GOVP1200946881

건설기술혁신사업 최종보고서

R&D/05건설핵심C21

내진 및 내풍 대책으로 적합한 신개념 스마트 제진장치의 실용화

2008. 8. 16.

주관연구기관 / 세종대학교 산학협력단
협동연구기관 / 한국과학기술원
/ 한국기계연구원
참 여 기 업 / (주)티이솔루션
(주)내경엔지니어링

건 설 교 통 부
한국건설교통기술평가원

Construction & Transportation R&D Report

제 출 문

건설교통부장관(한국건설교통기술평가원장) 귀하

본 보고서를 "내진 및 내풍 대책으로 적합한 신개념 스마트 제진 장치의 실용화"의 최종보고서로 제출합니다.

2008. 8. 16.

주관연구기관 : 세종대학교 산학협력단

단장 오 장 헌

협동연구기관 : 한국과학기술원

총장 서 남 표

: 한국기계연구원

원장 황 경 현

■ 총 괄 연 구 책 임 자 / 부 교 수 이기학 장치설계 및 성능평가

■ 협 동 연 구 책 임 자 / 부 교 수 이행기 특성실험 및 수치해석

/ 책임연구원 문석준 제진 장치 설계/제작

■ 주관연구기관 참여연구원 / 석사 과정 김인호 외 6인 장치설계 및 성능평가

■ 협동연구기관 참여연구원 / 연구원 장동두 외 5인 특성실험 및 성능평가

/ 선임연구원 허영철 외 2인 제진 장치 설계/제작

요 약 문

Ⅰ. 제 목

o 과 제 명: 내진 및 내풍 대책으로 적합한 신개념 스마트 제진 장치의 실용화

Ⅱ. 연구개발의 목적 및 필요성

o 연구개발의 목적:

- 교량 및 건물과 같은 토목/건축 구조물의 내진 및 내풍 대책으로 적합한 신개념 스마트 제진 장치의 실용화
- 유지관리와 경제성 면에서 획기적인 장점 보유하고 제진 성능 우수한 전자기 유도부가 있는 MR 감쇠기를 제품화
- 신개념 스마트 제진 장치에 변위확대 기구를 결합하여 최적의 제진성능을 갖는 내진 및 내풍 시스템 개발

o 연구개발의 필요성:

- 지진이나 강풍에 의한 토목/건축 구조물의 피해 심각함
- 내진 및 내풍 대책으로 제진 장치를 많이 이용함
- 수동형 제진 장치와 능동형 제진 장치의 장점을 접목한 스마트 제진 장치 유망
- 기존 스마트 제진 장치는 설치 및 유지관리 어렵고 비경제적 비효율적임
- 국내 특허 등록된 신개념 스마트 제진 장치를 이용한 내진/내풍 성능향상

Ⅲ. 연구개발의 내용 및 범위

o 신개념 스마트 제진장치의 설계/제작/평가 기술 개발

- 신개념 스마트 제진장치
- 신개념 스마트 제진장치의 이론적인 고찰
- 소형 신개념 스마트 제진장치의 설계/제작 및 특성 분석

- 대용량 신개념 스마트 제진장치의 특성 분석
- 속도 센서로서의 EMI 시스템의 활용 가능성 검토
- 신개념 스마트 제진장치의 통합설계
- 신개념 스마트 제진장치의 설치위치 및 최적용량 결정

o 수치모의실험을 통한 신개념 스마트 제진장치의 제진성능 평가

- 면진 건물 수치해석
- 면진 교량에 대한 수치해석
- 사장 케이블 수치해석
- 사장교에 대한 수치해석

o 진동대 실험을 통한 제진 장치의 내진 성능 평가

- 축소건물모형을 이용한 신개념 스마트 제진장치의 내진 성능평가
- 축소교량모형을 이용한 신개념 스마트 제진장치의 내진 성능평가

o 실규모 철골 구조물을 이용한 제진 장치의 제진 성능 평가

o 사장 케이블을 이용한 제진 장치의 제진 성능 평가

- 44.7m 사장케이블에 대한 MR 댐퍼 기반 스마트제진시스템 성능평가
- 100m 사장케이블에 대한 MR 댐퍼 기반 스마트제진시스템 성능평가
- 44.7m 사장케이블에 대한 신개념 스마트 제진장치 성능평가

o 대형 풍동 실험을 통한 제진 장치의 내풍 성능 평가

- 케이블 강체모형실험
- 케이블 탄성체모형실험
- 스마트 제진장치를 이용한 케이블 제진실험

o 신개념 스마트 제진장치 설계 및 제작 지침서

o 신개념 스마트 제진장치 성능평가 지침서

o 실용화 검토시 고려사항 파악

Ⅳ. 연구개발결과

o 신개념 스마트 제진장치의 설계/제작/평가 기술 개발

- 실 구조물에 적합한 대용량 전자기유도(EMI) 시스템을 설계 및 제작
- 진동대 실험을 통하여 EMI 시스템에 대한 특성 실험을 수행함
- 특성 실험 결과, 전자기유도부로부터 발생되는 유도기전력을 이용한 대용량 MR 감쇠기의 감쇠특성을 변화시키는 것이 실제적으로 가능함
- 부가적으로 발생되는 전자기유도감쇠력을 이론적인 접근과 이를 기반으로 실험한 결과로 인해 추후 다양한 하중 및 요구에 따라 제작 가능성을 확인함

o 수치모의실험을 통한 신개념 스마트 제진 장치의 제진 성능 평가

- 면진교량, 면진건물, 사장교 등을 대상으로 하여 신개념 스마트 제진 장치의 내진 성능을 수치적으로 평가함
- 사장 케이블을 대상으로 신개념 스마트 제진 장치의 내풍 성능을 수치적으로 평가함
- 수치모의실험 결과, 신개념 스마트 제진 장치는 기존 MR 댐퍼-기반 스마트 제진 시스템과 거의 동등한 제어 성능을 보이고 있음을 확인하였음

o 대형 진동대 실험을 통한 제진 장치의 내진 성능 평가

- 8톤 규모의 6층 철골 시험구조물에 신개념 스마트 제진 장치를 설치하여, 대형 진동대를 이용하여 내진 성능을 실험적으로 수행함
- 기존의 제어 알고리즘을 사용한 경우와 비교한 결과, 층 가속도 응답의 강인성을 확인하였다. 또한 부가적으로 전자기유도 감쇠력이 발생하여 구조물에 더 효과적으로 작용하는 것을 확인함. 즉, 신개념 제진 장치의 우수성을 확인함.

o 사장 케이블을 이용한 제진 장치의 제진 성능 평가

- 사장교에 대한 신개념 스마트 제진 장치의 내진 성능을 수치적으로 검증하였음. 그 결과 기존 스마트 제진 장치와 유사하거나 우수한 성능을 보임을 확인함
- 사장교의 케이블에 초점을 맞춘 신개념 스마트 제진 장치의 내진 성능을 수치적으로 검증하였음. 그 결과 기존 스마트 제진 장치와 유사하거나 우수한 성능을 보임을 확인함

o 실규모 철골 구조물을 이용한 제진 장치의 제진 성능 평가

- 20톤 규모의 실규모 5층 철골구조물에 실제 설치 용이하도록 새로이 제작된 MR 감쇠기 2기를 설치하여 내진 성능을 평가함
- 지진과 유사한 가진 시스템을 설계하여 제진 장치의 성능을 평가함
- 다양한 제어 알고리즘을 설계 및 적용하여, 그 성능을 비교 평가함
- 실규모에 적합한 신개념 제진 장치의 설계/설치 및 그 성능의 가능성을 확인함

o 대형 풍동 실험을 통한 제진 장치의 내풍 성능 평가

- 측정부의 폭원이 8m인 대형풍동에 케이블의 탄성체모형을 설치하여, 스마트 제진장치 설치 전,후의 내풍 거동을 실험적으로 확인하였음.
- 실제 풍진동에 대한 스마트 제진장치의 적용가능성을 파악함

o 설계 및 제작 지침서, 성능평가 지침서 작성 등을 통한 기술 표준화

- 신개념 스마트 제진장치의 설계 및 제작에 도움을 줄 수 있도록 설계 process를 표준화하고 지침서를 마련함
- 신개념 스마트 제진장치의 성능평가지표 (동적범위, 동특성 시험 방법 등)를 표준화 함

V. 연구개발결과의 활용계획

o 건설 현장에서 적극 활용:

- 효과적이고 경제적인 제진 장치의 실용화로 인한 인명·재산 피해의 방지
  - 사장교 케이블의 과도한 진동 문제 해결을 위해 사용
  - 면진 교량의 수평변위 감소를 위해 기존에 사용되는 댐퍼를 대체
  - 중장기적으로 고층건물 제진 대책 및 면진 건물 변위 제어를 위해 사용
- 국내 건설 시장의 수입대체에 활용: 외국에서 수입하는 사장교 케이블용 댐퍼와 면진교량용 댐퍼를 대체할 수 있음
- 해외 건설 시장 경쟁력 확보에 활용: 국내보다 실제 구조물에 적용이 많은 외국 건설 시장에서 우수한 성능 및 경제성을 바탕으로 시장 개척 가능

o 교육용으로 활용:

- 개발된 제진장치 설계 및 해석기법을 Benchmark로 한 연구 활성화
- 관련기관 및 산업체에서 시행하는 기술 교육용으로 활용

o 새로운 연구에 활용:

- 개발된 제진 장치의 설계, 제작 및 특성시험 기술을 새로운 제진기법 개발에 이용
- 차량하중, 파랑하중 및 소음제어 기술에 응용

여 백

목 차

제 1 장 서 론 ····· 1

1 절 연구개발 개요 ····· 1

1. 연구배경 ····· 1

2. 본 연구과제에서 실용화 시킬 신개념 스마트 제진 장치의 개요 ····· 8

2 절 연구개발의 목표 및 내용 ····· 11

1. 연구개발의 최종목표 ····· 11

2. 연차별 연구목표 및 내용 ····· 13

3 절 연구개발의 중요성 ····· 15

제 2 장 국내·외 기술개발 현황 ····· 17

1 절 국내기술 동향 ····· 17

2 절 국외기술 동향 ····· 17

3 절 기술동향 분석 결론 ····· 18

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과 ····· 20

1 절 신개념 스마트 제진장치의 설계/제작/평가 기술 개발 ····· 20

1. 신개념 스마트 제진장치 ····· 20

2. 신개념 스마트 제진장치의 이론적인 고찰 ····· 23

3. 소형 신개념 스마트 제진장치의 설계/제작 및 특성 분석 ····· 27

4. 대용량 신개념 스마트 제진장치의 특성 분석 ····· 38

5. 속도 센서로서의 EMI 시스템의 활용 가능성 검토 ····· 50

6. 신개념 스마트 제진장치의 통합설계 ····· 54

7. 신개념 스마트 제진장치의 설치위치 및 최적용량 결정 ····· 78

2 절 수치모의실험을 통한 신개념 스마트 제진장치의 제진성능 평가 · 93

1. 면진 건물 수치해석 ····· 93

2. 면진 교량에 대한 수치해석 ····· 106

3. 사장 케이블 수치해석 ····· 119
4. 사장교에 대한 수치해석 ····· 133

3 절 진동대 실험을 통한 제진 장치의 내진 성능 평가 ····· 146
1. 축소건물모형을 이용한 신개념 스마트 제진장치의 내진 성능평가 146
2. 축소교량모형을 이용한 신개념 스마트 제진장치의 내진 성능평가 181

4 절 실규모 철골 구조물을 이용한 제진 장치의 제진 성능 평가 ····· 202
1. 실험배경 ····· 202
2. 대상 구조물 ····· 202
3. 가진시스템 설계 ····· 206
4. 실험준비 ····· 207
5. 실험결과 ····· 214

5 절. 사장 케이블을 이용한 제진 장치의 제진 성능 평가 ····· 239
1. 44.7m 사장케이블에 대한 MR 댐퍼 기반 스마트제진시스템 성능평가 ····· 239
2. 100m 사장케이블에 대한 MR 댐퍼 기반 스마트제진시스템 성능평가 ····· 261
3. 44.7m 사장케이블에 대한 신개념 스마트 제진장치 성능평가 ····· 272

6 절 대형 풍동 실험을 통한 제진 장치의 내풍 성능 평가 ····· 280
1. 개요 ····· 280
2. 케이블 강체모형실험 ····· 282
3. 케이블 탄성체모형실험 ····· 292
4. 스마트 제진장치를 이용한 케이블 제진실험 ····· 307
5. 소결 ····· 349

7 절 신개념 스마트 제진장치 설계 및 제작 지침서 ····· 350

1. MR 감쇠기 ····· 350

2. MR 감쇠기와 EMI 시스템의 통합설계 ····· 365

8 절 신개념 스마트 제진장치 성능평가 지침서 ····· 398

9 절 실용화 검토시 고려사항 ····· 406

1. 실구조물 적용계획 ····· 406

2. 경제성 검토 ····· 410

3. MR 감쇠기 내구성 검토 ····· 412

4. 영구자석 자력유지 및 MR 유체 특성 검토 ····· 413

5. 국제 기술 선도/선점 전략 ····· 414

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 관련분야에의 기여도 ····· 416

1 절 연구개발 수행 진도율 ····· 416

2 절 연구개발 목표의 달성도 ····· 419

3 절 관련분야의 기술발전에의 기여도 ····· 422

제 5 장 연구개발결과의 활용계획 ····· 423

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외 과학 기술정보 ····· 424

제 7 장 참고문헌 ····· 425

별 첨 자체평가의견서 ····· 411

제 1 장 서 론

1 절 연구개발 개요

1.1 연구 배경

2003년 태풍 매미, 2007년 강원도 월정사 지진과 같이 최근 국내에서 발생한 자연재해뿐만 아니라, 2004년 인도네시아 지진, 올해 중국 쓰촨성 지진 등과 같은 커다란 자연재해로 인해 수많은 인명 피해와 막대한 경제적인 손실이 발생함으로 인해, 국내에서도 여러 분야에서 위와 같은 자연재해에 대한 보다 효과적인 대비책을 강구하고자 노력하고 있다. 건설 분야에서도 건물과 교량 등의 대형 구조물에 대한 내진 및 내풍 대책에 대한 관심이 더욱 높아지고 있는 상황이다. 지진이나 강풍과 같은 동적 하중은 교량, 건물과 같은 대형 구조물에 과도한 진동을 발생시키고 심한 경우에는 구조물의 안전성에 영향을 미치는 심각한 파손 및 붕괴를 야기하기도 한다. 다음 그림은 최근 발생한 지진 및 강풍에 의한 국내외 대형 구조물의 피해사례를 보여주고 있다.

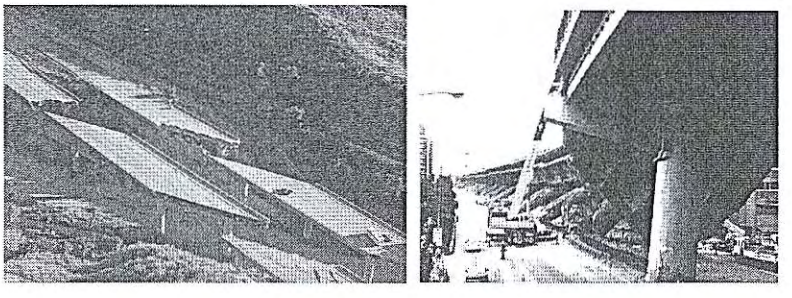


그림 1.1.1.1 지진에 의한 교량 구조물의 붕괴 사례

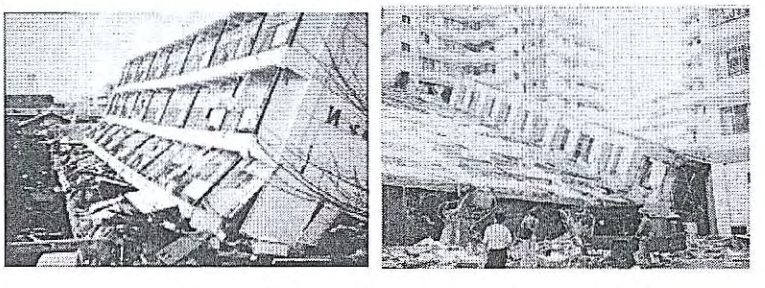


그림 1.1.1.2 지진에 의한 건축 구조물의 붕괴 사례

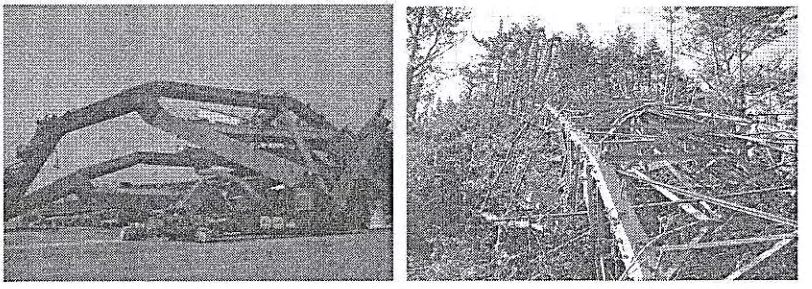


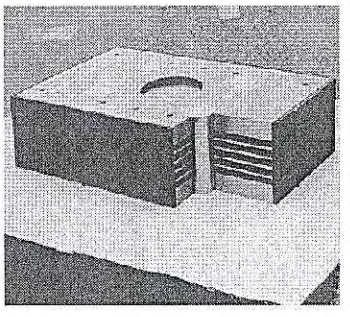
그림 1.1.1.3 강풍에 의한 강구조물의 붕괴 사례

1.1.1. 내진 및 내풍용 제진 장치의 특징 및 종류

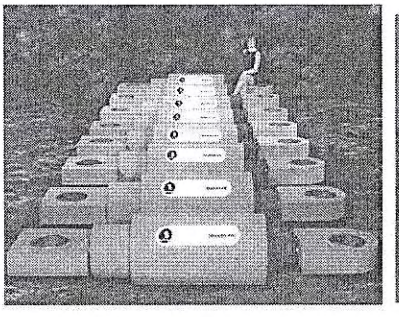
일반적으로 구조물의 내진 및 내풍 대책으로 구조부재 크기를 키우거나 부재의 개수를 증가시키는 등의 보강 방법을 많이 사용해왔지만, 최근 들어 보다 적극적으로 내진 및 내풍성능을 향상시키기 위해 제진 장치를 이용하려는 노력이 진행되고 있다. 대형 구조물의 내진 및 내풍 성능 향상을 위한 제진 장치는 구조물의 외부로부터 추가 에너지 공급의 필요 유무에 따라 수동형, 능동형, 스마트(반능동형) 제진 장치로 나눌 수 있다. 여기에서는 각 분류별로 특징 및 종류를 간략하게 설명하고자 한다.

(1) 수동형 제진 장치 (Passive-type control device)

- **장점:** 개념 간단, 안정성 보장, 경제적, 유지관리 용이
- **단점:** 제진 성능 한계, 구조물 및 하중조건 등의 변화에 적응성 매우 부족
- **종류:** 기초격리 장치 (base isolation system)
  점성/점탄성 감쇠기 (viscous/viscoelastic damper)
  동조질량 감쇠기 (tuned mass damper) 등



기초격리장치 (LRB)



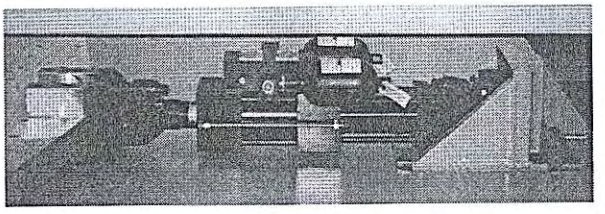
내진용 점성유체 감쇠기



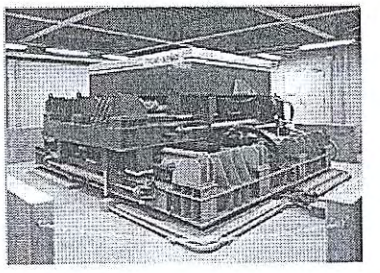
동조질량 감쇠기

(2) 능동형 제진 장치 (Active-type control device)

- **장점:** 제진 성능 우수, 구조물 및 하중 조건 변화에 적응성 우수
- **단점:** 비용 과다, 유지관리 어려움, 구조 시스템 불안정 가능성 존재,
- **종류:** 유압식 가력기, 능동형 질량 감쇠기(AMD), 능동형 텐던 장치 등



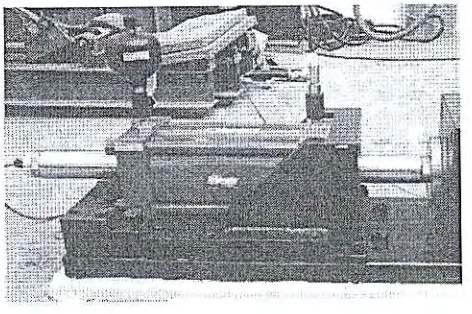
유압식 가력기



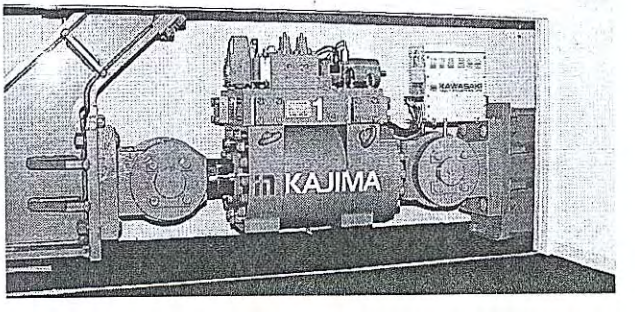
능동형 질량 감쇠기

(3) 스마트 제진 장치 (반능동형 제진 장치, Smart (semiactive-type) control device)

- **장점:** 제진 성능 우수, 구조물 및 하중 조건 변화에 적응성 우수, 안정성 보장
  능동제어에 비해 비용 저렴, 유지관리 용이,
- **단점:** 수동제어에 비해 유지관리 어려움, 비용 과다
- **종류:** MR 감쇠기, 가변 오리피스 감쇠기, 가변 강성 감쇠기 등



MR 감쇠기



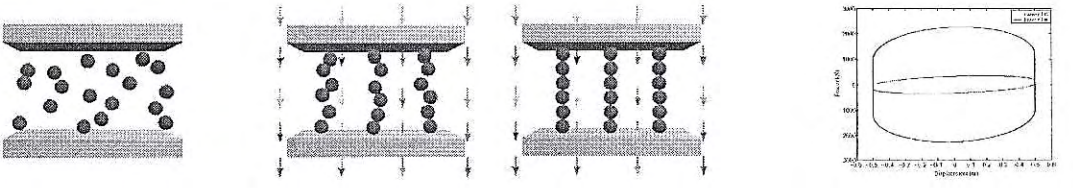
가변 오리피스 감쇠기

1.1.2. 스마트 제진 장치의 개요

위와 같은 각 형태별 제진 장치의 특징을 통해 알 수 있듯이, 비교적 최근 개발된 스마트 제진 장치는 수동형 장치의 장점과 능동형 장치의 장점을 고루 보유하면서도 각 장치의 단점을 최소화시킨 매우 유망한 제진 장치이다.

다양하게 개발된 스마트 제진 장치 중에서도 MR 감쇠기가 토목 분야에서 특히 각광을 받고 있고, 현재 스마트 제진 장치 중에서는 유일하게 실제 공용중인 토목/건축 구조물에 내진 및 내풍 성능 향상을 위해 적용된 실적이 있다.

MR 감쇠기는 MR 유체를 이용하여 감쇠력을 적절히 조절할 수 있도록 만들어진 스마트 제진 장치인데, 여기서 MR 유체는 유체(물, 실리콘 오일 등) 내에 미세하고 자성을 띤 입자를 분산시킴으로써 평소에는 일반적인 점성 유체처럼 자유롭게 유동하다가 자기장이 가해지면 매우 짧은 시간에 입자들이 정렬을 해서 유체의 유동을 제한하고 결과적으로 항복강도 (yield strength)를 발생시키는 제어가능한 유체(controllable fluid)를 말한다. 아래 그림(a,b)는 MR 유체의 거동 메커니즘을 이해하기 쉽게 소개하고 있다. 또한, 그림 (c)에서는 자기장이 없을 때의 감쇠력과 자기장이 있을 때의 감쇠력을 비교하였다.

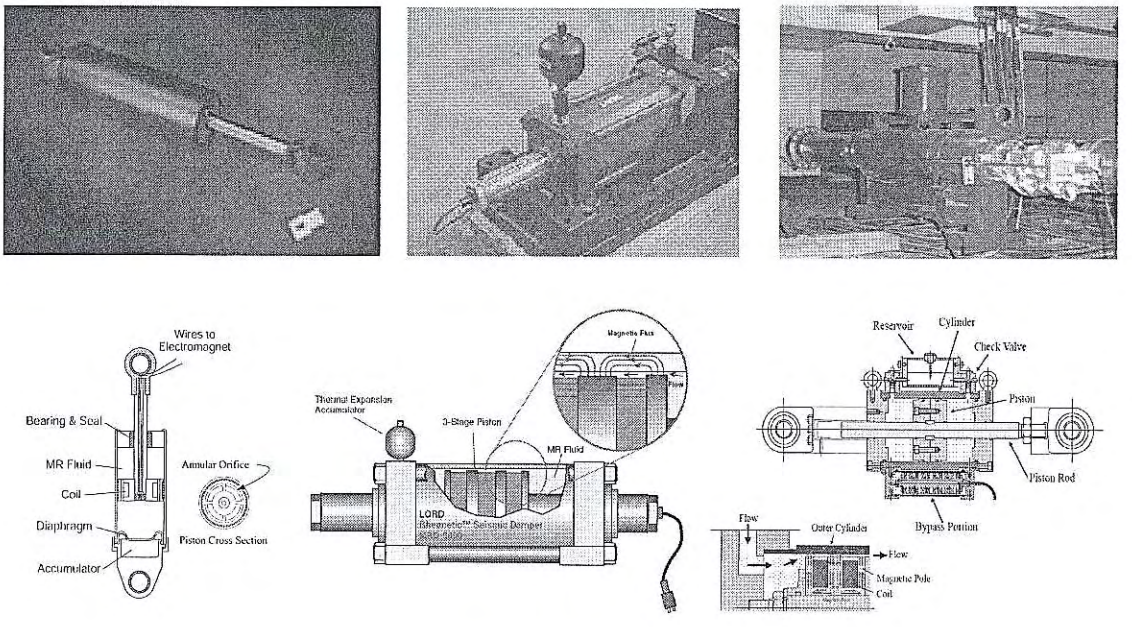


(a) 자기장이 없을 때 (b) 자기장이 있을 때 (c) MR 감쇠기의 동적 범위

그림 1.1.1.4 MR 유체의 거동 원리 및 MR 감쇠기의 동적 범위

MR 감쇠기는 일반적인 능동형 제진 장치와는 달리 기계적 에너지를 직접 구조물에 가하지 못하기 때문에, 한정 입출력(bounded-input bounded-output) 안정도가 보장될 뿐만 아니라, 기계적인 단순성(밸브가 필요 없음), 높은 동적 범위 (MR 감쇠기에 자기장을 가해줌으로써 10배의 힘을 얻을 수 있음), 적은 전력 요구량(일반적으로 50 Watt 이하), 커다

란 감쇠 능력, 외부 환경에 대한 뛰어난 강인성 등과 같은 우수한 특징을 가지고 있다. 따라서, 이 감쇠기는 수동형 제진 장치와 마찬가지로 높은 신뢰성을 가지면서도 능동형 제진 장치의 뛰어난 적응성도 유지가 가능하다는 매우 뛰어난 장점이 있다. 현재, 스마트 제진 장치 중 유일하게 실제 토목/건축 구조물에 적용된 사례가 있을 뿐만 아니라 앞으로도 적용 계획이 다수 있는 등 향후 매우 유망한 제진 장치이다. 아래 그림은 현재 상용으로 사용되고 있는 다양한 용량의 MR 감쇠기의 외관과 개략적인 내부의 모습을 보여주고 있다. 그림 (a,b)는 미국 Lord Corporation 제품이고, 그림 (c)는 일본 Sanwa Tekki Corporation 제품이다.

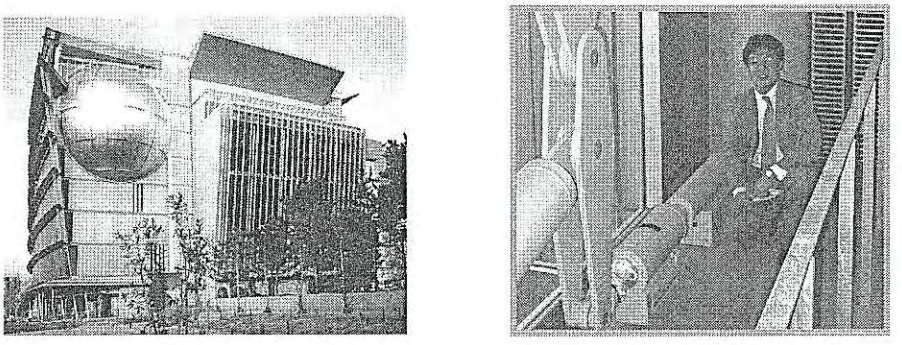


(a) 소용량 MR감쇠기 (b) 대용량 내진용 MR 감쇠기 (c) 대용량 By-pass 형태 내진용 MR 감쇠기

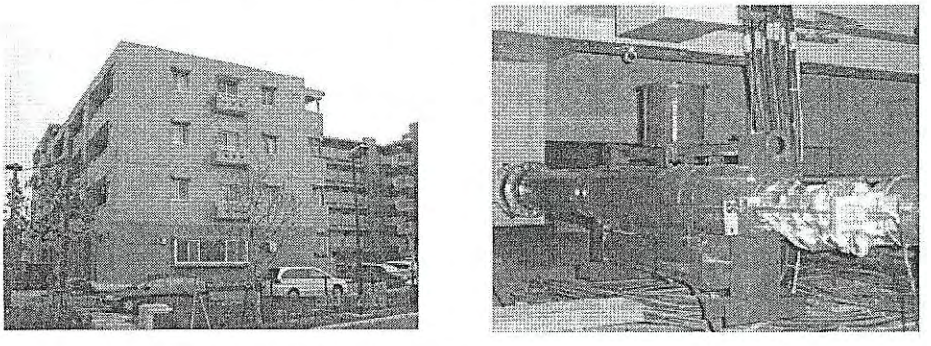
그림 1.1.1.5 상용 MR 감쇠기

MR 감쇠기가 실제 토목/건축 구조물에 적용된 사례는 다음과 같다. 먼저, 내진 대책으로 MR 감쇠기가 설치된 사례는 일본의 과학미래관 (그림 1.1.1.6(a))과 주거용 건물 (그림 1.1.1.6(b))이다. 내풍 대책으로는 2001년 홍콩 기술대학 주축으로 중국 Dongting Lake 사장교의 케이블에 MR 감쇠기를 설치하여 풍우진동을 저감시켰다 (그림 1.1.1.6(c)). 이것이

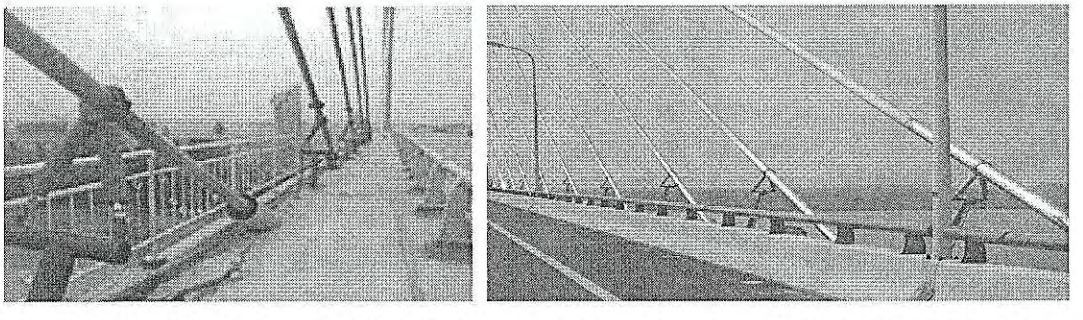
토목/건축분야에 세계최초의 스마트 제진 장치 실 적용사례이다. 그 이후, 중국 Binzhou 사장교에도 케이블 내풍용 MR 감쇠기가 설치되었다 (그림 1.1.1.6(d)). 또한, 현재 시공중에 있는 홍콩의 Stonecutter 사장교나 중국의 Sutong 사장교에도 케이블 내진 대책으로 MR 감쇠기를 계획하고 있다.



(a) 일본 과학미래관과 MR 감쇠기 설치 모습



(b) 일본의 주거용 건물과 MR 감쇠기의 설치 모습



(c) 중국 Binzhou사장교 케이블감쇠기 (d) 중국 Dongting 사장교 케이블 감쇠기

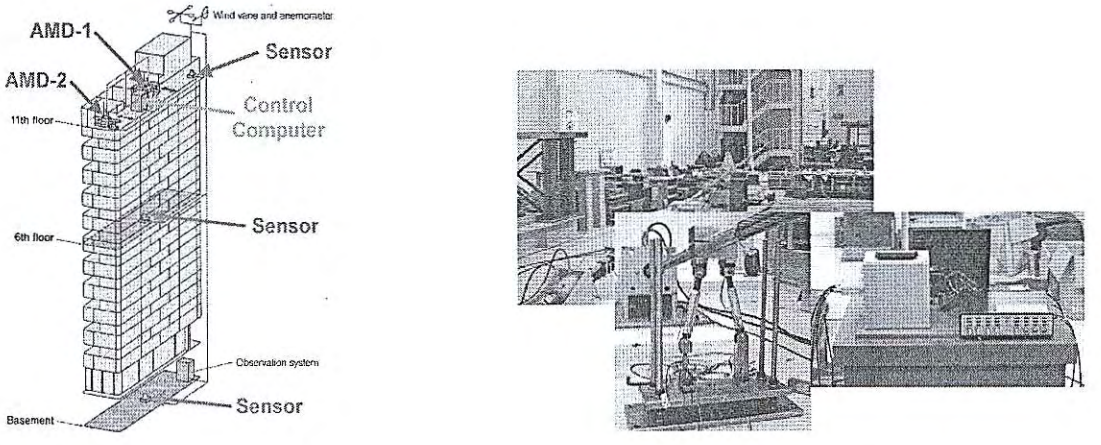
그림 1.1.1.6 스마트 제진 장치 실제 구조물 적용사례

1.1.3. 기존 스마트 제진 장치의 문제점

토목/건축 분야에서 대표적인 스마트 제진 장치인 MR 감쇠기를 내진 및 내풍 대책으로 활용한 많은 연구와 실제 적용사례를 통해 다음과 같은 문제점이 파악되었다.

- 수동형 제진 장치에 비해 설치 및 유지관리가 너무 어려움. 비용이 매우 과다함
- 계측기, 제어용 컴퓨터, 전원공급장치, 전선 등 부대 장치가 너무 많음
- 극한 환경에 설치된 구조물에는 적용하기 힘듦
- 전체 제진 시스템을 조종할 공간 (제어룸)이 필요함

다음의 그림은 이상의 문제점을 설명하기 위한 것이다.



(a) 세계최초 능동형 제진 건물 (1989,일본)　　(b) 케이블 스마트 제진 실험 (2004)

그림 1.1.1.7 기존 스마트 제진 장치의 문제점

그림 1.1.1.7(a)는 비록 능동형 제진 장치를 이용한 건물의 내진 대책이긴 하지만 필요한 전원공급장치가 작다는 점만 제외하고는 현재 스마트 제진 장치의 경우에도 그대로 적용 가능하다. 그림에서 알 수 있듯이, 계측기, 제어용 컴퓨터 및 제어룸, 전선 등이 매우 복잡하게 구성되어 있고 이를 유지관리하는 것이 매우 어렵고 비용이 많이 소요되리라는 것은 자명하다. 그림 1.1.1.7(b)는 본 연구책임자가 수행한 스마트 제진 장치를 이용한 케이블 제진 실험인데, 간단한 실험실 규모의 실험일 뿐인데도 건물의 경우와 마찬가지로 계측기, 전원공급장치, 기다란 전선, 제어용 컴퓨터 등 많은 부대장비가 필요함을 알 수 있다.

즉, 구조물에 대한 내진 및 내풍 대책으로 현 개념의 스마트 제진 장치를 사용한다는 것은 매우 비경제적이고 비효율적인 방식이라 할 수 있다. 따라서, 스마트 제진 장치를 통해 얻을 수 있는 내진 및 내풍 성능 향상이 수동형 제진 장치에 비해 괄목할 만큼 크지 않은 이상, 경제성 면이나 유지관리 면에서 매우 유리한 수동형 장치를 선호하는 것은 당연한 상황이다. 결론적으로, 이상과 같은 기존 스마트 제진 장치의 치명적인 단점을 극복하거나 해소할 수 있는 획기적인 방법이 개발되지 않는다면 이 장치의 향후 전망은 매우 어두울 수 밖에 없다. 하지만, 아직까지 국내는 물론이고 외국에서도 이에 대한 대책을 확보하기 위한 연구가 전무한 상태이다.

1.2. 본 연구과제에서 실용화 시킬 신개념 스마트 제진 장치의 개요

본 연구과제는 앞 절에서 언급된 기존 스마트 제진 장치의 주요한 단점인 경제성 및 설치/유지관리 면에서의 단점은 물론이고, 계측기, 컴퓨터, 전원장치 및 전선과 같은 많은 부대장치의 문제점을 동시에 해소할 수 있도록 이론적, 수치해석적으로는 이미 검증된 "신개념" 스마트 제진 장치를 실용화하여 실제 토목/건축 구조물의 내진 및 내풍용으로 제품화하는 것을 목표로 잡고 있다. 본 연구팀이 이미 보유하고 있는 기술은 "전자기유도부가 구비된 MR 감쇠장치"라는 제목으로 국내 특허등록이 완료 (등록번호: 제0416398호)된 상태로 전문가들로부터 아이디어를 공인받은 신기술이다. 또한, 국내외 저명 학술발표회에서의 발표를 통해 관련분야의 연구자들로부터 개념의 독창성과 실제 적용가능성을 인정받았다.

신개념 스마트 제진 장치의 원리를 간략하게 설명하면 다음과 같다. 패러데이의 전자기유도법칙에 의해 진동에 의한 운동에너지를 전기에너지로 변환시키는 전자기유도부(electromagnetic induction (EMI) system)을 아래 그림과 같이 MR 감쇠기에 장착하여 제어 시스템과 외부 전원을 대신하도록 함으로써, 단순하고 경제적인 신개념의 스마트 제진 장치를 개발할 수 있다.

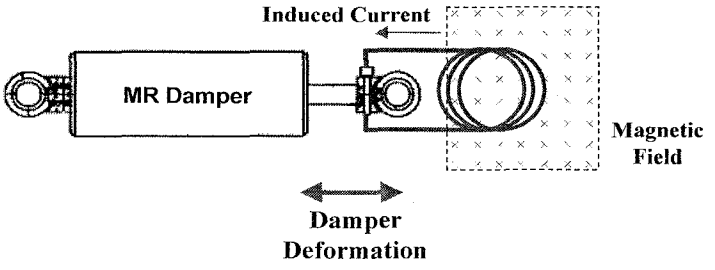


그림 1.1.2.1 신개념 스마트제진 장치의 개략도

전자기유도부 (EMI System)에서 생성되는 전기에너지는 영구자석의 세기 그리고 솔레노이드 코일의 감긴 횟수와 코일의 크기 등을 통하여 조절할 수 있고, MR 감쇠기가 설치된 지점의 구조물의 변형 속도에 비례하여 MR 감쇠기의 점성을 증가시킨다. 좀 더 자세히 설명하자면, 아래의 식 (1.1.2.1)과 같은 패러데이의 법칙에 따라서 영구자석과 코일의 상대운동이 빠르면 강한 전류가 유도되고, 반대의 경우에는 약한 전류가 유도된다.

$$\epsilon = -NA\frac{dB}{dt} \qquad (1.1.2.1)$$

여기서 ϵ는 볼트(V) 단위를 갖는 유도기전력이며, N은 코일이 감긴 회전수, B는 자기장의 세기, A는 단면적이다. 이러한 원리에 의해, 전자기유도부를 구비한 MR 댐퍼는 전원과 계측기 없이 독립적으로 작동하여 구조물의 응답을 감소시킨다. 그러므로, 이와 같이 간단한 전자기유도부는 기존의 MR 댐퍼-기반 제어시스템을 대체할 수 있다.

본 연구과제에서는 신개념 스마트 제진 장치뿐만 아니라, 이러한 제진 장치를 실제 구조물에 적용할 때, 기구학적 관점에서 효율을 극대화시킬 수 있는 변위 증폭 매커니즘 (그림 1.1.2.2 참고)을 활용하고자 한다. 그림과 같이 구조물의 진동 방향과 제진장치의 상대변위의 방향이 90도가 될 때 최상의 조건이며, 사잇각 θ를 조절함으로써 증폭량을 조절할 수 있다. 따라서, 작은 변형을 갖는 구조물에 대해서도 좀 더 커다란 감쇠력을 발휘하거나, 더 작은 용량 (따라서 더욱 저렴한 가격)의 제진 장치를 이용하여 똑같은 감쇠력을 발휘하는 시스템을 개발하고자 한다. 미국 SUNY Buffalo의 Constantinou 교수가 이에 대한 연구를

수행하였으나, 구조물의 거동 특성을 고려한 효율적인 설계 및 적용이 이루어지지 않았고, 특히, 그의 연구에서는 일반적인 점성 감쇠기 (viscous damper)를 사용한 한계가 있다. 국내에서도 전남대학교 건축학과 황재승 교수 등이 연구를 수행하고 있으나 건축 구조물에 제한적으로 사용하고 있고, 교량 구조물 및 사장교 케이블에 적합한 설계 및 적용에 대한 연구는 수행되어 있지 않다.

그림 1.1.2.2를 이용해 변위증폭 매커니즘에 대하여 좀 더 자세히 설명하겠다. 기존 문헌에서 제시된 선형화된 변위 증폭계수 f (구조물의 변위 u에 대한 감쇠기의 상대변위 u_D의 비)를 본 매커니즘에 적용하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f = 1/\tan\theta \tag{1.1.2.2}$$

그렇다면, 사잇각 $\theta = 30^\circ$ 이면 $f = 1.73$이고, $\theta = 15^\circ$ 이면 $f = 3.73$이 된다. 또한, 감쇠기와 변위증폭 장치가 결합된 제진 시스템에 의해 구조물에 가해지는 감쇠력은 다음과 같다.

$$F = C_0 \cdot f^2 \cdot \dot{u} \tag{1.1.2.3}$$

여기서, C_0는 선형 점성유체 감쇠기의 감쇠상수이고 $\dot{u}$는 구조물의 속도이다. 식 (1.1.2.3)에서 알 수 있듯이, 가위-잭 형태 변위 증폭장치를 구조물의 제진을 위해 사용할 경우에 장치에 의해서 감쇠력이 크게 증가하기 때문에, 기존 선형 점성유체 감쇠기보다 용량이 훨씬 더 작은 감쇠기로도 똑같은 제진 성능을 얻을 수 있는 장점을 갖게 된다.

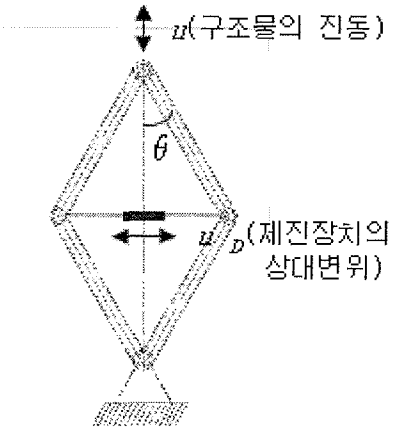


그림 1.1.2.2 변위증폭 매커니즘

따라서, 본 연구과제를 통해 실용화될 신개념 스마트 제진 장치는 크게 다음과 같이 기본형과 응용형으로 구분할 수 있으며, 기본형은 기본적으로 모든 제진 문제에 적용할 수 있고, 응용형은 특정 대상 구조물에 더욱 적합하게 최적화된 제진 시스템이라 할 수 있다.

- 기본형: 전자기유도부를 가진 MR 감쇠기
- 응용형: 전자기유도부를 가진 MR 감쇠기 + 변위증폭 매커니즘

2 절 연구개발의 목표 및 내용

2.1. 연구개발의 최종목표

2.1.1. 최종목표

- "토목/건축 구조물의 내진 및 내풍 대책으로 적합한 신개념 스마트 제진 장치를 실용화하는 것"이 본 연구의 최종목표임
- 이를 위해 기존 스마트 제진 장치에 비해 유지관리와 경제성 면에서 획기적인 장점이 있고 제진 성능도 뛰어난 전자기유도부가 있는 MR감쇠기를 제품화

- 또한, 신개념 스마트 제진 장치에 변위확대 장치를 결합하여 최적의 제진 성능을 갖는 내진 및 내풍 시스템을 개발하고자 함
- 최종적으로 실제 토목/건축 구조물에 적용하여 실용화 완성함

2.1.2. 최종목표의 성격 및 설정 근거

○ 최종목표의 성격 (최종적인 연구개발 성과물)
- 1차년도: 신개념 스마트 제진 장치 및 제진 시스템의 시작품
- 2차년도: 제진 장치의 시작품을 이용한 대규모 내진 및 내풍 성능 실험
- 3차년도: 제진 장치의 최종적인 제품 및 실 구조물 적용

○ 최종 목표 설정 근거
- 이미 세종대학교와 한국과학기술원에서 예비 공동연구 (이론, 해석적 연구)를 통해, 성능이 검증된 새로운 기술임
- 국내 특허등록 (등록번호: 제0416398호)을 통해 제품에 대한 아이디어를 전문가들로부터 인정받음
- 간단한 특성 실험을 이미 수행하였고, 시작품을 바로 제작할 수 있는 단계임
- 한국기계연구원의 대형 진동대 및 제진 장치 설계/제작 및 특성/성능 실험 경험이 풍부한 전문 연구진 참여함
- (주)티이솔루션은 국내최고의 내풍 성능 실험 평가 팀이므로 제진장치의 내풍성능 정확히 평가 가능
- 이상의 근거로, 3년의 연구기간 동안 충분히 최종 목표 달성 가능함

2.1.3. 하중 및 구조물 별 연구범위

본 연구과제에서 신개념 스마트 제진장치에 대한 성능평가에 대한 연구범위는 아래 표와 같다.

구조물 / 하중	건축구조물	케이블	면진교량
바람하중	-	-44.7m 및 100m 케이블 가진 실험 -축소 케이블에 대한 내풍성능 평가 실험	-
지진하중	-축소 철골구조물에 대한 내진성능평가실험 -실규모 철골 구조물에 대한 내진성능평가실험	-	-축소 면진교량에 대한 진동대 내진성능평가실험

2.2. 연차별 연구목표 및 내용

표 1.2.1 연차별 연구목표 및 내용

연 차	연구목표	주요 연구내용
1차년도	▪ 신개념스마트 제진장치 시제품 제작	▪ 신개념 스마트 제진장치 설계 ▪ 신개념 스마트 제진장치 제작
	▪ 신개념스마트 제진장치 특성실험	▪ 신개념 스마트 제진장치 동특성 실험 ▪ 시제품에 대한 동적 모델 구성 ▪ 동적 모델과 실험결과 비교
	▪ 제진장치 고려한 내진/내풍 성능 수치해석	▪ 제진 장치 고려한 구조물의 내진 성능 수치해석 ▪ 제진 장치 고려한 구조물의 내풍 성능 수치해석
2차년도	▪ 신개념 스마트 제진장치 설치위치 및 최적용량 결정	▪ 신개념스마트 제진장치의 설치위치 결정 ▪ 신개념스마트 제진장치의 최적용량 결정
	▪ 신개념 스마트 제진장치가 설치된 구조물의 내진 성능 평가	▪ 내진 성능평가를 위한 계획 수립 ▪ 대형 진동대 실험을 통한 내진성능 평가
	▪ 신개념 스마트 제진장치가 설치된 구조물의 내풍 성능 평가	▪ 내풍 성능평가를 위한 계획 수립 ▪ 대형 풍동 실험을 통한 내풍성능 평가
3차년도	▪ 최종 제품 설계/제작	▪ 제진장치의 설치위치에 대한 추가 연구 ▪ 영구자석 자력 변화에 대한 검토 ▪ 신개념스마트 제진장치의 성능평가 (추가적인 실험) ▪ 최종 시제품 설계/제작 ▪ 제진 장치의 경제성 분석
	▪ 실구조물 적용통한 시제품의 내진/내풍 성능 평가	▪ 실 구조물 또는 실물 크기 구조물에 적용하여 시제품의 내진 성능 평가 ▪ 실 구조물 또는 실물 크기 구조물에 적용하여 시제품의 내풍 성능 평가
	▪ 장치의 제품화/상용화 위한 제작 및 성능 평가기술 표준화	▪ 장치의 제품화/상용화 위한 제작 ▪ 장치 성능평가기술 표준화

2.2.1. 1차년도 연구목표 및 내용

(1) 연구목표

▪ 신개념스마트 제진장치 시제품 제작
▪ 신개념스마트 제진장치 특성실험
▪ 제진장치 고려한 내진/내풍 성능 수치해석

(2) 연구내용 및 범위

- 제진 장치와 변위확대 기구를 결합한 시스템 설계/제작
- 시제품에 대한 동특성 실험 및 내구성,안정성 등 검토
- 시제품에 대한 동적 모델 구성 및 실험과 비교
- 제진 장치 고려한 구조물의 내진 성능 수치해석
- 제진 장치 고려한 구조물의 내풍 성능 수치해석

2.2.2. 2차년도 연구목표 및 내용

(1) 연구목표

▪ 신개념 스마트 제진장치 설치위치 및 최적용량 결정
▪ 신개념 스마트 제진장치가 설치된 구조물의 내진 성능 평가
▪ 신개념 스마트 제진장치가 설치된 구조물의 내풍 성능 평가

(2) 연구내용 및 범위

- 신개념 스마트 제진 장치의 설치 위치 및 최적 용량 결정
- 제진장치에 대한 내진/내풍 성능평가를 위한 계획 수립
- 대형 진동대 실험을 통한 제진 장치의 내진 성능 평가
- 대형 풍동 실험을 통한 제진 장치의 내풍 성능 평가

2.2.3. 3차년도 연구목표 및 내용

(1) 연구목표

▪ 최종 제품 설계/제작
▪ 실구조물 적용통한 시제품의 내진/내풍 성능 평가
▪ 장치의 제품화/상용화 위한 제작 및 성능 평가기술 표준화

(2) 연구내용 및 범위

- 추가적인 대규모 진동대/풍동 실험을 통한 성능 평가
- 고층건물에 대한 합리적 제진장치 위치 및 용량결정에 대한 추가 연구
- 신개념 스마트 제진 장치의 경제성 분석
- 최종 제품 설계 및 제작
- 시제품 안정화 및 신뢰성 확보 (영구자석 자력유지관련 연구 포함)
- 실물 크기 구조물 (5층 철골구조물 등) 및 실제구조물 (사장 케이블, 면진 교량 등)에 적용하여 제진 성능 평가
- 제진 장치의 제품화/상용화를 위한 제작 및 성능 평가 기술 표준화
- 실용화 촉진을 위해 건설신기술 신청 (계획)

3 절 연구개발의 중요성

1. 기술적 측면

- 기존 제진 장치의 소극적 개선이 아닌 신개념 제진 장치 개발 및 실용화로 인한 관련분야 기술 주도
- 외국에도 없는 유일한 기술 확보를 통한 기술 경쟁력 우위 선점
- 경제성과 유지관리 용이성 및 제진 성능까지 확보할 수 있는 우수한 제진 장치
- 이를 위한 이론적, 해석적 연구를 통해 이미 검증된 기술임
- 이미 국내 특허등록 되어 있음
- 세계 최초의 신개념 스마트 제진 장치 설계, 제작 및 설치 기술 확보
- 독보적인 기술력으로 관련 세계 시장 및 학문 분야 주도

2. 경제 · 산업적 측면

- 최근 우려가 고조되고 있는 내진 대책에 매우 적합한 제진 장치임
- 태풍 및 돌풍으로 인한 구조물 파괴 및 손상을 방지할 수 있는 제진 장치임
- 현재 국내 건설시장에서 관련 분야는 외국 제품 및 기술을 단순히 도입하는 상황에서, 본 제품 및 기술 확보로 인해 기술 도입 불필요, 기술료 해외 유출 불필요함

- 국외에서도 독보적인 제품 및 기술 보유로 인해 건설 산업 국제 경쟁력 크게 향상됨
- 특정 구조물에 국한된 기술이 아니라, 원천기술인 제진 장치 개발이므로 향후 다양한 구조물에 활용되어 경제, 산업적으로 파급효과가 매우 큼

3. 사회 · 문화적 측면

- 확실한 내진 및 내풍 대책 확보로 인해 사회 안정성 향상에 기여
- 선진 외국과의 비교해도 손색없는 첨단 기술력 확보로 인한 국가 자긍심 고취

제 2 장 국내·외 기술개발 현황

1 절 국내기술동향

국내 토목/건축 분야에서는 아직까지 산업계에서 본격적으로 스마트 제진 장치에 대한 개발 및 연구에 직접 참여하고 있는 업체는 없다. 대부분의 연구가 학계를 중심으로 이루어지고 있으며, 좀 더 일찍 연구를 시작한 기계분야 (인하대학교, 한국과학기술원)와 학제간 연구를 통해 연구 성과를 높이고 있다. 본 연구과제에 참여하고 있는 주관, 협동 연구진을 제외하고 현재 토목/건축 분야에서 활발하게 스마트 제진 장치에 대한 연구를 수행하고 있는 연구자 및 연구내용을 정리하면 다음과 같다.

