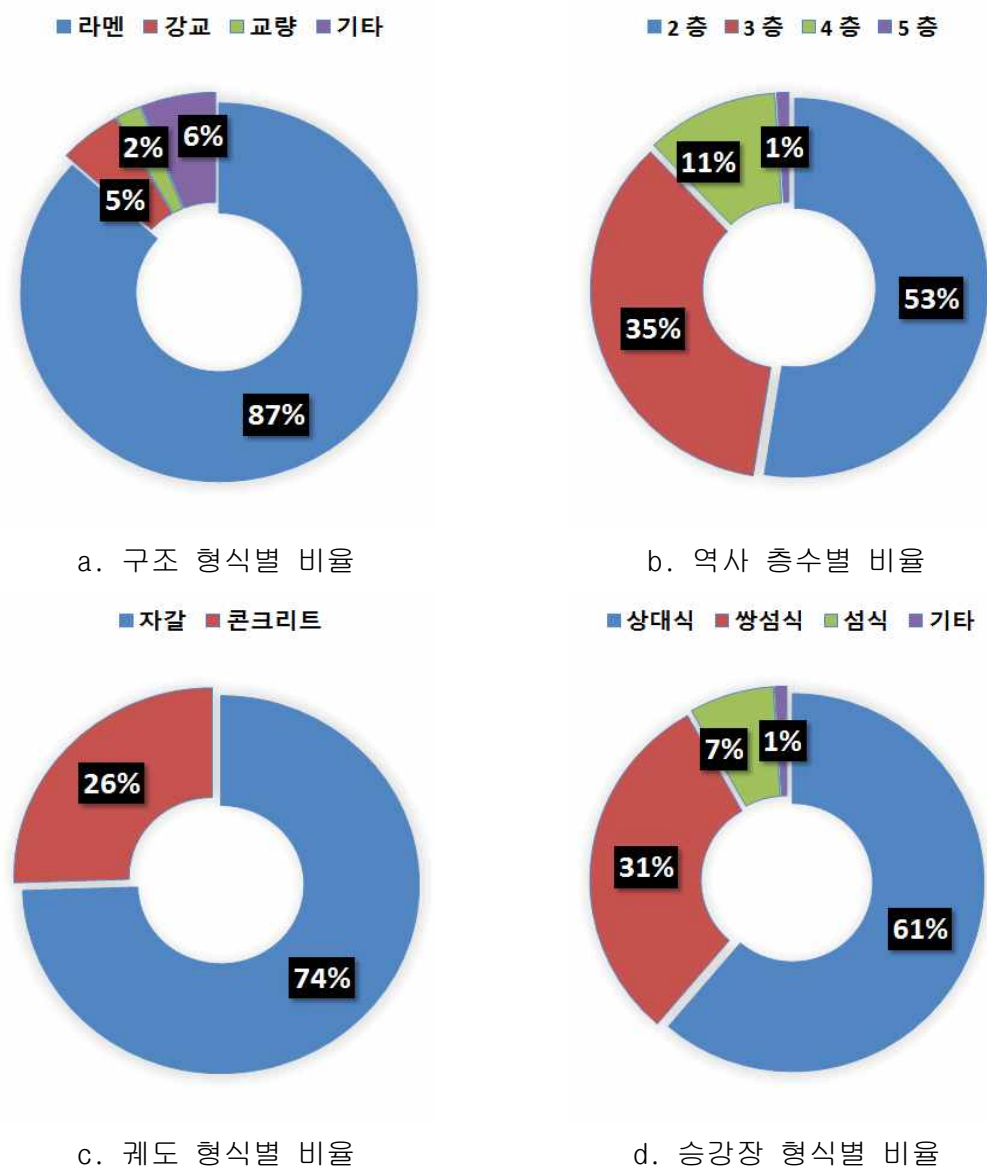
- 열차 운행에 따라 발생하는 선하역사의 진동에 영향을 미칠 수 있는 역사구조물의 영향인자로 역구조, 층수, 궤도형식 및 승강장 형식 등이 있다.
- 선하역사의 경우 접속교량 및 받침의 형식도 영향을 미칠 수 있으나, 연구 결과(최상현 등, 2015) 접속교량에서 전달되는 진동의 크기는 강철, 힌지, 탄성받침, 포트받침, 디스크 받침 등 어떠한 받침 형식에서도 교량 진동의 RMS값에 대하여 10% 미만으로 크지 않은 것으로 나타나 포함하지 않았다. 선하역사의 진동에 대한 영향인자 및 분류 기준은 표에 정리하였다.

<철도역사 진동 영향인자에 대한 분류 기준>

영향인자	분류기준			
역사 구조				
	콘크리트교량		강교량	
층수				
	2층		4층	
궤도 형식				
	자갈궤도		콘크리트궤도	
승강장 형식				
	상대식		섬식	
승강장 형식				
	상대식		쌍섬식	

(2) 영향인자에 따른 선하역사 분석

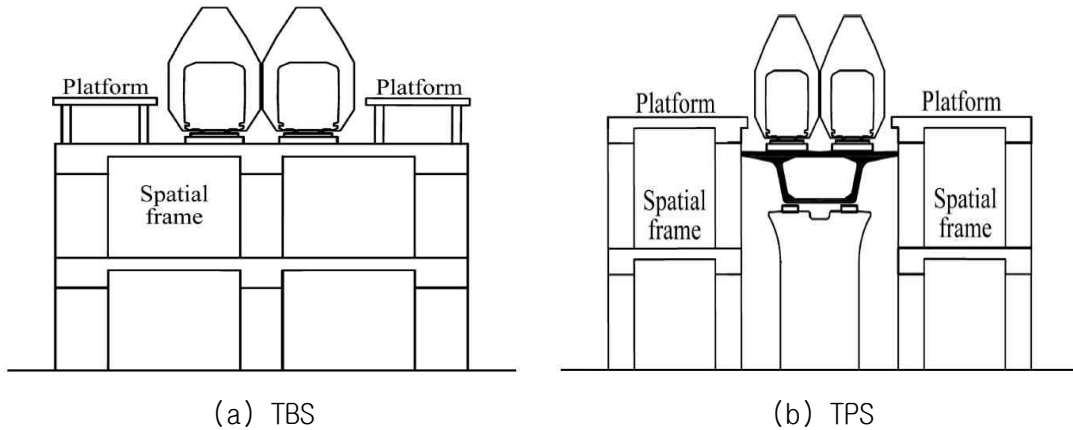
- 전국 선하역사 중 98개 역사를 구조물 진동특성에 영향을 미칠 수 있는 영향인자를 기준으로 조사 및 분류하였다. 그림은 기준으로 고려한 영향인자 별로 분류한 98개의 선하역사의 비율이다.
- 그림에서 역사구조의 형식은 라멘형이 87%로 가장 큰 비율을 차지하였으며 역사 층수는 2층 형식이 53%로 가장 높았다. 궤도형식은 자갈궤도가 74%로 가장 많았고, 승강장 형식은 상대식이 61%로 가장 높은 비율을 차지하는 것으로 나타났다.



<선하역사 현황 조사 결과>

(3) 구조형식에 따른 선하역사 분석

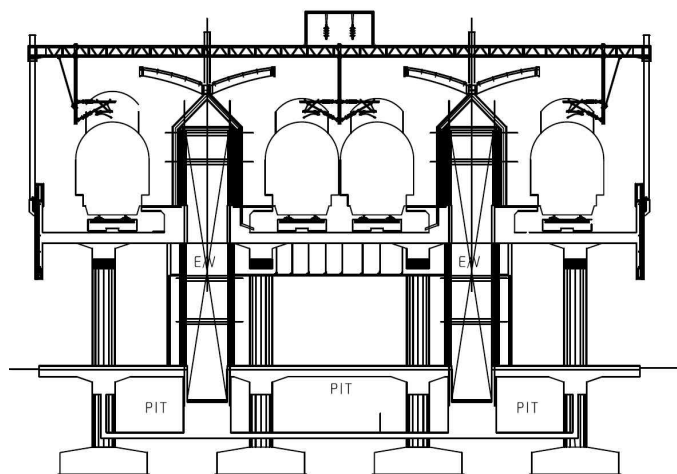
- 선하역사는 그림과 같이 열차가 구조물 최상부를 통과하는 TBS(Train on Building frame System)와 열차가 교량상 궤도를 통과하며 교량과 라멘형식의 선하역사 구조물이 연결된 TPS(Train on bridge Pier System)으로 나눌 수 있다.



<TBS와 TPS의 개념도>

라. 대표역사 선정

- 철도역사 종류에 따른 소음·진동 계측을 이용한 비교 결과 선하역사에서 측정된 계측 응답이 타 종류의 철도역사들 보다 높은 값을 보였다. 이러한 분석 결과를 바탕으로 대표역사 형식은 선하역사로 하고, 보다 세밀한 분석을 위하여 역사의 진동에 영향을 영향인자를 선정하고 영향인자 별 기준에 따라 국내 선하역사 중 가장 높은 구성비를 갖는 구조형식을 도출하였다. 또한 선하역사의 대표적인 구조형식인 TBS와 TPS 형식을 검토하였다.
- 분석 결과를 이용하여 승강장 TMD화를 통한 진동저감기법의 성능을 검토할 대표역사 형식은 그림과 같이 2층, 자갈궤도, 상대식 승강장 및 TBS 형식의 역사로 선정하였다.

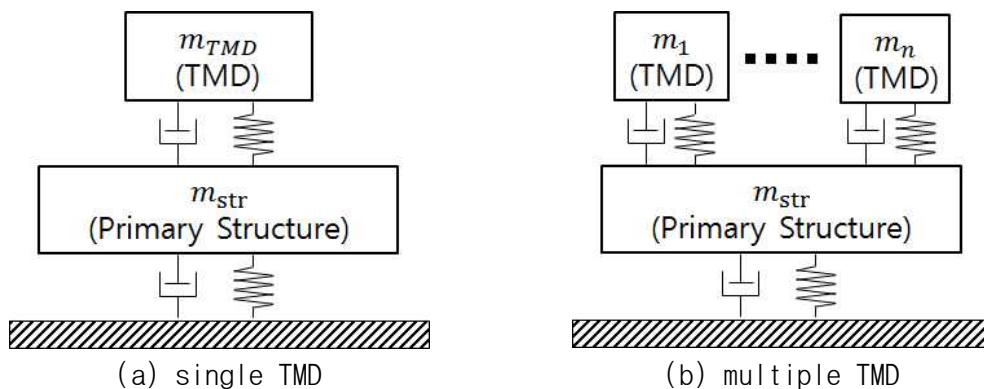


<대표역사 단면도>

4. TMD 이론을 확장한 승강장의 TMD화 해석 모델 작성 및 해석 수행

가. 개요

- TMD이론은 1909년 배의 롤링 감소를 위하여 Frahm(1909)이 발명한 동적진동흡수기로 불리는 진동제어장치를 기반으로 Ormondroyd et al.(1928)이 조화하중이 작용하는 비감쇠 단자유도 구조물에 대하여 TMD의 최적 설계 변수 연구결과를 최초로 발표한 이후 1956년 Denhartog에 의해 정식화되었으며(Shooshtari et al., 2008), 현재까지 지속적으로 연구 및 적용되어 왔다(Rana, 1996).
- 비감쇠 단자유도계 시스템에 대하여 유도되었던 초기 이론은 이후 Randall et al.(1981), Warburton(1982), Tsai et al.(1993)에 의해 감쇠시스템, 다자유도계 시스템 및 다양한 하중에 대하여 연구되었다. Sadek et al.(1997), Lee et al.(2006) 등은 지진하중에 대한 최적 TMD 설계파라미터에 대한 연구를 수행하였다. 그러나 건물, 교량 등 주시스템(primary system)과의 동조를 위해 설치된 TMD시스템이 주시스템의 고유진동수와 동조하지 않을 경우 진동 저감 성능이 급격히 저하되는 동조이탈 현상이 발생하며, 이러한 단점은 환경 요인에 따른 고유진동수의 변동성(Salawu, 1997)을 감안할 때 TMD 시스템의 적용에 큰 제약이 될 수 있다.
- 동조이탈로 인한 성능저하 문제를 해결하기 위한 대표적인 기법으로는 ATMD(Active Tuned Mass Damper), MTMD(Multiple TMD) 등이 있다. ATMD는 인위적으로 고유진동수를 조정하여 주시스템과 동조할 수 있도록 하는 TMD시스템이나, 대형 외부전원이 필요하여 큰 비용이 요구되는 단점이 있다(Daniel et al., 2013). MTMD의 기본 원리는 아래 그림 (a)의 STMD(Single TMD)와 달리 그림 (b)와 같이 서로 다른 주파수에 동조할 수 있는 다수의 질량으로 구성된 TMD 시스템을 통하여 주시스템의 주파수 변동 시에도 동조할 수 있도록 하는 것이다(Abe and Fujino, 1994). Clark(1988)는 지진과 같이 다수의 모드가 지배적인 하중 작용 시에도 MTMD 개념 적용을 통하여 진동 크기를 상당히 감소시킬 수 있음을 제시하였다.



<STMD와 MTMD 개념도>

나. 기존 이론 검토

(1) STMD

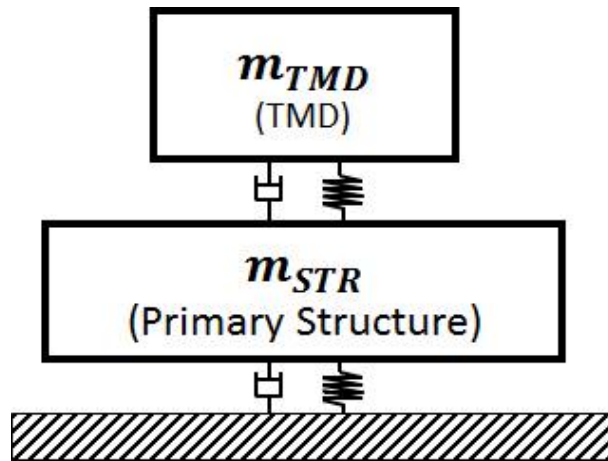
□ STMD 시스템의 개념은 외력의 작용으로 주시스템(primary system)에 발생하는 진동에 대하여 이차시스템(secondary system)이 동조주파수에서 공진하도록 함으로써 이차시스템의 거동으로 에너지를 대신 소산하여 주시스템의 진동을 제어하는 것이다(그림 참조). 따라서 주시스템 또는 목적구조물의 동적 특성 분석을 통하여 제어하고자 하는 모드와 설계주파수 값을 결정하고, 이차시스템 또는 STMD와 목적구조물의 질량비를 이용하여 STMD의 스프링강성과 감쇠계수를 산정한다.

□ STMD의 설계변수를 수식으로 표현하면 식 4 - 식 6과 같이 무차원화 할 수 있다.

$$\mu = \frac{M_{STMD}}{M_{STR}} \quad (4)$$

$$f = \frac{\omega_{STMD}}{\omega_{STR}} \quad (5)$$

$$\xi_{STMD} = \frac{C_{STMD}}{2\omega_{STMD}M_{STMD}} \quad (6)$$



<STMD 구조시스템>

□ 여기서, μ 는 ($=M_{STMD} / M_{STR}$) 질량비로서 STMD의 질량과 구조물의 모드 참여질량과의 비; f 는 고유진동수비로서 STMD의 고유진동수와 구조물의 고유진동수 비; ω_{STR} 는 ($=\sqrt{K_{STR}/M_{STR}}$) 구조물의 질량과 강성으로 표현되는 구조물의 목적 진동수; ω_{STMD} 는 ($=\sqrt{K_{STMD}/M_{STMD}}$) STMD의 질량과 강성으로 표현되는 요구되는 STMD의 진동수; ξ_{STMD} 는 STMD의 감쇠비; C_{STMD} 는 STMD의 감쇠계수이다.

□ 위 세 가지 설계변수의 최적값을 정하는 방법은 여러 가지가 있으며, 이는 무엇을 최적 기준으로 삼는지에 따라 달라진다. 이 가운데 조화하중에 대한 변위 응답의 증폭비를 기준으로 한 Den Hartog(1947)의 식과 백색잡음으로 모델링 되는 불규칙 하중에 대한 변위응답의 표준편차를 기준으로 하는 Ayorinde et al.(1980)의 식이 있다. 제안된 설계식은 감쇠가 없는 구조물을 대상으로 하여 실제 건물에 적용 시 약간의 오차가 발생하지만 실제 구조물의 감쇠가 크지 않음을 감안하였을 때 충분히 적용 가능하다(박지훈 등, 2008).

□ Den Hartog(1947)의 식은 구조물에 조화하중 작용 시 발생하는 동적변위 응답의 정적변위에 대한 증폭비를 최소화하여 얻어진 식이며, 설계변수를 고려하여 장치의 스프링강성과 감쇠계수를 산정할 수 있는 최적설계식을 식 7 - 9과 같이 제안하였다.

$$f_{Optimum} = \frac{1}{1+\mu} = \frac{\omega_{STMD}}{\omega_{STR}} \quad (7)$$

$$\xi_{STMD} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1+\mu)}} \quad (8)$$

$$\Delta\xi_{eq} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\mu}{2+\mu}} \quad (9)$$

여기서, $f_{Optimum}$ 는 최적주파수비; ξ_{STMD} 는 최적감쇠비; $\Delta\xi_{eq}$ 는 등가감쇠비 증가량이다.

□ Ayorinde et al.(1980)의 식은 백색잡음 형태의 불규칙 하중에 대한 변위의 표준편차를 최소화하여 얻어진 식이며, 설계변수를 고려하여 장치의 스프링강성과 감쇠계수를 산정할 수 있는 최적설계식을 식 10 - 식 12와 같이 제안하였다.

$$f_{Optimum} = \frac{\sqrt{1+\mu/2}}{1+\mu} = \frac{\omega_{STMD}}{\omega_{STR}} \quad (10)$$

$$\xi_{STMD} = \sqrt{\frac{\mu(1+3\mu/4)}{4(1+\mu)(1+\mu/2)}} \quad (11)$$

$$\Delta\xi_{eq} = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{\mu(1+\mu)}{(1+3\mu/4)}} \quad (12)$$

여기서, $f_{Optimum}$ 는 최적주파수비; ξ_{STMD} 는 최적감쇠비; $\Delta\xi_{eq}$ 는 등가감쇠비 증가량이다.

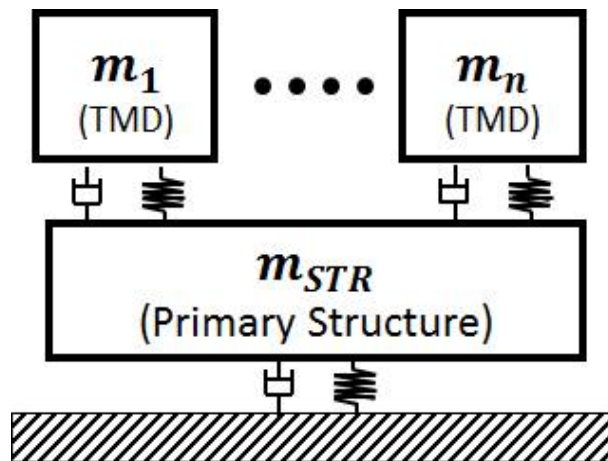
□ 최적 진동수비의 경우 두 근사식은 모두 '1' 로서 동일한 값을 가진다. 그러나 최적 STMD 감쇠비의 경우에는 서로 상이한 값을 가짐을 볼 수 있으며 불규칙 하중에 대한 최적 STMD 감쇠비가 조화하중에 대한 값의 대략 80% 정도로서 다소 작음을 알 수 있다. 등가감쇠비의 증가량도 상이한 값을 가지며 이는 Den Hartog(1940)의 등가감쇠비가 조화하중에 대한 주

구조물의 변위 증폭비를 기준으로 구해졌기 때문이다. 그러나 최적 설계변수 사용 시 등가 감쇠비는 질량비만으로 결정됨을 볼 수 있으며 질량비가 작은 경우 제공근에 반비례하여 증가한다. 따라서 최적 설계변수를 실제로 구현 가능하다면 STMD 질량체가 클수록 응답의 감소효과가 커지게 된다.

- 일반적으로 교량에 STMD 적용 시 동조주파수는 주로 1, 2차 모드를 제어 대상으로 하여, 산정한 설계 주파수 값으로 STMD의 특성을 결정하고 모드형상의 크기가 최대인 위치에 설치하는데, 이는 운행 하중에 의한 교량의 거동이 1, 2차 모드형상에 의해 지배되며, 해당 모드의 연직방향 질량참여율이 높게 나타나기 때문이다. 건물의 경우 하중 특성에 따라 제어할 구조물의 방향성분을 선정하고 해당방향 모드의 질량참여율을 고려하여 설계주파수를 결정할 수 있다(우성식 등, 2013).

(2) MTMD

- STMD는 복잡하지 않은 구조적 원리로 진동을 저감할 수 있는 기법이지만 대상구조물의 동적특성 예측 및 STMD의 설계 단계에서 발생할 수 있는 오차로 인하여 진동저감 성능이 크게 감소하거나 오히려 동적거동을 증폭시키는 부정적인 효과를 일으킬 수 있다. MTMD기법은 그림 2.2와 같은 시스템을 가지며, STMD의 한계를 극복하기 위한 방안으로 제안되었다. MTMD기법은 대상 구조물의 목적주파수를 포함한 특정 진동수 대역에 다수의 STMD를 동조함으로써 진동제어 효과를 향상시킬 수 있다.



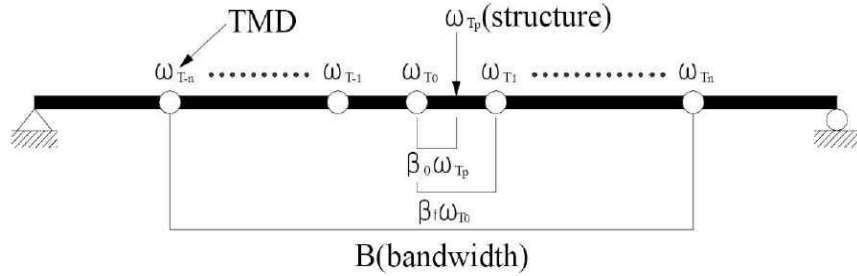
<MTMD 구조시스템>

- MTMD의 설계는 식 13과 같이 구조물에 동조하는 STMD의 질량과 MTMD의 총 질량 합을 서로 같도록 하고, 각각의 MTMD를 다음 그림과 같이 중심주파수 w_0 를 기준으로 일정한 편차(β)를 갖는 서로 다른 주파수에 동조하도록 한다. 그림과 같이 구조물에 $2n-1$ 개의 STMD가 적용되었을 때 j 번째 MTMD의 동조주파수는 다음 식 13과 같이 나타낼 수 있다.

$$M_{MTMD} = \sum_{j=1}^n m_{MTMD}^{jth} \quad (13)$$

$$w_{MTMD}^{jth} = w_0(1 \pm j\beta), \quad j = -n, \dots, n \quad (14)$$

- 여기서, M_{MTMD} 는 STMD기법으로 산정 시 요구되는 장치의 질량; m^{jth}_{MTMD} 는 n 개로 분할한 M_{MTMD} 의 j 번째 MTMD의 질량; ω_0 는 제어하고자 하는 구조물의 주파수; β 는 장치간의 동조 주파수 간격; ω^{jth}_{MTMD} 는 j 번째 MTMD의 동조주파수이다. 참고로 β 는 일정한 상수값을 가지며, $B=2n\beta$ 를 동조주파수대역(Frequency Band-Width)라 한다.



<MTMD의 동조주파수대역>(Abe et al,1994)

- j 번째 TMD의 강성 및 감쇠계수를 k^{jth}_{MTMD} 와 c^{jth}_{MTMD} 라고하면, 해당 질량체 m^{jth}_{MTMD} 와 감쇠비 ξ^{jth}_{MTMD} 는 식 15 및 식 16과 같이 표현된다.

$$m^{jth}_{MTMD} = \frac{k^{jth}_{MTMD}}{(\omega^{jth}_{MTMD})^2} \quad (15)$$

$$\xi^{jth}_{MTMD} = \frac{c^{jth}_{MTMD}}{2m^{jth}_{MTMD}\omega^{jth}_{MTMD}} = \frac{c^{jth}_{MTMD}}{2k^{jth}_{MTMD}}\omega^{jth}_{MTMD} \quad (16)$$

- Joshi et al.(1997)에 의하면 MTMD의 평균 감쇠비 ξ_{MTMD} 는 식 17과 같으며, 구조물의 제어하고자 하는 모드 참여질량과 MTMD의 질량비(μ)는 식 18과 같이 표현된다.

$$\xi_{MTMD} = \sum_{j=1}^n \frac{\xi^{jth}_{MTMD}}{n} = \frac{\omega^{jth}_{MTMD} c^{jth}_{MTMD}}{2k^{jth}_{MTMD}} \quad (17)$$

$$\mu = \frac{\sum_{j=1}^n m^{jth}_{MTMD}}{M_{STR}} \quad (18)$$

여기서, M_{STR} 은 구조물의 제어하고자 하는 모드 참여질량이다.

- 식 15 - 18을 이용하면 k^{jth}_{MTMD} 와 c^{jth}_{MTMD} 을 다음 식 19와 식 20과 같이 각각의 MTMD와의 관계식으로 표현할 수 있다.

$$k_{MTMD}^{jth} = \frac{\mu M_{STR}}{\sum_{j=1}^n \frac{1}{\omega_{MTMD}^{jth}}} \quad (19)$$

$$c_{MTMD}^{jth} = \frac{2 \xi_{MTMD} \mu M_{STR}}{(\omega_0 \sum_{j=1}^n \frac{1}{\omega_{MTMD}^{jth}})} \quad (20)$$

- 이외 기존 연구자들에 의해서 MTMD의 다양한 최적 질량분포 및 부설위치 선정 기법과 관련한 연구가 수행되었다(이용선, 2005; Bandivadekar et al., 2012; Wang et al., 2014).

다. 승강장 MTMD 알고리즘

- 실제 철도역사는 접근로 등의 시설의 존재로 승강장 전체를 TMD화하는 STMD의 적용이 어려우므로 TMD 설치 효과가 큰 위치에 다수의 TMD를 설치하는 MTMD 기술의 개발이 필요하다. MTMD 기술은 복수의 TMD 설치를 통하여 STMD의 단점 중 하나인 동조이탈현상을 완화할 수 있는 기술이다. 특히 설계 시 특정 주파수영역에 대한 진동저감 설계도 가능하다.
- 이 연구에서는 기존 STMD 및 MTMD에 대한 적용성 검토 결과, 철도역사 구조물과 열차하중의 특성 및 기존 연구를 참고하여 철도역사 승강장 MTMD의 설계파라미터 결정을 위한 알고리즘을 개발하였다. 기존 연구(Bandivadekar et al., 2012; Daniel et al., 2013)의 경우 고층건물, 교량 등 지배하는 특정모드가 분명한 구조물에 대한 알고리즘으로 초기에 최적화된 강성을 결정할 수 있어 최적화를 수행하지 않으나, 열차하중이 통과하는 철도역사 구조물의 경우 저감하고자 하는 응답을 지배하는 모드를 미리 알 수 없으므로 강성에 대한 최적화과정을 포함한 알고리즘을 구축하였다.
- 제안된 알고리즘은 해석모델을 이용하여 산정된 응답을 기초로 하며, 기존 철도역사에 설치할 경우 실제 측정된 응답을 이용할 수 있다. 참고로 제안된 알고리즘은 승강장 여러 곳을 TMD화 할 수 있어 복수의 주파수에 동조하여 진동저감 효율을 증가시킬 수 있으며, 인체에 영향을 미치는 특정 주파수영역에 저감이 가능하도록 설계할 수 있다.

(1) MTMD 알고리즘

- 응답의 출력밀도함수, $X_u(w)$,는 다음과 같이 산정할 수 있다(Bandivadekar et al., 2012).

$$X_u(w) = H(w) \cdot F(w) \quad (21)$$

여기서, $H(w)$ 는 전달함수, $F(w)$ 는 입력하중을 각각 나타낸다.

- 구조물의 위치 i 에서의 응답에 대한 출력밀도함수의 RMS(Root Mean Square)는 다음과 같다.

$$X_{RMS}(\ddot{u}^t)_i = \sqrt{\int_0^\infty |(X_u(\omega))_i|^2 d\omega} \quad (22)$$

□ TMD가 설치될 수 있는 위치의 응답에 대한 대푯값은 RMS를 이용하여 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$X_{RMS}(\ddot{u}^t) = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^i (X_{RMS}(\ddot{u}^t)_i)^2}{i}} \quad (23)$$

□ MTMD는 각 모드별 최대응답 위치에 배치하며, j 번째 모드에 대하여 각 TMD의 질량 분포 및 크기는 다음 식으로 결정할 수 있다.

$$(\mu_{TMD})_j = \frac{\varphi_j^T T^T D[(m_{TMD})_j] T \varphi_j}{\varphi_j^T m_{str} \varphi_j} \quad (24)$$

여기서, $(\mu_{TMD})_j$ 는 j 번째 모드에서 질량비; φ_j 는 j 번째 모드벡터; T 는 변환행렬 (transformation matrix); $D[(m_{TMD})_j]$ 는 j 번째 모드에 동조하는 TMD의 질량을 대각요소로 갖는 대각행렬; m_{str} 는 구조물의 질량이다(Daniel et al., 2013).

