

18CTAP
-C1297
36-02

보안 과제(), 일반 과제(✓) / 공개(✓), 비공개()발간등록번호(11-B350021-000055-01)

국토교통기술혁신연구 사업 제2차 연도 최종 보고서

R&D / 18CTAP-C129736-02

기
반
스
마
트
기
초
격
리
시
스
템
개
발
최
종
보
고
서구
조
물
의
내
진
성
능
향
상
을
위
한
MR
엘
라
스
토
머

2019

국
토
교
통
부
한
국
과
학
기
술
원

구조물의 내진 성능 향상을 위한 MR 엘라스토머 기반 스마트 기초격리시스템 개발 최종보고서

2019. 03. 29.

주관연구기관 / 한국과학기술원
협동연구기관 /국토교통부
(전문기관) 한국과학기술원

제 출 문

국토교통과학기술진흥원장 귀하

‘구조물의 내진성능향상을 위한 MR 엘라스토머 기반 스마트 기초격리시스템 개발’(연구개발 기간 : 2017.04.01. ~ 2018.12.31) 과제의 최종보고서를 제출합니다.

2019.03.29.

주관연구기관명 : 한국과학기술원 (대표자) 신성철 (인)
협동연구기관명 : (대표자) (인)
참여기관명 : (대표자) (인)

주관연구기관책임자: 정형조
협동연구기관책임자:
참여기관책임자:

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	18CTAP-C129 736-02	해당 단계 연구 기간	2018.01.01. ~ 2018.12.31	단계구분	2/2 (해당단계)/ (총단계)
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명	기초원천			
연구과제명	대과제명	-			
	세부과제명	구조물의 내진성능향상을 위한 MR 엘라스토머 기반 스마트 기초격리시스템 개발			
연구책임자	정형조	해당단계 참여연구원 수	총: 4명 내부: 4명 외부: 명	해당단계 연구비	정부:122,000천원 민간: 천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계: 천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 10명 내부: 10명 외부: 명	총 연구비	정부:250,000천원 민간: 천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계: 천원
연구기관명 및 소속 부서명	한국과학기술원 건설 및 환경공학과			참여기업명	
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위탁연구	연구기관명:			연구책임자:	

※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음

연구개발성과의 보안등급 및 사유	
-------------------------	--

9대 성과 등록·기탁번호

구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설 · 장비	기술요약 정보	소프트 웨어	화합물	생명자원		신품종	
								생명 정보	생물 자원	정보	실물
등록·기 탁 번호	4	1									

국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

구입기관	연구시설 · 장비명	규격 (모델명)	수량	구입연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	NTIS 등록번호

토목/건축 면진장치를 위한 MR 엘라스토머 최적 철 입자 부피비 산정
첨가제(카본블랙, 나프텐오일)을 이용한 최적 배합비 산정
새로운 형태의 스마트 기초격리장치 설계 및 제작
최대 100% 변형률을 고려한 스마트 기초격리장치의 동적 특성시험 수행
스마트 기초격리장치를 이용한 면진성능 평가 수행

보고서 면수 61

〈 요약 문 〉

연구의 목적 및 내용	▪ 최종목표: 토목 및 건축 구조물에 적합한 MR 엘라스토머 기반 스마트 기초격리 장치를 개발하고 성능 평가 수행 ▪ MR 엘라스토머 기반 스마트 기초격리 장치의 개발 및 통합 설계 - 면진 성능 향상을 위한 MR 엘라스토머 최적 배합비 산정 및 재료 특성 모델링 도출 - MR 엘라스토머 면진 성능 향상을 위한 전자기 시스템 설계 - 스마트 면진 장치의 통합 설계 ▪ 스마트 면진장치 제작 및 성능 평가 수행 - 스마트 기초격리장치 통합 설계 기반 스마트 면진장치 제작 - 진동대를 활용한 실험실 환경에서의 동적 특성 평가 수행 - Passive/semi-active 제어를 통한 면진 성능 평가 수행 - 반복 실험을 통한 MR 효과 비교 (내구성 평가)				
연구개발성과	▪ MR 엘라스토머 제작에 필요한 자성입자, 고무(Matrix)의 비율에 따른 최대 MR 효과를 비교/분석 ▪ MR 효과를 높이기 위한 방법으로 첨가제의 비율에 따른 MR 효과를 비교하여 최적 배합비를 산정 ▪ MR 엘라스토머 제작 방법에 따른 등방성/이방성 MRE에 대한 MR 효과 비교/분석 ▪ 기존의 면진장치에서 발생하였던 한계를 극복할 수 있는 새로운 형태의 스마트 기초격리장치를 개발 및 제작 ▪ 제작된 스마트 기초격리장치를 활용하여 동적특성시험을 수행하고 면진성능 평가를 통해 passive 제어 대비 semi-active 제어를 통한 면진성능의 우수성을 파악				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	▪ 새로운 형태의 스마트 기초격리시스템 구축을 통한 설계기술 가능성 부여 ▪ 기존의 연구에서 발생하였던 한계점을 보완하는 형태로 스마트 기초격리시스템을 제안하고 면진성능을 평가함으로써 산업체에서 활용 가능성 증가 ▪ 면진장치를 적용하면 면진층에 설치된 면진장치가 지진 에너지를 흡수하기 때문에 상부구조의 주요 부재 단면을 줄일 수 있어서 경제적 측면에서 유리 ▪ 면진 시스템은 기존 건물의 내진보강기법으로도 폭넓게 활용 가능함으로써 리모델링과 관련된 산업의 활성화 및 건물 장수명화에 의한 문제 등을 선진화 할 수 있음				
핵심어 (5개 이내)	MR 엘라스토머	MR 효과	스마트 기초격리장치	면진	반응동 제어

〈 SUMMARY 〉

Purpose & Contents	▪ Purpose: Developed MR elastomer-based smart foundation isolation device for civil structures and performance evaluation ▪ Development and design of MR elastomer-based smart foundation isolator – Estimation of optimum mixing ratio and modeling of material properties to improve seismic performance – Electromagnetic system design for improving MR elastomer seismic performance – Integrated design of smart base isolator ▪ Fabrication and performance evaluation of smart base isolation device – Fabrication of smart base isolation system based on integrated design – Dynamic characteristic test using shaking table – Performance evaluation in laboratory environment with passive/semi-active control – Comparison of MR effect through repeated experiment (durability evaluation)				
Results	▪ Comparison / analysis of the maximum MR effect according to the ratio of magnetic particles and rubber required for MR elastomer fabrication ▪ Estimation of optimum mixing ratio using additives to improve the MR effect ▪ Comparison and analysis of MR effect on isotropic/anisotropic MR elastomer ▪ Development and fabrication a new smart base isolation device that can overcome the limitations of existing isolation devices ▪ Performance dynamic characteristic test and performance evaluation through semi-active control				
Expected Contribution	▪ Possibility of designing technology by building new type of smart foundation isolation system ▪ Propose a new type of smart base isolation to overcome the limitations of existing base isolation and increased availability in industry ▪ Economical benefits for possibility to reduce the cross section of the main member of the superstructure by absorbing the earthquake energy through base isolation device ▪ Advancement of promotion of remodeling-related industries and problems of structural aging by widely utilizing the base isolation system in seismic retrofit of existing structures				
Keywords	MR elastomer	MR effect	Smart base isolation	Seismic isolation	Semi-active control

< CONTENTS >

1. INTRODUCTION	1
2. BACKGROUND INFORMATION	9
3. RESEARCH PROGRAM	20
4. CONTRIBUTION OF PROJECT IN RESEARCH AREA	48
5. APPLICATIONS	50
6. INTERNATIONAL LITERATURE REVIEW	51
7. SECURITY OF RESEARCH OUTCOMES	52
8. REGISTERED FACILITIES AND EQUIPMENT	53
9. LABORATORY SAFETY	64
10. MAIN OBJECTIVES	56
11. FUTURE WORKS	57
12. REFERENCES	60

< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요	1
2. 국내외 기술 개발 현황	9
3. 연구수행내용 및 성과	20
4. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	48
5. 연구개발성과의 활용 계획	50
6. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보	51
7. 연구개발성과의 보안등급	52
8. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황	53
9. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적	54
10. 연구개발과제의 대표적 연구 실적	58
11. 기타 사항	59
12. 참고 문헌	60

제1장. 연구개발과제의 개요

1 연구개발 목적

▪ 최종목표

- 토목 및 건축 구조물에 적합한 MR 엘라스토머 기반 스마트 기초격리장치 개발 및 성능평가 수행

▪ 단계별 연구개발 목표 및 결과

	세부 과제명	세부 연구 목표	연구개발 수행 내용	연구 결과
1차년도	MR 엘라스토머 기반 스마트 기초격리 장치의 개발 및 통합설계, 제작	면진 성능 향상을 위한 MRE 최적 배합비 산정 및 재료 특성 모델링 도출	• 다양한 철 부피비율과 배열상태에 따른 MRE 샘플 제작, 시험 • 첨가제(카본블랙, 나프텐 오일)를 다양한 배합비로 첨가한 MRE 샘플 제작, 시험	• 철 비율 35% 샘플의 50%의 변형률에서 63.4%의 MR 효과, 100% 변형률에서 22.0%의 MR 효과로 가장 높은 효과를 나타냄. • 카본블랙을 60phr, 나프텐 오일을 40phr 배합한 C60N40 샘플이 가장 높은 MR 효과를 나타냄 (변형률 25% : 127.4% / 변형률 100% : 33.5%).
		MRE 면진 성능 향상을 위한 전자기 시스템 설계	• MRE가 자기적 포화가 이루어지는 0.9 Tesla 부근의 수준 자속밀도를 달성하고, MRE의 거동을 방해하지 않으며 현실적으로 시공이 가능한 형상의 전자기 시스템 설계	• 사전 조사한 MRE의 자성을 바탕으로 그에 요구되는 자기장을 달성할 수 있는 시스템을 설계, 제작함. • 수치 해석(FEMM)을 통해 MRE 부에서 0.9 Tesla를 달성할 수 있는 폐회로 전자석 시스템 설계 • 실제 시스템 제작 후 측정결과목표 요구성능 (전자석 코일 표면 자기장 0.35 Tesla) 이상을 달성 (측정시 표면 자기장 : 0.56 Tesla (110V, 5A) 달성)
		스마트 기초격리장치의 통합 설계	• 전자석 시스템의 시공공간을 고려하면서도 압축하중으로부터 자유로운 형상의 시스템 설계	• 슬라이더(수평 1,2축)은 구조물의 하중을 재하받으면서 수평방향으로는 부드럽게 이동하여 MRE의 수평강성 제어성능에 영향을 최소화 함. • MRE를 작은 부분으로 분할하고, 시공상 여유공간에 배치하여 시공 현실성이 있는 복합형 장치로 설계함.
		통합 설계를 기반으로 한 스마트 기초격리장치 제작(~2차년도)	• 면진장치의 성능을 평가하기 위해 지진 진동 가진이 가능한 진동테이블에 결합할 수 있는 시제품 제작	• 진동테이블에 시제품과 로드셀(500kgf)을 설치하여 특성 실험 및 내진성능평가시스템 조성.

2차년도	스마트 기초격리 장치 제작 및 성능평가 수행	통합 설계를 기반으로 한 스마트 기초격리장치 제작	• 면진장치의 성능을 평가하기 위해 지진 진동 가진이 가능한 진동테이블에 결합할 수 있는 시제품 제작	• 진동테이블에 시제품과 로드 셀(500kgf)을 설치하여 특성 실험 및 내진성능평가시스템 조성. • 크기: 40cm X 36cm X 22cm • 구성: MR 엘라스토머(4개, Φ 4cm X 2cm), 전자석 폐회로(2개), 롤러 슬라이더
		스마트 기초격리장치를 이용한 동적특성 시험 및 면진성능평가 수행	• 면진장치의 동적특성 시험을 통해 넓은 범위의 변형률에 대한 MR 효과 계산 • 비면진 시스템 대비 면진 시스템 감쇠 성능 평가 비교 • MR 엘라스토머 재료 특성을 이용하기 위한 passive/ semi-active 제어에 따른 구조물 응답 저감 비교	• 다양한 변형률 및 주파수에 대한 동적특성시험을 통해 MR 효과 및 감쇠비 변화에 대한 결과를 산출. • 비면진/면진 시스템에 대한 감쇠성능 비교 수행(비면진 시스템 대비 면진 시스템 453% 감쇠성능 향상) • 대표지진하중에 대한 passive /semi-active 제어를 통해 2층 가속도 응답, 2층-base층 최대 상대변위에 대한 응답 저감을 확인함(최대가속도응답 저감 비율 - Hachinohe 지진 시 48.01%, 최대상대변위 응답 저감 비율 - Hachinohe 지진 866.09% 달성, 최대 변위 Base층 저감 비율: Hachinohe 지진 42.84% 저감))
		스마트 기초격리장치를 이용한 내구성 평가	• 발열 문제 해결을 위한 개선된 전자석 시스템 및 동적 특성시험 수행 • 다양한 조건(변형률/주파수)에 대해서 반복실험을 통한 고무 파단 파악 • 외부 환경 노출 시 부식 등의 문제 해결 방안 마련	• 발열 문제 해결을 위한 개선된 전자석 시스템(코일 지름(mm): 0.8 → 2.0 / 저항(Ω): 22 → 3.2) • 개선된 전자석 시스템 기반 동적 특성시험 수행 및 기존 특성시험 결과와 비교 (변형률 100%: 기존 시스템 - 14.8% / 개선된 전자석 시스템 - 22.6% MR 효과) • 1시간 30분의 반복시험 수행 중 고무 파단 발생 (변형률 5, 12.5, 25, 50, 75, 100, 150%) • 전문가 자문을 통한 외부 환경 노출 시의 문제 해결 방안 제시

2. 연구개발의 필요성

■ 연구 배경

- 2016년 9월 경주에 국내 지진관측 이래 가장 큰 규모 5.8의 지진이 발생하고 400여 차례의 여진이 발생하면서 우리나라가 더 이상 지진으로부터 안전지대가 아니라는 확신과 동시에 지진 대비의 필요성이 강조되고 있음.
- 일부 지진 전문가들은 규모 8.3 지진의 발생 가능성을 제기하면서 국내 교량 및 빌딩과 같은 대형 구조물의 내진 성능에 대한 재검토가 요구되었음.

경북 경주 지진 진도분포 및 피해 상황



그림 1.1 경주 지진 현황

Freq. Spectrum

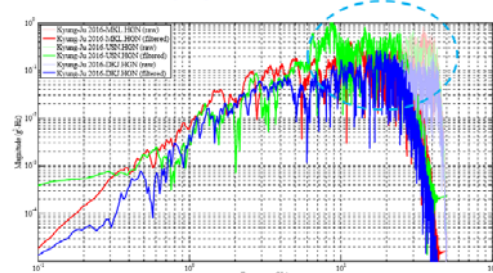


그림 1.2 경주 지진의 스펙트럼

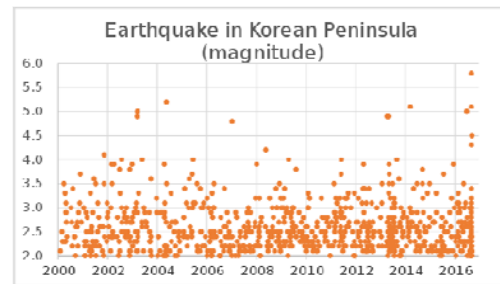


그림 1.3 국내 지진 통계



그림 1.4 경주 지진 피해 사례

- 지진공학회 발표에 따르면 경주지진의 특징은 강한 진동의 지속시간이 약 3초로 비교적 짧은 편이었고 주파수가 그림 1.2와 같이 10Hz 이상으로 높은 편이었음. 즉, 최고가속도는 매우 높았지만 (0.35g, 울산관측소) 지속시간이 짧았고 1초에 10번 이상 흔들리는 지진임. 따라서 공진 주파수가 낮은 고층건물보다 1층 이하의 낮은 건물이나 기와 및 벽돌담과 같은 비구조 부재의 피해가 컸음을 확인할 수 있음.
- 그림 1.5 같이 일반적으로 지진 강도와 실제적인 피해는 반드시 비례하지는 않으며 어떻게 지진에 대비하느냐에 따라 피해의 정도가 크게 달라질 수 있음. 수십 초에서 수분 정도의 비교적 짧은 시간 동안에 엄청난 에너지를 분출하여 지표면을 흔드는 자연 현상인 지진을 역학적인 관점에서 살펴보면, 지진 하중은 시간에 따라서 크기가 변하는 동적 하중으로 고려할 수 있으며 이로 인해 교량이나 건물과 같은 대형 구조물에 과도한 진동이 발생하게 되고 심한 경우에는 구조물의 안전성에 영향을 미치는 파손 및 붕괴를 야기함.

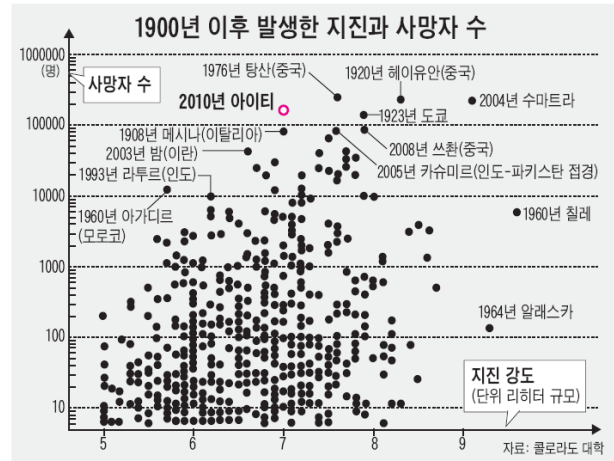
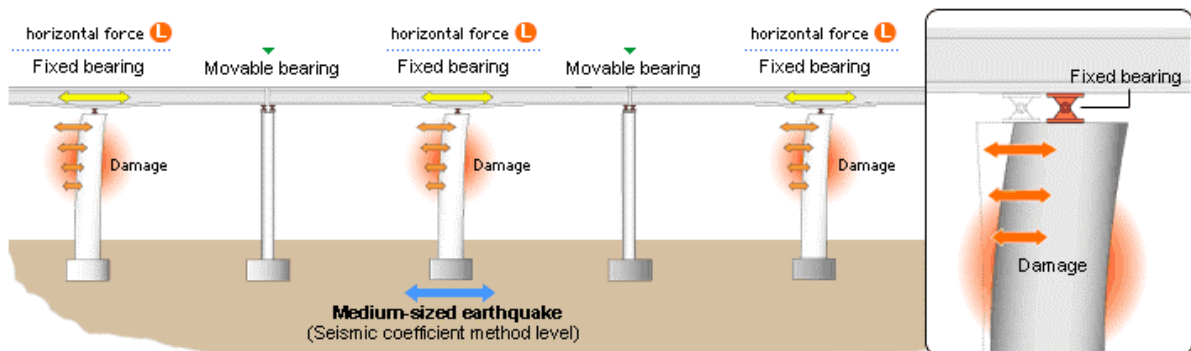
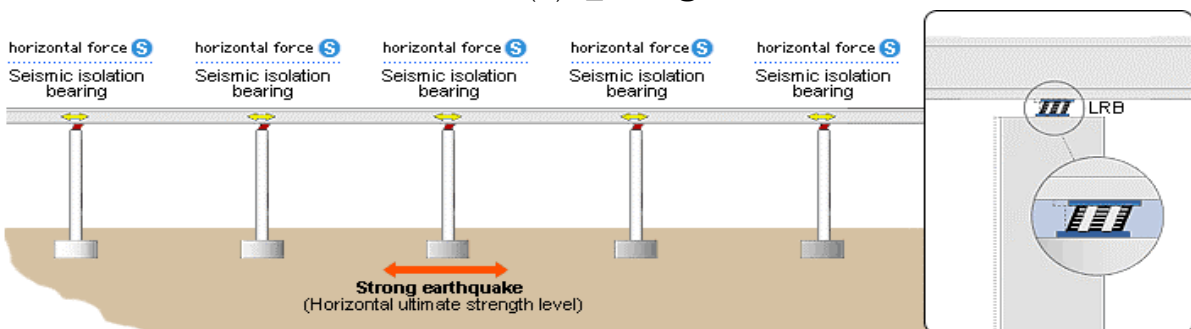


그림 1.5 지진의 크기와 인명 피해의 관계

- 일반적으로 구조물의 내진대책은 강도증가와 연성증가 두 가지 방법으로 분류할 수 있으며, 강도 증가에 의한 내진설계는 구조부재의 크기를 키우거나 부재 개수를 증가시키는 방식으로 지나치게 큰 부재의 사용으로 비경제적이고, 구조물의 갑작스러운 취성 파괴 양상에 의해 큰 인명피해를 유발할 수 있다는 단점을 지니고 있음. 연성증가에 의한 내진설계는 구조부재의 소성변형에 의해 지진에너지 흡수함으로써 지진하중의 크기를 효과적으로 줄일 수 있도록 하는 방법이지만 지진 발생 후 보수보강이 어렵고 비용이 많이 드는 단점을 지니고 있음.
- 최근에는 이러한 내진 설계의 한계를 극복하고 내진성능을 향상시키기 위해 구조물에 유입되는 진동 에너지를 부가적인 장치를 이용하여 흡수하는 기초격리장치 (Base Isolator)를 이용하려는 연구가 진행되고 있음. 지진파에서도 주기가 짧은 1초 이하의 진동이 가장 강하여 구조물에 주는 피해가 크기 때문에 지진의 진동 주기와 구조물의 고유주기가 일치할 때 공진현상으로 인해 구조물은 심한 진동과 큰 피해를 입게 됨. 따라서 구조물의 고유주기를 길게 함으로써 (Period Shift) 지진의 진동이 강한 영역을 피하여 지진 하중을 저감시키는 방법이 연구되고 있음. 여기에 감쇠 성능을 추가하여 입력하중을 줄여줄 수 있으며, 대표적인 기초격리장치로는 납면진받침 (LRB)이 있음.



(a) 일반 교량



(b) 기초격리 교량

그림 1.6 기초격리 교량의 개념도

■ 연구의 필요성

- 기존의 기초격리장치는 개념이 간단하고 안정성이 보장되며 유지관리가 용이한 장점이 있지만, 기초격리장치와 구조물로 구성된 구조계의 고유주기를 증가시켜 구조물의 상대변위 응답을 증가시키기 때문에 사용성 및 설계 단계에서 불리함을 초래함. 또한 강한 비선형성을 보이는 동적 특성으로 인해 지진과 같은 광범위한 주파수 대역을 가지는 입력지반운동에 대해서는 적절하지 않음.
- 특히, 특정 위험한 주파수 대역을 피하는 수동제어 방식으로 지진하중의 특성에 대한 적응성이 부족하고 제진성능의 한계가 있다는 단점이 있으며, 기초격리장치에서 과도한 변위가 발생하는 등의 문제점이 있음.
- 수동제어의 단점에 대한 대책으로 능동제어 장치를 사용하는 방법이 제시되었지만 이를 위해 대용량의 외부전력을 필요로 하며, 능동제어기에 의한 구조물의 안정성 확보 및 정기적인 유지관리의 어려움과 같은 문제점이 있어 실제 대형 구조물에 설치하는데 어려움이 있음.
- 따라서, 1990년대 이후 반능동제어 시스템이 제안되었음. 반능동제어 장치는 능동제어와 비슷한 성능을 발휘하면서 상대적으로 적은 외부전력만으로도 구동이 가능함. 또한 구조물에 직접 제어력을 가하는 것이 아니라 외부 하중을 소산시키는 형태이기 때문에 지진하중에 대한 적응성 및 구조물의 안정성 확보가 가능함.
- 초기의 반능동제어 시스템은 MR 유체 (Magneto-rheological Fluid)를 이용하였으나 침전, MR 유체의 누출, 입자 잔류물에 의한 감쇠 성능의 저하에 대한 문제점이 있었으며 이에 대한 대책으로 고체 형태의 MR 엘라스토머 (MR Elastomer, MRE)를 활용한 새로운 방식의 반능동 기초격리장치가 제안되었음. MRE는 실리콘 재료나 천연 고무와 같은 폴리머 재료 안에 체인 형태로 극성화 할 수 있는 자성입자를 내포하여 자기장에 의해 성질을 변화시킬 수 있는 스마트 재료임. MR 유체의 경우 자기장의 변화에 의해 점성이 변하는 반면, MRE는 강성이 변하는 특징을 가지고 있음. 그림 1.7은 MRE의 강성 변화 특성을 간략하게 나타내고 있으며, 전자석 등을 이용해 MRE에 자기장을 가해줌으로써 강성을 변화시킴.
- 본 연구진은 스마트 재료인 MRE를 기초격리장치로 활용하기 위해 타당성 연구를 수행하여 제어 성능을 확인하였음. 이후 다수의 연구자가 토목·건축 분야에서 기초격리장치로 활용하기 위한 개념적인 연구가 진행되었지만 실제 구조물에 적용하기는 한계가 있으며 추가적인 많은 연구가 필요함.
- 본 연구에서는 MRE의 감쇠 특성에 대한 선행연구를 기반으로 MRE 기반 기초격리장치를 실제 구조물에 적용시킬 수 있는 시스템으로 구성하기 위한 기초원천연구로 연구 결과물은 다양한 형태로 활용할 수 있음.

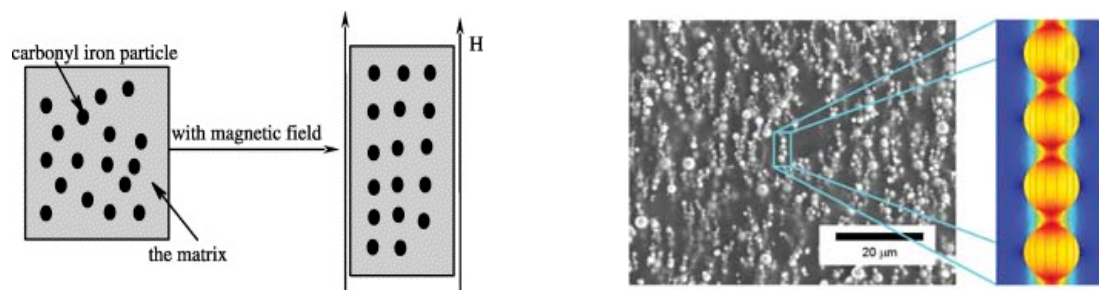


그림 1.7 MRE의 강성 변화 특성

	문제점	극복방안
제어 성능	기존 기초제어격리장치는 수동제어로 지진하중에 대한 적응성이 부족하고, 능동제어는 대용량의 외부 전력원을 필요로 함	반능동제어 시스템을 적용함으로써 능동제어의 성능을 유지하면서 적은 외부 전력원을 사용함
MRE 기반 기초격리장치에 대한 연구	자기장 세기의 한계로 인해 제어성능의 한계가 있으며, MRE를 활용할 경우 대형 전자석이 필요하기 때문에 부피가 커지는 단점이 있음	자석의 배열 및 코어(Core)등을 활용해 기존 자석 대비 2~3배의 자기장의 크기를 높일 수 있어 부피가 상대적으로 줄어들며, 높은 제어 성능을 나타냄
구조적 안정성	기초격리장치는 지진발생시 과도한 변위가 발생할 수 있으며, 능동제어시스템은 구조물에 직접 제어력을 가하기 때문에 위험요소가 있음	MRE를 이용하여 진동에너지를 소산 시키는 형태이기 때문에 지진하중에 대한 적응성 및 구조물의 안정성 확보가 가능함.