연구분야	연구기관/연구자	연구내용
교량 제진용 스마트 제진 장치	한국과학기술원/ 윤정방 교수	- 구조물의 내풍성능 향상을 위한 MR 감쇠기 연구 - 기초격리 건물의 내진성능 향상을 위한 스마트제진 시스템에 대한 연구
	서울대학교/ 고현무 교수	- MR 감쇠기 및 퍼지제어 기법을 이용한 교량 제진 - 최적 설계기법을 도입한 구조물 및 제어시스템의 동시 최적 설계에 대한 연구
	한양대학교/ 이종세 교수	- 면진교량의 내진 성능 향상을 위한 MR 유체 감쇠기 및 MR 엘라스토머 연구
고층건물 제진용 스마트 제진 장치	단국대학교/ 민경원 교수	- 고층 건물의 진동제어를 위한 MR 감쇠기 기반 스마트 제진 시스템에 대한 연구 수행 - 작은 용량 MR 감쇠기 자체 제작, 성능 실험 수행

2 절 국외기술동향

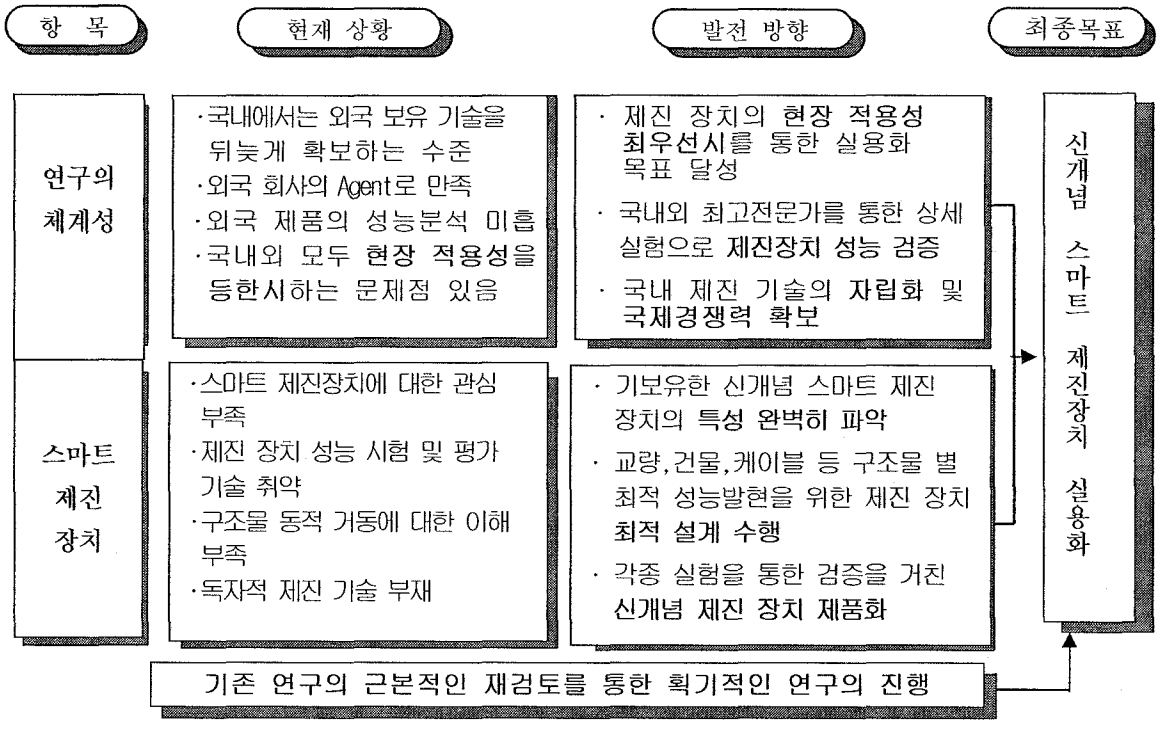
국외에서는 미국, 일본, 중국을 중심으로 내진 및 내풍용 스마트 제진 장치에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히, 국내와는 달리 산업체에서 관심을 가지고 상용 제진 장치를 만들고 있을 뿐만 아니라 실제 다양한 용도로 적용 중에 있거나 계획되고 있다. 미국에서는 Delphi라는 회사의 MR 감쇠기가 자동차 현가장치로 실

제 적용되고 있으나 토목/건축 분야에는 적용 사례가 없다. 반면에, 중국과 일본에서는 앞에서 살펴 본 바와 같이 내풍, 내진용으로 MR 감쇠기가 각각 사용되었다. 학계에서는 면진 건물이나 면진 교량의 내진성능 향상에 대한 벤치마크 연구에서도 샘플 제어기로 MR 감쇠기를 고려할 정도로 스마트 제진 장치에 대한 관심은 높다 하겠다. 하지만, 실제 적용상의 불편함과 문제점에 대한 검토는 아직 수행되고 있지 않다.

연구분야	연구기관/연구자	연구내용
산업계에서의 스마트 제진 장치 개발 현황	미국 Lord Corporation	- 소용량, 대용량 MR 감쇠기 제작 및 판매 - MR 유체 제조 및 판매
	일본 Sanwa Tekki Corporation	- 대용량 내진용 MR 감쇠기 제작 및 판매 (by-pass 형태)
학계에서의 스마트 제진 장치 연구 현황	미국 U. of Illinois / B.F. Spencer 교수	- MR 감쇠기를 토목 분야 제진 문제에 최초로 응용 - 케이블 제진 문제, 20톤 용량 내진용 MR 감쇠기 개발
	미국 Washington U./ S.J. Dyke 교수	- MR 감쇠기를 이용항 내진 문제 활발히 참여 - 사장교 및 건물의 내진 성능 향상을 위한 MR 감쇠기 연구
	미국 U.C. Irvine/ J.N. Yang 교수	- 고층건물의 내풍성능 향상을 위한 스마트 제진 장치 연구
	미국 Rice U./ S. Nagarajaiah 교수	- 면진 건물 내진 성능 향상에 대한 벤치마크 문제 개발 - 면진 교량 내진 성능 향상에 대한 벤치마크 문제 개발
	홍콩기술대학/ J.M. Ko 교수, Y.Q. Ni 교수	- 다양한 토목/건축구조물 제진 문제에 MR 감쇠기 적용 연구 - 케이블 제진 문제에 MR 감쇠기 적용 연구

3 절 기술동향 분석 결론

토목/건축 분야에서 국내의 스마트 제진 장치 관련 기술은 학계를 중심으로 소수의 연구자들이 연구하는 수준이고 업계에서는 아직 관심이 미미한 수준이다. 외국에서도 학계와 업계에서 연구 및 개발이 되고 있긴 하지만 토목/건축 분야의 특수성을 고려하여 기존 스마트 제진 장치의 문제점을 해소하는 수준의 연구는 진행되고 있지 않은 상황이다. 이상의 내용을 표로 정리하면 다음과 같다.


항 목
현재 상황
발전 방향
최종목표
연구의 체계성
·국내에서는 외국 보유 기술을 뒤늦게 확보하는 수준
·외국 회사의 Agent로 만족
·외국 제품의 성능분석 미흡
·국내외 모두 현장 적용성을 등한시하는 문제점 있음
· 제진 장치의 현장 적용성 최우선시를 통한 실용화 목표 달성
· 국내외 최고전문가를 통한 상세 실험으로 제진장치 성능 검증
· 국내 제진 기술의 자립화 및 국제경쟁력 확보
스마트 제진 장치
·스마트 제진장치에 대한 관심 부족
·제진 장치 성능 시험 및 평가 기술 취약
·구조물 동적 거동에 대한 이해 부족
·독자적 제진 기술 부재
· 기보유한 신개념 스마트 제진 장치의 특성 완벽히 파악
· 교량,건물,케이블 등 구조물 별 최적 성능발현을 위한 제진 장치 최적 설계 수행
· 각종 실험을 통한 검증을 거친 신개념 제진 장치 제품화
신개념 스마트 제진장치 실용화
기존 연구의 근본적인 재검토를 통한 획기적인 연구의 진행

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

1 절. 신개념 스마트 제진장치의 설계/제작/평가 기술 개발

1.1. 신개념 스마트 제진장치

1.1.1. 신개념 스마트 제진장치 개발 목적

자기유변유체 감쇠기(Magnetorheological Fluid Damper, 이하 MR 감쇠기)는 반능동 제어 (semi-active control) 장치의 일종으로써, 자기유변유체를 이용하여 감쇠기의 점성력을 변화시킴으로써 제진 성능을 향상시킬 수 있다. 1990년 중반에 미국 Univ. of Notre Dame의 B. F. Spencer Jr. 교수 (현재는 Univ. of Illinois at Urbana Champaign의 교수)가 MR 감쇠기를 처음으로 토목 분야에 소개하였고, MR 감쇠기가 갖는 여러 장점 (즉, 배터리 수준의 소규모 전력사용과 작동의 신뢰성 및 내구성 그리고 경제성 등) 때문에 근래에 활발하게 연구되고 주목을 받고 있다. MR 감쇠기-기반 제진 시스템은 2001년도에 중국의 사장교인 Dongting Lake Bridge와 일본의 Nihon-Kagaku-Miraikan 빌딩에 진동제어를 위해 설치된 바 있으며, 이는 실규모 구조물에 적용된 세계 최초 사례이다.

현 단계 MR 감쇠기-기반 제진 시스템은 배터리 규모의 전원 및 구조물의 응답을 측정하는 센서 그리고 센서 신호로부터 제어 명령을 결정하는 제어기 등을 포함하는 피드백 제어시스템 (feedback control system)을 필요로 한다. 앞에서 말한 여러 장점에도 불구하고 사장교 케이블의 진동제어나 초고층 빌딩의 진동제어를 위해 다수의 MR 감쇠기를 사용할 경우, 전력공급 및 센서 그리고 제어기 등을 포함하는 제어 시스템을 구축하고 유지 관리하는 것은 많은 노력을 필요로 한다.

따라서, 본 연구에서는 기존 MR 감쇠기의 제어시스템을 대체하기 위하여, 전자기유도 시스템 (Electromagnetic Induction System, 이하 EMI 시스템)을 구비한 MR 감쇠기를 제안하였다. EMI 시스템은 솔레노이드 코일과 영구자석으로 구성되며, 패러데이의 전자기 유도법칙 (Reitz et. al. 1993)에 의해 MR 감쇠기의 왕복운동을 전기에너지로 변환한다. 이렇게 생성된 전기에너지는 다시 MR 감쇠기의 점성

을 변화시키는 전원으로 사용되며, 생성되는 전기에너지의 강도는 MR 감쇠기의 왕복운동 속도 및 영구자석의 세기 그리고 솔레노이드 코일의 회전수에 비례한다. 또한 MR 감쇠기의 왕복운동이 빠르면 강한 전류가 유도되고, 왕복운동이 느리면 약한 전류가 유도된다. 따라서 MR 감쇠기에 가해지는 하중의 강도에 따라 MR 감쇠기의 점성이 변화한다. 이러한 EMI 시스템을 구비한 MR 감쇠기는 전력 및 센서 그리고 제어기를 필요로 하지 않는다. 이러한 간단한 구조는 EMI 시스템을 구비한 MR 감쇠기를 사용하는 가장 큰 장점 중에 하나이다.

위와 같이, EMI 시스템을 구비한 MR 감쇠기-기반 제진 시스템을 신개념 스마트 제진장치라고 하며, 신개념 스마트 제진장치가 현재의 반능동 제진 시스템의 여러 단점들을 극복하면서도 그와 유사하거나 더 뛰어난 성능을 발휘 할 수 있음을 보이는 것이 본 연구과제의 목표이다.

1.1.2. 신개념 스마트 제진장치

MR 감쇠기는 감쇠기 내부에 장착된 전자석에 전류를 가해서 자기장을 형성시켜 자기유변유체의 점성 특성을 변화시키는 과정을 통해 효율적으로 구조물의 진동을 감쇠시키는 장치이다. 따라서 MR 감쇠기를 이용하여 구조물의 응답을 효과적으로 감쇠시키기 위해서는 그림 3.1.1.1과 같이 전원, 제어기, 그리고 센서들로 이루어진 제어시스템이 필요하다.

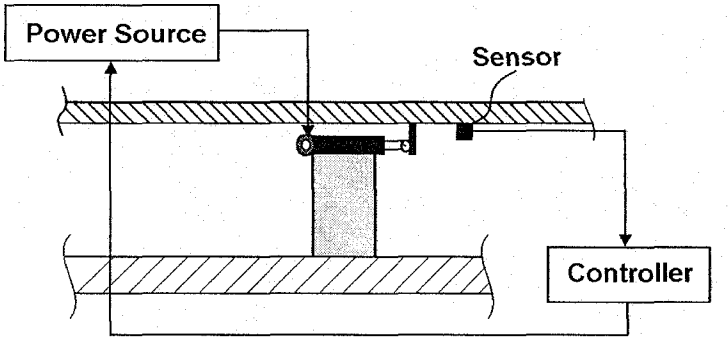


그림 3.1.1.1 MR 감쇠기를 위한 제어 시스템

하지만, 이러한 복잡한 제어시스템은 큰 규모의 토목구조물에 적용하기 어려우므로 본 연구과제에서는 그림 3.1.1.2와 같이 패러데이의 전자기유도법칙에 의해 진동에너지를 전기에너지로 변환시키는 EMI 시스템을 MR 감쇠기에 장착하여 제어시스템과 외부 전원을 대신하도록 하였다.

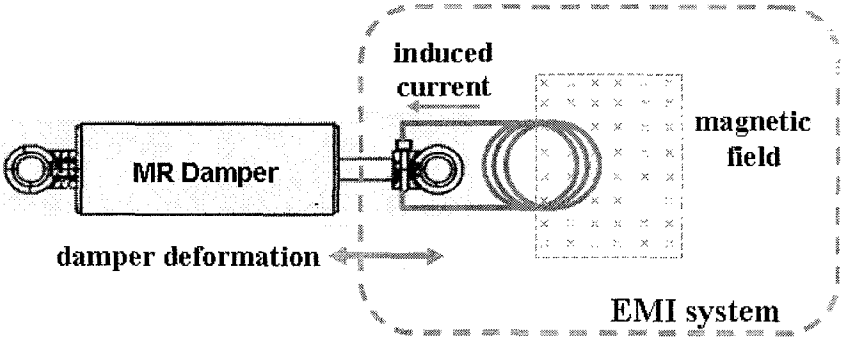


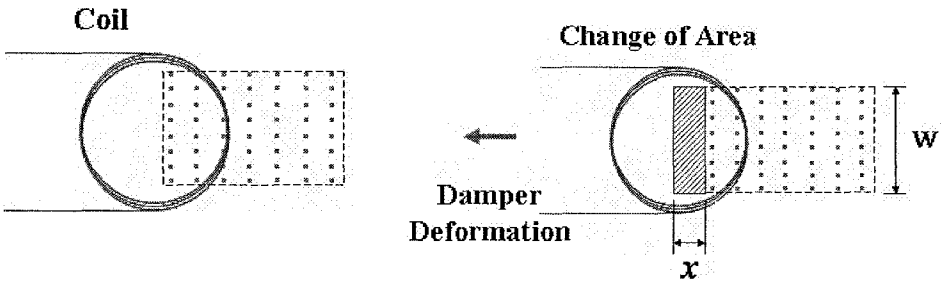
그림 3.1.1.2 EMI 시스템을 구비한 MR 감쇠기의 개략도

EMI 시스템은 코일과 자기장을 형성할 수 있는 영구 자석으로 이루어지며 식 (3.1.1.1)과 같은 패러데이의 전자기 유도법칙에 따라 코일과 영구자석의 상대 속도에 비례하여 유도전류를 생성하게 된다.

$$\varepsilon = -n\frac{d\Phi_B}{dt} = -n \times B\frac{dA}{dt} \tag{3.1.1.1}$$

여기서, ε는 유도 기전력, n은 코일이 감긴 횟수, Φ_B는 Magnetic Flux, B는 자기장의 세기, A는 자기장 내부에 위치한 코일의 면적이다.

즉, 그림 3.1.1.3a와 같이 한 개의 코일이 영구 자석에 의하여 생성된 자기장 내부에 존재할 때 감쇠기에 발생된 변위에 의하여 그림 3.1.1.3b와 같이 코일의 위치가 변하게 되고, 코일 내부의 자기장 변화량을 상충하기 위하여 코일 내부에 유도전류가 흘러 코일이 연결된 MR 감쇠기에 전원을 공급한다. 다시 말하면, 코일과 영구자석 사이의 상대변위에 의한 운동에너지가 MR 감쇠기의 전원으로 사용되는 전기 에너지로 변환이 되는 것이다.



(a) 전자기 유도부 변위 생성 전 (b) 전자기 유도부 변위 생성 후

그림 3.1.1.3 EMI 시스템의 거동 원리

따라서 빠른 변위는 코일 내부의 자기장량이 크게 변화하게 하므로 큰 전력이 생성되고 느린 변위는 자기장량이 크게 변화하지 않으므로 작은 전력이 생성되게 된다. 이는 MR 감쇠기에 전달되는 전류량의 크기가 댐퍼에 유발된 변위에 의하여 결정되므로 일종의 제어기로서의 역할을 수행하게 된다. 즉 빠른 속도가 유발되면 더 큰 제어력을 발생하도록 전원을 공급하고 느린 속도가 유발되면 작은 제어력으로 구조물을 제어하도록 한다. 따라서 EMI 시스템은 MR 감쇠기에 전원을 공급하는 동시에 복잡한 계측시스템과 제어기의 역할까지 수행하게 된다.

1.2. 신개념 스마트 제진장치의 이론적인 고찰

본 연구과제에서 개발한 EMI 시스템은 구조물의 진동에서 발생하는 운동에너지를 이용하여 전기에너지를 생성하여 이를 MR 감쇠기에 가해주어 감쇠력을 변화시키는 시스템이다. 따라서 구조물과 EMI 시스템 사이에서의 에너지 변환 및 생성에 대한 이론적인 고찰을 수행하였다.

그림 3.1.2.1.은 일반적인 2-port 에너지 발전 시스템을 나타낸다(Nakano et al. 2007). 그림에서 f_b 는 구조물에 가해지는 외력, Z_{ms}는 구조물의 임피던스, u는 구조물의 속도, f는 변환기에 의해 발생되는 힘을 뜻하며, Z_{mt}와 Z_{et}는 각각 개회로에서의 변환기의 기계적, 전기적 임피던스를 뜻한다. T_{me}와 T_{em}은 변환계수로서, 단위 전류당 생성되는 힘과 단위속도당 생성되는 전압을 뜻한다. Z_{eL}은 변환기에서 발생한 전기에너지를 사용하는 장치의 임피던스를 의미하며 i와 v는 각각 전류와

전압이다.

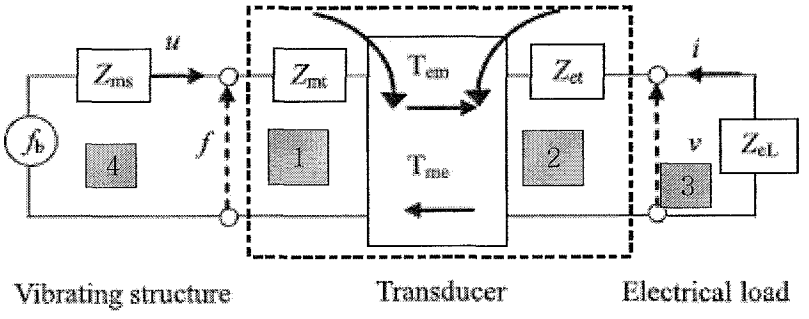


그림 3.1.2.1 2-port 네트워크 변환기 모델

위 그림에서 1 ~ 4 폐회로 내의 수식을 구하면 다음과 같다.

$$f = Z_{mt}\,u + T_{me}\,i \tag{3.1.2.1}$$

$$v = Z_{et}\,i + T_{em}\,u \tag{3.1.2.2}$$

$$v = -Z_{eL}\,i \tag{3.1.2.3}$$

$$f = f_b - Z_{ms}\,u \tag{3.1.2.4}$$

또한 변환계수 T_{me} 와 T_{em} 은 그 크기는 같고 부호는 반대이기 때문에 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$|T_{em}| = |T_{me}| \tag{3.1.2.5}$$

$$T_{em}\,T_{me} = -\phi^2 \tag{3.1.2.6}$$

식 (3.1.2.2)를 식 (3.1.2.3)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$i = -\frac{T_{em}}{Z_{eL} + Z_{et}}\,u \tag{3.1.2.7}$$

식 (3.1.2.7)을 식 (3.1.2.1)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$f = \left(Z_{mt} - \frac{T_{em}\, T_{me}}{Z_{et} + Z_{eL}} \right) u \tag{3.1.2.8}$$

이상에서 구한 일반적인 시스템의 경우를 본 연구과제에서 사용하고자 하는 EMI 시스템과 MR 감쇠기의 경우에 대해 확인하였다.
MR 감쇠기와 EMI 시스템이 설치된 구조물을 그림 3.1.2.2.와 같이 간략히 도시하였다.

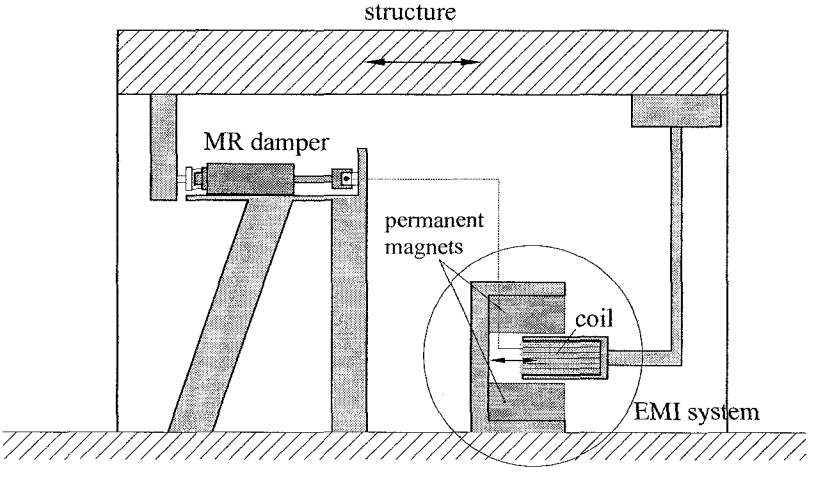


그림 3.1.2.2 MR 감쇠기와 EMI 시스템이 설치된 구조물

그림 3.1.2.2.를 그림 3.1.2.1.과 비교하여 보면 Vibrating structure는 구조물, Electric load는 MR 감쇠기, Transducer는 EMI 시스템이라 할 수 있다. EMI 시스템의 코일에서 발생하는 전류는 그 값에 비례하는 전자기 감쇠력을 생성하는데 이것이 그림 3.1.2.1.에서 f에 해당한다. 마찬가지로 코일의 움직임은 속도에 비례하여 전압을 생성시킨다. EMI 시스템의 경우 변환계수는 다음과 같이 정의된다.

$$T_{em}\, T_{me} = -(Bl)^2 = -(BNw)^2 \tag{3.1.2.9}$$

여기에서, B는 자기장의 자속밀도, l은 코일의 유효길이로 코일의 턴수 N, 자기

장 범위 안에 있는 코일의 폭 w의 곱으로 나타낼 수 있다.

EMI 시스템의 임피던스 Z_{mt}는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$Z_{mt} = sL_{mt} \tag{3.1.2.10}$$

여기서 L_{mt}는 코일의 질량, $s = j\omega$ 이다.

일반적인 코일은 인덕턴스와 저항값을 가지기 때문에 코일의 임피던스는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Z_{et} = R_{et} + sL_{et} \tag{3.1.2.11}$$

여기서 R_{et}는 코일의 저항, L_{et}는 코일의 인덕턴스 값이다.

MR 감쇠기 부분을 일련의 LCR 회로로 가정한다면 MR 감쇠기의 임피던스는 다음과 같다.

$$Z_{eL} = R_{eL} + sL_{eL} + \frac{1}{sC_{eL}} \tag{3.1.2.12}$$

여기서 R_{eL}, L_{eL}, C_{eL}은 각각 MR 감쇠기의 저항, 인덕턴스, capacitance 값이다.

이상에서 구한 식 3.1.2.9 ~ 3.1.2.12를 식 3.1.2.7과 3.1.2.8에 대입하여 정리하면 다음과 같이 EMI 시스템에서 발생하는 전류와 전자기 감쇠력을 계산할 수 있다.

$$i = \frac{B \cdot A \cdot w}{R_{et} + sL_{et} + R_{eL} + sL_{eL} + 1/sC_{eL}} \tag{3.1.2.13}$$

$$f_{EMI} = \left(sL_{mt} - \frac{-(B \cdot A \cdot N)^2}{R_{et} + sL_{et} + R_{eL} + sL_{eL} + 1/sC_{eL}} \right) u \tag{3.1.2.14}$$

1.3. 소형 신개념 스마트 제진장치의 설계/제작 및 특성 분석

전자기유도(EMI) 시스템은 크게 영구자석과 솔레노이드로 구분할 수 있다. 제작된 영구자석과 솔레노이드를 설명하고, 이들이 결합된 전체 EMI 시스템에 대해서 살펴보면 다음과 같다.

1.3.1. 소형 EMI 시스템

(1) 영구자석

영구자석의 세기는 자기력선속밀도 (Magnetic flux density, T : Wb/m^2)로 나타낼 수 있으며, 그림 3.1.3.1과 같이 영구자석을 제작하였다. 제작된 영구자석의 세기는 0.5 T(Tesla)이다.

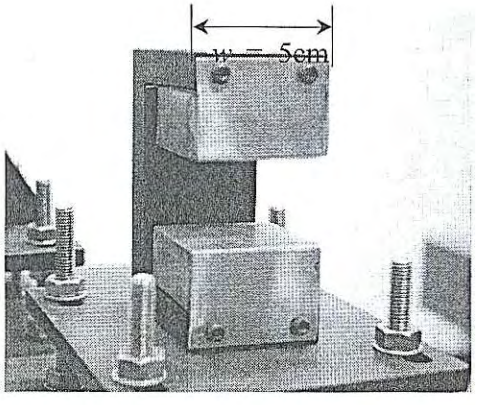


그림 3.1.3.1 영구자석

(2) 솔레노이드

본 연구과제에서 제작된 솔레노이드는 미국 AWG(American Wire Gauge) 기준으로 아래 표 3.1.3.1과 같이 크게 세 가지 종류의 코일을 사용하여 제작하였으며, 실제 제작된 모습은 그림 3.1.3.2에 나타내었다.

표 3.1.3.1 제작된 솔레노이드

	감은횟수 (N)	지름 (mm)	저항 (ohm)
# 1 (AWG 24)	1840	0.60	17.1
# 2 (AWG 22)	1500	0.65	11.9
# 3 (AWG 24)	2630	0.50	34.5

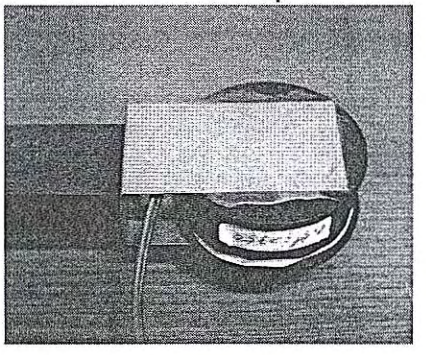


그림 3.1.3.2 제작된 솔레노이드

(3) 전자기유도 (EMI) 시스템

그림 3.1.3.3과 같이 영구자석과 솔레노이드 코일로 EMI 시스템을 형성하고, 그림 3.1.3.4와 같이 EMI 시스템과 MR 감쇠기를 연결하여 스마트 수동 감쇠 시스템을 구성한 후, EMI 시스템으로부터 생성된 유도 전류가 MR 감쇠기에 공급되어 감쇠기의 감쇠 특성을 변화시키도록 하였다.

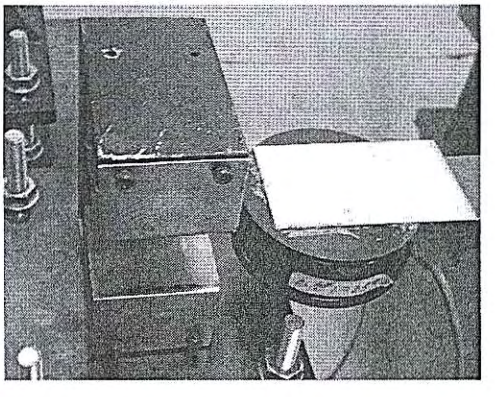


그림 3.1.3.3 EMI 시스템 실험체

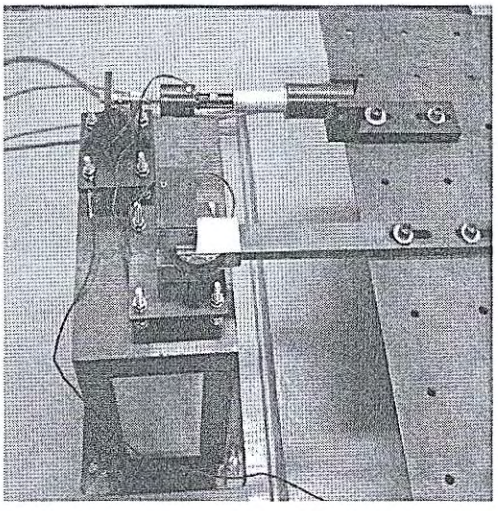


그림 3.1.3.4 EMI 시스템이 구비된 MR 감쇠기 실험체

1.3.2. EMI 시스템에 대한 특성 분석

(1) 진동대 설치

EMI 시스템에 대한 특성을 분석하기 위해 진동대(Shaking table test) 실험을 수행하였다. 본 연구에 사용된 진동대는 동양시스템에서 제작한 것으로 모델 DY-HV-2000 이며, 그림 3.1.3.5와 같다. 이 실험 플랫폼은 가로, 세로 각각 110 cm, 96 cm 이며, 최대 탑재 하중이 600 kg, 최대 가속도 ± 0.4 g, 그리고 최대 속도는 21 cm/sec 이다. 또한 변위 피드백모드 서보-유압 제어기로 최대 동하중 2 ton, 그리고 변위 ± 5 cm 의 성능을 발휘할 수 있다. 이 진동대는 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 구조동역학 및 진동제어 연구실에 설치되어 있다. 그림 3.1.3.5와 같이 EMI 시스템을 진동대에 설치하여 임의의 변위를 유발하고 그 응답을 측정하여 시스템의 특성을 측정할 수 있도록 하였다.

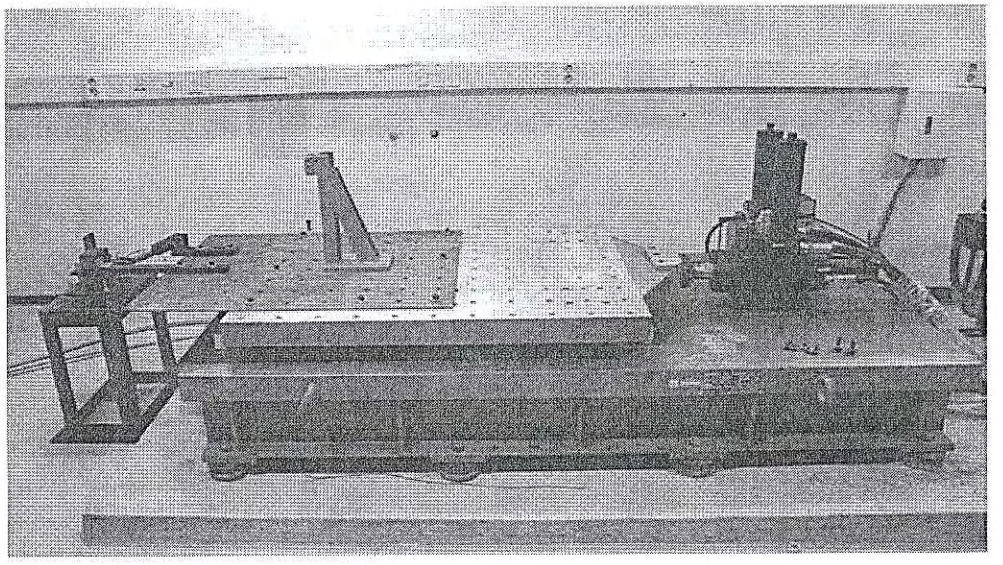


그림 3.1.3.5 신개념 스마트 제진 시스템의 모델링을 위한 진동대 설치 모습

(2) 특성 실험

실제 EMI 시스템을 통해 MR 감쇠기의 입력으로 사용되는 예측되는 전압은 식 (3.1.3.1)과 같다.

$$V_{MR} = V_F - V_D = V_F - I \cdot R_{MR} \tag{3.1.3.1}$$

이때, V_{MR} 는 MR 감쇠기에 사용되는 전압, V_D 은 부하로 인한 전압 강하, I는 회로 내 흐르는 전류, R_{MR} 는 MR 감쇠기의 자체 저항이다.

특성 실험을 위한 진동대 입력 변위를 주파수와 진폭에 변화를 가한 Sine 변위, 그리고 random 변위를 가하였다. 정리하면 다음 표 3.1.3.2와 같다.

표 3.1.3.2 진동대 입력 변위

	진폭 (mm)	주파수 (Hz)
Sine	5	1
	10	2
	15	3
Random	축소된 El Centro 지진 변위	

솔레노이드 # 1에 대한 일정한 주파수(2 Hz)와 진폭의 변화에 따른 Sine 변위를 진동대 입력으로 사용할 경우 MR 감쇠기에 들어가는 전압 V_{MR}의 시간에 따른 크기는 그림 3.1.3.6과 같다.

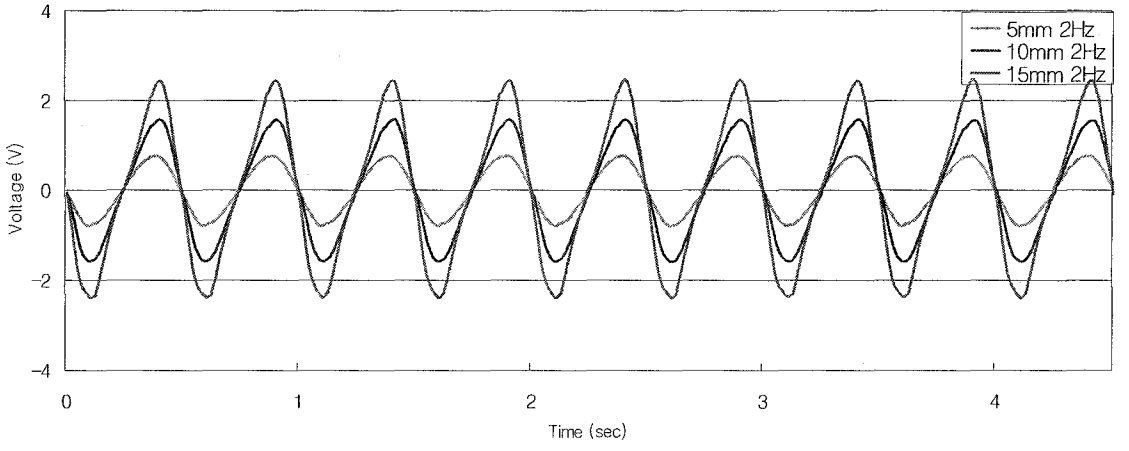


그림 3.1.3.6 시간에 따른 전압의 크기

그림에서 확인할 수 있듯이, 일정한 주파수를 가질 때 진폭의 변화가 클수록 발생되는 기전력 또한 배수로 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 패러데이 법칙에 의해 자기장에 형성되는 솔레노이드의 면적 변화가 크면 클수록 발생되는 기전력이 커지는 것을 보여주는 것이다.

다음으로, 솔레노이드 # 3에 대한 일정한 진폭(15 mm)와 주파수 변화에 따른 Sine 변위를 진동대 입력으로 사용할 경우 MR 감쇠기에 들어가는 전압 V_{MR}의 시간에 따른 크기는 그림 3.1.3.7과 같다.

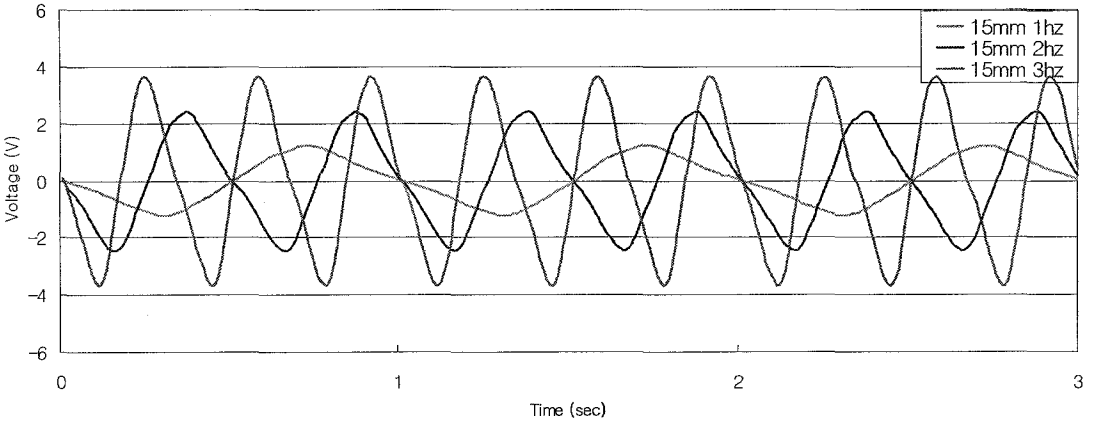


그림 3.1.3.7 시간에 따른 전압의 크기

그림에서 확인할 수 있듯이, 일정한 진폭을 가질 때 주파수의 변화가 클수록 발생되는 기전력 또한 배수로 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이 또한, 패러데이 법칙에 의해 자기장에 형성되는 솔레노이드의 면적 변화가 크면 클수록 발생되는 기전력이 커지는 것을 보여주는 것이다.

다음으로, 솔레노이드 # 2에 대한 random 진동대 입력 변위에 의해 발생되는 시간에 따른 유도기전력의 크기는 그림 3.1.3.8과 같다.

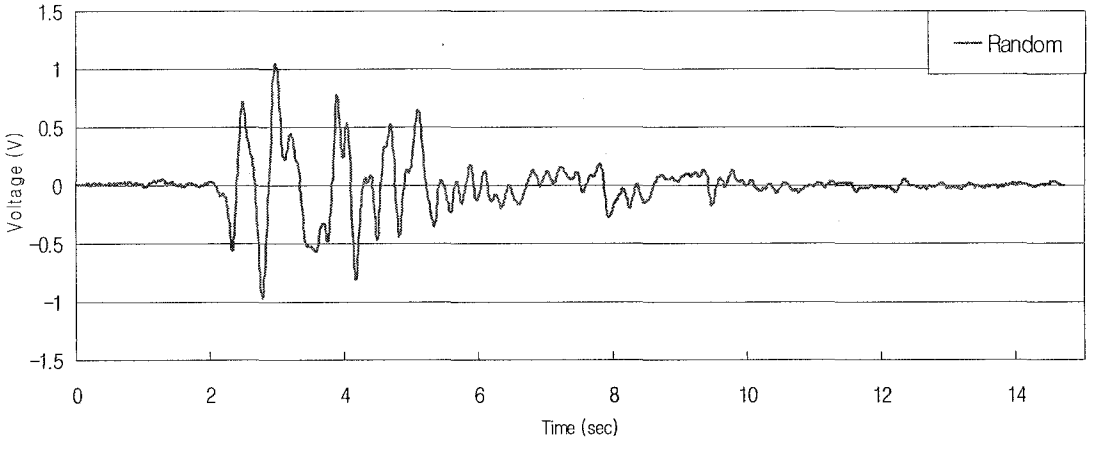


그림 3.1.3.8 시간에 따른 전압의 크기

이상의 다양한 신개념 스마트 제진 장치의 특성 실험 결과를 정리하면 다음 표 3.1.3.3 ~ 3.1.3.4과 같이 나타낼 수 있다.

표 3.1.3.3 솔레노이드 # 1에 대한 결과비교

감은 횟수 (N)	진폭 (mm)	주파수 (Hz)	ϵ (V)	V_F (V)	감소 계수 (k)	전류 (A)	계산된 V_{MR} (V)	측정된 V_{MR} (V)	차이 (V)
1840 (# 1)	5	1	1.30	0.79	0.61	0.023	0.40	0.40	0.00
		2	2.60	1.57	0.61	0.045	0.80	0.79	0.01
		3	3.90	2.38	0.61	0.069	1.20	1.20	0.00
	10	1	2.60	1.62	0.62	0.047	0.82	0.81	0.01
		2	5.20	3.15	0.61	0.091	1.59	1.58	0.01
		3	7.80	4.72	0.60	0.138	2.36	2.40	0.04
	15	1	3.90	2.46	0.63	0.071	1.24	1.24	0.00
		2	7.80	4.86	0.62	0.141	2.44	2.46	0.02
		3	11.70	7.15	0.61	0.210	3.55	3.66	0.11

표 3.1.3.4 솔레노이드 # 2에 대한 결과비교

감은 횟수 (N)	진폭 (mm)	주파수 (Hz)	ϵ (V)	V_F (V)	감소 계수 (k)	전류 (A)	계산된 V_{MR} (V)	측정된 V_{MR} (V)	차이 (V)
1500 (# 2)	5	1	1.06	0.72	0.68	0.024	0.44	0.41	0.03
		2	2.12	1.36	0.64	0.047	0.80	0.81	0.01
		3	3.18	2.05	0.64	0.071	1.21	1.23	0.02
	10	1	2.12	1.39	0.65	0.048	0.82	0.83	0.01
		2	4.24	2.71	0.64	0.093	1.60	1.62	0.02
		3	6.36	4.07	0.64	0.142	2.38	2.47	0.09
	15	1	3.18	2.11	0.66	0.072	1.25	1.26	0.01
		2	6.36	4.14	0.65	0.142	2.45	2.47	0.02
		3	9.54	6.19	0.65	0.211	3.68	3.67	0.01

표 3.1.3.5 솔레노이드 # 3에 대한 결과비교

감은 횟수 (N)	진폭 (mm)	주파수 (Hz)	ϵ (V)	V_F (V)	감소 계수 (k)	전류 (A)	계산된 V_{MR} (V)	측정된 V_{MR} (V)	차이 (V)
2630 (# 3)	5	1	2.06	1.24	0.60	0.023	0.45	0.40	0.05
		2	3.72	2.43	0.65	0.047	0.81	0.81	0.00
		3	5.57	3.65	0.65	0.072	1.17	1.25	0.08
	10	1	3.72	2.46	0.66	0.047	0.84	0.82	0.02
		2	7.43	4.76	0.64	0.092	1.59	1.60	0.01
		3	11.15	7.16	0.64	0.141	2.30	2.45	0.15
	15	1	5.57	3.74	0.67	0.071	1.28	1.24	0.04
		2	11.15	7.27	0.65	0.142	2.39	2.46	0.07
		3	16.72	10.26	0.61	0.212	2.95	3.69	0.74

(3) 수치 모델과의 검증

성능 검증을 위해 사용된 MR 감쇠기는 Lord Corporation에서 개발된 RD-1097-01 모델을 사용하였다. 개략도는 그림 3.1.3.9와 같으며, 실제 감쇠기 (모델명: RD-1097-01)는 그림 3.1.3.10과 같다.

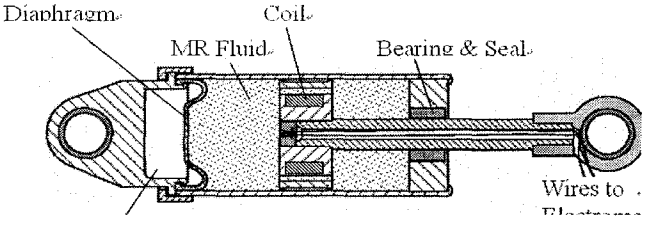


그림 3.1.3.9 MR 감쇠기 개략도

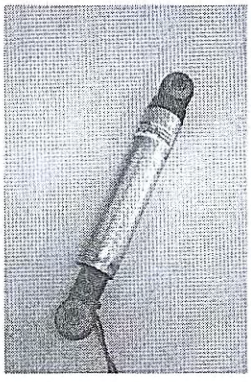


그림 3.1.3.10 상용 MR 감쇠기 (RD-1097-01)

이 MR 감쇠기의 최대제어력은 100 N, 최대입력전류는 0.5 A, 그리고 자체 저항은 17.4 Ohn이다. 입력전류에 대한 최대제어력을 그레프로 나타내면 그림 3.1.3.11과 같다.

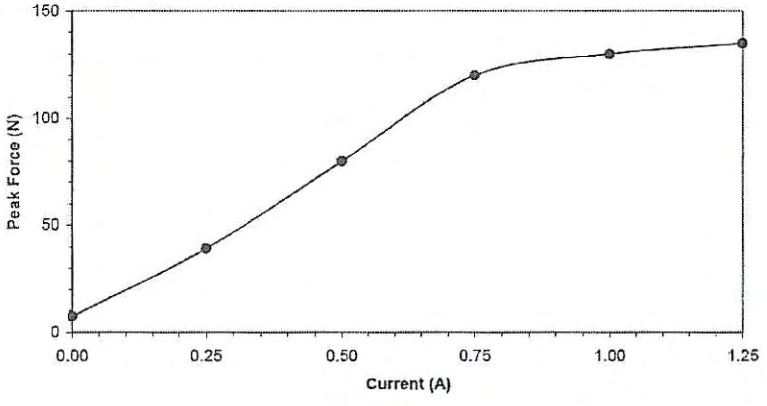


그림 3.1.3.11 입력전류에 대한 최대제어력

이 MR 감쇠기의 수치모델을 이용한 예측치와 실제 진동대 실험을 통해 얻어지는 실측치와 비교해 보았다. 이에 사용된 EMI 시스템은 솔레노이드 # 1과 영구자석을 사용하여 비교 평가 하였다.

MR 댐퍼의 동특성을 나타내는 수치모델은 Ramallo 등(2004)이 제안한 Bouc-Wen 모델을 이용한 모델을 사용하였다. 이는 그림 3.1.3.12와 같다.

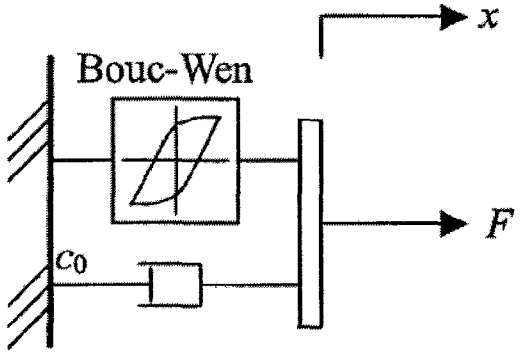


그림 3.1.3.12 Bouc-Wen 모델을 이용한 MR 댐퍼 동적 모델

MR 댐퍼의 거동을 예측하기 위한 식은 다음과 같다.

$$F = c_0\dot{x} + \alpha z \tag{3.1.3.2}$$

$$\dot{z} = -\gamma|\dot{x}||z|z|^{n-1} - \beta\dot{x}|z|^n + A\dot{x} \text{ 또는}$$

$$\dot{z} = \{A|z|^n[\gamma sgn(\dot{x}z) + \beta]\}\dot{x}$$

$$\dot{\alpha}(t) = -[\alpha(t) - p_1 v(t) - p_2]\eta$$

실험으로부터 얻어진 MR 댐퍼의 계수는 다음과 같다. $A=1$, $n=1$, $\gamma=\beta=58.662cm^{-2}$, $c_0=0.3327Ns/cm$, $\eta=2\pi\times11.0(rad/s)$, $p_1=3111.7(N/cm/V)$ 그리고 $p_2=161.47(N/cm)$이다.

이 MR 댐퍼의 동적 특성은 이미 Ramallo 등(2004)에 의해 그 정확성이 확인되었다. 여기서 확인할 사항은 이 수치모델과의 검증을 위한 모델이 증폭 장치라고 할 수 있는 Lord Corporation의 Wonder box device controller kit (Rd-3002-03)을 통해 MR 댐퍼가 연결되어 있다.