□ 각 TMD의 강성, $(k_{TMD})_{ij}$, 및 감쇠비, $(\xi_{TMD})_j$,는 각각 식 (25)와 (26)을 이용하여 결정할 수 있다.

$$(k_{TMD})_{i,j} = (m_{TMD})_{i,j} \cdot [(\omega_{TMD})_j]^2 \quad (25)$$

$$(\xi_{TMD})_j = \sqrt{\frac{3(\mu_{TMD})_j}{8[1 + (\mu_{TMD})_j]^3}} \quad (26)$$

식 (25) 및 (26)으로 결정된 강성과 감쇠비의 적절성은 식 (27)로 판단할 수 있다.

$$\frac{\partial X_{RMS}(\ddot{u}^t)}{\partial k_{TMD}} \frac{\partial X_{RMS}(\ddot{u}^t)}{\partial c_{TMD}} \approx 0 \quad (27)$$

□ 모드별 반영비율, M_n 은 다음 식을 이용하여 최적화할 수 있다(Lin et al., 2010).

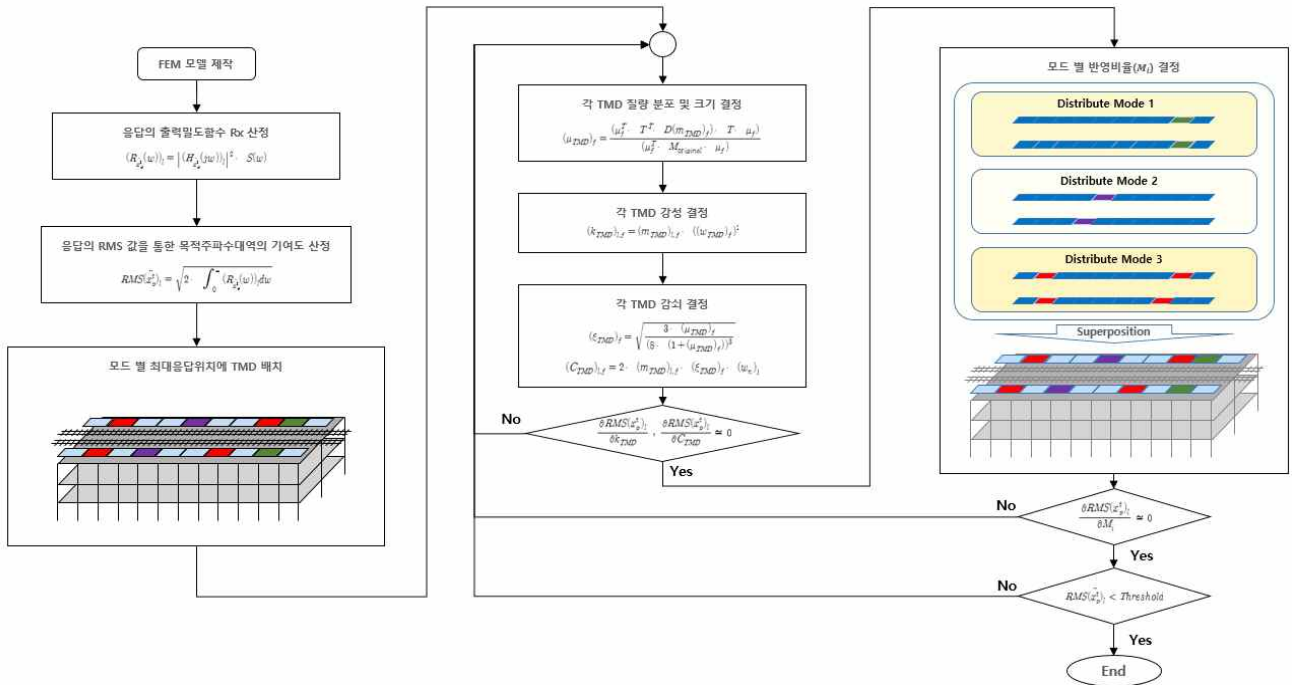
$$\frac{\partial X_{RMS}(\ddot{u}^t)}{\partial m_i} \approx 0 \quad (28)$$

최적화된 TMD 설계파라미터의 적절성은 최종적으로 다음 식을 이용하여 판단할 수 있다.

$$X_{RMS}(\ddot{u}^t) < e \quad (29)$$

여기서, e 는 설정된 목표진동값이다.

□ 다음 그림은 개발된 승강장 MTMD 설계파라미터 결정 알고리즘에 대한 순서도이다.

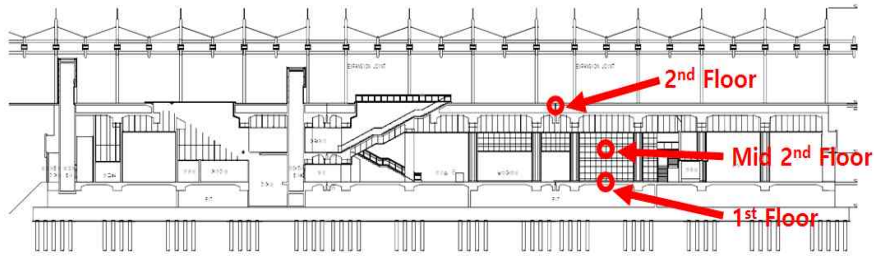


<승강장 MTMD 설계알고리즘>

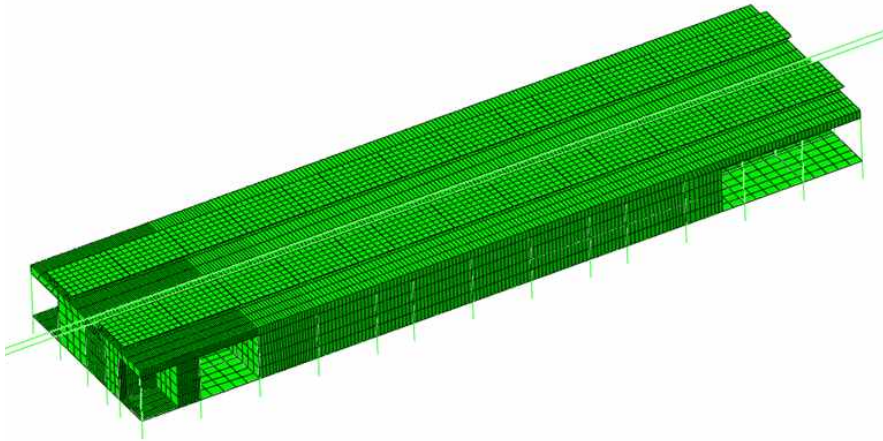
(2) 수치해석을 이용한 검토

□ 제안된 MTMD 알고리즘의 진동저감효과는 수치해석을 이용하여 검토하였다. 수치해석에 적용된 철도역사 형식은 구조적으로 진동 수준이 가장 높은 것으로 알려진 선하역사로 하였으며, 검토를 위한 예제는 국내 가장 많은 구조형식인 자갈도상궤도가 부설된 2층의 대천역사로 선정하였다. 열차하중은 대천역을 통과하는 열차 중 열차제원에 대한 상세 정보가 공개되어 있는 새마을 열차로 하였다.

□ 개발된 MTMD 알고리즘의 진동저감효과는 대천역사 수치해석모델에 대한 MTMD 설치 전·후의 응답 비교를 통하여 검토하였다. 응답 비교 위치는 그림에 표시된 2층 슬래브, 중2층 및 1층 슬래브로 하였다. MTMD 설계파라미터의 최적화는 열차가 시속 100km로 역사를 통과할 때의 응답을 이용하여 수행하였다. 표는 개발된 알고리즘을 이용하여 최적화된 MTMD 설계파라미터이다.



<대천역사 측면도>



<대천역사에 대한 유한요소해석 모델>

<MTMD 설계 파라미터>

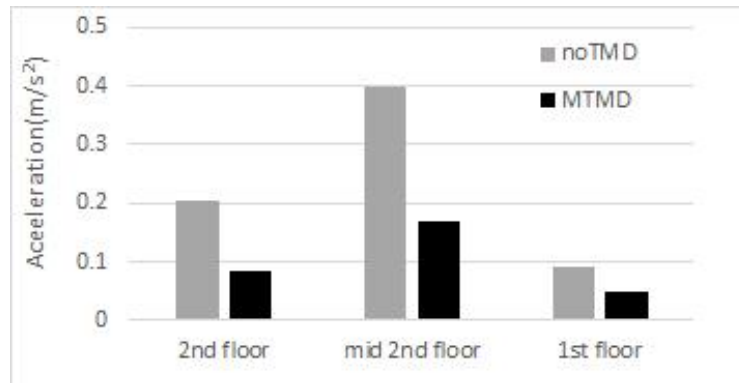
파라미터	단위	설계값
M_{TMD}	kg	1.717
M_{STR}	kg	2,773,150
μ_{TMD}		0.04
ξ_{tmd}		0.115
k_{TMD}	MN/m	2.460
C_{TMD}	MN-s/m	2.43

□ MTMD 설치 전·후 2층 슬래브, 중2층 및 1층 슬래브에서의 응답 비교 결과는 다음 그림에 정리하였다. 각 위치에서 시간영역응답의 RMS(Root Mean Square) 비교 결과 및 저감량도 제시하였다.

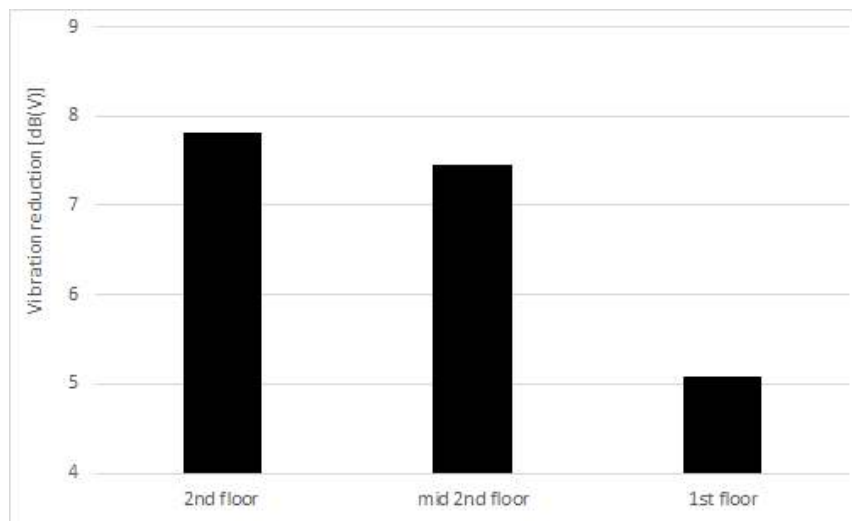
□ 그림에서 MTMD 설치 시 진동은 2층 및 중2층 슬래브에서 각각 7.4dB(V) 및 7.8dB(V), 1층 슬래브에서 5dB(V) 정도 감소하는 것을 확인할 수 있다.

□ 참고로 진동의 reference는 KS 기준에 따라 $10\mu\text{m/s}^2$ 을 아래 식과 같이 사용하였다.

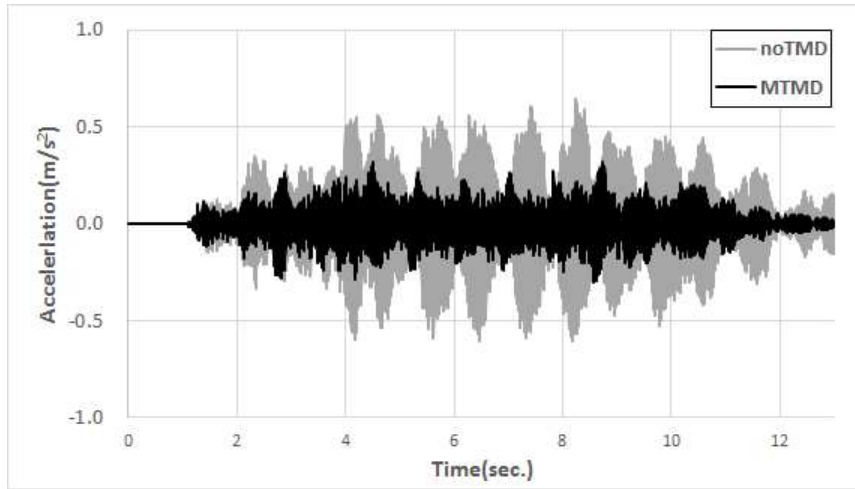
$$20\log\left(\frac{a}{a_0}\right), \quad a_0 = 10^5\text{m/s}^2 \quad (30)$$



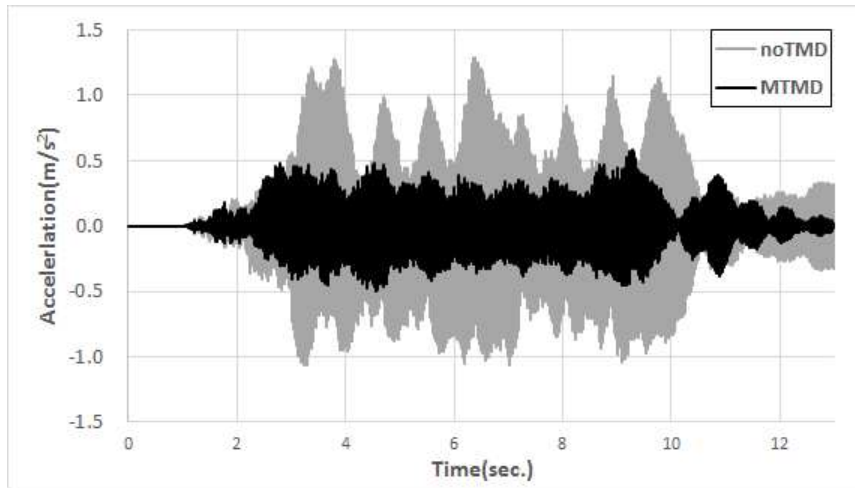
(a) 가속도 RMS 비교



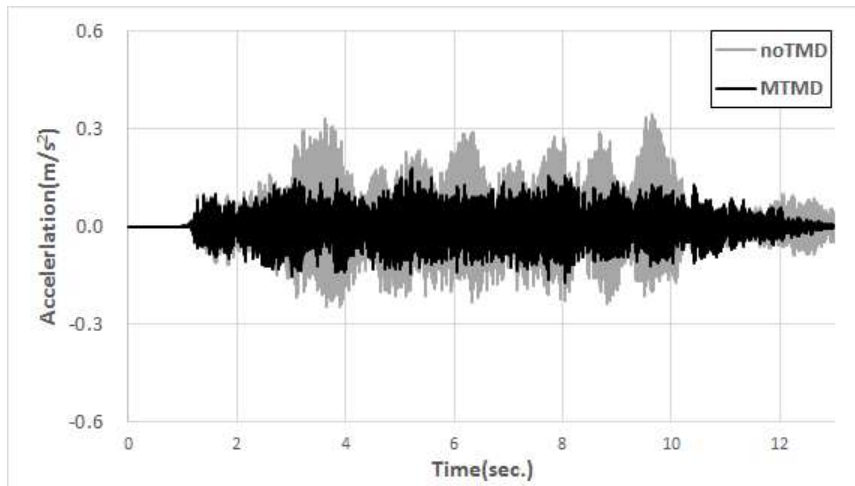
(b) 진동크기 저감량
<MTMD 적용에 따른 진동저감량>



(a) 2층 슬래브



(b) 중2층 슬래브

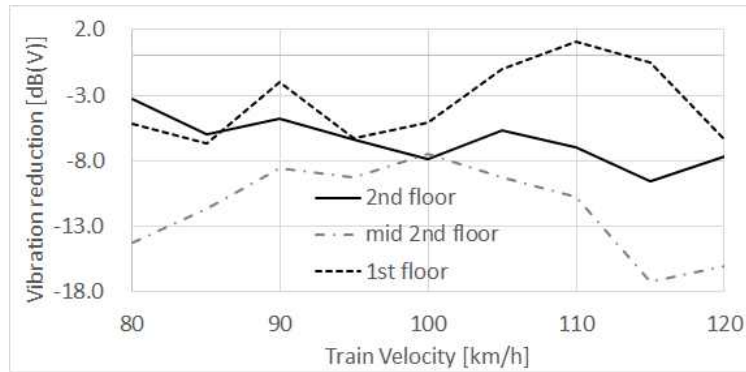


(c) 1층 슬래브

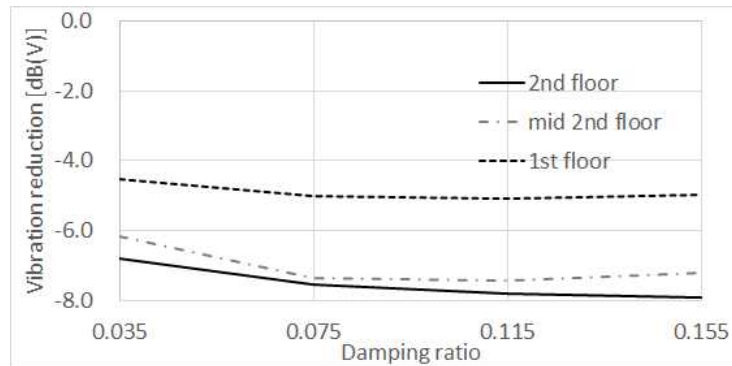
<MTMD 적용에 따른 시계열진동 변화>

- 제안된 MTMD 알고리즘으로 결정된 설계파라미터의 적절성은 열차 속도, 감쇠비 및 강성의 변화에 따른 진동저감량을 통하여 검토하였다. 열차속도에 따른 진동저감 성능 검토는 시속 100km를 중심으로 $\pm 20\text{km}$ 범위의 속도 변화에 따른 응답을 검토하였다.

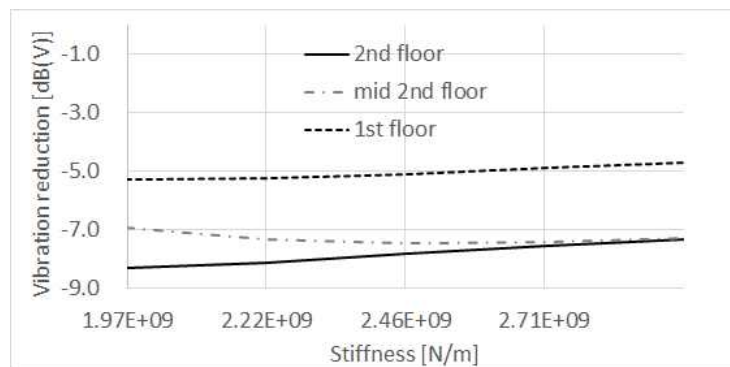
- 감쇠비는 최적값 0.115을 중심으로 -0.08에서 +0.04까지, 강성은 최적값 2.46MN/mm를 중심으로 $\pm 20\%$ 범위의 변화에 따른 응답저감량을 검토하였다. 참고로 감쇠비 검토범위는 통상적인 감쇠비의 상한인 15%를 넘지 않도록 범위를 설정하였다. 응답 비교 위치는 동일하게 2층 슬래브, 중2층 및 1층 슬래브로 하였다. 최적화된 설계파라미터의 적절성 검토 결과는 다음 그림에 제시하였다.



(a) 열차속도



(b) 스프링-감쇠시스템의 감쇠



(c) 스프링-감쇠시스템의 강성

<MTMD 설계파라미터에 따른 진동저감성능 변화>

- 그림 (a)에서 시속 100km를 중심으로 속도가 변화하면, 진동감소량이 대체로 증가하는 것으로 나타났으나, 1층의 경우는 큰 상관성을 보이지 않았다. 이러한 결과를 통하여 MTMD의 진동저감성능은 열차속도에 대한 의존성이 있으며, MTMD 설계 시 역사를 통과하는 열차의 속도에 대한 분석이 필요함을 알 수 있다.

-
- 그림 (b)에서 진동감소량은 최적화된 감쇠비에서의 응답이 1층과 중2층은 가장 크게 나타났으나, 2층에서는 최적값 이후에도 커지는 것으로 나타났다. 그림 (c)에서 중2층의 진동감소량은 최적강성에서 최대로 나타났으나, 1층 및 2층 슬래브의 진동감소량은 강성이 감소할수록 증가하는 것으로 나타났다.

라. 역사형식에 따른 적용방안 분석

(1) 역사구조형식 및 선로종별에 따른 검토

- 철도역사는 구조적으로 지상역사와 지하역사로 분류할 수 있으며, 지상역사는 선하역사와 선상역사로 구분할 수 있다. 열차하중이 직접 역사구조물로 전달되는 선하역사와 달리 선상역사와 지하역사는 지반을 통해 역사구조물로 전달되는 것을 알 수 있다. 이러한 전달경로의 차이는 구조물에 전달되는 열차의 운행으로 발생하는 진동에너지의 차이를 발생시킨다. 이러한 전달 경로 차이로 인하여 역사구조물에 전달되는 진동에너지의 차이는 한국철도공사의 연구보고서(2005)를 이용하여 검토할 수 있다.
- 보고서는 선하역사의 대표적인 두가지 형식인 TBS(Track on Building System)와 TPS(Track on Pier System)의 전달경로에 따른 진동에너지의 차이를 도심역과 덕계역에 대한 수치해석을 통해 검토하였다(최상현 등, 2015b).
- 검토 결과 TBS 형식과 달리 TPS 형식은 열차의 운행으로 발생한 진동에너지의 대부분이 기초부에서 흡수되는 것으로 나타났다. 그림들에서 선상역사와 지하역사는 TPS 형식과 같이 진동에너지가 기초를 통해 역사구조물로 전달되는 것을 알 수 있으며, 이러한 점을 감안할 때 선상역사와 지하역사도 역사구조물로 전달되는 진동에너지는 상대적으로 매우 작은 것을 유추할 수 있다. 또한 진동의 전달경로 상의 승강장의 위치를 감안할 때 선상역사와 지하역사 및 TPS형식의 선하역사는 승강장 TMD의 효과가 거의 없을 것으로 판단된다.
- 철도역사는 선로종별에 따라 일반철도역사, 고속철도역사, 도시철도역사 및 경전철역사로 분류할 수 있다. 각 역사 종류 별로 운행하는 열차 종류가 차이날 수 있으며, 이에 따른 하중 특성이 변화할 수 있으나, 역사구조물의 구조형식 차이는 거의 없으므로 전술한 구조형식에 따른 적용방안을 변동없이 준용하면 될 것으로 판단된다.

(2) 신설 및 기존역사 적용 방안 검토

- 철도역사 승강장의 TMD화의 기본 개념은 승강장 하부에 그림 1.3과 같은 스프링-감쇠장치를 설치하여 승강장의 질량을 이용한 TMD 시스템을 구축하는 것이다(유용 등, 2016). 이러한 점을 감안할 때 신설 역사의 경우 기존 역사에 비하여 승강장 TMD 설치가 용이할 것으로 판단되나, 기존 역사의 경우도 큰 어려움이 없을 것으로 판단된다. 물론 DLTMD의 경우 기존 승강장을 교체해야 하므로 기존 역사보다는 신설 역사가 훨씬 유리한 측면이 있다.
- 실제 철도역사에 승강장 TMD 기술 적용 시 예상되는 가장 큰 어려운 점은 역사구조물의 동적특성을 정확히 파악하는 것이다. 주구조물의 동적특성과 동조하는 부가 질량이 주구조물의 진동 에너지를 흡수하는 TMD의 원리를 고려할 때 TMD 시스템의 설계에는 주구조물의 정확한 동적특성 파악이 가장 중요하며, 부정확한 주구조물의 동적특성은 동조이탈현상을 발생시키며 진동저감능을 감소시키는 결과를 초래한다.

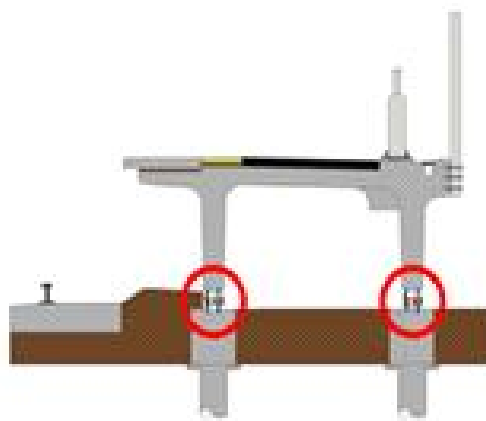


<스프링-감쇠장치>

- 구조물의 동적특성은 모달해석을 통해 추출할 수 있다. 모달해석은 강제진동에 기반한 기법과 상시진동에 기반한 기법이 있으나(최상현 등, 2015a), 인위적인 역사구조물의 경우 대부분 대형구조물로 인위적인 진동입력을 통해 구조물 전체를 자극하기 어려우므로 열차 운행으로 발생하는 진동을 이용한 상시진동기법을 이용해야 한다. 특히 실제 대부분의 역사구조물은 역사의 길이에 비하여 높이가 훨씬 작으며, 수평방향이 대부분의 저차모드를 점유하고 있고 수직방향 모드는 상대적으로 고차에서 나타나는 특성이 있으므로 동적특성 산정 시 이러한 점을 감안하여야 한다.

(3) 스프링-감쇠 시스템 시공 방안 검토

- 승강장 TMD 시공을 위해서는 그림과 같이 승강장 하부에 스프링-감쇠시스템의 설치가 필요하다. 승강장의 크기와 형태는 이용객 수, 역사의 규모 및 용도에 따라 다양하나, 구조재로 설계되지 않으며 승강장이 TMD의 공조질량으로만 사용되므로 시공 방안만을 감안할 때 기존 역사와 신설 역사의 경우로 구분할 수 있다.



<승강장 TMD 개념도>

- 기존 역사의 경우 승강장의 높이는 열차의 승하차를 고려하여 설계되므로 스프링-감쇠장치 설치 시 TMD화 구간 분리 후 하부 절삭 및 콘크리트 표면처리가 필요하며, 설치를 위한 TMD화 구간 승강장의 인상은 승강장의 자중을 고려하여 적절하게 선택된 유압 Jack 등을 이용하여 가능하다. 자갈도상궤도의 경우 자갈막이 설치가 필요할 수 있다.
- 신설 역사의 경우 승강장 및 스프링-감쇠장치를 일체화한 프리캐스트 제품화할 수 있어 기존 역사에 비하여 용이하게 설치할 수 있다.

마. 결론

- 승강장 MTMD 설계 시 필요한 설계파라미터를 최적화할 수 있는 알고리즘을 개발하였으며, 개발된 알고리즘은 해석을 통하여 산정된 응답이나 실제 구조물에서 측정된 응답을 이용하여 최적화된 설계파라미터를 결정할 수 있으므로 실용적이다.
- 2층 선하역사에 대한 수치해석을 이용한 검토 결과 MTMD 설치 시 진동은 2층 및 중2층 슬래브에서 각각 최대 7.4db(V) 및 7.8dB(V), 1층 슬래브에서 5dB(V) 정도 감소할 수 있는 것으로 나타났다.
- MTMD의 진동저감성능은 열차속도에 대한 의존성이 있으며, MTMD 설계 시 역사를 통과하는 열차의 속도에 대한 분석을 통한 MTMD 설계 파라미터 산정이 필요할 것으로 판단된다.
- 2층 선하역사에 대한 수치해석을 이용하여 최적화된 설계파라미터의 적절성을 검토한 결과, 최적감쇠비 및 최적강성에서 진동저감효과가 크게 나타나 효용성이 있는 것으로 판단되나, 추가적인 연구가 필요한 것으로 나타났다.
- 철도역사의 구조형식에 따른 분석 결과 TMD 승강장 적용에 따른 진동감소효과는 선하역사가 가장 크며, 진동전달이 기초를 통해 역사구조물에 전달되는 선상역사와 지하역사는 효과가 크지 않을 것으로 판단된다.
- 일반철도역사, 고속철도역사, 도시철도역사 및 경전철역사는 구조적으로 차이가 없어 구조형식에 따른 분류에 따라 TMD 승강장을 설치하면 되며, 신설 및 기존 역사의 경우도 큰 차이가 없는 것으로 판단된다.