3 연구개발 범위

구분(연도)	연구범위	연구개발 수행 내용
1차년도 (2017.04~ 2017.12)	면진성능 향상을 위한 MR 엘라스토머 최적 배합비 산정 및 재료 특성 모델링 도출	① 재료 선택 - 모재: 천연고무(SVR CV60, Hung Thinh, 베트남) · 실리콘 고무에 비해 기계적 물성이 뛰어나고 부착성이 좋음 - 자성입자: ASC300(Hoganas, 스웨덴) · Lokander 등에 의해 입자 크기 60 μm 이하의 크기분포를 가지고, · 불규칙한 형상을 한 회가내스 사의 ASC300이 가장 MR 효과가 높다고 관찰 - 첨가제: 카본블랙(N550), 나프텐 오일 · 카본블랙은 천연고무의 기계적 물성을 높이고 MR 효과를 증대시키는 것으로 알려져 있고, 나프텐 오일은 고무의 강성 강도를 조절하는 역할을 함 ② 샘플 제작 - 혼합, 압출, 성형, 건조 순으로 진행 · 1단계: 철 분말 부피비(0, 15, 25, 30, 35%) 샘플 제작 후 비교시험 · 2단계: 최대 MR 효과 철 부피비(35%) + 다양한 배합비의 첨가제 추가 - 등방성/이방성 MR 엘라스토머 제작 ③ 미세구조 관찰 - 전자현미경(SEM; SU8230, Hitachi, 일본) 이미지를 촬영하여 관찰 · 철 입자의 밀집도 및 배열 비교 ④ 자화곡선 도출 - 진동시료 자화율측정기(MPM3S-Evercool, Quantum Design, 미국)를 통해 자기적 포화가 이루어지는 자화곡선을 조사 · 철 입자의 투입대비 자화 곡선 비교 ⑤ 동적 전단시험 / 히스테리시스 곡선 관찰 - 자기장을 가할 수 있는 실험 지그 설계 및 제작 · 수치해석을 통한 자속밀도(0.9Tesla) 달성여부 확인 - 동적재료시험기를 통해 자기장 여부에 따른 MR 효과 비교

		· 1단계: 철 부피비(0, 15, 25, 30, 35%) 샘플 비교 시험 (변형률 50, 100%) · 2단계: 다양한 첨가제 배합비의 샘플 비교 시험 (변형률 25~100%, 0.5~2.0Hz) - 등방성/이방성 MR 엘라스토머에 대한 MR 효과 비교 (변형률 100%): 차이가 미미함을 확인함 · 등방성 MR 엘라스토머: 19.4% · 이방성 MR 엘라스토머: 22.0%
	MR 엘라스토머 면진 성능 향상을 위한 전자기 시스템 설계	① MR 엘라스토머 자화곡선 확인 - 9,000 에르스텝 (공기 중에서 0.9Tesla)에서 자기적 포화 현상 관찰 ② 전자기 수치 해석(Finite Element Method Magnetics; FEMM) - 전자석 코일, 자성물질(철), MR 엘라스토머를 포함하여 자기 폐회로를 구성(0.9Tesla 확인) ③ 전자석 시스템 설계 - 비현실적인 전자석 시스템의 크기를 줄이기 위해 다수의 MR 엘라스토머들로 분할 - MR 엘라스토머의 직렬 방향에 회로를 구성하여 면진장치의 거동에 제한이 없는 형상 설계 ④ 전자석 시스템 제작 및 측정 - 가우스미터를 통해 전자석 코일의 표면과 MR 엘라스토머 측면을 측정 · 수치해석상 전자석 코일 요구 성능 해석 : 코일 표면 자기장 - 0.35T, MR 엘라스토머 측면 - 0.45T · 가우스미터 측정결과 : 코일 표면 자기장 - 0.56T, MR 엘라스토머 측면 - 0.49T
	스마트 기초격리장치의 통합 설계	① 개념 - 롤러 슬라이딩식 받침(Isolation Roller Bearing; IRB)과 MR 엘라스토머 면진장치를 결합하여 구조물의 하중을 MR 엘라스토머가 재하 받지 않는 개념 제시 - IRB가 수직하중을 지지함으로써 MRE의 수평강성 제어 성능의 영향이 극대화 - 기존 IRB 시공시 생기던 여유 공간을 활용하여 기존 MR 엘라스토머 면진장치에서는 설치하기 난해하였던 자기시스템을 현실성 있게 배치 - 기존 MR 엘라스토머를 둘러싸는 전자석의 형상에 비하여 직렬로 회로를 구성하여 MR 엘라스토머의 거동을 자유롭게 배치 ② CAD 도면 설계 - 진동 테이블 시험용 소형 사이즈 설계
	통합 설계를 기반으로 한 스마트 기초격리장치 제작	① 개념 - 진동테이블(1축)의 크기와 사양을 고려한 규모로 시제품 제작 · 크기: 40cm X 36cm X 22cm · MRE: Φ4cm X 2cm

		· 구성부: MR 엘라스토머(4개), 전자석 폐회로(2개), 1축 롤러 슬라이더 - 진동테이블에 로드셀(500kg)을 설치하여 거동특성 평가시스템 조성 · 진동대 크기: 110cm X 96cm / 최대가속도: 0.4g / 최대 속도: 21cm/s ② 시제품 성능평가 시행 - 충분한 변위(변형률 100%) 거동여부 확인 - 전류 인가간 MR 효과 관찰 ③ 시제품의 성능 저하요인 발견 - 발열문제로 인한 장기간 실험 불가 - 2차년도에는 개선된 전자석 시스템을 통한 연구 수행
2차년도 (2018.01~ 2018.12)	스마트 기초격리장치를 이용한 동적특성 시험 및 면진성능평가 수행	① 전자석 시스템의 개선 - 기존의 전자석 시스템의 발열문제를 해결 · 코일 지름 변화: 0.8 → 22.0mm · 저항 감소: 22.0 → 3.2Ω ② 면진장치의 동적특성시험 수행 - 강성(MR 효과) 및 감쇠비 변화 분석 수행 · 변형률 변화에 따른 MR 효과 파악 · 주파수 변화에 따른 감쇠성능 파악 ③ 비면진/면진 시스템 감쇠성능 비교 ④ 면진성능 평가 수행 - 대표지진하중에 대한 면진성능 평가 수행 · 대표지진하중: El Centro, Hachinohe, Loma Prieta, Kobe, and Northridge 지진 - 하이브리드 시뮬레이션 기반으로 성능 평가 수행 · 2층 건물에 대한 면진성능 평가 · 2층 최대 가속도 응답, 2층-base 최대 변위차 응답 비교, Base층 최대 변위 응답 ⑤ Passive/Semi-active 제어 기반 성능 비교 - MR 엘라스토머의 재료 특성을 살리기 위해 semi-active 제어를 통해 제안된 스마트 기초격리시스템의 성능평가를 수행 - 기존의 passive 제어에 대한 구조물의 응답과 semi-active 제어를 통한 구조물의 응답을 비교/분석
	스마트 기초격리장치를 이용한 내구성 개선 및 평가	③ 스마트 기초격리시스템의 내구성 평가 - 구축된 전자석 시스템의 발열 문제 해결 (전문가 자문 후 전자석 시스템 교체) · 동일한 자속밀도 (0.9T)를 유지하면서 발열 문제 해결을 위해 코일 두께 및 저항 변경 - MR 엘라스토머 외부환경 노출 관련 내구성 평가 (전문가 자문: 고무 외부에 코팅 처리하여 외부환경 노출 관련 내구성 강화) - 일정한 주기에 대한 반복하중 실험을 통한 고무 파단 파악

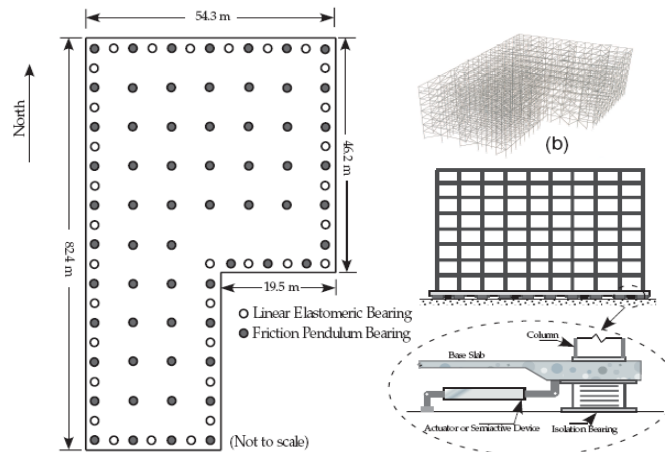
제2장. 국내외 기술 개발 현황

2.1 국내 현황

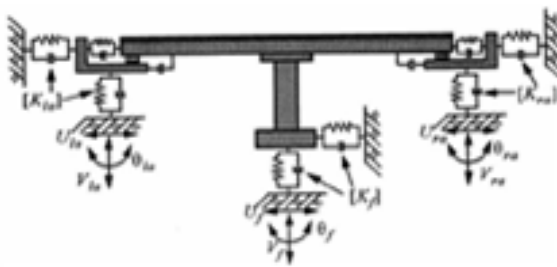
- 기초격리장치는 면진의 개념을 사용한 방법으로 장치의 제작에 필요한 원재료인 강재와 고무, 납 등의 품질기준은 국내 KS규격에 규정되어 있으나 이들 원재료의 품질기준은 기초격리장치의 제작에 사용되는 것이 아니라 재료에 대한 규정이며 시작품의 형상치수에 대한 검사기준은 국내에는 존재하지 않음.
- 장치의 강성과 감쇠 성능과 같은 성능을 검증할 기준과 그에 따른 시험방법 등도 국내에는 마련되어 있지 않으며 국내에 적용된 면진장치는 국내에서 개발한 장치가 아닌 일본의 관련 업체가 보유한 특허 기술을 가져와 사용하고 있음. 또한 면진구조설계기법이 국내에 정립되지 않기 때문에 일본의 면진 구조설계기술을 그대로 이용하고 있어 기술에 대한 국산화가 시급함.
- 한국과학기술원에서는 2000년대부터 MR유체를 포함한 다양한 재료의 성질을 고려하여 다양한 면진장치를 이용한 교량 및 건축 구조물의 내진성능 향상 기술에 대한 수치 해석적, 실험적 연구를 수행하고 이와 동시에 지반-구조물 상호 작용에 대한 수치 해석적 연구도 다년간에 걸쳐서 수행.



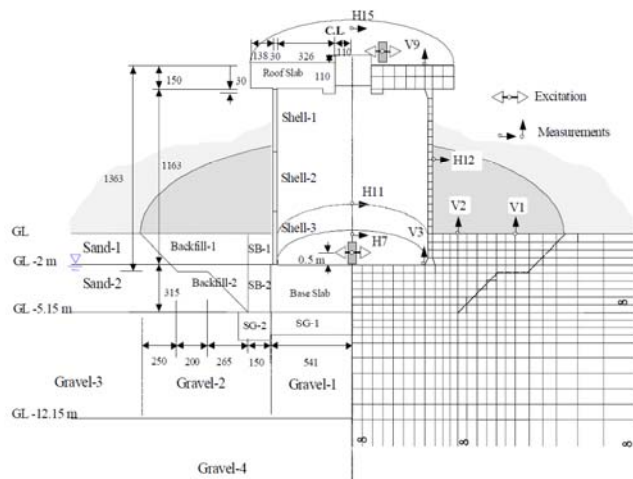
(a) 축소 면진 교량 진동대 실험



(b) 스마트 면진장치를 설치한 건물 수치해석



(c) 스마트 면진장치를 설치한 교량 수치해석



(d) 원전 격납건물에 대한 지반-구조물 상호작용

그림 2.1 기초격리장치 관련 연구 사례 (한국과학기술원)

- 토목구조물에 MRE를 활용한 기초격리장치 개발과 관련한 연구는 국내에서는 비교적 진행되지 않았으며 한국과학기술원에서 이를 적용하기 위한 타당성 평가에 대한 연구를 수행하였음. 기초격리장치에 대한 국내 연구 동향은 다음과 같음.

표 2.1 기초격리 장치에 대한 국내 연구 동향

한국과학기술원 (윤정방 교수)	- 기초격리된 구조물의 내진성능평가를 위한 실험기법
한국과학기술원 (정형조 교수)	- MRE를 이용한 면진시스템의 내진성능 검증 - 수치해석과 실험을 통해 활용 가능성 검증
동국대학교 (허석 교수)	- MRE를 이용한 반능동형 댐퍼의 기초성능 실험 - 토목 구조물을 대상으로 진행한 연구는 아님
한양대학교 (황인호)	- 자기 민감 고무를 이용한 구조물의 면진성능 연구 - 국내에서 처음으로 MRE를 토목구조물에 적용하고자 함
건국대학교 (하동호)	- 마찰형 지진격리 장치의 개발 및 적용에 대한 연구
대전대학교 (허윤)	- 원자력발전소 LRB 면진 시스템의 진동대실험 및 동적 해석 연구
(주)대우건설 기술연구소	- 건물하부에 면진베어링 장치를 설치하여 해석적으로 그 효율성을 분석한 연구 - 단순 철골조 건물에 국한
한국원자력연구원	- 액체 금속로 면진시스템 설계에 대한 연구를 수행 - 원전 사용 후 핵연료 저장조, 소형기기, 진동기기 등 부분면진에 대한 연구

2.2 국외 현황

1. MR 엘라스토머 관련 연구 및 개발 동향

- MR 엘라스토머를 활용한 연구는 해외에서 먼저 시작되었음. MR 효과는 1940년대에 Rabinow에 의해 최초로 발견되었음에도 불구하고, 그 후로 40여년이 지난 1985년이 되어서야 Rigbi와 Jilken에 의해 최초로 자기반응 엘라스토머에 대한 선구적인 연구가 이루어졌다고 알려져 있음. 당시에 MR 효과를 의료와 측정 기기들에 적용하였으나 만족할 만한 성과를 얻지는 못했다고 보고됨. 그 후로 십여년이 지난 후 Shiga 등은 전기장 적용시 실리콘 엘라스토머와 반도체 입자들을 기반으로 한 중합체의 전기점성 효과를 보고한 바 있음.
- MR 엘라스토머에 대한 최초의 포괄적인 연구는 1996년 Jolly 등에 의해 수행됨. 보고된 연구에 따르면, MR 엘라스토머 내부의 분자 변화를 규명하기 위해 준정적 2극성 모델이 개발되었음. 자기장 하에서 폴리머기지의 철 입자들을 포함한 엘라스토머의 재료 속성을 평가하기 위해 실험적 연구가 수행되었음. 이후로 MR 엘라스토머에 대한 연구가 본격적으로 주목을 받기 시작했으며, 신형 연구 주제로 부상되었음.
- Ginder 등에 의해 수행된 선행 연구에 따르면, 동조진동감쇠기 개발에 MR 엘라스토머를 적용하는 방안을 제안하였음. 이후 MR 엘라스토머에 대한 연구는 재료에 대한 실증 모델링, 재료 개발 및 물성치 시험, 새로운 기기 설계 및 정의, 성능 평가, 항공, 기계, 자동차 및 토목공학 분야에의 적용을 목표로 하여 괄목할만한 수준으로 활발히 진행되었다고 평가받고 있음.
- 일반적으로 MR 엘라스토머는 독특한 거동 속성과 큰 규모의 분자 변화, MR 유체에 비해 빠른 응답 시간, 안정성, 기기 요소들과의 호환성과 합리적으로 적은 전력 소요 등, 내재된 재료 속성에 기인한 진동 및 소음 저감, 그리고 면진 분야에의 기여 가능성으로 인해 능동 및 준능동 진동 제어 분야에 있어서의 잠재된 가능성이 모두 폭넓은 주목을 받고 있음.
- 특히, 넓은 범위의 적용 가능한 계수는 MR 유체 기기를 활용한 준능동 댐퍼에 비해 진동 장애 완화에 있어 더 효과적인 방안을 제공함.
- MR 엘라스토머를 응용한 창의적인 기기들은 진동 흡수, 방진 및 면진, 적응형 기초격리 방진, 진동 마운트, 그리고 샌드위치 빔 등 다양하게 보고되었음. 이들 설계들은 다양한 적용성을 목표로 하고 있으며, 차량 시트 진동 서스펜션 등을 예로 할 수 있음.
- MR 엘라스토머 기술에 대한 연구 개발은 초창기에 적용기기에 대한 개발보다 재료 연구를 통한 기술 개발에 더 많은 노력들이 있었음이 보고됨.

2. MR 엘라스토머 기술을 적용한 응용기기 적용 현황

- MR 유체와 MR 엘라스토머의 차이는 다음과 같음;
 - (1) MR 유체 기기는 항복 이후 영역, MR 엘라스토머는 항복 이전 영역에서 거동함.
 - (2) 거동 메커니즘의 차이.
 - (3) MR 유체는 단자유도에서만, MR 엘라스토머는 다자유도에서도 작동함.
- MR 엘라스토머는 자기장 적용시 제어 가능 강성과 감쇠를 통해 진동 흡수, 진동 절연, 기초격리 방진과 샌드위치 빔 등의 스마트 기기 적용에 있어서 유리한 기술이라고 볼 수 있음.

3. 진동 흡수 기기

- 동조 진동 흡수기기(Tuned vibration absorbers, TVAs) 또는 동적 진동 흡수기기(Dynamic vibration absorbers, DVAs)라 일컫는 진동 흡수 기기들은 엔진의 회전 불균형, 모터과 펌프 등에 의해 발생하는 주요 구조물의 진동을 완화시킴.

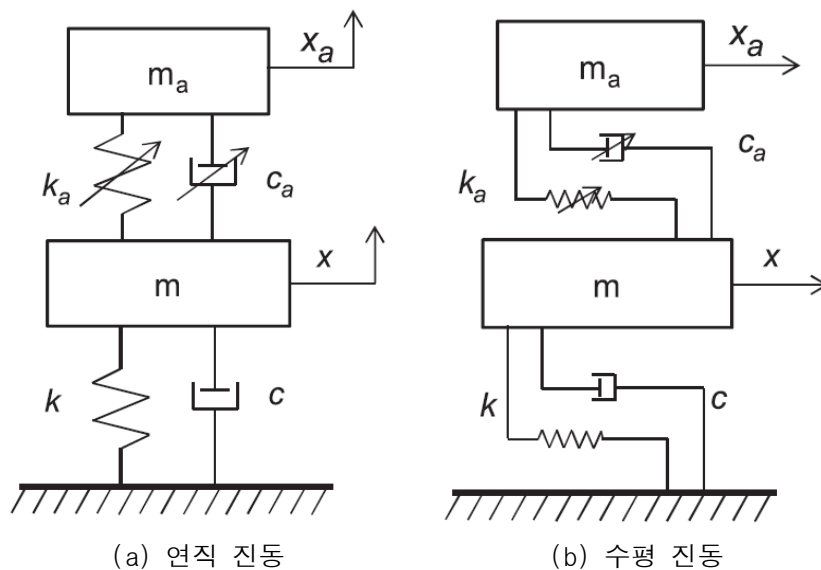


그림 2.2 MR 탄성 중합체를 활용한 동적 진동 흡수 시스템 개념도

(m은 주요 구조물 질량, m_a 는 흡수기 질량)

- 능동 TVAs는 설계에 따라 제한된 범위의 주파수에만 효과적으로 작동함. 설계 주파수 범위 이외의 가진이 발생할 경우, 효과를 상실하거나 오히려 시스템 진동을 증폭키므로 설계된 주파수에 따라 기기를 적용하여야 함
- MR 탄성중합체는 넓은 주파수 영역의 진동 흡수에 사용할 수 있는 상황 적응형 강성 속성으로 인하여 적응 진동 흡수기기(Adaptive vibration absorbers, AVAs) 개발을 가능케 함.
- MR 탄성중합체의 주파수 치환 능력은 TVAs와 적응 동조 진동 흡수기기(Adaptive tuned vibration absorbers, ATVAs), 단자유도 형태의 시스템을 구성함
- Ginder 등은 전단 모드에 적용할 수 있는 최초의 MR 탄성중합체를 개발하고 실험적 연구를 통해 성능을 검증함. MR 탄성중합체 TVA는 저탄소강의 금속부와 장 생성(field generation)과 MR 탄성중합체 샘플을 위한 회전 코일로 구성된 폐쇄 자기 회로로 제작됨. 반응 질량은 연직 거동을 위해 두 샘플 사이에 장착됨. 회전 코일은 추가로 다른 관절에 코일을 추가할 경우, MR 탄성중합체 샘플 내부 자기장 밀도를 다소 강화시키기 때문에 한쪽 관절에만 위치시킴.
- MR 탄성중합체 샘플은 0.8T 자기장하에서 27%의 부피율로 제작됨. 샘플의 크기는 직사각형으로 60mm 이하의 두께를 지님. 전달률에 대한 실험적 검증을 통해, 자속 밀도가 0T에서 0.56T 범위에 있을 때, 시스템의 공진 주파수가 500Hz 부근에서 최대 600Hz까지로 치환됨을 규명함.

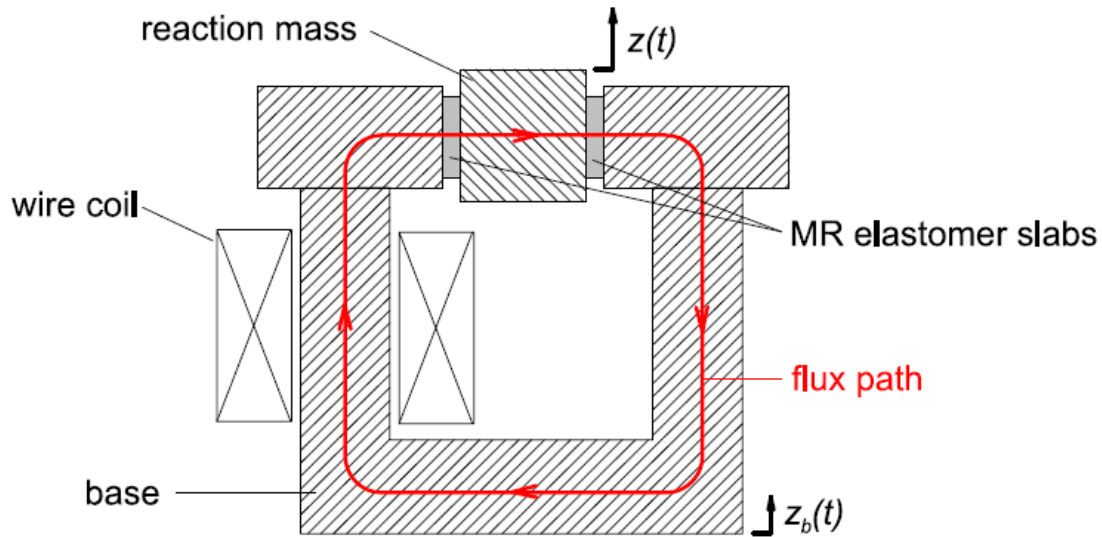


그림 2.3 소형 압착 MR 엘라스토머 흡수기기

- Deng 등은 Ginder 등에 의해 개발된 모델에 자기 경로에 따른 추가 회전 코일을 추가하여 개선된 모델을 제안함. 두 코일의 방향이 자기장을 강화시키는 방향으로 배치됨. 철 입자 질량비 70%의 이방성 MR 엘라스토머가 사용됨. 기기 공진 주파수는 0A의 55Hz에서 1.5A의 81.25Hz로 전류에 의해 제어되며, 147%의 동일한 증가율을 보임. ATVA의 효과는 양단지지 단순보 구조물에 의해 검증되었음.

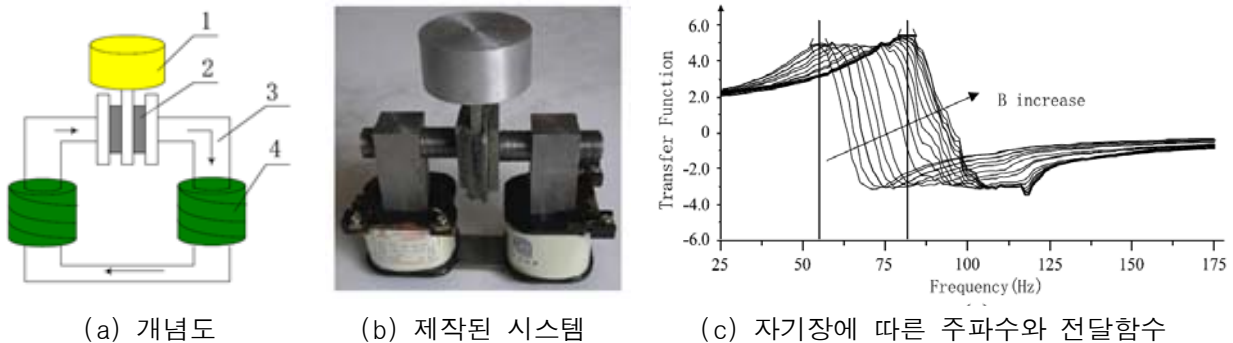


그림 2.4 Deng 등에 의해 제안된 적응 동조 진동 흡수기기와 성능

- 유사 구조를 응용하여 Zhang과 Li 등은 두 개의 3mm 두께를 지닌 이방성 MR 엘라스토머 샘플들을 개발함. 제안된 진동 흡수 기기는 고유진동수를 0A 전류에서 35Hz, 3A 전류에서 90Hz까지 변경시킬 수 있음. 진동 저감 효과에 대한 기기 성능에 기반한 수치해석적 검증이 이루어짐. 결과적으로 제안된 ATVA는 주파수를 초래하는 장애와 주요 구조물로부터 전달된 관성 에너지 흡수를 추적할 수 있으며, 진동을 억제하게 됨.
- 또 다른 전단 모드 ATVAs는 Liao 등, Kim 등, Xu 등 에 의해 연구가 수행되었음. MR 엘라스토머를 활용한 소형 전단 모드 AVTA가 설계되었으며, Deng과 Gong에 의해 시험이 수행되었음. 전자기장과 자기장 컨덕터는 폐쇄된 C-모양의 자기 경로와 동시에 동적인 질량을 제공함. 이러한 방법으로 기기는 이전의 기기들에 비해 소형으로 구성될 수 있었음. 실험적 검증을 통해 MR 엘라스토머가 27.5 Hz에서 40Hz 까지의 고유진동수로 조율될 수 있음을 입증함.

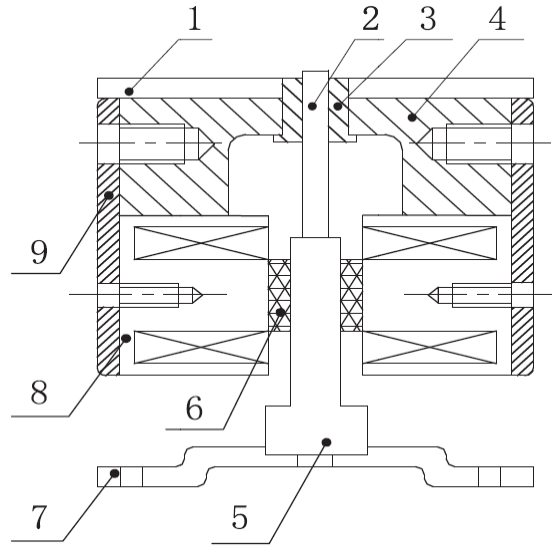


그림 2.5 소형 MR 엘라스토머 TVA

- 전단모드 ATVAs는 또한 비틀림 진동을 억제하기 위해 사용될 수 있음. Hoang 등은 파워트레인 진동 억제를 위해 MR 엘라스토머 TVA를 제안한 바 있음. 기기 회전부는 내외부의 고리와 그들 사이에 위치한 8개의 MR 엘라스토머 시편들로 구성되어 있음. 자속을 MR 엘라스토머 재료로 이끌기 위해 두 개의 연강 덮개가 사용됨. 이러한 배열로 인해 그림과 같이 자기장은 MR 엘라스토머를 같은 방향으로 통과하게 됨. 그러나 전단 거동이 자기장과 수직으로 MR 효과를 감소시켜 기기의 성능을 저하시키지 않음을 주목할 필요가 있음.
- Kallio 등은 다음 그림과 같이, MR 엘라스토머를 적용한 조율이 가능한 스프링 요소를 제안하였음. 기기는 압착 모드로 구동하며 압축력이 허용된다. 자기장은 압축 분자를 적용함으로써 조율 가능한 속성을 제공받게 됨.