EMI 시스템과 MR 댐퍼를 함께 설치하여 그 적합성 검증을 수행해 보았다. EMI 시스템과 MR 댐퍼를 그림 3.1.3.13과 같이 진동대에 설치하였다.

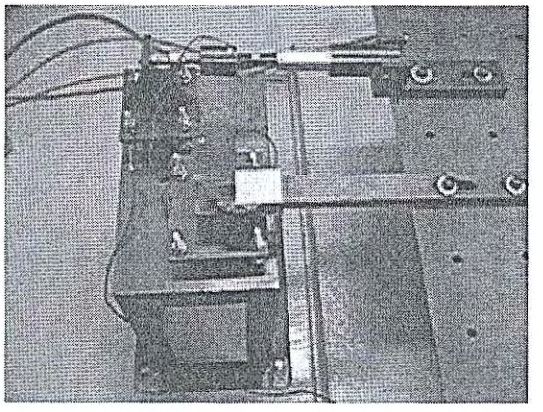
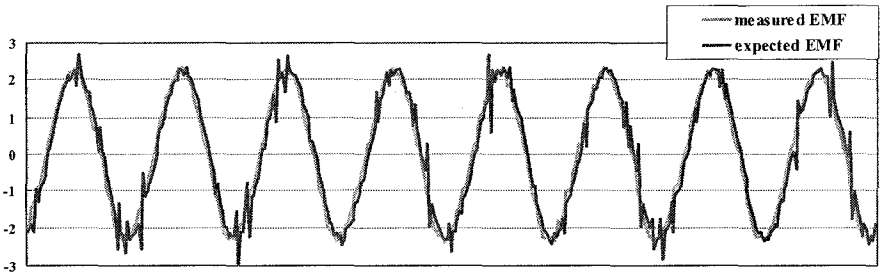


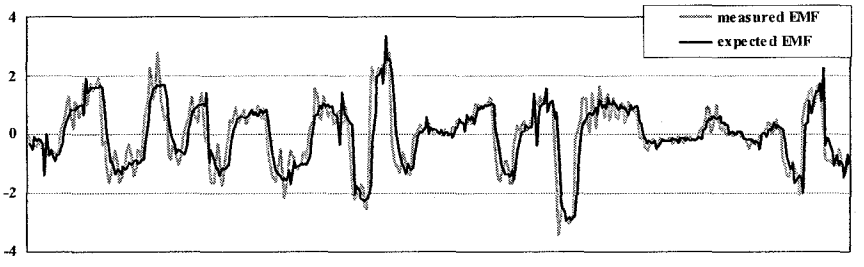
그림 3.1.3.13 적합성 검증을 위한 실험 수행

그림 3.1.3.14는 EMI 시스템 설계의 적합성을 보여주고 있다. 그림 3.1.3.14(a)는 Sine 입력 변위(5mm 진폭과 2 Hz 주파수), 그리고 그림 3.1.3.14(b)는 random 입력 하에 시간이력곡선을 나타내주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이, 실험으로부터 측정된 값과 수치해석을 통해 구한 이론적인 기댓값과 상당히 일치함을 알 수 있다. 따라서, MR 댐퍼를 구동시키기 위한 EMI 시스템 설계의 적합성을 본 실험에서 수행하였으며, 이를 통해 EMI 시스템 설계의 타당성을 검증하였다.



시간 (sec)

(a) 사인 하중하의 EMI 시스템에 유도된 유도기전력



시간 (sec)

(b) 랜덤하중하의 EMI 시스템에 유도된 유도기전력

그림 3.1.3.14 EMI 시스템의 실험적인 결과

1.4. 대용량 신개념 스마트 제진장치의 특성 분석

본 연구에서는 실 구조물에 적합한 대용량 전자기유도(EMI) 시스템을 설계 및 제작하였다. 앞서 설명한 소용량 전자기유도 시스템의 경우, 최대제어력이 100 N에 불과한 MR 감쇠기를 구동 시킬 수 있는 작은 규모의 전자기유도 시스템이기 때문에 본 연구과제에서 개발한 1ton급 MR 감쇠기에 적합한 대용량 전자기유도 시스템을 제작 완료하였다. 본 절에서는 이에 대한 설계/제작 및 특성 실험에 대한 내용을 정리하였다.

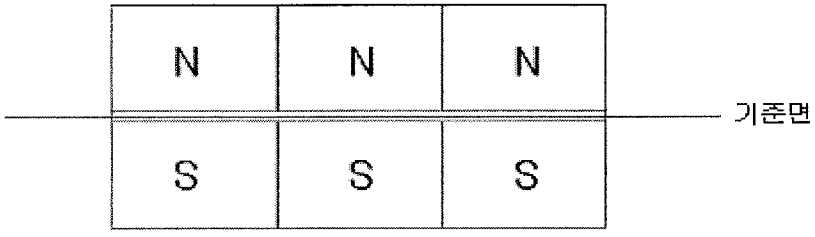
1.4.1. 대용량 EMI 시스템 설계

앞서의 소형 EMI 시스템과 마찬가지로 크게 두 부분인 영구자석과 솔레노이드에 대해 각각 설명하고 이들이 결합된 전체 시스템에 대해 살펴보았다.

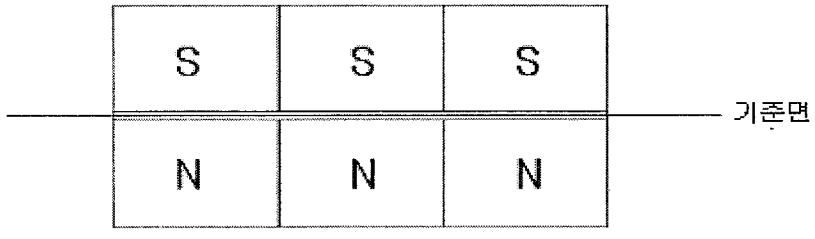
(1) 영구자석

영구자석의 세기는 자기력선속밀도 (Magnetic flux density, T: Wb/m^2)로 나타낼 수 있다. 본 연구에서 특이할 만한 사항은 일반 영구자석의 세기를 크게 증가시키는 것은 어려움이 있다. 소형 EMI 시스템의 경우, 영구자석의 세기가 0.5 T(Tesla) 로서 상당히 강한 자석 중의 하나였다. 대용량 EMI 시스템 제작을 위한 기본적인 영구자석의 세기는 0.6 T 까지만 증가시킬 수밖에 없었다. 대용량에 적합하기 위해서 영구자석의 세기는 제한적이었기 때문에, 실제로 자석의 배열을 통해 이를 극복하려고 했다. 즉, 자석의 세기는 고정시키고, 자석의 배열을 통해 솔레노이드가 흐를 수 있는 전류의 양을 증가시키는 방법을 선택하였다. 폭(w)이 50mm 인 하나의 영구자석을 윗면, 아래면 각각 6개씩 그림 3.1.4.1과 같이 자석의 배열을 변경하였다. 전체 폭은 150 mm 로, 소형 EMI 시스템보다 3배 증가하였으며, 자석의 세기는 약 1.2배 증가하였다.

먼저 윗면에서 세 개의 영구자석을 같은 극으로 일렬로 부착한 뒤, 같은 면의 반대쪽에 반대 극으로 세 개의 영구자석을 일렬로 부착한 뒤, 하나의 면을 이루도록 구성한다. 아래면은 이와 반대의 극을 같도록 배치하여 하나의 영구자석을 이룬다. 이 경우 영구자석의 윗면과 아래면 사이를 솔레노이드가 움직이면서 중심이 되는 기준면을벗어나게 되면, S-N 극 사이에서 전류가 발생하게 되고, N-S 극 사이에서도 동일하게 전류가 발생하게 되어, 약 2배 전력이 발생하도록 설계 및 제작하였다.



(a) 영구자석의 윗면



(b) 영구자석의 아래면

그림 3.1.4.1 대용량 EMI 시스템에 적합한 영구자석 배열

(2) 솔레노이드 코일

대용량 전자기유도 시스템에 사용되는 솔레노이드는 전류의 흐름을 원활하게 하기 위해 코일의 직경을 0.9 mm로 증가시켰다. 유도되는 기전력은 코일의 감은횟수에 비례하지만, 본 제작되는 EMI 시스템의 영구자석의 범위를 벗어나면 더 이상 증가하지 않기 때문에, 본 시스템에서는 1,400 turns 로 제한하였다. 본 솔레노이드의 저항은 18 Ω(Ohm)이며, 인덕턴스는 5Hz 일 때 2 H(Henri)이다.

(3) 결합된 대용량 전자기유도 (EMI) 시스템

그림 3.1.4.2는 본 연구에서 설계된 대용량 전자기유도 (EMI) 시스템의 도면이다. 이를 제작하여 그림 3.1.4.3과 같이 영구자석과 솔레노이드 코일로 대용량 EMI 시스템을 결합시켰다. 최종적으로 그림 3.1.4.4와 같이 대용량 EMI 시스템과 새로이 본 연구에서 개발 및 제작된 1 ton급 MR 감쇠기를 연결하여 대용량 스마트 수동 감쇠 시스템을 구성하였다.

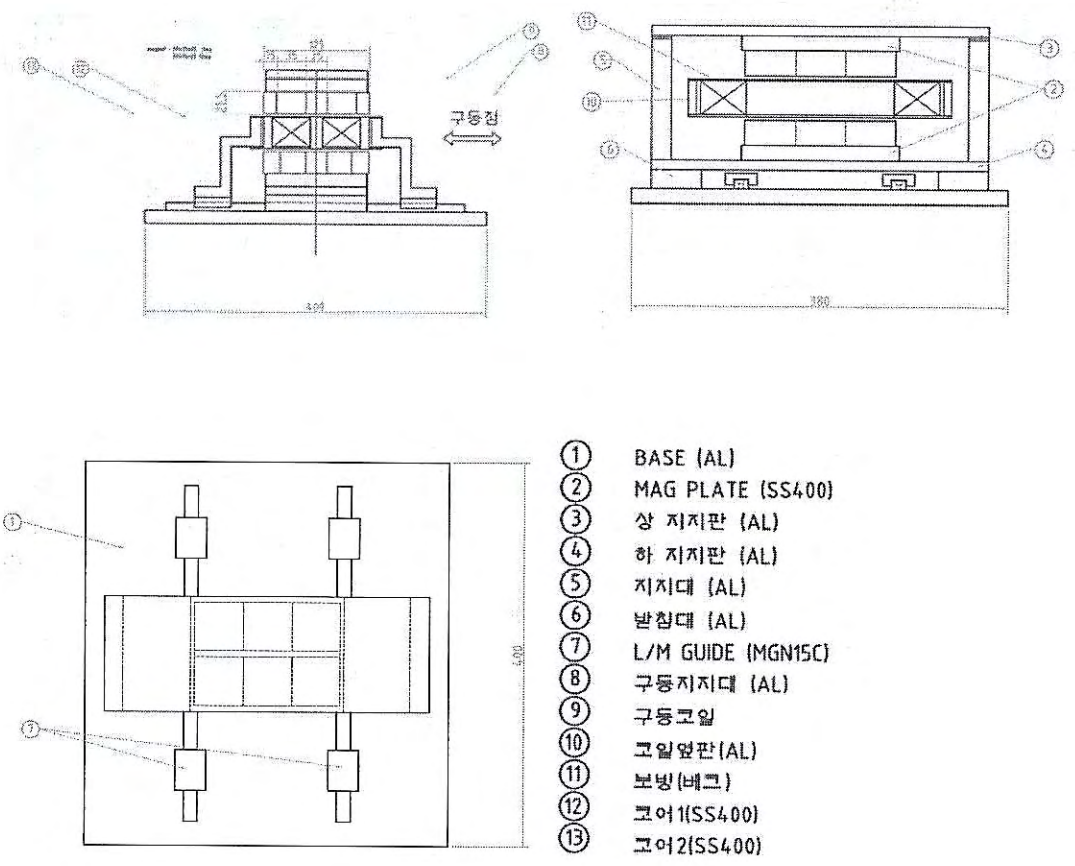


그림 3.1.4.2 대용량 EMI 시스템

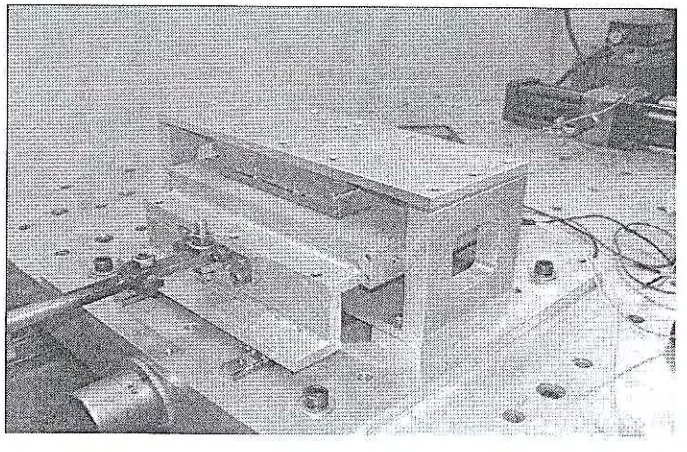


그림 3.1.4.3 대용량 EMI 시스템

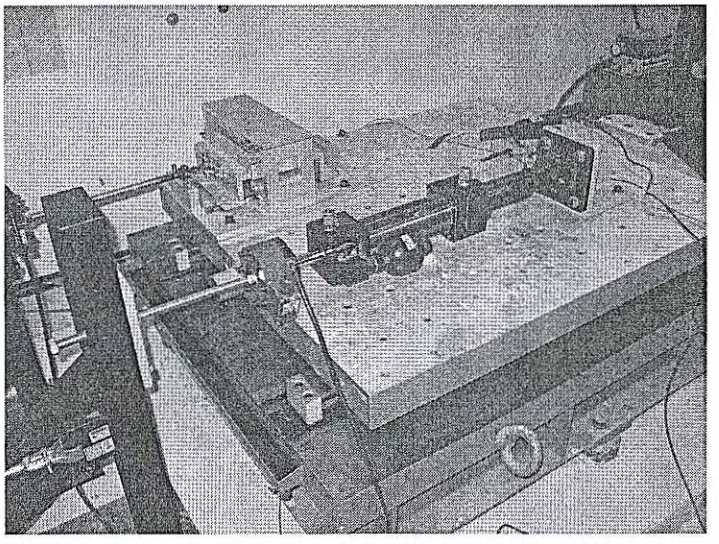


그림 3.1.4.4 대용량 스마트 제진 장치

이렇게 설계 및 제작된 대용량 스마트 제진 장치는 진동대 실험을 통해 그 특성을 분석하여 설명하고자 한다.

1.4.2. 전자기 유도기전력 및 유도감쇠력

(1) 전자기 유도기전력

EMI 시스템과 MR 감쇠기가 결합된 시스템에서 유도되는 유도기전력은 식 (3.1.4.1)과 같다.

$$(L_c + L_d)\frac{di(t)}{dt} + (R_c + R_d)i(t) = V_f(t) \tag{3.1.4.1}$$

여기서 L_c와 L_d 는 솔레노이드와 MR 감쇠기의 인덕턴스이며, R_c와 R_d는 솔레노이드와 MR 감쇠기의 자체 저항이다. 또한 $V_f(t)$는 유도기전압이며, i(t)는 회로 내 흐르는 전류이다.

소형 스마트 제진 장치의 경우 솔레노이드와 MR 감쇠기의 인덕턴스값이 상대적으로 작아서 첫 번째 항을 무시할 수 있었으나, 대용량 스마트 제진 장치의 경우,

이를 고려하였다.

(2) 전자기 유도감쇠력(Electromagnetic damping force)

실제 EMI 시스템의 경우 코일과 자석에서 발생되는 전류로 인한 감쇠력이 존재한다. 소형이어서 무시할 수 있을 정도였으나, 대용량 EMI 시스템은 이를 무시할 수 없으며, 이 전자기 유도 감쇠력을 실제 시스템에 고려해야만 한다. 실제로 이 전자기 유도 감쇠력은 원래 상태로 되돌아가려는 힘으로 인해 구조물에는 긍정적인 영향을 미친다.

이 전자기 유도 감쇠력은 식 (3.1.4.2)와 같이 속도에 비례하는 식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} F_{emi} &= \left(N\frac{d\Phi}{dx}\right)^2 \frac{1}{R_c + R_d + j\omega(L_c + L_d)} \frac{dx}{dt} \\ &= K_{emf} \frac{1}{R_c + R_d + j\omega(L_c + L_d)} \frac{dx}{dt} \\ &= D_{emi} \frac{dx}{dt} \end{aligned} \tag{3.1.4.2}$$

여기서 D_{emi} 는 전자기 유도 감쇠(Electromagnetic damping)이다.

1.4.3. 대용량 스마트 제진 장치 특성 파악

제작된 대용량 스마트 제진 장치의 특성을 분석하기 위해 진동대(Shaking table test) 실험을 수행하였다. 본 연구에 사용된 진동대는 앞에서 설명하였다.

(1) 특성실험

특성 실험을 위한 진동대 입력 변위를 주파수와 진폭에 변화를 가한 정현파 실험을 수행하였다. 이를 정리하면 다음 표 3.1.4.1과 같다. 이는 진동대의 가진 범위와 안전성을 고려하였다.

표 3.1.4.1 진동대 sine 가진 주파수

주파수	진폭 (mm)	최대속도(cm/sec)
0.5	2.5	0.7854
	5	1.5708
	10	3.1416
	15	4.7124
	20	6.2832
	25	7.8540
1.0	2.5	1.5708
	5	3.1416
	10	6.2832
	15	9.4248
	20	12.5664
	25	15.7080
1.5	2.5	2.3562
	5	4.7124
	10	9.4248
	15	14.1372
	20	18.8496
2.0	2.5	3.1416
	5	6.2832
	10	12.5664
	15	18.8496
2.5	2.5	3.9270
	5	7.8540
	10	15.7080
	12	18.8496

본 특성 실험을 통해 측정하는 것은 EMI로부터 생성하여 MR 감쇠기에 인가하는 전류 및 전압, EMI 시스템에서 발생하는 전자기 유도감쇠력, 그리고 MR 감쇠기의 감쇠력이다. 전류는 Tektronix A622 모델을 사용하였으며, 전자기 유도감쇠력 및 MR 감쇠기의 감쇠력은 CAS 사의 LS-2T, -3T 모델을 사용하여 측정하였다.

실험 결과를 다음과 같이 정리하였다.

- 가진조건에 따른 전압 및 전류, power 계측치: 표 3.1.4.2, 그림 3.1.4.5
- 가진조건에 따른 MR 감쇠력 및 전자기유도감쇠력: 표 3.1.4.3, 그림 3.1.4.6

- 가진조건에 따른 전류의 이론치와 계측치 비교: 그림 3.1.4.7

결과에서 확인할 수 있듯이 EMI에서 생성되는 전압, 전류는 속도와 비례하는 것을 알 수 있다. 이는 패러데이 법칙에 의해 자기장에 형성되는 솔레노이드의 면적 변화가 클수록 발생되는 기전력이 커지는 것을 보여준다. 또한 EMI에서 전력이 생성되면서 발생하는 전자기유도감쇠력은 그 크기가 MR 감쇠기의 감쇠력에 비해 매우 작은 값으로 (5% 이내) 실제 MR 감쇠기 적용 시에 무시할 수 있으리라 사료된다.

실험으로부터 계측한 전류값을 식 3.1.2.13 으로부터 이론적으로 예측한 계산치와 그림 3.1.4.7과 같이 비교하였다. 확인결과 본 연구과제에서 제작한 대용량 EMI 시스템이 이론적으로 생성해야 할 전류값에 근사하게 유도전류를 발생시키는 것을 알 수 있다.

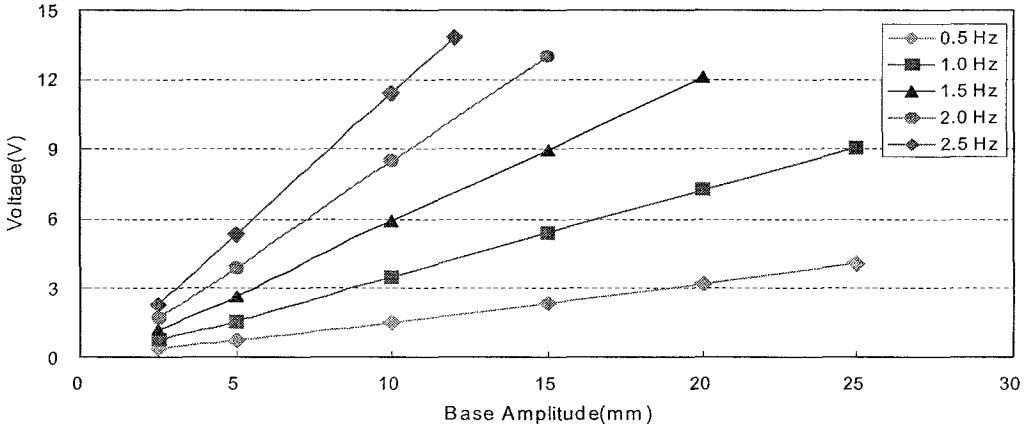
표 3.1.4.2 가진 조건에 따른 전압 및 전류, power

주파수	진폭 (mm)	전압(V)	전류(A)	power (W)
0.5	2.5	0.3722	0.0544	0.0202
	5	0.7443	0.1154	0.0859
	10	1.5011	0.2353	0.3532
	15	2.3348	0.3468	0.8097
	20	3.2119	0.4297	1.3801
	25	4.0742	0.5458	2.2238
1.0	2.5	0.7703	0.1101	0.0848
	5	1.5789	0.2265	0.3577
	10	3.4961	0.4208	1.4713
	15	5.3975	0.6174	3.3324
	20	7.2488	0.8204	5.9470
	25	9.0726	1.0219	9.2711
1.5	2.5	1.2147	0.1690	0.2053
	5	2.6630	0.3278	0.8729
	10	5.9142	0.5872	3.4729
	15	8.9553	0.8701	7.7922
	20	12.0948	1.1389	13.7742
2.0	2.5	1.7215	0.2134	0.3673

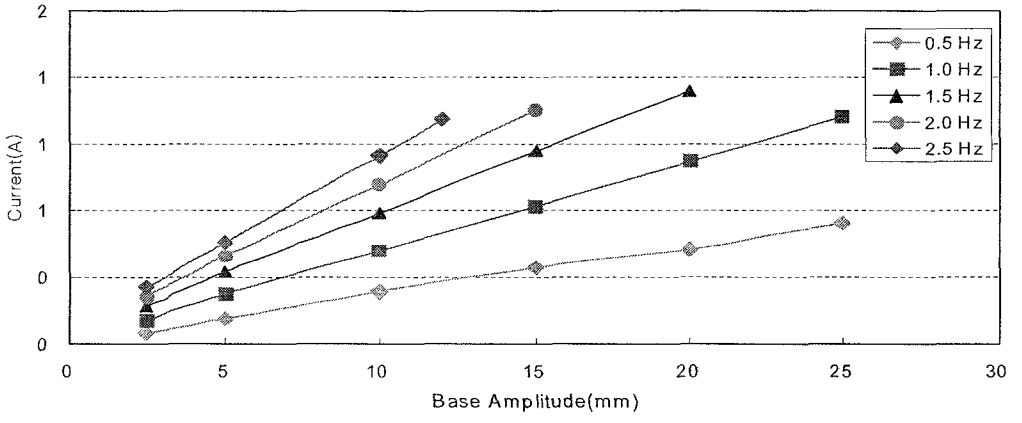
	5	3.8883	0.3953	1.5369
	10	8.5082	0.7176	6.1053
	15	13.0255	1.0545	13.7355
2.5	2.5	2.3026	0.2568	0.5913
	5	5.3390	0.4588	2.4494
	10	11.4121	0.8473	9.6699
	12	13.8412	1.0112	13.9965

표 3.1.4.3 가진 조건에 따른 MR 감쇠력 및 전자기유도감쇠력

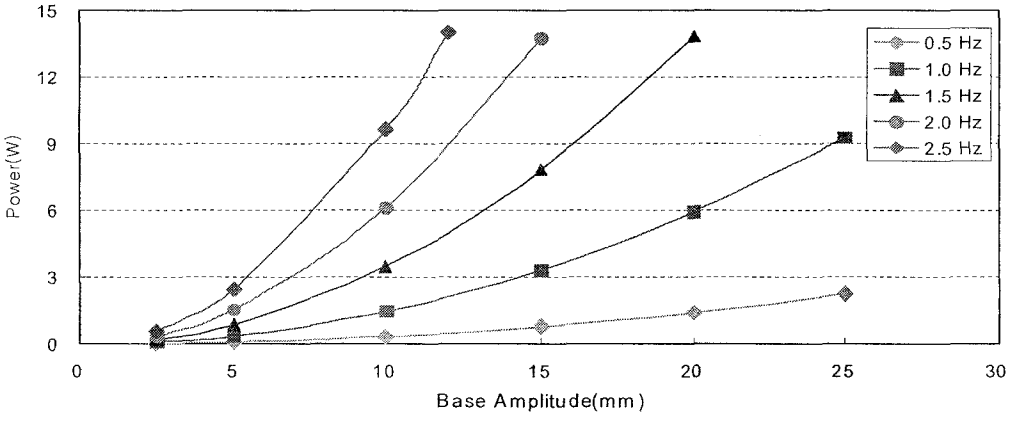
주파수	진폭 (mm)	MR 감쇠력(N)	전자기유도감쇠력(N)
0.5	2.5	499.7918	8.20
	5	513.1883	11.51
	10	634.0836	18.45
	15	963.2514	24.06
	20	1475.3887	31.67
	25	2123.1024	37.95
1.0	2.5	404.0121	9.77
	5	568.2700	17.24
	10	1270.4490	28.25
	15	2531.4554	39.25
	20	3998.0358	51.87
	25	5369.4105	63.39
1.5	2.5	428.8055	11.57
	5	716.1107	20.36
	10	2090.7061	33.65
	15	3963.7533	49.22
	20	5618.7850	62.96
2.0	2.5	454.9122	13.46
	5	854.4096	22.10
	10	2418.9989	39.06
	15	4383.1913	59.38
2.5	2.5	450.5798	12.96
	5	980.0032	22.59
	10	2653.6289	40.41
	12	3357.5780	47.65



(a) MR 감쇠기에 인가되는 전압

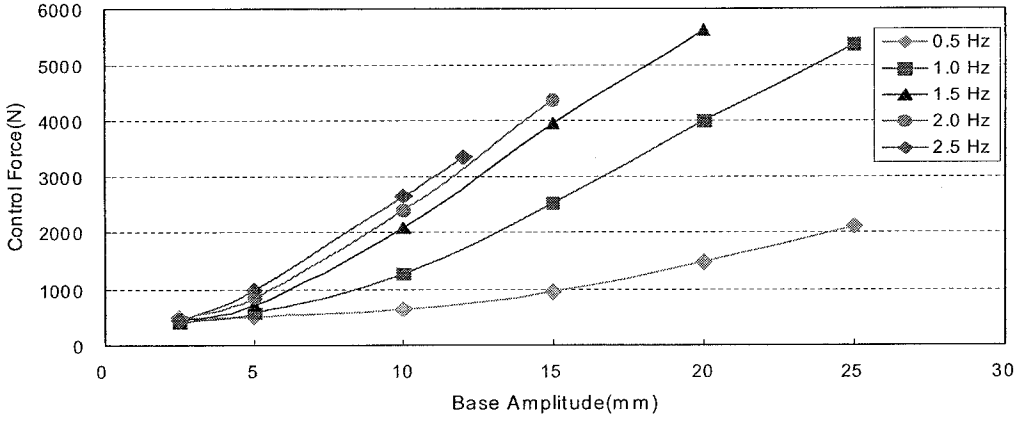


(b) MR 감쇠기에 인가되는 전류

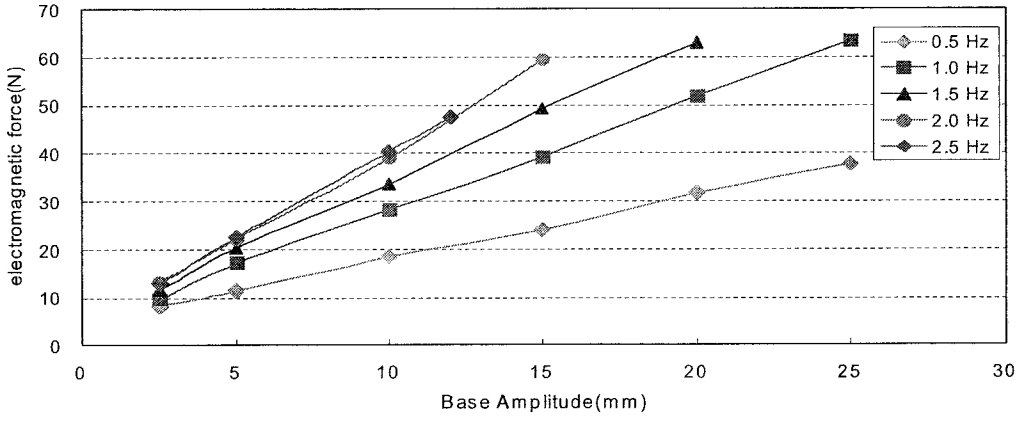


(c) MR 감쇠기의 전력량

그림 3.1.4.5 가진조건에 따른 전압, 전류 전력량

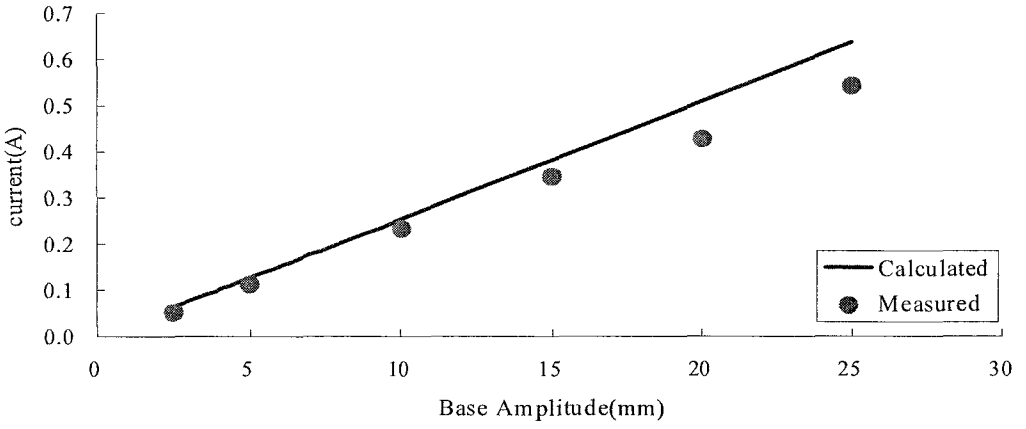


(a) MR 감쇠력

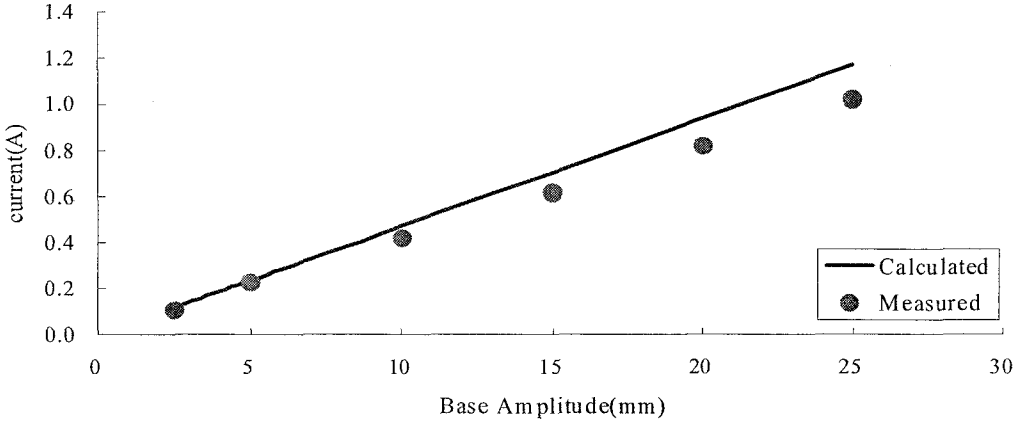


(b) 전자기유도감쇠력

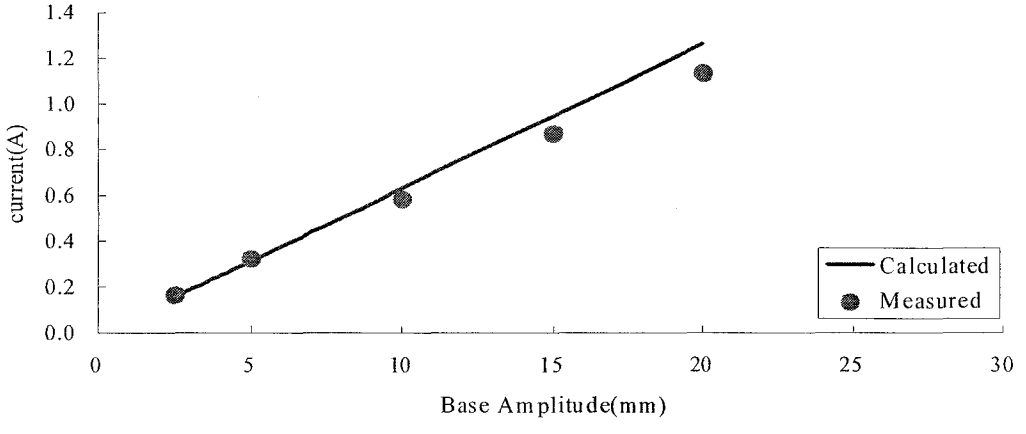
그림 3.1.4.6 가진조건에 따른 MR 감쇠력 및 전자기유도감쇠력



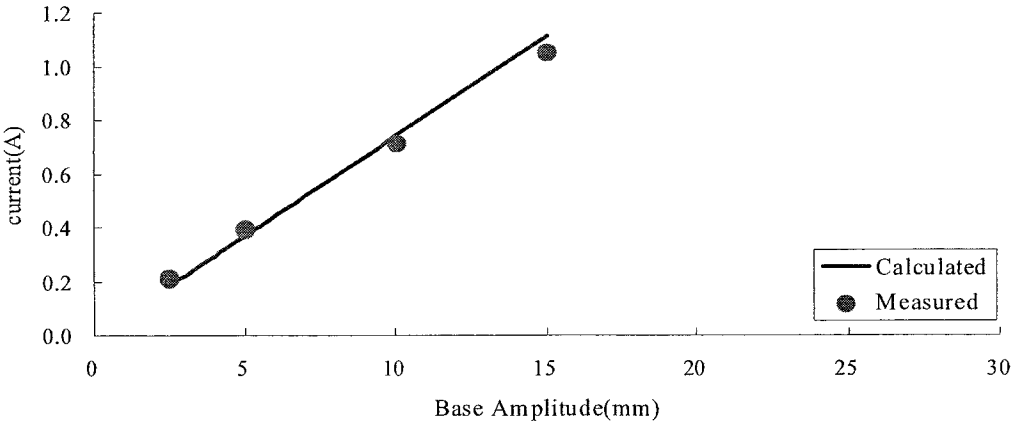
(a) 0.5Hz



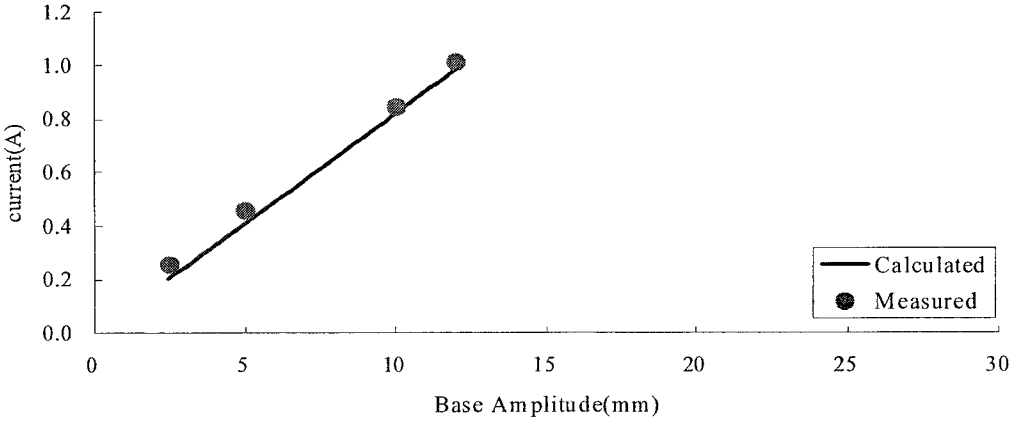
(b) 1.0Hz



(c) 1.5Hz



(d) 2.0Hz



(e) 2.5Hz

그림 3.1.4.7 가진조건에 발생 전류의 계측치와 계산치 비교

1.5. 속도 센서로서의 EMI 시스템의 활용 가능성 검토

본 연구에서는 EMI의 특성을 이용하여 EMI에서 발생된 전압을 속도로 활용하는, 즉 EMI 시스템을 속도 센서로서의 활용 가능성을 검토하였다.

페러데이의 전자기 유도법칙에 의해 전자기유도력(유도기전력)은 다음과 같이 간단히 표현할 수 있다.

$$\epsilon = -NB\frac{dA}{dt} = -NB\frac{d(wx)}{dt} = -NBw\frac{dx}{dt} = -NBw\dot{x} \qquad (3.1.5.1)$$

여기에서, ϵ 은 전자기 유도력 (voltage), N 은 코일의 감김횟수, B는 자속밀도, A는 자기장 내의 코일 면적으로 코일의 폭 w, 코일의 자석에 대한 상대변위 x의 곱으로 표현된다. 식 (3.1.5.1)에서 N, B, w는 일정한 값이기 때문에 전자기 유도력은 코일의 속도에 비례한다고 할 수 있다. 즉, 적절한 계수값을 계측한 전자기 유도력에 곱해주면 EMI 시스템을 속도 센서로 활용 가능하다.

이를 검증하기 위하여 일련의 sine 가진과 축소된 역사지진 가진실험을 수행하였다. sine 가진은 0.5Hz, 1.0Hz, 1.5Hz, 2.0Hz, 2.5Hz의 가진주파수에 대해 amplitude 10mm로 가진하였고 축소된 역사지진은 El Centro 지진과 Kobe 지진으로 가진하였다.

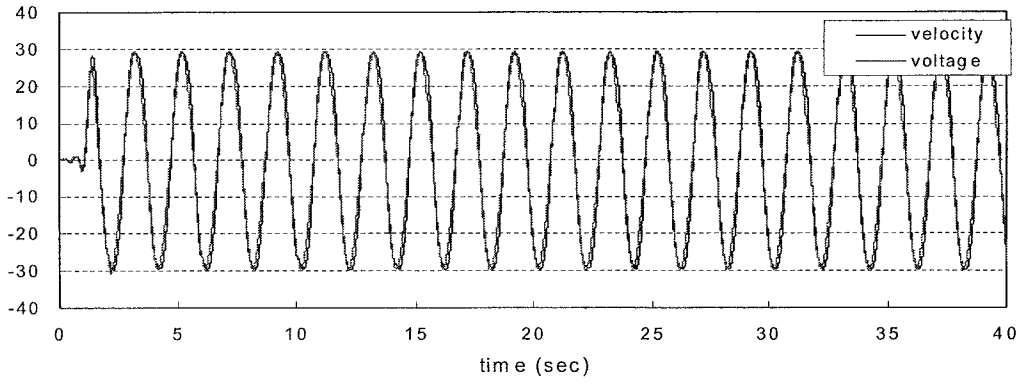
그림 3.1.5.1에 sine 하중으로 가진한 경우, 발생 전압과 속도의 시간 이력을 도시하였다. 여기에서 발생 전압은 적절한 계수 값을 곱한 것이다. 비록 약간의 phase가 발생하기는 하지만 속도 센서로 활용하는 데 있어 크게 문제는 되지 않을 것으로 보인다. 그림 3.1.5.2는 sine 하중으로 가진한 실험의 결과로 각 조건에서 발생한 최대 전압과 속도 사이의 관계를 나타낸다. 그래프를 통해 최대 전압과 속도 사이의 선형 관계를 확인 할 수 있다.

그림 3.1.5.3은 역사지진으로 가진한 실험 결과로 마찬가지로 발생 전압과 속도의 시간 이력을 나타낸다. 그래프를 통해 매우 유사한 결과를 나타냄을 확인할 수 있다. 특히나 부호에 있어서는 표 3.1.5.1과 같이 절대 속도가 30mm/sec 이상의 경우에는 두 역사지진 모두에서 동일한 것으로 나타났다.

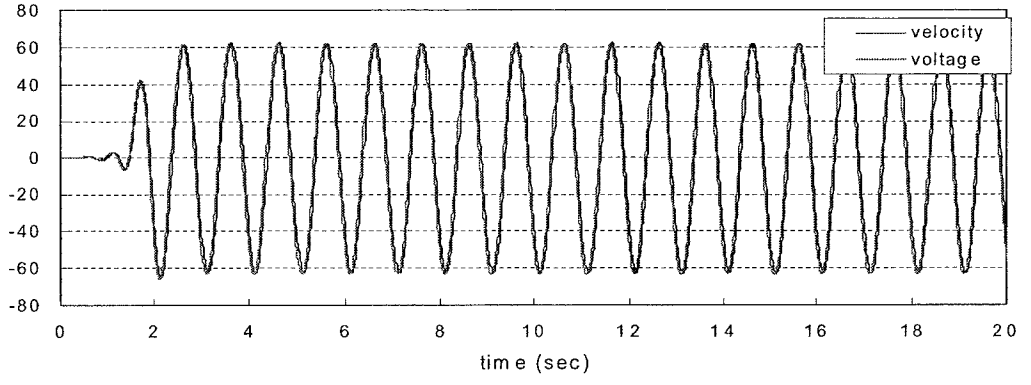
이런 EMI 시스템의 특성을 활용하면 추가적인 센서의 부착 없이 반능동 제어 알고리즘을 활용할 수 있게 된다. 특히나 Maximum Energy Dissipation Algorithm (MEDA) 같은 알고리즘의 경우 단순히 MR 감쇠기의 상대속도에 대한 정보만을 필요로 하기 때문에 직접적인 적용이 가능하게 된다.

표 3.1.5.1 전압과 속도사이의 부호의 동일성(%)

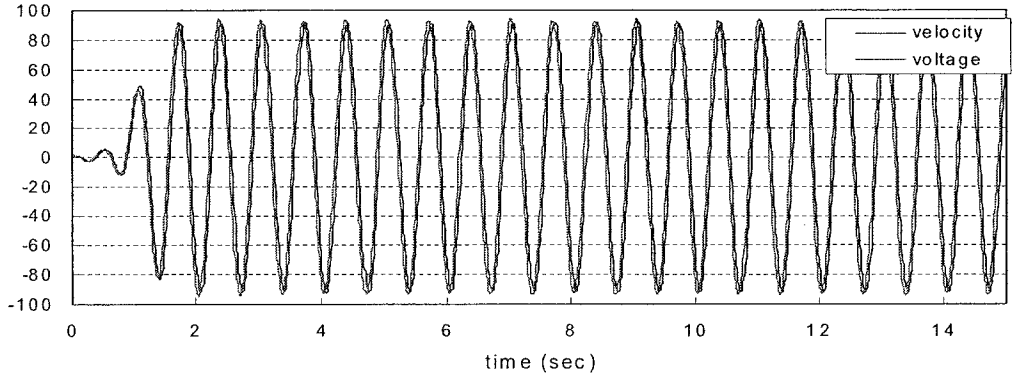
역사지진	$\lvert\dot{x}\rvert \geq 5mm/s$	$\lvert\dot{x}\rvert \geq 10mm/s$	$\lvert\dot{x}\rvert \geq 30mm/s$
El Centro	98.55	100	100
Kobe	95.77	95.52	100



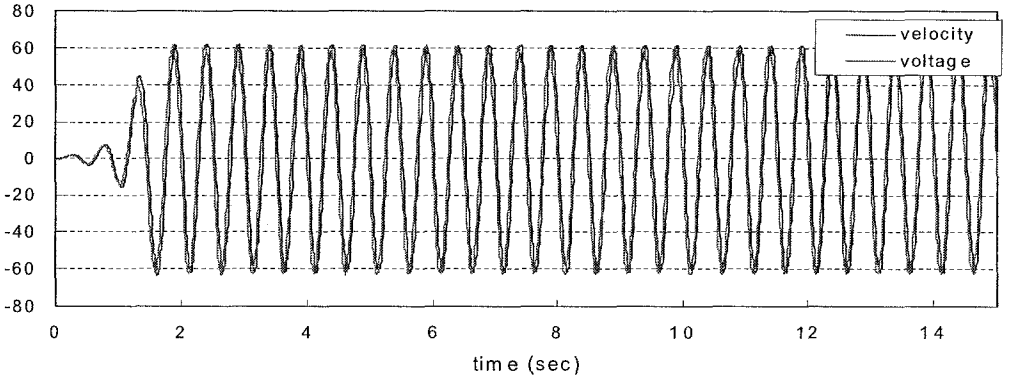
(a) 0.5 Hz, 10mm



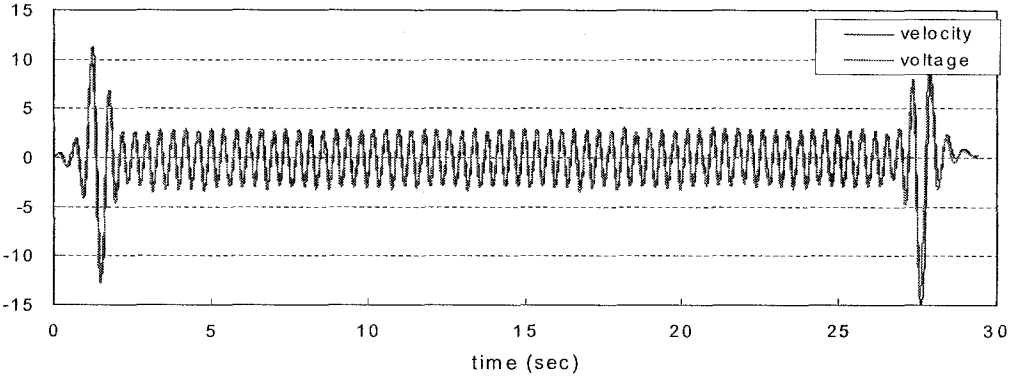
(b) 1.0 Hz, 10mm



(c) 1.5 Hz, 10mm



(d) 2.0 Hz, 10mm



(e) 2.5 Hz, 10mm

그림 3.1.5.1 전압과 속도의 시간이력 데이터 (sine 하중)

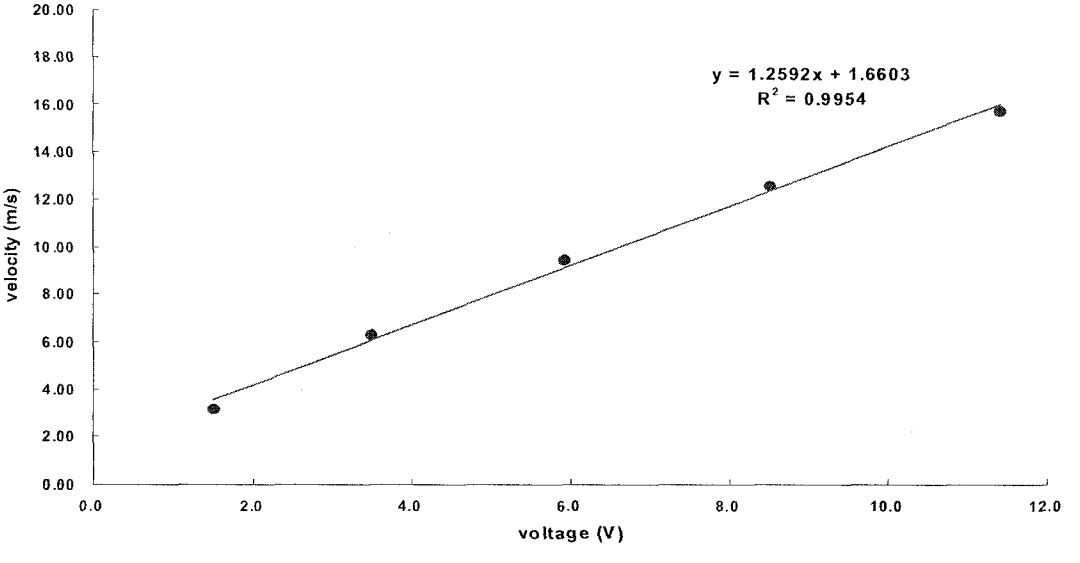
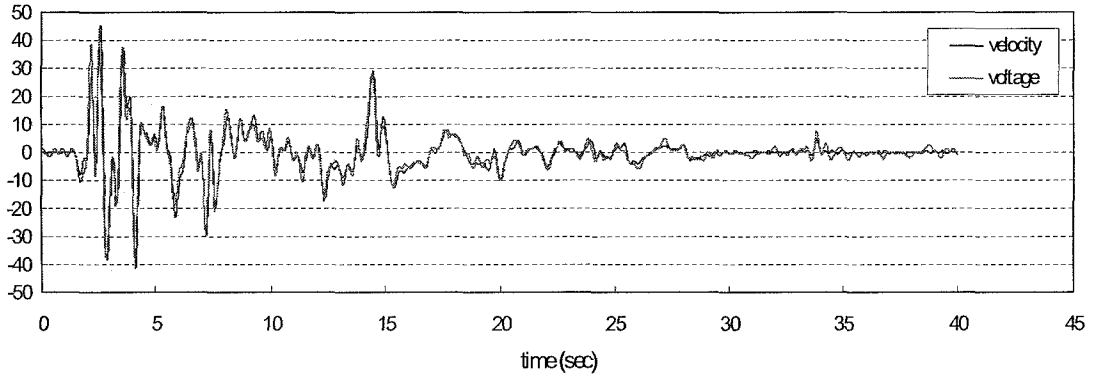
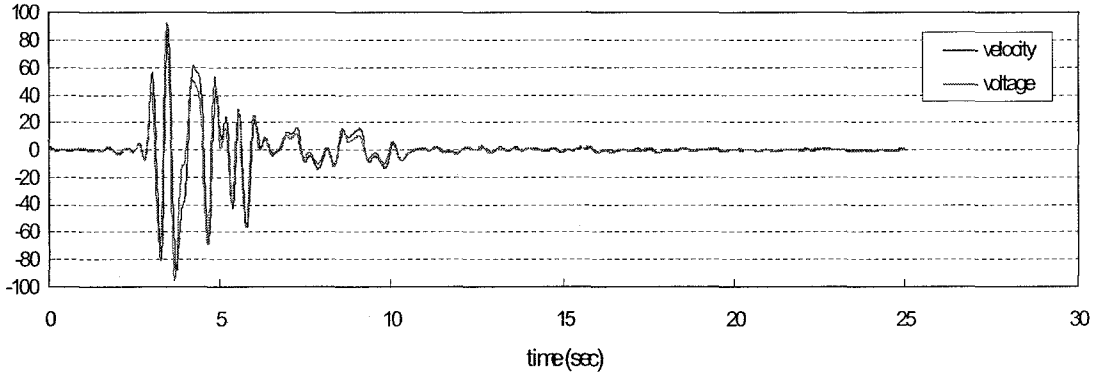


그림 3.1.5.2 최대전압-속도 사이의 관계



(a) El Centro



(b) Kobe

그림 3.1.5.3 전압과 속도의 시간이력 데이터 (역사지진)

1.6. 신개념 스마트 제진장치의 통합설계

구조물에 감쇠력을 제공하는 MR 감쇠기와 이 MR 감쇠기에 인가할 전압을 생성하는 EMI 시스템은 각기 따로 제작하여 함께 사용해도 전혀 문제가 없다. 그러나 최적의 효율성을 생각한다면 EMI 시스템과 MR 감쇠기를 따로 설계하는 것보다 설계변수들 사이의 관계를 이용하여 처음부터 통합 설계하는 것이 바람직하다. 본 절에서는 MR 감쇠기에 대해 전반적으로 설명한 후 10 kN 급 MR 감쇠기와 케이블용 MR 감쇠기의 최적 설계/제작에 대해 논하고 마지막으로 EMI 시스템과 MR 감쇠기의 통합 설계에 대해 고찰하였다.