5. Bench Scale 실험데이터를 반영한 해석모델 및 기법 고도화

가. 개요

- 승강장 TMD 시뮬레이션 기법의 고도화의 목적은 TMD 성능에 대한 합리적인 예측이 가능한 설계기법의 기초가 되는 해석기법을 정립하는 것이다. 승강장 TMD의 성능을 예측하고 설계에 활용할 수 있는 시뮬레이션 기법의 고도화는 Bench Scale 규모의 역사모형 실험을 통해 측정된 응답을 이용하여 수행하였다.
- 승강장 TMD 기법의 고도화의 목적은 승강장의 TMD화 과정에서 발생하는 문제점을 파악하고 해결할 수 있도록 기법을 개선하는 것이며, 수치해석 결과 및 Bench Scale 규모의 역사모형 실험 결과를 이용하여 수행하였다.

나. 시뮬레이션 기법 고도화

(1) 모델개선 기법 분석

- 해석모델이 실제 구조물의 응답과 근접한 결과를 산정할 수 있도록 해석모델에 사용된 파라미터의 값을 체계적으로 조절하는 모델개선 기법은 크게 수학적 이론에 기초한 하드컴퓨팅기법(hard computing; calculus based algorithm)과 소프트컴퓨팅기법(soft computing; non-calculus based algorithm)으로 분류할 수 있다(김두기, 2011).
- 하드컴퓨팅기법의 대표적인 예로는 시간영역법(time domain method), 모드섭동법(modal perturbation), 민감도법(sensitivity method), 주파수응답법(frequency domain method) 등이 있으며, 소프트컴퓨팅기법으로는 퍼지이론(Fuzzy theory), 신경망기법(neural network method), 유전자알고리즘(genetic algorithm), 전문가시스템(expert system) 등이 있다(이진학 등, 2002).
- 모델개선기법은 응답과 각각 장·단점이 있으며, 대상 구조물에 가장 최적인 기법을 선별하여 적용해야 한다. 시스템파라미터의 추정에는 시스템에 작용하는 입력 또는 출력 자료를 이용하여 입출력 자료 취득의 용이성은 기법 선정에 가장 큰 고려 요소이다.
- 철도역사의 경우 대형규모로 실제 구조물에서 충분한 입출력 자료를 얻기 어려우므로 입출력 자료를 이용한 학습에 기반한 소프트컴퓨팅기법은 배제하였다.
- 다음 표는 Ibrahim(1988), Inman et al.(1990), Imregun et al.(1991), Nam(2001)의 연구 결과에 기반한 시스템인식기법에 대한 평가 결과이다. 이 연구에서는 아래 표의 결과를 고려하여 민감도기법을 적용하여 모델개선을 수행하였다.

<시스템인식 기법의 평가>

선택 기준 SI 기법	(a) 인식력	(b) 계산량	(c) 적용성	(d) 정확도
시간영역법	중	중	중	하
섭동법	상	중	하	중
주파수응답함수법	상	하	중	중
민감도행렬법	상	중	중	상

(2) 모델개선 및 결과 분석

- 모델개선은 민감도기법을 이용하여 수행하였으며, 민감도기법을 간략히 소개하고 Bench Scale 실험결과를 이용한 모델개선 결과를 검토하였다.
- 민감도기법 민감도행렬법은 시스템 파라미터에 대한 응답 데이터의 편미분을 부분 Taylor 급수를 이용하여 구성하고 이들을 요소로 가지는 민감도행렬을 이용하여, 시스템 파라미터를 인식하는 기법으로 다음과 같이 요약될 수 있다(Stubbs and Osegueda, 1990).
- 미지의 시스템에 대한 수학적 모델이 n 개의 시스템파라미터 x_i ($i = 1, 2, \dots, n$)로 정의될 수 있다고 가정하자. $\omega(\mathbf{x} + d\mathbf{x})$ 가 실제 시스템의 고유진동수(참값)를, $\omega(\mathbf{x})$ 가 수학적 모델에서 구한 고유진동수(근사값)를 나타낸다고 가정하면, 실제 시스템과 해석 모델의 응답 차이를 나타내는 오차함수, e 는 다음과 같이 표현될 수 있다(Choi et al., 2010).

$$e = \omega(\mathbf{x} + d\mathbf{x}) - \omega(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n \frac{\partial \omega}{\partial x_i} dx_i \quad (31)$$

- 식 (31)을 ω_j 로 나누어 normalize하고 j 번째 고유진동수에 대하여 쓰면:

$$\frac{e_j}{\omega_j} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial \omega_i}{\partial x_i} \frac{x_i}{\omega_j} \frac{dx_i}{x_i} \quad (32)$$

또는

$$z_j = \sum_{i=1}^n f_{ji} \alpha_i \quad (33)$$

여기서, $z_j = \frac{e_j}{\omega_j}$ 는 실제 시스템과 해석모델의 j 번째 응답벡터 간의 분차 (fractional

change); $\alpha_i = \frac{dx_i}{x_i}$ 는 i 번째 시스템 파라미터의 분차; $f_{ji} = \frac{\partial \omega_i}{\partial x_i} \frac{x_i}{\omega_i}$ 는 i 번째 시스템 파라미터에 대한 j 번째 민감도를 각각 나타낸다.

□ 식(33)을 행렬식으로 쓰면:

$$\mathbf{Z} = \mathbf{F}\boldsymbol{\alpha} \quad (34)$$

□ 구조물 및 수학적 모델의 시스템 파라미터의 변화가 고유진동수 변화에 미치는 민감도를 나타내는 민감도행렬 $\mathbf{F}$ 는 다음과 같이 산정될 수 있다.

- (a) 시스템에 대한 시스템파라미터와 초기 수학적 모델을 구성하고, 고유진동수를 계산한다.
- (b) 수학적 모델의 시스템파라미터 벡터 $\boldsymbol{\alpha}$ 의 i 번째 요소 α_i 에 임의의 값을 부여하고 나머지 요소를 모두 0으로 설정한다.
- (c) 수학적 모델을 이용하여 고유진동수를 계산하고 벡터 $\mathbf{Z}$ 의 요소를 식 (35)를 이용하여 계산한다.

$$z_j = \frac{\bar{\omega}_j^2 - \omega_j^2}{\omega_j^2} \quad (35)$$

여기서 $\bar{\omega}_j$ 는 시스템에서 측정된 고유진동수를 의미하며, ω_j 는 해석 모델에서 구한 고유진동수를 나타낸다.

- (d) 민감도행렬 $\mathbf{F}$ 의 ij 번째 요소 F_{ij} 를 다음 식을 이용하여 계산한다.

$$F_{ij} = Z_j / \alpha_i \quad (36)$$

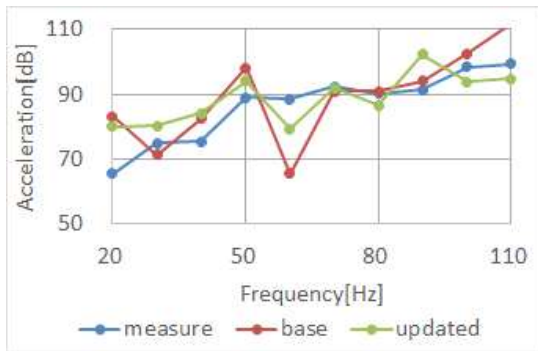
- (e) 과정 (b) ~ (d)를 $i = 1, 2, \dots, n$ 까지 반복한다.

□ 구조물의 시스템 파라미터 결정을 위한 과정은 다음과 같이 요약될 수 있다.

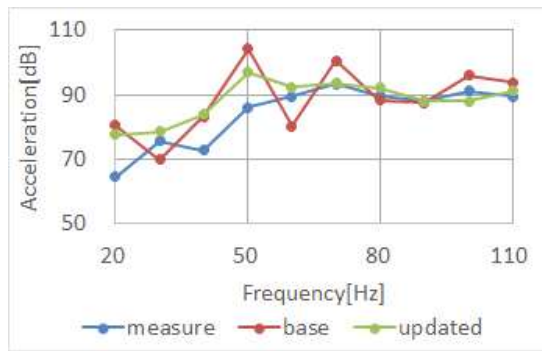
- (a) 대상 구조물의 동적응답에서 모달해석(Ewins, 1984)을 이용하여 모달파라미터(고유진동수)를 추출한다.
- (b) 설계, 시공 및 유지관리 자료 등을 이용하여 구조물에 대한 초기 수학적모델(유한요소모델)을 구성한다.
- (c) 초기 유한요소모델의 모달파라미터(고유진동수)를 계산한다.
- (d) 전술한 과정을 이용하여 민감도행렬 $\mathbf{F}$ 를 구성한다.
- (e) 구조물과 유한요소모델의 모달파라미터를 이용하여 벡터 $\mathbf{Z}$ 를 계산한다.
- (f) 식 (34)을 이용하여 벡터 $\boldsymbol{\alpha}$ 를 결정하고 시스템 파라미터를 갱신한다.
- (g) 과정 (c) ~ (f)를 $|\mathbf{Z}| \approx 0$ 또는 $|\boldsymbol{\alpha}| \approx 0$ 이 될 때까지 반복한다.

다. 실험결과 검토

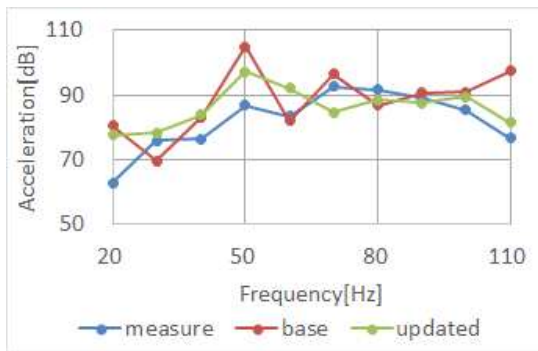
- 초기 모델로부터 Bench scale 실험 결과에 맞추어 민감도기법에 의한 모델 개선을 수행한 결과는 다음 그림에 나타내었다.



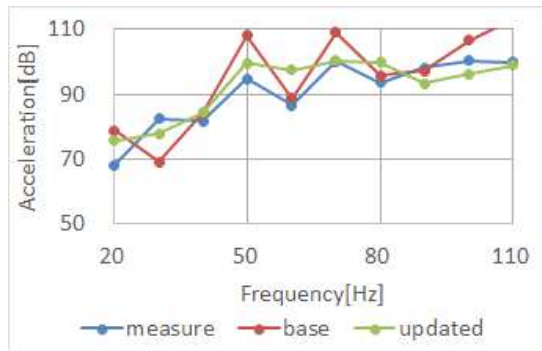
(a) 위치 ①



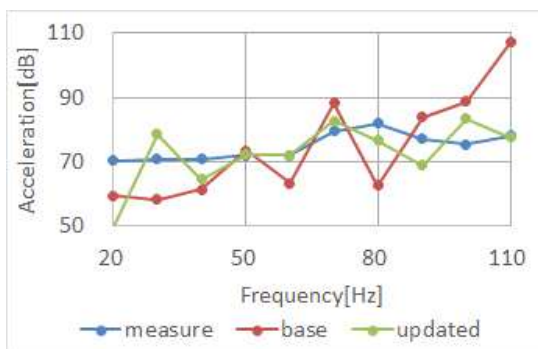
(b) 위치 ②



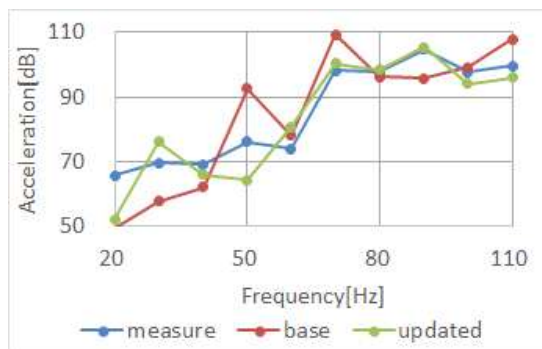
(c) 위치 ③



(d) 위치 ④

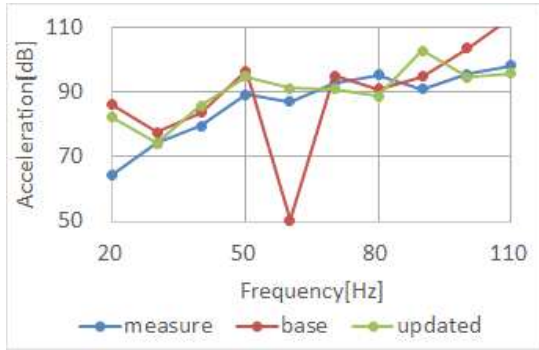


(e) 위치 ⑤

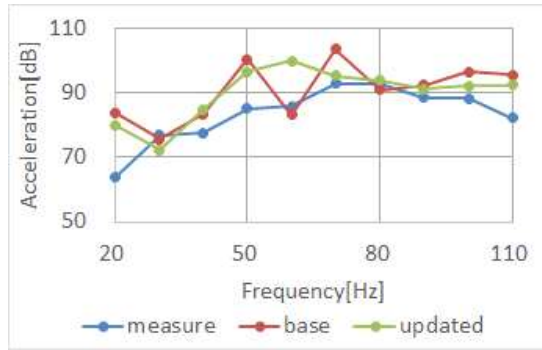


(f) 위치 ⑥

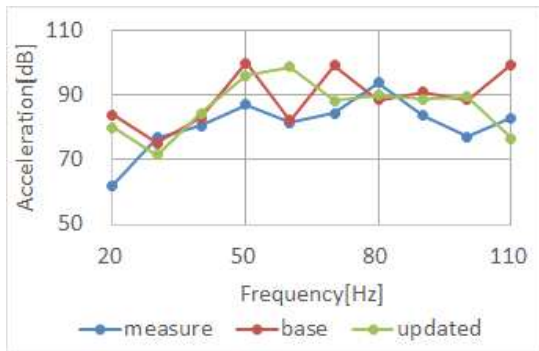
<모델개선 결과(Non TMD)>



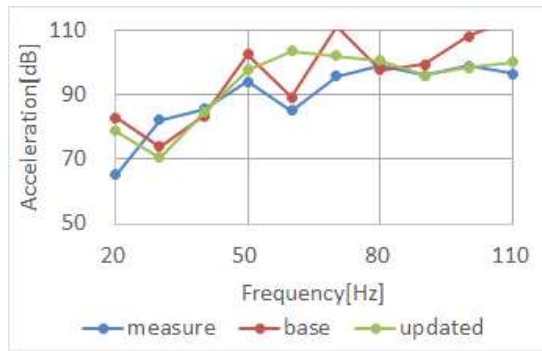
(a) 위치 ①



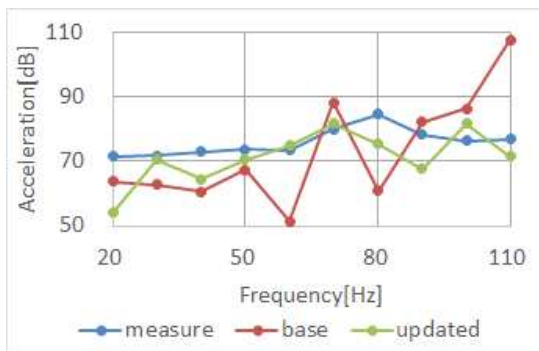
(b) 위치 ②



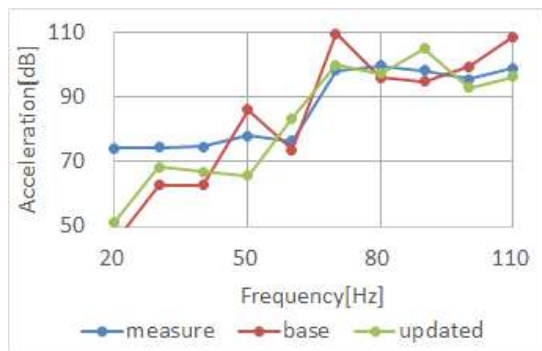
(c) 위치 ③



(d) 위치 ④

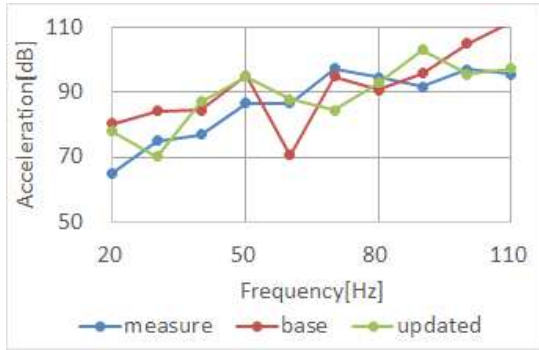


(e) 위치 ⑤

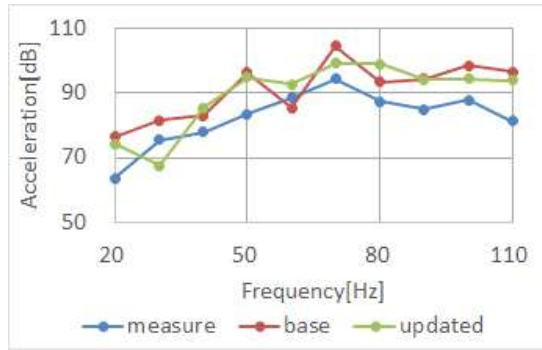


(f) 위치 ⑥

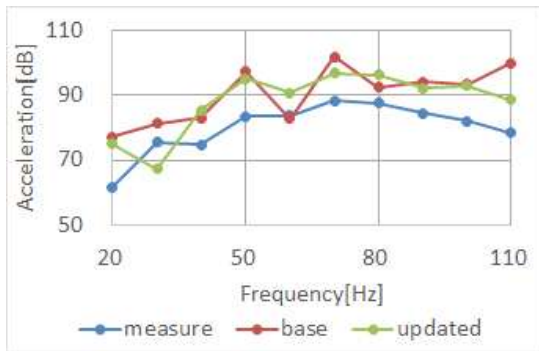
<모델개선 결과(STMD)>



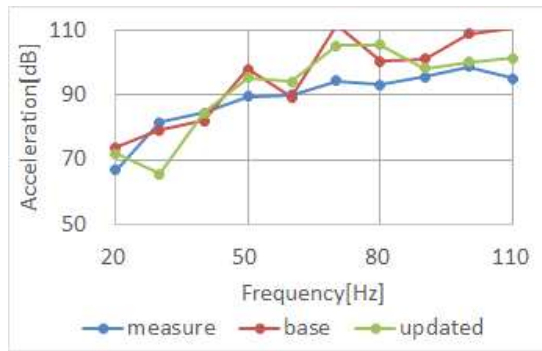
(a) 위치 ①



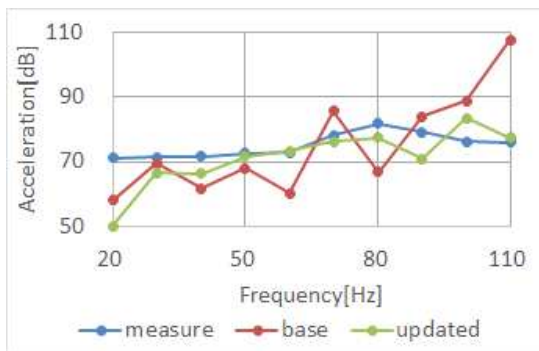
(b) 위치 ②



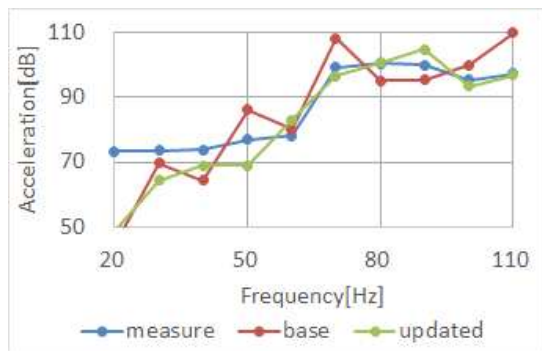
(c) 위치 ③



(d) 위치 ④



(e) 위치 ⑤



(f) 위치 ⑥

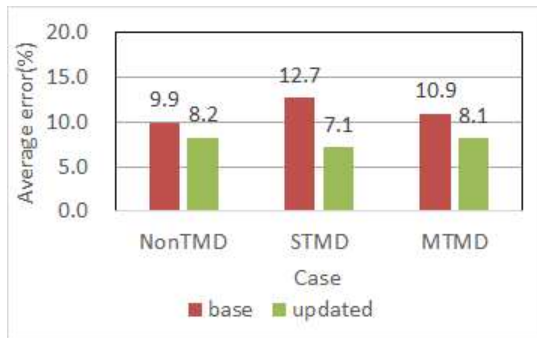
<모델개선 결과(MTMD)>

□ 다음 표는 초기 모델과 개선된 모델의 각 주파수 대역별 실험값 대비 퍼센트 오차와 각 주파수 대역별 오차의 절대 값의 평균이다.

<모델 개선 전, 후 주파수대역별 오차(%)>

분류			Error(%)										
			20Hz	30Hz	40Hz	50Hz	60Hz	70Hz	80Hz	90Hz	100Hz	110Hz	Avg. error
Non TM D	N-①	base	26.9	-47	94	105	-25.9	-1.6	0.8	2.9	4.3	12.6	9.9
		updated	22.2	7.1	11.3	5.8	-10.4	-0.4	-4.0	11.9	-4.6	-4.7	8.2
	N-②	base	24.8	-7.6	14.2	21.0	-10.3	7.6	-1.8	-0.5	5.4	4.9	9.8
		updated	20.0	4.0	15.2	12.7	3.0	0.1	2.5	-0.2	-3.4	2.0	6.3
	N-③	base	28.1	-8.3	8.8	20.7	-1.8	4.0	-5.3	2.0	6.5	27.0	11.3
		updated	23.2	2.9	9.8	12.0	10.3	-8.7	-3.2	-1.6	4.8	6.1	8.3
	N-④	base	15.6	-16.2	2.7	14.0	2.6	9.2	2.1	-1.2	6.4	13.6	8.4
		updated	11.1	-5.6	3.1	5.1	12.7	0.2	6.5	-5.0	-3.9	-0.9	5.4
	N-⑤	base	-15.6	-18.0	-13.4	2.3	-11.9	11.0	-23.8	8.6	17.7	37.3	16.0
		updated	-29.1	10.7	-9.2	0.5	0.1	4.0	-6.5	-10.6	10.6	-0.5	8.2
	N-⑥	base	-24.6	-17.0	-10.1	21.7	5.7	11.2	-1.5	-8.5	1.5	8.3	11.0
		updated	-20.7	9.3	-4.5	-15.3	9.2	2.1	0.6	0.7	-3.6	-3.5	7.0
ST MD	S-①	base	33.2	4.6	5.3	7.9	-41.9	2.3	-4.6	4.2	8.3	14.9	12.7
		updated	27.1	-0.1	8.0	6.0	4.7	-2.2	-7.0	12.9	-0.9	-2.6	7.1
	S-②	base	31.7	-1.6	7.4	17.8	-3.3	11.4	-1.9	4.5	9.2	16.4	10.5
		updated	25.4	-6.2	9.3	13.3	16.4	2.5	1.3	3.0	4.4	12.4	9.4
	S-③	base	35.4	-2.3	2.9	14.5	0.8	17.5	-5.9	8.6	14.8	19.8	12.3
		updated	28.9	-6.9	4.9	10.0	21.1	4.7	-4.1	6.1	16.0	-7.5	11.0
	S-④	base	26.9	-10.1	-2.6	9.1	4.9	16.2	-1.3	3.6	9.5	17.5	10.2
		updated	20.7	-14.2	-1.2	4.0	21.8	6.5	1.7	-0.1	-0.3	3.8	7.4
	S-⑤	base	-10.9	-12.6	-16.8	-8.4	-30.0	10.2	-28.0	5.0	13.3	40.1	17.5
		updated	-24.4	-1.6	-11.4	-4.2	1.9	2.1	-10.9	-13.8	7.3	-6.8	8.4
	S-⑥	base	-39.0	-15.6	-15.9	10.3	-3.4	11.6	-3.6	-3.4	4.0	9.7	11.7
		updated	-30.7	-8.2	-10.2	-15.7	9.5	1.7	-2.2	6.8	-2.6	-2.9	9.1
MT MD	M-①	base	23.5	12.4	9.6	9.8	-18.2	-2.5	-4.2	4.4	8.1	16.7	10.9
		updated	19.8	-6.3	13.3	9.6	1.5	-13.1	-1.9	12.5	-1.7	1.7	8.1
	M-②	base	20.4	8.1	6.7	15.6	-3.5	11.0	6.8	11.2	11.9	19.0	11.4
		updated	16.9	-10.3	9.9	13.9	4.7	5.2	13.2	10.9	7.3	15.5	10.8
	M-③	base	25.1	7.8	11.1	16.3	-1.3	15.2	5.7	11.6	13.9	27.6	13.6
		updated	21.3	-10.9	14.3	13.8	8.2	9.6	10.1	9.3	13.2	13.0	12.4
	M-④	base	10.5	-3.1	-2.8	9.7	-0.8	18.4	7.7	5.8	10.4	16.4	8.6
		updated	7.5	-19.8	-0.1	6.7	4.5	11.6	13.3	2.9	1.5	6.8	7.5
	M-⑤	base	-18.4	-2.7	-13.7	-6.4	-17.2	9.7	-18.3	6.2	16.4	41.8	15.1
		updated	-29.7	-6.5	-7.3	-1.5	0.7	-2.4	-5.3	-10.4	9.3	2.0	7.5
	M-⑥	base	-39.5	-5.4	-12.8	11.9	2.7	9.0	-5.4	-4.6	5.0	12.8	10.9
		updated	-33.3	-12.4	-6.5	-10.4	6.4	-2.7	0.3	4.9	-2.0	-0.5	7.9

- 다음 그림은 초기 모델과 개선된 모델의 전 주파수대역의 퍼센트 오차의 절대 값의 평균값을 비교한 결과이다. 모델 개선 결과 Non TMD의 경우, 전 위치에 대한 평균 오차는 모델 개선 전 11%, 모델 개선 후 7%로 계측 값과의 오차가 전체적으로 4%가 감소하였음을 확인하였고, 마찬가지로 STMD의 경우 평균 오차는 모델 개선 전 12%, 모델 개선 후 9%로 계측 값과의 오차가 전체적으로 3%가 감소하였으며, MTMD의 경우 평균 오차는 모델 개선 전 12%, 모델 개선 후 9%로 계측 값과의 오차가 전체적으로 3%가 감소하여 개선된 모델의 세 경우 모두 목표치인 10% 이내임을 확인하였다.