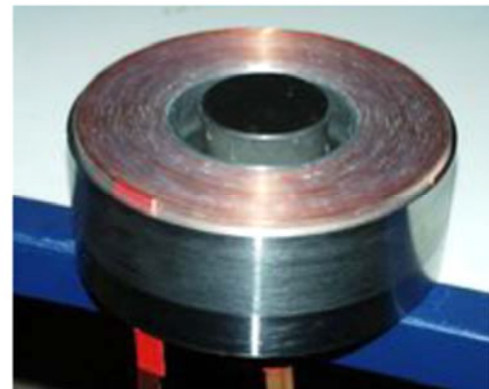
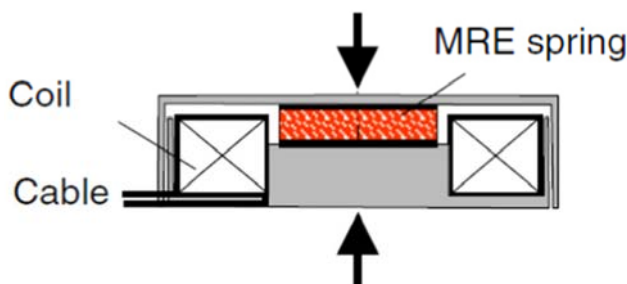
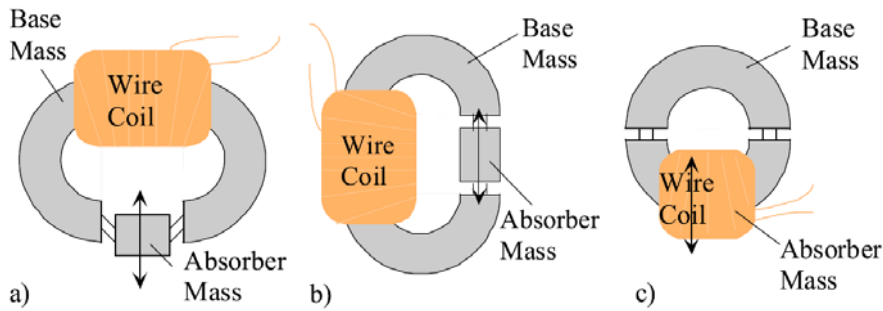


그림 2.6 MR 엘라스토머를 적용한 스프링 요소

- Lerner와 Cunefare는 다음 그림과 같이, ATR 42와 74 항공기체 동체에 적용될 수 있는 세가지 종류의 MR 엘라스토머 기반 진동 흡수 기기로 전단 기기, 연직 기기, 압착 모델 기기를 제안하였음. 전단 기기는 전단 모드, 다른 두 기기는 압착 모드와 길이 방향 모드로 구동됨. C-모양의 자기 회로 설계는 모든 세 가지 진동 흡수에 적용됨. 다른 모드에 적용되었지만 진동 흡수에 있어 기본 요소들은 기초 질량, 흡수기 질량, MR 엘라스토머와 와이어 코일임. 다음 그림은 진동 흡수 기기의 설계 개념도를 나타낸 것으로, 화살표는 가진 방향을 나타냄. 이방성 MR 엘라스토머 샘플들은 35% 부피의 철 입자들로 구성됨. 실험적 검증을 통해 장 밀도 0과 183kA/m에서 전단과 길이 방향 기기의 고유진동수가 각각 183%, 473% 증가한 것으로 나타난 반면에, 압착모드 기기는 고유진동수가 최대 507%로 증가함.



(a) 전단 기기, (b) 연직 기기, (c) 가진 방향의 압착 모델 기기

그림 2.7 Lerner와 Cunefare에 의해 제안된 세 종류의 진동 흡수기기

- 압착모드 MR 엘라스토머 흡수기기는 또한, Sun 등에 의해 고안된 다음 그림과 같이 더욱 소형화된 방향으로 설계될 수 있음. 질량 함수비 7.5:1.25:125(철:실리콘오일:실리콘고무)의 MR 엘라스토머 재료가 적용됨. 동적 질량을 형성하는 자기 코일과 철재 요소들은 MR 엘라스토머 상단에 위치하게 됨. 결과적으로 압착 MR 엘라스토머 흡수기기는 진동 감쇠 구간을 37Hz에서 67Hz로 확장 시킴.

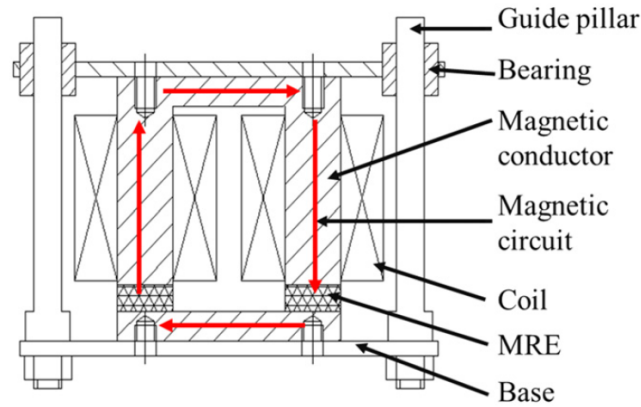


그림 2.8 소형 압착 MR 엘라스토머

- ATVAs는 또한 복합 전단모드와 압착모드 등의 복합모드로 설계될 수 있음. 압축하중 하에서의 전단모드 MR 효과는 순수 전단 모드일때보다 효과적인 것으로 드러남. Ni 등은 이를 활용하여 복합 전단과 압착 모드에 대한 MR 엘라스토머 AVTA를 설계함. 이 설계에 의하면, MR 엘라스토머에 제어 가능한 압축하중을 적용할 수 있는 움직일 수 있는 관절(arm)에 압전 액추에이터를 설치하였음. 수치해석적 연구에 의해 이러한 설계가 전단 모드만의 경우보다 더 효율적인 압축 용량을 제공함을 규명함.

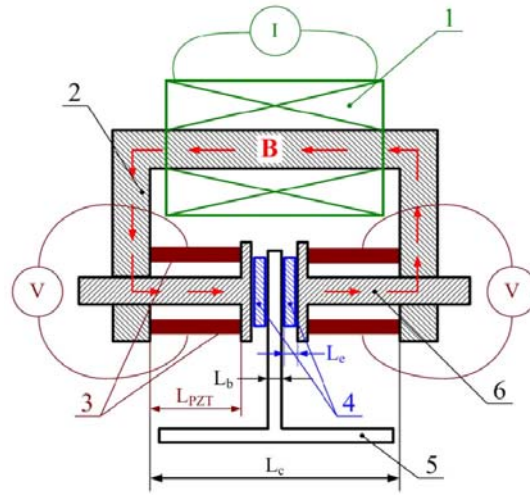


그림 2.9 압착-변형률 개선 MR 엘라스토머를 포함한 동적 강성-조율 흡수기기

4. 토목 구조물 적용을 위한 진동 절연

- 기초 격리는 토목공학에서의 진동 절연을 위한 특별한 적용물로, 지진으로부터 손상 에너지가 보호될 구조물로 전달되는 것을 방지하는 것을 목표로 함. 진동 흡수 기기와 진동 절연 기기들이 초기에 거론된 바와 다르게, 기초 격리는 연직 방향으로의 구조물 자중으로 인한 큰 규모의 연직 하중을 견디기 위해 높은 강성을 유지할 필요가 있는 반면에 횡방향으로는 유연한 강성을 요구로 함. 고무 재료와 철 재료의 시트의 적층으로 구성된 엘라스토머 베어링(또는 고무 베어링)은 이러한 목적에 부합하는 기초격리 시스템을 제공함. 수동형 기기로서, 기존의 고무 베어링은 특정 속성의 지진에 견디기 위해 설계되었기 때문에 일반적으로 지진 발생시 취약함. 지진은 본래 자연적으로 다양한 상황으로 발생하기 때문에 넓은 범위의 지진에 대한 적응성을 갖추는 것은 매우 중요한 일이라 할 수 있음. 종래의 기초격리 시스템의 취약성에 대한 설명은 다양하게 논의되어 왔음.

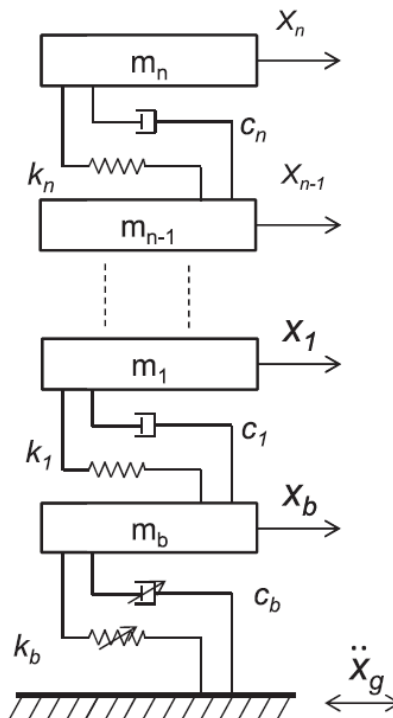
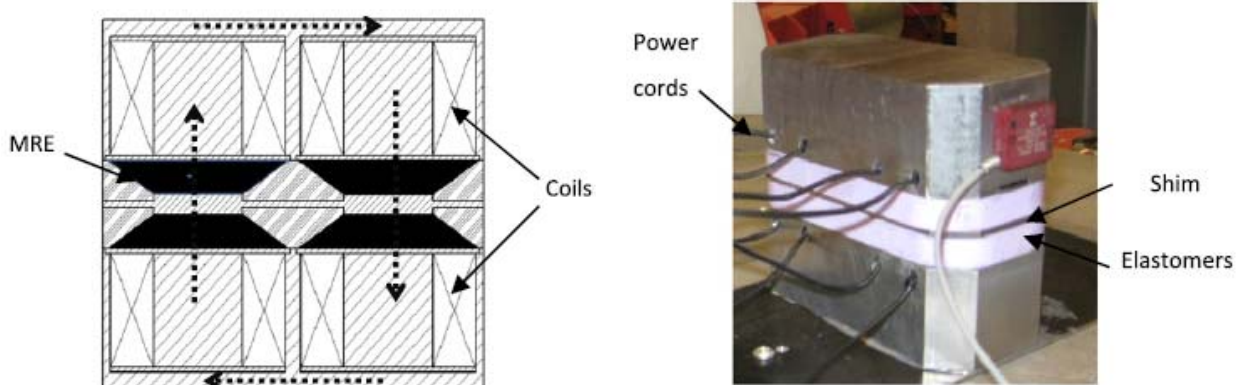


그림 2.10 토목구조물에 MR 엘라스토머를 적용한 적응형 기초 격리 시스템 개념도

- 이러한 문제들을 해결하기 위해 여러 연구자들이 토목구조물의 기초격리시스템에 적용된 MR 엘라스토머에 대한 신뢰성에 대해 다양한 연구를 수행한 바 있음. Hwang 등과 Usman 등은 수치해석적 시뮬레이션을 통한 신뢰성을 분석한 바 있음. 해석 결과에 따르면, MR 엘라스토머를 활용한 기초

격리시스템은 종래의 시스템에 비해 지진 가진 조건에서 구조물의 응답을 감소시키는데 더 우수한 것으로 규명됨.

- Jung 등은 상단에 MR 엘라스토머를 장착한 단층 구조물을 대상으로 축소모형 실험을 수행하였으며, 사인 하중과 인공 지진 조건에서의 단순화된 시스템에 대한 실험적 연구를 수행한 바 있음.
- Behrooz 등은 토목구조물의 기초격리시스템에 적용할 수 있는 다양한 강성과 감쇠 절연 기기를 제안하였음. 4개의 12mm 두께를 지니며, 쉐기로 분리가 되는 부등변 사각형의 MR 엘라스토머 샘플이 사용되었음. 각각의 두 개의 MR 엘라스토머 샘플들은 다음 그림과 같이 그룹을 형성함. 상단과 하단의 네 개의 코일이 자기장을 공급하기 위해 사용됨., 코일은 두 개의 철재 캡을 통해 철재 코어로 연결됨. 절연 기기의 전체 크기는 128mm×64mm×110mm임. 각각의 코일 숫자는 800, 각 기기의 소요 전력은 4A에서 234.2W임. 0.1Hz와 1mm 진폭 조건의 가진 조건에서의 전단 성능은 다음 그림과 같음. 루프 내 57%의 증가가 발견됨. 그러나 지진에 대비해 토목 구조물을 보호하기 위한 설계에 연직 하중 용량이 제한적이라는 점.



(a) 단면 (b) 프로토타입
그림 2.11 Behrooz 등에 의해 제안된 다양한 강성 및 감쇠 절연 기기

- Li 등은 가장 일반적으로 활용되는 형태의 적층형 MR 엘라스토머 기반 면진장치를 제안하였음. MR 엘라스토머는 $\Phi 120\text{mm} \times 1\text{mm}$ (25개), steel plate는 $\Phi 120\text{mm} \times 0.92\text{mm}$ (24개)를 적층으로 쌓았으며 전자석 코일로 주변을 둘러싼 형태의 장치를 제안하였다. 이는 기존 면진받침의 형상을 바탕으로 한 것으로 수직하중에 잘 버틸 수 있는 구조임. 하지만 이 형상은 둘러싸인 전자석으로 인해 면진장치의 거동 범위가 매우 협소해지는 문제가 발생함. 게다가 천연고무가 아닌 실리콘 고무를 활용하여 부착성이 떨어지고 자기장의 집중을 저하시킴.

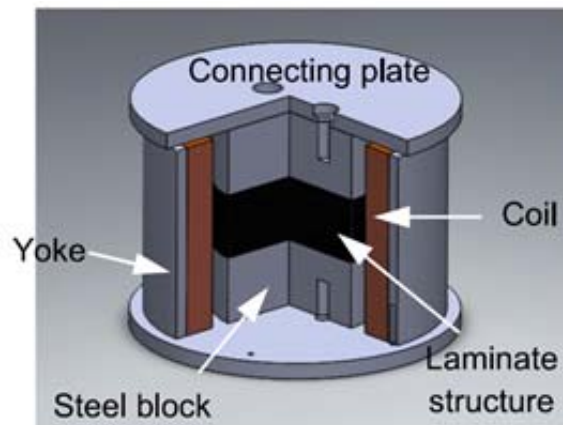


그림 2.12 Li 등이 제안한 적층형 MR 엘라스토머 면진장치 형상

- Wahab 등은 천연고무 기반 MR 엘라스토머 면진장치를 제작하여 성능평가를 수행하였음. 이 장치는 10%의 변형률, 0.8T 자기장 하에서 120%의 높은 MR 효과를 보임. 하지만 면진받침의 현실적인

거동범위를 고려할 경우 10%의 변형률 범위는 부족함. 따라서 현실적인 적용을 위해서는 더 넓은 변형률 범위에서의 성능 평가가 필요함.

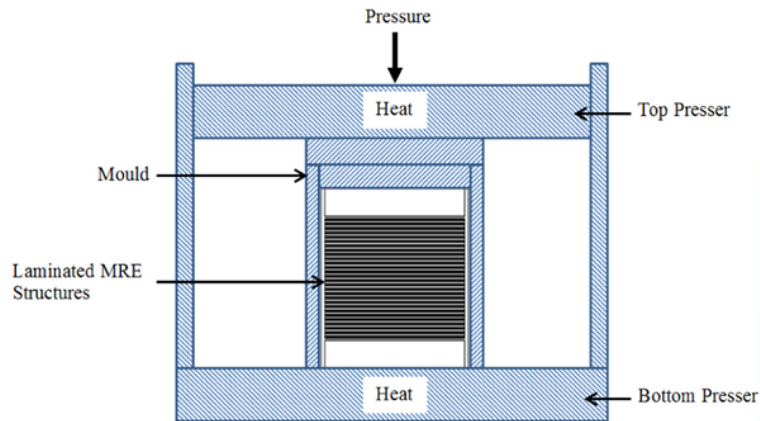


그림 2.13 Wahab 등이 제안한 MR 엘라스토머 면진장치 형상

- 미국에서 2017년 MR 엘라스토머 기반 면진장치에 대한 특허가 등록됨. 기존의 MR 엘라스토머 기반 면진장치와 유사한 형태로 MR 엘라스토머는 steel plate와 적층형으로 구성되며, 전자석 코일이 MR 엘라스토머 주변을 둘러싸는 형태를 가짐. 하지만 선행연구에서와 같이 ISO 규정에 따른 면진받침의 전단탄성계수 100% 변형률을 고려할 수 없음.

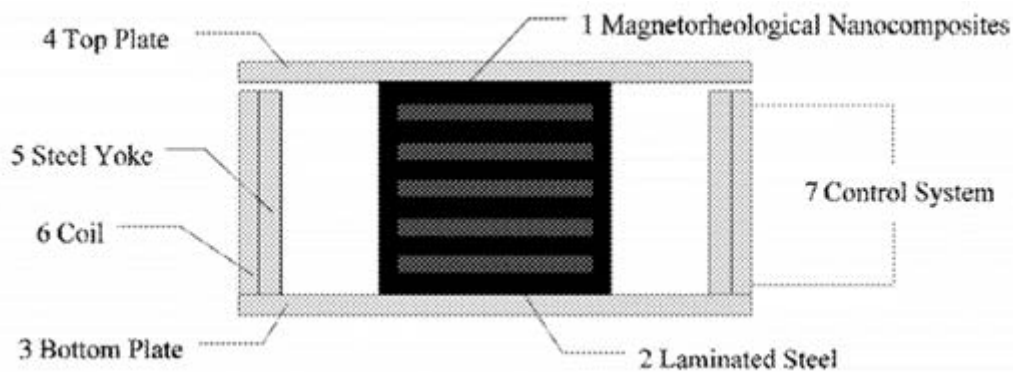


그림 2.14 기존에 제시되었던 MR 엘라스토머 기반 면진장치
(미국 특허, 등록번호 9,581,214,214, 2017년)

2.3 해외 면진기술 관련 연구 동향 및 수준

1. 미국

- 미국의 경우 1980년도부터 Los Angeles나 San Francisco 등 대도시의 공공건물이나 상업용 대형 건물을 중심으로 기존의 내진 설계된 건물에 대하여 기존의 내진보강 방법이 아닌 면진설계로 이를 대처하는 방법이 사용되고 있으며, 이의 효율성 및 경제성이 입증되고 있음.
- 미국에서는 기존 건축구조물의 내진보강 설계보다는 면진설계로 인한 구조적 리모델링이 일반화 되어 있으며, 주로 상업용 및 공공건축물에 적용되고 있음.
- 신규 원전 건설을 재개하면서 과거의 발전소보다 설계지진력을 상향조정함 특히 확률론적 지진위험도 분석을 통해 도출된 부지의 지반운동 응답스펙트럼은 중고진동수 대역에서 가속도 성분이 대폭 증가된 결과를 제공하고 있어 재래식 지진해석과 내진설계 절차로는 원전건설이 어렵도록 함.
- 지금까지 원전건물의 면진 적용에 있어 가장 신중한 입장을 취해왔지만, 최근 사업자, 연구기관 및 규제기관을 중심으로 활발한 연구를 진행하고 있음.
- 미국 버펄로 대학 (New York, USA)의 MCEER (Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, 지진공학연구소 다중분야 센터)에서는 2005년 변압기 기초의 면진시스템

에 대해 연구하였으며 2008년 원전 구조물에 대한 면진설계 적용의 이점을 규명함. 또한 2008년 "Assessment of Base-Isolated Nuclear Structures for Design and Beyond-Design Basis Earthquake Shaking" 연구를 통해 ASCE 4-2010이 개정을 위한 기술적 근거를 제공하고 있음. 이를 고려하여 ASCE 4-2010에는 원전 구조물의 면진시스템의 해석 및 설계에 관한 규정이 포함될 것으로 예상됨.

2. 일본

- 일본에서의 면진구조는 1993년 창설된 일본면진구조협회에 의하여 시스템의 안정성, 적응성 평가 및 이의 보급이 활발히 이루어지고 있음.
- 일본에서는 1995년 고베지진 이후에 일반 건축물, 특히 공동주택 건물에 대한 면진설계가 진행되고 있으며 이의 사용성 및 경제적인 효과도 검증되고 있음. 특히 안전성 및 사용성에 대한 효과가 탁월한 것으로 보고되고 있음.
- 일본의 경우, 1983년 최초의 면진구조물이 건설된 이래, 현재 약 1,300동 정도 건설되었으며, 2009년 현재 연간 130동 정도 건설되고 있음.
- 2000년 10월에 “면진구조물의 구조 방법에 관한 안전상 필요한 기술적 기준을 정함 등의 건(2000년 건축고시 제 2009호)”이 발행되었으며, 이에 따라 면진건축물이 처음으로 법률로 규정되었음.
- 동시에 “면진재료의 품질에 관한 기술적 기준(2000년 건축고시 제 1446호)도 발행되어 면진재료는 장관 인정품으로 정의되었음.
- 일본에서는 경수로 원자로 건물에 대한 설계와 원자력발전소의 전기계 정반에의 면진공법 적용이 검토되고 있음. 또한 고속 증식로 원자로 건물에 대한 설계와 원자력 기기를 면진 구조화한 경우의 유효성 평가법이 개발되고 있음.
- 일본의 전력중앙연구소는 고속증식로의 설계 합리화, 안전성 향상, 경제성 향상 및 입지점 확대를 위해 원자로 건물의 면진구조화 연구를 추진하고 있음. 그 일환으로 고속증식로의 면진설계와 면진장치의 각종 기능 확인시험을 수행하는 동시에 고속증식로의 면진설계법의 확립을 도모하고 있음.

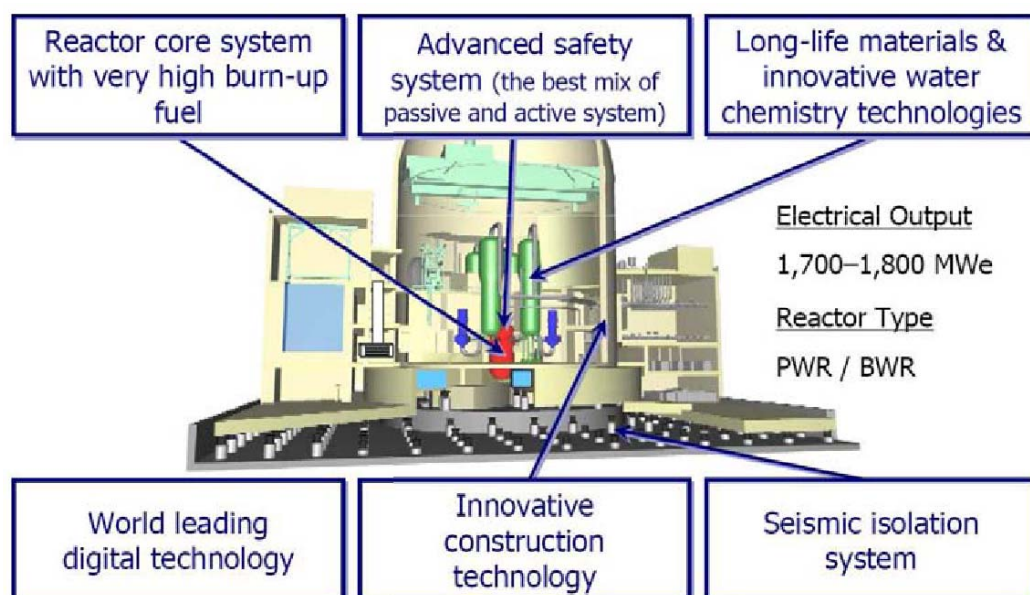


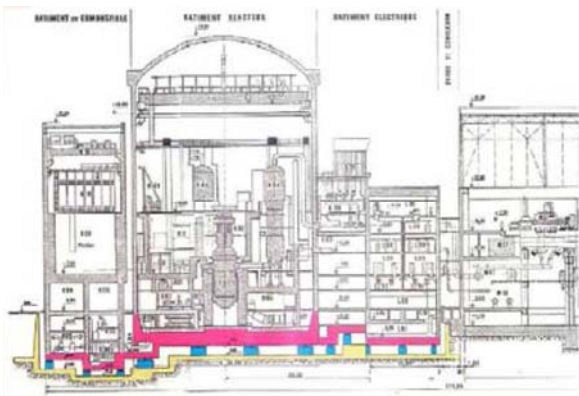
그림 2.15 면진장치를 도입한 일본의 차세대 원전 시스템 개발 계획

- 일본의 원자력 발전기술 기구는 전산기 시스템을 바닥 면진구조화한 경우의 안전성, 신뢰성 및 설계방법의 타당성을 확인하기 위한 진동대 시험을 수행함. 또한 원자력 기기를 면진구조화한 경우의 유효성을 확률론적 방법을 사용하여 평가하는 방법과 평가코드가 개발되고 있음.

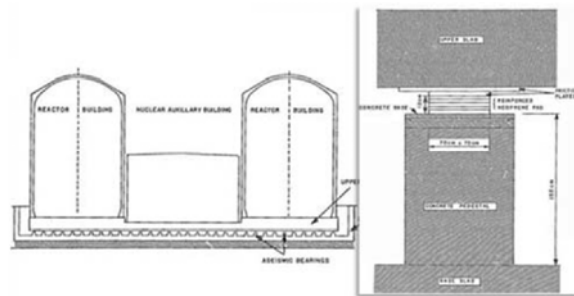
- 일본의 JNES(Japan Nuclear Energy Safety Organization, 원자력 안전기구)에서는 원전 건물의 설계, 평가, 건설, 운전 및 해외 적용을 염두에 두고 면진구조의 심사내규에 대한 초안을 완성하고, 2010년 2월 면진규제 내규검토 분과위원회를 설치함.
- 또한, 국제공조 강화를 통해 프랑스와의 사업적 협력을 꾀하며 국제원자력기구(IAEA)와 공동연구를 위한 협력관계를 맺고 있으며 미국 원자력 규제위원회 (NRC)와 규제기준 분야에 대한 MOU를 체결함.

3. 프랑스

- 프랑스 남동부 지역에 위치한 Cruas 경수로와 남아프리카공화국 Koeberg 경수로의 원자로 건물에 면진공법이 적용되어 실제 면진장치가 설치됨. 이는 현재까지 세계적으로 유일한 실제 적용사례임.
- Cruas 경수로의 경우에는 1,916개의 Neoprene Pad를 사용하였음.
- Koeberg 경수로의 경우에는 1,829개의 EDF 시스템 (Elastomer Pad와 Friction Plate의 조합)을 사용하였음.
- 이후로는 면진장치를 원전 구조물에 사용한 사례가 없음.