1.6.1. MR 감쇠기

(1) MR 감쇠력

MR 감쇠기의 감쇠력은 크게 우리가 제어할 수 있는 부분(이하 제어력, F_τ)과 제어할 수 있는 힘으로 나눌 수 있다(그림 3.1.6.1 참조). 제어할 수 없는 힘은 다시 소성의 점성에 의한 힘(plastic viscous force, F_η)과 마찰에 의한 힘(friction force, F_f)으로 나눌 수 있다. 일반적으로 마찰에 의한 힘은 댐퍼의 속도와 무관하게 일정한 반면 소성의 점성에 의한 힘은 속도와 밀접한 관계를 가지고 있다. 제어력은 제어입력 전압(또는 전류)의 크기 등으로 조정할 수 있고, 이 제어할 수 없는 힘은 제어입력 전압(또는 전류)의 양으로 조정할 수 없으며, 댐퍼의 기하학적 형상 및 사용하는 MR 유체의 특성 등에 의해 결정된다. 따라서 성능이 우수한 MR 감쇠기를 설계하기 위해서는 제어할 수 없는 힘에 대한 제어력의 비인 동적범위(dynamic range, D)를 가능한 크게 설정해야 한다. 동적범위는 여러 가지 형태로 정의될 수 있는데, 본 논문에서는 아래와 같이 정의하였다. 본 연구에서는 밸브 모드형 자기유변 댐퍼가 일반적으로 그림 3.1.6.2와 같이 기하학적으로 개념 설계할 수 있다고 가정하였다. 이런 경우 제어력 및 소성의 점성에 의한 힘은 다음의 식으로 표현할 수 있다.

$$D = \frac{F_\tau}{F_{uc}} = \frac{F_\tau}{F_\eta + F_f} \tag{3.1.6.1}$$

$$F_\tau = c\frac{\tau_0 L A_p}{h} = \left(2.07 + \frac{12Q\eta}{12Q\eta + 0.4wh^2\tau_0}\right)\frac{\tau_0 L A_p}{h} \tag{3.1.6.2}$$

$$F_\eta = \left(1 + \frac{whv_0}{2Q}\right)\frac{12\eta Q L A_p}{wh^3} \tag{3.1.6.3}$$

여기서, 사용된 각 변수는 아래와 같다.

· h : gap size (= $(D_2-D_1)/2$)

- w : mean circumference of the damper's annular flow path
- τ_0 : fluid yield stress
- η : plastic viscosity
- A_p : cross section area of the piston head
- v_0 : piston head velocity
- Q : volume flow rate (= $A_p \times v_0$)
- L : effective axial pole length (= ΣL_i, i =1,3)

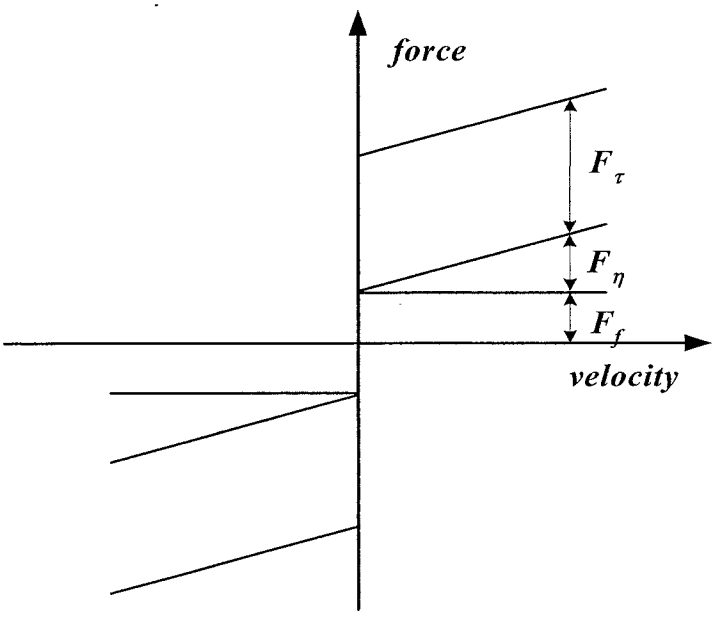


그림 3.1.6.1 Illustration of force decomposition of MR dampers

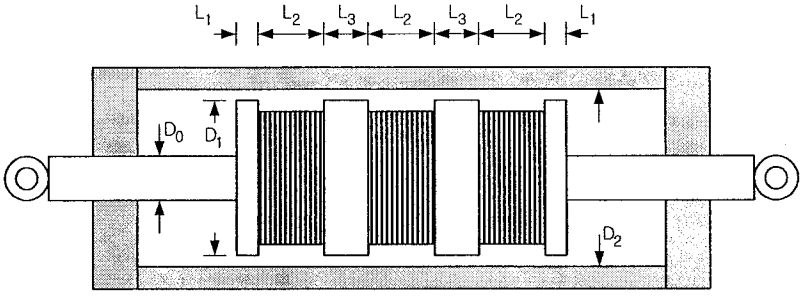


그림 3.1.6.2 Conceptional design for MR dampers

식 (3.1.6.2)와 식 (3.1.6.3)으로부터 기하학적 제한조건을 식 (3.1.6.4)와 같이 유도할 수 있다.

$$wh^2 = \frac{12k}{c}(\frac{\eta}{\tau_0})(\frac{F_\tau}{F_\eta})Q \qquad (3.1.6.4)$$

여기서, $k = 1 + (whv_0)/(2Q)$.

(2) 상용 MR 감쇠기의 분석

MR 감쇠기의 설계 방법을 정립하기 위해 상용 MR 감쇠기를 구입하여 관련 자료들을 검토해 보았다. 대상 감쇠기는 미국 Lord Corporation의 RD-1005-3이며, 제공되는 관련 자료를 표 3.1.6.1에 정리하였다.

표 3.1.6.1 RD-1005-3 Technical Data[4]

Item	Property
Damper forces (peak to peak)	> 2,224 N (2 in/s @ 1 A) < 667 N (8 in/s @ 0 A)
Electrical characteristics	Input current: max. 2 A Resistance: 5 Ω

대상 감쇠기의 정확한 크기 및 설계 방법 등을 검토하기 위해 분해를 하여 관련 자료를 취득하였으며, 그림 3.1.6.3은 분해된 모습을 보여주고 있다. 설계 시 가장 중요한 부분은 피스톤 헤드 부분이다. 따라서 피스톤 헤드부분의 각 치수는 그림 3.1.6.4와 같다.

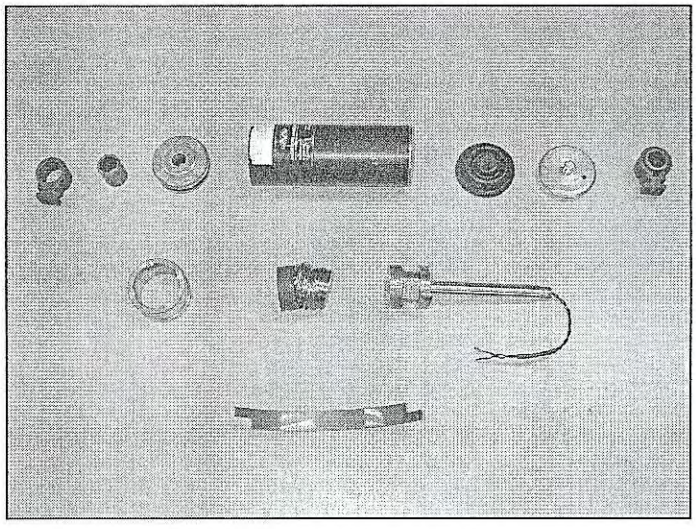


그림 3.1.6.3 RD-1005-3 MR damper

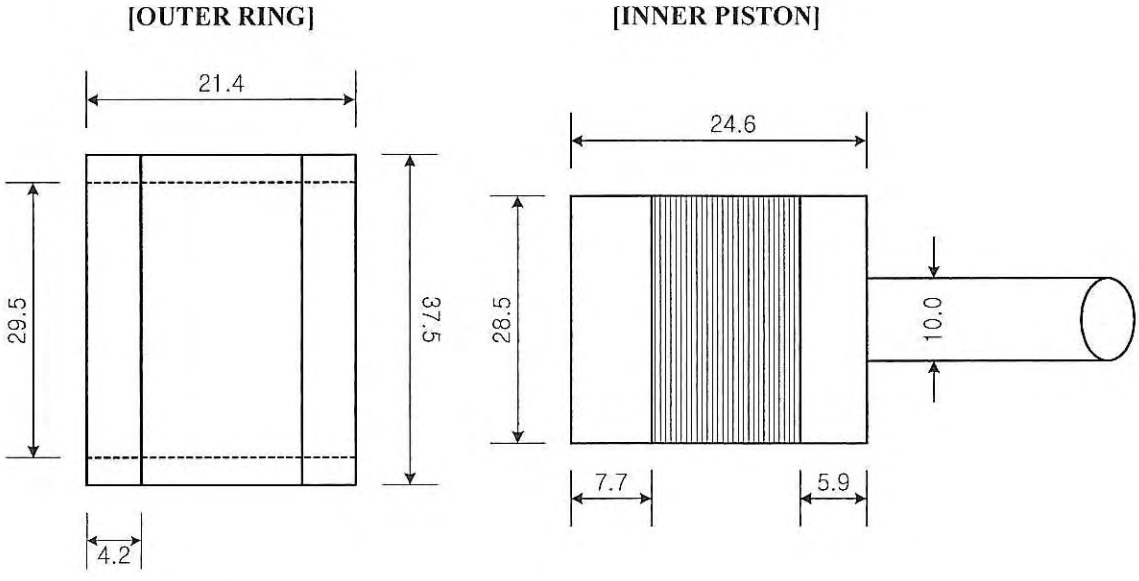


그림 3.1.6.4 Piston head of the RD-1005-3 MR damper

먼저, 표 3.1.6.1에 제시된 제어력과 관련 식과의 연관성을 검토하여 보았다. 관련 식 및 변수들은 아래와 같이 정리하였으며, 검토결과 좋은 결과를 얻을 수 있었다.

- Data: 약 2,000 N (@ 2 inch/s, p-p) → $F \cong 1{,}000$ N

  ∵ 2,224 N(@ 2 inch/s) - 667 N(@ 8 inch/s) = 1557N (p-p)

- 이론식: $F = \left(2.07 + \frac{12Q\eta}{12Q\eta + 0.4wh^2\tau_0}\right)\frac{\tau_0 L A_p}{h}$ [4]

- h = 0.5 mm
- w = π× (피스톤 직경) = π× 28.4 mm ≅ 90 mm
- τ_0 = 40 kPa (가정)
- η = 1.5 Pa-sec
- A_p = π× (피스톤 직경)^2 / 4 ≅ 633.5 mm^2
- v = 2 in/sec = 50.8 mm/sec
- Q = A_p × v ≅ 32182 mm^3/sec
- L = 4.3 mm × 2 = 8.6 mm

- 계산치: F ≅ 1,200 N > 1,000 N (Not bad, 20% error)

다음은 피스톤 헤드에 감긴 코일의 양을 검토해 보았다. 제시된 자료는 260 A-turns인 반면, 이론식에 근거한 계산결과 170 A-turns가 필요한 것으로 산정되었다. 이러한 차이는 누자 손실 등을 고려할 때, 크지 않은 양으로 판단된다.

- Data: N = 260 turns, I = 1 A → 260 A-turns

- 이론식: NI = $H_f g$ + $H_s L$

- H_f = 150 kA/m (가정)
- g = 2 × h = 1 mm
- H_s = 0.25 kA/m
- L = 24.5 mm + 14.2 mm × 2 + 21.5 mm = 74 mm
- $H_f g$ + $H_s L$ ≅ 170 **A-turns**

- 계산치: NI = $H_f g$ + $H_s L$ → 170 A-turns < 260 A-turns (Not bad, 누자 손실 고려)

위 검토 과정에서 얻은 가정한 사항들을 검토하기 위해 전자기력 해석을 수행하였다. 해석에 사용된 S/W는 Finite Element Method Magnetics (FEMM) Version 3.4이다. 가정한 변수는 MR 감쇠기의 전단응력으로서 아래와 같이 가정되었다. 가정된 값들이 정당한 것인가를 판단하기 위해 MR 감쇠기의 gap에 작용하는 자기장의 flux induction을 구하여 비교하였다. 그림 3.1.6.5는 해석에 사용된 MR 유체 MRF-336의 전단응력과 magnetic induction과의 관계를 보여주고 있으며, 해당 자료는 유체 제작업체에서 제공하고 있다. 그림 3.1.6.6은 해석을 통해 얻은 결과로서 피스톤 헤드부분에 작용하는 자기장을 보여주고 있다.

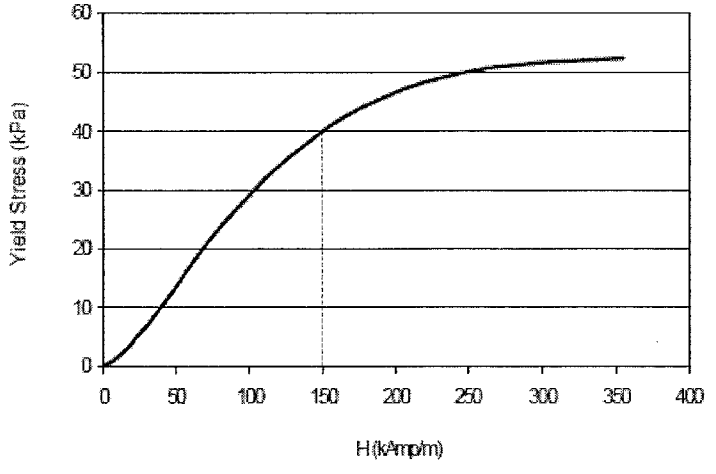


그림 3.1.6.5 Shear stress vs. magnetic induction for MRF-336

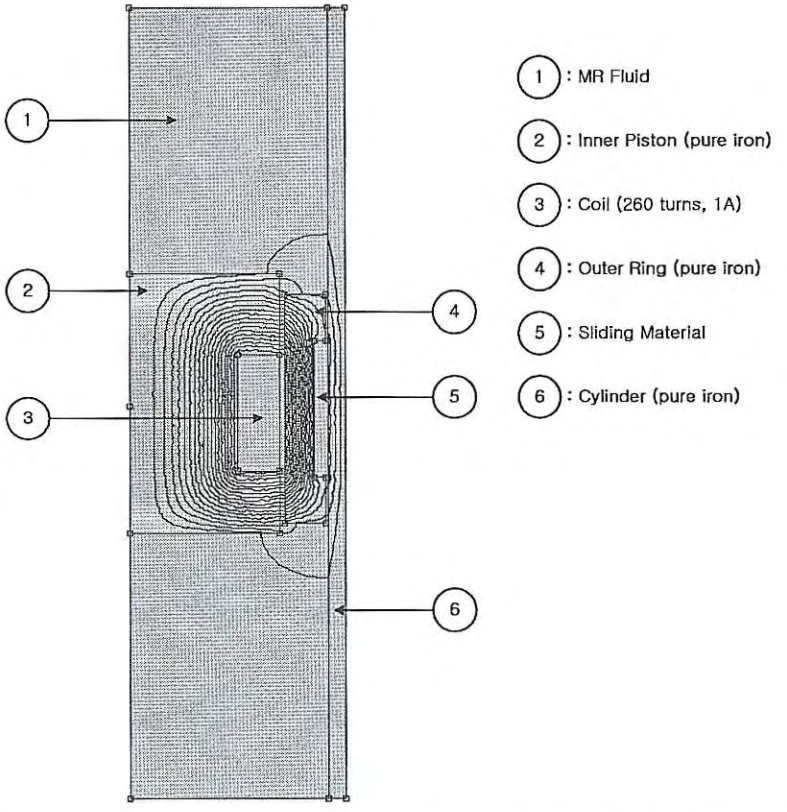


그림 3.1.6.6 Magnetical flux density obtained from analysis

그림 3.1.6.7은 피스톤 헤드의 상하 gap에 작용하고 있는 magnetic density를 보여주고 있는데, 가정한 값인 H_f = 150 kA/m 이상이 작용하고 있는 것을 확인할 수 있다. 따라서 위에서 검증한 내용들이 유용함을 검증하였다. 이를 요약하여 정리하면 아래와 같다.

- 가정 1) τ_0 = 40 kPa
- 가정 2) H_f = 150 kA/m

- 해석 결과

  - 양쪽 gap에서 계산된 Flux density(H_f) ≅ 152 kA/m → Good
  - 전단 응력(τ_0) ≅ 40 kPa (MRF-336인 경우) → Good
  - 코일의 저항: 4.7Ω (계측치) ≅ 4.4Ω(해석치) → Good

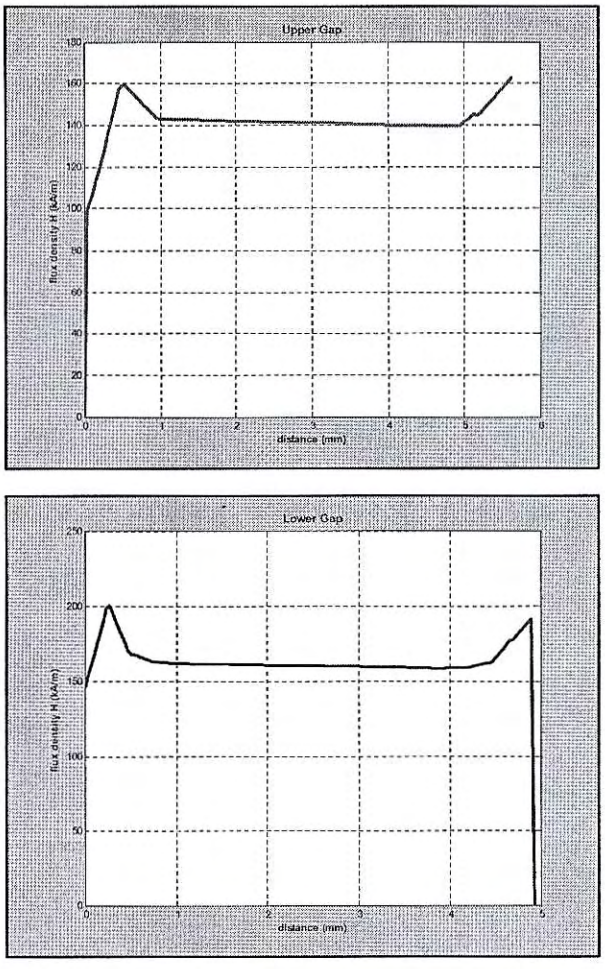


그림 3.1.6.7 Flux density @ upper gap (left) and lower gap (right)

참고적으로 대상 댐퍼의 특성들을 검토하기 위해 만능시험기를 사용하여 여러 가지 시험을 수행 하였다. 시험방법은 표 3.1.6.2에 정리하였다. 시험을 통해 얻은 결과를 그림 3.1.6.8 ~ 그림 3.1.6.10에 수록하였다.

표 3.1.6.2 Experimental test for RD-1005-3

Test method	Condition
Voltage-dependent (0 V ~ 5 V)	Displacement = ±20 mm, Frequency = 2 Hz
Frequency-dependent (0.25 Hz ~ 2 Hz)	Displacement = ±20 mm, Voltage = 5 V
Constant peak velocity (314 mm/sec)	Voltage = 5 V

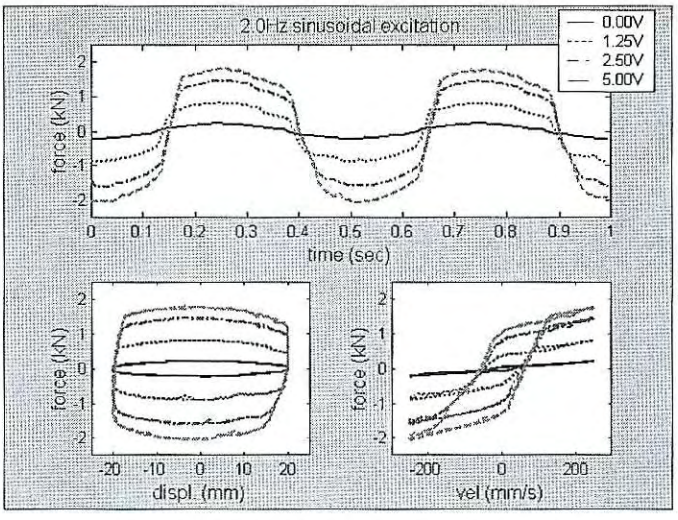


그림 3.1.6.8 Voltage-dependent test

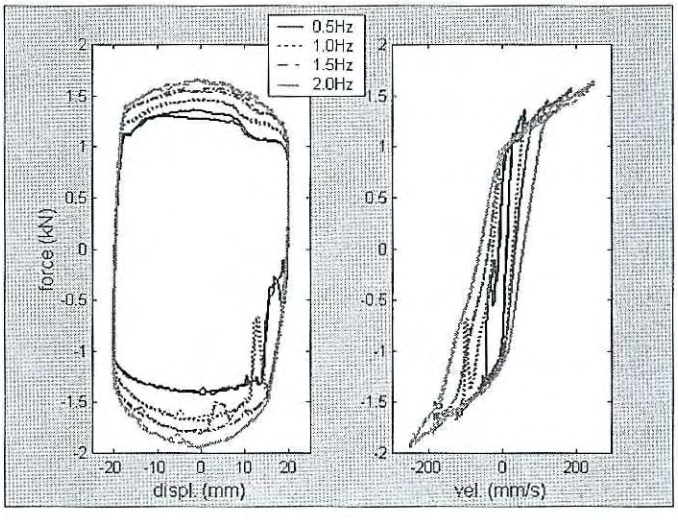


그림 3.1.6.9 Frequency-dependent test

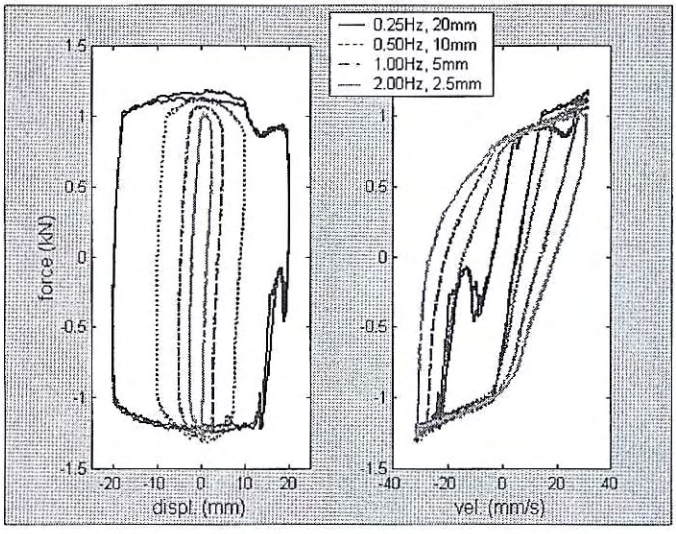


그림 3.1.6.10 Constant peak velocity test

MR 감쇠기는 주요 반능동형 댐퍼로 사용하기 때문에 제어기가 필요하다. 이런 경우 감쇠기의 동특성에 기반을 둔 제어기의 설계를 위해 동특성에 대한 모델링이 요구된다. 그 예를 보여 주기 위해 모델링 방법 및 모델링을 한 결과를 정리하였다. 그림 3.1.6.11 ~ 그림 3.1.6.13은 각 모델링 방법에 따라 모델링 한 결과를 시험결과와 비교해서 보여주고 있다.

- Bingham Model
  - $F = f_c \mathrm{sgn}(\dot{x}) + c_0\dot{x} + f_0$

- Bouc-Wen Model
  - $F = c_0\dot{x} + k_0(x - x_0) + \alpha z$
  - $\dot{z} = -\gamma|\dot{x}|z|z|^{n-1} - \beta\dot{x}|z|^n + A\dot{x}$

- 적용 예: 전압 = 5V, 변위 = ±20mm, 주파수 = 2Hz
  - Bingham Model; f_c = 120, c_0 = 0.3, f_0 = -10
  - Bouc-Wen Model; c_0 = 0.392, k_0 = 0.247, x_0 = 22.548, α = 98.121, γ = 0.5, β = 0.5, n = 2, A = 1

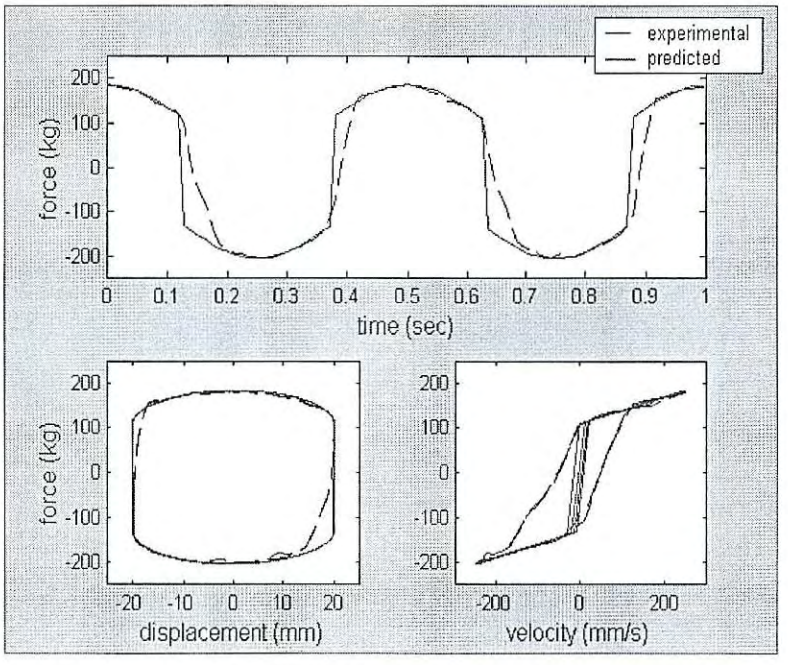


그림 3.1.6.11 Bingham model

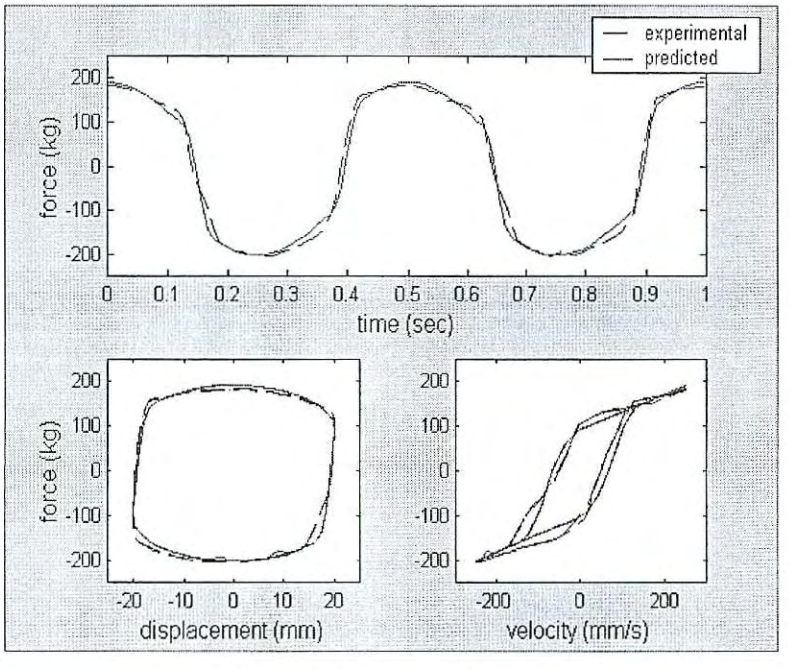


그림 3.1.6.12 Bouc-Wen model

- 전압을 고려한 Bouc-Wen Model
  - $F = c_0\dot{x} + k_0(x - x_0) + \alpha z$

- $\dot{z} = -\gamma|\dot{x}|z|z|^{n-1} - \beta\dot{x}|z|^n + A\dot{x}$
- $c_0 = c_0(u) = c_{0a} + c_{ob} \times u$
- $k_0 = k_0(u) = k_{0a} + k_{ob} \times u$
- $\alpha = \alpha(u) = \alpha_a + \alpha_b \times u$
- 적용 예: c_{0a} = 0.076, c_{ob} = 0.063, k_{0a} = 0, k_{ob} = 0.0490, α_a = 2.26, α_b = 19.17

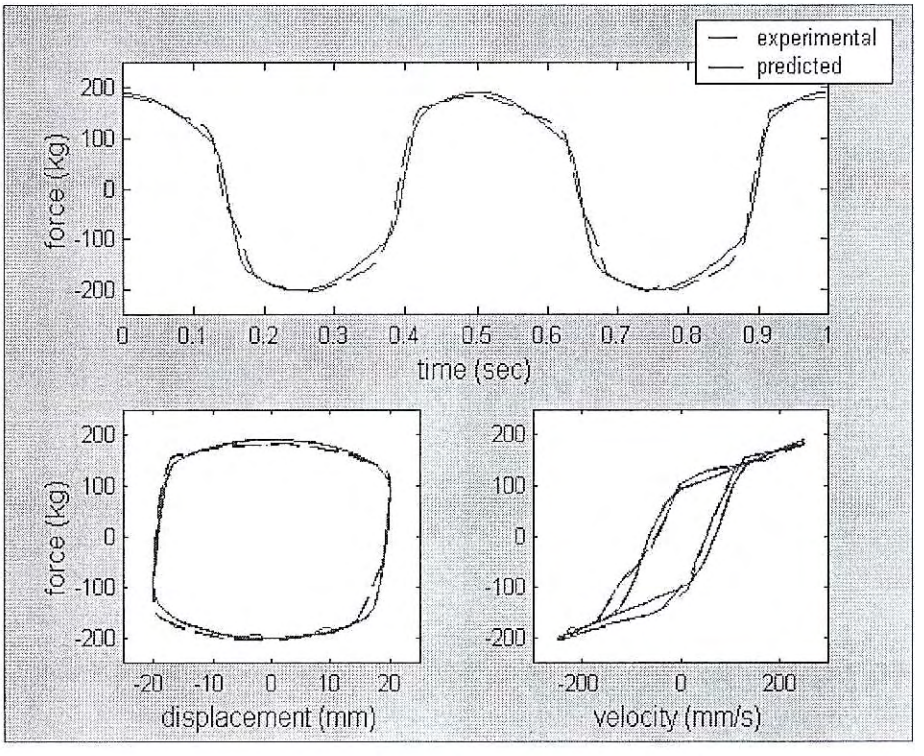


그림 3.1.6.13 Applied voltage of 5 V

1.6.2. MR 감쇠기 및 EMI 시스템의 설계 및 제작

본 연구과제에서는 5kN 급 MR 감쇠기와, 2kN 급 케이블용 MR 감쇠기-EMI 통합 시스템에 대한 설계 및 제작하였고 이에 대한 성능평가를 수행하였다. 자세한 내용은 3장 7절과 8절에 설명하였다.

1.6.3. 신개념 스마트 제진장치의 통합설계

이전에 기술된 바와 같이 본 연구를 통해 10 kN 용량의 MR댐퍼가 설계, 제작되었고 다양한 시험을 통해 댐퍼의 기본적인 성능 평가가 수행되었다. 또한 후속 연구를 수행하여 MR댐퍼의 준최적 설계 절차를 얻을 수 있었으며, 이는 최적화 문제와 전자기해석을 바탕으로 얻어진 것이다. 최적화 문제에서 목적함수는 몇 개의 제약조건을 갖는 동적 범위를 최대로 하는 것이다. 하지만, 이 연구는 MR 댐퍼에만 국한되어 있기 때문에, EMI 시스템과 결합된 신개념 스마트 제진장치에 바로 적용하기는 적절하지 않다. MR 댐퍼의 제어력은 EMI 시스템으로부터 발생된 입력 전류를 다르게 해 줌에 따라 조절할 수 있기 때문에, MR 댐퍼와 EMI 시스템을 동시에 고려해서 설계를 하게 되면 보다 효과적인 제진 장치를 얻을 수 있다. 여기서는 사장 케이블 제진용 신개념 스마트 제진장치를 설계하는 경우의 통합설계 방법에 대해서 살펴보고자 한다.

MR 댐퍼의 전체적인 성능을 평가하기 위해서 가장 중요한 2개의 매개변수는 제어가능한 힘과 동적 범위이다. 아래 그림에서 볼 수 있듯이 전체 감쇠력은 제어가능한 항복응력에 의한 힘 F_τ와 제어불가능한 힘 F_{uc}로 나눌 수 있다. 제어불가능한 힘은 소성점성력 F_η와 마찰력 F_f로 구성된다. 동적범위 (D)는 제어가능한 힘 F_τ과 제어불가능한 힘 F_{uc}과의 비로 정의되며 아래와 같이 표현된다.

$$D = \frac{F_\tau}{F_{uc}} = \frac{F_\tau}{F_\eta + F_f} \tag{3.1.6.5}$$

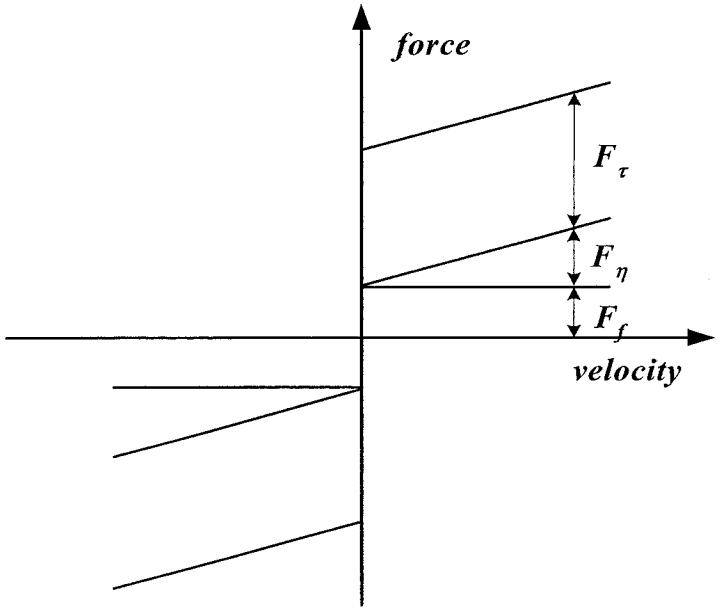


그림 3.1.6.14 MR 유체의 힘-속도 특성

제어할 수 없는 힘은 다시 소성의 점성에 의한 힘(plastic viscous force, F_η)과 마찰에 의한 힘(friction force, F_f)으로 나눌 수 있다. 일반적으로 마찰에 의한 힘은 댐퍼의 속도와 무관하게 일정한 반면 소성의 점성에 의한 힘은 속도와 밀접한 관계를 가지고 있다. 제어력은 제어입력 전압(또는 전류)의 크기 등으로 조정할 수 있고, 이 제어할 수 없는 힘은 제어입력 전압(또는 전류)의 양으로 조정할 수 없으며, 댐퍼의 기하학적 형상 및 사용하는 MR 유체의 특성 등에 의해 결정된다. 따라서 성능이 우수한 MR 감쇠기를 설계하기 위해서는 제어할 수 없는 힘에 대한 제어력의 비인 동적범위(dynamic range, D)를 가능한 크게 설정해야 한다. 동적범위는 여러 가지 형태로 정의될 수 있는데, 본 연구에서는 아래와 같이 정의하였다. 본 연구에서는 밸브 모드형 자기유변 댐퍼가 일반적으로 그림 3.1.6.15와 같이 기하학적으로 개념 설계할 수 있다고 가정하였다. 이런 경우 제어력 및 소성의 점성에 의한 힘은 다음의 식으로 표현할 수 있다.

$$D = \frac{F_\tau}{F_{uc}} = \frac{F_\tau}{F_\eta + F_f} \tag{3.1.6.6}$$

$$F_\tau = c\frac{\tau_0 L A_p}{h} = \left(2.07 + \frac{12Q\eta}{12Q\eta + 0.4wh^2\tau_0}\right)\frac{\tau_0 L A_p}{h} \tag{3.1.6.7}$$

$$F_\eta = \left(1 + \frac{whv_0}{2Q}\right)\frac{12\eta Q L A_p}{wh^3} \tag{3.1.6.8}$$

여기서, 사용된 각 변수는 아래와 같다.

- h : gap size (= $(D_2-D_1)/2$)
- w : mean circumference of the damper's annular flow path
- τ_0 : fluid yield stress
- η : plastic viscosity
- A_p : cross section area of the piston head
- v_0 : piston head velocity
- Q : volume flow rate (= $A_p \times v_0$)
- L : effective axial pole length (= $\sum L_i$, i =1,3)

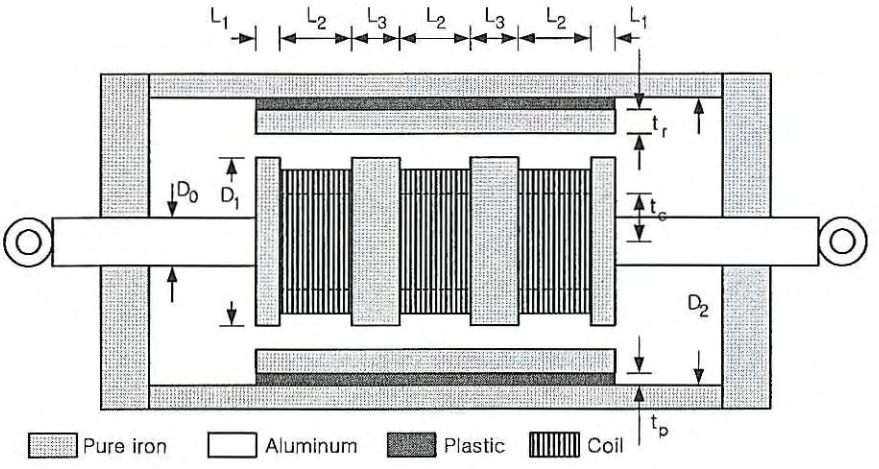
식 (3.1.6.7)와 식 (3.1.6.8)으로부터 기하학적 제한조건을 식 (3.1.6.9)와 같이 유도할 수 있다.

$$wh^2 = \frac{12k}{c}\left(\frac{\eta}{\tau_0}\right)\left(\frac{F_\tau}{F_\eta}\right)Q \tag{3.1.6.9}$$

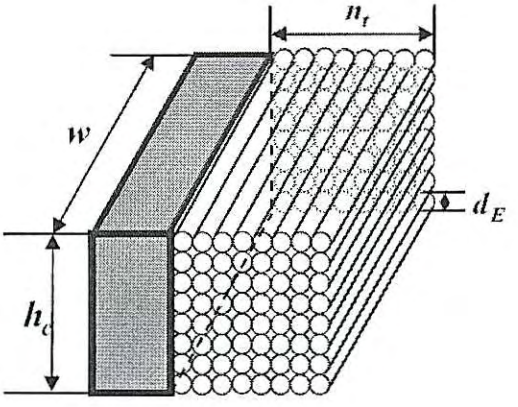
여기서, $k = 1 + (whv_0)/(2Q)$.

다중-stage (또는 spool) MR 댐퍼의 개략도는 그림 3.1.6.15(a)와 같이 나타낼 수 있다. 댐퍼는 단순한 형상을 사용하는데 외부 실린더 모양의 틀은 자기회로의 일부분을 이룬다. 코일 부분에서 3개의 자기회로를 구성하여 자속을 만들게 된다. 유효한 유체 오리피스 부분은 피스톤 외측 직경과 댐퍼 실린더 모양의 틀 내부 사이의 고리모양의 공간이다. 피스톤의 움직임을 통해 유체가 전체 고리모양의 영역을 통해 흘러가게 된다. 한 예로, 아래 그림에서는 전자기코일이 피스톤의 세 부분에 고

려되었고, 그러기 때문에 4개의 유효한 밸브 영역이 생기게 된다.



(a) 다중-스테이지 MR 댐퍼



(b) EMI 시스템 단면도

그림 3.1.6.15 다중 stage MR 댐퍼 와 EMI 시스템의 개념 설계

위에서 그림 3.1.6.15(b)는 EMI 시스템의 개념설계를 보여주다. 설계된 MR댐퍼가 의미있는 제어력을 발생시킬 수 있도록, 충분한 전류가 EMI 시스템에서 유도되어야만 한다. 이를 위해, EMI 시스템 서례의 목적은 MR 댐퍼와 EMI 시스템 모두를 구성하는 폐회로를 흐르는 전류가 최대가 되도록 하는 것이다. EMI 시스템의 설계에 필요한 변수는 다음과 같다 (그림 3.1.6.15(b) 참조바람).

w: 코일 내측의 폭

h_c: 코일 내측의 높이

d_E: 코일 전선 하나의 직경

n_t: 폭방향으로 코일 전선의 감긴 횟수 (그림의 경우는 8임),

$N_E = (h_c / d_e) \times n_t$): 코일 전선의 전체 감긴 횟수

본 연구에서는, 사장 케이블의 응답을 저감시키기 위한 신개념 스마트 제진장치를 통합 설계하고자 한다. 아래 그림은 설계에 고려된 사장 케이블이며 현대건설 기술연구소에 설치되어 있다. 케이블의 동특성은 아래 표에 나타난 바와 같다.

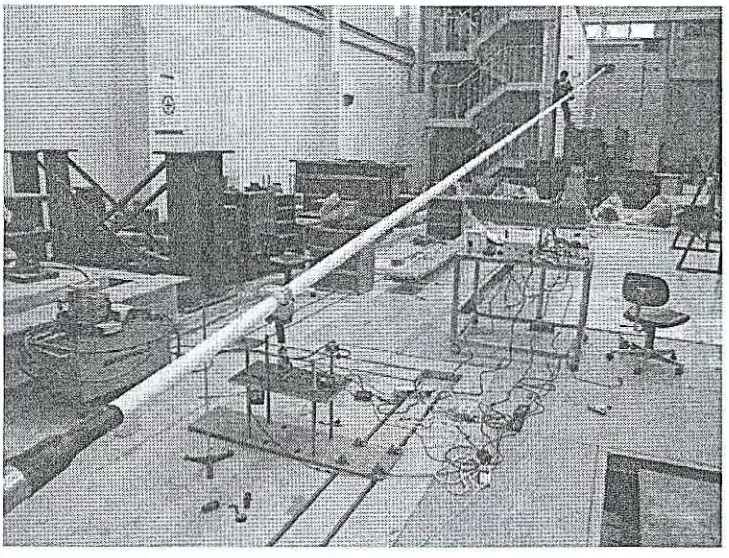


그림 3.1.6.16 사장 케이블

표 3.1.6.2 케이블 동특성

Parameter	Value
길이	44.70 m
단위길이당 질량	20.3 kg / m
장력	50 ton
첫 번째 모드 감쇠비	0.08 %
첫 번째 고유진동수	1.81 Hz

예비실험을 통해, MR 댐퍼를 설치할 위치의 최대 변위 및 필요한 제어가능한 힘이

각각 8 mm와 1100N (속도 60mm/sec일 때)임을 알게 되었다. 미국 Lord Corporation에서 제조하는 상용 MR 유체 (MRF 140CG)를 사용하였다. 회사에서 제공하는 자료에 의하면 유체의 점성도는 0.280 (± 0.070) Pa·s이고, 목표로하는 항복응력은 대략 50 kPa @ 140 kA/m로 선정되었다.

(1) 1단계 설계 과정

설계 목적함수는 60 mm/sec의 설계속도에서 약 1100 N의 제어가능한 힘을 갖는 댐퍼의 동적범위 (D)를 최대로 하는 것이다. 그런 까닭에 최적화 문제는 다음과 같이 제약 비선형 다변수 함수의 최대값을 찾는 것이다.

Object function: Max. D (> 10) (3.1.6.10)

Constraint condition

- Controllable force $F_\tau \fallingdotseq$ 2,000 N @ 60 mm/s

  (안전율을 고려하여 1100N을 2000으로 상향조정하였다)

- Geometric constraint $wh^2 = \frac{12k}{c}(\frac{\eta}{\tau_0})(\frac{F_\tau}{F_\eta})Q$

Design variables

- D_1 : Diameter of the piston head
- D_0 : Diameter of the piston rod
- L : effective axial pole length (= $\sum L_i$, i=1,3)
- h : gap size (= $(D_2-D_1)/2$)

Bound of the design variables

10 mm $< D_1 <$ 30 mm	5 mm $< D_0 <$ 10 mm
5 mm $< L <$ 20 mm	0.5 mm $< h <$ 1 mm

위의 최적설계 문제를 풀기 위해 MATLAB® Optimization Toolbox에서 제공하고 있는 'fmincon'함수를 사용하였으며, 해석결과를 통해 얻어진 설계변수 최적값은 [D_1 D_0 L h] $\fallingdotseq$ [30 10 10 0.5] mm이다. 결과적으로 동적 범위 및 제어력은 각각 약 10.2 및 1400 N이다. 이러한 결과는 MR댐퍼를 one-stage로 구성하여도 충분하다는 것을 보여준다.

(2) 2단계 설계 과정

1단계에서는, MR댐퍼의 피스톤 직경, 유효 pole 길이 및 gap size가 결정되었다. 이번 단계에서는 MR 댐퍼와 EMI 시스템의 통합설계가 수행된다. EMI 시스템에 대해서는 4개의 설계 변수가 있고 MR 댐퍼에 대해서는 3개의 설계변수가 존재한다. 2단계 설계 과정의 목적함수는 폐회로를 흐르는 전류의 크기를 최대화 하는 것이다. 전류를 간단하게 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$i = \frac{\varepsilon}{R_E + R_M} \tag{3.1.6.11}$$

여기서, ε는 유도기전력을 나타내고, R_E 와 R_M 는 각각 EMI 부분의 코일과 MR 댐퍼의 전체 저항을 각각 의미한다. 코일의 인덕턴스는 본 연구에서는 무시하였다. EMI 시스템에서 발생하는 유도기전력은 다음과 같이 얻어진다.

$$\varepsilon_{\max} = -N_E B\left(\frac{dA}{dt}\right)_{\max} = -N_E Bw\left(\frac{dx}{dt}\right)_{\max} \tag{3.1.6.12}$$

스마트 제진 장치의 통합설계의 효용성을 검증하기 위한 실험은 sine 하중을 가지고 수행될 것이고, MR댐퍼 및 EMI 시스템의 최대 스트로크는 모두 8 mm를 고려할 것이다. 또한, 조화 하중의 가진 주파수는 사장 케이블의 고유진동수와 동조시킬 것이다. 따라서, 최대속도는 다음과 같이 얻어진다: $(dx/dt)_{\max} = Amp. \times \omega_1 = 0.008 \times (2\pi \times 1.81) = 0.091$.

영구자석의 자기장 크기는 약 0.6 T 이고 코일의 감긴 회수는 $N_E = (h_c / d_E) n_t$ 과 같이 나타낼 수 있기 때문에, 유도기전력은 다음과 같다.

$$\varepsilon_{\max} = -0.0546 w h_c n_t / d_E \tag{3.1.6.13}$$

EMI 부분의 저항은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_E = \rho \frac{l}{S} = 1.72 \times 10^{-8} \frac{N_E l_E}{\pi d_E^2 / 4} = 5.50 \times 10^{-8} \frac{h_c n_t (2w + 0.02 + 2\pi n_t d_E)}{\pi d_E^3} \tag{3.1.6.14}$$

여기서, ρ 는 resistivity (구리의 경우에는 1.72×10^{-8} 임), l 과 S 는 각각 코일 길이 및 코일의 단면적이고, l_E 는 1번 회전 횟수당 평균 길이를 의미한다.

마찬가지로, MR 댐퍼 코일의 저항은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_M = 1.72\times10^{-8}\frac{N_M l_M}{\pi d_M^2/4} = 1.72\times10^{-8}\frac{(D_1^2 - t_c^2)L_2}{d_M^4} \qquad (3.1.6.15)$$

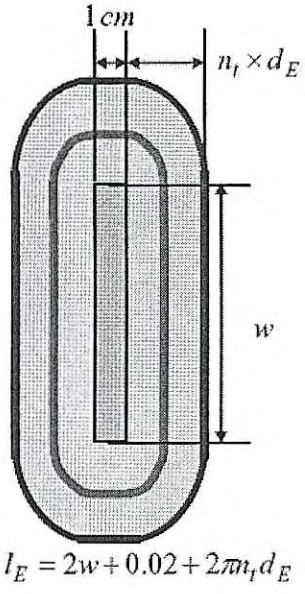
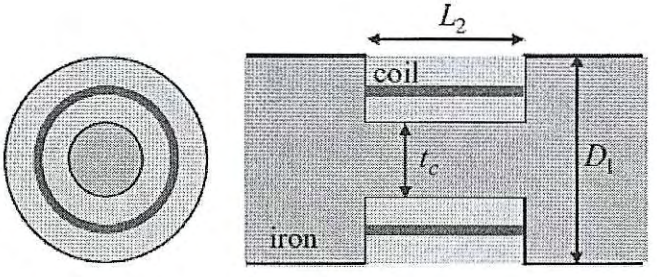


그림 3.1.6.17 Averaged length of one turn of EMI part coil (red line)



$$N_M = \frac{(D_1 - t_c)/2}{d_M}\times\frac{L_2}{d_M} = \frac{(D_1 - t_c)L_2}{2d_M^2}$$

$$l_M = \pi\left(\frac{D_1 + t_c}{2}\right)$$

그림 3.1.6.18 Cylinder, spool, and coil of MR damper

MR 댐퍼 코일 감긴 횟수 N_M 와 MR 댐퍼에서 1회전당 평균 길이 l_M 는 그림 6에서와 같이 알 수 있다. 피스톤 헤드의 직경은 1단계 설계 과정을 통해 30 mm임을 알고 있다..