(a) 위치 ①



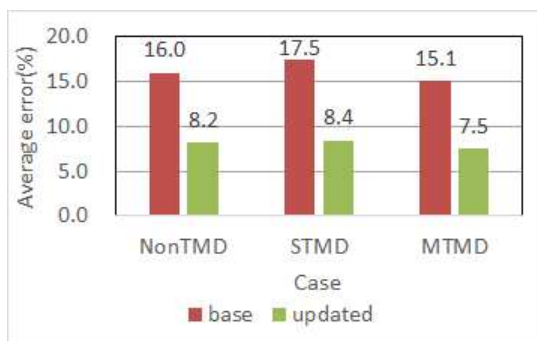
(b) 위치 ②



(c) 위치 ③



(d) 위치 ④



(e) 위치 ⑤



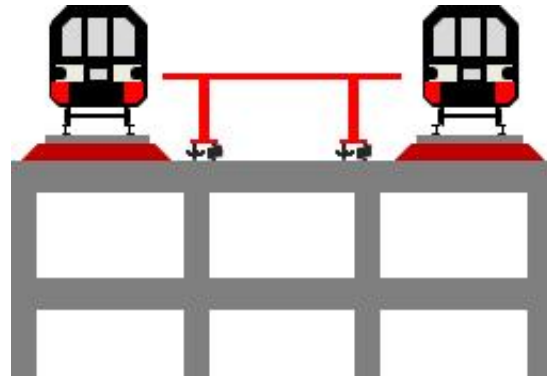
(f) 위치 ⑥

<모델 개선 전, 후 평균 오차(%)>

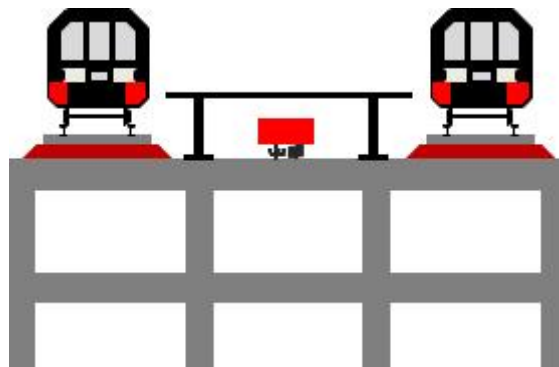
라. TMD 기법 고도화

(1) 승강장 TMD 개선점 도출

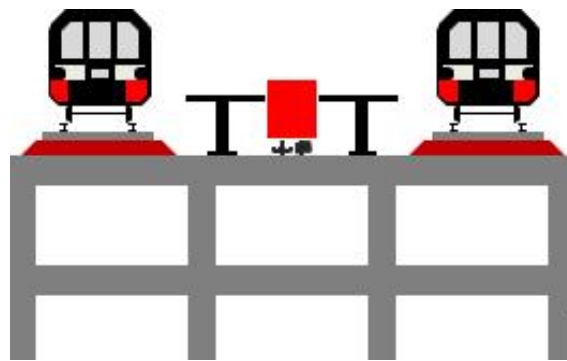
- ☐ 수치 해석 및 Bench Scale 실험을 통해 승강장 TMD는 철도역사의 진동을 저감할 수 있다는 것이 확인되었으며, 개발된 MTMD 기법(김민수 등, 2017)의 효용성이 증명되었다. 그러나 구조물과 공진을 통한 진동에너지 소산하는 TMD의 특성으로 인하여 승강장의 진동이 증가하는 단점이 있다.
 - ☐ 특히 이용객이 실질적으로 승하차하는 승강장의 기능을 감안할 때 이러한 진동 증가는 승강장 TMD의 적용성을 크게 저하할 수 있다. 이러한 점은 다음과 같은 방안을 통하여 해결될 수 있다.
 - 승강장 TMD의 진동을 진동설계기준 이하로 제한한다.
 - 승강장 TMD를 이용객이 없는 승강장 양단으로 제한한다.
 - 승강장 TMD의 구조를 변경한다.
 - 새로운 TMD 이론을 개발한다.
 - ☐ 첫 번째 방안의 경우 이용할 수 있는 진동설계기준으로는 국내 소음·진동관리법 시행규칙(환경부, 2015), 일본의 신간선 철도진동지침(한국철도시설공단, 2008), 독일 DIN 4150-3(1999), ISO 2631-2(1989) 등이 있다. 이들 기준은 인체에 미치는 진동의 영향을 고려하여 제정된 것이므로 적용할 수 있으나, 진동을 제한할 경우 역사구조물의 진동저감성능도 동시에 제한받는 단점이 있다.
 - ☐ 두 번째 방안의 경우 이용객의 불편을 줄 수 있는 여지가 없으나, 승강장 TMD의 질량이 감소되어 진동저감성능이 저감될 수 있으며(유용 등, 2016), 진동저감 성능이 가장 높은 위치에 설치할 수 없는 단점이 있다.
 - ☐ 세 번째 방안은 그림 (b)와 같이 승강장 내부에 별도의 TMD 시스템을 설치하거나, (c)와 같이 승강장 중앙부에 별도의 TMD 시스템을 설치하는 방안으로 TMD 시스템과 승강장을 분리하는 방안이다(Choi et al., 2017). 이 경우 별도의 TMD 질량의 설치없이 승강장을 이용하는 기법 개발을 위한 과제의 목적에 위배되므로 적용이 곤란하다.
 - ☐ 네 번째 방안은 개발된 TMD 이론(김민수 등, 2017)을 보완하는 것으로 이 연구에서는 소개된 TMD 이론 중 Series MTMD를 이용하여 승강장의 진동을 저감할 수 있는 방안을 검토하였다. 기본 개념은 두 개의 TMD가 직렬연결된 Series TMD에서 상부 질량의 진동이 최소화되도록 최적화하는 것이다.
-



(a) 승강장 TMD 기본형



(b) TMD-승강장 분리형 : TMD를 승강장 내부 설치



(c) TMD-승강장 분리형 : TMD를 분리하여 승강장 중앙부 설치
<승강장 TMD 구조>

(2) DLTMD 설계기법 개발

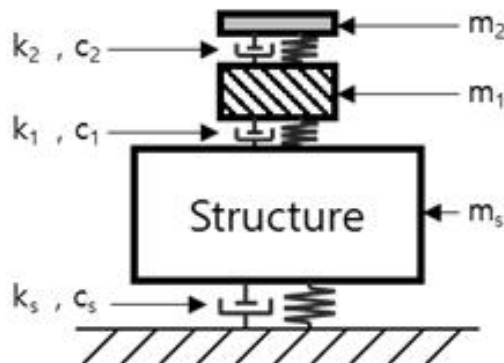
- 이 연구에서는 TMD화로 인한 승강장 상부의 진동 증가를 저감하기 위하여 직렬 TMD 중 하나인 DLTMD(Dual Layer TMD) 이론을 기반으로 새로운 DLTMD 알고리즘을 개발하였다.
- 개발된 DLTMD 이론은 기존 연구와 달리 승객이 이용하는 승강장의 특성을 감안하여 최상층 부 동조질량의 진동을 최소로 할 수 있도록 개발하였다. 참고로 기존 DLTMD 이론은 직렬로 연결된 두 개의 질량을 동조질량으로 사용하므로 승강장 상부의 진동이 증가할 수 있으나, 개발된 DLTMD 이론은 두 개의 질량 중 하부질량 만을 동조질량으로 사용하며 최상층 질량은 최소화되도록 최적화하므로 승강장 상부 진동 증가를 방지할 수 있다.
- 제안된 기법은 먼저 유한요소해석모델을 이용하여 목표위치에서의 스펙트럼응답을 산정하여 초기 설계파라미터를 결정하고, 시간이력해석을 통하여 산정된 응답을 기초로 최적화 과정을 수행하여 최적 설계파라미터를 산정하는 방법으로 열차 등의 이동하중과 같이 하중 재하위치가 시간에 따라 변화하는 경우에 적합한 방법이다.
- DLTMD는 다음 그림과 같이 중간 질량체 m_1 과 상부 질량체 m_2 로 구성되며, 전술한 바와 같이 m_1 은 구조물과 동조하여 응답이 증폭되도록 하고, m_2 의 응답은 최소화하도록 강성 및 감쇠 등의 TMD 설계파라미터가 결정되도록 하였다.
- 해석 또는 측정을 통해 산정된 구조물 응답의 출력밀도함수 $S_u(w)$ 는 다음과 같이 산정할 수 있다(Bandivadekar et al., 2012).

$$S_u(w) = H(w)F(w) \quad (37)$$

여기서, $H(w)$ 는 전달함수, $F(w)$ 는 입력하중을 각각 나타낸다.

- 주파수영역 ω 에서 목적위치에 대한 출력밀도함수의 RMS(Root Mean Square)는 다음과 같다.

$$S_{RMS}(\ddot{u}) = \sqrt{\int_0^\infty |(S_u(w))|^2 d\omega} \quad (38)$$



<DLTMD의 기본개념도>

- 참고로 $S_{RMS}(\ddot{u}_i)$ 를 최소화하는 ω 는 중간 질량체 m_1 의 동조주파수 ω_1 의 초기값으로 결정한다. μ_1 과 μ_2 는 각각 m_1 및 m_2 와 구조물의 모드질량 m_s 간의 질량비이다.

$$\mu_1 = \frac{m_1}{m_s} \quad (39)$$

$$\mu_2 = \frac{m_2}{m_s} \quad (40)$$

- 다음 식을 통해 m_1 과 m_2 의 초기 강성, 초기 감쇠비, 초기 감쇠 $k_{n,0}$, $\xi_{n,0}$, $c_{n,0}$ 를 결정할 수 있다(Daniel et al., 2013).

$$k_{n,0} = m_{n,0}(\omega_{n,0})^2 \quad (n=1,2) \quad (41)$$

$$\xi_{n,0} = \sqrt{\frac{3\mu_{n,0}}{8(1+\mu_{n,0})^3}} \quad (n=1,2) \quad (42)$$

$$c_{n,0} = 2m_{n,0}\xi_{n,0}\omega_{n,0} \quad (n=1,2) \quad (43)$$

- 시간이력해석결과 산정된 목적위치에 대한 가속도응답의 RMS(Root Mean Square)는 다음과 같다.

$$X_{RMS}(\ddot{u}_i) = \sqrt{\sum_{t=0}^T \frac{X_u^2(t)}{T}} \quad (44)$$

- 최적파라미터의 결정은 구조물 목표위치에서의 가속도응답의 RMS, $X_{RMS}(\ddot{u}_2)$ 와 상부 질량체에서 가속도응답의 RMS, $X_{RMS}(\ddot{u}_s)$ 가 각각 설정된 목표진동값 이내가 되는지 여부에 따라 판단한다.

$$X_{RMS}(\ddot{u}_2) < O_2 \quad (45)$$

$$X_{RMS}(\ddot{u}_s) < O_s \quad (46)$$

여기서, O 는 설정된 목표진동값이다. 참고로 최적화에 사용된 응답은 변위, 속도 및 가속도가 될 수 있다.

- 만약 $X_{RMS}(\ddot{u}_2) > O_2$, $X_{RMS}(\ddot{u}_s) > O_s$ 라면 목표진동값을 만족하는 설계파라미터를 찾기 위해

최적화 알고리즘에 의한 최적화 과정을 수행한다.

$$\omega_{n,i+1} = \omega_{n,i} + \Delta\omega_{n,i+1} \quad (n=1,2) \quad (47)$$

$$k_{n,i+1} = m_{n,i+1}(\omega_{n,i+1})^2 \quad (n=1,2) \quad (48)$$

$$c_{n,i+1} = 2m_{n,i+1}\xi_{n,i+1}\omega_{n,i+1} \quad (n=1,2) \quad (49)$$

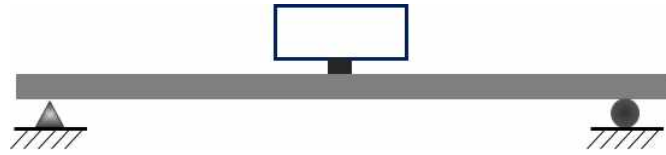
여기서, $\omega_{n,i+1}$ 은 $i+1$ 번째 갱신된 동조주파수이다. $\Delta\omega_{n,i+1}$ 는 최적화 알고리즘에 의해 결정되는 동조주파수의 $i+1$ 번째 증분으로 $X_{RMS}(\ddot{u}_2)$ 와 $X_{RMS}(\ddot{u}_s)$ 의 목표진동값 O_2 , O_s 와의 차이를 통해 계산되는 값이다. 그리고 $k_{n,i+1}$, $c_{n,i+1}$ 는 각각 $i+1$ 번째 갱신된 강성, 감쇠 값으로 갱신된 $\omega_{n,i+1}$ 을 이용하여 계산할 수 있다.

(3) 수치해석을 이용한 검토

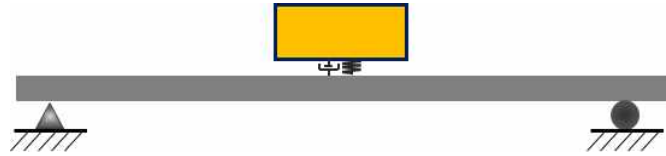
- 이 연구에서 개발된 DLTMD 알고리즘의 구조물과 승강장에 대한 진동저감효과는 수치해석을 이용하여 검토하였다. 수치해석 예제는 단순보 모델과 철도역사 모델 두가지이며, 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 수행하였다.

(가) 단순보 해석모델

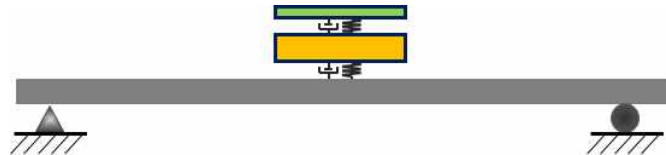
- 수치해석에 적용된 유한요소모델은 30m 길이의 단순보 모델로 중앙에 승강장이 위치하는 것으로 가정하였다. 해석 case는 다음 그림과 같이 승강장 TMD가 설치되지 않은 경우(Case 1 : NonTMD), 승강장이 STMD화 된 경우(Case 2 : STMD), 승강장이 DLTMD화 된 경우(Case 3 : DLTMD)를 포함한 총 3가지로 하였다. 열차하중은 현재 국내 역사들에 주로 운행하는 열차 중 새마을 열차를 적용하였다.
- 수치해석 모델 중 구조물 부분은 단순보 형태로 Beam요소를 사용하여 모델링하였으며, 열차 하중은 새마을 열차가 시속 130km로 통과하는 것으로 하였다.
- DLTMD 이론의 진동저감효과 검토는 구조물 중앙 위치와 승강장 상부 위치에서의 응답 비교를 통하여 수행하였다. 표는 제안된 알고리즘에 의해 최적화된 설계파라미터이다. 참고로 설계파라미터는 첫 번째 휨모드를 이용하여 결정하였다.



(a) Case 1 : NonTMD



(b) Case 2 : STMD



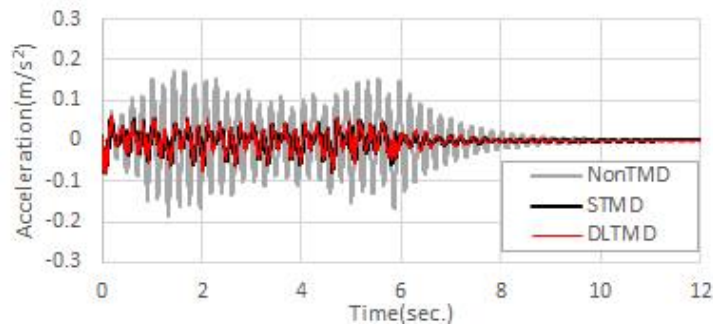
(c) Case 3 : DLTMD

<해석 경우>

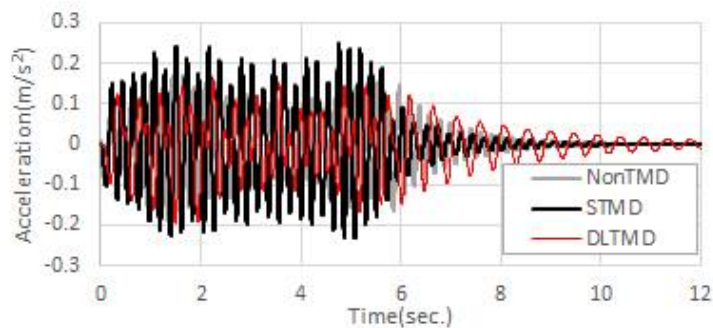
<DLTMD 시스템의 설계파라미터>

파라미터 \ 모드		값
STMD	m_1 (kg)	3.590×10^4
	k_1 (N/m)	3.419×10^7
	c_1 (N/m-s)	3.324×10^5
DLTMD	m_1 (kg)	2.872×10^4
	m_2 (kg)	7.180×10^3
	k_1 (N/m)	2.485×10^7
	k_2 (N/m)	1.422×10^6
	c_1 (N/m-s)	2.028×10^5
	c_2 (N/m-s)	2.021×10^4

- 다음 그림은 각 case에 대한 시간이력해석 결과이다. 구조물의 응답을 비교한 그림에서 STMD와 DLTMD 모두 유사한 진동감소효과를 보이고 있으며, 승강장의 응답을 비교한 그림 (b)의 경우 STMD는 진동의 크기가 증가했으나 DLTMD는 TMD 설치 전과 유사한 진동 수준을 나타냈다.



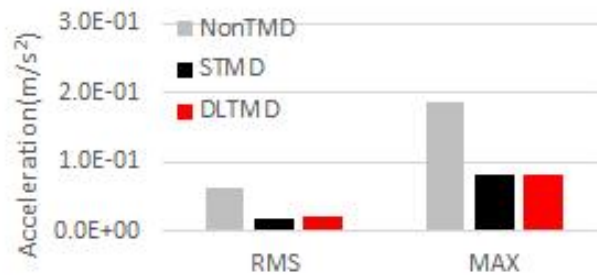
(a) 역사구조물



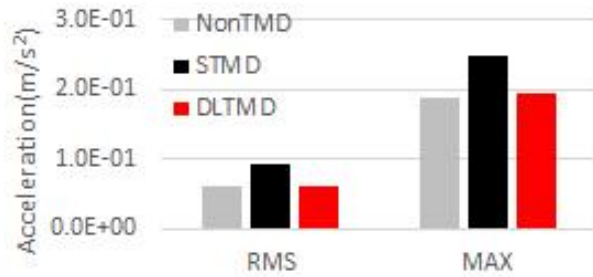
(b) 승강장

<시간영역응답 비교>

- 다음 그림은 각 case별 응답의 RMS 및 최대값을 비교한 결과이다. 그림 (a)에서 STMD 및 DLTMD 적용 시 구조물의 응답은 RMS 및 최대값 모두 유사하게 감소하는 것으로 나타났다. 그림 (b)에서 승강장의 응답은 STMD 적용 시 상당량 증가했으나, DLTMD 적용 시 거의 증가하지 않는 것으로 나타났다.
- 표는 TMD 시스템 적용 전·후 응답을 정량적으로 비교한 결과이다. 표에서 구조물의 응답은 STMD 적용 시 RMS 28%, 최대값 43%, DLTMD 적용 시 RMS 32%, 최대값 44% 수준이며, 승강장의 응답은 STMD 적용 시 RMS 151%, 최대값 133%, DLTMD 적용 시 RMS 99%, 최대값 104% 수준으로 나타났다.



(a) 역사구조물



(b) 승강장

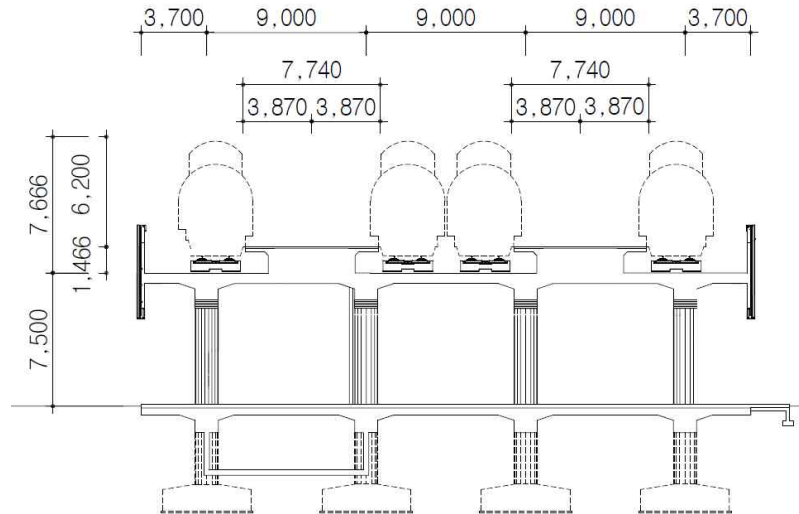
<역사구조물과 승강장 응답의 RMS 및 최대값 비교>

<역사구조물과 승강장 응답의 RMS 및 최대값 비교>

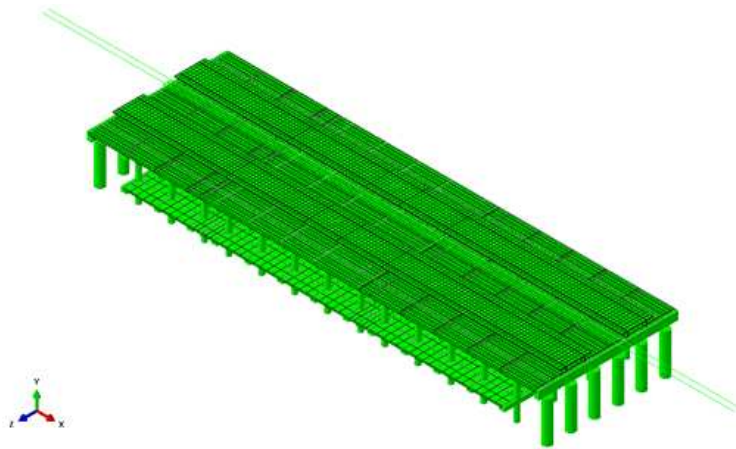
	역사구조물		승강장	
	STMD	DLTMD	STMD	DLTMD
RMS	28%	32%	151%	99%
MAX	43%	44%	133%	104%

(나) 철도역사 해석모델

- 수치해석에 적용된 해석 모델은 국내 선하역사 중 가장 대표적인 형식인 2층 구조를 가진 군북역의 역사구조를 참고하고 궤도 형식은 자갈궤도로 하여 작성하였으며, 상용 유한요소 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 수치해석을 수행하였다.
- 아래 그림은 역사구조물의 횡단면도와 유한요소해석 모델이다. 참고로 해석모델에서 전달 진동량이 작은 역사건물 접속교량은 등가의 스프링으로 고려하였다(최상현 등, 2015). 역사 상부에 부설된 자갈궤도는 조정래 등(2013)의 연구를 참조하여 표에 제시된 물성치를 갖는 등가 스프링으로 모델링하였으며, 역사구조물은 철근콘크리트에 대한 일반값을 사용하였다.



<철도역사 횡단면도>

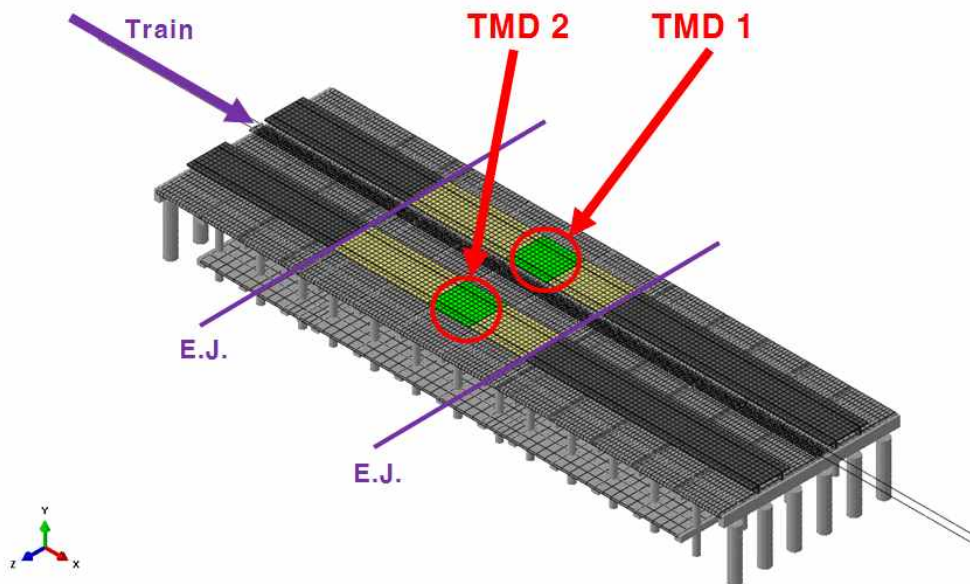


<철도역사 해석모델>

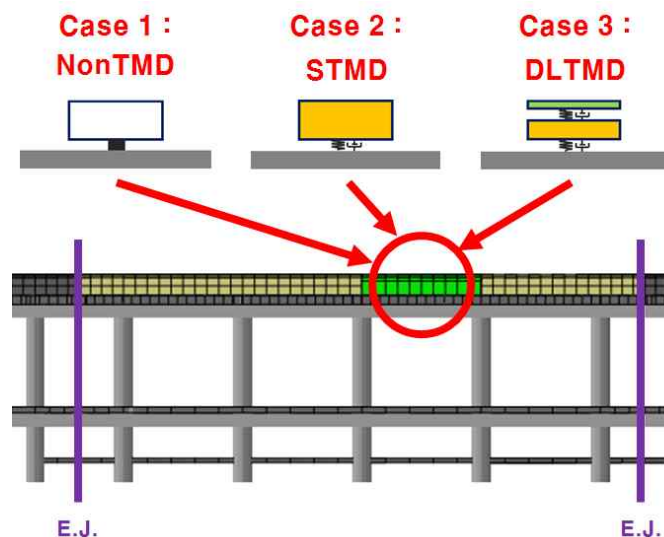
<해석모델의 역학적 특성>

특성		값
철근콘크리트	$E \text{ (N/m}^2\text{)}$	2.850×10^{10}
	$\rho \text{ (kg/m}^3\text{)}$	2.350×10^3
도상	강성 [MN/m]	31.9×10^6
레일패드	강성 [MN/m]	27.0×10^2
	감쇠계수 [MN · s/m]	0.20×10^2

- 해석은 새마을호가 통과할 때 발생하는 하중을 적용하여 수행하였다. 열차의 역사건물 진입 및 통과를 모사하기 위해 역사 접속교량 방향으로 30m씩 레일을 연장하여 모델링하였다 (Choi et al., 2015b). 역사건물은 선로 진행방향으로 익스펜션 조인트에 의해 3부분으로 분할되어있으며 이중 중앙 부분을 진동저감의 주 대상으로 하여 TMD들을 설치하였다(그림).
- 열차 통과로 인한 진동해석은 TMD화되지 않은 승강장 설치 시(Case 1)와 일반적인 STMD(Case 2) 및 DLTMD 승강장(Case 3)이 설치된 3가지 경우에 대하여 수행하고 진동저감 성능에 대한 검토를 수행하였다.



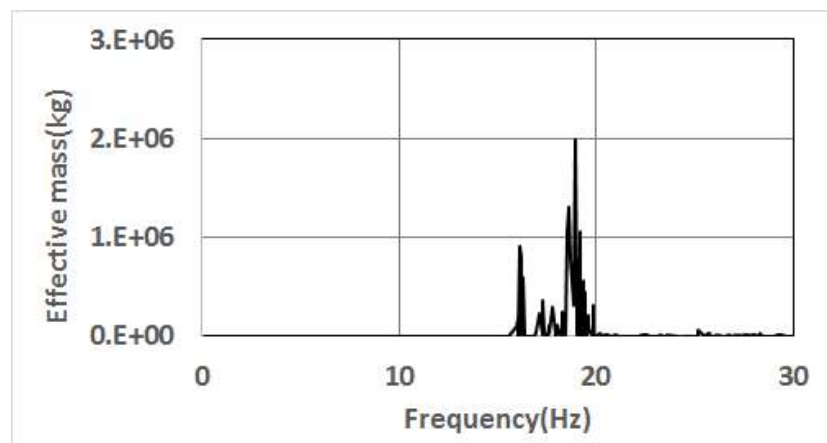
(a) 3차원 위치



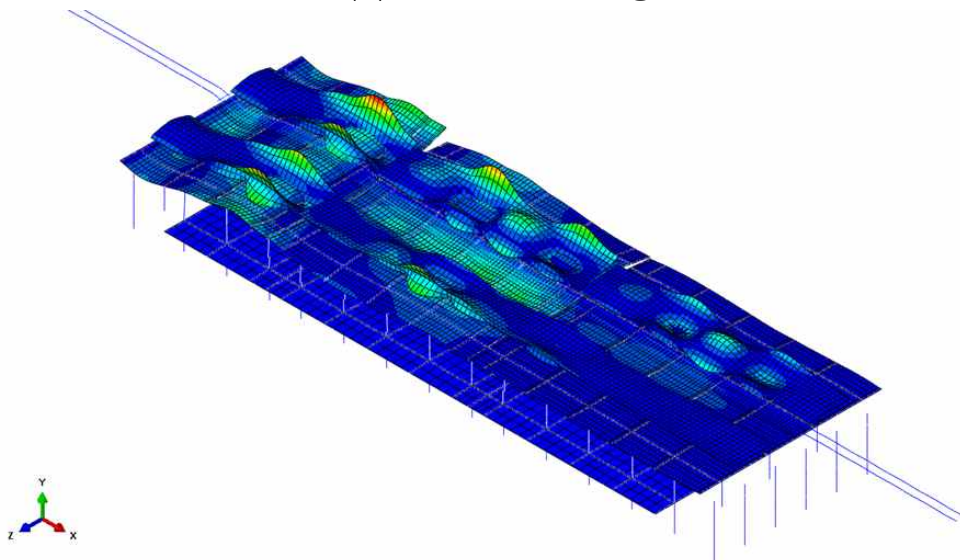
(b) 선로진행방향 위치

<TMD 설치도>

- TMD 설치를 통한 역사건물의 제어 대상 응답은 연직방향 진동이므로 자유진동해석 결과에서 연직방향 진동에 대한 질량참여율을 검토하였다. 그림에서 연직방향 질량참여율은 19.81Hz의 모드에서 최대값이 산정되었다. 해당 대역에 새마을 열차의 통과에 따른 진동이 주요주파수 성분을 가지게 되는 속도는 135km/h이며, 해당 열차 하중을 레일 위치에 재하하여 주파수응답 분석을 수행한 결과 19.66Hz에서의 수직응답이 가장 크게 나오는 것을 확인하였다.
- TMD의 설계는 각각 STMD와 DLDTMD의 중간 질량이 역사구조물의 FRF결과의 수직진동을 제어하도록 하며 DLDTMD의 상부 질량의 진동은 최소화하도록 설정되었다. 승강장의 TMD화를 위한 스프링-감쇠시스템의 설계파라미터(강성과 감쇠계수)는 MTMD 알고리즘을 이용하여 아래 표와 같이 산정하였다.