(a) Cruas 경수로 적용 사례



(b) Koeberg 경수로 적용 사례

그림 2.16 프랑스의 면진장치 실제 원전 구조물 적용 사례

제3장. 연구수행내용 및 성과

3.1 연구수행내용

단위성과 1: 면진성능 향상을 위한 MRE 최적 배합비 산정 및 재료 특성 모델링 도출

■ 재료 선택, 샘플 제작 및 미세구조 관찰

- MR 엘라스토머를 제작하기 위해서는 모재와 자성입자가 필요함. 따라서 본 연구에서는 선행연구를 바탕으로 최대 MR 효과를 나타낼 수 있는 모재와 자성입자를 선정하여 MR 엘라스토머를 제작하였음. MR 엘라스토머는 경화 시에 자기장 인가/미인가에 따라 자성입자의 배열이 달라지는데 이를 이방성/등방성 MR 엘라스토머라고 함. 본 연구에서는 이방성/등방성 MR 엘라스토머에 대한 MR 효과 비교를 수행하였음. (그림 3.1)
- MR 물질은 자기장의 인가에 따라 강성이나 감쇠비와 같은 기계적 성질을 빠르게 변화시키는 MR 효과를 가지고 있는 물질임. MR 엘라스토머의 경우 자기장의 변화에 따라 강성과 감쇠비가 조절되지만 감쇠비의 변화는 극히 미미하다고 보고됨. 따라서 MR 엘라스토머는 주로 자기장에 따른 탄성계수의 변화로 MR 효과가 특정 지어짐.

$$MR\ effect\ (\%) = \frac{G(B_{MRE}) - G(0)}{G(0)} \times 100$$

- 여기서, $G(B_{MRE})$ 는 MR 엘라스토머에 자기장이 인가되었을 때의 전단 탄성계수를 나타내며, $G(0)$ 는 자기장이 없을 때의 전단 탄성계수를 의미함.
- 천연고무(SVR CV60, Hung Thinh, 베트남): 실리콘 고무에 비해 기계적 물성이 뛰어나고 부착성이 높으므로 자기장의 집중에 효과적임
- 자성입자(ASC300, Hoganas, 스웨덴): Lokander 등에 의해 입자 크기 $60\mu m$ 이하의 크기 분포를 가지고, 불규칙한 형상을 한 회가네스 사의 ASC300이 가장 MR 효과가 높다고 관찰함.
- MR 효과는 자성입자의 크기, 형상, 부피비에 따라 다르게 나타남. 따라서 본 연구에서는 자성입자의 부피비에 따른 MR 효과를 비교하여 분석함.
 - MR 엘라스토머 경화시 자기장 인가/미인가에 따라 이방성/등방성 MR 엘라스토머로 구분
 - 이방성/등방성 MR 엘라스토머의 철 부피비에 따른 MR 효과 비교 수행 (표3.3 & 4)
 - : 선행연구에서는 이방성 MR 엘라스토머의 MR 효과가 우수한 것으로 산정되었으나 본 연구에서는 100% 변형률에서는 두 종류에 대한 차이가 미미한 것으로 나옴
- 또한, 천연고무의 기계적 물성을 높이고 MR 효과를 증대 시키는 카본블랙(N55)과 고무의 초기 탄성계수를 조절할 수 있는 나프텐 오일(N2)을 활용하여 첨가제의 부피비에 따른 MR 효과의 비교를 수행함.
 - 카본블랙: 천연고무의 기계적 물성을 높이고 MR 효과를 증대 시킴
 - 나프텐오일: 고무의 초기 탄성계수를 조절
 - 1단계: 철분말 부피비(0, 15, 25, 30, 35%) 샘플 제작 (표 3.1)
 - 2단계: 최대 MR 효과 철 부피비 + 다양한 배합비의 첨가제 추가 (표 3.2)
- 전자현미경(SEM; SU8230, Hitachi, 일본) 이미지를 촬영하여 미세 구조를 관찰함. (그림 3.2)

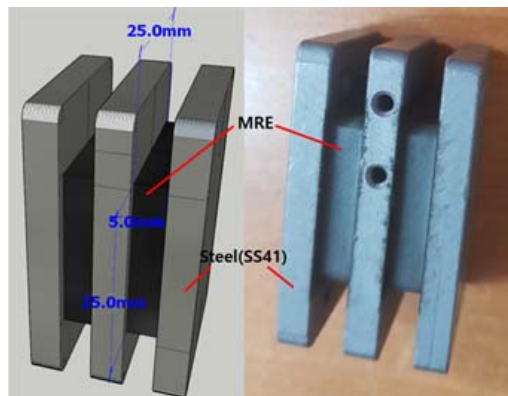
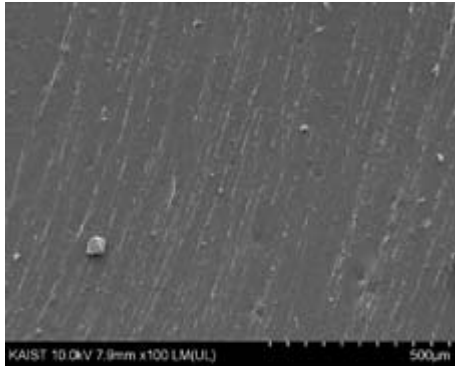
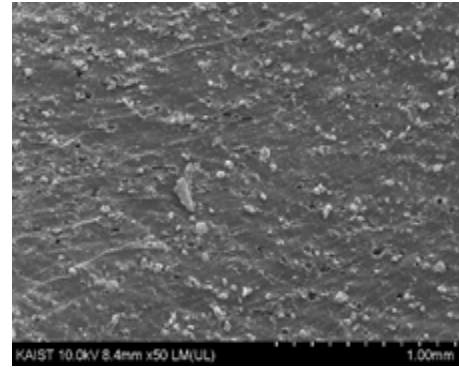


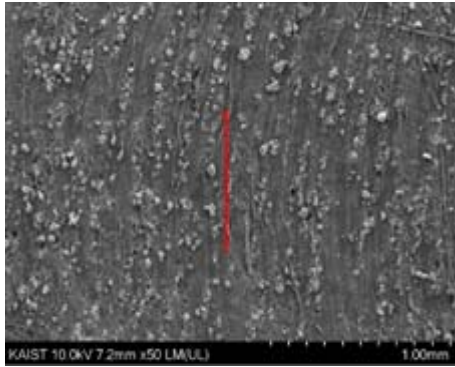
그림 3.1 MR 엘라스토머 시편 형상



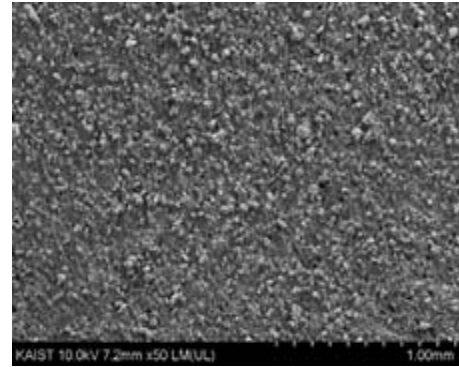
(a) 철 입자 0%



(b) 철 입자 15% / 등방성



(c) 철 입자 15% / 이방성



(c) 철 입자 35% / 이방성

그림 3.2 MR 엘라스토머 시편 미세구조

표 3.1 다양한 철분말 부피비, 배열을 가진 MR 엘라스토머 샘플 제작 (9종)

철 부피비율 (%)	등방성	이방성
0	✓	미제작
15	✓	✓
25	✓	✓
30	✓	✓
35	✓	✓

표 3.2 카본블랙과 나프텐 오일의 다양한 배합비를 가진 MR 엘라스토머 샘플 제작 (5종)

철 부피비율 (%)	카본 블랙 (phr)	나프텐 오일 (phr)	등방성
35	20	20	✓
	40	20	✓
	60	20	합성불가
	20	40	✓
	40	40	✓
	60	40	✓

- 철 입자 부피비에 따른 자화곡선 도출 및 동적 전단시험 / 히스테리시스 곡선 관찰
 - 진동시료 자화율측정기(MPM3S-Evercool, Quantum Design, 미국)을 통해 자기적 포화가 이루어지는 자화곡선을 조사함. 철 입자 투입대비 자화곡선을 비교함. (그림 3.3 & 4, [증빙 1-2] 시험분석 확인서)
 - 동적재료 시험기를 통해 자기장 여부에 따른 MR 효과를 비교함.
 - 철 부피비에 따른 동적 특성시험 결과를 토대로 등방성 MR 엘라스토머를 제작함. (첨가제 비율에

다른 MR 효과 비교 시험)

- KS ISO 22762-1 규정을 준수하여 수행하였으며 전단 탄성계수는 ISO 22762-1의 「6. 면진 장치 시험」을 참고하여 계산하였음.
- 1-1단계: 철 부피비(0, 15, 25, 30, 35%) 샘플 비교 시험 (변형률 50, 100%, 0.5Hz) (그림 3.5-7, 표 3.3 & 4)
 - : 50% 변형률 - 등방성 63.4% / 이방성 50.0% MR 효과
 - : 100% 변형률 - 등방성 19.4% / 이방성 22.0 % MR 효과
- 1-2단계: 변형률과 자속밀도에 따른 감쇠비 의존도 실험 수행 (그림 3.7)
 - : 철 비율 증가에 따라 최소 2.14%에서 최대 10.29%까지 뚜렷하게 증가하는 경향을 보임
- 2-1단계: 다양한 첨가제 배합비의 샘플 비교 시험 (변형률 25~100%, 0.5~2.0Hz) (그림 3.8-11, 표 3.5, 6 & 7)
 - : C60N40 비율에서 최대 MR 효과를 나타냄 (카본블랙 60 phr, 나프텐오일 40 phr)
 - : 50% 변형률 - 106.9% MR 효과
 - : 100% 변형률 - 33.5% MR 효과
- 2-2단계: 주파수 변화에 따른 감쇠비 의존도 실험 수행 (그림 3.12)
 - : 첨가제 부피비에 따른 시편의 이력곡선이 주파수의 변동간 거의 차이가 없음

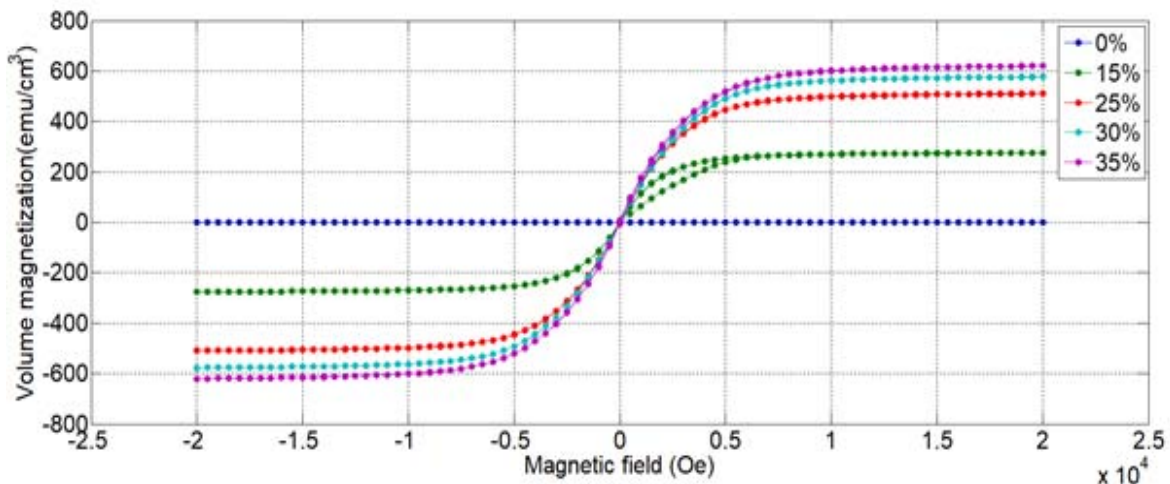


그림 3.3 MR 엘라스토머의 M-H 곡선 (철 입자 0, 15, 25, 30, 35%)

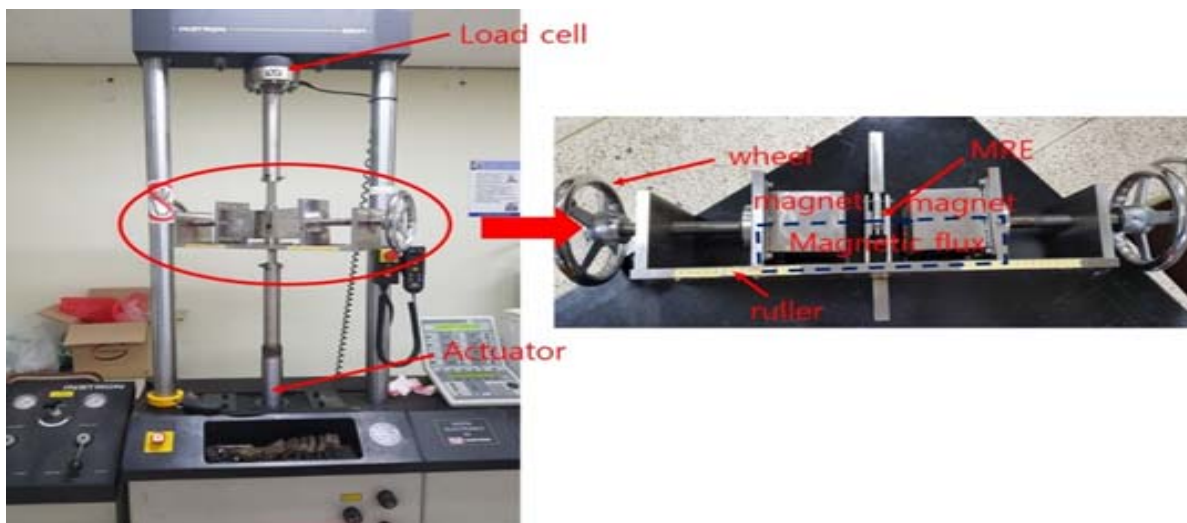


그림 3.4 자기장 인가 지그제작, 동적 전단 시험기

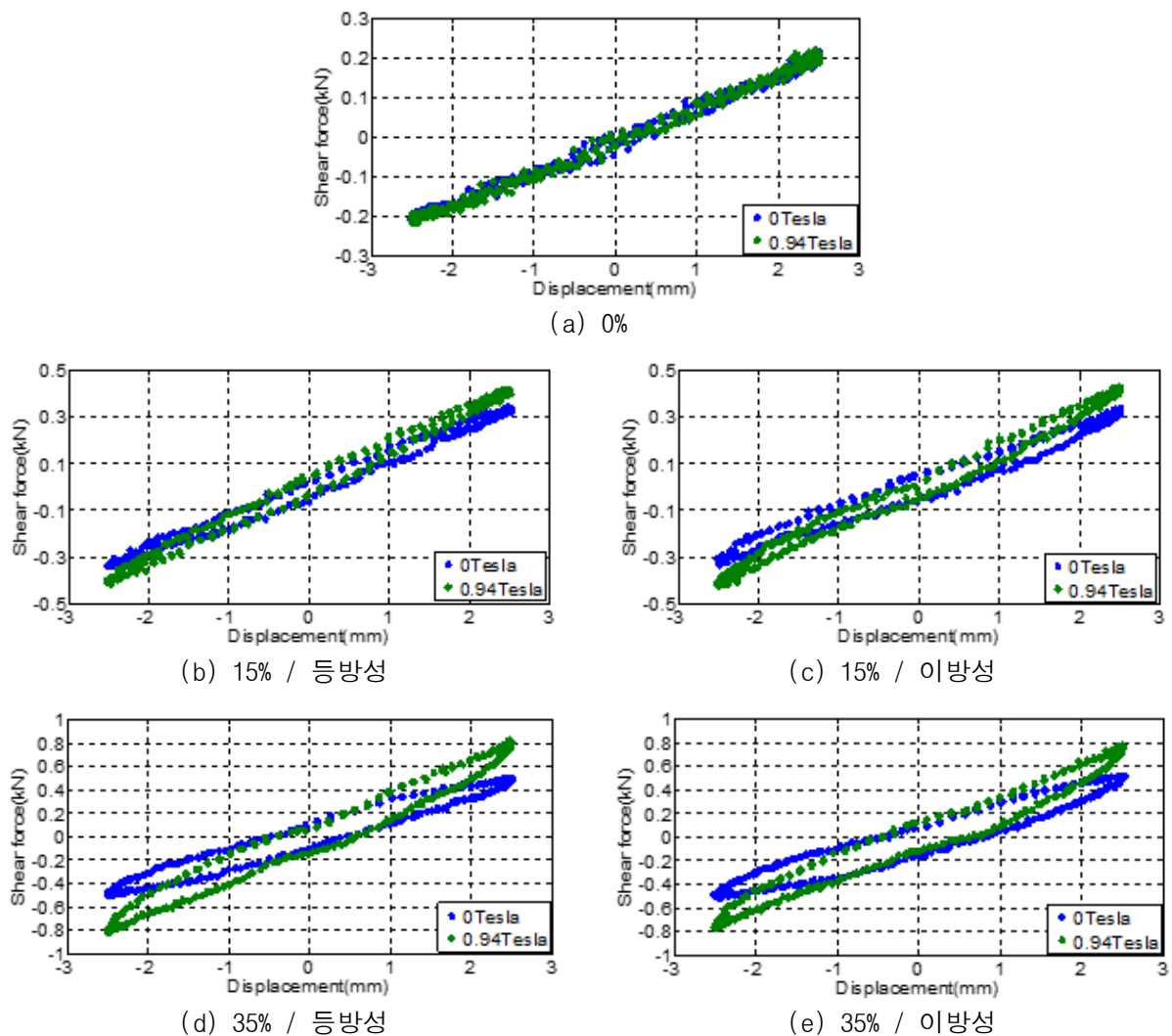


그림 3.5 철 입자 부피비별 MR 엘라스토머 시편의 전단력-변위 이력곡선(변형률 50%, 0.5Hz)

표 3.3 철 부피비율에 따른 MR 효과 (50% 변형률/0.5Hz)

철 부피비율(%)		0		15		25		30		35	
자속밀도(T)		0	0.94	0	0.94	0	0.94	0	0.94	0	0.94
등방성	전단 탄성계수(MPa)	0.35	0.35	0.55	0.69	0.71	0.95	0.77	1.15	0.80	1.31
	MR 효과(%)	0		21.0		33.6		49.6		63.4	
이방성	전단 탄성계수(MPa)	-	-	0.53	0.68	0.73	0.93	0.78	1.14	0.82	1.24
	MR 효과(%)	-		28.4		27.5		46.6		50.0	

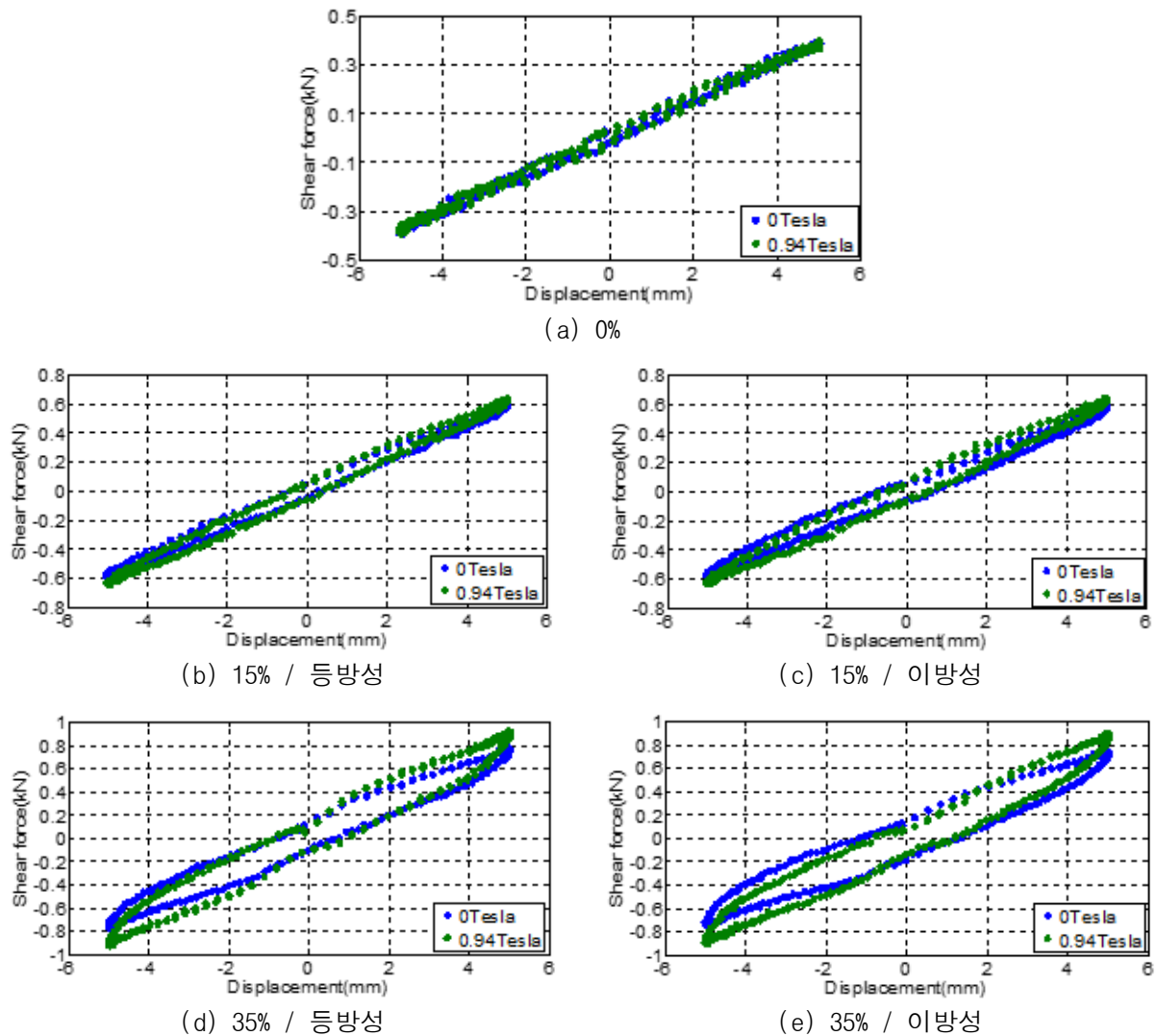


그림 3.6 철 입자 부피비별 MR 엘라스토머 시편의 전단력-변위 이력곡선(변형률 100%, 0.5Hz)

표 3.4 철 부피비율에 따른 MR 효과 (100% 변형률/0.5Hz)

철 부피비율(%)		0		15		25		30		35	
자속밀도(T)		0	0.94	0	0.94	0	0.94	0	0.94	0	0.94
등방성	전단 탄성계수(MPa)	0.32	0.32	0.48	0.51	0.58	0.65	0.61	0.70	0.62	0.74
	MR 효과(%)	0		6.3		12.1		14.8		19.4	
이방성	전단 탄성계수(MPa)	-	-	0.47	0.54	0.58	0.66	0.59	0.70	0.59	0.72
	MR 효과(%)	-		8.5		13.8		18.6		22.0	

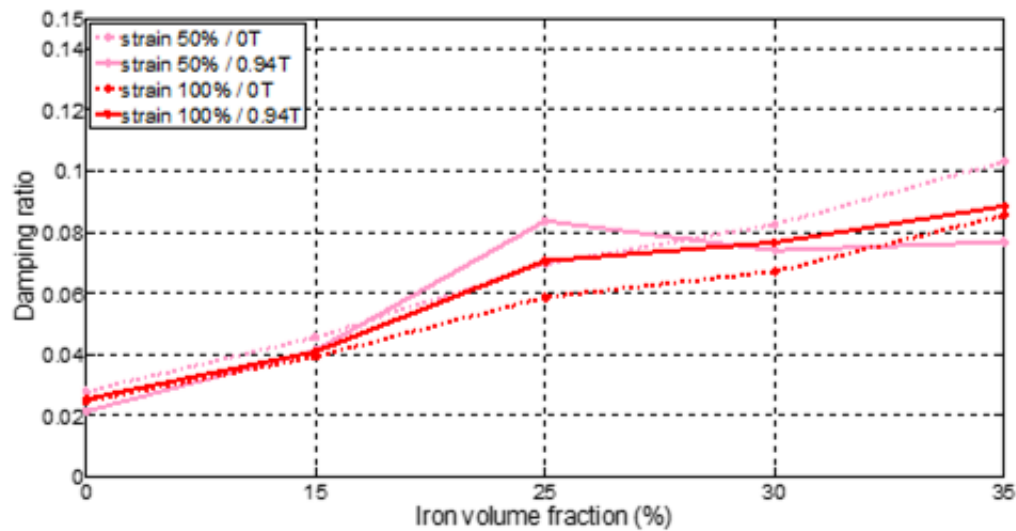


그림 3.7 철 부피비율에 따른 MR 엘라스토머의 감쇠비 변화

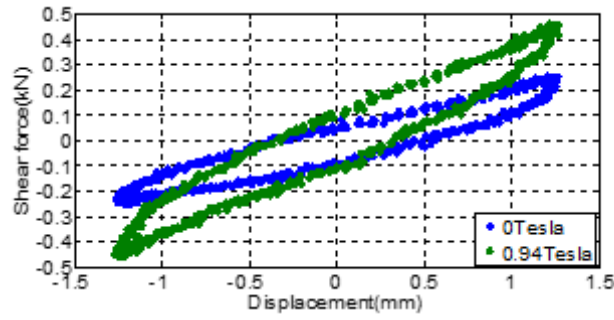
표 3.5 카본블랙 및 나프텐 오일의 다양한 배합비에 따른 MR 엘라스토머 시편 구성 (철 비율: 35%)

시편명		C20N20	C40N20	C60N20	C30N40	C40N40	C60N40
카본블랙 첨가량 (phr)		20	40	60	20	40	60
오일 첨가량 (phr)		20	20	20	40	40	40
질량비 (%)	고무	13.5	12.4	합성실패 (고점도)	11.7	10.9	10.2
	철	79.6	78.8		79.9	79.1	78.5
	카본블랙	2.7	5.0		2.3	4.4	6.1
	오일	2.7	2.5		4.7	4.4	4.1
	기타	1.5	1.3		1.4	1.2	1.1
부피비 (%)	고무	48.3	44.9		42.0	39.4	37.1
	철	35.0	35.0		35.0	35.0	35.0
	카본블랙	4.9	9.1		4.2	8.0	11.3
	오일	9.7	9.0		16.8	15.8	14.9
	기타	2.1	2.0		2.0	1.8	1.7

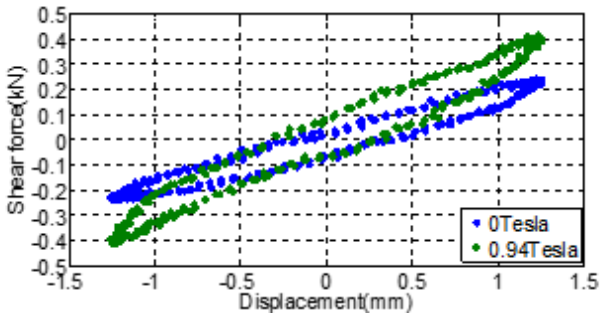
*phr (Parts per Hundred Rubber): 고무 질량 100 단위에 대한 분율

표 3.6 동적 전단시험(조화하중) 조건

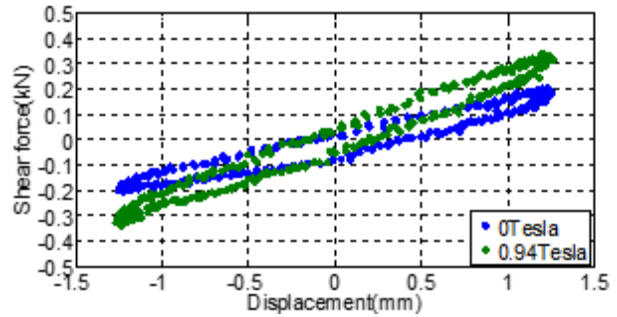
시험	전단 변형률 (%)	가진 주파수 (Hz)	사이클 (회)	자속 밀도 (Tesla)	온도
변형률 의존도	25, 50, 75, 100	0.5	11	0 / 0.94	상온
주파수 의존도	100	0.5, 1.0, 2.0			



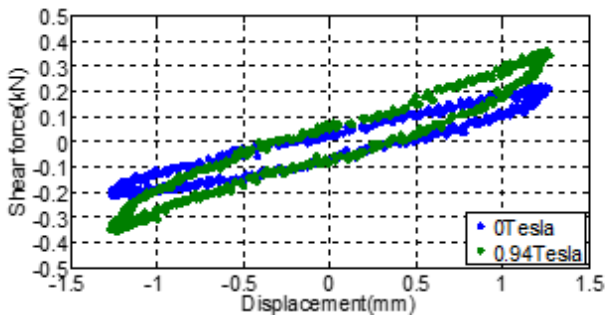
(a) C20N20



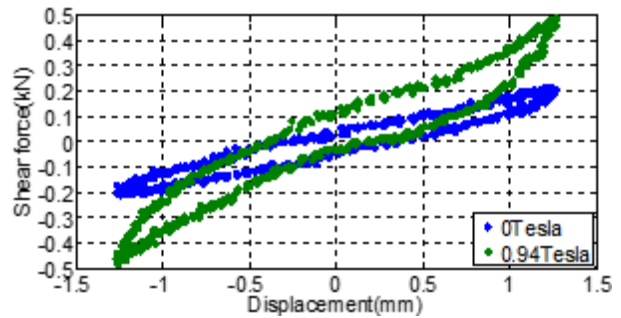
(b) C40N20



(c) C20N40



(d) C40N40



(e) C60N40

그림 3.8 카본블랙, 오일을 첨가한 MR 엘라스토머 시편의 전단력-변위 이력곡선 (변형률 25%, 0.5Hz, 등방성 MR 엘라스토머)

표 3.7 카본블랙과 나프텐 오일을 첨가한 MR 엘라스토머 시편의 MR 효과 (0.5Hz)

샘플명			C20N20	C40N20	C20N40	C40N40	C60N40
자속밀도 (T)			0 / 0.94	0 / 0.94	0 / 0.94	0 / 0.94	0 / 0.94
변 형 률 (%)	25	전단 탄성계수 (MPa)	0.80 / 1.45	0.76 / 1.32	0.66 / 1.08	0.69 / 1.13	0.67 / 1.53
		MR 효과 (%)	80.2	72.5	64.0	64.3	127.4
	50	전단 탄성계수 (MPa)	0.58 / 1.00	0.58 / 0.97	0.45 / 0.72	0.47 / 0.79	0.52 / 1.07
		MR 효과 (%)	73.1	67.9	58.2	67.9	106.9
	75	전단 탄성계수 (MPa)	0.49 / 0.75	0.50 / 0.76	0.39 / 0.57	0.39 / 0.60	0.45 / 0.78
		MR 효과 (%)	53.3	52.2	47.5	54.2	71.2
	100	전단 탄성계수 (MPa)	0.42 / 0.56	0.47 / 0.60	0.35 / 0.44	0.38 / 0.48	0.45 / 0.60
		MR 효과 (%)	33.2	26.9	27.1	26.6	33.5