2단계에서의 최적화 문제는 아래와 같은 제약 비선형 다변수 함수의 최대값을 찾는 것이다.

- Object function: Max. i (유도전류)
- 제한 조건

$$N_M \cdot i \geq H_{fluid} h + H_{steel} L$$

- 설계 변수

w : EMI 코일 폭

h_c : height of the coil core (EMI part),

n_t : outward number of turn for coil (EMI part)

d_E : diameter of EMI part coil

d_M : diameter of MR damper coi

t_c : thickness of the piston core(MRdamper)

L_2 : length of non-effective axial pole (MRdamper)

- 제한조건

50 mm < w < 100 mm, 10 mm < h_c < 25 mm

5 turns < n_t < 80 turns, 0.1 mm < d_E < 1 mm

0.1 mm < d_M < 1 mm , 22 mm < t_c < 28mm

5 mm < L_2 < 12 mm

앞 단계와 마찬가지로 *'fmincon'* 함수를 사용하였고, 이를 통해 얻어진 설계변수 값은 아래와 같다:

$$[w \;\; h_c \;\; n_t \;\; d_E \;\; d_M \;\; t_c \;\; L_2] = [100 \;\; 25 \;\; 36(turns) \;\; 1 \;\; 0.32 \;\; 22 \;\; 11] \text{ mm}$$

이에 대응되는 변수들은 다음과 같다:

$$\begin{matrix} [& N_E & N_M & R_E & R_M & i & N_M \cdot I] \\ = [& 703 turn & 423 turn & 8.31\Omega & 7.41\Omega & 0.428 A & 181] \end{matrix}$$

코일의 직경에 대한 설계 변수들은 각각 AWG 18 (EMI 시스템) 과 AWG 28 (MR 댐퍼)로 규격화될 수 있다.

(3) 3단계 최적 설계

1단계 및 2단계에서는, MR 댐퍼와 EMI 시스템의 가장 중요한 설계 변수들이 결정되었다. 3단계에서는 앞 단계에서 결정된 최적값을 이용하여 세부적인 피스톤 헤드의 형상을 결정하는 단계이다. 여기서는, 자기 회로의 설계 및 해석을 통해 피스톤 헤드의 주요 설계변수를 결정한다. 단, 이때 주의할 점은 이전 단계에서 가정한 유체의 항복응력이 발생할 수 있는 자기유도가 형상되어야만 그 결과가 유효할 수 있다. 또한 자기포화를 고려하기 위해 자기밀도는 1.5 T이하로 설계되어야 한다.
댐퍼의 최종 치수는 다음과 같은 설계 변수를 조정함에 의해 결정된다.

- t_r : thickness of outer ring
- t_p : thickness of the frictional material (plastic)
- $L_{1,3}$: effective axial pole length

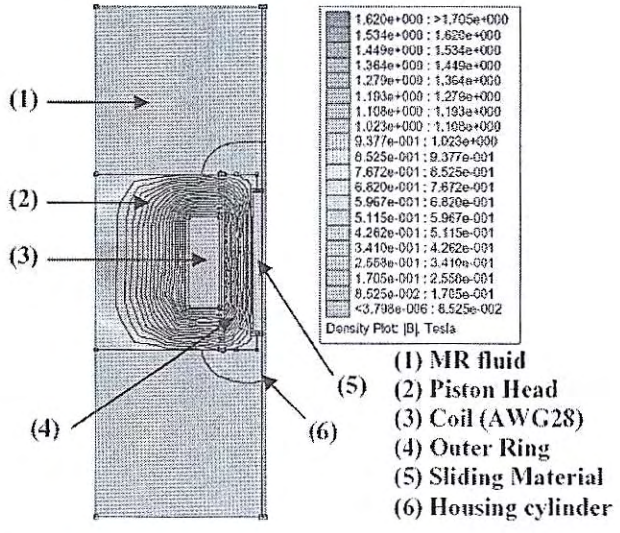
표 3.1.6.3는 최종 결과를 정리한 것이다. 표에서 알 수 있듯이, 설계된 one-stage 댐퍼는 steel의 자기포화 조건 (<1.5T) 및 MR 유체의 작동 조건 (>140kA/m)을 만족한다. 그림 3.1.6.19는 설계된 one-stage MR 댐퍼의 수치해석 결과를 보여주고 있다.

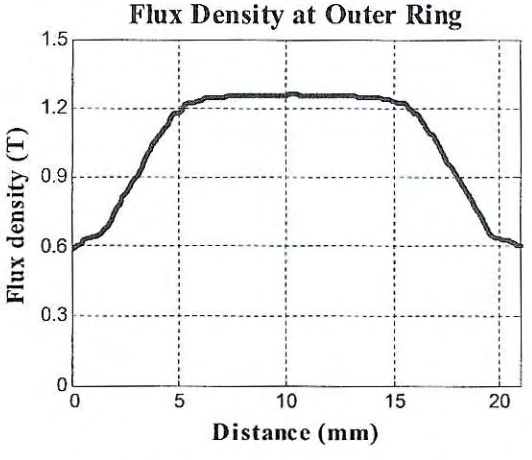
표 3.1.6.3 신개념 스마트 제진장치의 통합설계 절차 및 결과

<table>
<tr><th colspan="2">1st Step</th><th colspan="2">2nd Step</th></tr>
<tr><td colspan="2">Maximize $D = \frac{F_\tau}{F_\eta + F_f}$</td><td colspan="2">Maximize $i = \frac{\varepsilon}{R_E + R_M}$</td></tr>
<tr><td colspan="2">Diameter of piston head (D_1) : 30 mm</td><td rowspan="5">EMI Part</td><td rowspan="2">Width of coil core (w) : 100 mm</td></tr>
<tr><td colspan="2">Diameter of piston rod (D_0) : 10 mm</td></tr>
<tr><td colspan="2">Effective axial pole length (L) : 10 mm</td></tr>
<tr><td colspan="2">Gap size (h) : 0.5 mm</td><td>Height of coil core (h_c) : 25 mm</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">3rd Step</td><td>Outward number of turn of coil (n_t) : 36 turns</td></tr>
<tr><td colspan="2">FEM Magnetics Analysis</td><td>Diameter of coil (d_E) : AWG 18</td></tr>
</table>

Flux density in steel	< 1.5 T	MR Damper	Diameter of coil (d_M) : AWG 28
Magnetic Induction at gap	> 140 kA/m		Thickness of the piston core (t_c) : 22 mm
MR damper coil turn	AWG 28 / 380 turn		
MR damper coil current	0.427 A		Non-effective axial pole length (L_2) : 11 mm
$N_M \cdot I = 380 \cdot 0.427 = 162.6$ $H_{fluid}h + H_{steel}L = 152.8$*	$N_M I > \sum HL$		

* $H_{fluid}h + H_{steel}L = 140kA/m \times (0.5 \times 2)mm + 0.25kA/m \times (16 + 7.5 + 2) \times 2mm$





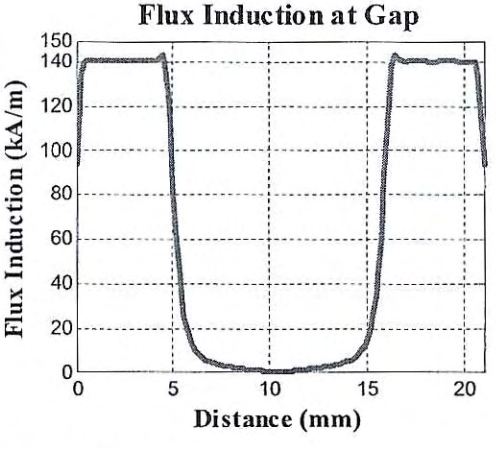


그림 3.1.6.19. 설계된 one-stage MR 댐퍼의 수치해석 결과

이상과 같이 MR 댐퍼와 EMI 시스템이 결합된 신개념 스마트 제진장치의 통합설계 절차를 수립하고 44.7 m 길이의 사장 케이블 제진용 장치를 예제로 하여 절차에 따라 실제 설계를 수행해 보았다. 이상과 같이 통합 설계된 제진장치는 실제 실험을 통해 성능이 평가되었으며 그 결과는 4절에 기술되어 있다.

1.7. 신개념 스마트 제진장치의 설치위치 및 최적용량 결정

1.7.1. MR 댐퍼의 최적위치 결정 방법

(1) 기존 방법

Zhang과 Soong (2002)은 간편화된 순차적인 방법 (SSSA)을 사용하여 수동 제어기의 하나인 선형점성 감쇠기의 최적위치를 결정하였다. SSSA는 구조물의 응답이 큰 곳에 감쇠기를 설치할수록 감쇠기가 발현하는 제어 효과가 크다는 원리를 이용한 방법이다. 그리고 기존의 최적위치 결정방법과 달리 복잡한 이론이나 해석 방법을 사용하지 않으면서, 간단하고 알기 쉽게 표현된 최적위치 결정지수를 사용하여 순차적인 방법으로 감쇠기의 최적위치를 결정한다.
감쇠기의 최적위치를 결정하기 위해 모든 층에 대해 구하는 최적위치 결정지수는 다음과 같다.

$$\gamma_i = \alpha_1 \delta_i + \alpha_2 \dot{\delta}_i \qquad (3.1.7.1)$$

각 층의 최대 층간 변위와 최대 층간 상대속도에 α_1 과 α_2 라는 일정한 가중치를 곱한 것이다. 그리고 δ_i 는 각 층의 최대 층간 변위를, $\dot{\delta}_i$ 는 각 층의 최대 층간 상대속도를 말한다. 빌딩에 설치하는 선형점성 감쇠기의 개수가 하나씩 증가할 때마다 모든 층에 대해 최적위치 결정 지수의 값을 구하여 최대값을 갖는 층에 다음 감쇠기를 설치하는 것이다.

하지만 SSSA에서 각 응답에 대한 가중치인 α_1 과 α_2 는 명확하게 정해져 있지 않다. 그리고 층간 변위와 층간 속도의 규모가 매우 다르며, 사용하는 변위와 속도의 단위나 구조물에 가하는 지진 등 여러가지 요인들에 따라 그 규모의 비가 달라진다. 그러므로 식 (3.1.7.1)은 최대 층간 변위와 최대 층간 상대속도의 가중치

를 명확하면서도 알기 쉽게 표현할 수 없다.

(2) 자기유변유체 감쇠기에 대한 제안 방법

여기서는 자기유변유체 감쇠기의 최적 위치를 결정하기 위하여 수정된 SSSA방법을 사용하였다. 이를 위해 수정된 최적위치 결정 지수를 제안한 다음 자기유변유체 감쇠기의 최적위치를 순차적으로 결정하고자 한다. 우선 각 층의 최대 층간 변위, 최대 층간 상대속도, 그리고 최대 절대가속도 중의 하나만을 최적위치 결정 지수로 정한 다음, 세 가지 경우에 대해 자기유변유체 감쇠기의 최적 위치와 성능을 구한다. 그 결과 각 층의 최대 절대가속도는 최적위치 결정 지수로써 부적절하다는 것을 알게 되었다.

따라서 선형점성 감쇠기에 대한 기존의 SSSA 방법과 마찬가지로 각 층의 최대 층간 변위와 최대 층간 상대속도에 대해서만 가중치를 가정하고 수정된 최적위치 결정 지수를 제안한다. 수정된 자기유변유체 감쇠기에 대한 최적위치 결정 지수의 식은 다음과 같다.

$$\gamma_i = \alpha_1 \frac{\delta_i}{d_{\max}} + (1-\alpha_1)\frac{\dot{\delta}_i}{v_{\max}} \qquad (3.1.7.2)$$

여기서 와 $v_{\max}$ 는 자기유변유체 감쇠기를 하나도 달지 않은 상태에서 빌딩 전체에 대한 최대 층간 변위와 최대 층간 상대속도를 말한다. 이렇게 제어하지 않은 상태에서의 빌딩 전체에 대한 최대 응답으로 나누는 이유는 층간 변위와 층간 속도의 규모가 매우 다르고 여러가지 요인들에 따라 달라지기 때문이다. 그러므로 $d_{\max}$ 와 $v_{\max}$ 로 나누면 보다 간편하면서도 명확하게 두 가지 응답의 가중치를 표현할 수 있다. 각 층의 최대 층간 변위에 대한 가중치, α_1 은 0, 0.33, 0.5, 0.67, 그리고 1까지 달리하면서 최적위치 결정지수를 제안한다.

제안된 최적위치 결정지수로 자기유변유체 감쇠기의 최적위치를 구하는 동안 수동제어 모드와 반능동 제어 모드로 입력전압을 결정한다. 수동제어 모드에서는 Passive-on과 Passive-off 방법을 사용하다. 반능동제어 모드에서는 MEDA 방법을 사용한다. Clipped-optimal 제어는 가장 대표적인 반능동제어 방법이지만 자기유변유체 감쇠기를 하나씩 설치할 때마다 가중행렬들을 결정해야 하는 번거로움 때문

에 제안된 최적위치 결정 방법을 사용하기에 부적절하다. 반면 MEDA 방법은 이러한 가중행렬을 결정할 필요 없이 간단한 식으로 입력전압을 결정할 수 있으므로 제안된 최적위치 결정방법을 간편하게 사용할 수 있다.

이렇게 제안한 자기유변유체 감쇠기의 최적위치 결정 지수를 이용하여 최적위치를 구하는 순서는 다음과 같다.

① 자기유변유체 감쇠기의 최적위치 결정 지수를 제안한다.
② 감쇠기를 전혀 달지 않은 상태에서 각 층에서의 최적위치 결정 지수의 값을 구한다.
③ 지수의 값이 가장 큰 층에 첫 번째 감쇠기를 설치하고, 그 상태에서 다시 각 층에서의 최적위치 결정 지수의 값을 구한다.
④ 지수의 값이 가장 큰 층에 다음 감쇠기를 설치한다.
⑤ 감쇠기의 설치를 마칠 때까지 위의 과정을 반복하다.

1.7.2. 수치 예제

수치 해석에 사용하는 구조물은 Otori 등이(2000, 2002)이 사용한 3rd Generation 벤치마크 문제에서 다룬 20층 규모의 비선형 벤치마크 빌딩이다.

구조물에 가하는 입력 지진은 El Centro 지진 (N-S component, 1940), Hachinohe 지진 (N-S component, 1968), Northridge 지진 (N-S component, 1994), Kobe 지진 (N-S component, 1995)이다. 각 지진의 최대 절대가속도는 0.349g, 0.230g, 0.844g, 그리고 0.834g이다. 각 지진의 최대 절대가속도의 크기에서 알 수 있듯이 El Centro 지진과 Hachinohe 지진은 약진에, Northridge 지진과 Kobe 지진은 상대적으로 강진에해당한다.

최적위치 결정지수는 각층의 최대 절대 가속도만으로 이루어진 지수와 식 (3.2)를 사용한다. 또한 각 층의 최대 층간 변위에 대한 가중치, α_1을 0, 0.33, 0.5, 0.67, 그리고 1까지 변화시키면서 구한 자기유변유체 감쇠기의 최적 위치와 성능을 비교한다. 최적위치를 구하는 동안 자기유변유체 감쇠기의 입력전압을 결정하기 위해 수동제어 모드인 Passive-On과 Passive-Off 방법을, 그리고 반능동제어 모드인

MEDA 방법을 사용한다. 수치해석 결과 Passive-Off 하에서 자기유변유체 감쇠기의 최적위치를 결정하는 것이 부적절하다는 것을 알 수 있으므로 Passive-On과 최대소산에너지 방법으로 구한 성능만을 비교한다.

수치해석에 사용한 네 가지 지진의 서로 다른 강도가 자기유변유체 감쇠기의 최적위치의 결과에 끼치는 영향도 확인한다. 이를 위해서 네 가지 지진의 강도, 즉 최대 절대가속도를 동일하게 조절한 후 자기유변유체 감쇠기의 최적위치를 구해보고 최적위치의 결과가 비슷해 지는지 확인한다.

그림 3.1.7.1은 20층 규모의 비선형 벤치마크 빌딩을 표현한 그림이다. 빌딩의 규모는 가로 30.48m, 세로 35.48m, 높이 80.77m이며 지하 2층까지 포함한다. 남북방향으로 다섯 구획, 동서방향으로 여섯 구획으로 나누어진다. 남북방향의 지진에 더 약한 방향이므로 자기유변유체 감쇠기는 모두 남북방향으로 설치한다. 각 절점마다 수직방향과, 수평방향, 그리고 두 방향 축으로 이루어진 면에 대한 회전축 방향의 세 개의 자유도를 가진다. 빌딩 전체가 138개의 절점으로 이루어져 있으므로 총 자유도는 414개이다.

구조물의 감쇠 행렬은 Rayleigh 행렬로 가정하며 강한 지진 하중을 받는 동안 구조물은 비선형 거동을 한다. 이러한 비선형 거동은 그림 3.1.7.7 과 같이 Bilinear 이력 현상 모델로 표현한다.

빌딩 구조물에 가하는 지진 하중은 El Centro 지진 (N-S component, 1940), Hachinohe 지진 (N-S component, 1968), Northridge 지진 (N-S component, 1994), Kobe 지진(N-S component, 1995)이며 1.0배의 강도 그대로 사용하였다.

구조물에 설치하는 전단 모드 자기유변유체 감쇠기의 각 변수들은 Yi (2000)등이 실험적으로 구한 값들을 사용하였다. 자기유변유체 감쇠기의 각 변수들은 표 4.3에 나타나 있다. 자기유변유체 감쇠기에 입력되는 전압의 최소값과 최대값은 각각 **0 V** 와 **10 V** 이다. 그리고 자기유변유체 감쇠기가 발현하는 제어력의 최대값은 **1000 kN** 이다. 제어 성능을 공정하게 평가하기 위하여 모든 경우에 있어서 자기유변유체 감쇠기를 동일하게 25개를 설치하였다. 왜냐하면 Yoshida 등 (2002)이 20층 비선형 벤치마크 빌딩에 자기유변유체 감쇠기를 1층에 4개, 2, 3층에 2개, 그리고 나머지 층에 1개씩, 총 25개의 감쇠기를 설치하였기 때문이다. 그리고 그리고 제어

모드나 최적위치 결정지수를 다르게 하면서 구한 최적위치의 제어 성능을 비교할 때 Yoshida 등의 논문에서 사용한 위치의 성능과 함께 비교하였다.

제어성능을 평가하는 평가지수는 식 3.1.7.3부터 식 3.1.7.5에서 나타낸 세 가지를 사용한다. J1은 빌딩 전체의 최대 층간 변위를, J2는 최대 절대가속도를, J3는 최대 바닥 전단력을 나타내는 지수이다.

$$J_1 = \max\left\{\frac{\max_{t,i}\left|d_i(t)\right|/h_i}{\delta^{\max}}\right\} \tag{3.1.7.6}$$

$$J_2 = \max\left\{\frac{\max_{t,i}\left|\ddot{x}_{ai}(t)\right|}{\ddot{x}_a^{\max}}\right\} \tag{3.1.7.7}$$

$$J_3 = \max\left\{\frac{\max_{t}\left|\sum_i m_i \ddot{x}_{ai}(t)\right|}{F_b^{\max}}\right\} \tag{3.1.7.8}$$

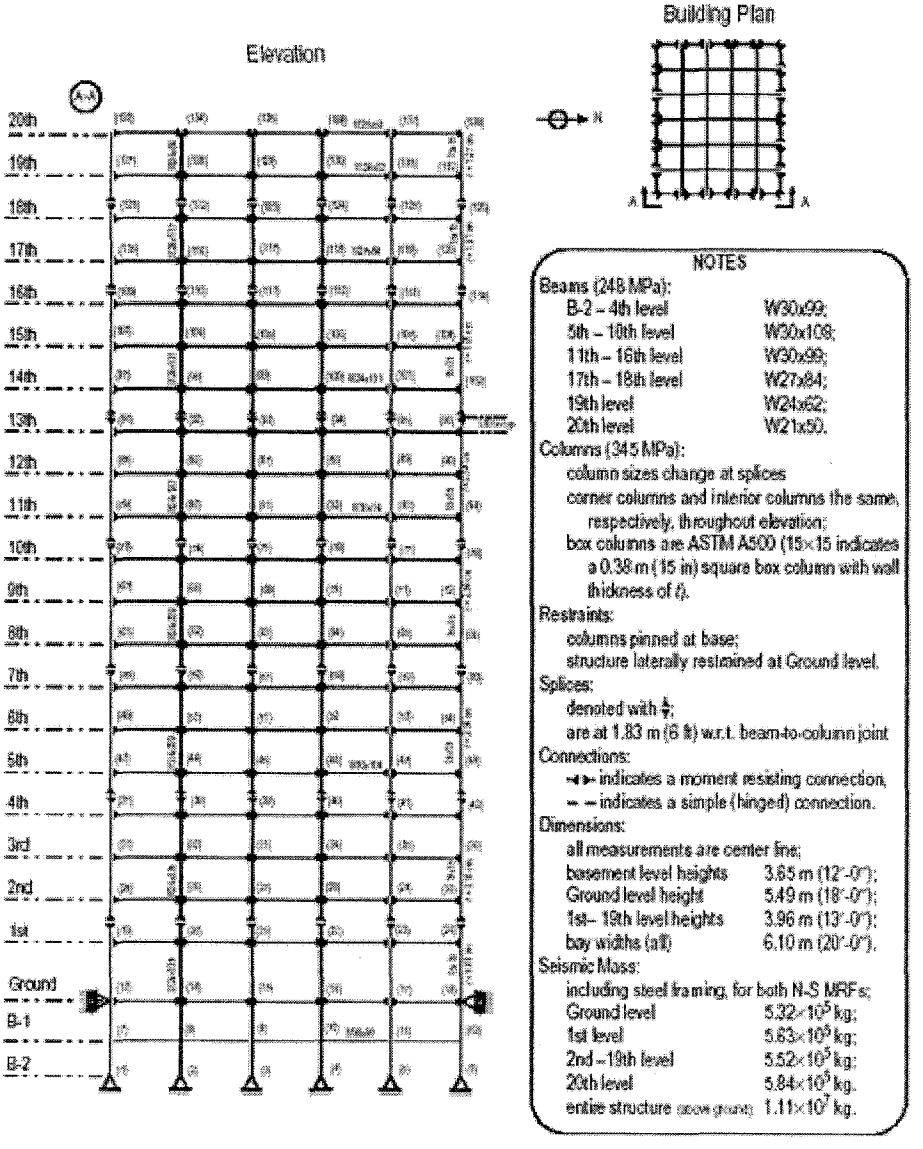


그림 3.1.7.1 20층 비선형 벤치마크 빌딩 모델 (Ohtori 등, 2000)

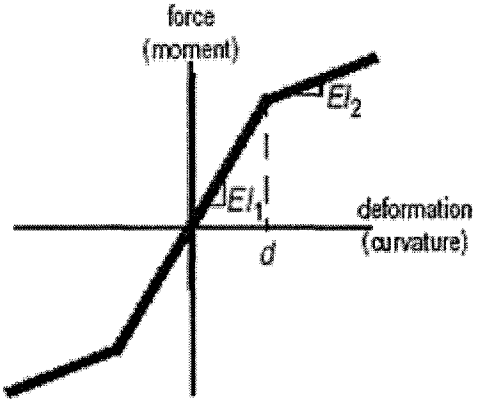


그림 3.1.7.2 20층 벤치마크 비선형 빌딩의 Bilinear 이력현상 모델

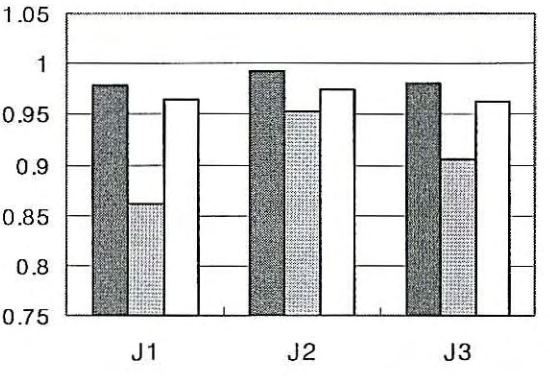
표 3.1.7.1 자기유변유체 감쇠기 모델의 변수들

Parameter	Value	Parameter	Value
c_{0a}	**4.40 N · sec/cm**	α_a	**1.0872×10^5 N/cm**
c_{0b}	**44.0 N · sec/cm · V**	α_b	**4.9616×10^5 N/cm · V**
γ	**3 cm^{-2}**	β	**3 cm^{-1}**
A	**1.2**	n	**1**
η	**50 sec^{-1}**		

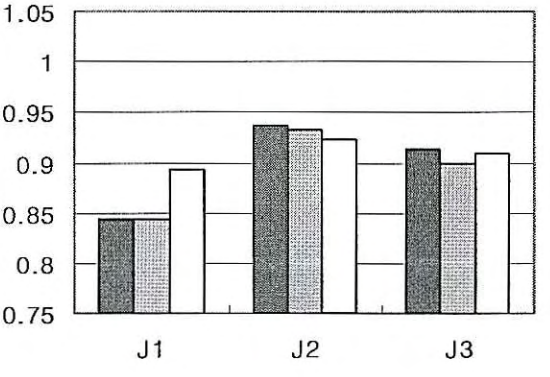
먼저 Passive-off 제어를 하면서자기유변유체 감쇠기의 최적위치를 결정하였다. 최적위치 결정 지수는 α_1을 1과 0으로, 즉 각 층의 최대 층간 변위과 최대 층간 상대속도 중 하나만을 사용하였다. El Centro 지진의 경우에는 α_1이 1이라면 1층에만, α_1이 0이라면 20층에만 25개의 자기유변유체 감쇠기가 모두 설치된다. Kobe 지진의경우에는 α_1이 1이라면 19층에만, α_1이 0이라면 20층에만 25개 모두 설치된다. 다른 지진의 경우도 마찬가지로 특정한 한 층에만 25개의 감쇠기가 모두 설치된다. 왜냐하면 Passive-off로 제어할 경우 자기유변유체 감쇠기 하나만의 제어성능이 무척 작기 때문이다.

그림 3.1.7.3을 보면 α_1이 0인 경우최적위치가 Yoshida 등 (2002)의 논문의 위치보다 제어 성능이 좋다. 하지만 위의 결과대로 한 층에만 25개의 자기유변유체 감쇠기를 모두 설치할 수는 없다. 그러므로 제안된 방법으로 최적위치를 결정하는 동안 Passive-off로 입력전압을 결정하는 것은 부적절하다.

다음은 Passive-on 제어 하에서 각 층의 최대 절대가속도만을 최적위치 결정 지수로 제안하여 자기유변유체 감쇠기의 최적위치를 결정하였다. 표 3.1.7.2 에서 숫자의 배열은 자기유변유체 감쇠기를 설치하는 층의 순서를 말하며 그림 3.1.7.4 는 자기유변유체 감쇠기의 개수가 증가할 때 평가지수의 변화를 나타낸다. El Centro 지진과 Kobe 지진 모두 결국 자기유변유체 감쇠기가 특정한 층에만 설치된다. 왜냐하면 가속도가 큰 층에 감쇠기를 설치하면 오히려 그 층의 가속도는 더욱 커지고, 결국 그 층의 가속도가 계속 최대가 되기 때문이다. 그림 3.1.7.5 에서 보듯이 처음에는 평가지수의 값들이 줄어들다가 한 층에 감쇠기가 계속 설치되면서 모두 증가한다. 따라서 제안된 최적위치 결정 방법에서 각 층의 최대 절대가속도를 최적위치 결정지수로 사용하는 것은 부적절하다.



(a) El Centro earthquake(1940)



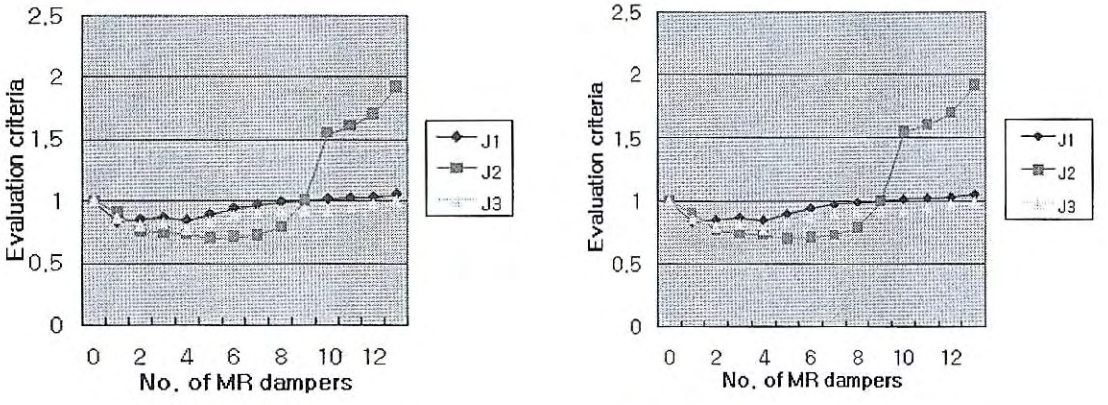
(b) Kobe earthquake (1995)

그림 3.1.7.3 Passive-off 제어로 구한 최적위치의 성능 비교

($\alpha_1 = 1.0$, $\alpha_1 = 0$, Yoshida 등 (2000, 2002))

표 3.1.7.2 Passive-on 제어 하에서 각 층의 최대 절대가속도를 지수로 사용할 경우 감쇠기의 최적위치

	자기유변유체 감쇠기의 최적위치
El Centro	20 20 20 14 14 14 14 14 14 14 14 13 13 13 1 3…
Kobe	12 12 12 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 1 1…



(a) El Centroearthquake(1940) (b) Kobe earthquake (1995)

그림 3.1.7.4 감쇠기의 개수가 증가할 때 평가지수의 변화
(Passive-on 제어, 각 층의 최대 절대가속도 지수 사용)

개선된 최적위치 결정지수인 식 (3.1.7.2)를 사용하여 최적위치를 구하였다. 최적위치를 구하는 동안 입력전압의 크기는 Passive-on으로 하였다. 그림 3.1.7.5부터 그림 3.1.7.8 까지는 네 가지 지진에 대해 α_1 의 값을 다르게 한 최적위치 결정지수를 사용하여 구한 자기유변유체 감쇠기의 최적위치의 결과이다.

최대 절대가속도가 작은 El Centro 지진과 Hachinohe 지진의 경우, 1층에 좀 더 많은 자기유변유체 감쇠기가 설치되고 나머지 층에는 골고루 설치된다. 최대 절대가속도가 큰 Northridge 지진과 Kobe 지진의 경우, 하부 층들과 상부 층들에 더 많은 자기유변유체 감쇠기가 설치되며 가운데 층들에는 그 만큼 적게 설치된다.

최적위치를 구하기 위해 사용한 최적위치 결정지수의 α_1 값이 다르더라도 최적

위치의 결과는 비슷하다. 다만 α_1 이 0으로 갈수록 상부 층들에 좀 더 많이 설치되는 경향을 보인다.

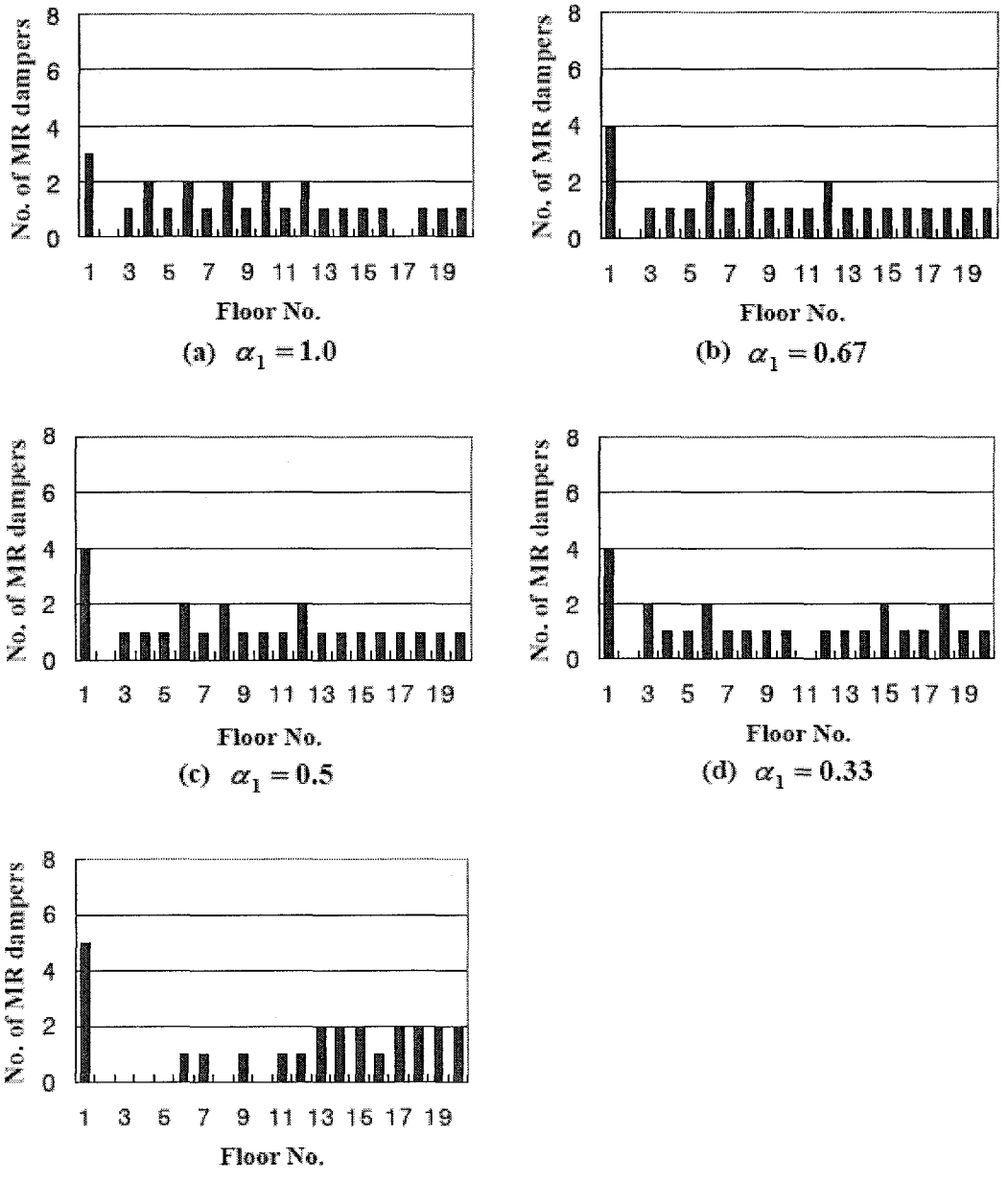


그림 3.1.7.5 Passive-on 제어로 구한최적위치 (El Centro 지진, 1940)

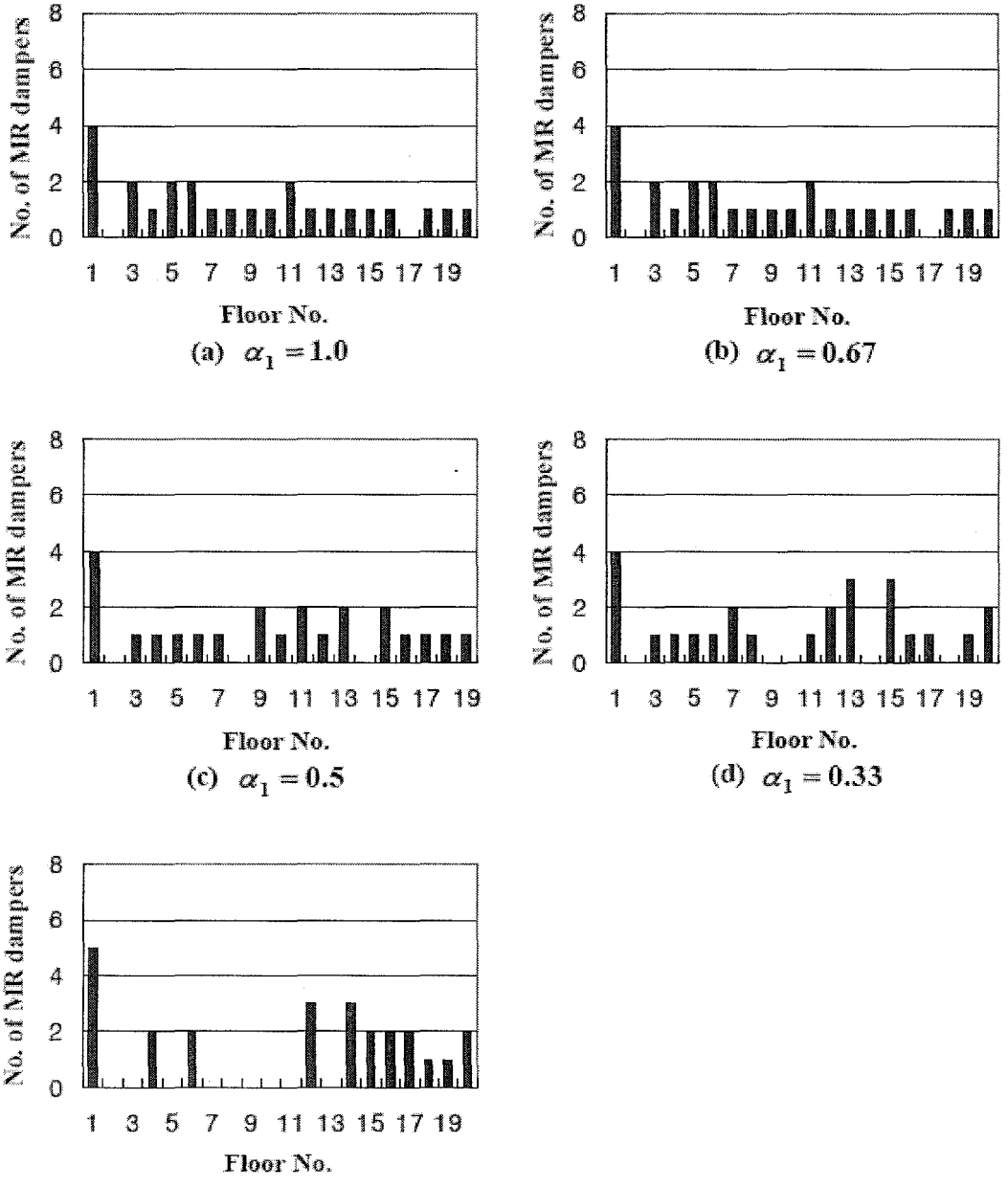


그림 3.1.7.6 Passive-on 제어로 구한최적위치 (Hachinohe 지진, 1968)

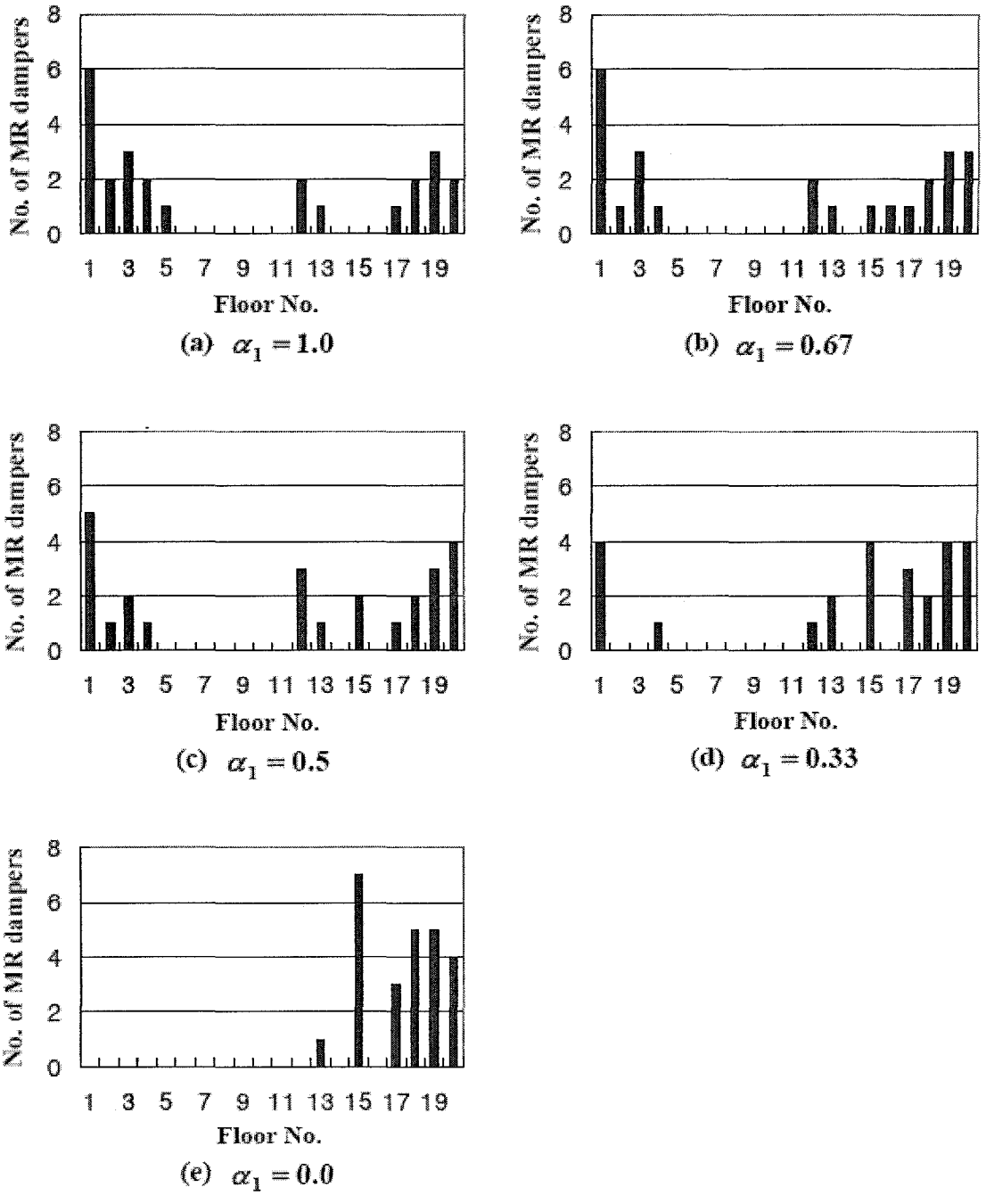


그림 3.1.7.7 Passive-on 제어로 구한최적위치 (Northridge 지진, 1994)

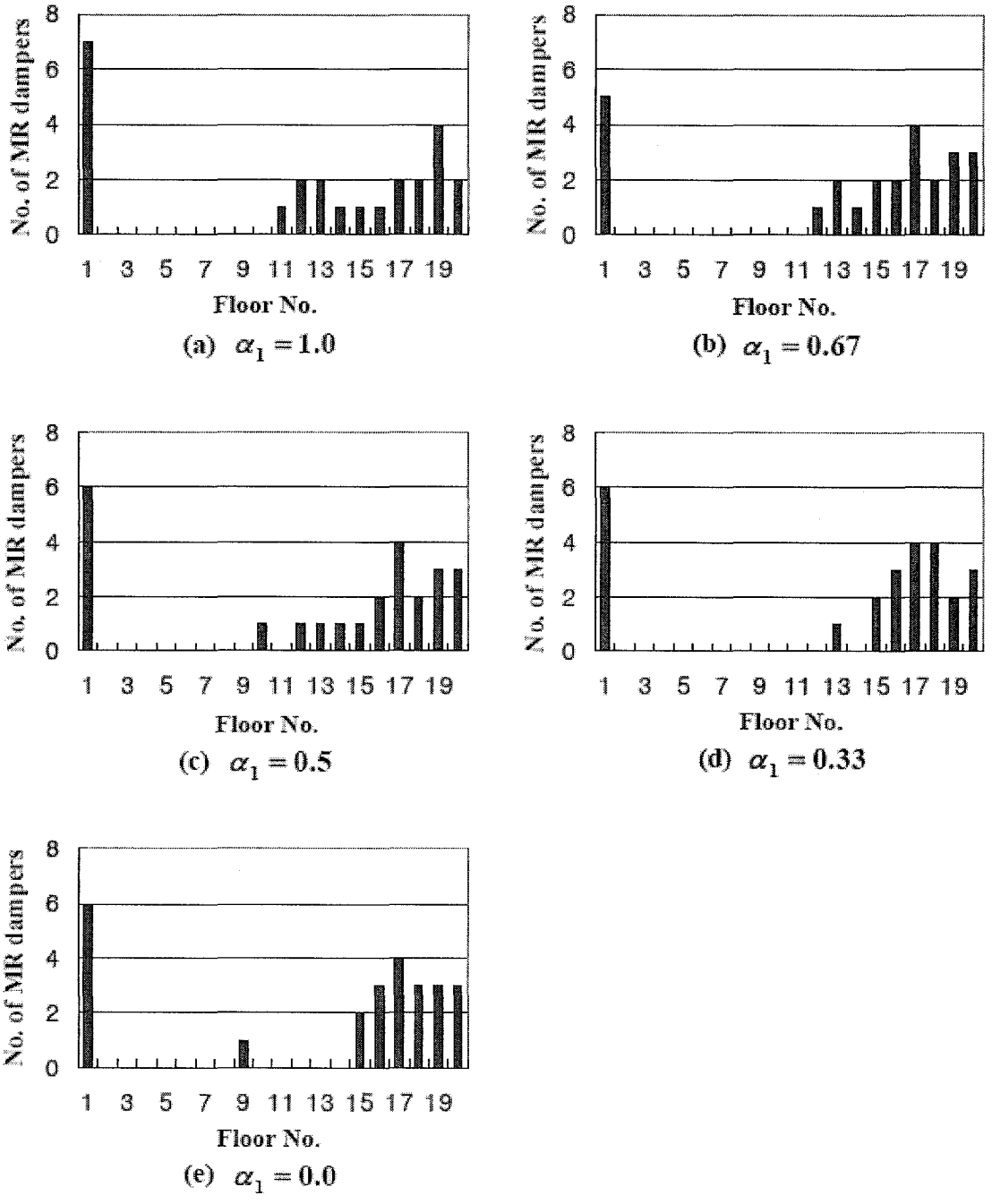


그림 3.1.7.8 Passive-on 제어로 구한 최적위치 (Kobe 지진, 1995)

1.7.3. 소결

본 연구에서는 자기유변유체 감쇠기를 위한 간단하고 순차적인 최적위치 결정 방법을 제시하였으며, 이 결과는 기존 연구성과를 인용한 것이다 (장종우, 2004). 새로운 기법에서는 기존 Zhang (2002)등이 제안한 선형점성 감쇠기의 최적위치 결정지수를 개선하였다. 그런 다음 자기유변유체 감쇠기를 하나씩 설치할 때마다 모든 층에 대해 최적위치 결정지수를 구하고 최대값을 갖는 층에 다음 감쇠기를 순차적으로 설치하였다. 자기유변유체 감쇠기의 최적위치를 구하는 동안 입력전압을 수동모드인 Passive-on/off 방법으로 결정하였다.

최적위치 결정지수를 위해 각 층의 최대 층간 변위, 최대 층간 상대속도와 최대 절대 가속도를 고려하였다. 그러나 각 층의 최대 절대가속도는 최적위치 결정지수로서 부적절하다. 왜냐하면 가속도가 큰 층에 자기유변유체 감쇠기를 설치하면 그 층의 가속도가 오히려 커지므로, 제어 성능에 역효과를 주기 때문이다. 그래서 각 층의 최대 층간 변위와 층간 상대속도에만 가중치를 곱하여 개선된 최적위치 결정지수를 제안하였다. 최적위치 결정지수에서 α_1 의 값을 다르게 하여도 자기유변유체 감쇠기의 최적위치는 비슷하다.

마지막으로, 서로 다른 지진의 강도가 자기유변유체 감쇠기의 최적위치에 미치는 영향을 확인하였다. 이를 위해 네 가지 지진의 최대 절대 가속도를 약진인 Hachinohe 지진과 강진인 Kobe 지진과 동일하게 맞춘 후, 자기유변유체감쇠기의 최적위치를 구하였다. 이렇게 구한 자기유변유체 감쇠기의 최적위치가 네 지진의 경우 모두 비슷하였다. 어떤 지역의 역사 지진의 자료나 지반의 특성 등을 안다면 그 지역에서 발생하는 지진의 강도를 예상할 수 있다. 나아가 그 지역의 빌딩에 설치할 자기유변유체 감쇠기의 최적위치를 비교적 명확하게 구할 수 있다.

2 절. 수치모의실험을 통한 신개념 스마트 제진 장치의 제진 성능 평가

2.1. 면진 건물 수치해석

2.1.1. 개요

면진 시스템 (base isolation system)은 건물 및 교량의 내진 대책으로 가장 널리 사용되고 있는 방법이다. 건물에 대해서는 면진 시스템이 저층부터 중층까지 (대체적으로 8층까지) 건물에 매우 효과적인 대책으로 알려져 있다. 일반적으로 상부구조와 기초 사이에 면진 장치를 설치하여 지진 하중이 상부구조로 전달되지 않도록 한다. 그 기본 개념은 아래 그림을 통해 간단히 파악할 수 있다.