(a) 연직방향 유효질량



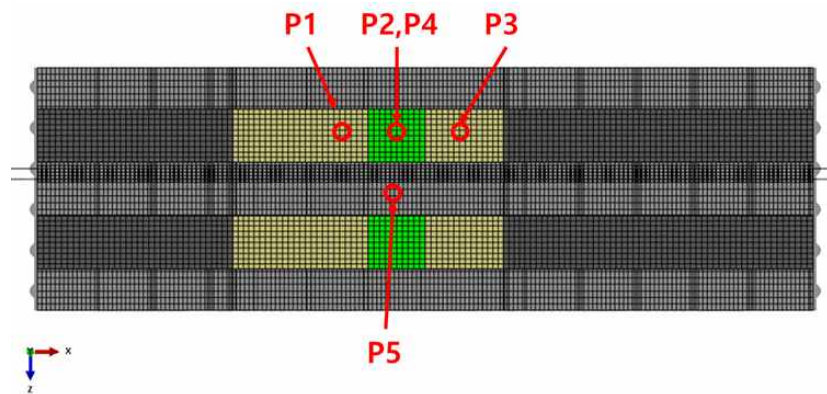
(b) 19.81(Hz)에서의 자유진동모드

그림 4.8 자유진동해석 결과

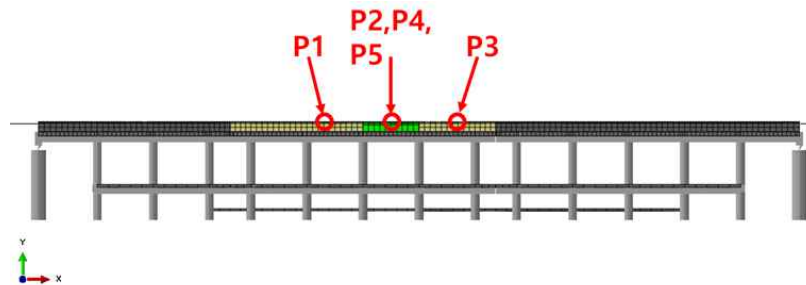
<TMD 시스템의 설계파라미터>

TMD 특성	STMD	DLTMD (mid mass)	DLTMD (top mass)
M_{STR} (kg)	21,467,890		
M_{TMD} (kg)	39,580	26,050	31,803
μ	0.0018	0.0012	0.0015
ω_{TMD} (Hz)	19.58	19.61	2.99
ξ_{TMD}	0.037	0.030	0.033
K_{TMD} (MN/m)	59.92	39.54	1.12
C_{TMD} (MN-s/m)	0.036	0.019	0.004

- 시간이력해석 시 응답측정 위치는 다음 그림에 나타내었다. P1 ~ P3은 승강장 직하부의 2층 슬래브 위치이며 이 중 P2는 2층 슬래브 위치 중 각 case 별로 비교 대상 승강장 혹은 STMD, DLTMD 승강장의 설치 대상이 되는 위치이다. P4는 일반 승강장, STMD, DLTMD 각각의 경우의 승강장 상부이며, P5는 궤도 슬래브 부설 위치이다.



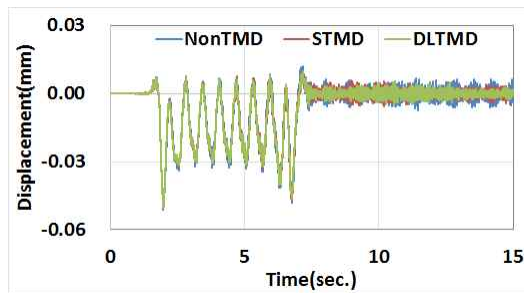
(a) 평면도



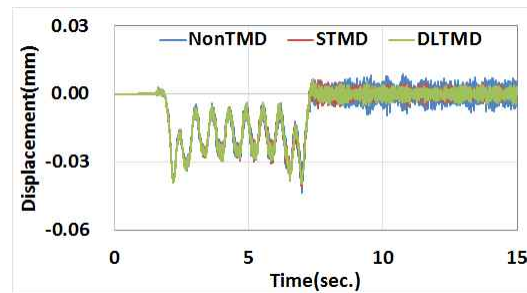
(b) 측면도

<응답 측정 위치>

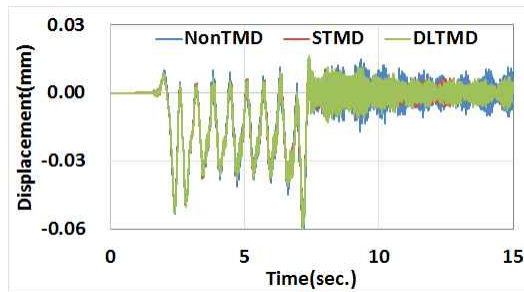
- 열차 하중에 의한 슬래브의 주요 거동형상은 연직방향으로 발생하므로 각 지점에서 주요 거동형상에 대한 수직방향의 변위응답을 이용하여 진동저감 효과를 검토하였다. 135km/h의 새마을 열차 통과 시 각 case 별 시간이력해석 결과는 그림과 같다.
- 표는 각 case 별 응답의 RMS와 최대값 및 TMD 설치로 인한 진동변화량이다. 참고로 Table 3은 열차 통과 시와 열차 통과 후의 응답을 구분하여 제시하였다.
- 그림 (a) ~ (c) 및 (e)에서 열차 통과 중 구조물의 응답(P1 ~ P3, P5)은 큰 차이가 없는 것으로 나타났으며, 이는 표에서도 확인할 수 있다. 열차 통과 시 승강장 상부(P4)에서의 응답은 STMD 설치 시 최대 3dB, DLTMD 설치 시 1dB 증가하는 것으로 나타났다.



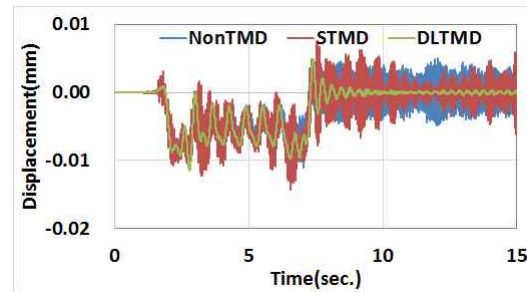
(a) P1



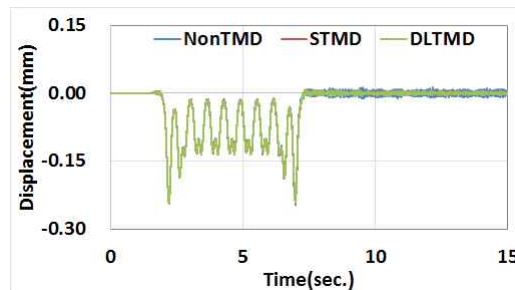
(b) P2



(c) P3



(d) P4



(e) P5

<시간영역응답 비교>

- 표에서 열차 통과 후 응답의 경우 STMD와 DLTMD 설치 시의 저감량은 큰 차이가 없었으며, TMD 설치 위치인 P2에서 STMD와 DLTMD의 경우 모두 TMD를 설치하지 않은 경우에 비하여 진동레벨(VL)이 열차 통과 중과 통과 후의 경우 각각 3~4dB(V)와 9dB(V) 가량 감소하였다. 또한 TMD 설치 위치에서 선로 진행방향으로 약 10m 가량 떨어져 있는 P1과 P3에서는 열차 통과 중 1dB(V) ~ 2dB(V), 열차 통과 후 3dB(V) ~ 5dB(V) 가량 응답이 감소하는 것으로 나타났으며, 궤도 부설 위치인 P5에서는 열차 통과 전 4dB(V), 열차 통과 후 10~11dB(V) 가량 응답이 감소하였다. 승강장 상부인 P4에서 STMD 설치 시의 진동 변화량은 RMS 기준 1dB(V) 저감, 최대값 기준 2dB(V) 증가하는 것으로 나타났으나, DLTMD 설치 시 RMS는 23dB(V), 최대값은 19dB(V) 감소하는 것으로 나타났다.

<응답 비교 결과>

		변위					
		열차 통과 중 (1.5~7sec)			열차 통과 후 (9~15sec)		
		NonTMD	STMD	DLTMD	NonTMD	STMD	DLTMD
P1	VL(dB(V))	97	96	96	100	97	97
	Difference		-1	-2		-3	-4
P2	VL(dB(V))	98	94	93	103	94	94
	Difference		-3	-4		-9	-9
P3	VL(dB(V))	100	99	99	106	101	102
	Difference		-1	-1		-5	-3
P4	VL(dB(V))	93	100	74	100	99	73
	Difference		7	-20		-1	-27
P5	VL(dB(V))	101	97	97	106	94	95
	Difference		-4	-4		-11	-10

6. 스프링-감쇠 장치의 개발

가. 연구 내용

- 본 연구는 스프링-감쇠 시스템 적용에 따른 승강장 동조질량감쇠기화의 효과로부터 철도 역사에서 발생하는 진동을 저감시킬 수 있는 기술을 개발하는 것이 목표이다. 이러한 기술을 개발하기 위해 스프링-감쇠 시스템이 적용된 장치를 제작하고 정적 및 동적 시험과 같은 장치 시험을 진행하여 장치의 성능을 파악하였다.
- 스프링-감쇠 시스템은 2차에 걸쳐 개발되었다. 1차 스프링-감쇠 장치는 1차년도에 설계 값을 이용하여 설계를 진행하였으며, 2차 스프링-감쇠 장치는 1차 스프링-감쇠 장치의 문제점을 보완한 장치이다. 1차 및 2차 스프링-감쇠 장치는 비슷한 개념으로 설계되었지만, 거동 원리의 차이가 있으며, 승강장용으로 적합하게 사용할 수 있도록 변형하였다. 1차 및 2차 스프링-감쇠 장치를 제작하고 정적 연직재하 시험 및 동적 연직재하 시험 그리고 장치의 공진대역을 검출하는 공진대역검출 시험을 진행하였다.
- 구조물의 변위 제어 등을 위하여 건물, 교량 등의 하부에 적용되는 받침 시스템은 크게 고무를 주재료로 사용하여 에너지를 감쇠시키는 탄성형과 마찰재의 마찰 거동으로부터 에너지를 감쇠시키는 마찰형이 있다. 승강장 TMD는 열차에 의한 진동을 감소시키기 위한 것이 목적이다. 이에, 진동 저감을 목적으로 고무를 주재료로 하는 탄성형을 사용하기에는 적합하지 않기 때문에 감쇠 성능 및 강성 조절이 용이한 마찰형시스템을 기반으로 장치를 설계하였다.

나. 1차 스프링-감쇠 장치

(1) 장치 개요 및 설계

- 1차 스프링-감쇠 장치의 설계 값은 1차년도에 진행한 해석으로부터 산출된 강성 및 감쇠계수, 변위로 설계를 진행하였다. 설계 강성은 $1.31kN/mm$ 이며, 설계 변위는 실제 역사 승강장의 자중으로부터 발생하는 정적 변위를 고려하여 70mm로 결정하였다.
- 1차 스프링-감쇠 장치는 연직방향 거동을 하는 격리장치(Vertical Isolator, VI)로서 수직 및 수평 스프링, 경사가 있는 상·하부 플레이트, 마찰재 등으로 구성되어 있다. 1차 스프링-감쇠 장치의 거동 방정식은 상부 및 하부 플레이트, 마찰재 EP의 경사 각도와 수직 및 수평 스프링의 강성 및 변위, 마찰재의 마찰계수 등으로 구성되며 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

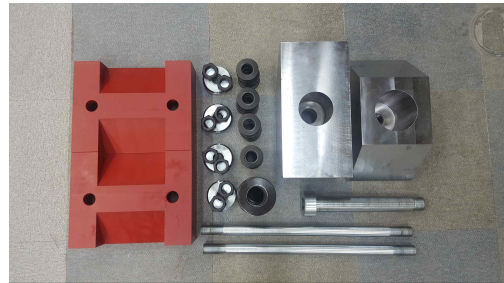
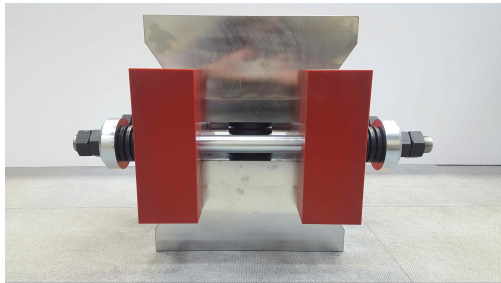
$$P = \left[k_c + \frac{k_s(1 + \mu S)}{2S(S - \mu)} \right] z \quad (50)$$

여기서, P 는 외부로부터 작용하는 하중, k_c 는 수직 스프링의 강성, k_s 는 수평 스프링의 강성, μ 는 상·하부 플레이트와 마찰재의 접촉에 대한 마찰계수, S 는 경사면의 기울기이다.

- 다음 그림은 설계된 1차 스프링-감쇠 장치 모델 및 시제품이다. 그림과 같이 상·하부 플레이트 및 마찰재(Engineering Plastic, EP)는 경사가 있도록 제작하였으며 상·하부 플레이트와 마찰재의 경사면에서 마찰 거동을 한다. 장치의 스프링은 코일 스프링을 사용하여 설계를 진행하려했으나, 설계 변위를 수용할 수 없기 때문에 접시 스프링을 사용하였다.

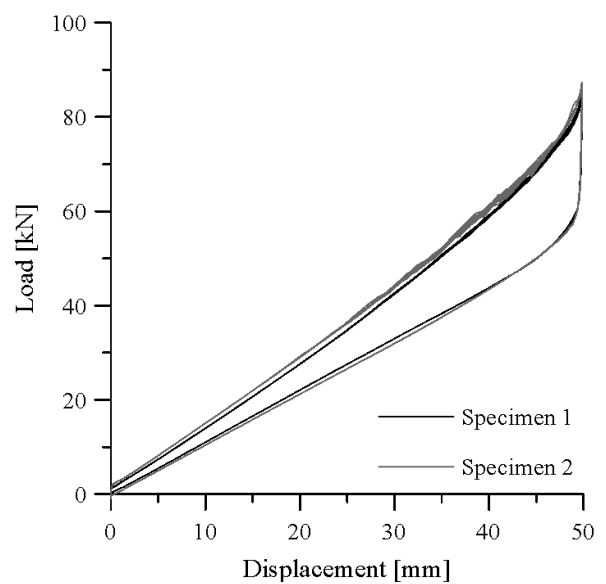


(a) 3D 모델링



(b) 시제품

<설계된 1차 스프링-감쇠 장치>



<1차 스프링-감쇠 장치 성능 시험 결과>

(2) 소결

- 1차 스프링-감쇠 장치는 수직 및 수평 스프링, 경사가 있는 상·하부 플레이트, 마찰재 등으로 구성되어 있으며, 장치에 대한 성능 시험을 진행하였다. 성능 시험 결과, 1차 스프링-감쇠 장치는 거동 방정식에 의해 산출된 강성과 성능 시험을 통해 산출된 강성이 거의 유사한 것을 확인하였으며, 오차율은 약 4%정도 인 것을 확인하였다.
- 그러나, 접시 스프링의 강성이 일정하지 않고 상·하부 플레이트 옆면에서 거동에 의한 마찰이 발생함에 따라 일정 구간 이상에서는 2차 강성이 증가한 것으로 보인다. 이는 상·하부 플레이트 및 마찰재가 조립되는 부분의 제작 공차가 적기 때문에 발생한 것으로 사료되며, 향후 시험품 제작 시 스프링의 종류를 변경하고 상·하부 플레이트 옆면에서 마찰이 발생하지 않도록 보완하여 반영해야 한다.

다. 2차 스프링-감쇠 장치

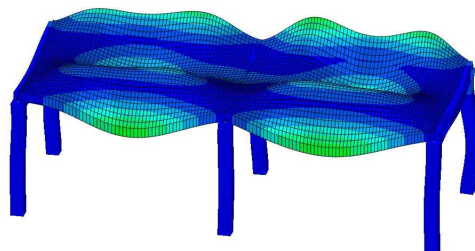
(1) 장치 설계

- 2차 스프링-감쇠 장치의 설계는 그림과 같이 Bench Scale 철도 역사 구조물을 대상으로 해석을 진행한 결과를 반영하였으며, 최적화된 스프링-감쇠 시스템의 설계 파라미터는 다음 표와 같이 정리하였다.



(a) 20.05Hz

(b) 103.10Hz



(c) 198.69Hz

<Bench Scale 구조물에 대한 고유진동 해석>

<최적화된 스프링-감쇠 시스템의 설계 파라미터>

구분		단위	값
구조물	m_{str}	kg	18,900
	$(\omega_{TMD})_1$	Hz	20.05
	$(\omega_{TMD})_2$	Hz	23.49
TMD-1	$(m_{TMD})_1$	kg	472
	$(k_{TMD})_1$	N/mm	7120
	$(c_{TMD})_1$	N/mm-s	11.1
TMD-2	$(m_{TMD})_2$	kg	472
	$(k_{TMD})_2$	N/mm	9800
	$(c_{TMD})_2$	N/mm-s	13.0

- TMD-1 및 TMD-2는 구조물의 특정 모달 응답을 감소한 스프링-감쇠 시스템이며, 스프링-감쇠 시스템 4개를 Bench Scale 구조물 승강장에 설치할 예정이기 때문에 TMD-1의 설계 강성은 시스템 1개당 1.78kN/mm, TMD-2의 설계 강성은 장치 1개당 2.45kN/mm이다. 또한, 시스템 1개에 가해지는 승강장의 자중은 118kg이며, TMD-1 및 TMD-2의 정적 변위는 약 0.66mm, 0.48mm이다. 이에 따른 설계 변위는 안정성을 고려하여 8mm로 결정하였다.
- 해석을 통해 최적화된 설계 파라미터를 반영하여 Bench Scale 실험에서 사용될 장치로서 Bench Scale 구조물 승강장 하부와 승강장 기초 즉, 상부 슬래브에 적용할 수 있는 2차 스프링-감쇠 장치에 대해 설계를 진행하였다. 2차 스프링-감쇠 장치는 경사가 있는 상부 플레이트, 하부구조와 연결되는 하부플레이트, 수직 및 수평 스프링, 마찰 감쇠를 위한 EP블록(Engineering Plastic Block)등으로 구성된다.
- 1차 스프링-감쇠 장치와 같이 수직 및 수평 스프링은 탄성 복원을 위한 강성체 역할을 하고 상부 플레이트의 경사면과 EP블록 경사면의 마찰 거동으로 감쇠 기능이 발휘되며, EP블록 경사면의 기울기와 마찰계수에 따라 감쇠 성능을 조절할 수 있다. 또한, Bench Scale 실험시 현장 오차를 줄이고자 수평 스프링을 교체할 수 있도록 하여 장치의 강성이 조절 가능하도록 설계하였다. 또한, 1차 스프링-감쇠 장치의 문제점을 보완하기 위해 접시 스프링 대신에 코일 스프링을 사용하였으며,
- 상·하부 플레이트 옆면에서 발생하는 마찰을 방지하기 위해 마찰재에 또 다른 마찰재를 조립하여 경사면에서만 마찰 거동을 하도록 하였다. 1차 스프링-감쇠 장치는 상·하부 플레이트 모두 마찰 거동을 하지만, 2차 스프링-감쇠 장치는 패드 형식(Friction Pad type Isolator, FPI)으로 상부 플레이트에서만 마찰 거동을 하도록 하였다. 다만, 패드와 EP블록간의 접촉으로부터 마찰이 발생할 수 있으므로 이를 방지하고자 스테인리스 스틸 판(STainless Steel plate, STS)을 부착하고 EP블록 하면에 딤플(dimple)을 넣어 그리스를 채웠다. 상부 플레이트의 회전을 방지하기 위한 패드 옆면도 하면과 같이 스테인리스 스틸 판을 부착하였으며, EP블록에 딤플이 들어진 마찰재를 조립하여 그리스를 채웠다.

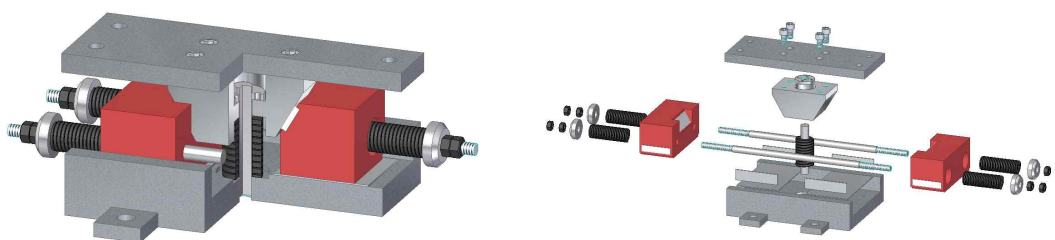
- 2차 스프링-감쇠 장치의 거동 방정식은 상부 플레이트 및 EP블록의 경사면의 각도와 수직 및 수평 스프링의 강성, 마찰계수, 변위의 관계이며 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$P = \left[k_c + \frac{2k_s}{S^2 \mp 2S\mu} \right] z \quad (51)$$

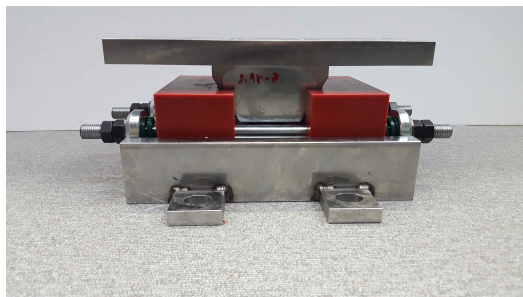
여기서, P 는 연직방향 하중, k_c 는 수직 스프링의 강성, k_s 는 수평 스프링의 강성, μ 는 EP블록의 마찰계수, S 는 상부 플레이트 및 EP블록의 경사면 기울기, z 는 작용되는 하중에 대한 연직 변위량이다.



<경사면의 마찰 방지를 위한 마찰재>

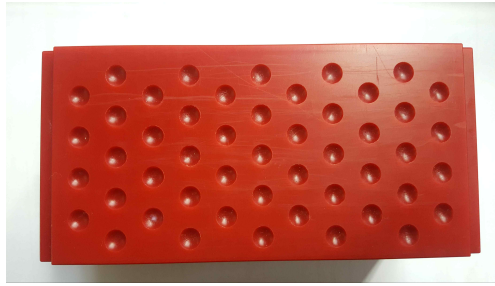


(a) 3D 모델링

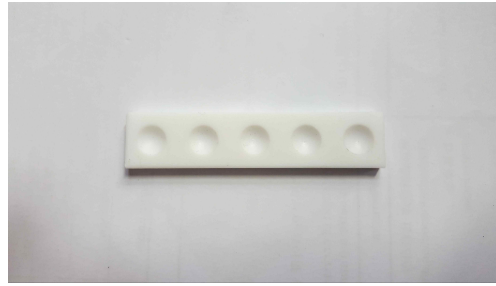


(b) 시제품

<설계된 2차 스프링-감쇠 장치>



(a) EP Block



(b) EP Plate

<마찰재 딤플(Dimple)>

(2) 스프링-감쇠 장치 성능시험

(가) 성능시험 방법 및 조건

- 2차 스프링-감쇠 장치의 성능 시험은 기본 특성을 확인하는 정적 연직 재하 시험과 동적 특성을 확인하는 동적 연직 재하 시험 및 공진 대역 검출 시험을 진행하였다. 설계 제작된 2차 스프링-감쇠 장치의 정적 및 동적 특성을 확인하기 위해 한국산업기술시험원에서 보유한 연직재하 시험기를 사용하여 정적 및 동적 연직 재하 시험을 진행하였다.
- 연직 재하 시험기의 최대 연직하중은 50kN, 최대 스트로크(Stroke)은 $\pm 125\text{mm}$ 이다. 또한, 2차 스프링-감쇠 장치의 공진대역을 확인하기 위해 한국산업기술시험원에서 보유한 고무시험기를 이용하여 장치의 공진 대역을 확인하는 시험을 진행하였다. 고무 시험기의 주파수 범위는 0.01 Hz ~ 700Hz이며, 하중은 $\pm 25\text{kN}$, 변위는 $\pm 20\text{mm}$ 이다.



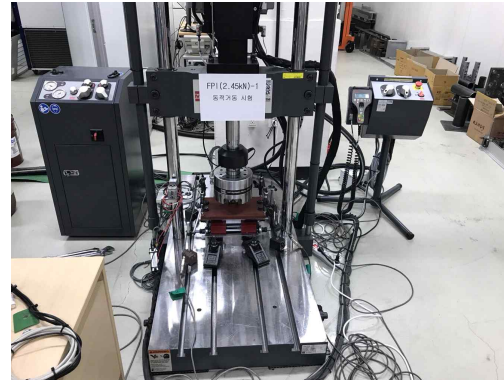
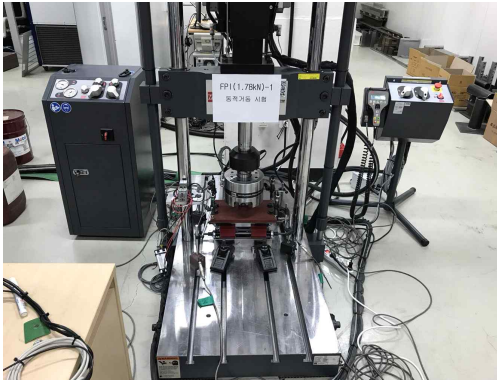
<연직재하 시험기>



<공진대역 검출 시험기>

(나) 정적 연직 재하 시험

- 정적 연직 재하 시험은 정적 상태에서의 스프링-감쇠 장치의 거동을 확인하는 시험으로서 4mm의 변위를 선제하한 상태에서 시험을 진행한다. 아래 그림과 같이 스프링-감쇠 장치에 $\pm 4\text{mm}$ 의 시험 변위를 1초당 2kN 미만의 하중이 증가하는 가력속도로 10Cycle을 실시하였다. 시험 오차를 보완하기 위해 정적 연직재하 시험은 장치 1개당 3번씩 진행하였으며, 측정된 하중 및 변위를 이용하여 2차 강성을 계산하였다. 2차 강성은 장치 설계의 용이성을 고려하여 압축 거동시의 하중-변위의 관계로부터 계산할 수 있다.

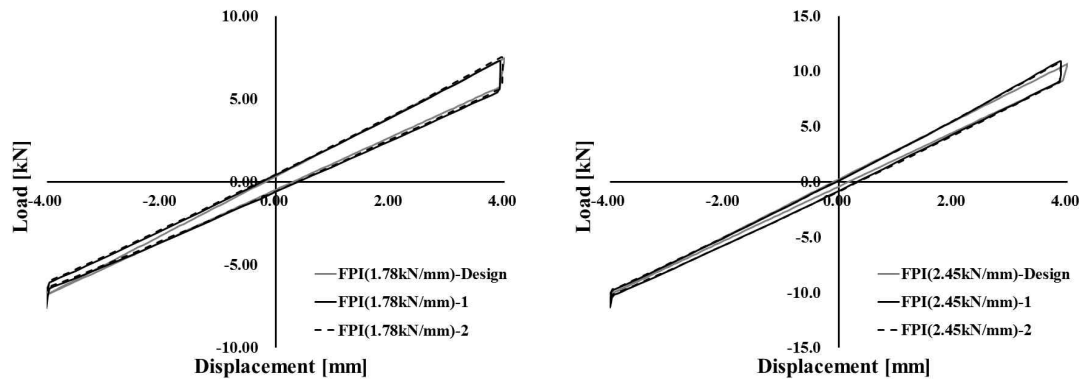


<2차 스프링-감쇠 장치에 대한 정적·동적 연직재하시험>

- 정적 거동 확인을 위한 시험은 2kN/sec 미만의 속도로 진행하였다. 스프링-감쇠 장치의 정적 연직 재하 시험 결과는 아래 표와 같으며, 설계된 2차 스프링-감쇠 장치의 설계 강성의 오차는 10% 미만인 것을 확인하였다.
- 거동 방정식과 시험으로부터 산출된 이력곡선을 비교한 결과 두 곡선이 거의 유사한 것을 확인하였다. 또한, 1차 스프링-감쇠 장치의 상·하부 플레이트 옆면에서 발생하는 마찰로 인해 2차 강성이 증가하는 문제를 개선함에 따라 2차 강성이 증가하지 않는 것을 확인하였다. 이는 수직 거동에 의해 발생하는 마찰이 일정하고 강성 오차가 적은 코일 스프링을 사용함에 따라 2차 강성의 오차가 적은 것으로 판단된다.

<정적 연직재하 시험 결과>

구 분		변위 [mm]		하중 [kN]		2차 강성 [kN/mm]	오차율 [%]
		최소	최대	최소	최대		
1.78 kN/mm	FPI - 1	0.92	7.17	2.46	13.10	1.70	4%
	FPI - 2	0.81	7.07	1.93	12.59	1.70	4%
2.45 kN/mm	FPI - 1	0.76	6.85	3.08	19.17	2.64	8%
	FPI - 2	0.79	6.71	3.02	18.54	2.62	7%



<정적연직재하시험: 하중-변위 이력곡선>

(다) 동적 연직 재하 시험

- 동적 연직 재하 시험은 스프링-감쇠 장치의 동적 거동을 확인하기 위해서 보통 열차 진출 입시 역사 내에서 발생하는 진동수의 범위 4Hz~21Hz를 고려하여 다음 표와 같이 주파수별로 시험을 진행하였다.