*phr (Parts per Hundred Rubber): 고무 질량 100 단위에 대한 분율

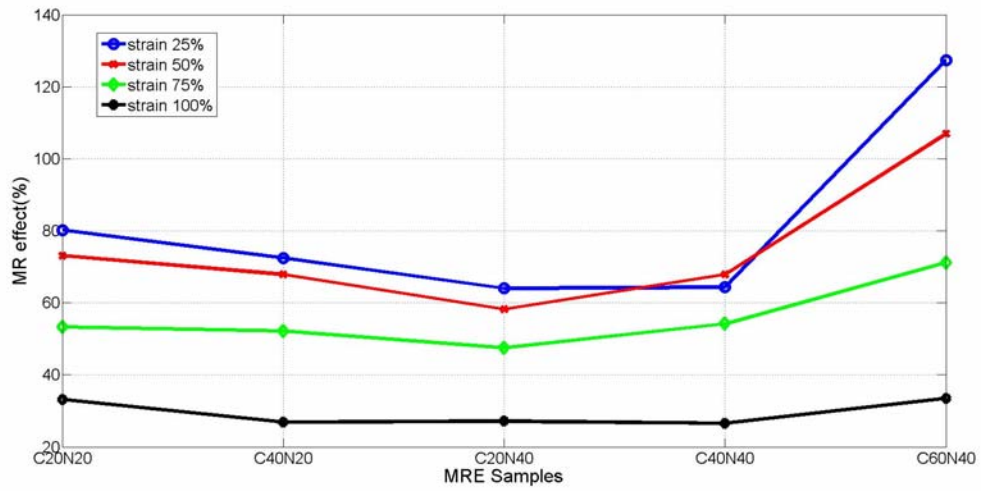
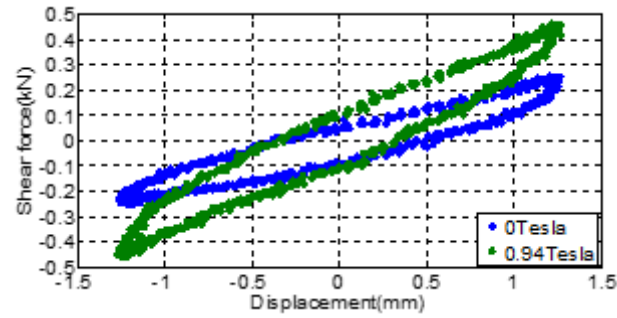
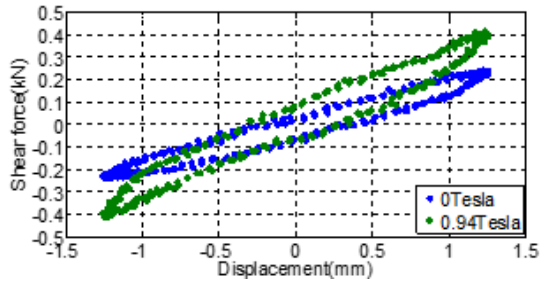


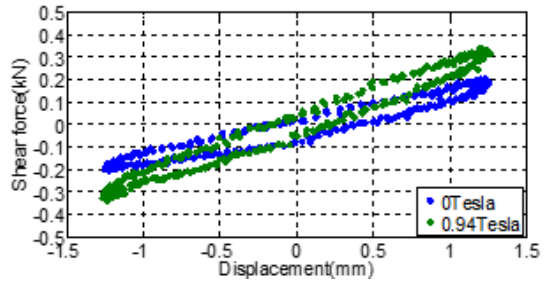
그림 3.9 첨가제를 추가한 MR 엘라스토머의 MR효과 비교



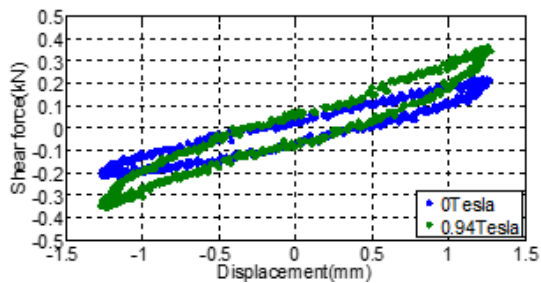
(a) C20N20



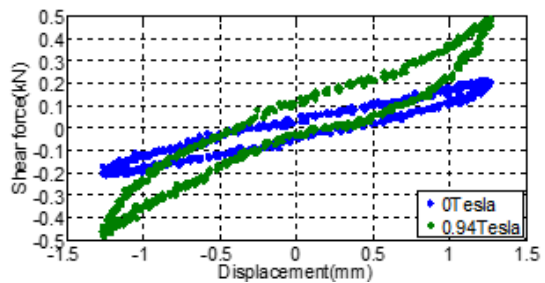
(b) C40N20



(c) C20N40

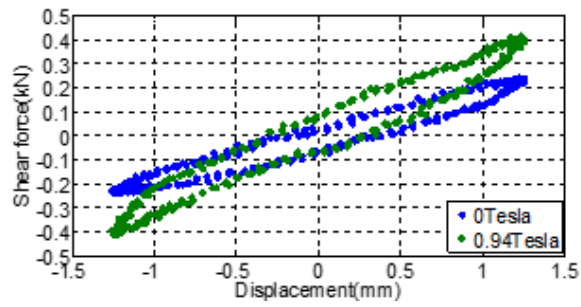


(d) C40N40

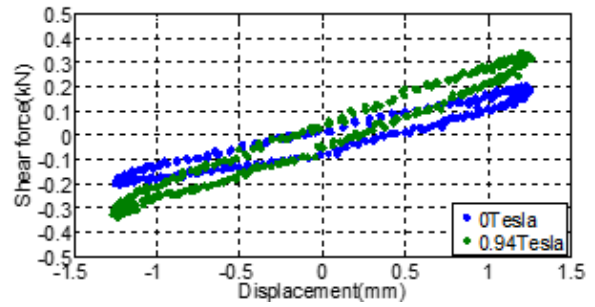


(e) C60N40

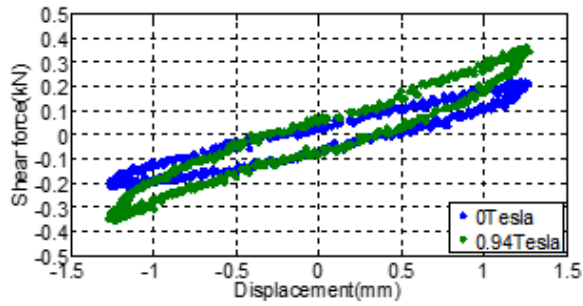
그림 3.10 카본블랙, 나프텐오일을 첨가한 MR 엘라스토머 시편의 전단력-변위 이력곡선
(변형률 25%, 0.5Hz, 등방성)



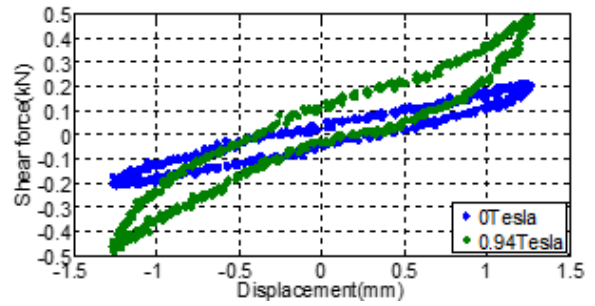
(a) C20N20 (0T)



(b) C20N20 (0.94T)

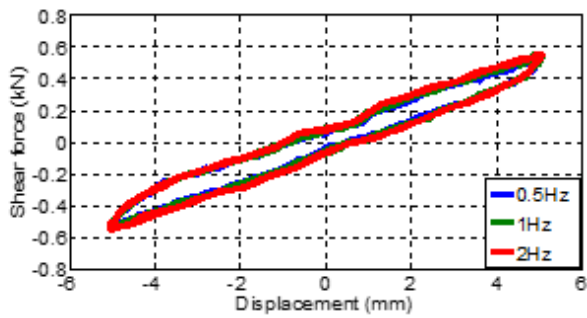


(c) C60N40 (0T)

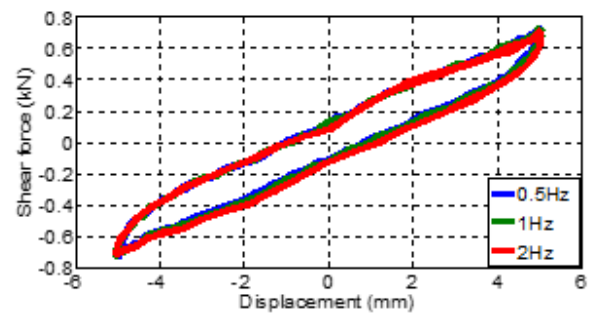


(d) C60N40 (0.94T)

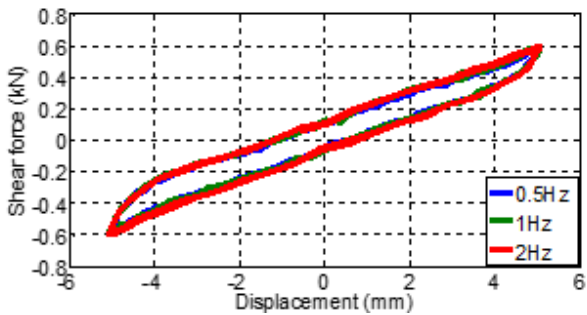
그림 3.11 주파수에 따른 C20N20, C60N40의 전단력-변위 이력곡선 (변형률 100%, 0.5~2.0Hz)



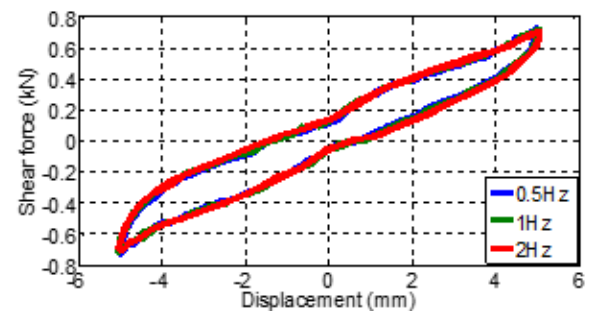
(a) C20N20 (0T)



(b) C20N20 (0.94T)



(c) C60N40 (0T)

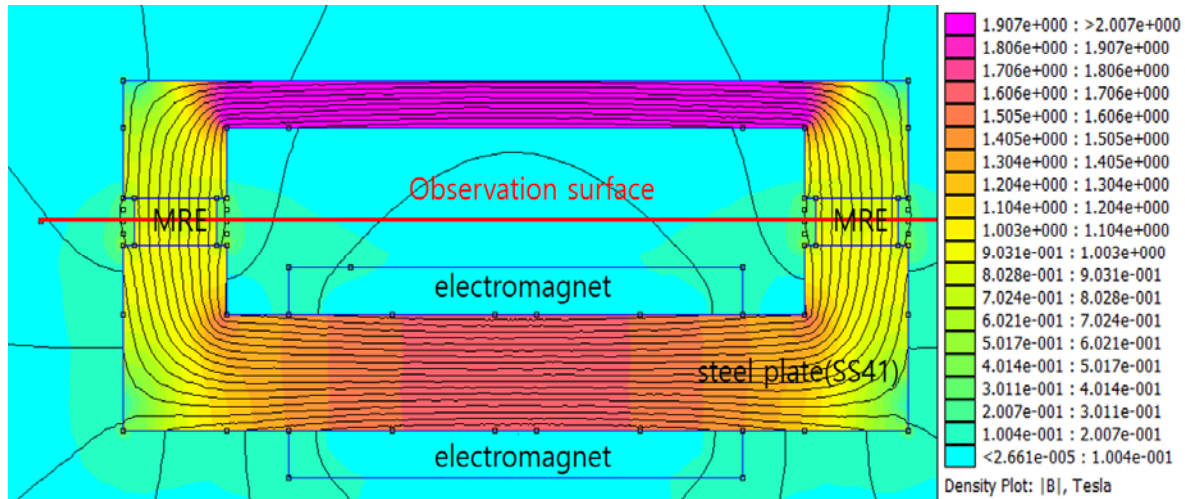


(d) C60N40 (0.94T)

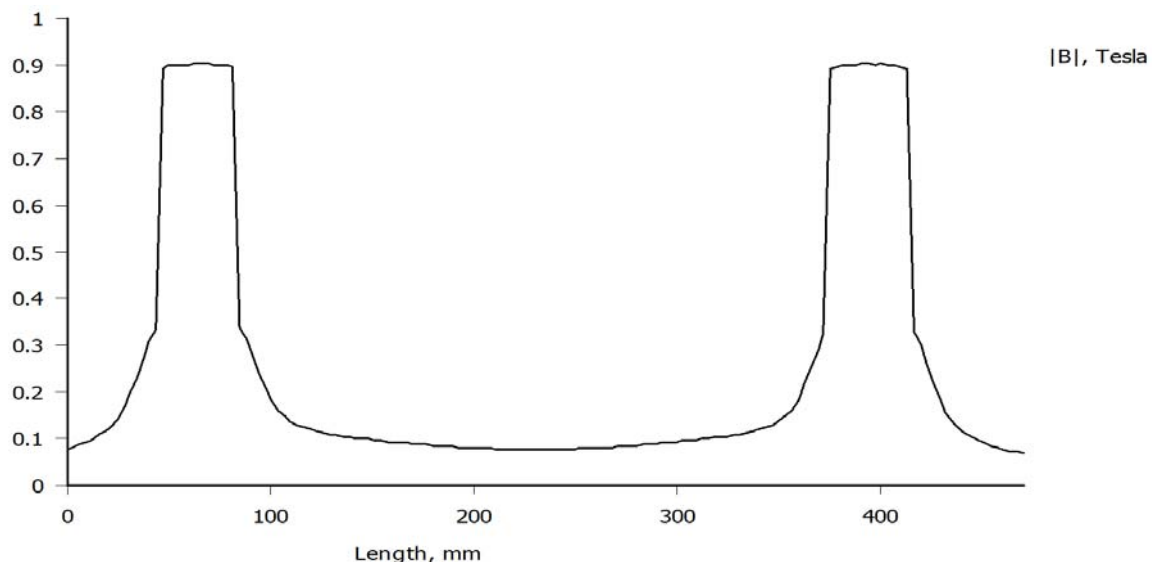
그림 3.12 주파수에 따른 C20N20, C60N40의 전단력-변위 이력곡선 (변형률 100%, 0.5~2.0Hz)

단위성과 2: MR 엘라스토머 면진 성능 향상을 위한 전자기 시스템 설계

- MR 엘라스토머 재료의 자화곡선 확인 및 전자기 수치 해석(Finite Element Method Magnetics; FEMM)을 통한 수치 검증 (그림 3.13)
 - 9,000 에르스텝 (공기 중에서 0.9 Tesla)에서 자기적 포화현상을 관찰함
 - FEMM 수치해석을 통해 전자석 코일, 자성물질(철), MR 엘라스토머를 포함하여 자기 폐회로를 구성함. 또한 목표 자기장인 0.9 Tesla를 만족하는 것을 확인함



(a) 전자석 시스템 자속밀도



(b) 전자석 시스템 자기장

그림 3.13 전자기 수치 해석(Finite Element Method Magnetics ; FEMM)

- 전자석 시스템 설계 및 제작
 - 비현실적인 전자석 시스템의 크기를 줄이기 위해 다수의 MR 엘라스토머들로 분할함. (그림 3.14)
 - MR 엘라스토머를 분할하고 전자석 시스템과 직렬로 연결하도록 제작함(그림 3.14)
 - 직렬 방향으로 회로를 구성하여 면진장치의 거동에 제한이 없도록 형상을 설계하였음. (그림 3.15)
 - 가우스미터를 통해 전자석 코일의 표면과 MR 엘라스토머 측면을 측정하여 수치해석과 실험의 결과값을 비교하였음. (그림 3.16 & 17)
 - 수치해석상 전자석 코일 요구 성능 해석
 - : 코일 표면 자기장 - 0.35T / MR 엘라스토머 측면 자기장 - 0.45T
 - 가우스미터 측정 결과

: 코일 표면 자기장 - 0.56T / MR 엘라스토머 측면 자기장 - 0.49T

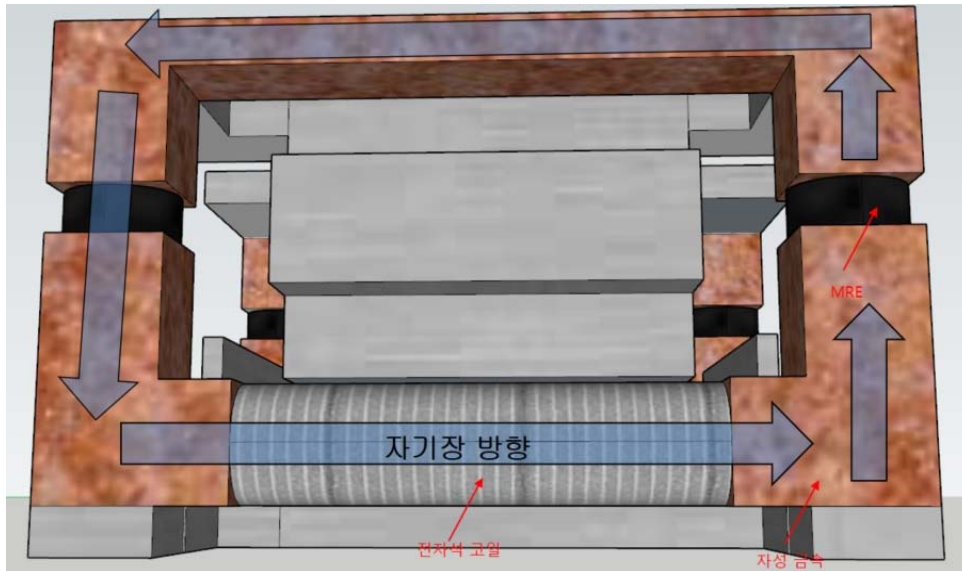


그림 3.14 전자석 시스템 개념도

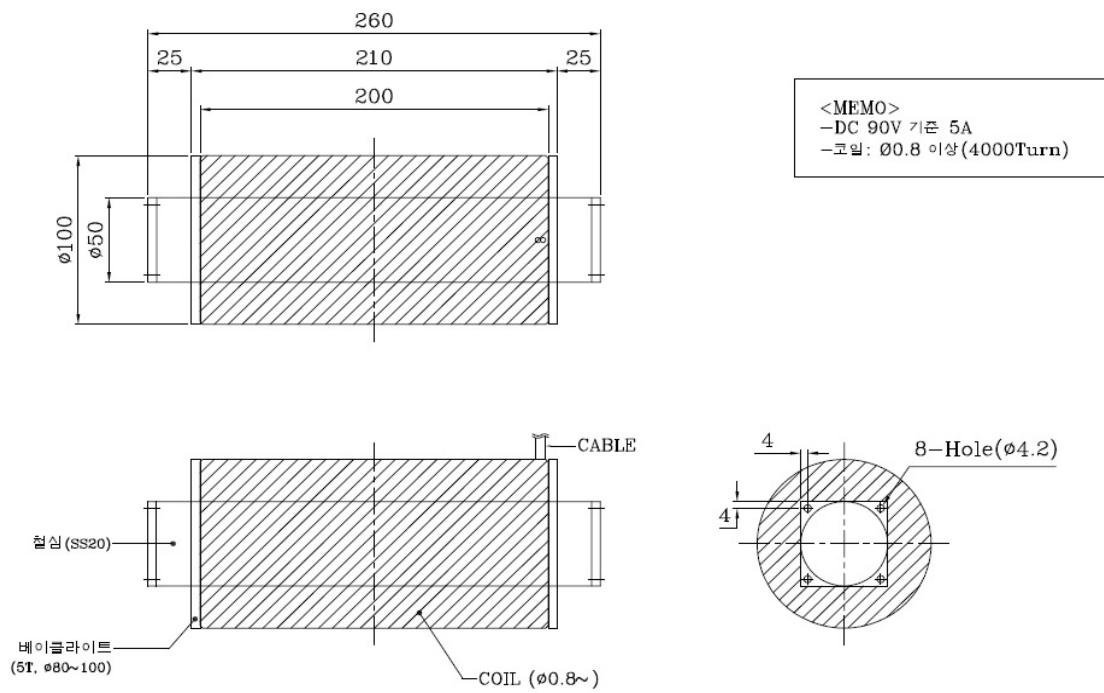


그림 3.15 전자석 코일 도면

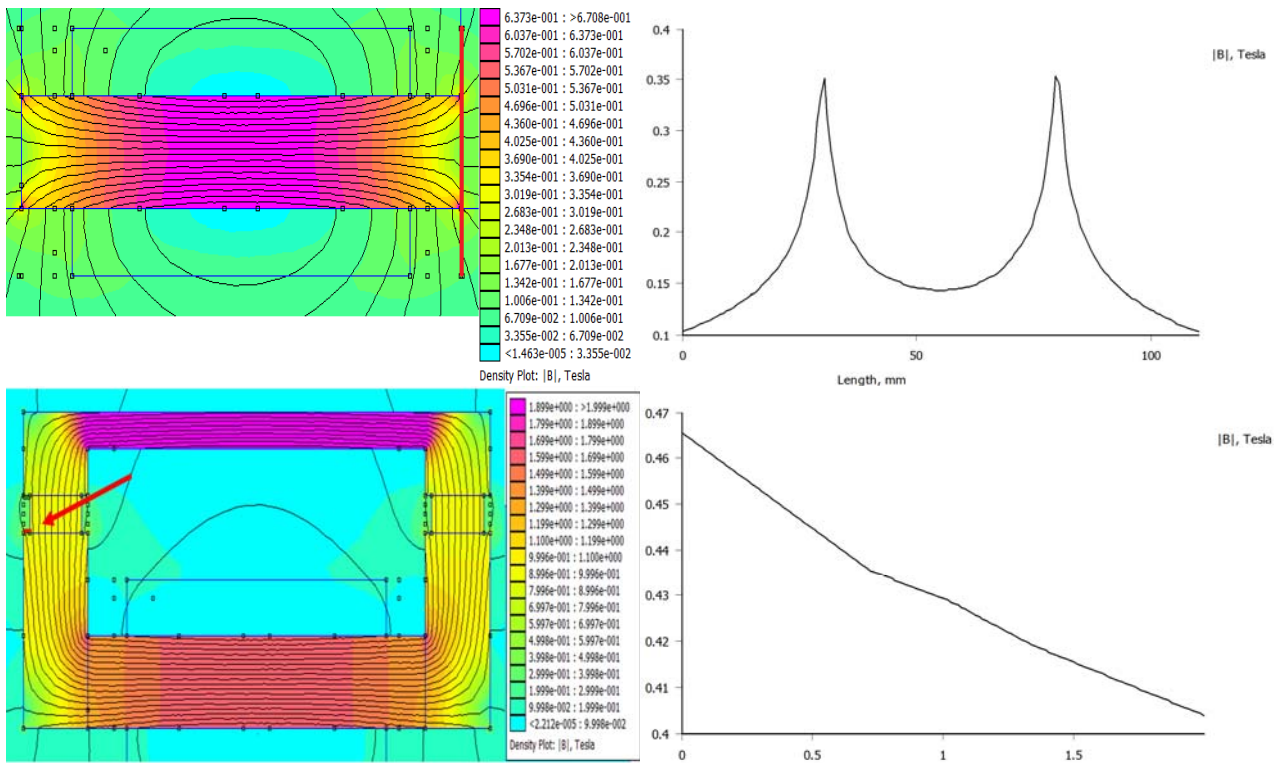


그림 3.16 전자석 코일 요구성능 해석 (코일 표면 자기장 : 0.35T, MRE 측면 : 0.45T)



그림 3.17 제작된 전자석 시스템 및 측정결과 (코일 표면 자기장 : 0.56T, MRE 측면 : 0.49T)

단위성과 3: 스마트 기초격리장치의 통합 설계

- 제안된 전자석 시스템과 롤러 슬라이딩 받침(Isolation Roller Bearing; IRB)의 결합을 통한 새로운 형태의 스마트 기초격리장치 설계
 - IRB와 MR 엘라스토머 면진장치를 결합하여 MR 엘라스토머가 구조물의 하중을 재하 받지 않는 형태의 시스템을 제안함.
 - 기존 IRB 시공 시 생기는 여유 공간을 활용하여 기존 MR 엘라스토머 면진장치에서는 설치하기 힘들었던 자기 시스템을 현실성 있게 배치할 수 있음. (그림 3.18)
 - 롤러/슬라이더부가 있어 수평강성이 거의 0에 달하므로 수평방향의 저항에는 거의 기여하지 않게 됨으로써, MRE의 수평 강성 제어량의 기여분을 극대화시키는 장점이 있음.
 - 기존 MR 엘라스토머를 둘러싸는 전자석의 형상에 비해 직렬로 회로를 구성하여 MR 엘라스토머의 거동을 자유롭게 배치하였음. (그림 3.19 & 20)



그림 3.18 기존 롤러 슬라이딩식 받침(IRB)

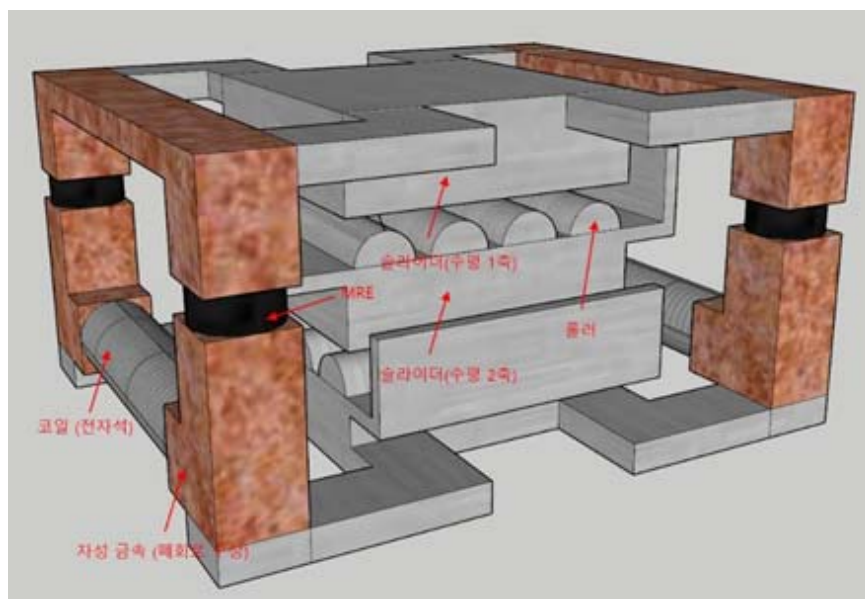
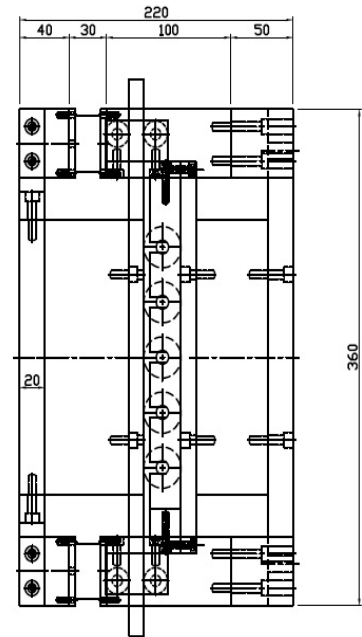
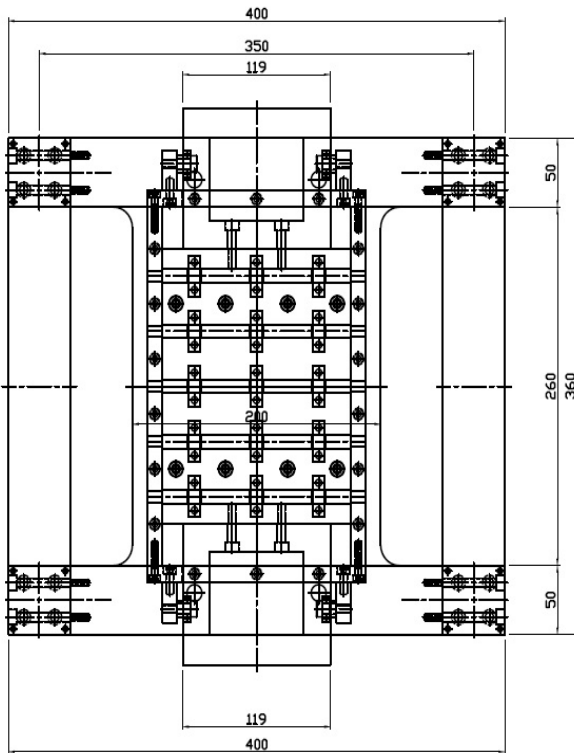
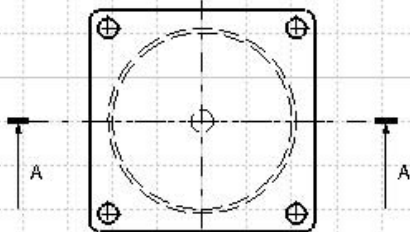