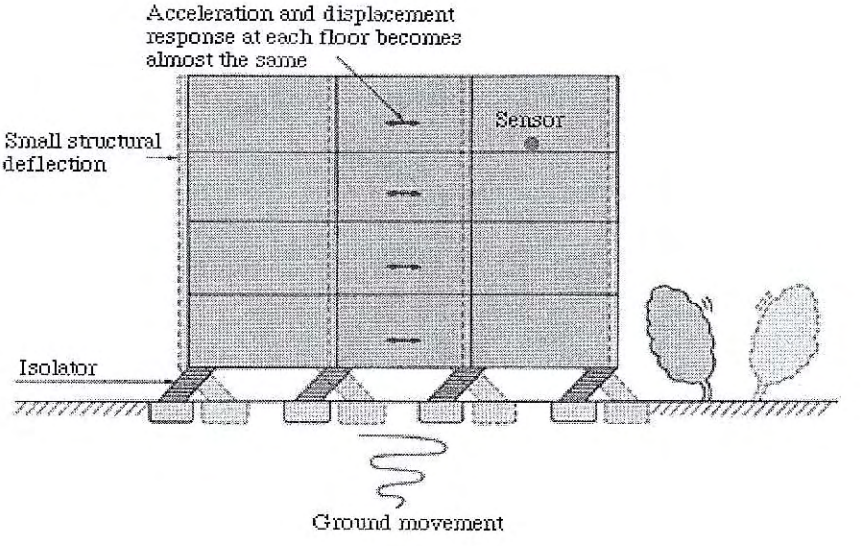
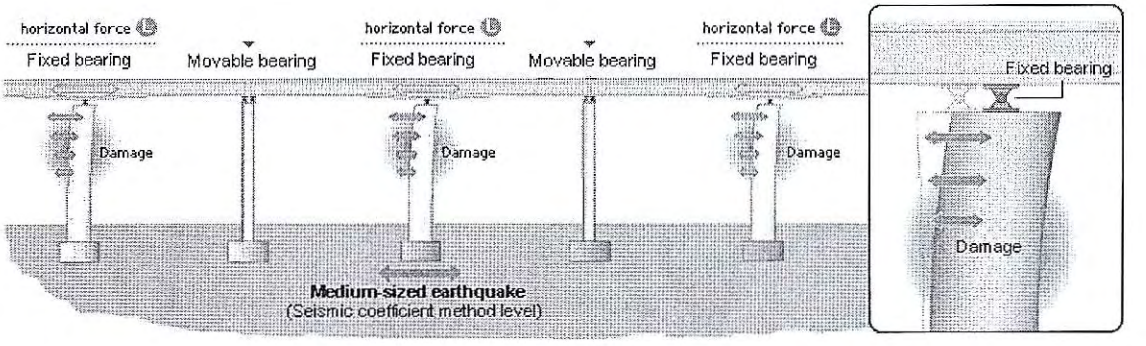
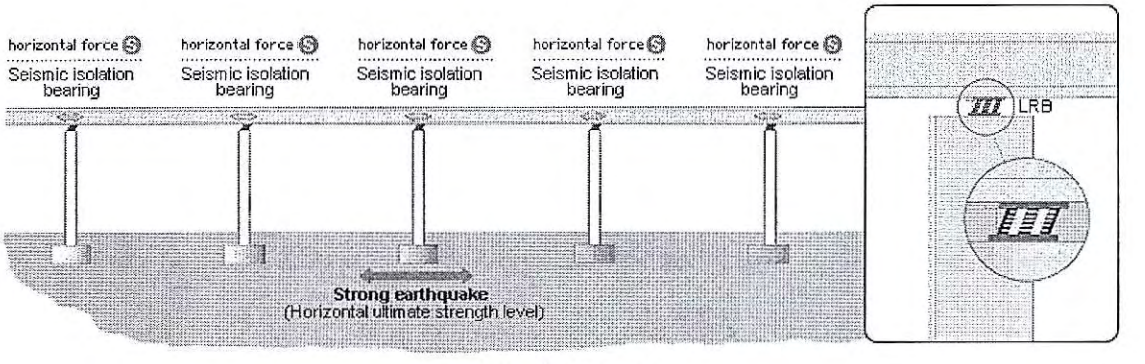


그림 3.2.1.1 면진 건물의 개념도

교량에 대해서도 내진 성능을 향상하기 위해 면진 시스템을 많이 사용하고 있다. 교량의 경우에는 상부구조와 교대 및 교각 상부 사이에 면진 장치를 설치하여 상부구조의 질량에 의해 발생되는 관성력을 교각에 전달하지 않도록 하여 교각을 보호하는 역할을 한다. 이에 대한 기본 개념은 그림 3.2.1.2에 비면진 교량과 비교하여 보여주고 있다.



(a) 비면진 교량



(b) 면진 교량

그림 3.2.1.2 면진 교량의 개념도

하지만, 면진 시스템을 통해 기존 건물 및 교량의 응답을 상당히 감소시킬 수 있다 하더라도, 면진 장치가 설치되어 있는 부분의 변위가 과도하게 커지는 문제점이 발생한다. 이러한 변위를 감소시키기 위해 면진장치에 추가적으로 감쇠기를 설치해 감쇠를 키우는 방법이 적용되기도 하지만, 이로 인해 상부구조의 가속도 응답 및 층간 변위가 많이 증가하게 되는 단점도 유발한다.

이러한 문제점을 해결하기 위한 방안으로 복합제어 기법이 최근 들어 연구되고 있다. 복합제어란, 수동제어 방법인 면진 장치에 능동 또는 반능동제어 방법인 유압식 가력기 또는 MR 감쇠기를 같이 설치하는 것이다. 이러한 방법은 단순히 면진 장치에 수동형 감쇠기를 설치한 것보다 성능이 우수한 것으로 알려져 있다.

특히, MR 감쇠기와 같은 반능동 제진 장치는 지진 발생 시의 신뢰성 및 다양한 지진 하중에 대한 적응성, 낮은 전력 요구량 등의 장점 때문에 최근 들어 수요가 늘어나고 있다. 하지만, 앞에서 설명한 바와 같이 기존 MR 감쇠기가 가지고 있는

문제점이 있기 때문에 이러한 문제를 해결하는 방안으로, 기존 MR 감쇠기 대신에 신개념 스마트 제진 장치를 이용하여 면진 건물 및 교량에 대한 내진 성능을 향상하는 것을 목적으로 본 연구를 수행하게 되었다.

2.1.2. 면진 건물에 대한 수치해석

(1) 해석 모델

본 연구에서 대상으로 하고 있는 면진 건물은 그림 3.2.1.3과 같은 8층 건물이다. 높이는 82.4 m이고 폭은 54.3 m이다. 미국 California주의 Los Angeles에 위치한 건물과 유사한 형태이다.

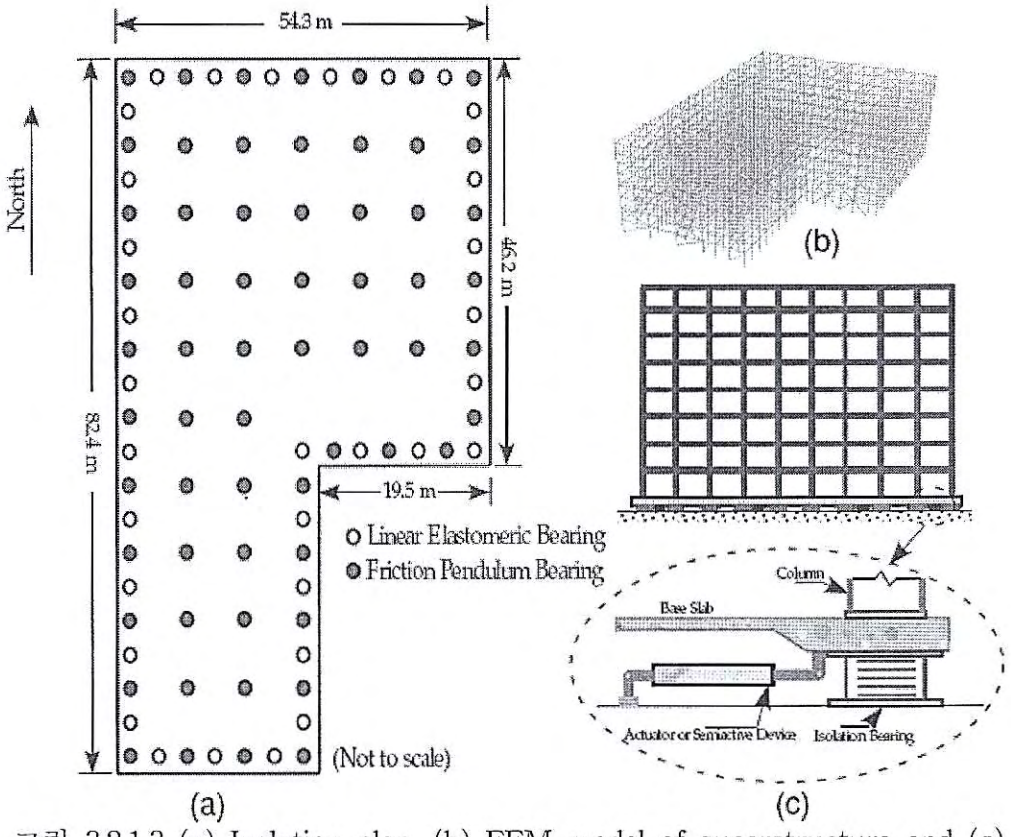


그림 3.2.1.3 (a) Isolation plan, (b) FEM model of superstructure and (c) Elevation view with device

본 연구에서는 92개의 저감쇠 면진 장치가 상요된 선형 면진 시스템을 고려하였다. 여기서 고려한 면진 장치의 개략도 및 힘-변위 관계 그래프는 그림 3.2.1.4에 나타내었다.

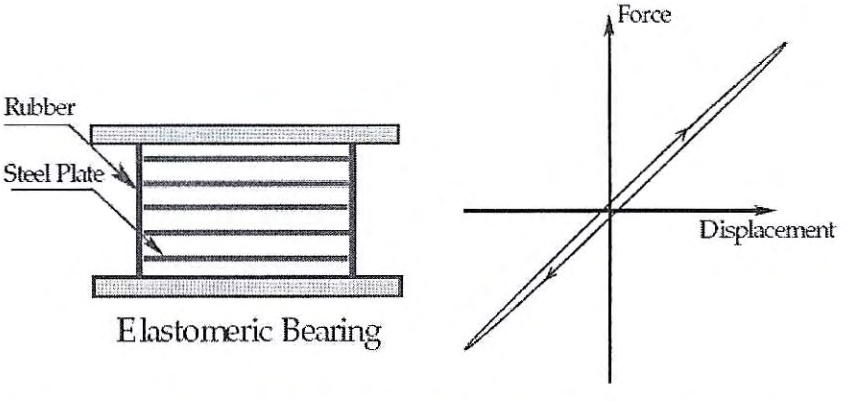


그림 3.2.1.4. 저감쇠 면진장치의 개략도 및 힘-변위 관계 그래프

(2) 지진 하중

본 연구에서는 고려한 지진 하중은 총 7개의 역사지진 기록이다. 즉, Newhall, Sylmar, El Centro, Rinal야, Kobe, Ji-ji, Erzinakn 지진에서의 지반 가속도를 입력으로 고려하였으며, 그림 3.2.1.5에 각각의 가속도 시간이력곡선을 나타내었다.

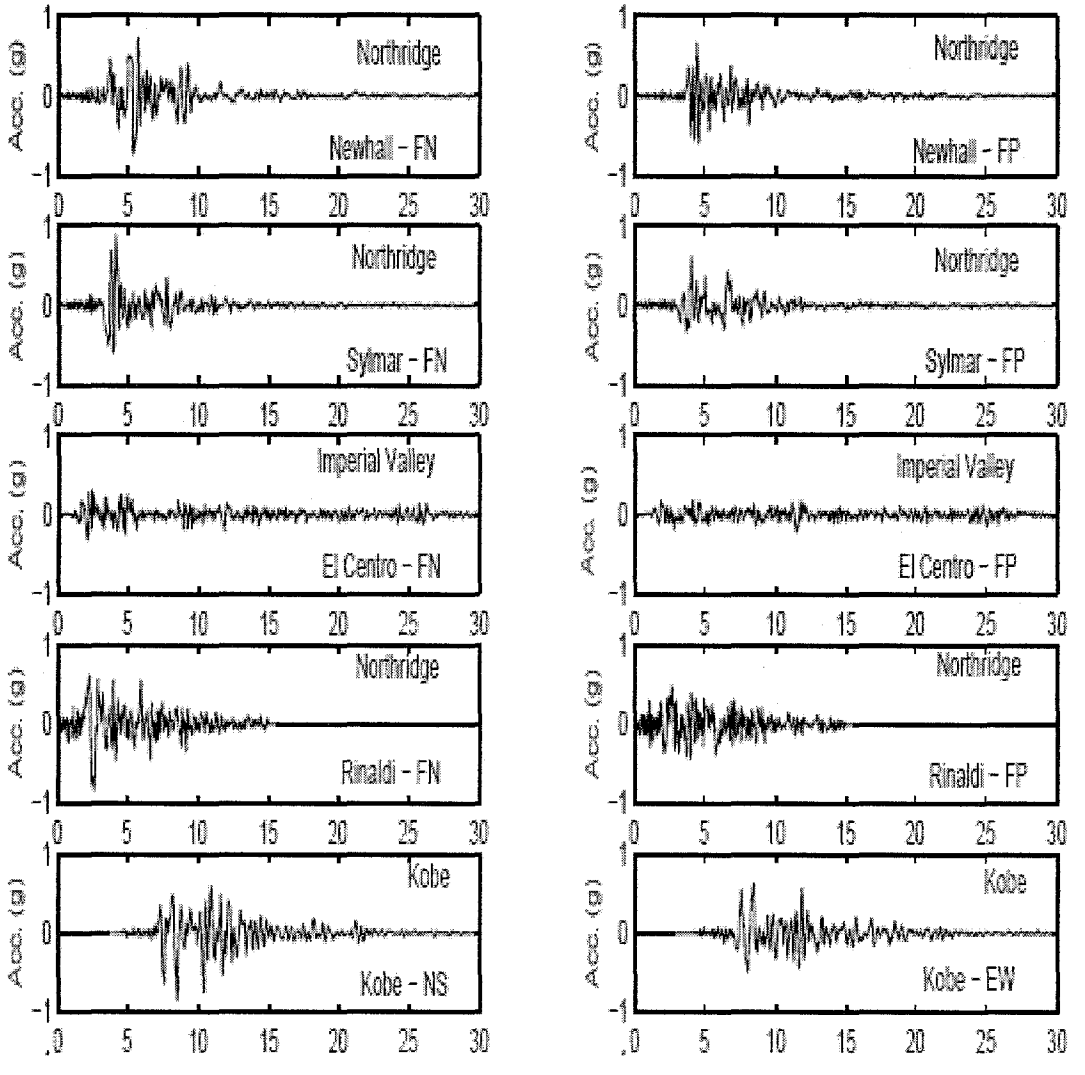


그림 3.2.1.5. 지진하중의 가속도 시간이력곡선

(3) 성능 평가 기준

본 연구에서 제진 시스템의 내진 성능을 평가하기 위해 고려한 기준은 다음과 같다. 먼저 건물의 최대값에 대한 응답 5가지 (기초 전단력, 구조물 전단력, 기초 변위(또는 면진장치 변형), 층간 변위, 절대 층가속도)를 비교 평가한다. 여기서 각 응답들은 비제어시의 값으로 정규화 되어 있다. 또한, 건물의 응답의 평균치를 비교 평가하기 위해 RMS 응답 2가지 (기초 변위 및 절대 층가속도)를 비교한다. 마지막으로 제진 장치로 인해 소산되는 총에너지량을 비교한다. 구체적인 각각의 성능 평가 기준은 아래에 소개되어 있다.

(가) Peak base shear

$$J_1(q) = \frac{\max_t \|V_0(t,q)\|}{\max_t \left\|\hat{V}_0(t,q)\right\|}$$

(나) Peak structure shear

$$J_2(q) = \frac{\max_t \|V_1(t,q)\|}{\max_t \left\|\hat{V}_1(t,q)\right\|}$$

(다) Peak base displacement or Isolator Deformation

$$J_3(q) = \frac{\max_{t,i} \|d_i(t,q)\|}{\max_{t,i} \left\|\hat{d}_i(t,q)\right\|}$$

(라) Peak inter-story drift

$$J_4(q) = \frac{\max_{t,f} \|d_f(t,q)\|}{\max_{t,f} \left\|\hat{d}_f(t,q)\right\|}$$

(마) Peak absolute floor acceleration

$$J_5(q) = \frac{\max_{t,f} \|a_f(t,q)\|}{\max_{t,f} \|\hat{a}_f(t,q)\|}$$

(바) Peak force

$$J_6(q) = \frac{\max_t \left\| \sum_k F_k(t,q) \right\|}{\max_t \|V_0(t,q)\|}$$

(사) RMS base displacement

$$J_7(q) = \frac{\max_t \|\sigma_d(t,q)\|}{\max_t \|\sigma_{\hat{d}}(t,q)\|}$$

(아) RMS absolute floor acceleration

$$J_8(q) = \frac{\max_f \|\sigma_a(t,q)\|}{\max_f \|\sigma_{\hat{a}}(t,q)\|}$$

(자) Total absorbed Energy

$$J_9(q) = \frac{\sum_k \left[\int_0^{T_q} F_k(t,q) v_k(t,q) dt \right]}{\int_0^{T_q} \left\langle V_0(t,q) \dot{U}_g(t,q) \right\rangle dt}$$

여기서, i는 Isolator 개수, k는 Device 개수, f는 층수, q는 지진, t는 시간을 나타낸다.

(4) 신개념 스마트 제진 시스템

아래 그림 3.2.1.6은 기존에 사용되어 왔던 MR 감쇠기-기반 스마트 제진 시스템에 대한 MATLAB의 SIMULINK Block을 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이, 기존 시스템에서는 계측기 (Sensors)가 필요하고 Controllers(컴퓨터)가 필요하다.

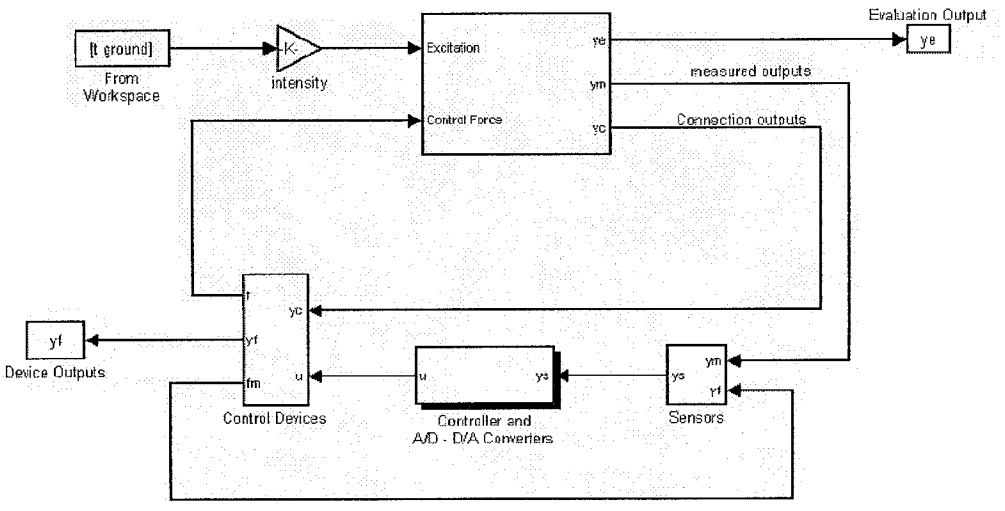


그림 3.2.1.6. 기존 스마트 제진 시스템의 SIMULINK Block

본 연구에서는 앞에서 설명한 바와 같은 전자기유도(Electromagnetic Induction, EMI) 시스템을 도입한 신개념 스마트 제진 장치를 고려하였다.

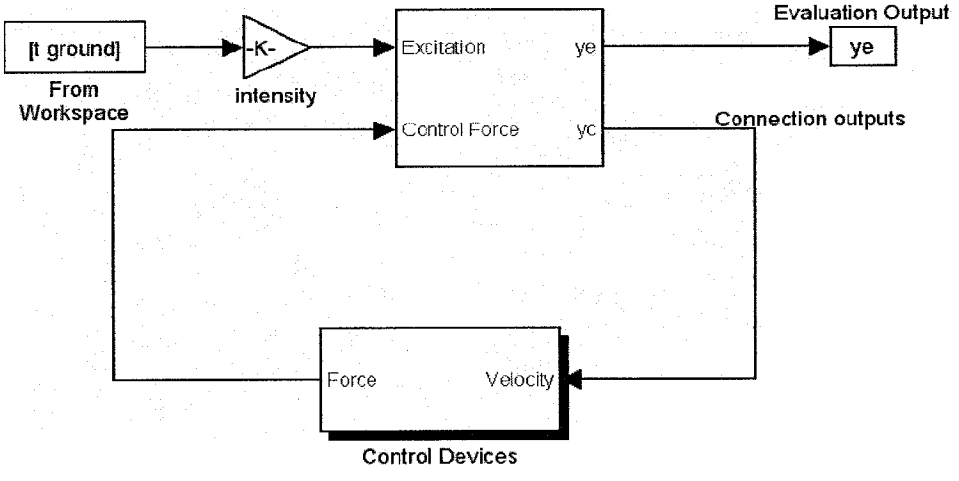


그림 3.2.1.7. 신개념 스마트 제진 시스템의 SIMUKINK Block

위 그림에서 알 수 있듯이 신개념 스마트 제진 시스템에서는 계측기 및 제어기가 필요 없이 단순히 감쇠기가 설치된 위치에서의 속도에 의해 MR 감쇠기에 입력으

로 들어가는 전압값이 달라지는 매커니즘을 가지고 있다. 이 경우의 SIMULINK Block은 그림 3.2.1.7와 같이 단순화된다.

간략하게 신개념 스마트 제진 시스템의 거동 매커니즘을 설명하면 다음고 같다.먼저, 식 (3.2.1.1)과 같은 패러데이의 전자기 유도 법칙을 따라서 EMI 시스템에 유도 기전력이 발생한다.

$$u_a = -N\frac{d\Phi_B}{dt} = -N \cdot B\frac{dA}{dt} \qquad (3.2.1.1)$$

이때 u_a 는 유도 기전력, N 은 코일이 감긴 횟수, Φ_B 는 Magnetic Flux, B 는 자기장의 세기, A 는 자기장 내부에 위치한 코일의 면적이다. 따라서 EMI 시스템에서 생성되는 전기에너지는 영구자석의 세기 그리고 솔레노이드 코일의 감긴 횟수와 코일의 크기 등을 통하여 조절할 수 있고, MR 감쇠기가 설치된 지점의 구조물의 변형 속도에 비례하여 MR 감쇠기의 점성을 증가시킨다.

패러데이의 법칙에 따라 유도되는 기전력은 식 (3.2.1.2)와 같이 코일의 감긴 횟수가 자기장 세기에 비례한다. 이 두 값은 임의로 변화시킬 수 있으므로 감긴 횟수와 자기장의 세기의 곱을 K_{emf} 로 지정하여 K_{emf}를 변화시킴으로써 EMI 시스템의 성능을 변화시킨다.

$$u_a = -N\frac{d\Phi_B}{dt} = -N \cdot B\frac{dA}{dt} = -N \cdot B \cdot w\frac{dx}{dt} = -K_{emf}\frac{dx}{dt} \qquad (3.2.1.2)$$

신개념 스마트 제진 시스템의 내진 성능을 알아보기 위해 K_{emf}의 값을 변화시켜 수치해석을 하여 기존 스마트 제진 시스템의 결과와 비교하고자 한다.

본 연구에서 고려한 MR 감쇠기 모델 및 힘-변위 관계 그래프는 그림 3.2.1.8에 나타내었다.

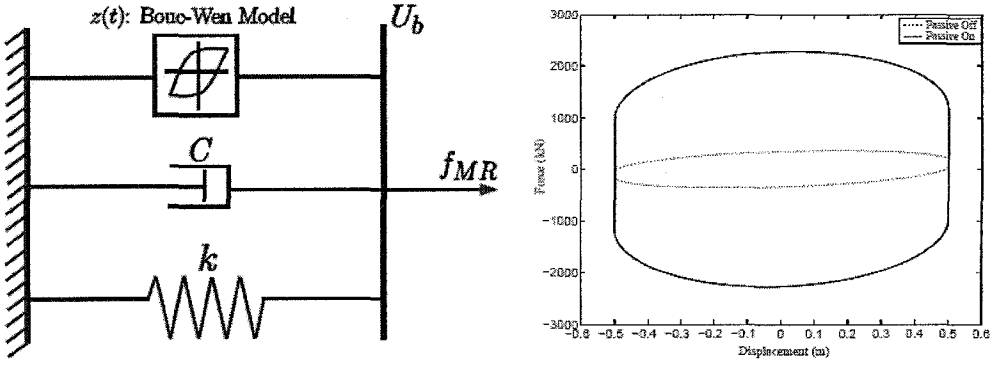


그림 3.2.1.8. MR 감쇠기 모델 및 힘-변위 관계 그래프

(5) 수치해석 결과

먼저 가장 대표적인 역사 지진이라 할 수 있는 El Centro 지진 만을 가지고 수치해석을 수행하였으나, 이 경우 최대 전단력 및 중앙부분의 변위는 감소하였지만 최대 가속도는 증가하는 것을 볼 수 있었다. 따라서, 개별적인 지진에 대한 검토 보다는 모든 지진에 대한 내진 성능을 전체적으로 수행하는 것이 보다 유용하다고 판단되어 그로 인해 어느 하나의 지진하중만을 가지고 성능평가를 하기에는 부족함을 느꼈기에 7개의 지진하중을 모두 고려하여 수치해석을 하였다.

수치해석 결과는 그림 3.2.1.9에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 K_{emf}값이 커짐에 따라 내진 성능이 향상되는 것을 볼 수 있다. 하지만 K_{emf}값이 0.8에 다다르자 가속도가 30% 정도 증가하는 것을 볼 수 있다.

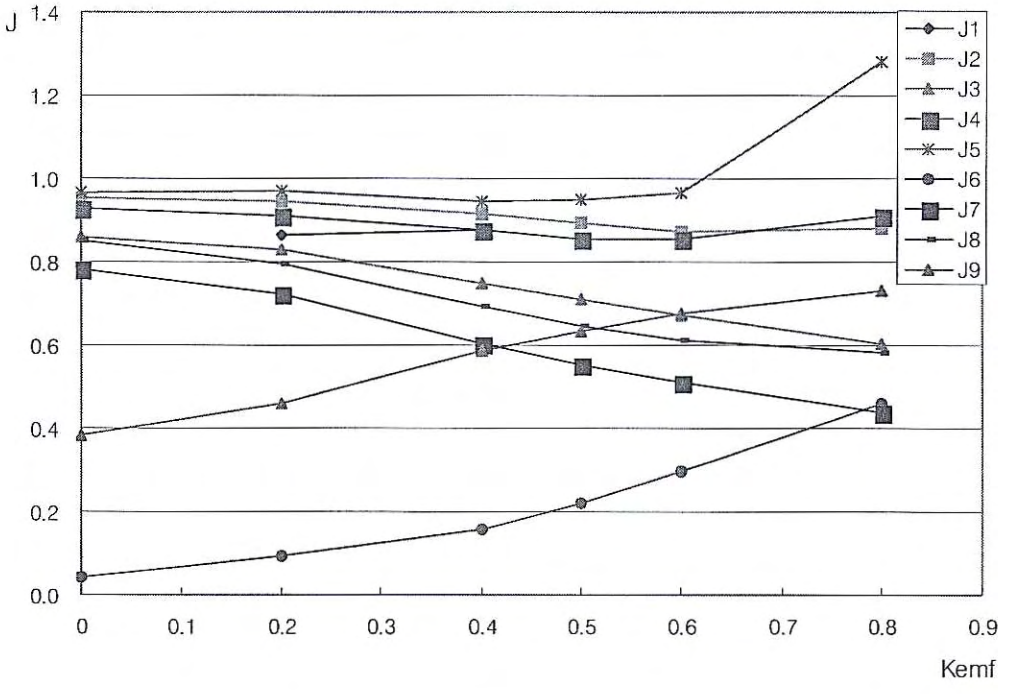


그림 3.2.1.9. K_{emf}값의 변화에 따른 J값과의 관계

앞에서 모델링한 최적의 신개념 스마트 제진 시스템의 내진 성능을 기존의 MR 감쇠기-기반 스마트 제진 시스템의 결과와 비교 평가하기 위하여 같은 면진 건물에 대하여 각각 수치해석을 수행하였다. 기존 스마트 제진 시스템은 Jansen 등(2000)에 의하여 효율적이라고 평가된 Clipped-optimal 제어 알고리즘을 사용하였다.

표 3.2.1.1 기존 스마트 제진 시스템(Clipped-optimal)의 수치해석 결과

성능 평가 기준	Newhall	Sylmar	El Centro	Rinaldi	Kobe	Aver
J_1(Peak Base Shear)	0.8883	0.9896	**1.0148**	**1.0309**	0.8899	0.9627
J_2(Peak Str. Shear)	0.9035	0.9985	0.9864	**1.0038**	0.9023	0.9589
J_3(Peak Isolator Deformation)	0.7963	0.9534	0.8223	0.9682	0.7799	0.8640
J_4(Peak I.S Drift)	0.8668	**1.0107**	0.839	0.9891	0.8481	0.9107
J_5(Peak Absolute Acceleration)	0.9044	**1.0178**	0.8513	**1.0084**	0.9354	0.9435
J_6(Peak Force)	0.1408	0.1814	0.1125	0.1787	0.1205	0.1468
J_7(RMS Displacement)	0.6625	0.7406	0.7681	0.728	0.738	0.7274
J_8(RMS Acceleration)	0.7983	0.8864	0.7127	0.7438	0.6875	0.7657
J_9(Total Absorbed Energy)	0.4524	0.5167	0.4047	0.507	0.4231	0.4608

표 3.2.1.2. 신개념 스마트 제진 시스템(K_{emf}= 0.5)의 수치해석 결과

성능 평가 기준	Newhall	Sylmar	El Centro	Rinaldi	Kobe	Aver
J_1(Peak Base Shear)	0.878	0.8079	**1.0217**	0.9694	0.7826	0.8919
J_2(Peak Str. Shear)	0.8894	0.8214	**1.0038**	0.9606	0.7949	0.8940
J_3(Peak Isolator Deformation)	0.6959	0.8675	0.6506	0.7887	0.6688	0.7343
J_4(Peak I.S Drift)	0.8803	0.8632	0.9085	0.9314	0.8113	0.8789
J_5(Peak Absolute Acceleration)	0.9694	0.883	0.9676	0.9421	1.0624	0.9649
J_6(Peak Force)	0.2026	0.2464	0.1916	0.2118	0.1804	0.2066
J_7(RMS Displacement)	0.511	0.5519	0.555	0.5551	0.6019	0.5550
J_8(RMS Acceleration)	0.7406	0.6501	0.5974	0.6293	0.6633	0.6561
J_9(Total Absorbed Energy)	0.6461	0.6705	0.607	0.64	0.5874	0.6302

아래 그림 3.2.1.10은 신개념 스마트 제진 시스템의 내진 성능 평가 지수를 기존 스마트 제진 시스템의 결과와 비교한 그래프이다. 그림에서 알 수 있듯이, 신개념 스

마트 제진 시스템은 기존 스마트 제진 시스템 (Clipped-optimal 제어 알고리즘)보다 전반적으로 좀 더 나은 성능을 보이고 있다.

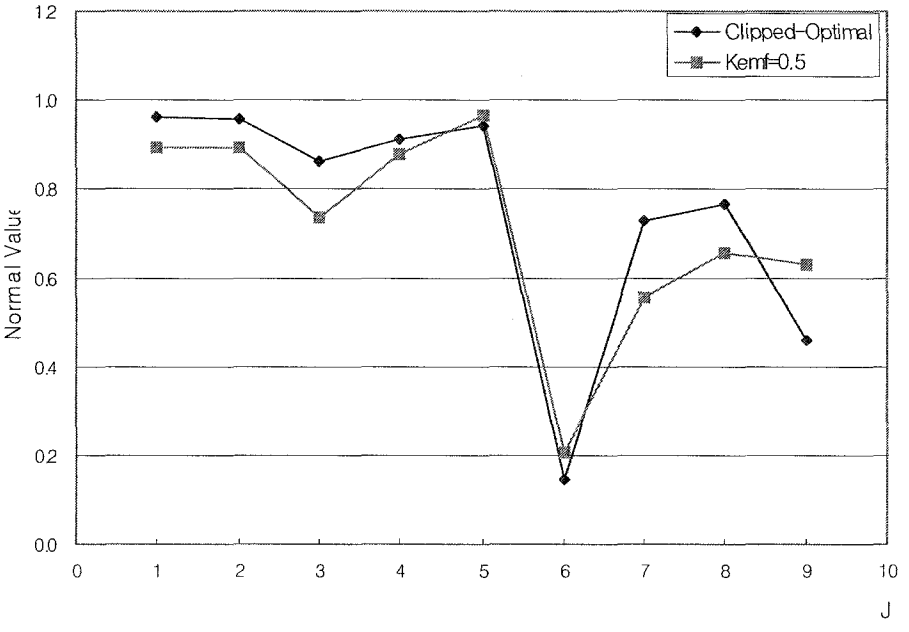


그림 3.2.1.10. 면진 건물에 대한 내진 성능 비교

2.2. 면진 교량에 대한 수치해석

2.2.1. 교량 해석 모델

신개념 스마트 제진 시스템의 면진 교량에 대한 내진 성능을 파악하기 위한 수치 해석을 수행하기 위해, 그림 3.2.2.1과 같은 미국 캘리포니아주에 위치하는 91/5 Highway Over-crossing 교량을 대상 구조물로 선정하였다.

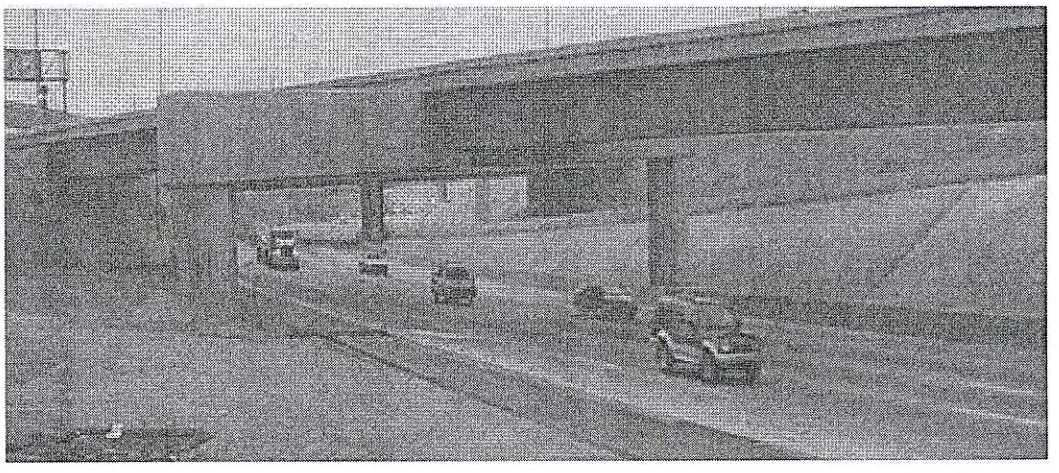


그림 3.2.2.1. Elevation and Plan Views

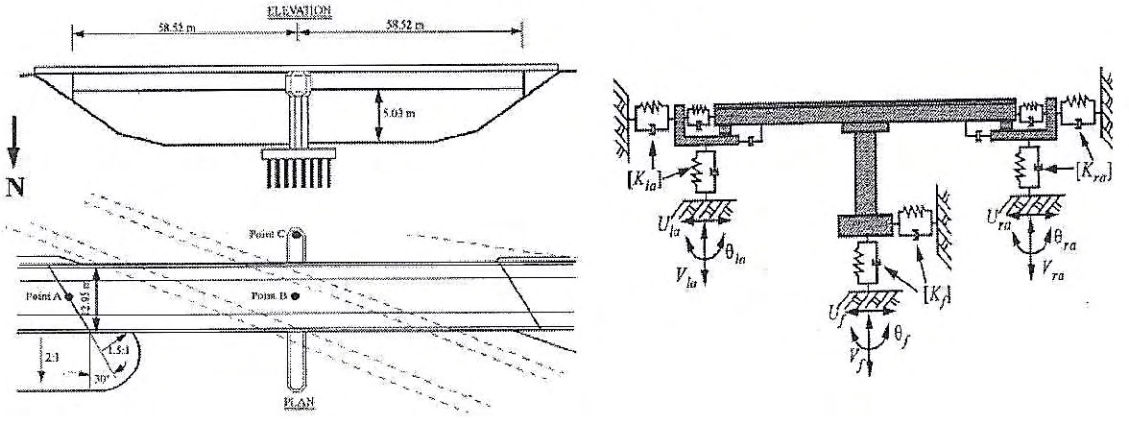


그림 3.2.2.2. Elevation View of Idealized Model

해석 모델의 총 절점수는 108개, 보요소 70개, 스프링 24개, 감쇠 장치 27개, Rigid

link 4개로 구성되어 있다. 교대와 상판 사이에 총 8개의 면진 베어링이 위치하며 이 베어링 모델링은 ABAQUS에서 하였다. 그리고 면진 베어링의 수직방향으로의 강성은 무한대, 비틀림 및 휨 강성은 '0'으로 가정하였으며 질량 및 감쇠비는 무시하였다.

2.2.2. 지진 하중

수치해석을 위하여 제진 시스템이 설치된 면진 교량에 가해질 입력 지진 하중으로는 총 6개의 역사 지진 자료를 사용하였다. 사용된 6개의 지진은 North Palm Springs 지진 (1986), Chi-Chi 지진 (1999), ElCentro 지진 (1940), Northrige 지진 (1994), Turkey 지진 (1999), Kobe 지진 (1995) 이다. 각 지진의 시간 이력곡선은 그림 3.2.2.3에 나타내었다.

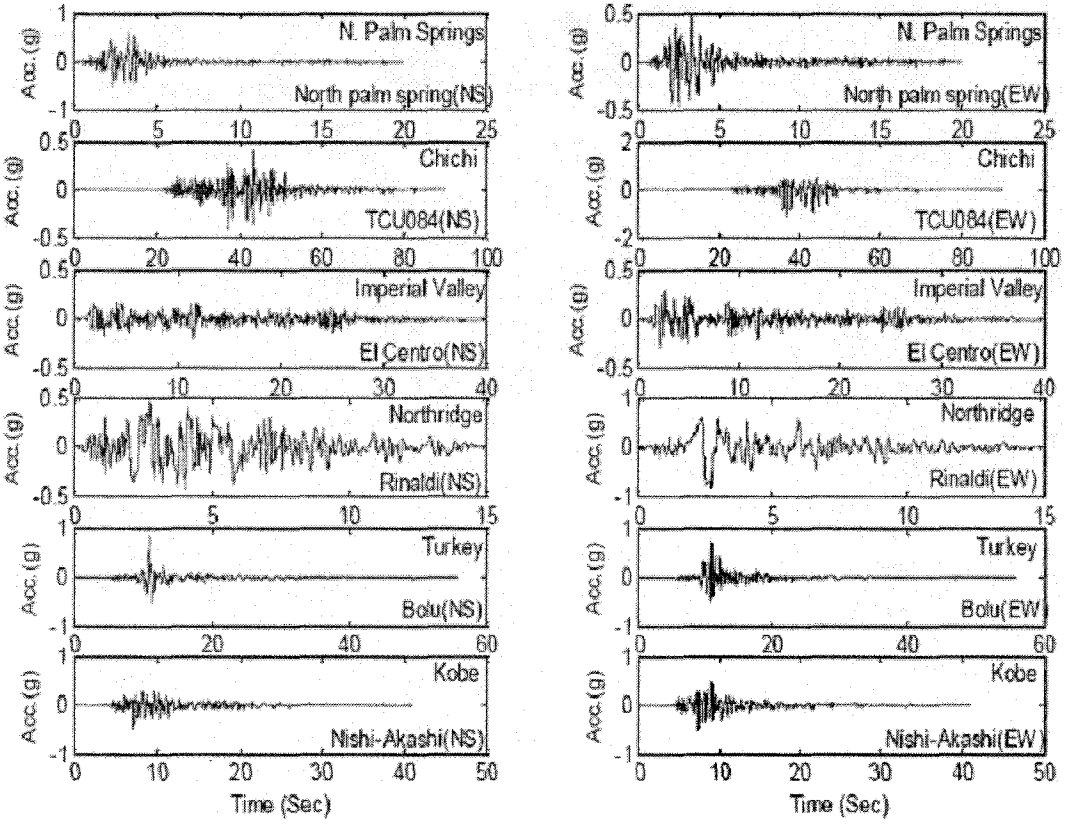


그림 3.2.2.3. 입력 지진의 시간 이력곡선

2.2.3. 성능 평가 기준

본 연구에서 제진 시스템의 내진 성능을 평가하기 위해 고려한 기준은 다음과 같다. 먼저 건물의 최대값에 대한 응답 8가지 (기초 전단력, 전도 모멘트, 중앙부의 변위, 중앙부의 가속도, 면진장치 변형, 연성도, 소산 에너지, 소성 연결부)를 비교 평가한다. 여기서 각 응답들은 비제어시의 값으로 정규화 되어 있다. 또한, 건물의 응답의 평균치를 비교 평가하기 위해 RMS 응답 6가지를 비교한다. 마지막으로 제진 시스템의 비교를 위해 6가지 기준을 마련하였다. 구체적인 각각의 성능 평가 기준은 아래에 소개되어 있다.

표 3.2.2.1. 성능 평가 기준

PEAK RESPONSES	NORMED RESPONSES	CONTROL STRATEGY
Base Shear $J_1 = \max\left\{\frac{\max_{i,t}\lvert F_{bi}(t)\rvert}{F_{0b}^{\max}}\right\}$	**Base Shear** $J_9 = \max\left\{\frac{\max_{t}\lVert F_{bi}(t)\rVert}{\lVert F_{0b}^{\max}\rVert}\right\}$	**Peak Force** $J_{15} = \max\left\{\max_{i,t}(\frac{f_i(t)}{W})\right\}$
Overturning Moment $J_2 = \max\left\{\frac{\max_{i,t}\lvert M_{bi}(t)\rvert}{M_{0b}^{\max}}\right\}$	**Overturning Moment** $J_{10} = \max\left\{\frac{\max_{t}\lVert M_{bi}(t)\rVert}{\lVert M_{0b}^{\max}\rVert}\right\}$	**Device Stroke** $J_{16} = \max\left\{\max_{i,t}(\frac{d_i(t)}{x_{0m}^{\max}})\right\}$
Displacement at Midspan $J_3 = \max\left\{\max_{i,t}\left\lvert\frac{y_{mi}(t)}{y_{0m}^{\max}}\right\rvert\right\}$	**Displacement at Midspan** $J_{11} = \max\left\{\max_{i}\frac{\lVert y_{mi}(t)\rVert}{\lVert y_{0m}^{\max}\rVert}\right\}$	**Peak Power** $J_{17} = \max\left\{\frac{\max_{t}\left[\sum_i P_i(t)\right]}{\dot{x}_{0m}^{\max}W}\right\}$
Acceleration at Midspan $J_4 = \max\left\{\max_{i,t}\left\lvert\frac{\ddot{y}_{mi}(t)}{\ddot{y}_{0m}^{\max}}\right\rvert\right\}$	**Acceleration at Midspan** $J_{12} = \max\left\{\max_{i}\left\lVert\frac{\ddot{y}_{mi}(t)}{\ddot{y}_{0m}^{\max}}\right\rVert\right\}$	**Total Power** $J_{18} = \max\left\{\frac{\sum_i\int_0^{t_f}P_i(t)dt}{x_{0m}^{\max}W}\right\}$
Bearing Deformation $J_5 = \max\left\{\max_{i,t}\left\lvert\frac{y_{bi}(t)}{y_{0b}^{\max}}\right\rvert\right\}$	**Displacement at Abutment** $J_{13} = \max\left\{\max_{i}\left\lVert\frac{y_{bi}(t)}{y_{0b}^{\max}}\right\rVert\right\}$	**Control Devices** J_{19} = number of control devices
Ductility $J_6 = \max\left\{\max_{j,t}\frac{\lvert\Phi_j(t)\rvert}{\Phi^{\max}}\right\}$	**Ductility** $J_{14} = \max\left\{\max_{j,t}\frac{\lVert\Phi_j(t)\rVert}{\lVert\Phi^{\max}\rVert}\right\}$	**Sensors** J_{20} = number of required sensors
Dissipated Energy $J_7 = \max\left\{\frac{\max_{j,t}\int dE_j}{E^{\max}}\right\}$	**Plastic Connections** $J_8 = \max\left\{\frac{N_d^c}{N_d}\right\}$	**Computational Resource** $J_{21} = \dim(x_k^c)$

여기서 $i = 1,2$는 x, y 방향이며, $j = 1,2,...,N_d$는 소성힌지의 개수이며, l은 제어 장치의 숫자이다.

2.2.4. 신개념 스마트 제진 시스템

앞 절의 면진 건물과 마찬가지의 신개념 스마트 제진 시스템을 고려하여 수치해석을 수행하고자 한다. 즉, 식 (3.2.2.1)을 통해 유도되는 유도기전력으로 MR 감쇠기의 입력 전압을 조절하는 방식으로 적응성을 보유한 스마트 제진 시스템을 구축하고자 한다. 여기서, K_{emf}를 변화시킴으로써 EMI 시스템의 성능을 변화시킬 수 있다.

$$u_a = -N\frac{d\Phi_B}{dt} = -N \cdot B\frac{dA}{dt} = -N \cdot B \cdot w\frac{dx}{dt} = -K_{emf}\frac{dx}{dt} \qquad (3.2.2.1)$$

신개념 스마트 제진 시스템의 내진 성능을 알아보기 위해 K_{emf}의 값을 변화시켜 수치해석을 하여 기존 스마트 제진 시스템의 결과와 비교하고자 한다.
또한, 본 연구에서 고려한 MR 감쇠기 모델 및 힘-변위 관계 그래프는 그림 3.2.2.4에 나타내었다.

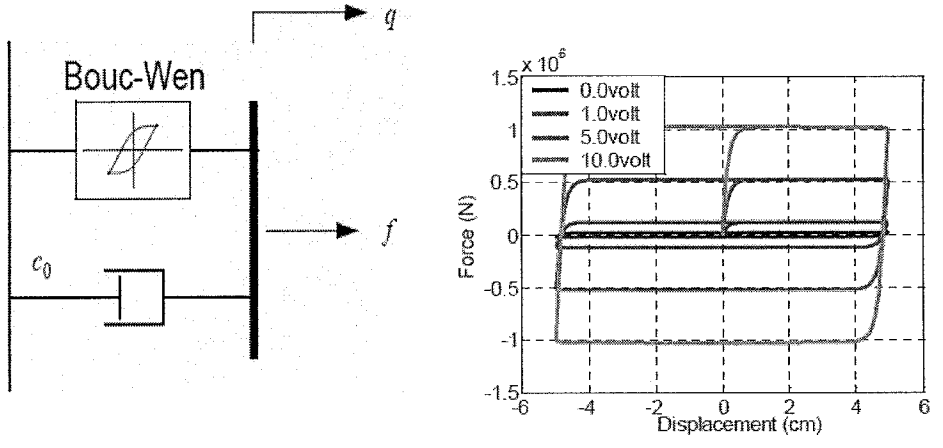
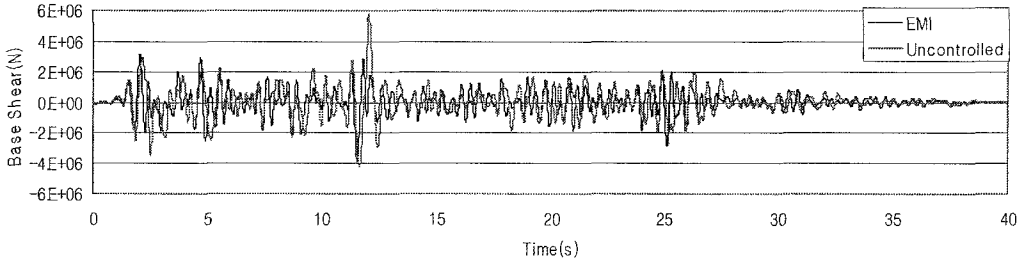


그림 3.2.2.4. MR 감쇠기 모델과 힘-변위 관계 그래프

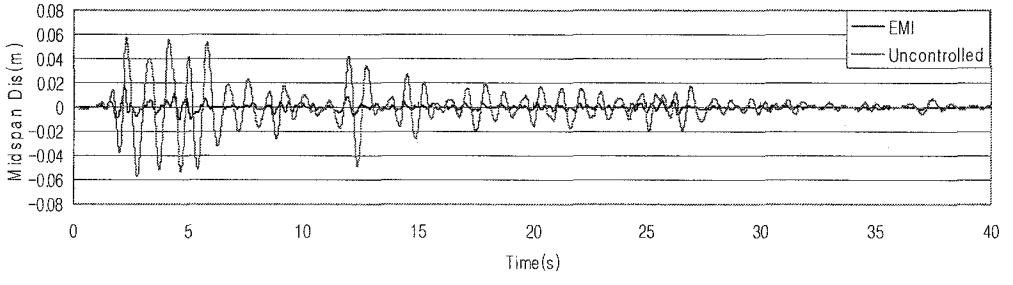
2.2.5. 수치해석 결과

본 연구에서 구조 대상물인 91/5 Highway Over-crossing 교량에 스마트 수동 감쇠 시스템을 모델링하여 설치하고 수치해석을 한 후 제어하지 않았을 때와의 성능 비교 시간 이력곡선은 그림3.2.2.5과 같다.

이 그래프에서 볼 수 있듯이, 제어를 하지 않은 경우에 비해, 제어를 하는 경우가 최대 전단력이 약 30% 정도 감소하였으며, 경간의 중앙 부분의 변위는 약 70% 정도가 감소하는 것을 알 수 있다.



(a) 전단력



(b) 중앙부분의 변위

그림 3.2.2.5. El Centro 지진하중에 의한 시간이력곡선

다음 그림은 대상 교량에 K_{emf}값을 변화 시키면서 수치해석을 수행한 후, 성능 평가 기준을 나타낸 것이다. 먼저, 그림 3.2.2.6는 최대값에 대한 평가기준의 결과이고, 그림 3.2.2.7는 RMS 응답에 대한 결과이다.

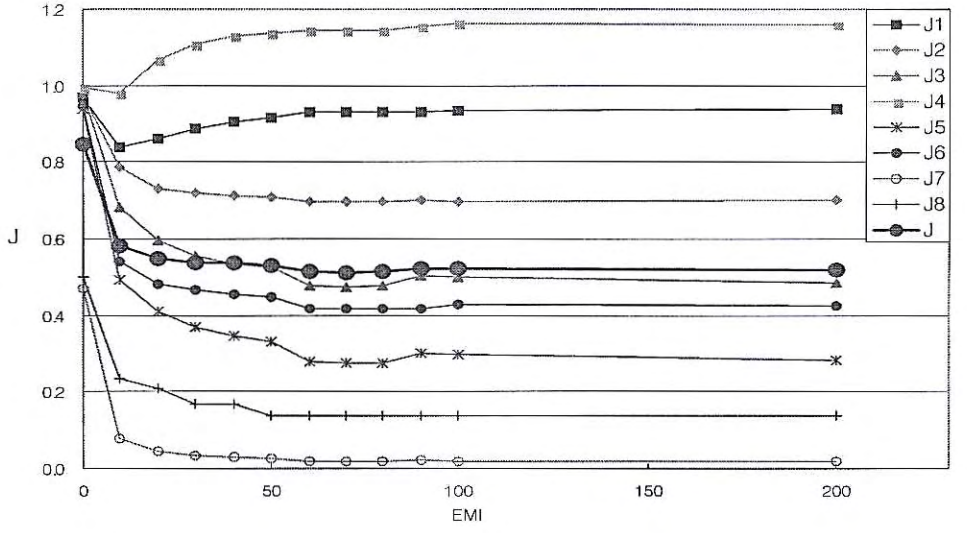


그림 3.2.2.6. K_{emf}값의 변화에 따른 성능 평가 기준 결과 (최대값)

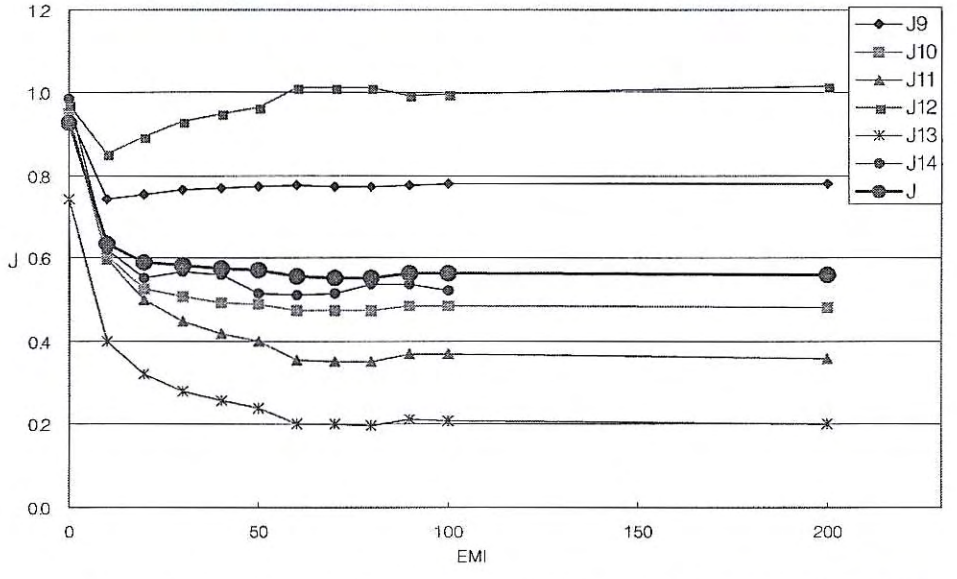


그림 3.2.2.7. K_{emf}값의 변화에 따른 성능 평가 기준 결과 (RMS)

그림 3.2.2.6와 그림 3.2.2.7에서는 각각 K_{emf}와 최대 J값과 평균 J값의 관계를 나타내며 각 그래프에 근거하여 최적의 K_{emf}의 값을 산정할 수 있다. 위 그림을 통해, 전체적으로 커다란 차이는 없지만, K_{emf}의 값이 70 근처에서 최소가 된다는 것을 알 수 있다.