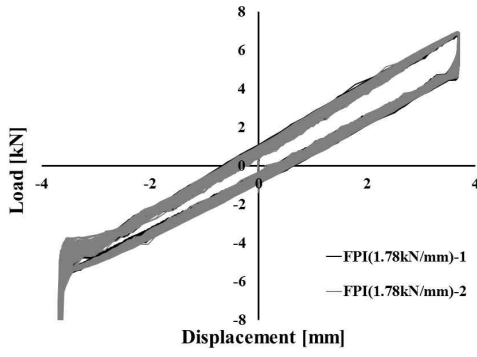
<동적 연직재하 시험 변수>

Device	Hz	변위(mm)	속도 (mm/sec)
FPI(1.78kN/mm) -1	4	± 3.750	60
FPI(1.78kN/mm) -2	6	± 2.500	
	9	± 1.667	
FPI(2.45kN/mm) -1	12	± 1.250	
	15	± 1.000	
FPI(2.45kN/mm) -2	18	± 0.833	
	21	± 0.714	

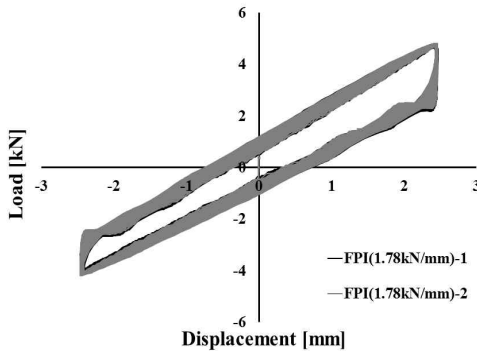
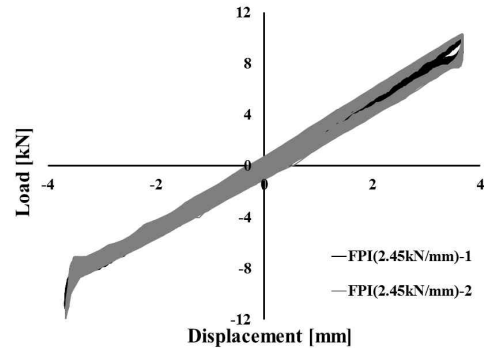
- 시험 오차를 보완하기 위해 동적 연직 재하 시험은 각 장치마다 3회씩 진행하였으며, 측정된 하중 및 변위를 이용하여 2차 강성 및 감쇠비를 계산하였다. 2차 강성은 정적 연직 재하 시험과 동일하게 계산하였다.
- 표와 같이 동적 시험 결과, 장치의 강성은 각 진동에 대해 거의 일정하며 설계 강성과의 오차율은 약 5% 이내인 것을 확인하였다. 감쇠비의 경우에는 진동수가 증가할수록 커지는 경향을 확인하였으나, 속도를 일정하게 유지하고 변위를 줄여 가진 주파수를 조정하는 시험 조건에 대해 장치의 강성이 일정한 것을 보아 하중-변위 관계의 이력 거동 특성으로 인한 것으로 판단된다.

<동적 연직 재하 시험 결과>

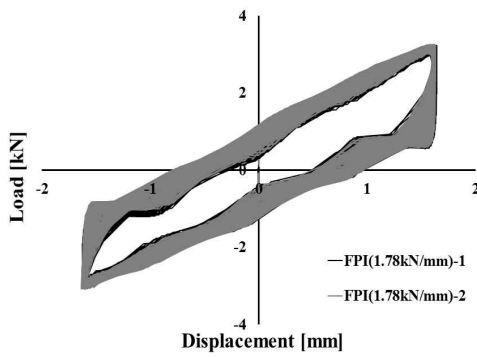
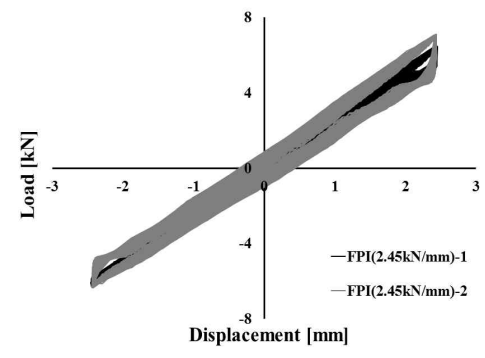
구 분			변위 [mm]		하중 [kN]		2차 강성 [kN/mm]	EDC [kN-mm]	감쇠비 [%]
			최소	최대	최소	최대			
1.78 kN/mm	FPI -1	4 Hz	-3.15	2.20	-4.72	4.39	1.70	8.04	11%
		6 Hz	-2.05	2.32	-3.02	4.32	1.68	7.17	14%
		9 Hz	-1.52	1.37	-1.90	2.98	1.69	4.66	21%
		12 Hz	-1.21	0.92	-1.68	2.01	1.73	4.05	33%
		15 Hz	-0.89	0.88	-1.26	1.73	1.70	3.40	41%
		18 Hz	-0.79	0.80	-1.41	1.30	1.70	3.10	46%
		21 Hz	-0.69	0.56	-0.91	1.20	1.69	2.16	52%
	FPI -2	4 Hz	-3.18	2.20	-4.90	4.15	1.68	7.95	10%
		6 Hz	-2.05	2.32	-3.02	4.32	1.68	7.17	14%
		9 Hz	-1.62	1.62	-2.55	3.04	1.73	5.70	20%
		12 Hz	-1.23	1.10	-1.83	2.16	1.71	4.55	31%
		15 Hz	-0.95	0.91	-1.33	1.82	1.69	3.67	40%
		18 Hz	-0.80	0.81	-1.48	1.29	1.72	3.18	45%
		21 Hz	-0.70	0.69	-1.32	1.03	1.69	2.70	53%
2.45 kN/mm	FPI -1	4 Hz	-2.92	2.49	-7.07	6.79	2.57	2.96	3%
		6 Hz	-2.21	1.89	-5.35	5.12	2.55	2.18	3%
		9 Hz	-1.61	1.50	-4.13	3.91	2.59	2.27	6%
		12 Hz	-1.14	1.05	-2.97	2.66	2.57	1.29	7%
		15 Hz	-0.91	0.85	-2.41	2.06	2.54	1.19	10%
		18 Hz	-0.75	0.80	-2.08	1.68	2.43	0.99	11%
		21 Hz	-0.66	0.42	-1.41	1.16	2.39	0.69	16%
	FPI -2	4 Hz	-3.01	2.36	-6.84	6.95	2.57	6.98	6%
		6 Hz	-2.19	1.91	-4.72	5.80	2.57	5.86	9%
		9 Hz	-1.61	1.57	-3.57	4.62	2.58	4.85	12%
		12 Hz	-1.22	0.93	-2.37	3.04	2.52	3.03	17%
		15 Hz	-0.93	0.89	-1.97	2.80	2.62	2.97	22%
		18 Hz	-0.85	0.66	-1.71	2.19	2.58	2.48	27%
		21 Hz	-0.69	0.67	-1.45	2.06	2.58	2.31	31%



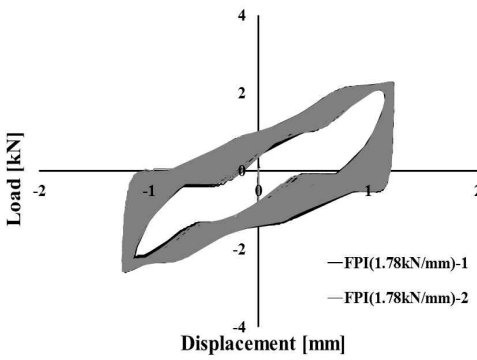
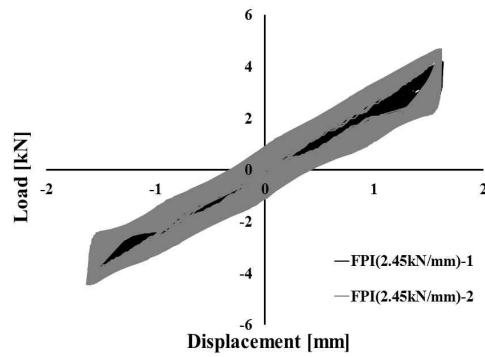
(a) 4Hz



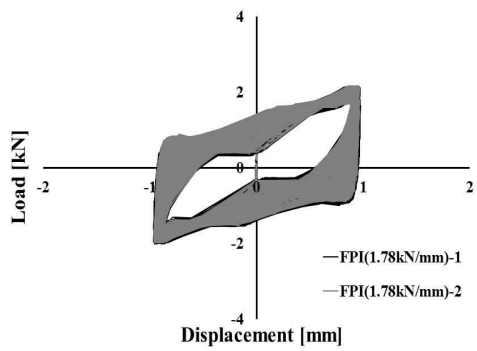
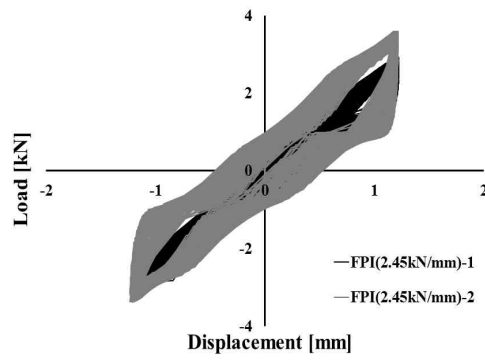
(b) 6Hz



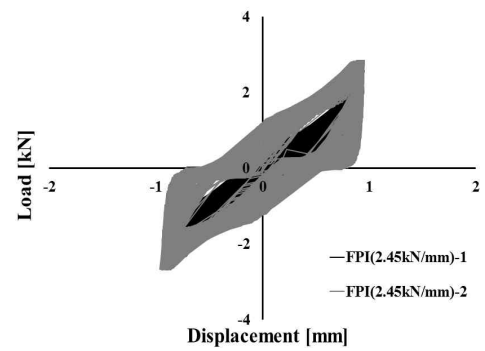
(c) 9Hz

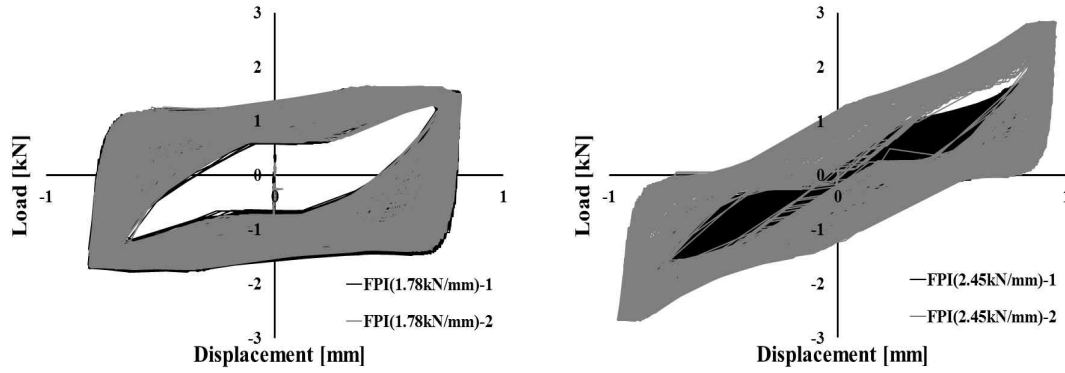


(d) 12Hz

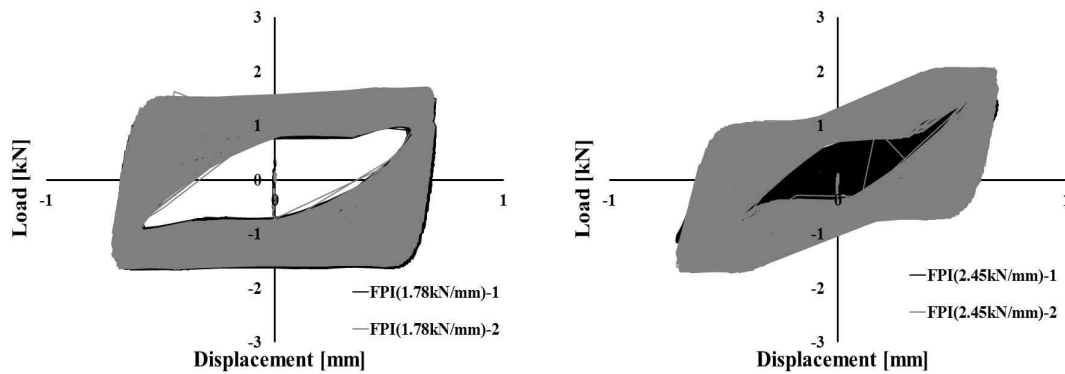


(e) 15Hz





(f) 18Hz



(g) 21Hz

<동적연직재하시험: 하중-변위 이력곡선>

□ 위 그림은 각 주파수별 하중-변위 이력곡선 그래프이며, 설계 제작된 2차 스프링-감쇠 장치는 모든 Hz에서 원활한 동적 거동을 하는 것을 확인하였다. 하지만, 설계 강성 2.45kN/mm인 장치의 경우에는 감쇠비가 설계 강성 1.78kN/mm인 장치보다 작은 것을 확인하였으며, 그 중, FPI(2.45kN/mm)-1 장치는 감쇠효과가 거의 없는 것으로 보인다.

□ 장치의 감쇠비는 수직 및 수평 스프링의 강성비 관계이기 때문에 설계 강성 1.78kN/mm인 장치와 설계 강성 2.45kN/mm 장치의 감쇠비가 차이 날 수는 있으나, FPI(2.45kN/mm)-1의 경우에는 볼트 풀림 현상과 같은 문제로 인해 강성 및 감쇠비 차이가 발생한 것으로 보인다. 이러한 문제를 해결하기 위해 볼트 풀림 현상과 같은 문제를 보완하여 Bench Scale 실험을 진행하였다.

(라) 공진 대역 검출 시험

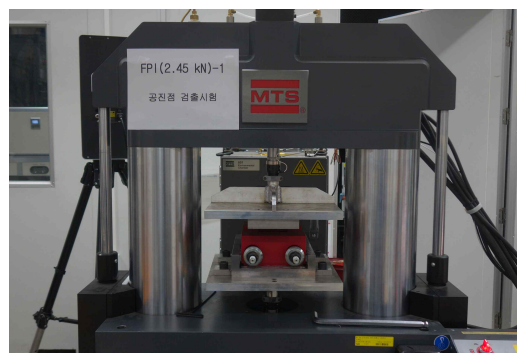
□ 2차 스프링-감쇠 장치의 진동 특성 및 주파수 및 공진 대역에서의 거동을 확인하고자 고무 시험기를 이용하여 공진 대역 검출 시험을 진행하였다. 스프링-감쇠 장치의 이론적 고유진동수 f_n 는 시스템의 자중 118kg이 가해졌을 때 각각 19.10Hz, 23.63Hz이다.

□ 보통 구조물의 공진을 피하기 위해서 구조물의 고유진동수를 예상 가진 진동수의 1/3배 이하, 3배 이상으로 설계가 진행되므로, 설계 제작된 2차 스프링-감쇠 장치의 공진이 발생하는 예상 공진 대역은 $6.37Hz \leq f_n(19.10Hz) \leq 57.30Hz$, $7.88Hz \leq f_n(23.63Hz) \leq 70.89Hz$ 이다.

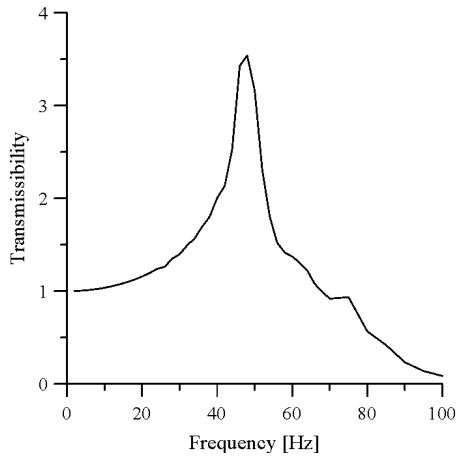
- 공진대역 시험은 각 장치에 가해지는 시스템의 중량 118kg을 선재하한 후에 시험이 진행된다. 승강장 자중에 의해 생기는 정적 변위를 고려하여 시험변위는 $\pm 0.1\text{mm}$ 로 하였으며, 5Hz ~ 100Hz까지 시험을 진행하였다. 또한, 공진이 예상되는 진동수 대역에서는 2Hz 간격, 공진이 예상되지 않는 진동수 대역에서는 5Hz 간격으로 시험을 진행하였으며, 시험 오차를 고려하여 공진 대역 검출 시험은 3회를 진행하였다.

<공진대역검출시험 결과>

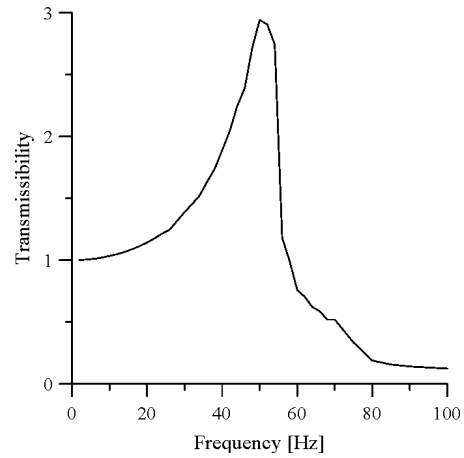
구 분		Frequency [Hz]	Damping Coefficient [N-sec/mm]	Tr [Unitless]	Tan Delta [Unitless]	Dynamic Stiffness [kgf/mm]
1.78 kN/mm	FPI-1	50.0	9.89	3.52	0.28	11436.89
		48.0	11.47	3.53	0.29	12248.47
		48.0	10.86	3.30	0.31	11065.35
	FPI-2	50.0	16.71	2.94	0.34	15977.08
		52.0	17.53	2.47	0.43	14344.14
		52.0	17.41	2.33	0.46	13508.30
2.45 kN/mm	FPI-1	48.0	9.75	2.72	0.37	8436.17
		46.0	12.60	2.59	0.41	9454.98
		40.0	11.79	2.33	0.46	6973.52
	FPI-2	52.0	11.82	2.66	0.37	11045.15
		46.0	17.18	2.47	0.41	12952.79
		48.0	18.03	2.54	0.41	14226.86



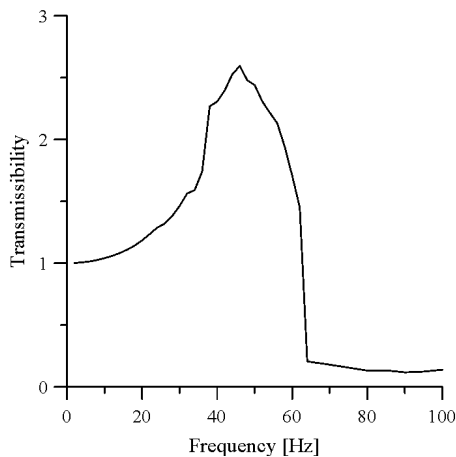
<2차 스프링-감쇠 장치 공진대역 검출 시험>



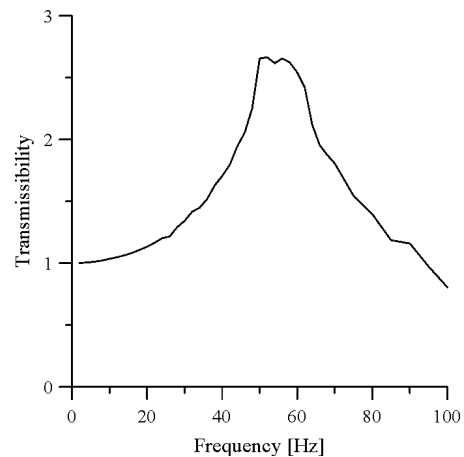
(a) FPI(1.78kN/mm)-1



(b) FPI(1.78kN/mm)-2



(c) FPI(2.45kN/mm)-1



(d) FPI(2.45kN/mm)-2

<공진대역 검출 그래프>

(3) 소결

□ 2차 스프링-감쇠 장치는 1차 스프링-감쇠 장치의 문제점을 개선하여 하부 경사 플레이트 대신에 패드 형식으로 변경하였으며, 하부 패드 플레이트와 마찰재간의 마찰을 없애기 위해 하부 패드 플레이트에 스테인리스 스틸 판을 용접하고 뒤편이 있는 마찰재에 그리스를 채워 마찰을 최소화하였다. 또한, 상부 경사 플레이트 옆면에서 발생하는 마찰을 없애기 위해 마찰재 경사부에 다른 마찰재를 조립하여 상부 플레이트의 경사부에서만 마찰이 발생하도록 하였다. 2차 스프링-감쇠 장치의 구성요소는 수직 및 수평 스프링, 상부 경사 플레이트, 하부 패드 플레이트, 마찰재 등이며, 설계 제작된 2차 스프링-감쇠 장치에 대한 성능을 파악하기 위해 정적 및 동적 연직재하 시험, 공진대역 검출 시험을 진행하였다.

□ 성능 시험 결과, 2차 스프링-감쇠 장치는 거동 방정식에 의해 산출된 강성과 성능 시험을 통해 산출된 강성이 스프링의 허용제작오차 $\pm 10\%$ 이내의 오차를 가지는 것을 확인하였으며, 1차 스프링-감쇠 장치에서 확인하였던 2차 강성의 증가 문제는 상부 플레이트 옆면 마찰 제거 및 접시 스프링 대신에 코일 스프링을 사용함으로써 해결하였다. 동적 연직 재하 시험에서의 장치는 각 주파수에 상관없이 거의 일정한 강성을 보이며 5% 이내인 것을 확인하였다.

□ 장치의 감쇠비는 진동수가 증가할수록 증가하는 경향을 확인하였으나, 이는 속도를 일정하게 유지하고 변위를 줄여 가진 주파수를 조정하는 시험 조건에 의한 것으로 판단되며, 동적

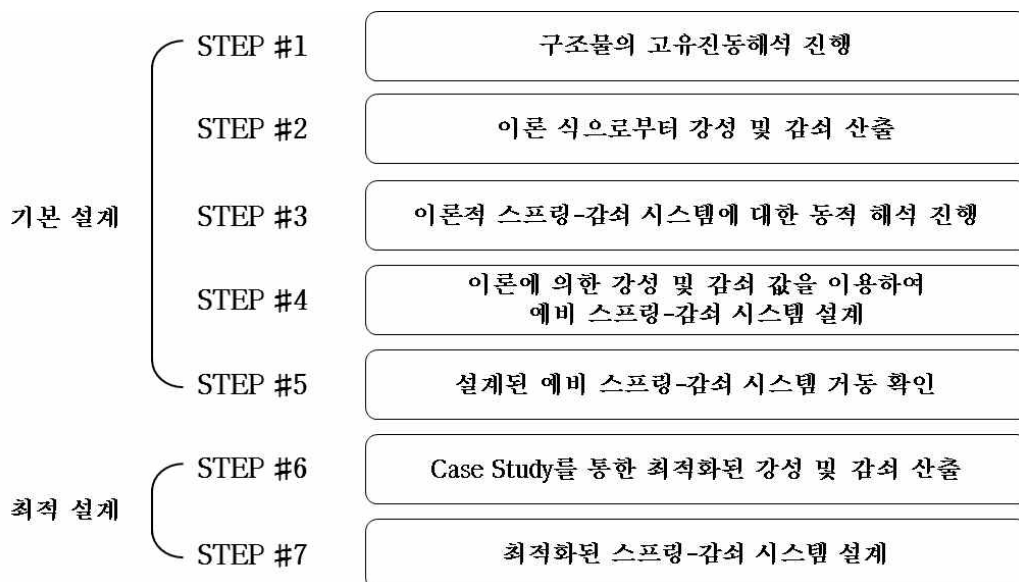
거동시에도 장치의 동적 특성이 유지되어 거동 예측 및 설계 반영에 대해 문제가 없을 것으로 판단된다. 공진 대역 검출 시험에서 장치의 고유진동수는 약 50Hz인 것을 확인하였으나, FPI(2.45kN/mm)-1 장치는 다른 변수의 주파수, 전달율의 관계 그래프와 다른 것으로 나타났다. 이는, 반복적인 장치 시험으로 인해 볼트가 풀리는 현상이 나타난 것으로 보이며, 볼트가 풀림으로서 장치의 특성이 제대로 발현되지 않은 것으로 사료된다. 향후 반복적인 가진으로부터 장치의 볼트가 풀리지 않도록 개선해야 한다.

라. 설계절차서 및 설계도

- 최종 개발된 2차 스프링-감쇠 장치의 실제 현장 적용 및 설치를 위한 설계절차서와 설계도를 작성하였다.

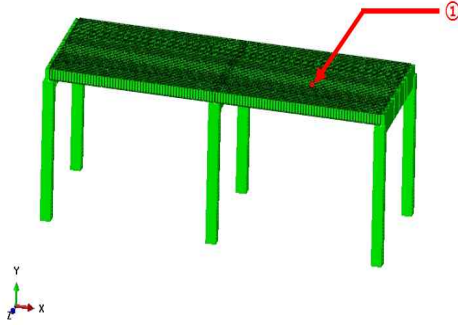
(1) 설계절차서

- 본 설계 절차서는 승강장의 질량을 부가질량으로 활용하여 동조질량감쇠 효과를 발휘할 수 있는 스프링-감쇠 시스템에 대한 설계 절차이다. 그림은 스프링-감쇠 시스템에 대한 설계 절차이며, 크게 기본 설계와 최적 설계로 구분된다.
- 기본 설계에서는 대상 구조물에 대한 고유진동해석을 진행하고 이론 식을 이용하여 스프링-감쇠 시스템에 대한 설계 값을 결정한다. 이론적 접근에 따른 스프링-감쇠 시스템에 대한 동적 해석을 진행하고 스프링-감쇠 장치를 제작하여 성능 시험을 진행해야 한다.
- 최적 설계에서는 기본 설계와 동일한 절차로서 진행되며 스프링-감쇠 시스템에 대한 Case Study를 진행하여 최적화된 스프링-감쇠 시스템의 설계 값을 결정해야 한다. 스프링-감쇠 시스템에 대한 설계 절차는 다음과 같다.

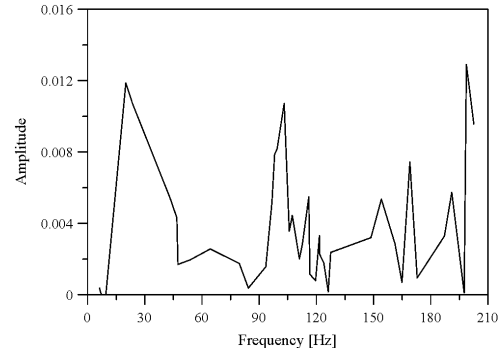


<설계 절차>

- STEP #1에서는 스프링-감쇠 시스템을 적용하고자 하는 구조물에 대한 고유진동해석을 진행하여 구조물의 지배적인 모드 형상 및 고유진동수를 파악해야 한다. 승강장 기초와 승강장 하부 사이에 적용될 스프링-감쇠 시스템은 보통 연직방향에 대해 지배적이기 때문에 연직 방향 성분에 대한 고유진동수를 산출해야 한다. 다음 그림은 본 연구에서 진행한 Bench Scale 철도 역사 모형에 대한 자유진동해석 결과이다. 그림(b)는 구조물에서 모달 응답이 가장 크게 발생하는 지점에 대한 결과이다. 스프링-감쇠 시스템 설치 위치는 구조물의 모달 응답을 감안하여 결정해야 한다.