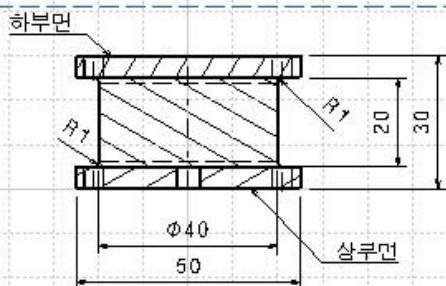
그림 3.19 제안된 면진장치 개념도



MRE PART

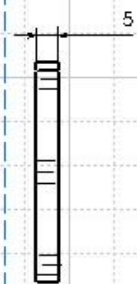
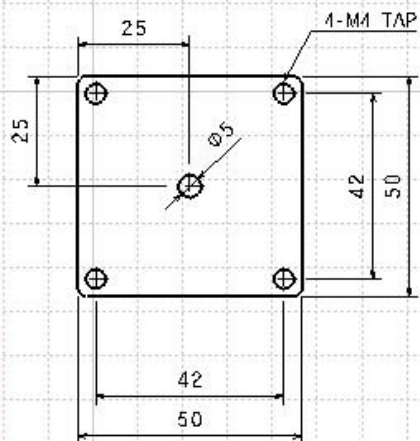


Front view
Scale: 1:1



Section view A-A
Scale: 1:1

PLATE (2EA)



Right view
Scale: 1:1

(상판은 홀 5파이, 아관은 홀 없음)

그림 3.20 IRB-MRE 복합 면진장치 도면

단위성과 4: 통합 설계를 기반으로 한 스마트 기초격리장치 제작

- 실험실 내 실험을 위해 진동테이블의 크기와 사양을 고려한 규모로 시작품 제작함. (그림 3.21)
 - 크기: 40cm X 36cm X 22cm
 - 구성: MRE(4개, $\Phi 4\text{cm} \times 2\text{cm}$), 전자석 폐회로(2개), 롤러/슬라이더
 - 문제점: 발열문제로 인한 장기간 실험이 불가(2차년도 연구 수행 때 개선하여 수행함)

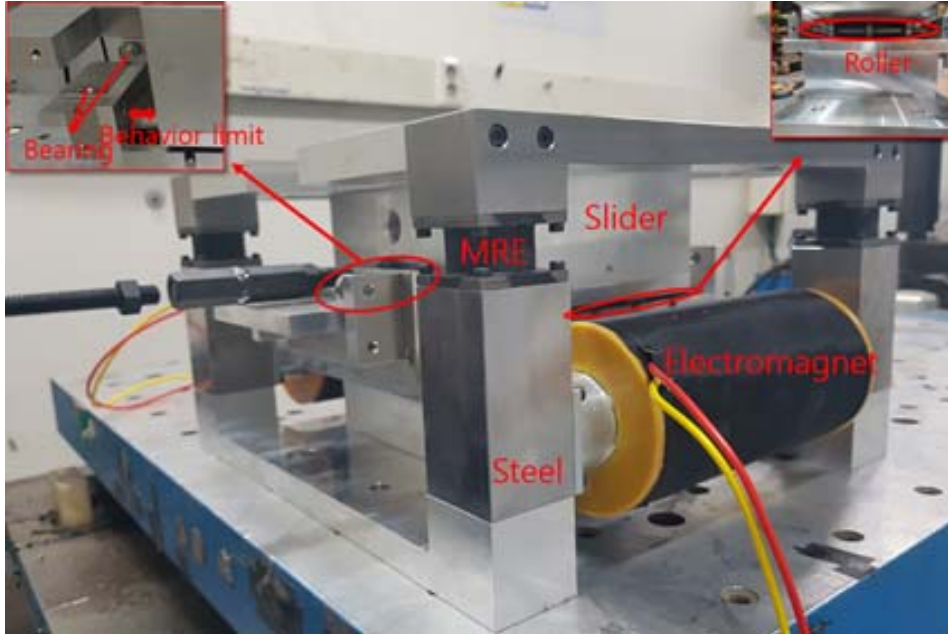


그림 3.21 제작된 스마트 기초격리시스템

- 제작된 시제품의 발열문제를 해결하기 위해 전자석 시스템 교체 (그림 3.22, 표 3.8)
 - 기존의 전자석 시스템 대비 작은 저항값을 가질 수 있도록 구축
 - 기존의 전자석 시스템 대비 지름이 더 큰 코일을 활용

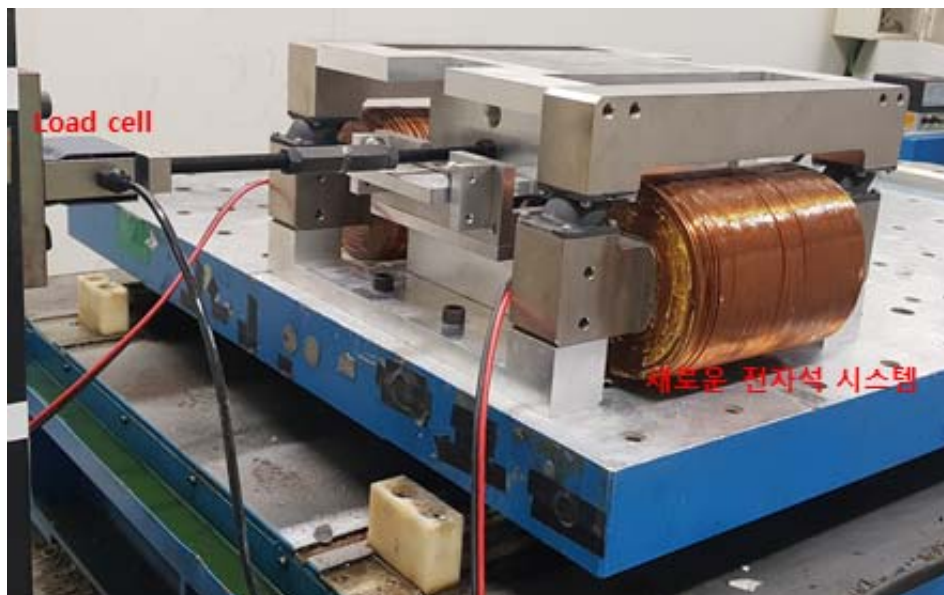


그림 3.22 개선된 전자석 시스템 기반 스마트 기초격리 시스템

표 3.8 기존 및 개선된 전자석 시스템 비교

	턴(회)	저항 (Ω)	코일지름 (mm)
기존 전자석 시스템	4,000	22	0.8
개선된 전자석 시스템	1,830	3.2	2.0

단위성과 5-1: 스마트 기초격리장치를 이용한 동적 특성시험 수행

- 동적 특성시험은 로드셀과 레이저 변위계를 활용하여 거동을 관찰하였음.
- 기존의 전자석 시스템을 이용한 시험에서 전자석 시스템의 발열 문제로 인한 MR 엘라스토머 성능 저하를 고려하여 새로운 전자석 시스템을 이용한 동적 특성시험 수행 및 결과 비교를 수행함. (그림 3.23 & 24, 표 3.9 & 10)
 - 다양한 변형률(25, 50, 75, 100%)에 대하여 동적 특성시험을 수행하여 1차년도 때 수행했던 결과와 비교하여 개선된 전자석 시스템을 통한 스마트 기초격리장치의 MR 효과가 더 크게 나온 것을 확인함.
 - 개선된 전자석 시스템 기반 동적 특성 시험에서 더 큰 MR 효과를 나타냄
 - : 100% 변형률 - 기존 전자석 시스템 14.8% MR 효과 / 개선된 전자석 시스템 22.6% MR 효과
 - 50% / 75% 변형률 하에서 MR 효과 비교시 급격하게 성능이 저하되는 것을 확인함
 - MR 엘라스토머의 변형률이 커질수록 MR 엘라스토머 중앙부를 통과하는 자속밀도가 급격하게 떨어지기 때문에 75% 변형률 이후로 MR 효과가 급격하게 떨어지는 것으로 확인됨
- 전단변형률, 주파수, 전류 변화에 따른 히스테리시스 곡선을 도출함. (그림 3.24 & 25)

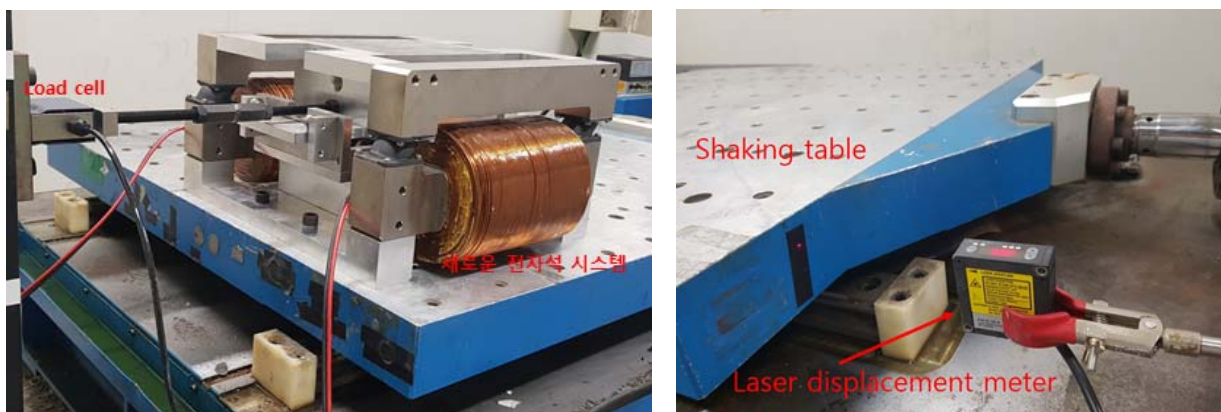
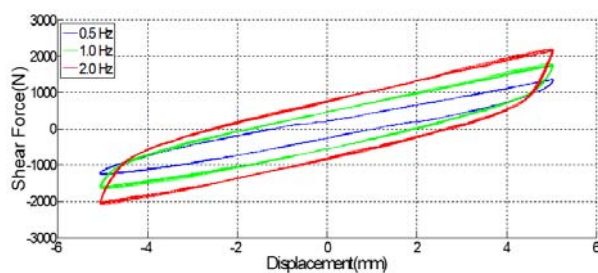


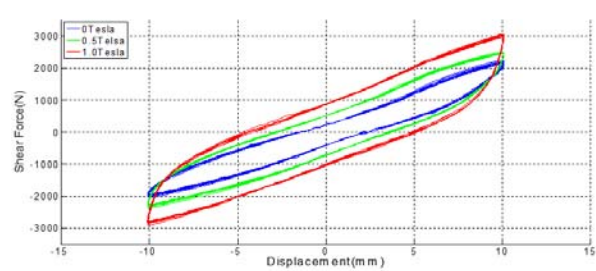
그림 3.23 스마트 기초격리시스템 기반 동적 특성 시험 시스템 구성

표 3.9 시스템의 동적 전단시험 (조화하중) 조건

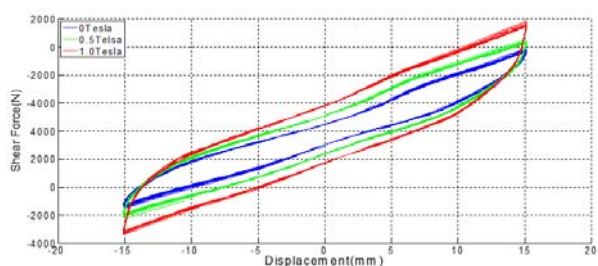
시험	전단 변형률 (%)	주파수 (Hz)	사이클 (회)	전류 (A)	온도
변형률 의존도	25.0, 50.0, 75.0, 100.0	0.5	10	0, 2.5, 5.0	상온
주파수 의존도	100	0.5, 1.0, 2.0			



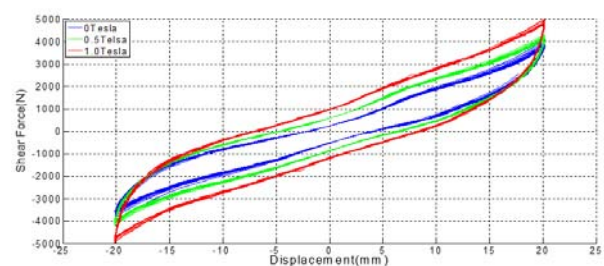
(c) 25.0% (5mm)



(d) 50.0% (10mm)



(e) 75.0% (15mm)

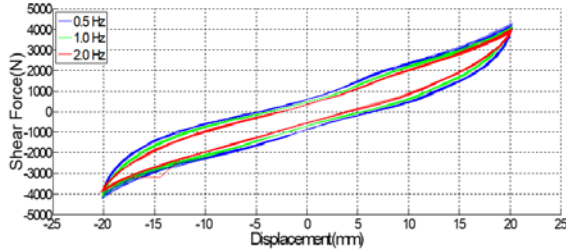


(f) 100% (20mm)

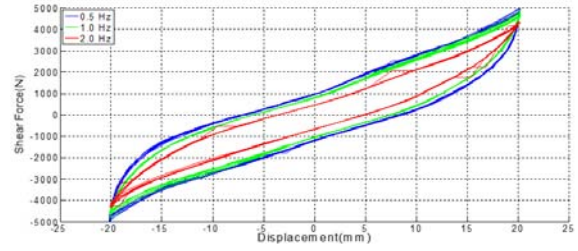
그림 3.24 새로운 전자석 시스템을 이용한 전류 변화간 전단력-변위 이력곡선
(변형률 5 ~ 100%, 0.5Hz)

표 3.10 기존 및 개선된 전자석 시스템 기반 동적 특성시험 결과 (1 Tesla)

변형률 (%)		25	50	75	100
기존 전자석 시스템	수평강성 (kN/m)	137.0 / 169.0	93.0 / 108.6	80.6 / 90.9	79.0 / 90.7
	MR effect (%)	23.4	17.0	12.8	14.8
새로운 전자석 시스템	수평강성 (kN/m)	137.0 / 219.6	93.0 / 147.2	80.6 / 94.9	79.0 / 96.9
	MR effect (%)	60.3	58.3	17.8	22.6



(a) 0.5 Tesla



(b) 1.0 Tesla

그림 3.25 제작된 MRE 면진장치의 주파수 의존도 (변형률 100% / 0.5~2Hz)

단위성과 5-2: 스마트 기초격리장치를 이용한 면진성능평가 수행

- 하이브리드 시뮬레이션을 이용한 면진성능 평가를 수행하였음. 대상 구조물은 2층 건물에 기초층을 더하여 수치해석으로 구성함. (그림 3.26~28, 표 3.11)

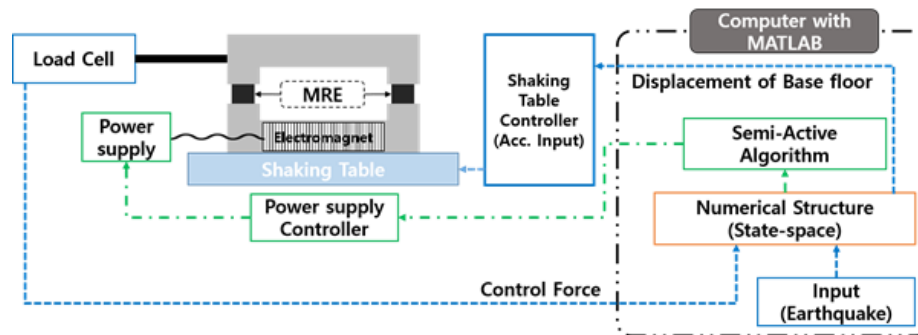
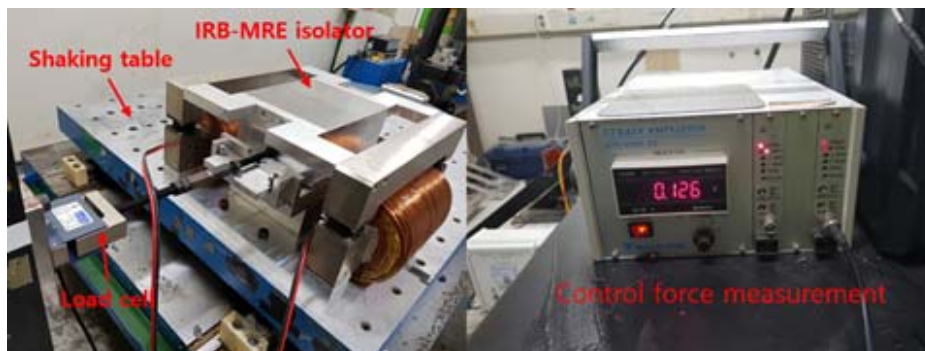
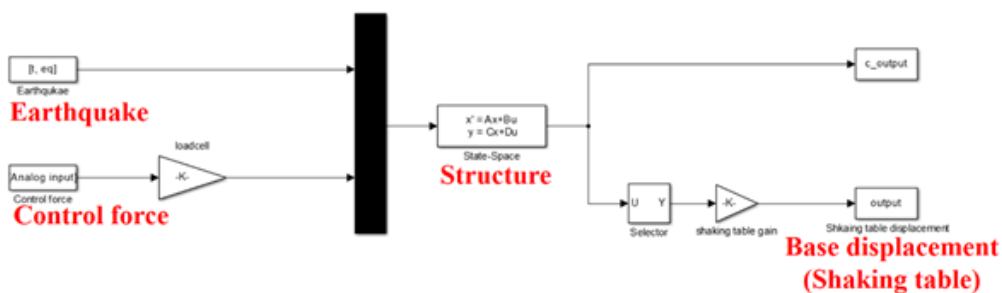


그림 3.26 하이브리드 시뮬레이션 과정의 블록 다이어그램



(a) 실제 실험부



(b) 수치적 모델 구성부

그림 3.27 면진성능 시험 구성

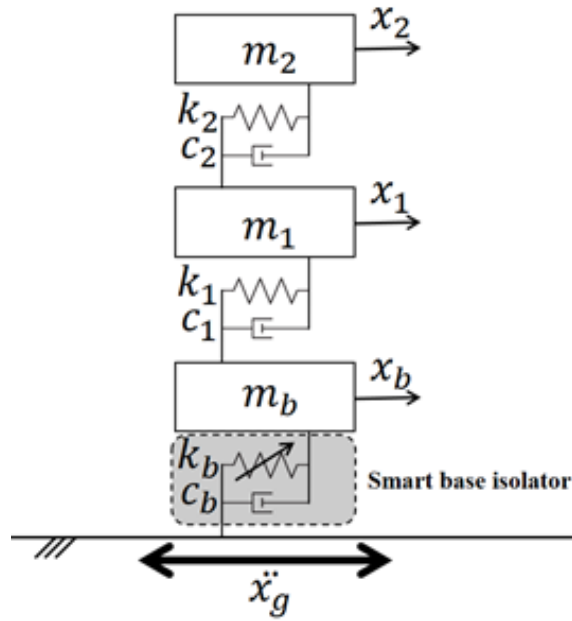
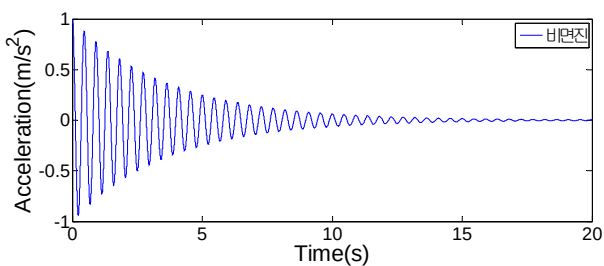


그림 3.28 스마트 기초격리장치가 설치된 2층 구조물(수치해석)

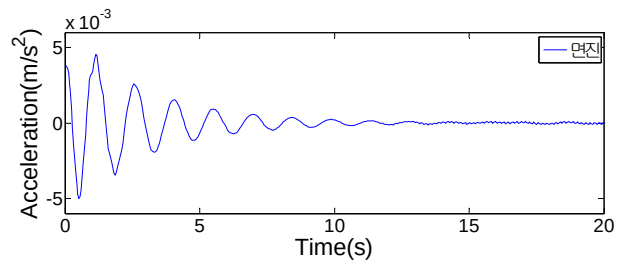
표 3.11 2층 전단 건물 물성치

층	질량 (kg)	수평강성 (kN/m)	감쇠비	1차 고유진동수
기초	5,000	-	2%	2.2 Hz (비면진 시)
1	5,000	2,500		
2	5,000	2,500		

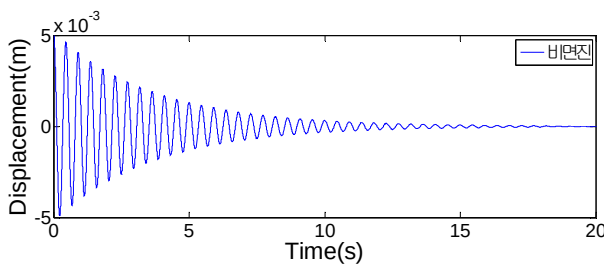
- 구조물 감쇠 성능 효과를 확인하기 위해 면진 시스템에 대한 감쇠 성능 평가를 수행하였고 결과를 비교 (그림 3.29)
 - 대수감소법을 이용하여 면진시스템의 감쇠율을 계산함
 - 면진시스템의 감쇠비: 11.06 % (비면진시스템 (2%) 대비 453% 향상)



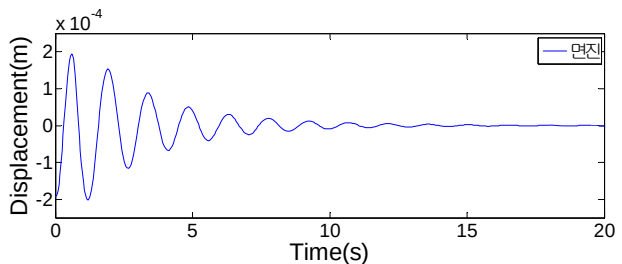
(a) 비면진 시스템 가속도 응답



(b) 면진 시스템 가속도 응답



(c) 비면진 시스템 변위 응답



(d) 면진 시스템 변위 응답

그림 3.29 비면진/면진 시스템 감쇠 성능 평가

- 제안된 면진장치의 면진성능평가를 수행하기 위해 대표 지진하중에 대해 passive/semi-active control 수행하여 구조물의 응답을 비교
 - 대표지진하중에 대한 면진성능 평가를 수행하였음. (그림 3.30)
 - 대표지진하중: El Centro, Kobe, Hachinohe, Northridge and Loma Prieta 지진하중
 - Passive/semi-active control에 따른 구조물 2층 가속도 응답, Base-2층의 상대변위 차에 따른 응답, 최대 Base층 변위 응답을 비교하였음. (그림 3.31 & 32, 표 3.12 - 14)
 - Semi-active control은 Fuzzy algorithm 기반으로 수행됨.
 - Passive control
 - : Power on - 전류를 인가한 상태로 면진성능을 수행함.
 - : Power off - 전류를 인가하지 않은 상태로 면진성능을 수행함.
 - Semi-active control (표 3.12)
 - : Semi-active 'Fuzzy' algorithm - 입력지진의 속도, Base층의 속도, 2층-base층 상대변위에 따른 자기장 인가/미인가 알고리즘을 활용하여 면진성능을 수행함.
 - Fuzzy control: 퍼지 제어는 불확실성과 부정확성을 수용할 수 있는 비선형 제어 법칙을 지정하기 위한 간단하고 강력한 방법임. 퍼지 컨트롤러는 수학적 모델의 분석에 의존하지 않고, 외부 하중 및 구조물 응답 센서에서 오는 입력 데이터의 불확실성을 기존의 제어 이론보다 쉽게 처리할 수 있는 장점이 있음. 퍼지 제어는 IF-THEN 규칙을 입력 및 출력을 연결하는 인터페이스로 사용함. 즉, 연속 입력을 언어 변수로 변환한 다음 비정형화를 통해 숫자값으로 변환함.
 - 진동테이블의 규모를 고려하여 하이브리드 시뮬레이션 기반으로 면진성능 평가를 수행함 (그림 3.31 & 32, 표 3.13 - 15): 2층 최대 가속도 응답, Base-2층 상대변위 응답, Base층 변위 응답에 대한 결과 비교를 수행함
 - 최대 가속도 응답 저감 비율: Hachinohe 지진 발생 시 48.01% 저감
 - Base-2층간 상대변위 응답 저감 비율: Hachinohe 지진 발생 시 866.09% 저감
 - 최대 변위 Base층 저감 비율: Hachinohe 지진 발생 시 42.84% 저감

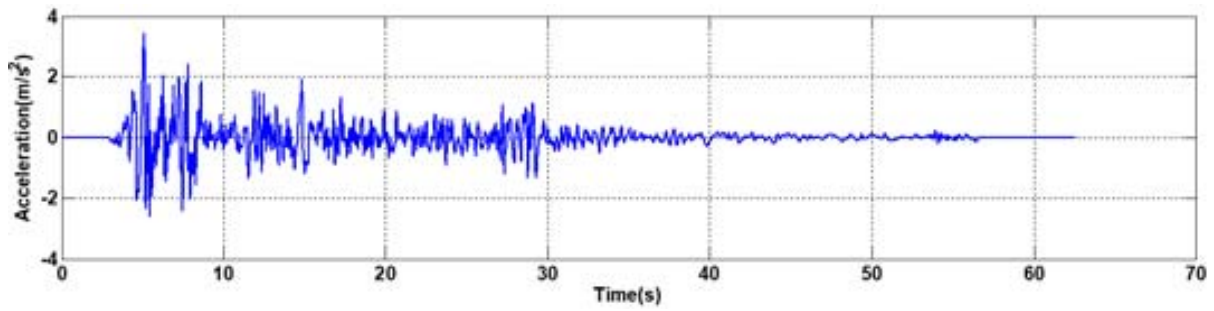
표 3.12 Fuzzy 알고리즘 규칙

변수	Indicated form							
$x_2 - x_b$	N	N	N	N	P	P	P	P
x_b	N	P	N	P	N	P	N	P
$\dot{x}_g$	P	P	N	N	P	P	N	N
전류	L	S	L	S	S	L	S	L

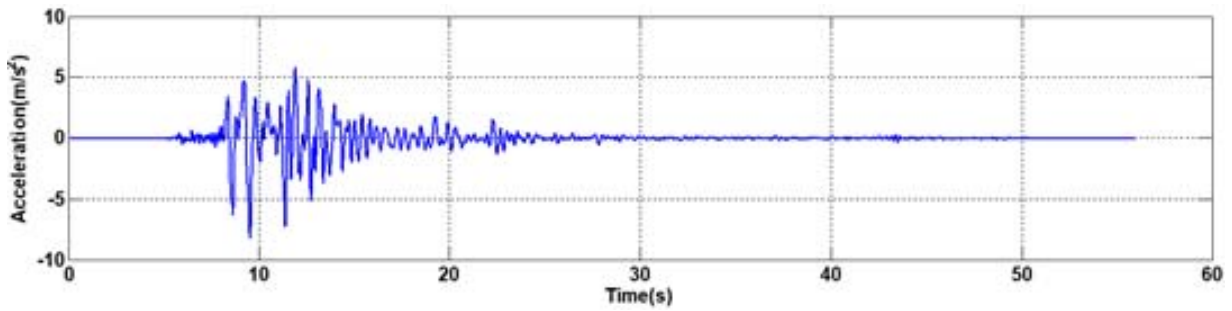
여기서, N: negative, P: positive, L: large 그리고 S: small을 나타냄.