하지만 그림 3.2.2.6의 그래프의 J_4를 고려해 보면 K_{emf}값이 70일 때 최대 가속도

가 약 17% 정도 증가한다. 또한 그림 3.2.2.7에서도 K_{emf}값이 70일 때 평균 가속도인 J_{12}값이 약 2% 정도 증가하는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 결과치가 나온 이유는 6개의 지진을 모두 고려해서 평균값을 내었기 때문이다. 다시 말해, K_{emf}값이 70일 때 North Palm Springs (1986) 지진을 제외한 다른 5개의 지진들은 신개념 스마트 제진 시스템에 의해 내진 성능이 향상하였지만, North Palm Springs(1986) 지진의 내진 성능이 너무 열악해져 이 값의 평균을 내었을 경우, 최대 가속도와 평균 가속도가 증가하게 된 것이다.

표 3.2.2.2부터 표 3.2.2.5까지는 각각, 두가지 경우의 신개념 스마트 제진 시스템의 수치해석 결과 (K_{emf}=5인 경우, K_{emf}=70인 경우)와 Passive-off인 경우 (K_{emf}=0), 그리고 기존 스마트 제진 시스템 (Clipped optimal 제어 알고리즘)의 경우의 성능 평가 기준 결과를 보여주고 있다.

표 3.2.2.2. 신개념 스마트 제진 시스템(K_{emf}=5)의 성능 평가 기준

Criterion	N.Palm Springs	Chichi	El Centro	North-ridge	Turkey	Kobe_NIS	평균
J1(Max Base Shear)	**1.0102**	0.8100	0.8317	0.8370	0.8953	0.8630	0.8745
J2(Max Base Moment)	0.7473	0.9737	0.7609	0.9712	0.9790	0.7151	0.8579
J3(Max Midspan Displacement)	0.8033	0.7881	0.8441	0.7985	0.7469	0.7211	0.7837
J4(Max Midspan Acceleration)	0.9235	0.9917	**1.0281**	0.9454	0.9095	0.9582	0.9594
J5(Max Abutment Displ.)	0.6496	0.7471	0.4760	0.7667	0.7015	0.3591	0.6166
J6(Max Ductility)	0.7473	0.6767	0.7609	0.7201	0.4296	0.7151	0.6750
J7(Max Dissipated Energy)	0	0.4508	0	0.4685	0.1913	0	0.1851
J8(Max Plastic Connections)	0	0.6667	0	1.0000	0.3333	0	0.3333
J9(Norm Base Shear)	0.8265	0.8445	0.6572	0.8026	0.8402	0.7490	0.7867
J10(Norm Base Moment)	0.7085	0.7968	0.6162	0.8155	0.5499	0.7004	0.6979
J11(Norm Midspan Displ.)	0.7369	0.7428	0.6381	0.7395	0.5835	0.7311	0.6953
J12(Norm Midspan Acceleration)	0.8223	0.8717	0.7736	0.8560	0.8730	0.8986	0.8492
J13(Norm Abutment Displ.)	0.3568	0.7182	0.4081	0.7137	0.3959	0.2814	0.4790
J14(Norm Ductility)	0.7085	0.5283	0.6162	0.6411	0.3307	0.7004	0.5875
J15(Max Control Force)	0.0088	0.0203	0.0057	0.0180	0.0131	0.0082	0.0123
J16(Max Device Stroke)	0.6253	0.7153	0.4377	0.6983	0.6954	0.3541	0.5877
J17(Max Power)	-	-	-	-	-	-	
J18(Total Power)	-	-	-	-	-	-	
J19(Number Devices)	16	16	16	16	16	16	
J20(Number Sensors)	28	28	28	28	28	28	
J21(Control Resources)	28	28	28	28	28	28	

표 3.2.2.3. 신개념 스마트 제진 시스템(K_{emf}=70)의 성능 평가 기준

Criterion	N.Palm Springs	Chichi	El Centro	North-ridge	Turkey	Kobe_NIS	평균
J1(Max Base Shear)	**1.6205**	0.6091	0.6676	0.6734	0.9635	**1.0594**	0.9322
J2(Max Base Moment)	0.8401	0.9406	0.3641	0.9352	0.5703	0.5331	0.6972
J3(Max Midspan Displacement)	0.5645	0.5271	0.2923	0.5373	0.3560	0.5735	0.4751
J4(Max Midspan Acceleration)	**1.6559**	0.8709	0.9958	0.8346	**1.2118**	**1.2982**	**1.1445**
J5(Max Abutment Displ.)	0.1770	0.4760	0.0623	0.4796	0.2738	0.1963	0.2775
J6(Max Ductility)	0.8401	0.3194	0.3641	0.3175	0.1256	0.5331	0.4166
J7(Max Dissipated Energy)	0	0.0176	0	0.0848	0	0	0.0171
J8(Max Plastic Connections)	0	0.3333	0	0.5000	0	0	0.1389
J9(Norm Base Shear)	**1.3424**	0.4691	0.5590	0.5514	0.8602	0.8669	0.7748
J10(Norm Base Moment)	0.6638	0.4788	0.2825	0.7237	0.2386	0.4560	0.4739
J11(Norm Midspan Displ.)	0.4466	0.3545	0.1943	0.4696	0.2707	0.3816	0.3529
J12(Norm Midspan Acceleration)	**1.3434**	0.6315	0.8329	0.7853	**1.2098**	**1.2746**	**1.0129**
J13(Norm Abutment Displ.)	0.1038	0.3213	0.0446	0.4241	0.1878	0.1214	0.2005
J14(Norm Ductility)	0.6638	0.4895	0.2825	**1.1694**	0.0230	0.4560	0.5140
J15(Max Control Force)	0.0246	0.0256	0.0241	0.0253	0.0249	0.0247	0.0249
J16(Max Device Stroke)	0.1703	0.4558	0.0572	0.4368	0.2715	0.1935	0.2642
J17(Max Power)	-	-	-	-	-	-	
J18(Total Power)	-	-	-	-	-	-	
J19(Number Devices)	16	16	16	16	16	16	
J20(Number Sensors)	28	28	28	28	28	28	
J21(Control Resources)	28	28	28	28	28	28	

표 3.2.2.4. Passive-off(K_{emf}=0)인 경우의 성능 평가 기준

Criterion	N.Palm Springs	Chichi	El Centro	North-ridge	Turkey	Kobe_NIS	평균
J1(Max Base Shear)	0.9470	0.9837	0.9788	0.9791	0.9706	0.9635	0.9705
J2(Max Base Moment)	0.9402	**1.0044**	0.9450	0.9948	**1.0009**	0.9659	0.9752
J3(Max Midspan Displacement)	0.9652	0.9893	0.9851	0.9853	0.9825	0.9644	0.9786
J4(Max Midspan Acceleration)	**1.0030**	0.9977	**1.0096**	0.9949	0.9970	0.9786	0.9968
J5(Max Abutment Displ.)	**1.0431**	0.9797	0.7811	0.9855	0.9520	0.8948	0.9394
J6(Max Ductility)	0.9402	0.9366	0.9450	0.9921	0.9102	0.9659	0.9483
J7(Max Dissipated Energy)	0	0.9577	0	0.9631	0.8871	0	0.4680
J8(Max Plastic Connections)	0	1.0000	0	1.0000	1.0000	0	0.5000
J9(Norm Base Shear)	0.9425	0.9828	0.8963	0.9755	0.9797	0.9223	0.9499
J10(Norm Base Moment)	0.9286	0.9829	0.8835	0.9863	0.9958	0.9113	0.9481
J11(Norm Midspan Displ.)	0.9352	0.9825	0.8926	0.9761	0.9673	0.9267	0.9467
J12(Norm Midspan Acceleration)	**1.0065**	0.9892	0.9278	0.9826	0.9765	0.9597	0.9737
J13(Norm Abutment Displ.)	0.5189	0.9829	0.5985	0.9764	0.7079	0.6892	0.7456
J14(Norm Ductility)	0.9286	**1.1105**	0.8835	**1.1152**	0.9812	0.9113	0.9884
J15(Max Control Force)	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005
J16(Max Device Stroke)	**1.0041**	0.9381	0.7183	0.8976	0.9348	0.8822	0.8959
J17(Max Power)	-	-	-	-	-	-	
J18(Total Power)	-	-	-	-	-	-	
J19(Number Devices)	16	16	16	16	16	16	
J20(Number Sensors)	28	28	28	28	28	28	
J21(Control Resources)	28	28	28	28	28	28	

표 3.2.2.5.기존 스마트 제진 시스템(Clipped-optimal)의 성능 평가 기준

Criterion	N.Palm Springs	Chichi	El Centro	North-ridge	Turkey	Kobe	평균
J_1(Max Base Shear)	0.9619	0.8416	0.7792	0.8857	0.9039	0.8174	0.8650
J_2(Max Base Moment)	0.7476	0.9781	0.7081	0.9790	0.9788	0.6642	0.8426
J_3(Max Midspan Displacement)	0.8024	0.7852	0.7753	0.8570	0.7166	0.6632	0.7666
J_4(Max Midspan Acceleration)	0.9814	0.8757	0.8956	0.8993	0.8003	0.9858	0.9064
J_5(Max Abutment Displacement)	0.8121	0.7647	0.5662	0.8532	0.6744	0.5097	0.6967
J_6(Max Ductility)	0.7476	0.6959	0.7081	0.8276	0.3717	0.6642	0.6692
J_7(Max Dissipated Energy)	0	0.4682	0	0.5674	0.2364	0	0.2120
J_8(Max Plastic Connections)	0	0.6667	0	1.0000	0.3333	0	0.3333
J_9(Norm Base Shear)	0.7792	0.8457	0.5970	0.8288	0.8402	0.6909	0.7636
J_{10}(Norm Base Moment)	0.6622	0.7984	0.5594	0.8378	0.5019	0.6560	0.6693
J_{11}(Norm Midspan Displ.)	0.6825	0.7532	0.5797	0.7772	0.5732	0.6743	0.6734
J_{12}(Norm Midspan Acceleration)	0.7894	0.8074	0.6895	0.8178	0.8087	0.8376	0.7917
J_{13}(Norm Abutment Displ.)	0.4543	0.7460	0.3929	0.7744	0.4045	0.3679	0.5233
J_{14}(Norm Ductility)	0.6622	0.6927	0.5594	0.7713	0.2204	0.6560	0.5937
J_{15}(Max Control Force)	0.0109	0.0227	0.0084	0.0226	0.0157	0.0096	0.0150
J_{16}(Max Device Stroke)	0.7817	0.7322	0.5207	0.7772	0.6685	0.5025	0.6638
J_{17}(Max Power)	-	-	-	-	-	-	
J_{18}(Total Power)	-	-	-	-	-	-	
J_{19}(Number Devices)	16	16	16	16	16	16	
J_{20}(Number Sensors)	28	28	28	28	28	28	
J_{21}(Control Resources)	28	28	28	28	28	28	

그림 3.2.2.8은 앞의 네 개의 표에 나타난 성능 평가 기준의 값을 각 제진 시스템에 대하여 나타낸 그래프이다. 그림으로부터 알 수 있듯이, 신개념 스마트 제진 시스템은 기존 스마트 제진 시스템인 Clipped-optimal 제어 알고리즘을 사용한 경우와 유사한 성능을 보이는 것을 알 수 있다. 이에 비해, Passive-off 시스템은 구조물의 변형을 거의 제어하지 못한 것을 볼 수 있다. 하지만 K_{emf}가 70인 경우는 최대 변위를 53% 감소 시켰지만 최대 가속도 및 평균 가속도가 각각 14%, 1% 증가함을 볼 수 있다. 기존 스마트 제진 시스템인 Clipped-optimal 제어 알고리즘을 사용한 경우는 복잡한 제어 시스템이 고려되었음에도 불구하고, 단순한 신개념 스마트 제진 시스템보다 성능이 크게 좋지 않음을 알 수 있다.

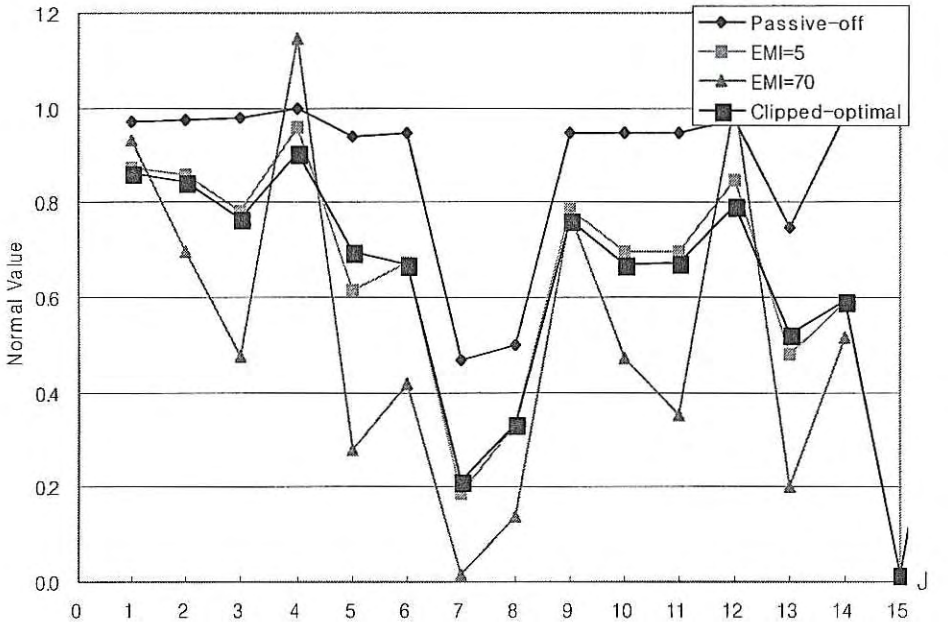


그림 3.2.2.8. 스마트 수동 감쇠 시스템의 성능 평가 비교

2.3. 사장 케이블 수치해석

2.3.1. 배경

일반적으로 길이가 매우 긴 케이블로 지지되는 사장교의 대부분이 강한 바람과 태풍이 자주 발생하는 해안 또는 해협에 주로 건설되기 때문에, 풍하중에 의한 과도한 진동 (풍우진동, 웨이크 갤로핑, 지점 가진에 의한 진동 등)이 케이블에 발생하게 된다. 또한, 사장교의 장경간화 추세에 따른 사장 케이블 길이의 증가와 효과적인 응력 재분배를 위한 케이블 수량 증가 및 이에 따른 부재 당 소요단면적의 감소로 인해 케이블 부재의 휨강성은 더욱 더 작아지게 되었고 케이블 자체의 구조감쇠비도 매우 낮기 때문에, 1980년대 중반 이후부터 사장교를 건설하고 유지관리를 하고 있는 여러 나라에서 사장교 케이블 시스템의 과도한 진동 및 이로 인한 건전성 확보 문제가 심각하게 대두되고 있다. 사장교의 수명기간 동안 케이블 시스템의 진동은 케이블 스트랜드의 피로와 부식에 대한 주요 원인이 되고, 사장교를 이용하는 통행자의 사용성 저하에 커다란 영향을 미치게 된다. 따라서, 사장교의 공용기간 동안 구조적으로 안정하고 높은 사용성을 유지하기 위해서는, 풍하중에 의한 케이블 시스템의 과도한 진동에 대한 적극적인 방지 대책을 수립하는 것이 필수적이다.

사장 케이블에 발생하는 유해한 진동을 방지하기 위한 여러 가지 대책 중에서 현재 널리 사용되는 방법은 수동형태 (passive-type) 감쇠기 (external damper)를 사장 케이블에 적용하는 것이다. 감쇠기는 일반적으로 앵커 근처에 설치되며 자체 감쇠비가 낮은 케이블에 부가의 감쇠를 제공하는 역할을 한다. 1980년대 중반 이후부터, 수동형 감쇠기에 의한 케이블의 진동 감소 효과와 케이블 감쇠기의 설계에 대한 연구가 수행되고 있으며, 외국에서는 이러한 이론적 연구에 기초하여 실제 사장교 케이블에 점성 또는 점탄성 감쇠기를 설치한 사례도 있다. 수동형 감쇠기가 케이블 제진을 위해 설치된 대표적인 사장교로는 프랑스의 Brotonne Bridge, 네델란드 Eramus 사장교, 미국 플로리다의 Sunshine Skyway Bridge, 미국 사우스캐롤라이나의 New Cooper River Bridge, 일본의 Aratsu Bridge, Tsurumi Tsubasa

Bridge 등이다. 이상과 같이 실제 교량에 적용된 경우에도, 감쇠기의 위치는 미적인 고려와 설치상의 문제로 인해 교량 상판에 가까운 지점으로 제한되고 있다.

최근 수십 년 동안, 많은 연구자들이 감쇠기를 사용한 사장 케이블의 수동 제어에 대한 연구를 수행해왔다. Kovacs (1982)는 감쇠기의 최적 크기가 존재한다는 것을 처음으로 규명하고 케이블 제진을 위한 수동형 감쇠기의 최적 감쇠 계수를 찾아내었다. Sulekh (1990) 와 Pacheco et al. (1993)은 사장 케이블을 위한 수동 감쇠기의 설계를 용이하게 하는 설계 곡선을 수치적으로 개발하였다. 이 무차원 곡선은 주어진 케이블 길이와 고유진동수의 모드에 대한 최적의 점성 .감쇠 성질을 결정하는데 사용될 수 있다. Krenk (1999)는 설계 곡선에 대한 해석적인 해를 개발하여 최적 감쇠계수를 위한 명시적 결과를 얻었다.

하지만, 지금까지의 연구에 주로 사용된 수동형 감쇠기는 케이블의 길이가 긴 경우에는 감쇠기를 부착해야 하는 위치가 앵커로부터 상당히 떨어져 있어야만 하기 때문에 미관 및 설치·유지관리 면에 있어서 커다란 제한을 받게 된다. 이러한 수동형 감쇠기의 단점은 여러 연구를 통해 검증된 바 있다. 이에 비해, 최근 미국을 중심으로 부상하고 있는 반능동형 (semiactive-type)감쇠기 (특히, MR 감쇠기)를 이용하면, 수동형 감쇠기에 비해 케이블 진동에 대한 제진 성능이 우수할 뿐만 아니라, 감쇠기의 설치위치에 따라 성능의 차이가 크게 변하지 않는 매우 강인한 (robust) 케이블 제진 대책을 수립할 수 있다.

본 절에서는 사장 케이블의 과도한 진동을 저감시키기 위한 스마트 감쇠 시스템의 성능을 수치해석적인 방법을 통해 검증하고자 한다. 수치모의실험에서는 케이블을 따라 분포된 외부 하중에 의해 진동하는 사장 케이블 구조물을 고려하고, 이러한 진동을 전단-모드 MR 감쇠기로 제어하는 기법을 모색하였다. 케이블/감쇠기 시스템의 운동방정식은 가정된 모드 방법 (assumed mode approach)으로 유도하고, 제어용 케이블 모델을 사용하였다. 또한, 스마트 감쇠 시스템을 위해 최근에 개발된 다양한 반능동제어 알고리즘을 고려하여 Clipped-optimal control, Lyapunov 안정론-기반 제어, maximum energy dissipation과 modulated homogeneous friction 알고리즘과 같은 다양한 반능동 제어 알고리즘이 스마트 감쇠 시스템에 적용되고

각 방법의 성능을 확인하였다.

2.3.2. 사장교 모델

강사장 케이블은 큰 장력이 가해지기 때문에 일반적으로 작은 처짐을 갖는다. 따라서 본 연구에서는 그림 3.2.3.1과 같이 처짐을 갖지 않는 이상적인 사장 케이블을 대상으로 하며, 이때 케이블의 지배 미분 방정식은 식 (3.2.3.1)과 같다.

$$m\ddot{v}(x,t) + c\dot{v}(x,t) - T v''(x,t) = f(x,t) + F_d(t)\delta(x - x_d) \qquad (3.2.3.1)$$

여기서, $v(x,t)$는 케이블의 수직방향의 변위, $F_d(t)$는 반능동 댐퍼로부터 케이블에 전달되는 감쇠력, $f(x,t)$는 외부 하중, L은 케이블의 길이, T는 케이블의 장력, m은 케이블의 길이당 질량, 그리고 c는 케이블의 길이당 감쇠 계수이다.

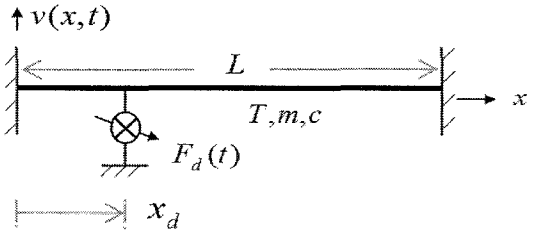


그림 3.2.3.1. 반능동 댐퍼가 설치된 케이블 모델

강사장 케이블의 수직방향의 변위 형상이 유한한 케이블의 모드들로 표현되어진다고 가정하고 식(3.2.3.2) 및 (3.2.3.3)과 같은 형상함수와 표준 Galerkin Method를 이용하여 식(3.2.3.1)로부터 식(3.2.3.4)과 같은 행렬로 이루어진 지배방정식을 산출하였다.

$$\Phi_1(x) = \begin{cases} x/x_d & 0 \le x \le x_d \\ (L-x)/(L-x_d) & x_d \le x \le L \end{cases} \qquad (3.2.3.2)$$

$$\Phi_{j+1}(x) = \sin \pi jx \tag{3.2.3.3}$$

$$M\ddot{q}(t) + C\dot{q}(t) + Kq(t) = f(t) + \Phi_d F_d(t) \tag{3.2.3.4}$$

여기서, M은 질량행렬, C는 감쇠행렬, K는 강성 행렬, f는 하중 벡터, 그리고 Φ_d는 감쇠력 벡터이다. 이때, M은 질량 행렬로 다음과 같이 나타난다.

$$M = [m_{ij}],\ m_{ij} = m\int_0^L \phi_i(x)\phi_j(x)dx \tag{3.2.3.5}$$

이때, 강성 행렬 K는,

$$K = [k_{ij}],\ k_{ij} = -T\int_0^L \phi_i'(x)\phi_j'(x)dx \tag{3.2.3.6}$$

하중 벡터 f는,

$$\mathrm{f} = [f_i],\ f_i = \int_0^L f(x,t)\phi_i(x)dx \tag{3.2.3.7}$$

그리고 감쇠력 벡터 φ는 다음과 같이 나타난다.

$$\varphi = \phi(x_d) = [\phi_1(x_d)\ \phi_2(x_d)\ \cdots\ \phi_n(x_d)]^T \tag{3.2.3.8}$$

이때, 감쇠 행렬 C는 질량, 감쇠 행렬과 모드 감쇠비로부터 구할 수 있다

이 방정식을 상태공간방정식으로 바꾸면 식 (3.2.3.9), (3.2.3.10), (3.2.3.11)으로 나타낼 수 있다.

$$\dot{z} = Az + BF_d(t) + G\mathrm{f} \tag{3.2.3.9}$$

$$Z = C_Z z + D_Z F_d(t) + H_Z \mathrm{f} + \mathrm{v} \tag{3.2.3.10}$$

$$y = C_y z + D_y F_d(t) + H_y \mathrm{f} + \mathrm{v} \tag{3.2.3.11}$$

이때, $z = [\eta \ \dot{\eta}]^T$ 는 상태 벡터, $Z = [\eta \ \dot{\eta} \ \ddot{\eta}]^T$ 이고 , $y = [v(x_d,t) \ \ \ddot{v}(x_d,t)] + \mathrm{v}$ 는 계측시스템으로부터 측정된 케이블 응답을 나타내는 벡터이다. 이때 v는 계측 시 포함된 센서잡음을 나타낸다. 각 행렬은 다음과 같다.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}\varphi \end{bmatrix} \quad G = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1} \end{bmatrix} \tag{3.2.3.12}$$

$$C_Z = \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix} \quad D_Z = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ M^{-1}\varphi \end{bmatrix} \quad H_Z = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ M^{-1} \end{bmatrix} \tag{3.2.3.13}$$

$$C_y = \begin{bmatrix} \varphi^T & 0 \\ -\varphi^T M^{-1}K & -\varphi^T M^{-1}C \end{bmatrix} \quad D_y = \begin{bmatrix} 0 \\ \varphi^T M^{-1}\varphi \end{bmatrix} \quad H_y = \begin{bmatrix} 0 \\ \varphi^T M^{-1} \end{bmatrix} \tag{3.2.3.14}$$

2.3.3. 반능동 MR 감쇠기 모델

본 연구에서는 반능동 감쇠기로 MR 감쇠기를 사용하였고, 수치해석에 필요한 MR 감쇠기의 동적 모델은 Terasawa 등 (2004)에 의해 제안된 모델을 사용하였다. MR 감쇠기의 동적 모델에서 감쇠력 $F_d(t)$는 식(3.2.3.15)와 식(3.2.3.16)과 같이 표현될 수 있다.

$$F_d = \sigma_a w + \sigma_0 w V + \sigma_1 \dot{w} + \sigma_2 \dot{v}_d + \sigma_b v_b V \qquad (3.2.3.15)$$

$$\dot{w} = \dot{v}_d - a_0 |\dot{v}_d| w \qquad (3.2.3.16)$$

여기서, $w(t)$는 내부상태변수 (m), $v_d(t)$는 감쇠기 위치에서 케이블의 변위 (m), $V(t)$는 MR 댐퍼 입력전압, σ_0는 $V(t)$에 의해 영향을 받는 $w(t)$의 강성 ($N/(mV)$), σ_1은 $w(t)$의 감쇠계수 (Ns/m), σ_2는 점성 감쇠계수 (Ns/m), σ_a는 $w(t)$의 강성 ((N/m), σ_b는 $V(t)$에 영향을 받는 점성감쇠계수 ($Ns/(mV)$), 그리고 a_0는 일정한 값 $(1/m)$이다.

2.3.4. 반능동 제어 알고리즘

MR 감쇠기는 원하는 감쇠력을 직접 강사장 케이블에 전달할 수 없고, 감쇠기에 주어진 전압과 케이블의 거동에 따라 감쇠력이 정해지기 때문에, 제어 알고리즘도 그러한 반능동 감쇠기의 특성을 고려하여 케이블의 거동에 따라 필요한 감쇠력을 발휘할 수 있는 감쇠기의 전압을 산정하는 식을 제안하고 있다. 다양한 반능동 제어 알고리즘에 개발되었지만, 본 연구에서는 아래에서 간략하게 기술된 네 가지 제어 알고리즘만을 고려하였다.

(1) Lyapunov 안정론-기반 제어 알고리즘

Lyapunov 안정성 이론은 Lyapunov 함수를 도입하여 함수값의 변화율이 negative semidefinite 일 때 그 시스템은 Lyapunov 관점에서 안정하다는 이론이다. 이 이론을 이용하여 최대한 Lyapunov 함수값이 음이 되도록 하는 감쇠력을 구조물에 전달하는 것이 제어 알고리즘의 목적이 된다. 이때, Lyapunov 함수에 따라 제어 알고리즘이 다양하게 제시될 수 있으며, 이 연구에서는 Leitmann (1994)이 반능동 제어기에 적용한 Lyapunov 이론을 사용하여, 식(3.2.3.17)과 같이 MR 감쇠기에 주어

지는 전압을 결정한다.

$$v_i = V_{max} H((-\dot{x}) {}^{T} PBF_d) \qquad (3.2.3.17)$$

여기서 V_{max}는 감쇠기의 최대 입력 전압을 나타내고, $H(\cdot)$는 Heaviside step 함수이다.

(2) Maximum Energy Dissipation 알고리즘

Maximum Energy Dissipation 알고리즘은 구조물의 전체 진동 에너지를 감소시키도록 감쇠력을 산정하는 알고리즘으로, Lyapunov 함수로 상대적인 진동 에너지에 대한 함수를 사용하고 함수값이 최소가 되도록 유도한다. 이 알고리즘은 식(3.2.3.18)과 같이 댐퍼에 전달되는 전압을 결정한다.

$$v_i = V_{max} H(-\dot{q}^{T} \phi_d F_d) \qquad (3.2.3.18)$$

즉, 이 알고리즘은 에너지가 소산되는 경우에만 최대 전압을 MR 감쇠기에 전달하게 된다.

(3) Clipped Optimal 제어 알고리즘

Clipped Optimal 제어 알고리즘은 MR 감쇠기의 특성을 잘 나타내도록 Dyke 등이 제안한 알고리즘으로, 선형 최적 제어기로부터 감쇠력을 산출한다. 그러나 MR 감쇠기의 특성상 구조물의 반응에 제한되어 작용되기 때문에 식(3.2.3.19)을 통하여 반능동 댐퍼가 최대한 산출된 제어력과 유사한 제어 효과를 발휘하도록 유도하는 알고리즘이다.

$$v_i = V_{max} H(\{F_{dci} - F_d\} F_d) \qquad (3.2.3.19)$$

즉, MR 감쇠기의 실제 감쇠력과 계산된 제어력을 비교하여, 제어력이 더 큰 경우에는 입력전압을 최대값으로 취해주고, 그렇지 않은 경우에는 입력전압을 0으로 하는 알고리즘이다.

(4) Modulated Homogeneous Frication 알고리즘

Modulated Homogeneous Friction 알고리즘은 마찰 댐퍼를 위하여 Inaudi (1997)가 제안한 알고리즘이지만, 마찰 댐퍼와 MR 감쇠기의 거동상의 유사성으로 인하여 반능동 감쇠기에 대한 제어 알고리즘으로 사용할 수 있다. 이 알고리즘은 최대 변위가 일어나는 시점을 기준으로 감쇠력을 산정하며, 다음 최대 변위가 일어날 때까지 일정한 감쇠 효과를 구조물에 가하게 된다. 이때 감쇠력은 반능동 제어 장치의 변위에 비례하게 산정되며 반능동 감쇠기에 주어지는 입력 전압은 식(3.2.3.20)을 통하여 결정된다.

$$v_i = V_{\max} H(F_{d_n} - |F_d|) \qquad (3.2.3.20)$$

여기서, F_{d_n}은 원하는 제어력을 의미한다.

2.3.5. 수치해석

케이블 진동에 대하여 반능동 댐퍼의 진동 감쇠 효과를 알아보고 각 알고리즘의 성능을 비교하기 위해서 다음과 같은 모델에 대해 수치해석을 수행하였다. 알고리즘은 앞에서 소개한 Lyapunov 안정론-기반 제어 알고리즘 (LYAP), Maximum Energy Dissipation 알고리즘 (MED), Clipped Optimal 제어 알고리즘 (CO), 그리고 Modulated Homogeneous Friction 알고리즘 (MHF)을 고려하였다.

(1) 해석 대상 구조물의 제원

본 수치해석에서 고려한 강사장 케이블은 그림 3.2.3.2와 같은 실존하는 PVC 마감된 고장력 케이블로써, 단면과 제원은 그림 3.2.3.3과 표 3.2.3.1과 같다.

또한, 수치해석에 사용한 MR 감쇠기로는 Terasawa 등(2004)이 제안한 동적모델을 고려하였으며 그 모델에 필요한 변수는 표 2.4.5.2와 같다. 여기서, MR 감쇠기의 최대 감쇠력은 약 ±2000N이고 최대 전압은 10V 이다.

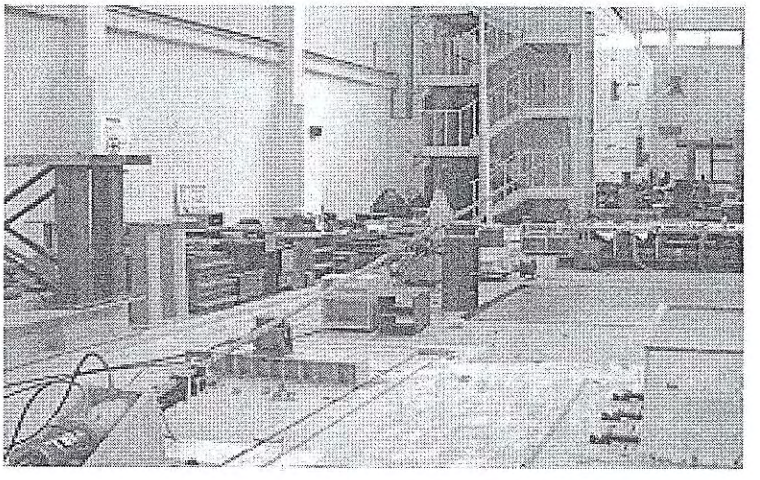


그림 3.2.3.2. 실제 사장 케이블

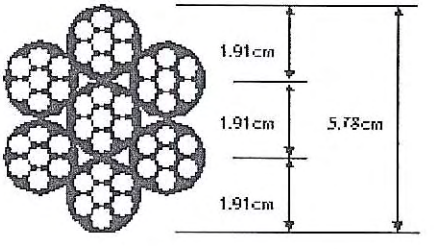


그림 3.2.3.3. 실제 사장 케이블의 단면

표 3.2.3.1. 케이블 제원

항 목	제원
케이블 길이, L	44.7 m
길이당 질량, m	0.090 kN/ m
케이블 장력, T	500 kN
모달 감쇠비, ζ	$\zeta_1 = 0.0015$ $\zeta_{i\geq 1} = 0.0005$
탄성계수, E	1.89×10^{8} kN/ m^2
굽힘강도, EI	3.79×10^{5} kN m^2
축강도, EA	77.36 kN

표 3.2.3.2. MR 감쇠기 변수

항목	제원	항목	제원
$\sigma_0(N/(mV))$	28815 MF	$\sigma_a(N/m)$	30542 MF
$\sigma_1(Ns/m)$	0.131 MF	$\sigma_b(Ns/(mV)$	16.3 MF
$\sigma_2(Ns/m)$	29.6 MF	$a_0(V/N)$	3198

(2) 평가 지표

본 연구에서 여러 가지 반능동 제어 시스템의 제어성능을 평가하기 위해 고려한 평가지표는 네 가지로서 다음과 같다. 첫 번째와 두 번째 평가지표는 각각 케이블의 중간지점과 1/4 지점의 최대변위에 대한 지표이고, 세 번째와 네 번째 평가지표는 변위와 속도에 대한 RMS 값이다. 각각의 평가 지표들은 제어하지 않았을 때의 값으로 정규화 시켰으며, 다음 식과 같이 정의된다.

$$J_1 = \frac{\max(v_{midspan}(t))}{\max(v_{midspan}(t))|_{uncontrolled}} \tag{3.2.3.21}$$

$$J_2 = \frac{\max(v_{quarterspan}(t))}{\max(v_{quarterspan}(t))|_{uncontrolled}} \tag{3.2.3.22}$$

$$J_3 = \frac{\sigma^2_{displacement}(t)}{\sigma^2_{displacement}(t)|_{uncontrolled}} \tag{3.2.3.23}$$

$$J_4 = \frac{\sigma^2_{velocity}(t)}{\sigma^2_{velocity}(t)|_{uncontrolled}} \tag{3.2.3.24}$$

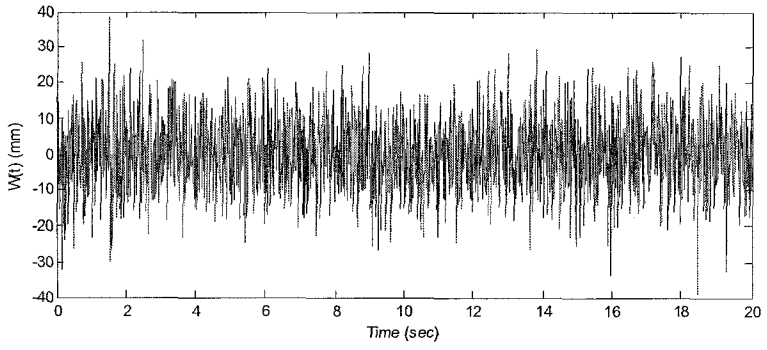
여기서,

$$\sigma^2_{displacement}(t) = E\left[\int_0^L v^2(x,t)dx\right] = trace\left\{M^{1/2}E[\eta(t)\eta^T(t)]M^{1/2}\right\} \tag{3.2.3.25}$$

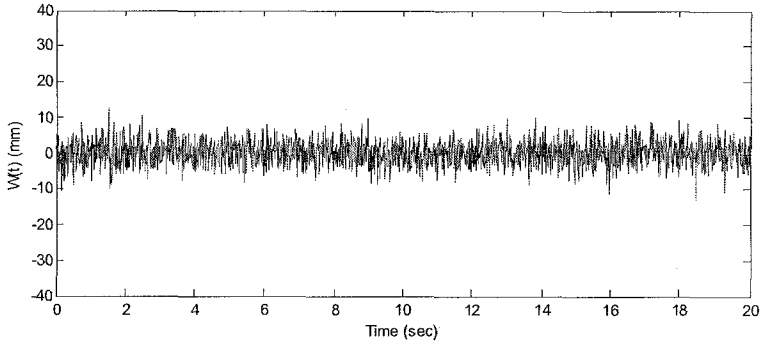
$$\sigma^2_{velocity}(t) = E\left[\int_0^L \dot{v}^2(x,t)dx\right] = trace\left\{M^{1/2}E[\dot{\eta}(t)\dot{\eta}^T(t)]M^{1/2}\right\} \tag{3.2.3.26}$$

(3) 외부 하중

강사장 케이블에 적용되는 하중은 케이블 전 영역에 작용하는 분포하중으로, 평균이 0인 Gaussian 백색 잡음 (White Noise)을 사용하였다. 특별히, 수동 제어 방법에 대한 반능동 제어 방법의 특성을 확인하기 위하여 풍하중의 크기를 달리 한 두 가지 경우에 대하여 수치해석을 수행하였다. 첫 번째 경우 (Case 1)는 상대적으로 커다란 풍하중을 고려하였고, 두 번째 경우 (Case 2)는 Case 1의 1/3 크기의 풍하중을 고려하였다. 각각의 풍하중의 시간이력은 그림 3.2.3.4와 같다.



(a) Case I



(b) Case II

그림 3.2.3.4. 수치해석에 쓰인 풍하중 (가우시안 백색잡음)

2.3.6. 수치해석 결과

제어되지 않은 경우에 대해서 응답을 사장 케이블의 중앙 지점과 케이블 길이의 1/4 지점에서의 최대 변위 그리고 RMS 변위와 속도에 대하여 Case 1과 Case 2를 비교한 결과를 표 3.2.3.3과 3.2.3.4에서 각각 확인할 수 있다. 그림 3.2.3.5와 3.2.3.6은 수치해석 결과를 보기좋게 그래프로 나타냈다. 여기서, MR 댐퍼를 수동형 댐퍼로 활용한 passive-on 경우와 passive-off 경우의 제진 성능과 반능동 제어 알고리즘의 성능을 비교해보면, 수동형 제어 시스템의 하중 변화에 대한 적응성 한계를 명확하게 알 수 있다. 즉, 하중이 큰 경우에는 passive-on이 성능이 좋고 passive-off는 성능이 나쁜 반면에, 하중이 1/3으로 작아진 경우에는 그 반대 현상이 나타난다. 하지만, 수동제어의 경우에는 댐퍼의 감쇠특성이 미리 정해지기 때문

에 다양한 하중에 대해서 항상 좋은 제진 성능을 나타낼 수 없다. 반면에, 반능동 제어 시스템은 MED의 경우만 제외하고 두 경우 모두 우수한 제진 성능을 나타내었다. 반능동 제어 시스템 중에서는 CO와 MHF 알고리즘이 다른 알고리즘에 비해서 뛰어난 제진 성능을 보여주었다.

표 3.2.3.3. 제어 알고리즘에 따른 정규화된 응답 (Case 1)

Control algorithms	Passive-off	Passive-on	LYAP	MED	CO	MHF
J_1 (max. displ. at mid-span)	0.4203	0.2326	0.2215	0.2316	0.1918	0.1935
J_2 (max. displ. at quarter-span)	0.4078	0.2479	0.2283	0.2455	0.1891	0.2063
J_3 (RMS displ.)	0.3605	0.2090	0.1785	0.2047	0.1412	0.1611
J_4 (RMS velocity)	0.3617	0.2249	0.1884	0.2197	0.1527	0.1700

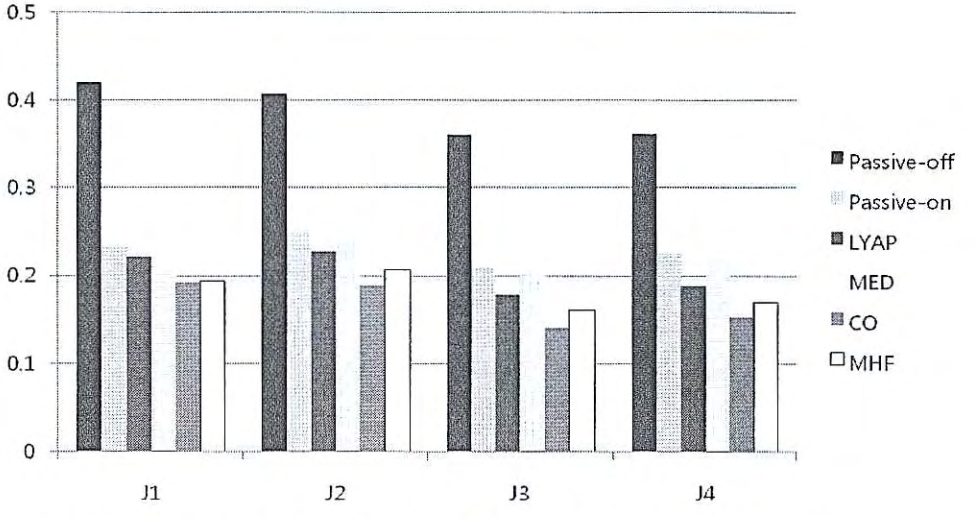


그림 3.2.3.5. 제어 알고리즘에 따른 정규화된 응답 (Case 1)

표 3.2.3.4. 제어 알고리즘에 따른 정규화된 응답 (Case 2)

Control algorithms	Passive-off	Passive-on	LYAP	MED	CO	MHF
J_1 (max. displ. at mid-span)	0.2442	0.3921	0.2229	0.3749	0.1874	0.1814
J_2 (max. displ. at quarter-span)	0.2464	0.4169	0.2249	0.4011	0.1977	0.2077
J_3 (RMS displ.)	0.2175	0.4054	0.1750	0.3628	0.1470	0.1484
J_4 (RMS velocity)	0.2216	0.4388	0.2026	0.3908	0.1570	0.1656

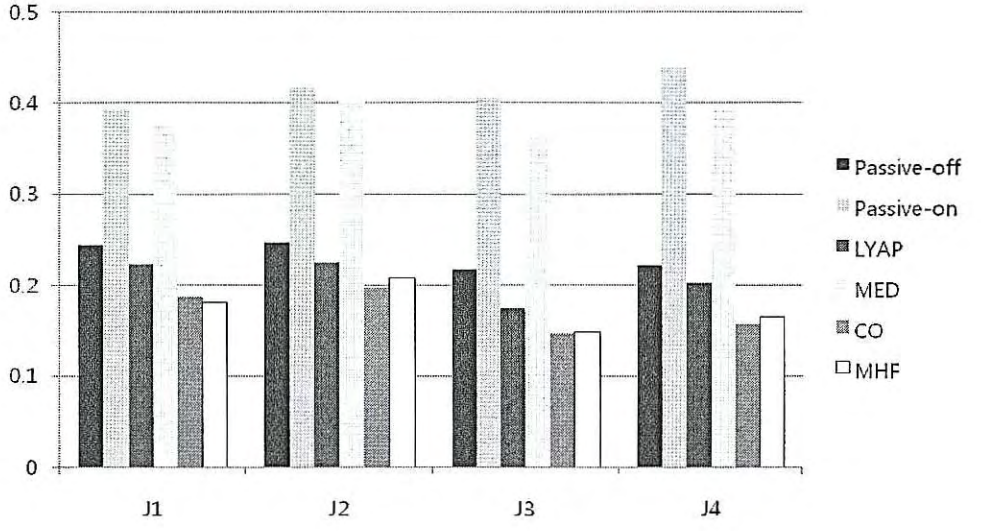


그림 3.2.3.6. 제어 알고리즘에 따른 정규화된 응답 (Case 2)

이상의 수치해석을 통해서, clipped optimal 제어 알고리즘이나 modulated homogeneous friction 알고리즘을 사용한 MR 댐퍼-기반 스마트 제진 시스템이 다양한 풍하중을 받는 강사장 케이블의 진동을 효과적으로 감소시킬 수 있음을 확인하였다.

2.3.7. 결론

본 연구에서는 풍하중을 받는 강사장 케이블의 진동을 저감시키기 위한 대책으로 MR 감쇠기-기반 스마트 제진 시스템이 가능한 지를 수치해석적인 방법으로 검토하였다. 수치해석 결과, 수동형 제어 시스템은 하중 강도의 변화에 대해 적응성이 매우 부족함을 보인 반면에, 반능동 제어 알고리즘을 사용한 스마트 제진 시스템은 하중 강도의 변화에 대한 우수한 적응성을 나타내었다. 또한, 본 연구에서 고려한 강사장 케이블 모델에 대해서는 clipped optimal 제어 알고리즘과 modulated homogeneous friction 알고리즘의 제진 성능이 다른 반능동 제어 알고리즘의 성능에 비하여 우수하였다. 그러므로, MR 댐퍼-기반 스마트 제진 시스템은 강사장 케이블의 진동 감소를 위한 적용가능한 대책의 하나로 고려할 수 있다.

2.4. 사장교에 대한 수치해석

2.4.1. 배경

지난 몇 십 년 동안 지진이나 바람과 같은 자연재해로부터 구조물을 보호하기 위한 많은 제어방법과 제어장치가 개발되고 연구되어 왔다. 최근 들어 다양한 제어기법을 비교하기 위한 시험구조물로서 벤치마크(benchmark) 제어 문제가 개발되었다 (Caughey, 1998). 이러한 벤치마크 제어 문제를 이용하면 연구자들은 다양한 제어알고리즘, 제어장치, 센서(sensor)등을 특정한 문제에 적용할 수 있고 제어 결과들을 명시된 평가기준(evaluation criteria)을 이용하여 상호간에 직접 비교 할 수 있다.

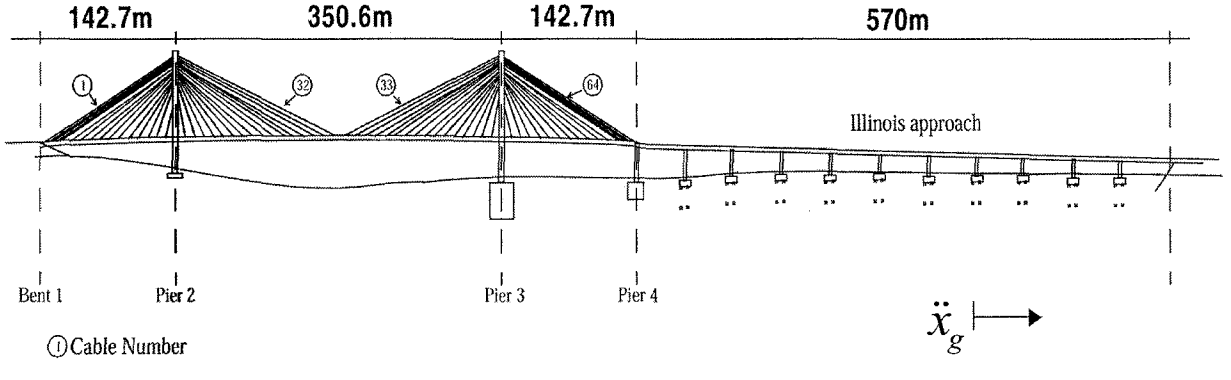
최근 들어 우리나라뿐만 아니라 세계적으로 사장교의 건설이 증가하고 있는 추세이기 때문에 사장교제어에 관한 연구가 필요하게 되었다. 사장교와 같은 유연하고 큰 구조물의 제어는 특이하고 도전적인 문제이다. 이러한 이유 때문에 지진하중을 받는 사장교의 첫 번째 벤치마크 문제가 개발되었다 (Dyke et al., 2000). 이 벤치

마크 문제는 미국 Missouri, Cape Girardeau에 건설되고 있는 사장교를 기반으로 개발되었다. Cape Girardeau 교량의 상세도면을 기초로 하여 전체규모의 벤치마크 교량의 복잡한 거동을 나타내기 위해 3차원 평가모델 (evaluation model)이 개발되었다. 또한 제안된 제어방법의 성능을 평가하기 위해 사장교에 적절한 평가기준과 제어기 설계에 필요한 제약조건이 벤치마크 문제에 포함되어 있다.