(a) Bench Scale 철도 역사 모형 모델



(b) ① 위치에서의 주파수별 응답 크기

<자유진동해석 결과>

- STEP #2에서는 STEP #1의 고유진동해석으로부터 산출된 고유주파수 및 질량을 활용하여 이론 식으로부터 강성 및 감쇠 값을 결정해야 한다. 본 연구에서 적용한 MTMD 이론은 j 번째 모드의 TMD 질량비 $(\mu_{TMD})_j$, 강성 $(k_{TMD})_j$, 및 감쇠비 $(\xi_{TMD})_j$ 에 대한 초기 값을 결정해야하며 다음 식과 같다. 여기서, φ_j 는 j 번째 모드벡터, T 는 변환행렬, $D[(m_{TMD})_j]$ 는 j 번째 모드에 동조하는 TMD의 질량을 대각요소로 갖는 대각행렬, m_{str} 은 구조물의 질량이다.

$$(\mu_{TMD})_j = \frac{\varphi_j^T T^T D[(m_{TMD})_j] T \varphi_j}{\varphi_j^T m_{str} \varphi_j} \quad (52)$$

$$(k_{TMD})_j = (m_{TMD})_j \cdot [(\omega_{TMD})_j]^2 \quad (53)$$

$$(\xi_{TMD})_j = \sqrt{\frac{3(\mu_{TMD})_j}{8[1 + (\mu_{TMD})_j]^3}} \quad (54)$$

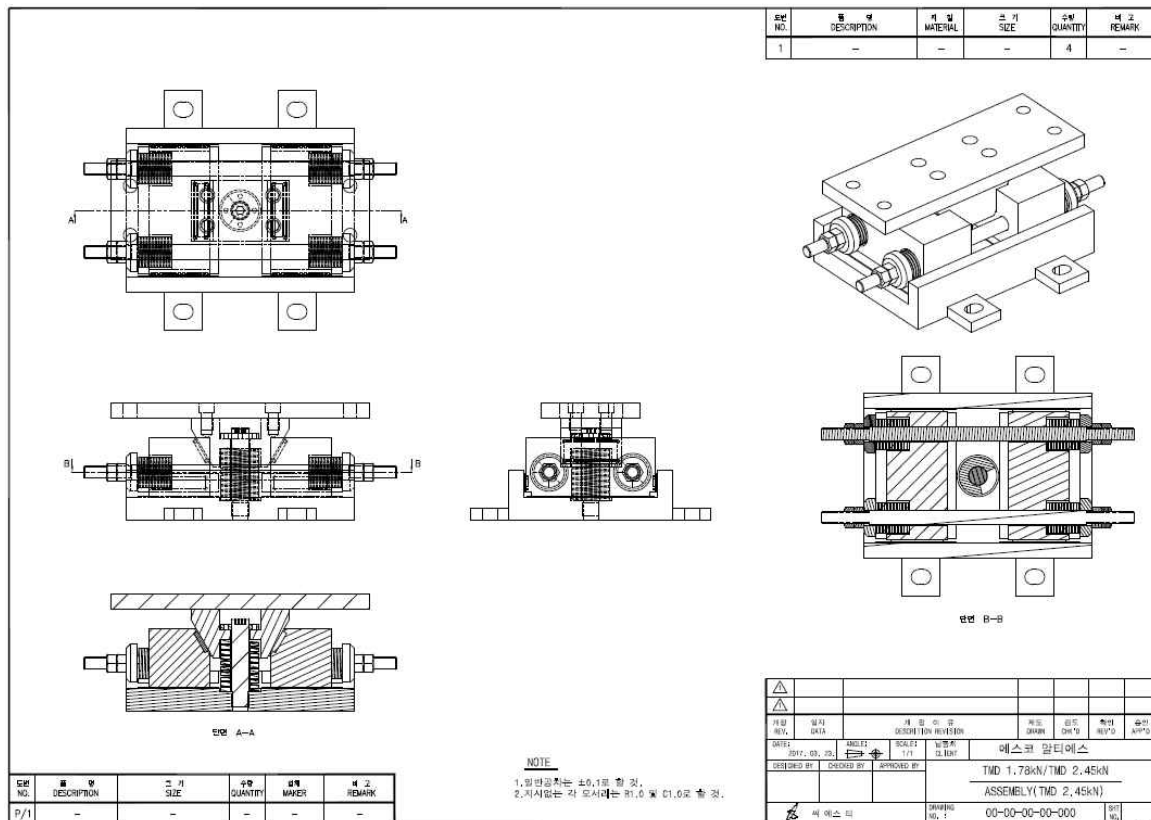
- STEP #3에서는 STEP #2에서 결정된 강성 및 감쇠 값을 이용하여 스프링-감쇠 시스템이 적용된 구조물에 대해 동적 해석을 진행해야 한다. 스프링-감쇠 시스템이 적용된 구조물에 대한 동적 해석은 동적 하중에 의한 구조물의 응답 및 스프링-감쇠 시스템 적용 위치를 결정하는 절차이며, 스프링-감쇠 시스템 적용 유무 및 위치에 따른 진동 데시벨을 비교하여 진동 저감 성능에 대해 확인해야 한다.
- STEP #4에서는 동적 해석 검토를 통해 결정된 스프링-감쇠 시스템에 대한 강성 및 감쇠 값을 이용하여 스프링-감쇠 장치를 설계하는 단계이다. 스프링-감쇠 장치는 다음 거동방정식으로부터 설계할 수 있다.

$$P = \left[k_c + \frac{2k_s}{S^2 + 2S\mu} \right] z \quad (56)$$

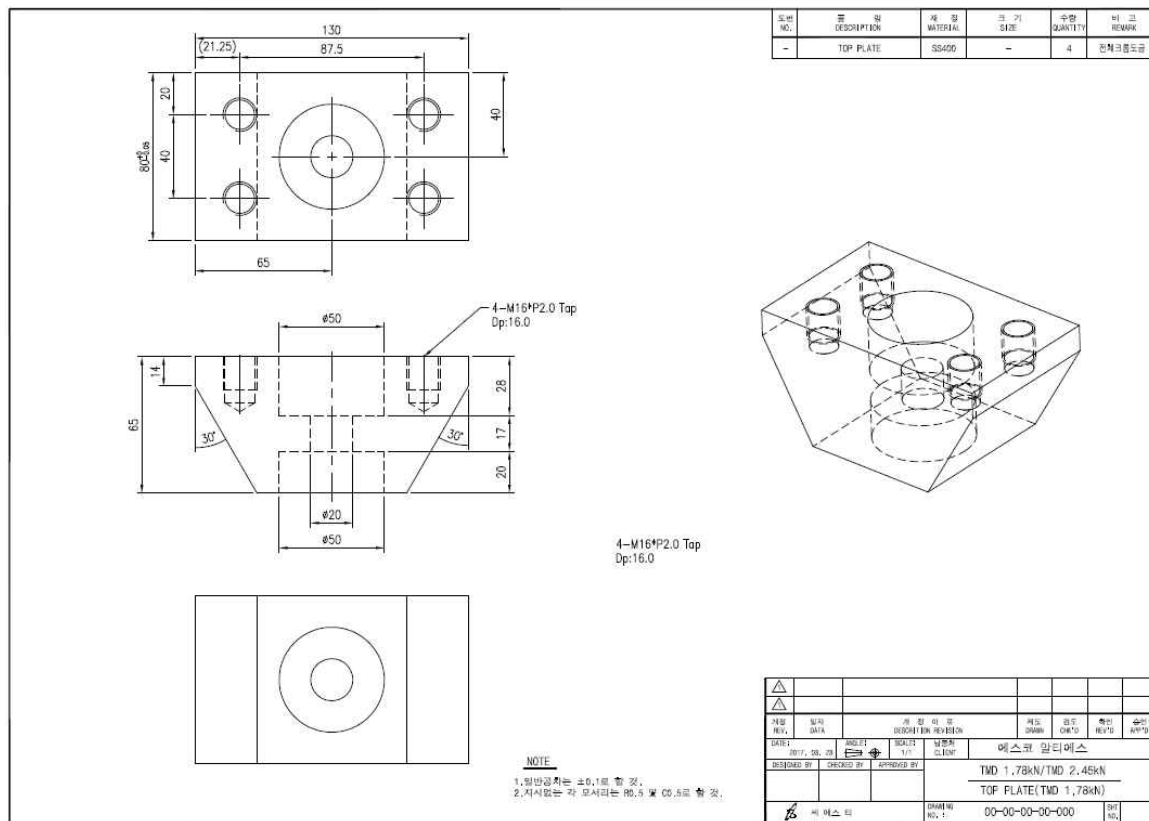
- STEP #5에서는 스프링-감쇠 장치를 제작하고 거동 방정식으로부터 산출된 이력곡선과 시험으로부터 산출된 이력곡선을 비교하여 설계된 스프링-감쇠 장치에 대해 검증해야 한다. 또한, 동적 시험을 진행하여 동적 하중이 작용하였을 때 장치의 성능이 제대로 발휘되는지를 확인하여 구조물에 장치를 적용하였을 때의 거동 예측을 할 수 있어야 한다.
- STEP #6, #7에서는 상세 설계 단계로서 스프링-감쇠 장치에 대한 성능을 파악한 후에 구조물에 스프링-감쇠 시스템을 적용하였을 때의 동적 해석을 Case Study하여 최적화된 강성 및 감쇠 값을 도출해야 한다. 최적화된 강성 및 감쇠 값을 이용하여 스프링-감쇠 장치를 제작하고 제작에 대한 오차를 확인하기 위해 장치 성능 시험을 진행해야 한다. 스프링-감쇠 장치 설치 유무에 따른 진동 저감 효과를 확인하기 위해 스실험을 진행하여 가속도계가 부착된 위치에서의 진동 저감율을 파악해야 하며, 진동 저감율로부터 스프링-감쇠 시스템에 대한 저감 성능을 검증해야 한다.

(2) 설계도

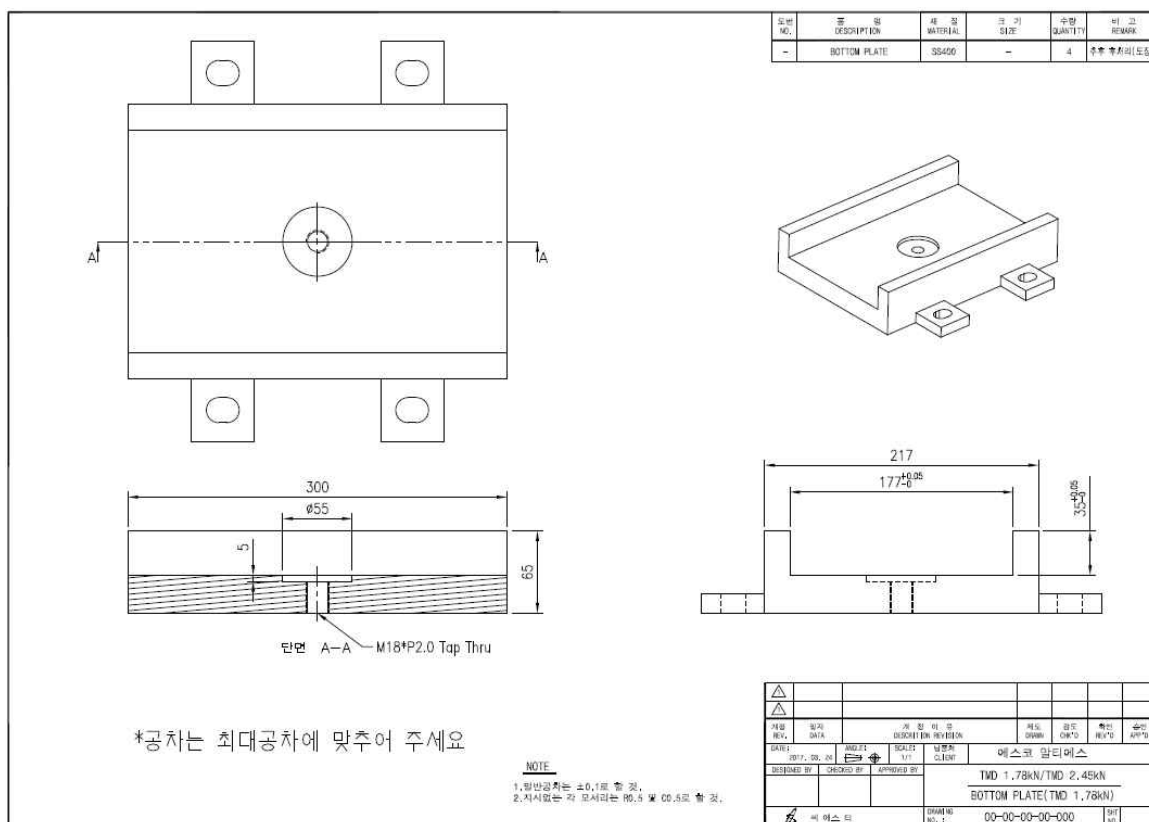
- 스프링-감쇠 시스템의 제작을 위해 그림과 같이 장치에 대한 설계도를 작성하였다.



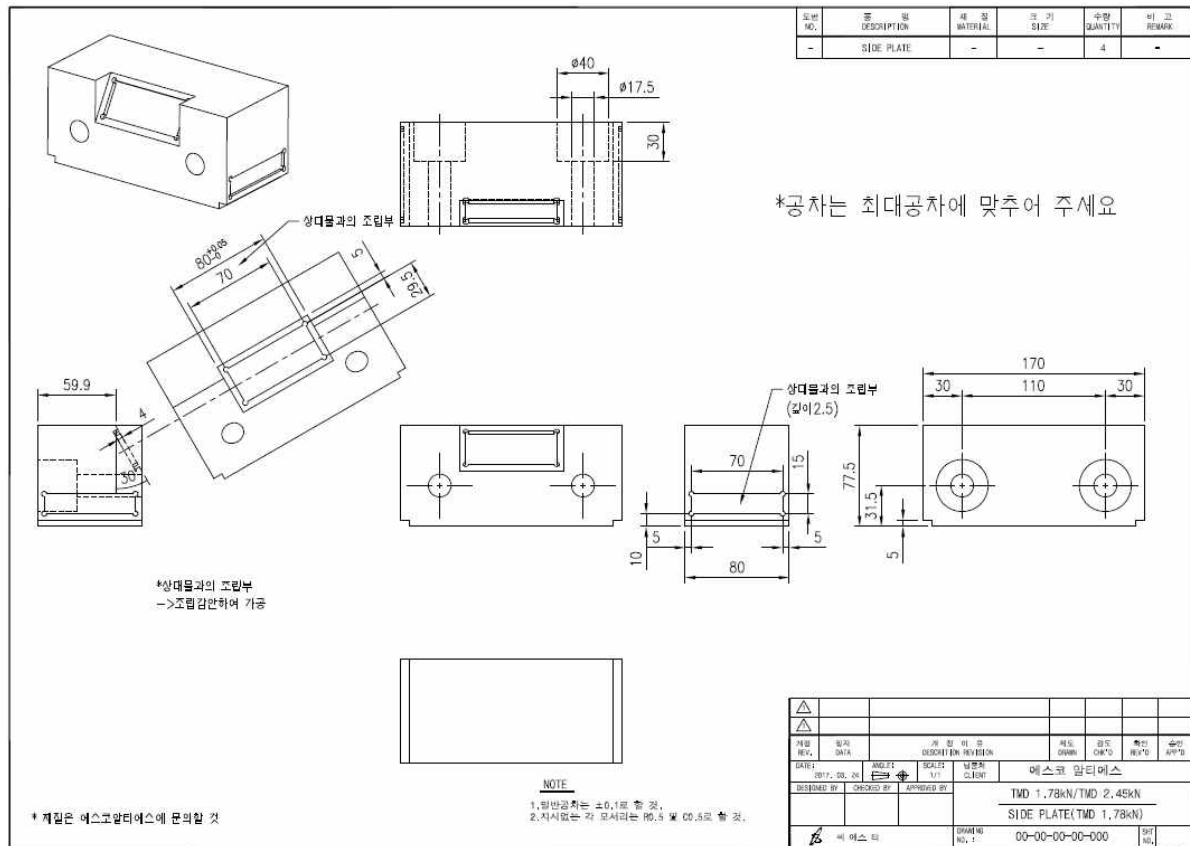
<스프링-감쇠 장치 설계도 1>



<스프링-감쇠 장치 설계도 2>



<스프링-감쇠 장치 설계도 3>



<스프링-감쇠 장치 설계도 4>

마. 결론

- 1차 스프링-감쇠 장치는 전년도에 결정된 강성 및 감쇠 값을 이용하여 설계를 진행하였으며, 설계 값 대비 약 4% 정도의 오차를 확인하였다. 하지만, 상·하부 플레이트 및 마찰재가 조립되는 부분의 제작 공차가 작아 마찰이 발생하고 접시 스프링의 사용으로부터 강성이 일정 하지 않아 일정 구간 이상에서는 2차 강성이 증가하는 것을 확인하였다.
- 2차 스프링-감쇠 장치는 1차 스프링-감쇠 장치의 상부 및 하부 옆면 마찰 및 접시 스프링의 사용으로 인해 일정 구간에서 2차 강성이 증가하는 문제점을 조립식 마찰재 및 하부 플레이트 제거 및 코일 스프링을 사용함으로써 스프링-감쇠 장치의 거동 방정식을 수정하여 개선하였다.
- 2차 스프링-감쇠 장치는 정적 및 동적, 공진 대역 검출 시험을 진행하였으며, 설계 강성 대비 약 10% 이내의 오차를 확인하였다. 또한, 동적 시험의 경우에는 보통 열차 진출입 역사 내에서 발생하는 진동수의 범위 4Hz~21Hz에서 원활한 거동을 확인하였으며, 특정 주파수 대역에서는 유사한 공진 대역을 확인하였다.
- FPI(2.45kN/mm)-1 시험체에서 다른 시험체와 상이한 결과를 확인하였다. 이는, 볼트 풀림 현상과 같은 문제로 인해 강성 및 감쇠비에서 차이가 발생한 것으로 사료되며, 추후에 진동에 의해 발생하는 볼트 풀림 문제를 개선하는 방법을 모색해야 할 필요가 있다고 판단된다.

7. 승강장 스프링-감쇠 시스템 기술 개발 고도화

가. 개요

- 실제 역사에 마찰 스프링-감쇠 장치를 적용하여 진동 저감 성능을 검증하기에는 어려움이 있기 때문에 Bench Scale 실험체를 제작하여 진동 저감 검증 실험을 진행하였다. 다음 그림은 제작된 Bench Scale 철도 역사 모형 제작하는 현장 사진이며, 그림과 같이 실제 역사의 진동 전달 경로를 구현하기 위해 실제 역사와 유사하게 복층 형식으로 구성하였다. 당초 계획으로는 승강장을 2개의 블록으로 구분하여 실험을 진행하려 하였으나, 실험의 변수를 고려하여 길이 960mm인 블록 8개로 분할하여 제작하였다. 실제 설계시에 사용되었던 승강장의 자중보다는 더 적은 용량이기 때문에 구조적으로는 안전하다. 또한, 실제 역사에 부설된 궤도를 모사하기 위해 6개로 분할된 콘크리트 판을 제작하였으며, 제작된 콘크리트 판 위에 가진기를 설치하여 진동을 가진하여 실험을 진행하였다.



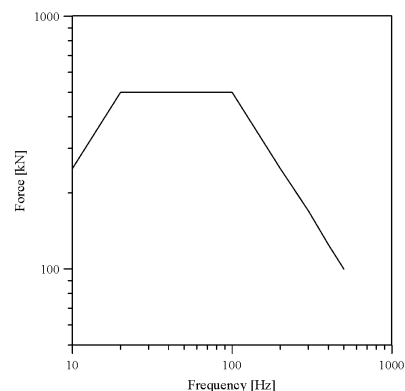
<Bench Scale 철도 역사 모형 제작 현장>

나. Bench Scale 실험 방법 및 조건

- 스프링-감쇠 시스템 적용 유무에 따른 진동 저감효과를 비교하기 위해 가진기를 이용한 진동 저감 성능 검증 실험을 진행하였다. 실제 열차가 이동하거나 멈췄을 때 발생하는 진동을 모사하기 위해 그림과 같은 가진기를 사용하였다. 가진기는 내부 혹은 외부의 이동 질량에서 발생하는 관성력으로 가진하는 관성 질량형 가진기(Electro Magnetic Actuator Inertial Mass, EMAIM)이며, 가진기의 용량은 최대 500N, 10H~500Hz까지의 넓은 주파수 범위를 작동 시킬 수 있는 특성을 가지고 있다.
- 가진기는 콘크리트 궤도부로 모사된 패널 위에 그림 (c)와 같이 설치되었으며, 가진에 의해 발생하는 가속도를 검출하기 위해 그림 (b)와 같이 스프링-감쇠 시스템을 적용할 승강장 밑 부분과 슬래브, 슬래브 외측 등 가진기로부터 발생하는 진동이 역사내부로 전달되는 경로로 예상되는 곳에 설치하였다. 가속도계는 6개를 설치하였으며, 가속도계의 종류는 그림 (a)와 같은 5g~100g 용량의 Dytran 제품을 사용하였다. 표는 실험에 대한 가진 조건이며 스프링-감쇠 시스템의 적용 유무에 따른 특성을 파악하기 위해 구조물의 고유주파수와 가진기의 성능이 안정화된 구간(그림 (b))을 고려하여 20Hz에서부터 110Hz까지 10Hz의 간격으로 총 10가지의 가진 조건을 고려하여 실험을 진행하였다.



(a) 가진기



(b) 가진기 성능곡선

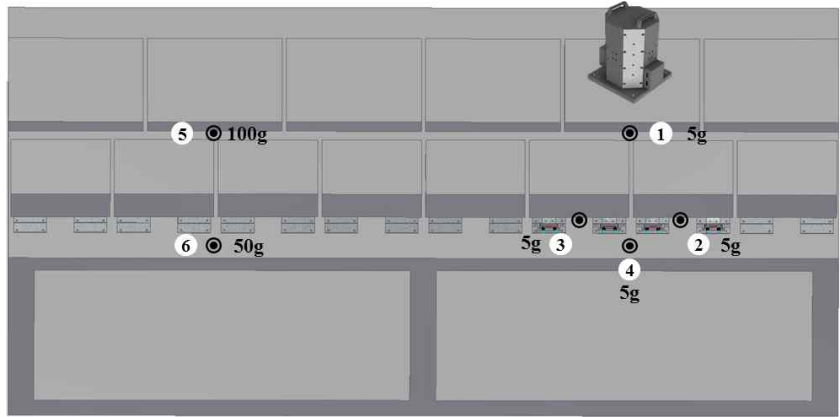


(c) 설치된 가진기

<가진기의 형상 및 성능 곡선>



(a) 가속도계



(b) 가진기 및 가속도계 설치 위치

<가속도계 및 설치 위치>

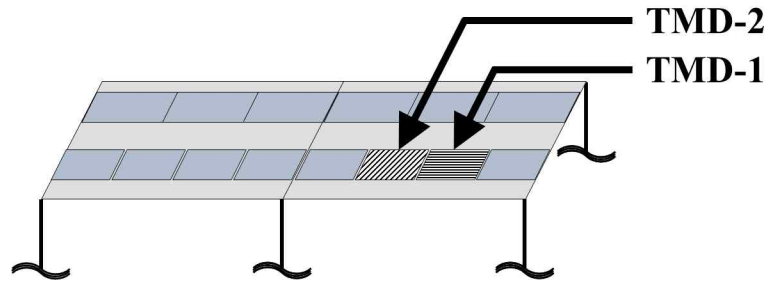
<실험 조건>

구 분	값
가진력 (N)	250 ~ 500
가진 주파수 (Hz)	20 ~ 110
주파수 범위 (Hz)	10
가진 시간 (sec)	60

다. 진동 저감 실험 결과

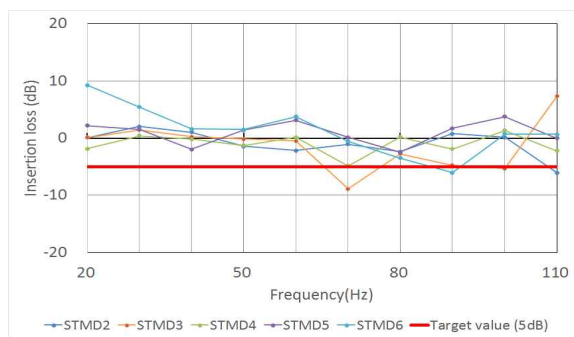
- 보통 열차에 의한 진동은 궤도부 전체에 걸쳐 발생하나, 가진기를 이용하는 실험 여건상 진동 전달이 용이한 특정 위치를 선정하여 실험을 진행하였다. 가진부 슬래브(①)와 스프링-감쇠 시스템이 적용될 승강장 하부(②, ③) 및 슬래브 외측(④), 가진원 반대편 슬래브(⑤), 가진원 반대편 슬래브 외측(⑥)에 설치된 가속도계의 응답 가속도를 측정하였다.
- 아래 표는 측정된 응답 가속도의 실효값으로부터 산출된 진동 분석 결과이며, 스프링-감쇠 시스템의 적용 유무를 NonTMD와 STMD, MTMD로 구분하였다. STMD는 그림의 TMD-2(그림에서 ③ 위치의 승강장) 만을 TMD화 시킨 경우이며 MTMD는 그림의 TMD-1과 TMD-2(그림에서 ②, ③ 위치의 두 승강장)를 TMD화 시킨 경우이다. STMD ②~⑥, MTMD ②~⑥은 각 측정 위치에서 TMD 적용 유무에 따른 진동 저감량이며 궤도 패널의 영향으로 가진력을 정확히 파악하기가 어렵기 때문에 가진부에 가까운 슬래브(①)에서 측정된 값을 기준으로 각 실험 조건에 대해 비교 분석을 진행하였다.
- NonTMD의 경우에는 전반적으로 가진부의 진동 크기 대비 각 계측부에서 그대로 전달 또는 증폭되는 경향을 보이고 있다. STMD 및 MTMD에서는 70Hz, 80Hz와 같은 특정 주파수 대역을 제외하고 가진부 중앙 슬래브(①)보다 진동 전달 경로인 슬래브 외측(④)에서 진동이 증폭

되는 경향을 보이나, 진동 전달 경로 상에 위치한 TMD 승강장 하부 가속도는 감소한 것으로 보아 구조물 고유 모드의 영향을 가장 크게 받는 부분으로 판단되며, 추후 세밀한 구조물의 고유 모드 분석을 통해 특정 주파수의 모드 형상에 따른 가속도의 증폭 여부에 대해 확인해야 할 필요가 있다.

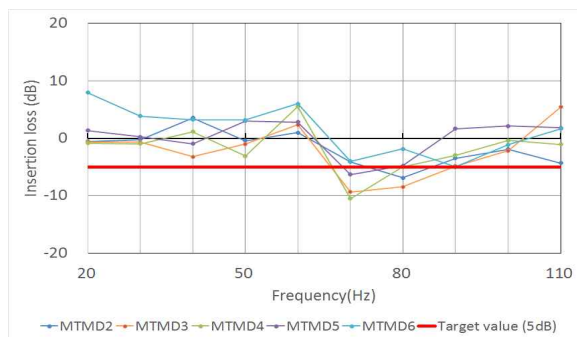


<스프링-감쇠 장치 설치 위치>

- 아래 그림은 진동수에 따른 진동 저감량을 각 측정 위치에서 비교한 결과이다. STMD에서는 60Hz, 100Hz에서 증폭되는 경향을 확인하였으며, MTMD에서는 60Hz에서 확인하였다. 이는 스프링-감쇠 시스템이 구조물의 강성에 기여하고 볼트 연결이 되어있는 궤도부 패널의 공진으로 인한 영향으로 보인다. 하지만, 전반적으로 스프링-감쇠 시스템이 없는 경우에 비해 스프링-감쇠 시스템이 적용된 STMD, MTMD의 진동이 상당량 저감되는 것을 확인하였다.
- 구조물 전체적인 진동은 STMD의 경우 70Hz, 80Hz, 90Hz에서 각각 평균 2.54dB, 1.82dB, 1.70dB씩 진동이 저감되었으며, MTMD의 경우 70Hz, 80Hz, 90Hz, 100Hz에서 각각 평균 5.71dB, 4.49dB, 2.43dB, 0.57dB씩 진동이 저감되었음을 확인하였다. 부분적으로는 STMD의 경우 특히, 70Hz에서 위치 ③의 진동이 8.88dB만큼 저감되었고 100Hz에서 위치 ③의 진동이 5.33dB만큼 진동이 저감되었으며 그 외에도 110Hz의 위치 ②에서 6.07dB, 90Hz의 위치 ⑥에서 6.02dB의 진동이 저감되어 해당 경우에 대해 목표 저감량인 5dB를 만족함을 확인하였다.
- MTMD의 경우 70Hz에서 위치 ③, ④, ⑤의 진동이 각각 9.33dB, 10.53dB, 6.30dB씩 저감되었으며 80Hz에서 위치 ②, ③의 진동이 각각 6.88dB, 8.48dB씩 저감되어 목표 저감량인 5dB를 만족하였고, 90~100Hz대역에서 전체적으로 2~4dB의 진동이 저감됨을 확인하였다.