표 3.13 2층 최대 가속도 응답

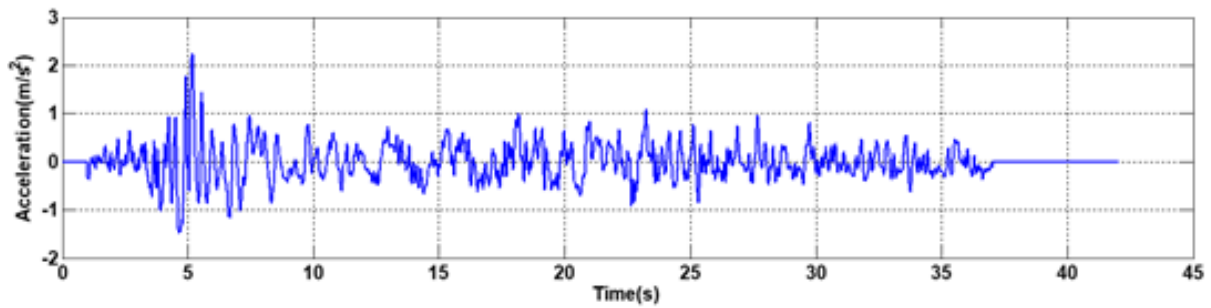
지진	Power off (m/s^2)	Power on (m/s^2)	Fuzzy (m/s^2)
El Centro	0.2307	0.2210	0.1703
Kobe	0.1957	0.1976	0.1840
Hachinohe	0.2108	0.1944	0.1096
Northridge	0.2477	0.2271	0.2341
Loma Prieta	0.1779	0.1734	0.1694



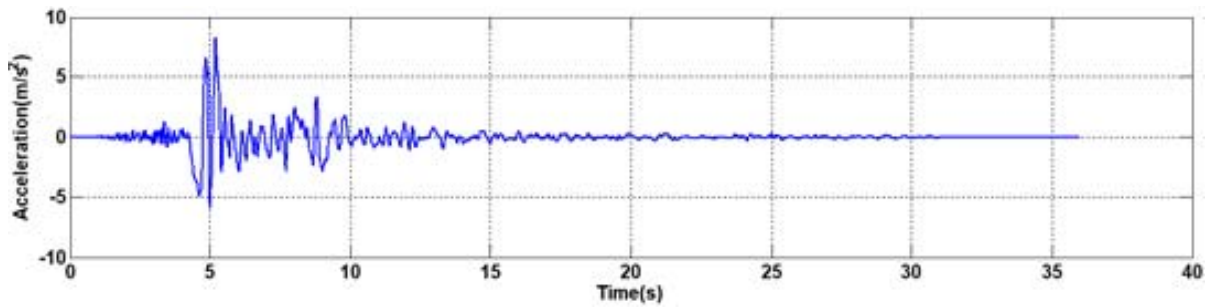
(a) El Centro 지진 (1940)



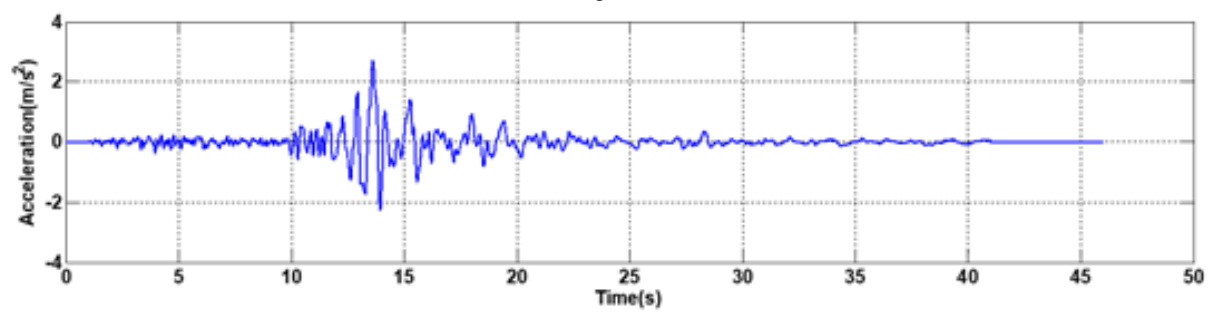
(b) Kobe 지진 (1995)



(c) Hachinohe 지진 (1968)

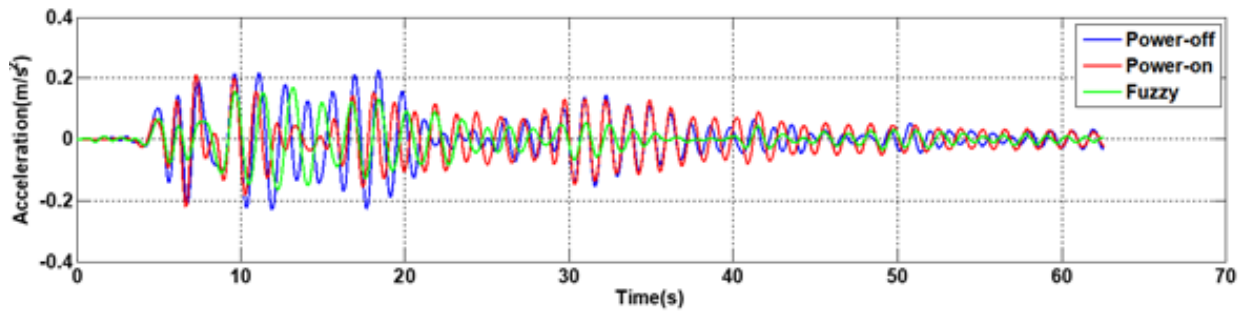


(d) Northridge 지진 (1994)

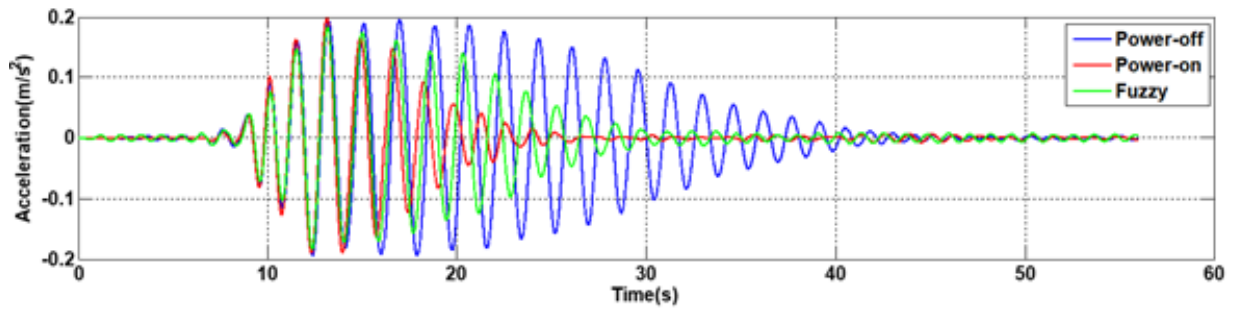


(e) Loma Prieta 지진 (1989)

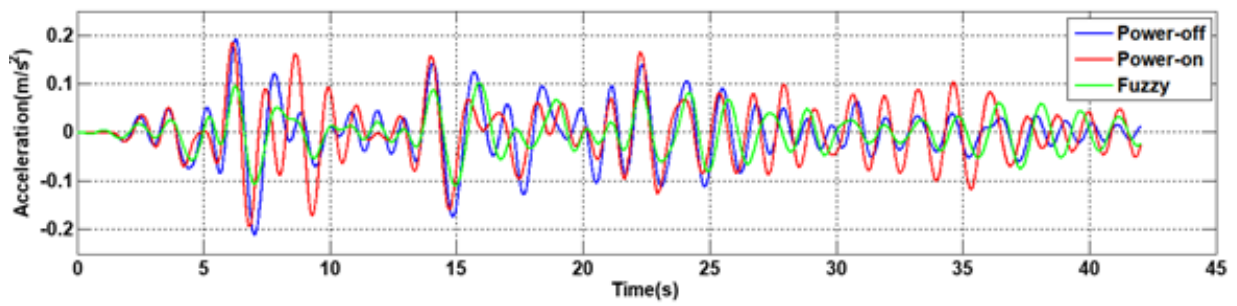
그림 3.30 역사 지진 가속도 이력



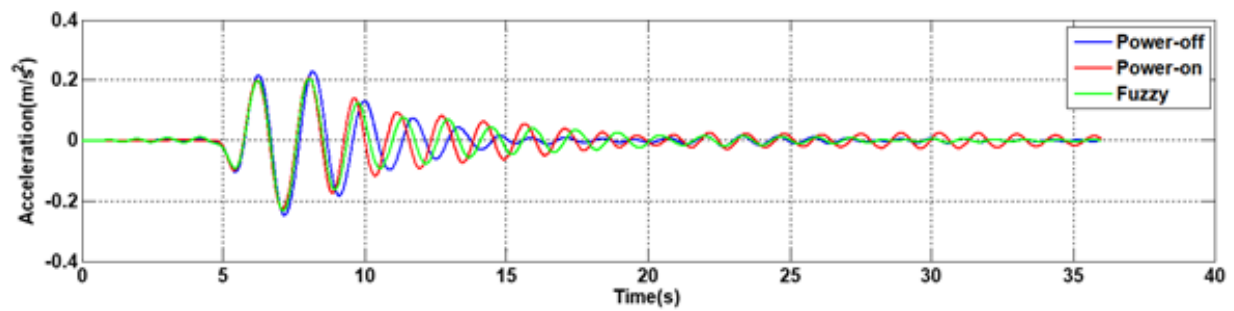
(a) El Centro 지진



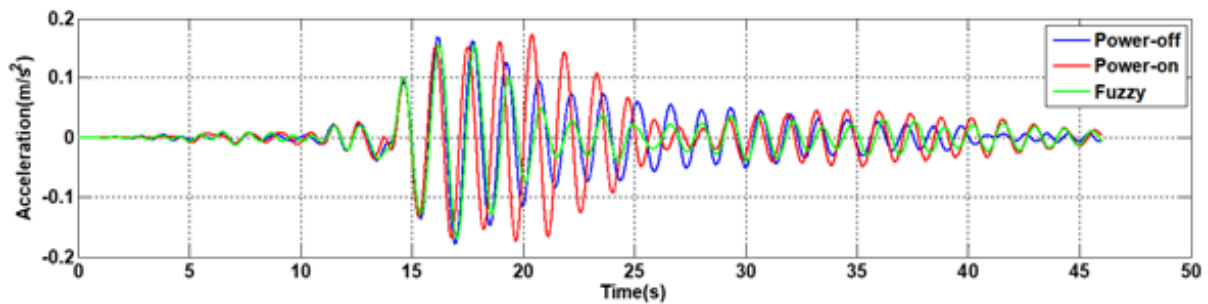
(b) Kobe 지진



(c) Hachinohe 지진

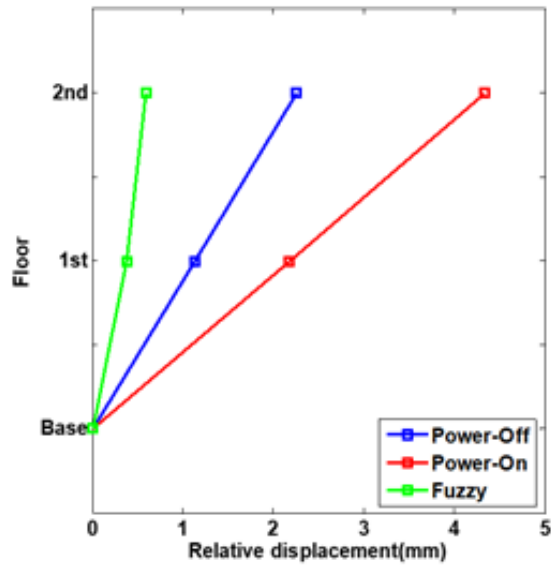


(d) Northridge 지진

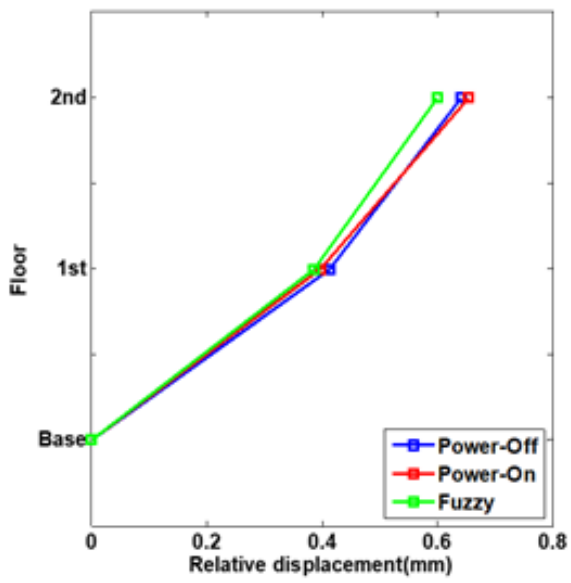


(e) Loma Prieta 지진

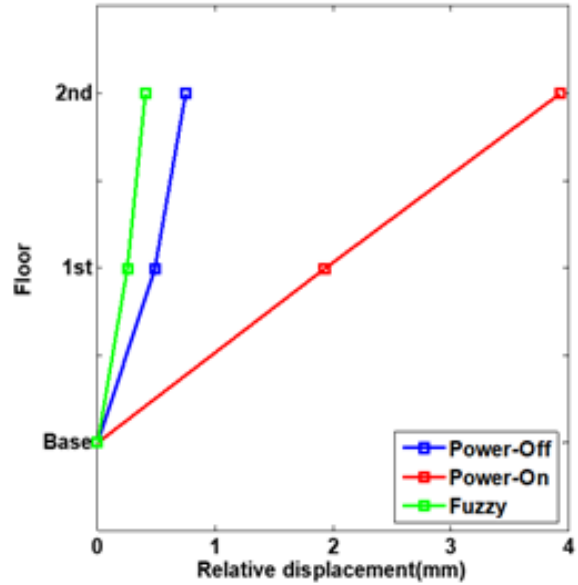
그림 3.31 지진 하중 시 2층 가속도 응답(passive/semi-active 제어)



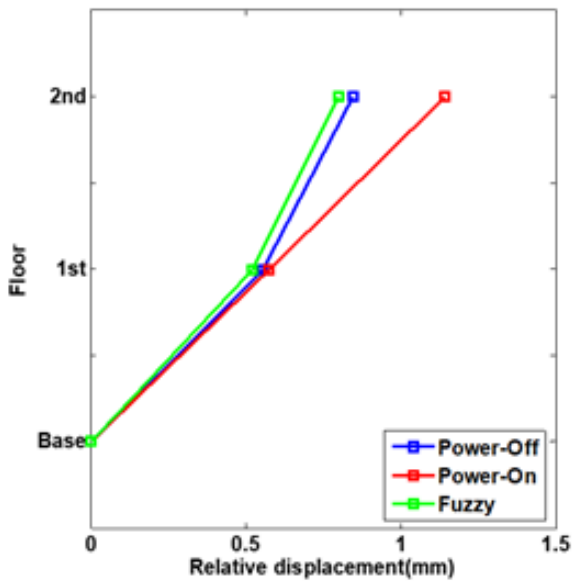
(a) El Centro 지진



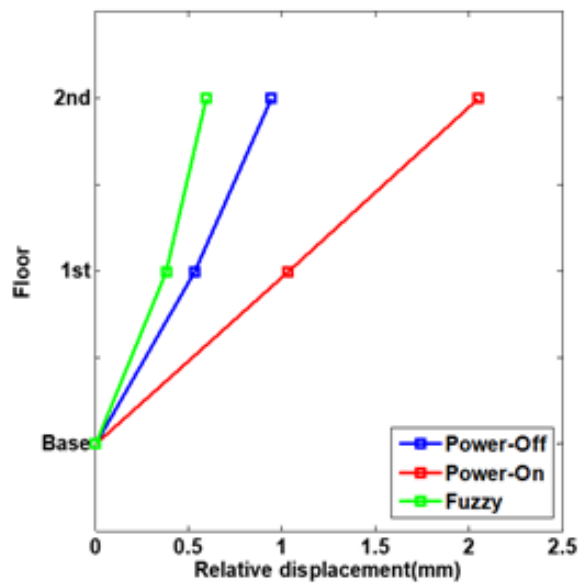
(b) Kobe 지진



(c) Hachinohe 지진



(d) Northridge 지진



(e) Loma Prieta 지진

그림 3.32 최대변위 발생 지점에 대한 상대 변위 응답값

표 3.14 Base-2층 최대 상대변위 발생 시 층간 변위

지진		Power off (mm)	Power on (mm)	Fuzzy (mm)
El Centro	Base-1층	1.133	2.182	0.383
	1층-2층	1.122	2.161	0.209
	Base-2층	2.255	4.342	0.592
Kobe	Base-1층	0.414	0.398	0.386
	1층-2층	0.228	0.258	0.215
	Base-2층	0.642	0.656	0.602
Hachinohe	Base-1층	0.487	1.934	0.260
	1층-2층	0.261	1.998	0.147
	Base-2층	0.749	3.932	0.407
Northridge	Base-1층	0.556	0.576	0.522
	1층-2층	0.290	0.567	0.278
	Base-2층	0.846	1.142	0.800
Loma Prieta	Base-1층	0.530	1.032	0.382
	1층-2층	0.411	1.022	0.210
	Base-2층	0.941	2.054	0.592

표 3.15 최대 base층 변위 응답

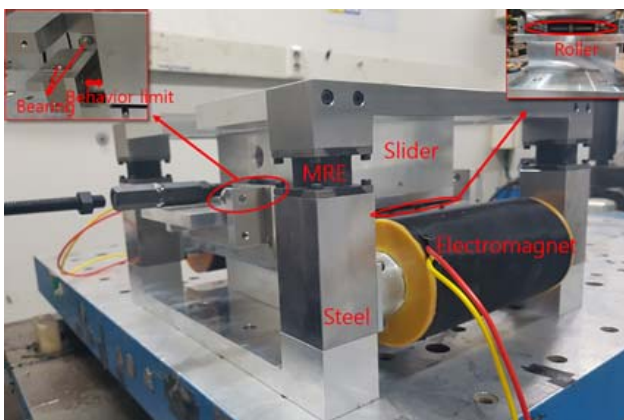
지진	Power off (mm)	Power on (mm)	Fuzzy (mm)
El Centro	13.3102	11.2429	13.2748
Kobe	16.7403	14.7456	14.7838
Hachinohe	12.2949	10.4744	7.0274
Northridge	23.3793	18.9687	19.1506
Loma Prieta	12.3931	9.6321	12.1488

단위성과 6: 스마트 기초격리장치의 내구성 평가

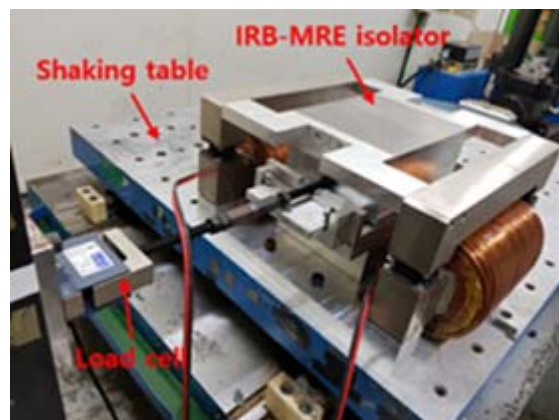
- 스마트 기초격리장치의 발열 문제 해결
 - 전자석 시스템의 개선을 통해 기존에 발생하였던 발열 문제를 해결함. (그림 3.33, 표 3.16)

표 3.16 기존 및 개선된 전자석 시스템 비교

	턴(회)	저항 (Ω)	코일지름(mm)
기존 전자석 시스템	4,000	22	0.8
개선된 전자석 시스템	1,830	3.2	2.0



(a) 기존의 전자석 시스템



(b) 개선된 전자석 시스템

그림 3.33 기존의 전자석 시스템과 발열문제를 개선한 전자석 시스템

- 기존 및 개선된 전자석 시스템 기반 동적 특성시험을 수행하여 MR 효과를 비교함 (표 3.17)
- 기존의 전자석 시스템 대비 전체적으로 MR 효과가 향상됨을 확인

- : 변형률 50% 이내에서는 약 3배에 가까운 MR 효과의 증가가 있었으며 75% 및 100%에서는 약 1.5배의 MR 효과 증가를 확인함
- : 변형률이 커질수록 상부 구조와 하부 구조의 상대 변위가 커지게 되어 자기장의 흐름이 불균일하며 이로 인한 자기장 세기의 변화가 클 것이라 예상

표 3.17 기존 및 개선된 전자석 시스템 기반 동적 특성시험 결과 (1 Tesla)

변형률 (%)		25	50	75	100
기존 전자석 시스템	수평강성 (kN/m)	137.0 / 169.0	93.0 / 108.6	80.6 / 90.9	79.0 / 90.7
	MR effect (%)	23.4	17.0	12.8	14.8
새로운 전자석 시스템	수평강성 (kN/m)	137.0 / 219.6	93.0 / 147.2	80.6 / 94.9	79.0 / 96.9
	MR effect (%)	60.3	58.3	17.8	22.6

- 일정한 주기에 따른 반복하중 재하에 따른 고무 파단 (그림 3.34)
 - 다양한 변형률(5%, 12.5%, 25%, 50%, 75%, 100, 150%) 하에서 반복하중 재하 시험 수행 (10~15사이클/변형률 조건)
 - 반복 하중에 대한 MR 엘라스토머 기반 스마트 기초격리장치 내구성 평가 수행
 - : 다양한 조건 하에서 10~15회 사이클 주기로 실험을 연속적으로 수행
 - : 변형률(5%, 12.5%, 25%, 50%, 75%, 100%, 150%) / 주파수 (0.5Hz, 1.0Hz, 2.0 Hz) / 자기장 (0 Tesla)
 - : 일반적으로 지진의 지속 시간이 1분 내외인 점을 감안하면 제안된 MR 엘라스토머 기반 스마트 기초격리장치의 내구성이 적절한 것으로 판단됨 (실험시간 약 90분 / 변형률 150% 하에서 파단이 발생함)
 - MR 엘라스토머와 기초격리장치 사이의 접촉부에서 파단 발생 (그림 3.35)

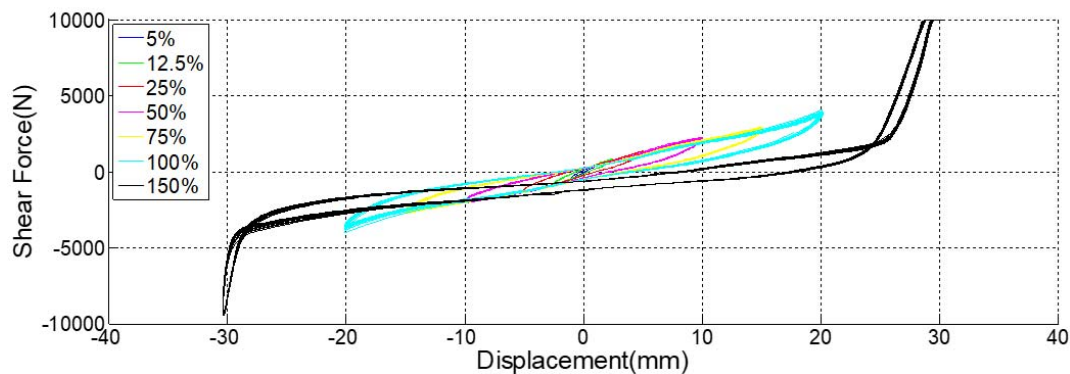


그림 3.34 내구성 평가를 위한 변형률 변화간 전단력-변위 이력곡선 (0 A)

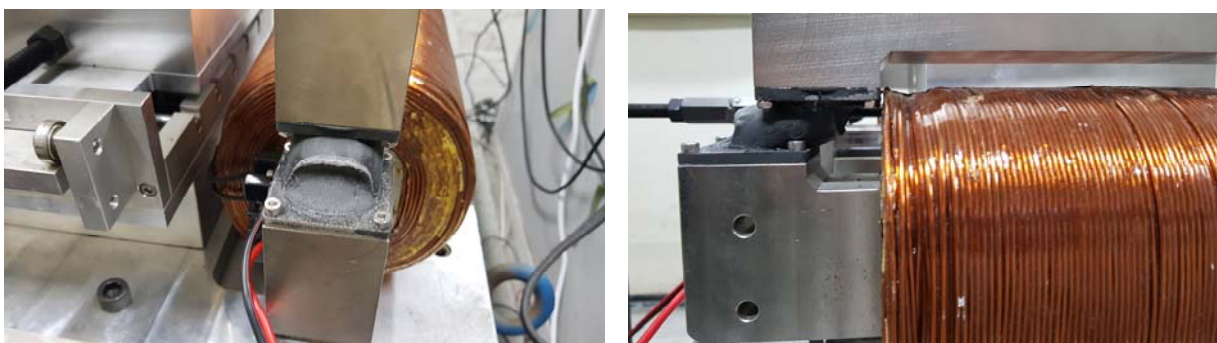


그림 3.35 150% 변형률 반복하중 재하 시험 중 MR 엘라스토머 파단

■ 외부 환경 노출시 문제 해결 방안

- 기초격리장치 롤러슬라이드부의 유지관리 방안

- MRE 구동을 위해 전자석 시스템 부분 이외에는 자성에 영향을 받지 않는 알루미늄으로 제작하며, 이는 공기중에 장시간 노출 되어도 표면상의 문제는 발생하지 않음
- 마찰이 최소화 되어야하는 구름부의 롤러는 주기적인 유지관리를 통해 문제 발생 최소화

- MR 엘라스토머의 유지관리 방안

- 고무와 철가루 및 다양한 재료들이 복합적으로 구성되어 있으며, 기초격리장치의 핵심 파트이므로 세심한 관리가 필요함
- 전문가 자문을 통하여 고무 경화 방지 마련 검토
 - : 고무 노화방지제를 활용한 고무 경화 방지
 - : 자외선 노출 시에 변색이 발생하지 않고, 굴곡균열, 표면균열을 방지할 수 있음
- 스마트 기초격리장치 시제품 설계시 MR 엘라스토머 부분의 내구성이 가장 취약함을 고려하여 교체할 수 있도록 제작하였음
- 실제로 설치되어 외부 환경에 노출 될 시에는 주기적인 관리를 통하여 MR 엘라스토머의 성능 저감시 교체를 통하여 지속적인 관리 필요

3.2 연구 결과

1. 기술적 성과

■ 새로운 형태의 반능동 면진 시스템 개발

- 기존 지진격리 시스템의 경우 수동 특정 주파수대의 지진을 목표로 설계되기 때문에 예기치 못한 주파수 대역의 지진에 대해서는 취약함
- 제안된 MR 엘라스토머 기반 스마트 기초격리시스템의 경우 반능동 제어가 가능하기 때문에 기존 지진격리 시스템 대비 다양한 주파수 대역의 지진에 대해 구조물의 피해를 줄일 수 있음

■ 면진 성능 향상을 위한 MR 엘라스토머 최적 배합비 산정

- 철 부피비율에 따른 MR 효과 비교: 35%에서 가장 큰 MR 효과를 나타냄 (100% 변형률에서 22.0% MR 효과)
- 등방성/이방성 MR 엘라스토머에 대한 MR 효과 비교
 - 철 부피비 35% (100% 변형률에서 등방성 MR 엘라스토머 - 19.4%, 이방성 MR 엘라스토머 - 22.0%)
- 첨가제(카본블랙/나프텐오일) 부피비에 따른 최적 MR 엘라스토머 배합비 산정
 - 카본블랙 60phr, 나프텐오일 40phr 배합 / 100% 변형률에서 33.5% MR 효과

■ MR 엘라스토머 면진성능 향상을 위한 전자석 시스템 설계

- MR 엘라스토머가 자기적 포화가 이루어지는 0.9 Tesla 부근의 자속 밀도를 달성하고, MR 엘라스토머의 거동을 방해하지 않으며 현실적으로 시공이 가능한 형상의 전자석 시스템 설계
 - 전자석 코일의 표면 요구 자기장(수치해석): 0.35T / 전자석 코일의 자기장(실험): 0.56T
 - MR 엘라스토머 측면 요구 자기장(수치해석): 0.45T / MR 엘라스토머 측면 자기장(실험): 0.49T

■ 스마트 기초격리장치의 통합 설계 및 성능평가

- 기존의 Isolation Roller Bearing (IRB) 시스템에 전자석 시스템을 결합한 새로운 형태의 스마트 기초격리장치 설계 및 제작
- ISO 22762-1 규정에 따라 면진 받침의 전단 탄성계수 100%를 고려한 동적 특성시험 및 면진 성능 평가 수행
- 기존의 IRB 시스템이 수직하중을 지지함으로써 MR 엘라스토머에 압축하중의 전달이 없음
- 롤러/슬라이딩식 받침의 수평강성이 0에 가깝기 때문에 MR 엘라스토머의 수평강성 제어량의 기여분을 극대화

2. 경제적 성과

■ 새로운 형태의 스마트 기초격리장치 설계 및 제작

- 기존의 MR 엘라스토머 기반 면진장치의 현실 적용성이 떨어지는 문제점을 해결하기 위하여 기존의 IRB 시스템에서 발생하는 여유 공간을 활용한 전자석 시스템 구축을 통한 새로운 형태의 스마트 기초격리장치 제작
- 구조물의 내진보강기법으로 면진장치를 활용한 경우 면진층에 설치된 면진장치가 지진에너지를 흡수하기 때문에 상부구조의 부재 단면을 줄일 수 있어서 경제적 측면에서 유리함
- 면진장치를 활용하게 되면 원전 구조물뿐만 아니라 여러 사회기반 시설물에 적용이 가능함

3.3 연구 개발 성과

1. 국내외 논문 게재

번호	논문명	학술지명	주저자명	호	SCI 여부 (SCI/비SCI)	게재일
1	Design and Experimental Study of an L Shape Piezoelectric Energy Harvester	Shock and Vibration	In-Ho Kim	2017	SCI급	2017.10.18
2	Fabrication and Characterization of Natural Rubber-Based Magnetorheological Elastomers at Large Strain for Base Isolators	Shock and Vibration	Chan-Woo Lee	2018	SCI급	2018.01.04
3	Feasibility study of an adaptive mount system based on magnetorheological elastomer using real-time hybrid simulation	Journal of intelligent material systems and structures	Seung-Hyun Eem	00 (0)	SCI급	2018.01.29
4	A comprehensive framework for seismic risk assessment of urban water transmission networks	International Journal of Disaster Risk Reduction	Sungsik Yoon	31	SCI급	2018.09.18.