(a) STMD



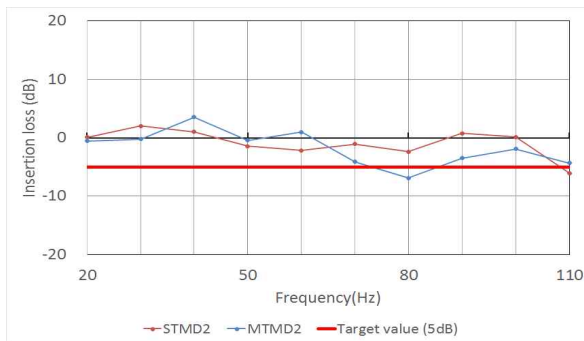
(b) MTMD

<진동 저감 실험 결과>

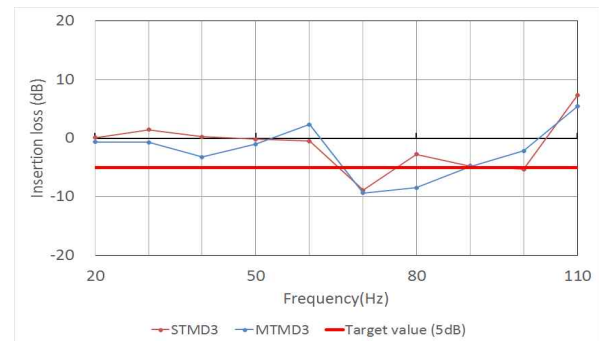
<Bench Scale 실험 결과>

구 분		dB									
		20Hz	30Hz	40Hz	50Hz	60Hz	70Hz	80Hz	90Hz	100Hz	110Hz
Non TMD	N-①	65.60	74.92	75.53	88.94	88.50	92.38	90.25	91.52	98.40	99.49
	N-②	64.63	75.61	72.81	86.16	89.61	93.48	89.86	88.13	91.10	89.46
	N-③	62.94	76.05	76.41	86.91	83.46	92.77	91.57	88.99	85.36	76.78
	N-④	68.15	82.56	81.85	94.92	86.52	100.07	93.71	98.35	100.35	99.92
	N-⑤	70.41	70.97	70.97	71.96	72.01	79.50	82.06	77.18	75.42	78.03
	N-⑥	65.78	69.68	69.15	76.08	74.04	98.30	97.86	104.6 ₈	97.63	99.59
STMD	S-①	64.58	74.20	79.36	89.26	86.89	92.80	95.30	90.96	95.44	98.19
	S-②	63.72	76.90	77.65	85.06	85.81	92.84	92.54	88.33	88.29	82.10
	S-③	61.99	76.78	80.46	87.09	81.37	84.31	93.86	83.69	77.07	82.82
	S-④	65.29	82.26	85.51	93.97	85.03	95.65	98.95	95.91	98.76	96.43
	S-⑤	71.59	71.73	72.83	73.67	73.51	80.04	84.60	78.32	76.23	76.72
	S-⑥	74.04	74.41	74.58	77.92	76.22	98.17	99.46	98.10	95.39	98.96
MTMD	M-①	65.08	74.96	77.02	86.59	86.51	97.25	94.70	91.73	97.16	95.61
	M-②	63.54	75.41	77.85	83.38	88.60	94.27	87.43	84.86	87.95	81.25
	M-③	61.76	75.39	74.70	83.55	83.81	88.31	87.55	84.37	81.99	78.33
	M-④	66.78	81.66	84.49	89.48	90.05	94.41	93.17	95.60	98.73	94.99
	M-⑤	71.25	71.27	71.51	72.65	72.83	78.07	81.75	79.08	76.31	76.00
	M-⑥	73.20	73.59	73.87	76.93	78.05	99.15	100.4 ₇	99.89	95.30	97.36
진동 저감량	STMD ②	0.11	2.01	1.01	-1.43	-2.19	-1.07	-2.37	0.76	0.16	-6.07
	STMD ③	0.08	1.45	0.22	-0.15	-0.48	-8.88	-2.76	-4.74	-5.33	7.34
	STMD ④	-1.83	0.42	-0.18	-1.28	0.13	-4.83	0.18	-1.89	1.37	-2.20
	STMD ⑤	2.20	1.49	-1.98	1.38	3.11	0.13	-2.50	1.69	3.77	-0.01
	STMD ⑥	9.29	5.46	1.60	1.52	3.78	-0.56	-3.46	-6.02	0.72	0.67
	MTMD ②	-0.56	-0.25	3.56	-0.43	0.99	-4.09	-6.88	-3.48	-1.91	-4.34
	MTMD ③	-0.65	-0.71	-3.19	-1.02	2.34	-9.33	-8.48	-4.84	-2.14	5.43
	MTMD ④	-0.84	-0.95	1.15	-3.09	5.53	-10.53	-4.99	-2.96	-0.38	-1.06
	MTMD ⑤	1.36	0.26	-0.95	3.04	2.81	-6.30	-4.76	1.68	2.12	1.85
	MTMD ⑥	7.95	3.87	3.23	3.20	6.00	-4.02	-1.85	-5.00	-1.10	1.65

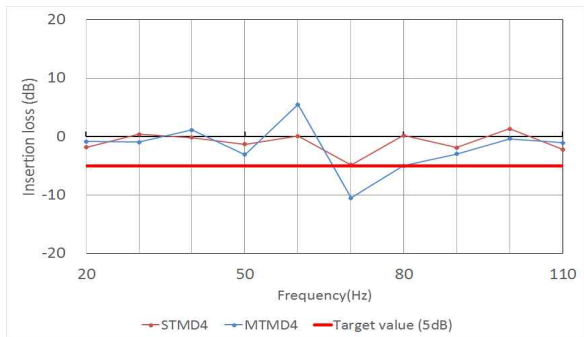
□ 다음 그림은 각 Hz에서 STMD와 MTMD의 진동 저감량에 대한 결과를 비교 분석한 그래프이다. STMD와 MTMD는 전반적으로 거의 유사한 거동을 보이는 것을 확인하였다. 그러나, 그림 (c)에서 70Hz의 진동 저감 성능이 약 2배 이상 차이 나는 것을 확인하였으며, 그림 (a), (b)에서도 MTMD의 진동 저감 양상이 좀 더 넓은 주파수 대역에서 나타나는 것을 확인할 수 있다. 그림 (d), (e)에 비해 (a), (b), (c)에서 진동 저감 성능이 크게 나타나는 것으로 보아 TMD를 설치한 위치 주변의 진동저감량이 TMD를 설치하지 않은 반대편 슬래브에 비해 크게 나타나 TMD 거동이 설치 주변 위치에 더 큰 진동저감효과를 나타냄을 확인하였다. 또한 전체적인 진동저감양상을 통해 MTMD가 STMD보다 좀 더 넓은 주파수 대역에서 TMD에 의한 진동 저감 효과를 볼 수 있었다.



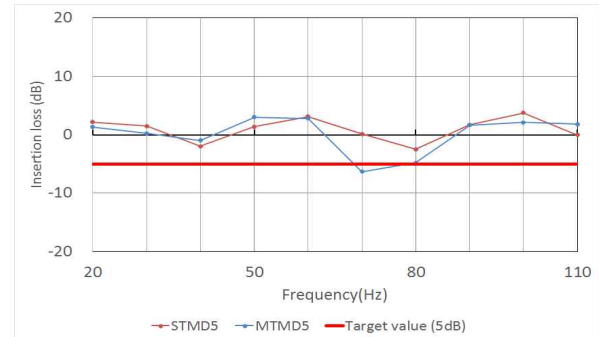
(a) slab under TMD-1 (Location ②)



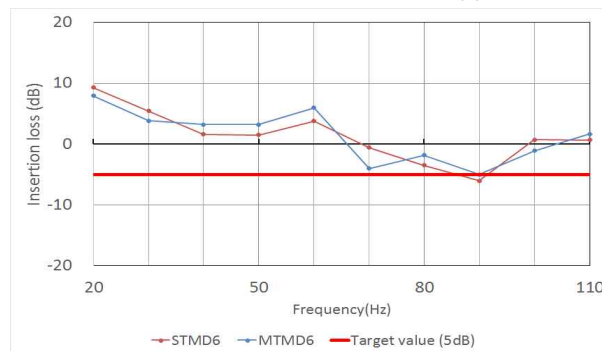
(b) slab under TMD-2 (Location ③)



(c) outer slab (Location ④)



(d) opposite slab (Location ⑤)



(e) opposite outer slab (Location ⑥)

<STMD와 MTMD 위치별 진동 저감량 비교>

라. 결론

- 승강장을 TMD화하여 역사에 적용시 가진부 슬래브의 진동에는 효과가 적었으나, 실험 모형의 고유 주파수 대역으로 예상되는 70Hz 가진시에는 가진부 슬래브 대비 승강장을 통과한 위치에서의 응답이 5dB(V) 이상 저감되었다. 이는 승강장 TMD의 동조질량감쇠기 효과로서, 슬래브로부터 전달되는 경로에서 진동 절연효과가 발휘된 것으로 판단된다.
- 일부 주파수 대역에서는 크지는 않지만 가진부 대비 증폭된 응답이 발견되었으며, 이는 실험 중 안전을 위해 승강장-슬래브간, 궤도패널-슬래브간 체결 조건을 강결함에 따른 강성 증가 및 스프링-감쇠 장치 연결에 따른 강성 변화 등에 기인되어 공진대역이 발생된 것으로 판단된다.
- STMD와 MTMD 적용 유무에 따라 승강장 하부의 진동이 차이를 보였으며, 외측 슬래브 및 반대편 슬래브, 반대편 외측 슬래브에서 진동 저감량의 차이가 현저한 것을 보아 STMD보다 MTMD를 적용하였을 때 훨씬 더 큰 효과를 확인할 수 있는 것으로 판단된다.
- 승강장 TMD화에 의해 특정 주파수 대역에서 진동 전달 경로의 진동이 저감됨에 따라 열차 궤도부를 중심으로 양측에 승강장이 있는 역사 형식에서 보다 큰 진동 저감 효과를 발휘할 수 있는 기술로 판단된다.

제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

1. 목표 달성도

성과지표	성과목표	최소성과목표
일반학술지게재(1점)	4건	4건
특허출원(1점)	3건	3건
소계(점수)	7점	7점

구분	목표 건수	달성실적	달성율
일반학술지 게재	4	1. 철도역사 진동 저감을 위한 승강장의 동조질량감쇠기화 기법 개발 [한국방재학회 논문집, Vol.16, No.2, 2016] 2. 철도 승강장의 진동수준 감소를 위한 이중동조질량감쇠기술 개발 [한국복합신소재구조학회 논문집, Vol.8, No.2, 2017] 3. 다중동조질량감쇠기를 이용한 철도역사의 진동제어 [한국방재학회 논문집, Vol.17, No.3, 2017] 4. Bench Scale 구조물을 이용한 TMD 기반 철도역사 진동저감 기법의 실험적 검증 [한국복합신소재구조학회 논문집, Vol.8, No.2, 2017] 5. 이중 TMD 기술을 이용한 철도역사의 진동감소 성능 검토 [한국방재학회 논문집 2017 10월 게재 예정]	100% [5/4]
특허출원	3	1. 진동저감형 철도역사 및 그 시공방법 [10-2016-0024078] 2. 진동저감형 철도역사 및 이를 위한 스프링-마찰 댐퍼 [10-2016-0067873] 3. 철도 승강장 설치구조와 이를 갖는 철도 역사 및 철도 승강장의 이중동조질량감쇠 진동감쇠방법 [10-2017-0078493]	100% [3/3]

2. 관련 분야 기여도

가. 기술적 파급효과

- 철도역사의 진동특성 분석 및 향상 기술 확보
 - 철도역사의 진동감소를 위한 해석기술 개선
 - 승강장의 영향을 고려한 효율적인 진동저감 기술 확보
 - 다양한 역사구조 및 승강장 구조형식에 따라 진동해석, 예측기법 기술 개발 가능
- 세계 최초로 승강장을 부가질량으로 고려한 진동저감 기술 확보
 - 철도역사 승강장의 특성을 고려한 진동저감 기술 확보
 - 승강장과 같은 기존 시설을 활용한 TMD 기술 활성화 가능
 - TMD 기술이 적용되지 않던 철도역사로 기술적용 범위를 확장하고, 타 영역으로의 파급 가능성 제고

나. 경제적 효과

- 국내 철도역사 저진동 시스템 설계 및 시공비용 절감
 - 궤도에 적용하지 않는 기술로 열차 운행에 지장을 주지 않고 적용이 가능함.
 - 기존 승강장에 적용이 가능하므로 비용이 상대적으로 저렴함.
- 해외 철도역사 진동저감 시스템 시장으로 진출
 - 해외시장은 국내 대비 약 6~7배 정도 규모로 그 수요가 점차 증가하는 추세임.
 - 승강장 TMD 기술은 적용이 상대적으로 간편하고 저렴하므로 해외 시장 진출이 용이함.
 - 아시아 및 개발도상국에서의 철도 건설시장 규모의 지속적인 확대로 세계 철도시장의 규모는 점차 확대될 것으로 전망됨

제5장. 연구개발성과의 활용계획

1. 현장적용 방안

- ☐ 다양한 역사구조물과 승강장 형식에 대하여 수치해석을 통한 승강장의 동조질량감쇠기화 설계 기법 개발은 기존의 역사 진동저감방안 관련 연구내용과 연계하여 현장에 적용이 가능함
- ☐ 철도역사와 승강장의 형식 조사 및 분석을 통하여 기존 역사의 현장여건에 따른 분류 및 설계안을 제시하고, 공사비용 등을 고려하여 우선적으로 개선해야할 순위 제공에 활용 가능함
- ☐ 기존 방진시스템들은 적용 시 열차운행을 중단하거나 영업에 큰 불편함이 있었으나 본 과업의 결과물은 열차운행 지장이 적고, 기존 공법에 비하여 시공비용 측면 또한 비교적 덜 제한적임

2. 실용화·제품화·사업화 방안

- ☐ 경제수준의 향상에 따른 국민들의 정온한 환경에 대한 요구가 커짐에 따라 소음·진동의 민원이 증가함에 따라 주요역사와 소음·진동 레벨이 높은 역사에 대하여 개발되는 시스템을 적용할 경우 높은 부가가치를 얻을 수 있을 것으로 예상됨.
- ☐ 기존 역사의 소음·진동 저감을 위한 기존 기술의 비용이 과대함으로 인하여 많은 수의 역사가 개선의 어려움을 겪고 있음. 본 과업을 통하여 개발된 진동저감 기술을 적용 시 저비용, 고효율의 방진시공이 가능할 것으로 기대됨.
- ☐ 방음·방진기술은 강소 중소기업형의 기술로 본 과업을 통하여 개발된 기술의 이전을 통한 관련 중·소기업의 기존 역사 개량 사업 수행 시 큰 액수의 시장창출 가능.
- ☐ 본 과업을 통하여 개발될 진동저감시스템은 기존 및 신설역사 모두 적용 가능하므로 사업화에 대한 국내 시장규모는 상당함
- ☐ 해외 선진국의 경우 선진국의 공공시설에 대한 친환경적 요구 수준이 높아지고 있어 국내 시장 대비 약 7배 정도 규모로 그 수요가 점차 증가하는 추세임. 또한 아시아를 포함한 개발도상국에서의 철도 건설시장 규모의 지속적인 확대로 세계시장 규모는 점차 확대될 것으로 전망됨.

3. 미래원천기술 확보

- ☐ 국민수준이 점점 향상되어 보다 정온한 환경에 대한 요구가 증가됨에 따라 고객과 주민들의 소음·진동에 대한 민원은 앞으로 더욱 증가할 것으로 예상됨. 이와 같은 민원을 해결할 수 있는 진동저감기법을 사전에 확보하면 분쟁해결 비용 및 유지관리 면에서 큰 경쟁력을 보유할 수 있음.
- ☐ 기존 철도역사의 진동특성 분석에서 상호작용 요소로 고려하는 열차-궤도, 궤도-구조물에 추가로 승강장과 역사의 상호작용을 고려한 검토기술 확보로 역사의 설계 및 계획 수립 시 활용이 가능함
- ☐ 승강장을 고려한 진동저감 해석 및 인터페이스 검증 기법은 기존·신설, 지상·지하 역사에 방진시스템을 적용 시 정확한 진동특성 진단 후 최적화된 방진시스템 구축이 가능함
- ☐ 수치해석 및 실험실 환경 내 실험을 통한 스프링 감쇠시스템의 최적화 설계기법은 신설 역사 뿐만 아니라 기존역사에도 적용이 가능하며, 철도시장에서 인프라 구축 시 진동에 의한 영향을 줄여주고, 고난이도 기술을 확보함으로써 선진국수준의 기술력을 갖을 수 있는 중요한 계기가 될 수 있음
- ☐ 구조물 및 사용시설에 대한 진동저감 방안 모색은 미래에도 지속적으로 해결해야할 과제임. 본 과업으로 개발되는 철도분야 이외에 도로, 항공, 항만, 플랜트 등 진동저감 기술을 적용이 야에도 적용이 가능한 미래지향적인 원천기술을 확보

4. 기술이전

- ☐ 세계 최초로 역사 내 구조물인 승강장을 이용한 진동저감기술 이전
 - 승강장-구조물의 상호작용을 고려한 해석, 예측기법 기술
 - 승강장을 동조질량감쇠기화 시키는 스프링-감쇠시스템의 시공기술
 - 다양한 역사 및 승강장 구조물에 대한 스프링-감쇠시스템 진동해석 및 예측기법
- ☐ 스프링-감쇠시스템의 설계 및 시공기술 이전
 - 승강장을 동조질량감쇠기화 시키는 스프링-감쇠시스템의 해석 및 설계기술
 - 스프링-감쇠시스템 제작 및 시공기술
 - 실험을 통한 성능검증 및 제작실적 확보
- ☐ 차량-궤도-구조물-승강장 상호작용 특성 및 향상 기술 이전
 - 기존 해석기법에서 더 향상된 진동 예측 기술
 - 차량-궤도-구조물-승강장을 고려한 역사 진동저감 기술

5. 후속연구

- ☐ TRL 4단계 이후 연구는 단품 및 bench scale 규모 축소실험을 통하여 도출한 최적화 설계 기법 및 상호작용해석 기법을 이용하여 Test bed 실험을 통한 성능검증 필요
- ☐ 해외 철도역사 및 고속철도역사 등 대형역사에 적용성을 검토하기 위한 해석 및 설계요소 검토를 통하여 기술의 해외 진출 및 적용폭을 확대할 수 있는 연구 필요

제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

- ☐ 이 연구는 철도역사 승강장을 합리적으로 TMD화 하기 위한 기술로 국내외 관련 기술을 검토하였으며, 해외 기술의 경우 모두 TMD와 관련한 것임.
- ☐ 연구 수행을 통해 취득한 TMD 관련 해외 과학기술 정보는 모두 본문 중에 기술하였음.

제7장. 연구개발성과의 보안등급

- ☐ 연구 수행을 통해 발견한 지식 등의 성과는 모두 학술논문 등으로 발표한 바 있으므로 일반과제로 분류하는 것이 적절함.

제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

구입 기관	연구시설/연구장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입 가격 (천원)	구입처 (전화번호)	비고 (설치 장소)	NTIS장비 등록 번호

제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

- ☐ 기술적 위험요소 분석
 - 연구책임자가 기술적 위험요소 및 위험도를 분석·기술하고, 위험도 저감 및 참여연구원의 안전확보를 위한 대책(연구실 안전시설·장비 구비, 연구종사자 안전교육 매주 실시) 수립
- ☐ 안전관리대책
 - 시험품 성능 시험 시 시험실내 안전관리 강화
 - 기업에서는 안전관리팀 관리 하에 안전시설 확보되어 있으며, 주기적 안전 교육 실시

제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적

번호	구분 (논문/ 특허/ 기타)	논문명/특허명/ 기타	소속 기관명	역할	논문 게재지/ 특허 등록 국가	영향력 지수	논문 게재일 /특허 등록일	사사 여부 (단독 사사 또는 중복 사사)	특기 사항 (SCI 여부/인용 횟수 등)
1	논문	철도역사 진동 저감을 위한 승강장의 동조질량감쇠기 화 기법 개발	한국 교통대	주관	한국 방재학회	0.43	2016.04	Y	
2	논문	다중동조질량 감쇠기를 이용한 철도역사의 진동제어	한국 교통대	주관	한국 방재학회	0.43	2017.06	Y	
3	논문	철도 승강장의 진동수준 감소를 위한 이중동조질량 감쇠기술 개발	한국 교통대	주관	한국복합 신소재 구조학회	0.23	2017.06	Y	
4	논문	Bench Scale 구조물을 이용한 TMD 기반 철도역사 진동저감 기법의 실험적 검증	(주)에스 코알티 에스	협동	한국복합 신소재 구조학회	0.23	2017.06	Y	
5	논문	이중 동조질량감쇠 기술을 이용한 철도역사의 진동감소 성능 검토	한국 교통대	주관	한국 방재학회	0.43	2017.10	Y	
6	특허	진동저감형 철도역사 및 그 시공방법	(주)에스 코알티 에스	협동	대한민국		2016.02.29. (출원일)		
7	특허	진동저감형 철도역사 및 이를 위한 스프링-마찰 댐퍼	(주)에스 코알티 에스	협동	대한민국		2016.06.01. (출원일)		
8	특허	철도 승강장 설치구조와 이를 갖는 철도 역사 및 철도 승강장의 이중동조질량감쇠 진동감쇠방법	(주)에스 코알티 에스	협동	대한민국		2017.06.21. (출원일)		

제11장. 기타 사항

제12장. 참고 문헌

- 국토교통부 (고시 제 2013-236호, 개정일 2013.5.16.), “철도의 건설기준에 관한 규정.”
- 김두기 (2011). 구조동역학. 구미서관.
- 김민수, 이규세, 최상현 (2017). 철도 승강장의 진동수준 감소를 위한 이중동조질량감쇠기술 개발. 한국복합신소재구조학회 논문집, 8(2), 67-72.
- 류봉조, 이흥기, 구경환. (2011). “방진재를 이용한 대형구조물의 철도 진동에 관한 실험적 연구.” 전기학회논문지, 60(6), 1286-1292.
- 박지훈, 주석준 (2008). “건축구조물의 풍진동 제어를 위한 동조질량감쇠기”, 한국면진제 진협회 협회지, Vol. 8, pp. 52-62.
- 신정열, 안태기, 김은성, 강형구, 박은천 (2012). “지하철 역사구조물 건전성 평가를 위한 모니터링시스템 구축.” 한국철도학회 춘계학술대회.
- 양신추 (1997). “차량과 궤도의 상호작용을 통한 하부구조물에 작용하는 동하중의 산정.” 대한토목학회 논문집, 17(1-1), 79-88.
- 우성식, 이상현, 황지현, 정란 (2013). “동조질량감쇠기를 사용한 39층 철골조 구조물의 연직방향 진동 제어”, 대한건축학회지, pp. 41-48.
- 유용, 권순정, 최상현 (2016). 철도역사 전동 저감을 위한 승강장의 동조질량감쇠기화 기법 개발. 한국방재학회 논문집, 16(2), 77-82.
- 이용선 (2005) 다중동조질량감쇠기를 이용한 강판형교의 진동소음제어. 박사학위논문, 연세대학교.
- 이진학, 윤정방 (2002). 구조계규명기법을 이용한 프레임구조물의 수치해석모델 개선 및 접합부의 손상도 평가. 대한토목학회 논문집, 22(6-A), 1271-1283.
- 이흥기, 이현준, 손성완 (2014). “철도 소음 민원 집중 지역의 소음 발생원을 고려한 철도 소음진동 데이터베이스 설계.” 한국소음진동공학회 2014년 추계학술대회, 812-816.
- 장승엽, 조호현, 양신추 (2010). “플로팅 슬래브궤도를 적용한 선하역사 구조물 진동해석.” 한국철도학회 춘계학술대회논문집, 1719-1724.
- 조정래, 김동석, 김영진, 곽종원, 장승엽 (2013). PSC-I 거더 철도교량의 3차원 동적 이동하중 해석 모델. 한국철도학회 논문집, 16(4), 286-297.
- 최상현, 백준호, 이유인 (2012). 구조물의 진동저감을 위한 수직형 면진장치. 한국재난정보학회 논문집, 8(2), 198-204.
- 최상현, 김민수 (2015a). 철도교량의 구조건전성 모니터링을 위한 모달파라미터 산정 기법 분석. 한국방재학회 논문집, 15(1), 1-7.
- 최상현, 유용, 김진호, 권세곤 (2015b). 철도 선하역사 진동 전달 특성의 실험적 분석. 한국재난정보학회 논문집, 11(1), 89-96.
- 최상현, 김진호, 유용, 권세곤 (2015c). 철도선하역사 접속교량의 진동전달 특성 분석. 한

-
- 국산학기술학회 논문집, 16(4), 2911-2916.
- 한국철도공사 (2014). 궤도-구조물 상호작용을 고려한 역사진동 해석기법 개발. 1차년 보고서.
- 한국철도공사 (2016). 궤도-구조물 상호작용을 고려한 역사진동 해석기법 개발. 3차년 보고서.
- 한국철도시설공단 (2008). 궤도 소음·진동 설계기준 개발 연구. 최종보고서.
- 한국철도시설공단, “철도 설계지침 및 편람(궤도설계일반)”
- 한국철도시설공단(2013.05.02. 개정), “선로유지관리 지침”
- 환경부 (2015). 소음·진동관리법 시행규칙, 환경부령 제587호.
- Abe, M., Fujino, Y. (1994). “Dynamic characterization of multiple tuned mass dampers and some design formulas” , Earthquake engineering and structural dynamics, Vol. 23, pp. 813-835.
- Ayorinde, E.O., Warburton, G.B. (1980). Minimizing structural vibrations with absorbers. Earthquake Engineering Structural Dynamics, 8(3), 219-236.
- Bandivadekar, T.P., and Jangid, R.S. (2012). Mass distribution of multiple tuned mass dampers for vibration control of structures. International Journal of Civil and Structural Engineering, 3(1), pp.70-84.
- Choi, S., Park, S., Hyun, C.-H., Kim, M.-S., Choi, K.-R. (2010). Modal parameter identification of a containment using ambient vibration measurements. Nuclear Engineering and Design, 240, 453-460.
- Choi, S., Yoo, Y., Kim, M., Lee, C. (2017). Vibration control of an elevated railroad station using platform TMD system. 35th International Modal Analysis Conference, Los Angeles, US.
- Daniel, Y., Lavan, O. (2013). Allocation and sizing of multiple tuned mass dampers for seismic control of irregular structures, Seismic Behaviour and Design of Irregular and Complex Civil Structures. Vol. 24 of the Series Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering, 323-338.
- Den Hartog, J.P. (1947). Mechanical Vibration, McGraw-Hill, New York, N.Y.
- DIN 4150-3 (1999). Structural Vibration - Part 3: Effects of Vibration on Structures.
- Ewins, D.J. (1986). Modal Testing: Theory and Practice. Research Studies Press Ltd., Hertfordshire, England.
- Frahm, H. (1909). Device for Damping Vibration of bodies. U.S. Patent No. 989958.
- Ibrahim, S.R. (1988). Correlation of analysis and test in modelling of structures: assessment and review. Journal of the Society of Environmental Engineers, 27-1(116), 39-44.
- Imregun, M., Visser, W.J. (1991). A review of model updating techniques. Shock and Vibration Digest, 23(1), 9-20.
- Inman, D.J., Minas, C. (1990). Matching analytical models with experimental modal data in mechanical systems. Control and Dynamic Systems, 37, 327-363.
- International Organization for Standardization (1989). Evaluation of human exposure to
-

-
- whole-body vibration – Part 2: Human exposure to continuous and shock-induced vibrations in buildings (1 to 80 Hz). ISO 2631-2. International Organization for Standardization, Geneva.
- Lee, C.-L., Chen, Y.-T., Chung, L.-L., and Wang, Y.-P. (2006) Optimal design theories and applications of tuned mass dampers. *Engineering Structures*, 28, 43–53.
- Nam, D. (2001). Improvements in the accuracy of system identification and nondestructive damage evaluation in civil engineering structures. Ph.D. Dissertation, Texas A&M University.
- Ormondroyd, J., Den Hartog, J.P. (1928). The theory of dynamic vibration absorber. *Trans. ASME*, APM-50-7, 9–22.
- Rana, R. (1996). Response control of structures by tuned mass dampers and their generalizations. 11th World Conference on Earthquake Engineering, No. 498.
- Randall, S.E., Halsted, D.M., and Taylor, D.L. (1981) Optimum vibration absorbers for linear damped systems. *Journal of Mechanical Design*, ASME, Vol. 103, pp. 908–913.
- Sadek, F., Mohraz, B., Taylor, A.W., Chung, R.M. (1997) A method of estimating the parameters of tuned mass dampers for seismic application, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 26, pp. 617–635.
- Shooshtari, A., and Afzali, H. (2008) A numerical approach to consider effectiveness of TMDs on nonlinear behavior of reinforced concrete frames. The 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China.
- Stubbs, N., Osegueda, R. (1990). Global non-destructive damage evaluation in solids. *International Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis*. 5(2), 67–79.
- Tsai, H.-C., Lin, G.-C., (1993) Optimum tuned-mass dampers for minimizing steady-state response of support-excited and damped systems. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 22, No. 11, pp. 957–973.
- Wang, H., Tao, T.Y., Cheng, H.Y., Li, A.Q. (2014). “A simulation study on the optimal control of buffeting displacement for the Sutong Bridge with multiple tuned mass dampers” , *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, Vol. 15, pp. 798–812.
- Warburton, G.B. (1982) Optimum absorber parameters for various combinations of response and excitation parameters. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 10, No. 3, pp. 381–401.
-

주 의

1. 이 최종보고서는 국토교통과학기술진흥원에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구보고서입니다.
2. 이 최종보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통과학기술진흥원에서 시행한 사업의 연구 개발성과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.