2. 국내 및 국제학술회의 발표

번호	회의 명칭	발표자	발표 일시	장소	국명
1	The 13th International Workshop on Advanced Smart Materials and Smart Structures Technology	Sungsik Yoon	2017.07.22	도쿄	일본
2	2017 지진공학회	윤성식	2017.09.15.	경주	대한민국
3	2017 가을 토목학회 정기학술대회	윤성식	2017.10.19.	부산	대한민국
4	2017 KKHTCNN Symposium on Civil Engineering	Chan-Woo Lee	2017.11.02.	타이페이	대만
5	2017 KKHTCNN Symposium on Civil Engineering	Jeong-Hee Kim	2017.11.03.	타이페이	대만
6	2017 KKHTCNN Symposium on Civil Engineering	Sungsik Yoon	2017.11.03.	타이페이	대만
7	The 14th International Conference on Motion and Vibration	Junghoon Lee	2018.08.07.	대전	대한민국
8	The 7th World Conference on Structural Control and Monitoring, 7WCSCM	Sungsik Yoon	2018.07.23.	칭타오	중국
9	2018년도 추계 복합재료학회	황용문	2018.11.23.	대전	대한민국

3. 지식재산권(특허, 실용신안, 의장, 디자인, 프로그램)

번호	명칭	국명	출원			등록			기 여 율
			출원인	출원 일	출원번호	등록인	등록 일	등록번호	
1	면진 장치	대한 민국	이찬우, 김인호, 정형조	2018. 01.05	10-2018-0001789				100
2	면진 장치	대한 민국				이찬우, 김인호, 정형조	2018. 12.05	10-1928017-0000	100

4. 전문 연구 인력 양성

번호	분류	기준연도	학위별	성별		지역별
			석사	남	여	대전
1	석사	2018	✓	✓		✓
2	석사	2018	✓		✓	✓

제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

4.1. 목표 달성도

1. 정성적 연구목표 달성도

	핵심성과	단위성과	평가목표 및 착안점	결과물	달성도
1차년도 (2017.04 ~ 2017.12)	면진성능 향상을 위한 MR 엘라스토머 최적 배합비 산정	철 부피비율에 따른 MR 효과 비교	MR 엘라스토머 동적 특성시험을 통한 MR 효과 비교 수행 (철 부피비 35%, 변형률 100%에서 22.0% MR 효과)	최적 배합비 산정(부피비 백분율) 고무 : 39.4 철 : 35.0 카본블랙 : 8.0 오일 : 15.8 기타 : 1.8 100% 변형률 33.5% MR 효과 달성	100%
		MR 엘라스토머 제작에 따른 MR 효과 비교 (등방성/이방성)	등방성/이방성 MR 엘라스토머의 MR 효과 비교: 철 입자 부피비 35%, 변형률 100%에서 등방성 MR 엘라스토머 - 19.4% / 이방성 MR 엘라스토머 22.0% MR 효과		
		MR 효과를 향상시키기 위해 첨가제의 비율에 따른 MR 효과 비교	첨가제 비율에 따른 MR 효과 비교 수행 (카본블랙 60phr, 나프텐오일 40phr 샘플, 변형률 100%에서 33.5% MR 효과)		
	MR 엘라스토머 면진성능 향상을 위한 전자석 시스템 설계	전자기 시스템의 수치해석 및 실험	표면 요구 자기장 0.35T 목표 자속밀도 0.9T	전자석 표면 요구 자기장 (0.35T) 이상의 자기장 달성 : 0.59T (110V, 5A) 목표 자속밀도 0.9T 달성	100%
	스마트 기초격리장치 의 통합 설계 및 제작	기초격리 시스템과 전자석 시스템 통합 설계	IRB 시스템이 수직하중지지 MR 엘라스토머는 수평 방향으로 제어	특허 출원 및 등록	100%
2차년도 (2018.01 ~ 2018.12)	스마트 기초격리장치 를 이용한 동적 특성시험 수행	다양한 변형률 및 주파수에 대한 기초격리장치 동적 특성시험 수행	강성 및 감쇠비에 대한 영향력 파악	다양한 변형률 및 주파수에 따른 스마트 기초격리장치의 강성 및 감쇠비 성능 파악 (비면진/면진 시스템 감쇠비: 2% / 11.06% 감쇠 성능 453% 향상) 기존 전자석	100%

				시스템과 개선된 전자석 시스템을 이용한 동적 특성시험 비교 수행 (100% 변형률, 기존 전자석 시스템 - 14.8% / 개선된 전자석 시스템 - 22.6% MR 효과)	
	스마트 기초격리장치를 이용한 면진 성능 평가	Passive/semi-active 제어를 통한 구조물 응답 저감 비교	대표 지진하중에 대하여 최대 가속도 및 2층-base층 상대변위 차에 대한 구조물 저감 확인	Semi-active 제어를 통한 구조물 저감 효과 파악 (2층 가속도 응답 : Hachinohe 지진 - 48.01% 저감, 최대 상대변위 응답 : Hachinohe 지진 866.09% 저감 Base층 최대변위 응답 : Hachinohe 지진 - 42.84% 저감)	100%
	스마트 기초격리장치의 내구성 평가	반복실험을 통한 MR 효과 비교 고무 경화 방지를 위한 방안 마련	다양한 실험 조건 하에서 장시간 실험을 수행 (90분 및 150% 변형률에서 파단 발생) 전문가 자문을 통한 고무 경화 방지 마련	다양한 변형률에 대한 반복하중 재하 시험 수행 및 전문가 자문을 통한 고무 경화방지 마련	100%

2. 정량적 연구목표 달성도

성 과 지 표		목 표	달 성	비 고
논 문	SCIE급	3	4 (중복 사사 미고려)	- Shock and Vibration 0.5건 - Shock and Vibration 1.0건 - International Journal of Disaster Risk Reduction 0.5건 - Journal of intelligent material systems and structures 0.5건
	국내외 학술발표	4	9	- The 13th International Workshop on Advanced Smart Materials and Smart Structures Technology 1건 2017 지진공학회 1건 2017 가을 토목학회 정기학술대회 1건 2017 KKHTCNN Symposium on Civil Engineering 3건 - The 14th International Conference on Motion and Vibration 1건

				▪ The 7th World Conference on Structural Control and Monitoring, 7WCSCM 1건 ▪ 2018년도 추계 복합재료학회 1건
특 허	출원	1	1	▪ “면진장치” ▪ 출원 번호 : 10-2018-0001789
	등록	1	1	▪ “면진장치” ▪ 등록번호 : 10-1928017-0000
인력양성		-	2	▪ 석사 학위 2명

4.2 관련 분야 기여도

1. 기술적 기여도

- 선행연구에서 수행되지 못했던 MR 엘라스토머 제작의 철 입자 부피비에 따른 MR 효과를 비교하였음 (철 입자 부피비 35%, 변형률 100%에서 22.0% MR 효과를 나타냄)
- 등방성/이방성 MR 엘라스토머의 부피비에 따른 MR 효과를 비교하였음 (철 입자 부피비가 35%가 되었을 때 등방성/이방성 MR 엘라스토머의 MR 효과 차이가 미미 : 철 입자 부피비 35% / 변형률 100% 일 때 등방성 MR 엘라스토머 - 19.4%, 이방성 MR 엘라스토머 - 22.0% MR 효과를 나타냄)
- MR 효과를 증대할 수 있는 첨가제의 부피비에 따른 MR 효과를 비교하였음 (카본블랙 60phr, 나프텐오일 40phr, 변형률 100%에서 33.5%의 MR 효과를 나타냄)
- 새로운 형태의 스마트 기초격리 시스템을 제안하기 위해 새로운 형태의 전자석 시스템을 개발하였으며 수치해석 및 실험을 통해 충분한 자기장이 발현되는 것을 확인함
- 새로운 형태의 스마트 기초격리시스템의 도입으로 기존 MR 엘라스토머 기반 면진장치의 한계를 극복할 수 있는 장치임. (ISO 22762-1 규정에 따라 면진 받침의 전단 탄성계수를 100% 고려한 동적 특성시험을 수행함)
- 비록 실규모 사이즈의 실험을 통해 스마트 기초격리시스템을 검증하지는 못했으나 기존의 IRB 장치는 40~60mm 당 17.5 톤의 수직하중을 지지할 수 있음.
- MR 엘라스토머 스마트 재료를 활용한 기초격리장치 개발로 진동제어 설계에 대한 원천 기술을 확보함.
- 본 연구에서는 하이브리드 시스템을 통해서 구조물의 하중을 인가함으로써 면진성능을 수행함으로써 실규모 구조물 적용에 대한 가능성을 확인함.

2. 경제적 기여도

- 면진장치를 활용한 측면에서 건축 및 교량 구조물뿐만 아니라 여러 사회기반 시설물에 대한 적용이 가능함.
- 면진장치를 적용하면, 면진층에 설치된 면진장치가 지진 에너지를 흡수하기 때문에 상부구조의 주요 부재 단면을 줄일 수 있으므로 경제적 측면에서 유리함.
- 새로운 형태의 스마트 기초격리시스템의 도입으로 국내 건설 시장의 수입대체 효과 뿐만 아니라 해외 건설 시장에서의 경쟁력을 확보할 수 있을 것으로 기대됨.

3. 사회적 기여도

- 2016년 정부에서 확정된 19대 <미래성장동력 종합실천계획전략> 산업 중 “재난안전관리 스마트 시스템”의 핵심요소 기술로 활용이 가능함.
 - 구조물의 노후화로 인하여 지속적으로 발생하고 있는 재해재난 사고 발생에 대비하여 폭넓게 활용 가능함으로 리모델링과 관련된 산업의 활성화 및 건물 장수명화에 의한 문제 등을 선진화 할 수 있음.
 - 산업체로의 기술이전을 통해 실용화가 가능해지면 이로 인한 제품의 개발 그리고 새로운 기술 및 제품 개발에 대한 교두보 역할이 가능함. 또한 틈새시장의 개척으로 인해 건설 및 기계 분야에 파급효과를 가질 수 있음.
-

제5장. 연구개발성과의 활용계획

▪ 최종 성과물의 활용 계획

연구결과물	활용방안
MR 엘라스토머 최적 재료 배합비에 따른 새로운 형태의 스마트 기초격리시스템 개발	▪ 「국토교통과학기술 연구개발 종합계획(’18-’27)」에 포함되어 있는 ‘예방형 재난대응 시스템’에 대한 기초 연구로 활용할 수 있음 ▪ 구조물 면진에 적합한 MR 엘라스토머의 최적 배합비를 산정함으로써 구조물의 내진성능향상에 적극 활용 가능함 ▪ 내진성능을 향상 시키는 스마트 기초격리시스템 개발을 통한 일반 사회기반 시설물(건물, 교량, 원전 구조물 등) 등 내진관련 분야에서의 다양하게 활용이 가능함 ▪ 구조물뿐만 아니라 문화유산 및 예술 작품의 보호와 통신장비 및 전산장비의 보호를 위한 면진장치로 활용할 수 있음 ▪ 실용화 및 대형화를 위한 후속 연구의 기초자료로 활용이 가능함 ▪ 중장기적으로 기기 면진, 층 면진 등에 우선적으로 적용하고, 점진적으로 구조물 면진 등에 확대 적용할 수 있음

제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

▪ MR 엘라스토머 기반 면진장치

1. 호주 (University of Technology Sydney)

일반적인 MR 엘라스토머 기반 면진장치는 적층형 MR 엘라스토머를 제작하여 전자석 시스템(코일)이 MR 엘라스토머를 둘러싸는 형태임. Li 등은 이러한 형태의 면진장치를 제안하여 성능평가를 수행함. 적층형 MR 엘라스토머는 MR 엘라스토머와 steel plate를 적층을 쌓는 것으로 이는 수직하중에 대한 지지 능력을 향상시킬 뿐만 아니라 steel plate의 높은 permeability를 이용하여 더 높은 MR 효과를 나타낼 수 있음. 하지만 본 연구에서는 MR 엘라스토머 기반 면진장치를 제안하기에 앞서 최적 배합비에 대한 연구를 수행하였으나 Li 등의 연구에서는 천연고무보다 기계적 물성이 낮고, 부착성이 떨어져 자기 집중이 저하되는 실리콘 고무를 활용하였음. 또한 ISO 22762-1 규정에 따르면, 면진받침의 전단 탄성계수는 100% 변형률의 측정값이 필요함. 하지만 Li 등의 연구에서는 제한된 변형률(~27.7%) 하에서 면진장치의 성능평가를 수행함.

2. 말레이시아 (Universiti Teknologi Malaysia)

Wahab 등의 연구에서는 천연고무를 활용하여 MR 엘라스토머 기반 면진장치를 제안하여 동적 특성시험을 수행하였음. Wahab 등이 제안한 면진장치의 기본적인 형태는 Li 등의 형태와 동일함. 따라서 MR 엘라스토머를 둘러싸는 전자석 시스템으로 인해 MR 엘라스토머의 변형에 제한이 생김. Wahab 등의 연구에서는 10%의 변형률, 0.8T의 자기장 하에서 120%의 높은 MR 효과를 보임. 하지만 10%의 변형률 범위로 면진장치로 활용하기 부족함.

3. 미국 (University of Nevada)

Behrooz 등은 위의 연구와는 다른 형태의 MR 엘라스토머 기반 면진장치를 제시함. 사다리꼴 모양의 MR 엘라스토머가 중앙에 위치하고, 위 아래로 전자석이 설치되어 자기 폐회로를 형성함. 하지만 이와 같은 형상은 전자석 부분이 수직하중을 재하 받는 단점이 발생함. 또한, Li 등의 연구와 마찬가지로 실리콘 고무를 활용하여 MR 엘라스토머를 제작하였음.

제7장. 연구개발성과의 보안등급

보안등급 분류	보안	일반
		✓
결정 사유	원천기술을 개발하고 이를 타 유사 연구개발 분야의 기반 기술로 제공 가능하므로 연구과제 보안등급의 분류 상 일반과제로 분류하는 것이 합당한 것으로 판단됨	

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

■ 연구실 안전 점검 체계 및 실시

1) 실험실 안전 점검 체계

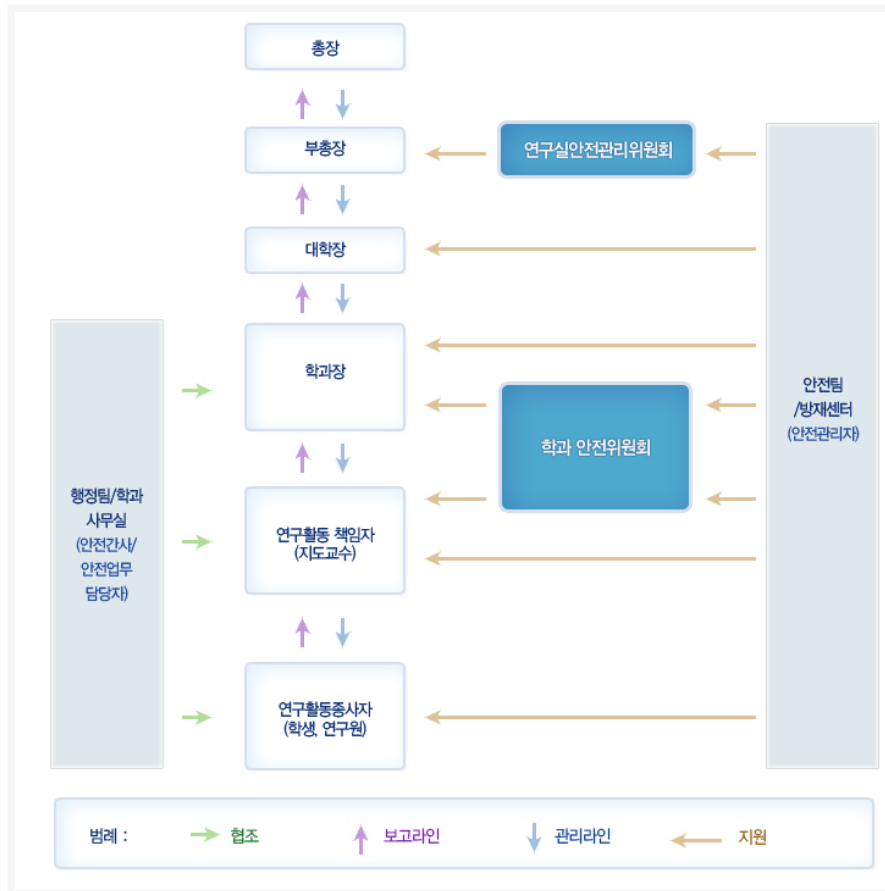


그림 9.1 연구실 안전 점검 체계

※ 위험등급별로 환경안전점검을 단계별로 체계화하여 관리

※ 관리위험등급의 지정

- A등급: 가연성가스, 인화성 시약, 유해화학물질, 다량의 폐액배출, 독극물, 생물 및 동물, 방사성 동위원소, 위험성이 높은 기계장비가 설치된 실험실
- B등급: 일반시약, 소규모 인화성 시약, 불연성가스, 소량의 폐수발생실험실
- C등급: 이화학실험을 수행하지 않는 전기, 설계, 컴퓨터 관련 실험실

2) 교육 훈련

- 개요:

- ① 연구·실험실 관리부서의 장은 매학기 개시 후 15일 이내에 별표 제3호의 “안전교육 이수 대상자 명단 통보서”를 작성하여 당해연도 교육대상자 명단을 주관부서에 제출하여야 한다.
- ② 연구·실험 종사자는 매년도 4월과 10월 말일을 기준으로 안전교육과정을 이수하거나 주관부서에서 시행하는 안전교육 이수를 대체할 수 있는 시험을 통과하여야 한다.

- 교육대상: 학부생(연구, 실험실 출입자), 대학원생, 연구원 등 연구활동종사자

- 단계별 교육 이수과정:

- 1단계: 공통이수과목(등록실험실전체)
- 2단계: 특수실험실

- 교육구분

- 정기교육: 연 2회(각 1시간)
- 비정기임시교육

: 대상 - 새로운 실험과정의 신설 시, 연구소의 신설 시, 교육 미이수자 (신입 대학원생, 전담직

원, 연구원, 업체직원, 유해물질 취급자 등)

· 방법 - 사이버 교육 환경안전교육 등(홈페이지 개설 동영상 교육), 자료/유인물, 외부 온라인 상, 외부강사, 전문교육기관의뢰 등

· 특별교육: 해당기관에서 자체 또는 외부의 전문기관에 의뢰하여 위탁교육 실시

3) 보험 가입 현황

보 험 명	보 상 내 용	대 상	주관부서
학생단체 상해보험	회원의료보조금 지원 : 지급한도 연간 500만원 무료건강검진, 예방접종 등 상해사망, 후유장해 : 교내사고 최대 7억원 교외사고 최대 2억원 상해치료 : 최대 700만원	학부생, 대학원생	의료상조회
교직원 단체안심보험	재해 사망, 장해 : 1억원	전임직 교·직원 및 전문관리직원	인사팀

4) 추가 이행 계획

1) 실험종사자 건강검진 및 보험 추가가입	1. 건강검진(특수실험실) 2. 상해보험추가가입검토(특수실험실)
2) 실험실 공기질 관리, 환기	유해물질농도 측정관리, 환기대책수립
3) 실험실 환경개선공사	노후 실험실 개선공사 시행
4) 특수위험 실험실에 별도의 소화설비 설치	위험성이 큰 실험실에 별도의 특수소화 설비를 설치하여 사고 확산을 예방
5) 유기용매 보관시설 설치 및 액체질소 통합관리	1. 보관창고를 설치하여 통합관리 2. 액체질소를 시약센터에서 통합관리
6) 실험실 환경안전지침 작성	보완작성
7) 고압가스 안전관리	안전시설 설치
8) 안전보호장비 시설 보완	안전보호장비와 안전표지 설치

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	Design and Experimental Study of an L Shape Piezoelectric Energy Harvester	한국과학기술원/호서대학교	교신	Shock and Vibration	1.857	2017.01.18.	중복	SCI급
2	논문	Fabrication and Characterization of Natural Rubber-Based Magnetorheological Elastomers at Large Strain for Base Isolators	육군3사관학교/한국과학기술원	교신	Shock and Vibration	1.857	2018.01.04.	단독	SCI급
3	논문	Feasibility study of an adaptive mount system based on magnetorheological elastomer using real-time hybrid simulation	한국원자력연구원/한국과학기술원	교신	Journal of intelligent material systems and structures	2.211	2018.01.29	중복	SCI급 피인용 2회
4	논문	A comprehensive framework for seismic risk assessment of urban water transmission networks	한국과학기술원/울산과학기술원	교신	International Journal of Disaster Risk Reduction	1.968	2018.09.18	중복	SCI급
5	특허	면진장치	육군3사관학교/한국과학기술원	주발명자	대한민국		2018.12.05	단독	등록번호 10-192801 7-0000

제11장. 기타 사항

제12장. 참고 문헌

- [1] 과학기술분류체계 2018
- [2] 이찬우, (2018). “MR 엘라스토머 기반 스마트 면진장치 개발 및 내진성능 평가”, 석사학위논문
- [3] 한국과학기술원, (2017). “가속도 센서가 내장된 지진·화재 감지기를 대상으로 한 진동대 실험”
- [4] KS ISO 22762-1, (2016). “탄성 중합체 면진장치-제1부 : 시험방법”
- [5] Asai, T., Chang, C. M., & Spencer Jr, B. F. (2014). Real-time hybrid simulation of a smart base-isolated building. *Journal of Engineering Mechanics*, 141(3), 04014128.
- [6] Behrooz, M., Wang, X., & Gordaninejad, F. (2014a). Performance of a new magnetorheological elastomer isolation system. *Smart Materials and Structures*, 23(4), 045014.
- [7] Behrooz, M., Wang, X., & Gordaninejad, F. (2014b). Modeling of a new semi-active/passive magnetorheological elastomer isolator. *Smart Materials and Structures*, 23(4), 045013.
- [8] Chen, L., Gong, X. L., & Li, W. H. (2007a). Microstructures and viscoelastic properties of anisotropic magnetorheological elastomers. *Smart Materials and Structures*, 16(6), 2645.
- [9] Chen, L., Gong, X. L., Jiang, W. Q., Yao, J. J., Deng, H. X., & Li, W. H. (2007b). Investigation on magnetorheological elastomers based on natural rubber. *Journal of Materials Science*, 42(14), 5483-5489.
- [10] Chen, L., Gong, X. L., & Li, W. H. (2008). Effect of carbon black on the mechanical performances of magnetorheological elastomers. *Polymer Testing*, 27(3), 340-345.
- [11] Chopra, A. K. (2017). *Dynamics of Structures. Theory and Applications to. Earthquake Engineering*.
- [12] Jolly, M. R., Carlson, J. D., & Munoz, B. C. (1996). A model of the behaviour of magnetorheological materials. *Smart Materials and Structures*, 5(5), 607.
- [13] Jung, H. J., Eem, S. H., & Gu, J. H. R&D Trend of Smart Base Isolation Systems of Structures Using MR Elastomers. *Computational Structural Engineering*, 27.
- [14] Kallio, M. (2005). The elastic and damping properties of magnetorheological elastomers (p. 149). VTT.
- [15] Lee, C. W., Kim, I. H., & Jung, H. J. (2018). Fabrication and Characterization of Natural Rubber-Based Magnetorheological Elastomers at Large Strain for Base Isolators. *Shock and Vibration*, 2018.
- [16] Li, Y., Li, J., Li, W., & Samali, B. (2013a). Development and characterization of a magnetorheological elastomer based adaptive seismic isolator. *Smart Materials and Structures*, 22(3), 035005.
- [17] Li, W. H., Zhang, X. Z., & Du, H. (2013b). Magnetorheological elastomers and their applications. In *Advances in Elastomers I* (pp. 357-374). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [18] Li, Y., Li, J., Li, W., & Du, H. (2014). A state-of-the-art review on magnetorheological elastomer devices. *Smart materials and structures*, 23(12), 123001.
- [19] Lokander, M., & Stenberg, B. (2003a). Performance of isotropic magnetorheological rubber materials. *Polymer Testing*, 22(3), 245-251.
- [20] Lokander, M., & Stenberg, B. (2003b). Improving the magnetorheological effect in isotropic magnetorheological rubber materials. *Polymer Testing*, 22(6), 677-680.
- [21] Mills, R. S. (1979). Model tests on earthquake simulators : development and implementation of experimental procedures.
- [22] Naeim, F., & Kelly, J. M. (1999). *Design of seismic isolated structures: from theory to practice*. John Wiley & Sons.
- [23] Payne, A. R., & Whittaker, R. E. (1971). Low strain dynamic properties of filled rubbers. *Rubber chemistry and technology*, 44(2), 440-478.

-
- [24] Rabinow, J. (1948). The magnetic fluid clutch. *Electrical Engineering*, 67(12), 1167-1167.
- [25] Son, I. C. (2008). IRB System Used for Rollers to Protect Building from Earthquake. *Computational Structural Engineering*, 21.W
- [26] Subramaniam, R. S., Reinhorn, A. M., Riley, M. A., & Nagarajaiah, S. (1996). Hybrid control of structures using fuzzy logic. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 11(1), 1-17.
- [27] Sun, L., Sun, H., & Li, R. (2017). U.S. Patent No. 9,581,214. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [28] Wahab, N. A. A., Mazlan, S. A., Kamaruddin, S., Ismail, N. I. N., Choi, S. B., & Sharif, A. H. R. (2016). Fabrication and investigation on field-dependent properties of natural rubber based magneto-rheological elastomer isolator. *Smart Materials and Structures*, 25(10), 107002.
- [29] Yang, J., Sun, S., Tian, T., Li, W., Du, H., Alici, G., & Nakano, M. (2016). Development of a novel multi-layer MRE isolator for suppression of building vibrations under seismic events. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 70, 811-820.
- [30] Zhou, G. Y. (2003). Shear properties of a magnetorheological elastomer. *Smart materials and structures*, 12(1), 139.
-

주 의

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