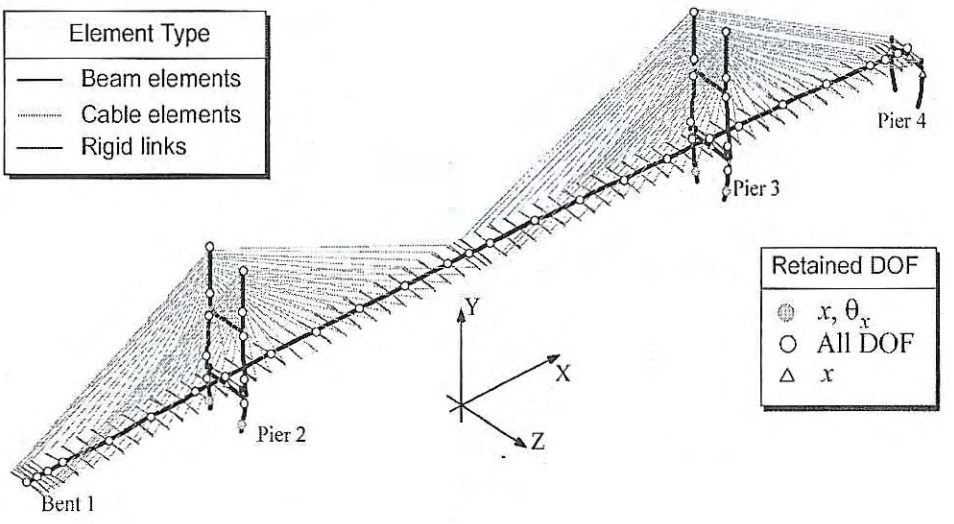
2.4.2. 사장교 모델

본 연구에서 고려된 사장교는 그림 3.2.4.1 과 같은 2003년 완공된 미국 Missouri 주의 Cape Girardeau 교를 대상 구조물로 고려하였다. 2개의 주탑, 128개의 케이블(cable) 그리고 Illinois 진입로 방향의 12개의 추가적인 교각으로 구성되어 있다. Illinois 진입로 부분은 사장교의 동적거동에 미치는 영향이 미비하기 때문에 이 벤치마크 문제에는 포함되어 있지 않다.

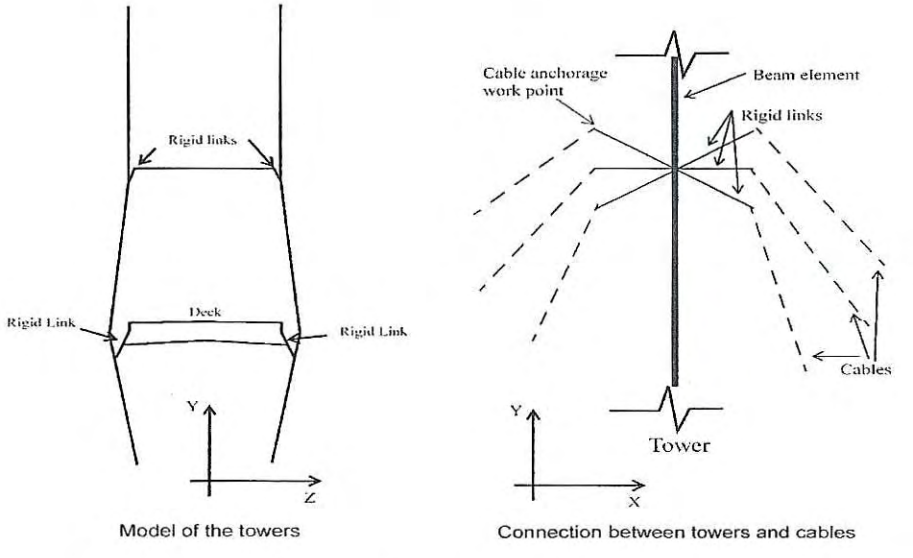
사장교의 상세도면에 기초해 Dyke 등은 교량의 복잡한 거동을 나타낼 수 있는 3차원 선형모델을 개발하였다. 벤치마크 문제에서는 선형모델을 사용하였으나 모델에 사용된 강성행렬은 사하중에 의한 교량의 변형 상태에서의 비선형 정적해석을 통해 결정되었다. 교량이 기반암에 건설되었다고 가정했기 때문에 지반-구조물 상호작용은 무시하였다.



(a) Cape Girardeau 교의 개략도



(b) 유한요소 모델



(c) 주탑의 유한요소 모델

그림 3.2.4.1. Cape Girardeau 교의 개략도 및 유한요소 모델

모델축소 방법으로 정적 응축을 수행해 평가모델인 419개의 자유도를 가지는 축소 차수 모델을 구성하였다. 감쇠행렬은 교량을 설계할 때와 같은 가정사항인 3% 의 모드별 감쇠(modal damping)를 각 모드(mode)에 적용하여 구성하였다. 원 설계에서는 상판과 주탑의 연결부분에 6.67 MN 의 용량을 가지는 16개의 충격 전달 장

치(shock transmission device)가 설치되었다. 이렇게 구성된 평가모델의 처음 10개의 고유주파수는 0.2899, 0.3699, 0.4683, 0.5158, 0.5812, 0.6490, 0.6687, 0.6970, 0.7102, 0.7203 Hz 이다. 이와 반대로 상판과 주탑 사이에 제어장치를 설치하기 위해 상판과 주탑을 분리한 두 번째 평가모델의 처음 10개의 고유주파수는 0.1618, 0.2666, 0.3723, 0.4545, 0.5015, 0.5650, 0.6187, 0.6486, 0.6965, 0.7094 Hz 이다.
벤치마크 문제에서는 위와 같은 평가모델 뿐만 아니라 각 제어방법의 성능을 평가하기 위한 18개의 평가기준이 제시되었다. 처음 6개의 평가기준은 제어기법의성능을 고려하기 위한 교량의 최대응답에 관한 것이며, 두 번째 5개의 평가기준은 전체 해석시간에 대한 평균응답(normed response)에 관한 것이다. 마지막 7개의 평가기준은 제어기 자체에 대한 제약조건에 관한 것이다. 조금 더 자세한 평가기준은 Dyke 등의 논문에 제시되어 있다.

2.4.3. 지진 하중

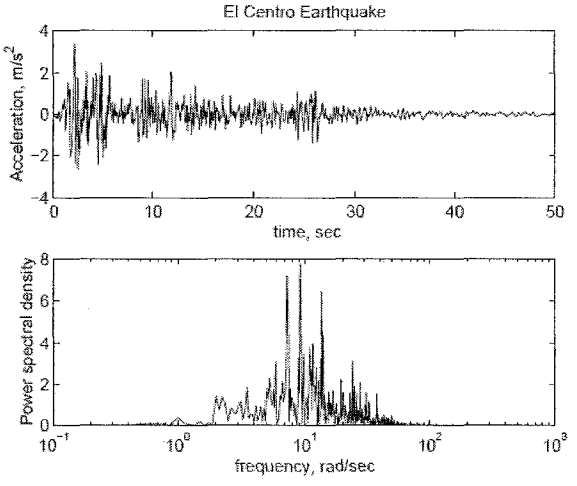
수치해석을 위해 제진 시스템이 설치된 사장교에 가해질 입력 지진 하중으로는 총 3개의 역사 지진을 사용하였다.

(1) El Centro. Recorded at the Imperial Valley Irrigation District substation in El Centro, California, during the Imperial Valley , California earthquake of May,18,1940

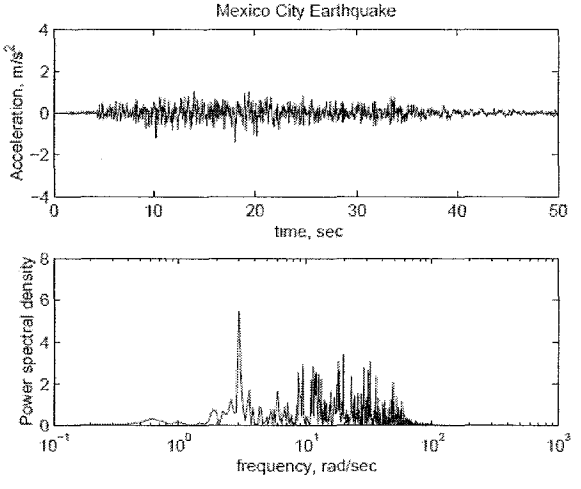
(2) Mexico city. Recorded at the Galeta de Campos station with site Geology of Meta-Andesite Breccia in September 19, 1985

(3) Gebze,Turkey. The Kocaeli earthquake recorded at the Gebze Tubitak Marmara Arastirma Merkezi on Aug 17,1999

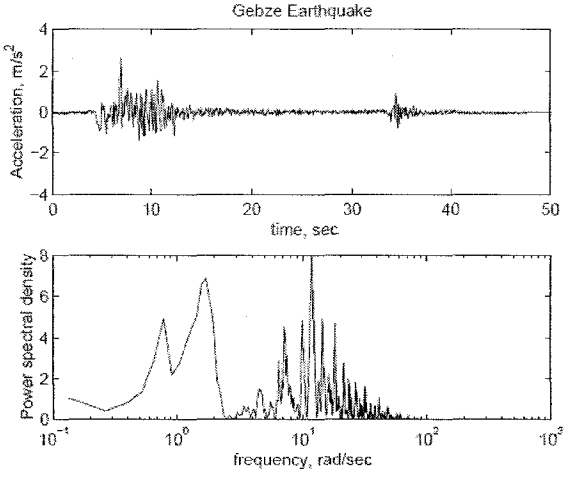
각 지진에 대한 시간이력곡선과 PDS 그래프는 그림 3.2.4.2와 같다. 모든 지진은 실제 경우와 유사한 형태를 위해 입사각이 15°로 가진한다고 가정하였다. 이 사잇각은 교축방향과 지진의 N-S 방향사이의 각을 의미한다.



(a) El Centro



(b) Mexico



(c) Gebze

그림 3.2.4.2 입력 지진의 시간이력곡선 및 PDS 그래프

2.4.4. 성능 평가 기준

본 연구에서 제진 시스템의 내진 성능을 평가하기 위해 고려한 기준은 다음과 같다. 크게 최대응답, RMS응답, 그리고 제어기 자체에 대한 항목이다. 구체적인 성능 평가 기준은 아래 표 3.2.4.1에 소개되어 있다.

표 3.2.4.1. 성능 평가 기준

PEAK RESPONSES	NORMED RESPONSES	CONTROL STRATEGY
Base Shear* $J_1 = \max_{\substack{\text{El Centro}\\\text{Mexico City}\\\text{Gebze}}} \left\{ \frac{\max_{i,t} \lvert F_{bi}(t) \rvert}{F_{0b}^{\max}} \right\}$	Base Shear* $J_7 = \max_{\substack{\text{El Centro}\\\text{Mexico City}\\\text{Gebze}}} \left\{ \frac{\max_{i} \lVert F_{bi}(t) \rVert}{\lVert F_{0b}(t) \rVert} \right\}$	Peak Force* $J_{12} = \max_{\substack{\text{El Centro}\\\text{Mexico City}\\\text{Gebze}}} \left\{ \max_{i,t} \left(\frac{f_i(t)}{W} \right) \right\}$
Shear at Deck Level* $J_2 = \max_{\substack{\text{El Centro}\\\text{Mexico City}\\\text{Gebze}}} \left\{ \frac{\max_{i,t} \lvert F_{di}(t) \rvert}{F_{0d}^{\max}} \right\}$	Shear at Deck Level* $J_8 = \max_{\substack{\text{El Centro}\\\text{Mexico City}\\\text{Gebze}}} \left\{ \frac{\max_{i} \lVert F_{di}(t) \rVert}{\lVert F_{0d}(t) \rVert} \right\}$	Device Stroke* $J_{13} = \max_{\substack{\text{El Centro}\\\text{Mexico City}\\\text{Gebze}}} \left\{ \max_{i,t} \left(\frac{\lvert y_i^{\mathrm{d}}(t) \rvert}{x_0^{\max}} \right) \right\}$
Overturning Moment* $J_3 = \max_{\substack{\text{El Centro}\\\text{Mexico City}\\\text{Gebze}}} \left\{ \frac{\max_{i,t} \lvert M_{bi}(t) \rvert}{M_{0b}^{\max}} \right\}$	Overturning Moment* $J_9 = \max_{\substack{\text{El Centro}\\\text{Mexico City}\\\text{Gebze}}} \left\{ \frac{\max_{i} \lVert M_{bi}(t) \rVert}{\lVert M_{0b}(t) \rVert} \right\}$	Peak Power* $J_{14} = \max_{\substack{\text{El Centro}\\\text{Mexico City}\\\text{Gebze}}} \left\{ \frac{\max_{t} \left[\sum_i P_i(t) \right]}{x_0^{\max} W} \right\}$
Moment at Deck Level* $J_4 = \max_{\substack{\text{El Centro}\\\text{Mexico City}\\\text{Gebze}}} \left\{ \frac{\max_{i,t} \lvert M_{di}(t) \rvert}{M_{0d}^{\max}} \right\}$	Moment at Deck Level* $J_{10} = \max_{\substack{\text{El Centro}\\\text{Mexico City}\\\text{Gebze}}} \left\{ \frac{\max_{i} \lVert M_{di}(t) \rVert}{\lVert M_{0d}(t) \rVert} \right\}$	Total Power* $J_{15} = \max_{\substack{\text{El Centro}\\\text{Mexico City}\\\text{Gebze}}} \left\{ \frac{\sum_i \left(\int_0^{t_f} P_i(t) dt \right)}{x_0^{\max} W} \right\}$
Cable Tension $J_5 = \max_{\substack{\text{El Centro}\\\text{Mexico City}\\\text{Gebze}}} \left\{ \max_{i,t} \left\lvert \frac{T_{ai}(t) - T_{0i}}{T_{0i}} \right\rvert \right\}$	Cable Tension $J_{11} = \max_{\substack{\text{El Centro}\\\text{Mexico City}\\\text{Gebze}}} \left\{ \max_{i,t} \frac{\lVert T_{ai}(t) - T_{0i} \rVert}{T_{0i}} \right\}$	J_{16}= number of control devices
		J_{17}= number of sensors
		$J_{18} = \dim(\mathbf{x}_k^c)$
Deck Displacement at Abutment $J_6 = \max_{\substack{\text{El Centro}\\\text{Mexico City}\\\text{Gebze}}} \left\{ \max_{i,t} \left\lvert \frac{x_{bi}(t)}{x_{0b}} \right\rvert \right\}$		

여기서, 12개의 평가 항목은 X(교축)와 Z(교축 직각방향) 모두 고려되어야 한다.

2.4.5. 신개념 스마트 제진 장치

그림 3.2.4.3은 기존에 사용되어 왔던 MR 감쇠기-기반 스마트 제진 시스템에 장치에 대한 MATLAB의 SIMULINK Block을 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이, 기존 시스템에서 계측기(Sensors)가 필요하고, 이를 이용하여 MR 감쇠기를 효과적으로 구동시킬 수 있게끔 하는 Controllers(컴퓨터)가 필요하다.

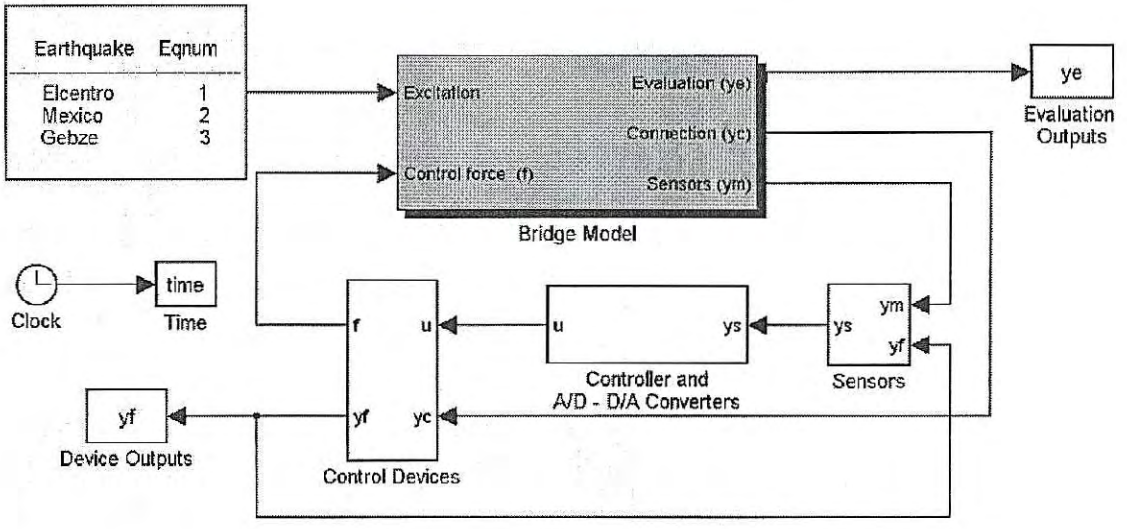


그림 3.2.4.3 기존 스마트 제진 시스템의 SIMULINK Block

본 연구에서 개발된 전자기유도(EMI) 시스템을 도입한 신개념 스마트 제진 장치를 고려하였다. 식 (3.2.4.1)을 통해 유도되는 유도기전력으로 MR 감쇠기의 입력 전압을 조절하는 방식으로 적응성을 보유한 스마트 제진 시스템을 구축하고자 한다. 여기서, K_{emf}를 변화시킴으로써 EMI 시스템의 성능을 변화시킬 수 있다.

$$u_a = -N\frac{d\Phi_B}{dt} = -N \cdot B\frac{dA}{dt} = -N \cdot B \cdot w\frac{dx}{dt} = -K_{emf}\frac{dx}{dt} \qquad (3.2.4.1)$$

신개념 스마트 제진 시스템의 내진 성능을 알아보기 위해 K_{emf}의 값을 변화시켜 수치해석을 하여 기존 스마트 제진 시스템의 결과와 비교하고자 한다.

또한, 본 연구에서 고려한 MR 감쇠기 모델은 그림 3.2.4.4와 같이 Modified Bouc-Wen 모델을 사용하였다. 이 MR 감쇠기는 Yang 등이 제안한 20 ton급 MR 감쇠기의 실험적인 결과를 이용하여 본 사장교에 적합한 100 ton급 MR 감쇠기로 최적화시켜서 만든 모델이며, 각 상수값은 표 3.2.4.2와 같다.

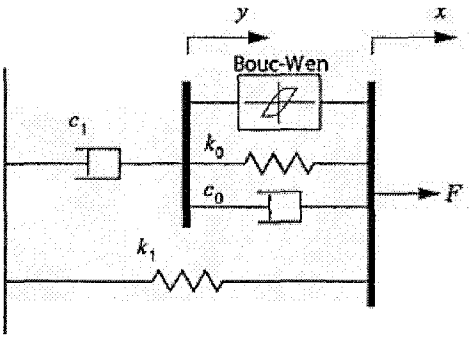


그림 3.2.4.4 MR 감쇠기 Modified Bouc-Wen 모델

표 3.2.4.2. MR 감쇠기 동적 모델의 상수 값

항목	상수 값	항목	상수 값
c_{0a}	110.0 kN s/m	α_a	46.2 kN/m
c_{0b}	114.3 kN s/m/V	α_b	41.2 kN/m/V
k_0	0.002 kN/m	γ	164.0 m^{-2}
c_{1a}	8359.2 kN s/m	β	164.0 m^{-2}
c_{1b}	7482.9 kM s/m/V	A	1107.2
k_1	0.0097 kN/m	n	2
		η	100 s^{-1}

이 스마트 제진 장치가 설치된 위치 및 개수는 그림 3.2.4.5와 같다.

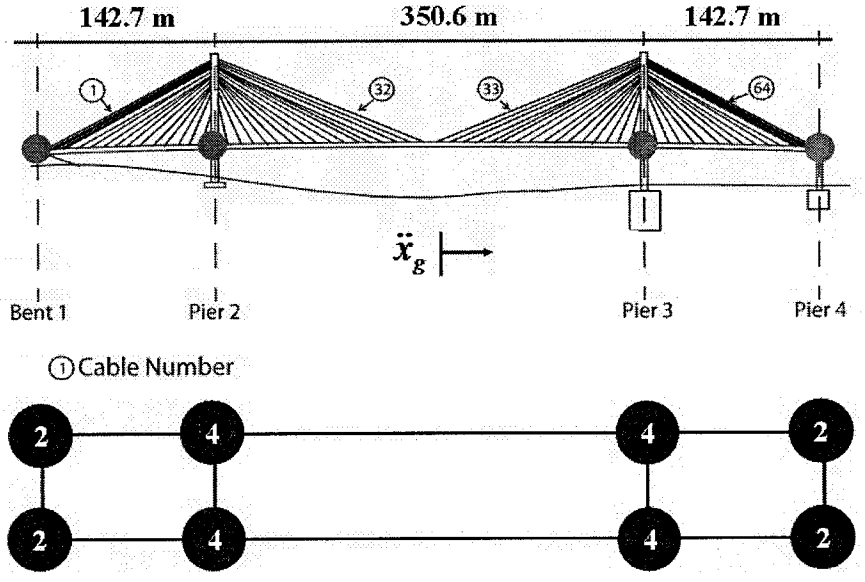
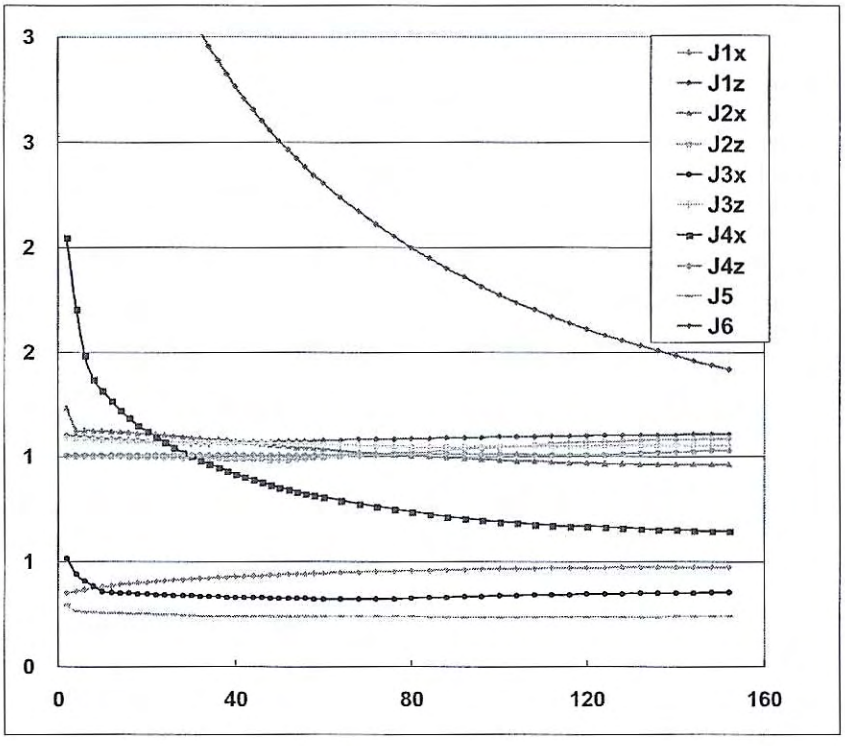


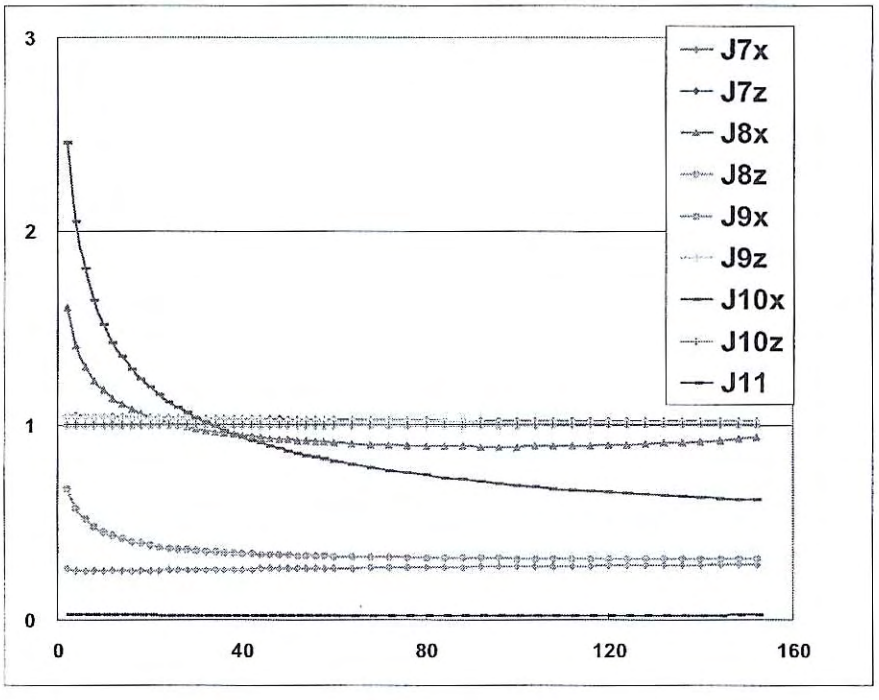
그림 3.2.4.5 스마트 제진 장치 설치 위치 및 갯수

2.4.6. 수치해석 결과

먼저 EMI 시스템을 설계하기 위해, 사장교에 $\boldsymbol{K}_{\mathrm{emf}}$값을 변화시키면서 수치해석을 수행하였다.



(a) Peak responses



(b) Normed responses

그림 3.2.4.6 K_{emf}값의 변화에 따른 성능 평가 기준 결과

그림 3.2.4.6은 K_{emf} 값의 변화에 따라 모든 지진에 대한 최대 J값의 결과를 보여주고 있다. 각 그래프에 근거하여 최적의 K_{emf}의 값을 산정할 수 있다. 위 그림을 통해, K_{emf}값을 150로 선정하였다. 이는 $N \cdot B \cdot w$ 가 150 으로, 임의로 $B=0.4T, w=0.25m, N=1500turns$ 로 EMI를 제작할 수 있다.

이렇게 설계된 스마트 제진 장치의 수치해석 결과를 Passive-on, -off 그리고 벤치마크 문제에서 제공하고 있는 비교 대상 제어 알고리즘 결과와 비교하였다. 표 3.2.4.3은 모든 지진에 대한 최대 J값의 성능 지수 결과를 보여주고 있다.

표 3.2.4.3 성능 지수 결과 비교

Evaluation criteria	Passive-off	Passive-on	Sample (Active)	Smart passive
1. Max. base shear	1.10	1.66	1.12	1.11
2. Max. deck shear	1.56	3.56	1.00	1.09
3. Max. base moment	1.09	1.07	1.10	1.05
4. Max. deck moment	2.76	1.01	1.01	1.03
5. Max. cable deviation	0.34	0.24	0.25	0.24
6. Max. deck dis.	10.22	2.20	2.40	1.42
7. Norm base shear	1.05	5.77	1.06	1.02
8. Norm deck shear	2.07	17.60	1.00	1.00
9. Norm base moment	1.05	1.22	1.05	1.01
10. Norm deck moment	3.40	1.64	1.00	1.01
11. Norm cable deviation	0.0334	0.0250	0.0235	0.0249
12. Max. control force	0.0003	0.0025	0.0028	0.0025
13. Max. device stroke	4.46	0.96	1.05	0.66
14. Max. power	0.0018	0.0260	0.0067	0.0042
15. Total power	0.0002	0.0038	0.0007	0.0005

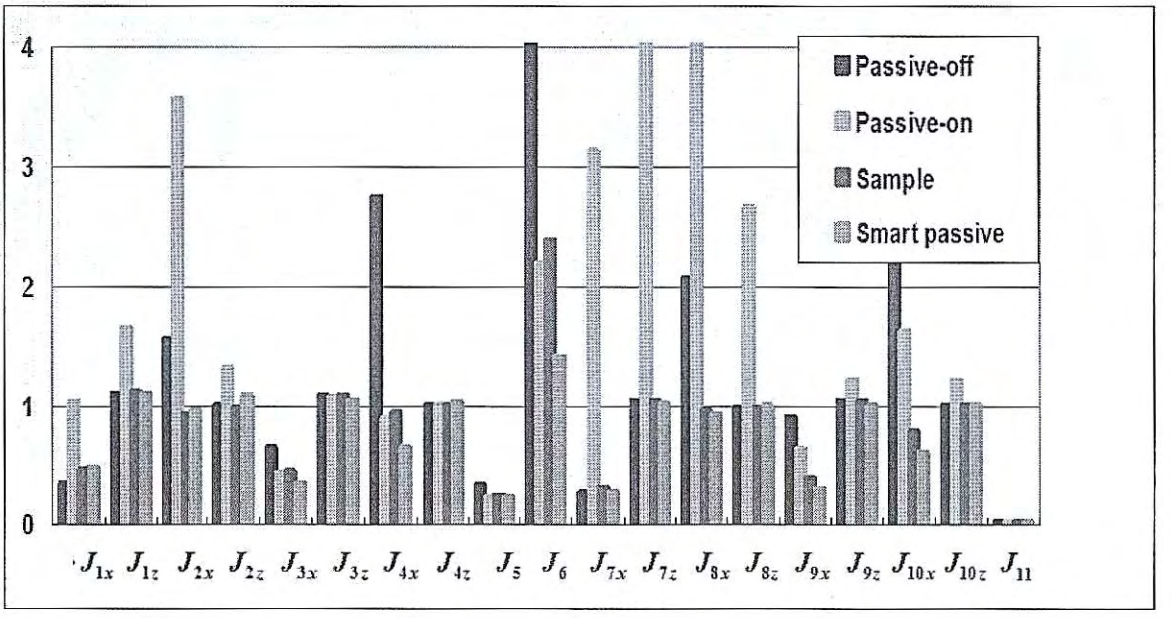


그림 3.2.4.7 성능 지수 결과 비교

결과에서 알 수 있듯이, 신개념 스마트 제진 장치는 Passive-on 그리고 -off 시스템의 경우보다는 훨씬 뛰어난 성능을 보여주었다. 이에 비해, 기존의 제어 알고리즘을 사용한 경우와는 견줄만한 유사한 성능을 보이는 것을 알 수 있다. 이는 기존 제어 알고리즘을 사용한 경우는 복잡한 제어 시스템이 고려되었음에도 불구하고, 단순한 신개념 스마트 제진 장치보다 성능이 크게 좋지 않음이 확인되었다. 즉, 본 연구에서 제안된 신개념 스마트 제진 장치가 대표적인 대형 토목구조물인 사장교에도 충분히 적용될 수 있음을 보였다. 따라서 신개념 스마트 제진 시스템이 구조물에 적절하게 설계된다면, 이를 이용하여 다양한 대형 토목구조물의 내진 성능을 향상시키는 대책으로 유용하게 사용할 수 있음을 수치적으로 검증하였다.

3 절. 진동대 실험을 통한 제진 장치의 내진 성능 평가

3.1. 축소건물모형을 이용한 신개념 스마트 제진장치의 내진 성능평가

3.1.1. 3층 축소 건물에 대한 성능평가

이번 절에서는 MR 감쇠기와 전자기유도(EMI) 시스템이 결합된 신개념 스마트 제진 장치가 설치된 3층 축소 건물에 대한 수치해석 및 성능평가 실험에 대해 설명한다.

(1) 대상 건물 모델

축소된 전단 건물 모델은 강재 (Steel)로 제작되었으며, 이때 실제적인 모델의 형상은 그림 3.3.1.1에서 보여주고 있다. 축소 건물 모델의 높이는 총 105 cm 이며, 전체 무게는 48.27 kg 이다. 추가적으로 MR 감쇠기와 EMI 시스템을 고정시키는 장치로 인해 4.07 kg이 추가되었다. 실험을 통해 얻어진 대상 구조물의 고유진동수는 2.05 Hz, 5.55 Hz, 그리고 8.41 Hz 이다.

이때, 축소 전단 건물 모델의 질량 및 강성 행렬은 다음과 같다.

$$\boldsymbol{M} = \begin{bmatrix} 20.16 & 0 & 0 \\ 0 & 16.09 & 0 \\ 0 & 0 & 15.17 \end{bmatrix} \boldsymbol{kg}$$

$$\boldsymbol{K} = \begin{bmatrix} 27130 & -14370 & 0 \\ -14370 & 29490 & -15120 \\ 0 & -15120 & 15120 \end{bmatrix} \boldsymbol{N/m}$$

또한, 감쇠행렬은 0.7%의 감쇠비를 이용한 모달 감쇠행렬을 사용하여 얻어 졌으며, 그 값은 다음과 같다.

$$C = \begin{bmatrix} 9.80 & -2.90 & -0.69 \\ -2.90 & 8.64 & -3.32 \\ -0.69 & -3.32 & 5.85 \end{bmatrix} N \cdot s/m$$

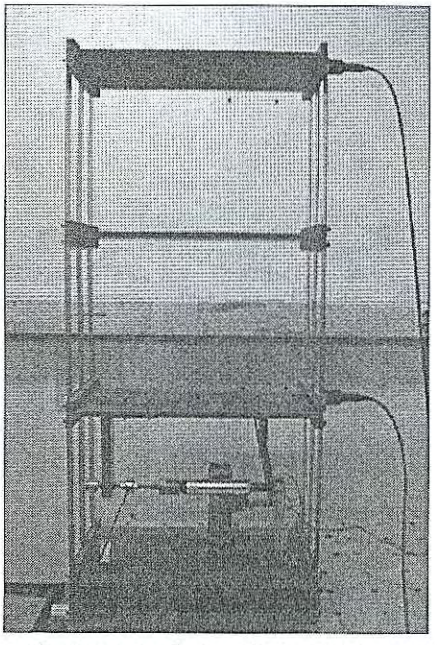


그림 3.3.1.1 축소 전단 건물 모델

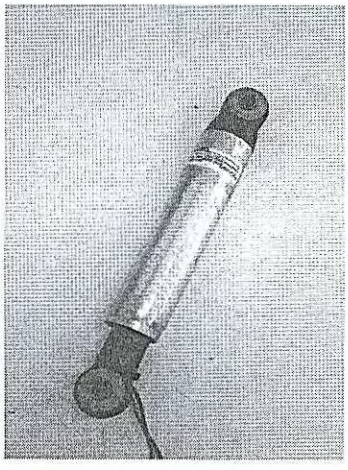


그림 3.3.1.2 MR 댐퍼 RD-1097-01

(2) MR 감쇠기

이번 실험에서 사용한 MR 감쇠기는 그림 3.3.1.2에 나타낸 바와 같은 미국 Lord 사에서 제작된 MR 감쇠기 (모델명: RD-1097-01)로써, 감쇠기의 최대 스트로크는 ± 2.9cm, 최대 감쇠력은 ± 100N, 그리고 최대 전압은 ± 10V 이다.

(3) EMI 시스템

본 실험에서 사용한 EMI 시스템은 앞의 3.1.3 절에서 설명한 소형 EMI 시스템으로 그림 3.3.1.3과 같다.

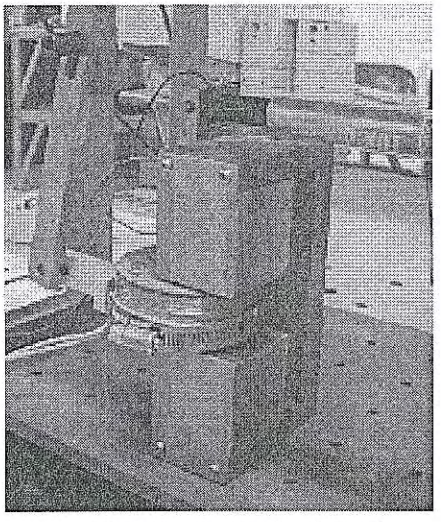


그림 3.3.1.3 EMI 시스템

(3) 계측기기

본 실험에 사용된 계측기는 다음과 같다. 먼저, 변위계는 레이저 변위계 (모델명: Keyence LK-081, LB-70, and LB-301)를 사용하였으며, 변위 측정범위는 ± 1.5 cm, ± 4 cm, 그리고 ± 10 cm이다. 이들 변위계는 대상 구조물의 상대 변위를 측정하기 위하여 바닥과 1층, 2층에 설치하였다. 가속도계는 PCB 393A03를 사용하였으며, 가속도 측정범위는 ± 5 g이며 1층과 3층에 가속도를 측정하였다. 감쇠기의 감쇠력을 측정하기 위하여 최대 측정범위가 ± 100 N을 가지는 로드셀 (모델명: Kyowa UR-A-100NSA1)를 사용하여 감쇠력을 측정하였다. EMI 시스템에 의해서 유도되는 전압과 함께 위에서 언급한 각각의 측정 장치에서 출력된 데이터는 NI DAQ Card-6062E에서 수집하여 디지털 데이터로 변환하였다.

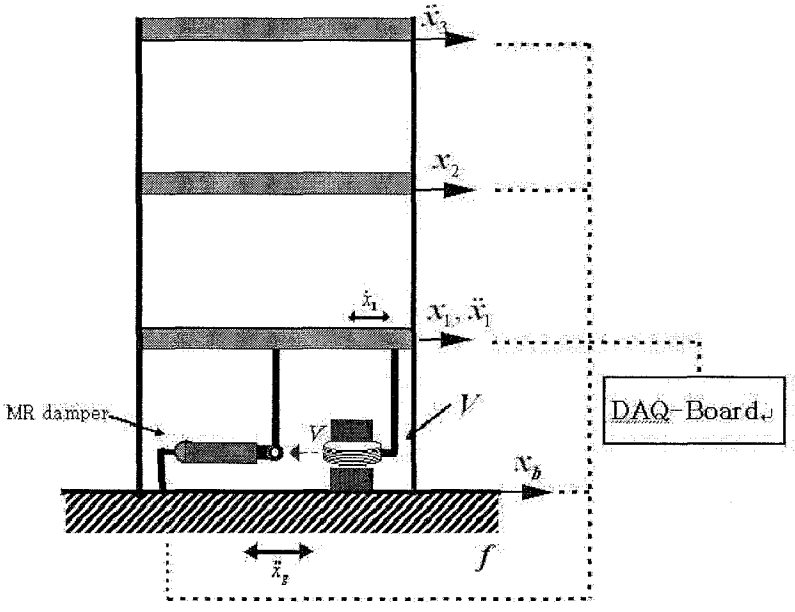


그림 3.3.1.4 전단 건물 실험을 위한 측정 시스템

(4) 외부하중

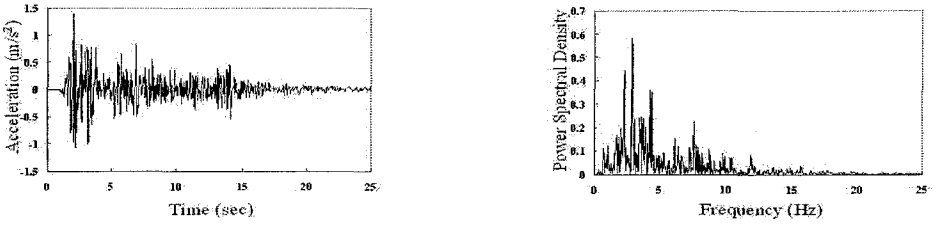
본 실험은 앞서 설명한 EMI 시스템의 특성분석을 위해 사용한 진동대를 이용하여 가진하였으며 입력하중으로는 다양한 역사지진 하중을 고려하였다.

본 실험에서 고려한 지진하중은 다음과 같으며, 실험을 위해 제작된 전단 건물 모델은 축소된 구조물이므로, 지진 하중 또한 크기와 시간 간격을 대상 구조물에 맞게 줄여주었다.

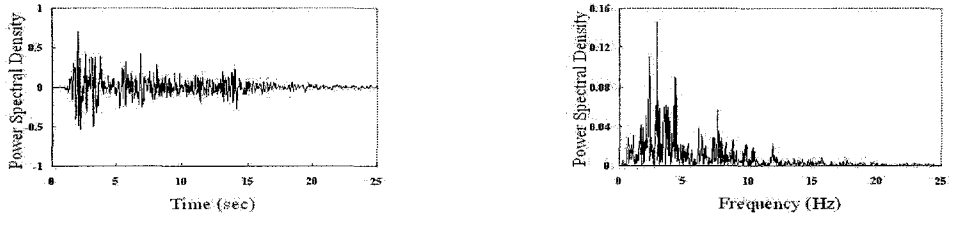
- El Centro 지진 1 (The N-S component recorded at the Imperial Valley Irrigation District substation in El Centro, California, during the Imperial Valley, California earthquake of May 18, 1940) : 실제크기의 40%, 기록율의 2 배 (PGA 0.1395 g)
- El Centro 지진 2 : 실제크기의 20%, 기록율의 2 배 (PGA 0.0697 g)
- Hachinohe 지진 (The N-S component recorded at Hachinohe City during the Tokachi-oki earthquake of May 16, 1968) : 실제크기의 30%, 기록율의 2 배 (PGA 0.0811 g)

- Kobe 지진 (The N-S component recorded at the Kobe Japanese Meteorological Agency (JMA) station during the Hyogoken Nanbu earthquake of January 17, 1995) : 실제크기의 20%, 기록율의 2 배 (PGA 0.1643 g)
- Northridge 지진 (The N-S component recorded at Sylmar County Hospital parking lot in Sylmar, California, during the Northridge, California earthquake of January 17, 1994) : 실제크기의 20%, 기록율의 2 배 (PGA 0.0843 g)

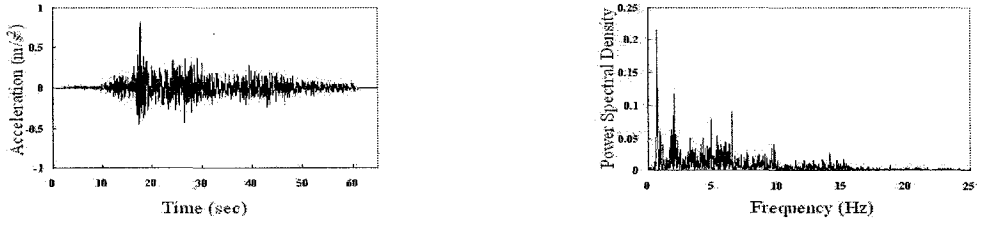
지진 하중의 시간이력곡선과 파워 스펙트럼 밀도(power spectral density: PSD)는 다음 그림 3.3.1.5와 같다.



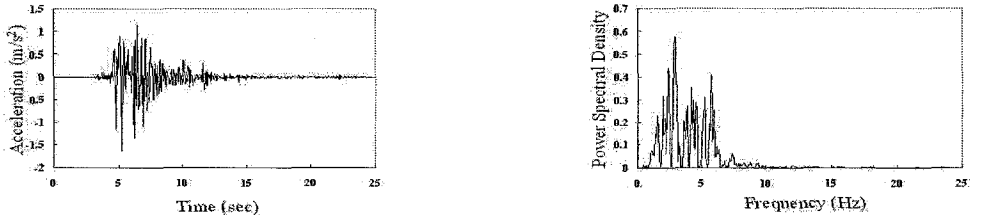
(a) 축소된 El Centro 지진 (0.4 배 PGA 와 2 배 기록율)



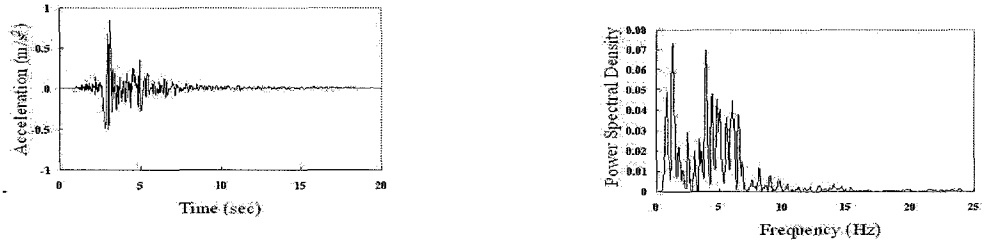
(b) 축소된 El Centro 지진 (0.2 배 PGA 와 2 배 기록율)



(c) 축소된 Hachinohe 지진 (0.3 배 PGA 와 2 배 기록율)



(d) 축소된 Kobe 지진 (0.2 배 PGA 와 2 배 기록율)



(e) 축소된 Northridge 지진 (0.1 배 PGA 와 2 배 기록율)

그림 3.3.1.5 지진 하중의 시간이력 곡선과 파워스펙트럼 밀도

(5) 수치해석

가. 운동방정식

대상 구조물에 대한 실험을 수행하기 전에, 동일한 전단 건물과 제어 시스템을 가지고 수치해석을 선행하여 수행하였다. 수치해석을 수행함으로써, EMI 시스템의 특성과 실험적인 변수들을 보다 더 잘 규명해낼 수 있게 되었다. 지진 하중을 고려한 지반의 가속도는 각 층에 외부하중을 가하는 것으로 고려하였으며, 이를 위한 운동방정식은 식 (3.3.1.1)과 같다.

$$\boldsymbol{M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = \Lambda f - M\Gamma\ddot{x}_g} \tag{3.3.1.1}$$

여기서, M, C, 그리고 K는 (3×3) 질량, 감쇠, 강성 행렬이다. $\boldsymbol{x}$는 지반에 따른 상대적인 각 층의 변위로써, 3차원 벡터이다. $\boldsymbol{f}$는 신개념 스마트 제진 장치의 제어력 벡터, $\ddot{\boldsymbol{x}}_g$는 지반의 가속도, Λ는 구조물의 제어장치의 위치벡터, Γ는 구조물의 층벡터이다. 위의 식 (3.3.1.1)을 상태공간방정식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\dot{z} = Az + Bf + E\ddot{x}_g$$
$$y = Cz + Df \qquad (3.3.1.2)$$

여기서 z는 상태벡터이며, y 는 출력벡터이다.

나. MR 감쇠기 모델

수치해석을 수행하기 위하여, 그림 3.3.1.6과 같은 MR 감쇠기 모델을 사용하였다. Spencer 등(1997)에 의해 제안된 이 모델은 Bouc-Wen 모델과 간단한 점성 감쇠 요소로 구성되어 있다. MR 감쇠기의 감쇠력은 식 (3.3.1.3)과 같이 표현할 수 있다.

$$f = c_0\dot{x} + \alpha z$$
$$\dot{z} = -\gamma|\dot{x}|z|z|^{n-1} - \beta\dot{x}|z|^n + A\dot{x} \qquad (3.3.1.3)$$
$$\dot{\alpha}(t) = -[\alpha(t) - p_1 v(t) - p_2]\eta$$

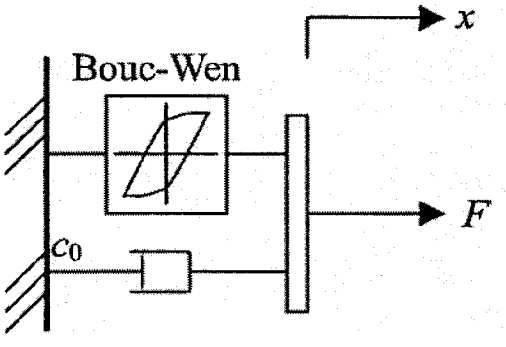


그림 3.3.1.6 Bouc-Wen 이력곡선을 사용한 MR 댐퍼 모델

본 MR 감쇠기 모델에 필요한 변수들은 표 3.3.1.1과 같이 Ramallo 등 (2002)에 의해 제안되었다.

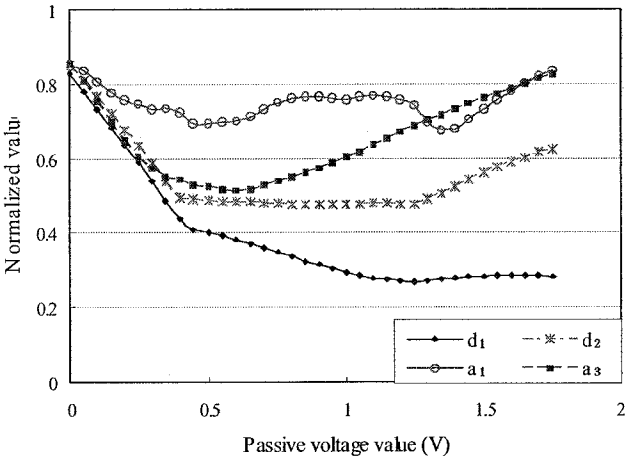
표 3.3.1.1 MR 감쇠기 모델의 변수들

변수	값	변수	값
γ	$58.662cm^{-2}$	c_0	$0.3327N \cdot s/cm$
n	1	p_1	$3111.7N/cm/V$
β	$58.662cm^{-2}$	p_2	$161.47N/cm$
A	1	η	$2\pi \times 11.0rad/s$

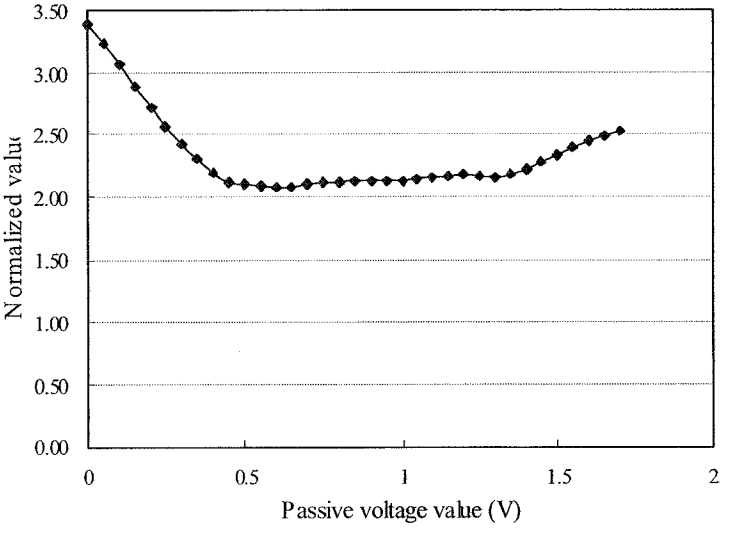
다. 최적 수동제어 시스템

MR 감쇠기의 수동 모드는 일정한 전압을 유지하는 것을 말한다. 따라서 적절한 전압값이란, 0 V부터 1.6 V까지 제어효율이 최적인 값을 말한다. 외부하중, El Centro 지진 (40%의 크기와 2배의 기록율 : PGA 0.1359g)을 사용하여 최적값을 구하였다.

그림 3.3.1.7(a)는 1층, 2층의 최대상대변위 (d_1), (d_2)와 1층과 3층의 최대가속도 (a_1), (a_3)에 따른 최적의 전압을 구하였으며, 그림 3.3.1.7(b)는 3.3.1.7(a)의 정규화된 최적의 값을 합산하여 표현하였다. 이를 통해 최적의 수동 MR 감쇠기의 전압은 0.6 V인 것을 알 수 있으며, 신개념 스마트 제진 장치의 수치적 내진 성능 평가를 위해 passive-off (0 V), passive-on (1.6 V), 그리고 최적 passive-on (0.6 V)을 비교 검증하였다.



(a) 상대변위와 가속도



(b) 응답에 따른 최적전압

그림 3.3.1.7 최적전압을 위한 정규화된 응답

라. 수치해석 결과

축소 건물 모델을 가지고 다양한 지진 하중에 대하여 수치해석을 하였고, 이를 통해 신개념 스마트 제진 장치의 효용성을 검증하였다. 신개념 스마트 제진 장치의 내진 성능 결과는 MR 감쇠기의 passive-off (0 V), passive-on (1.6 V), 그리고 optimal passive (0.6 V)의 결과와 비교하였으며, 층간 최대 변위는 표 3.3.1.2와 그림 3.3.1.8에서, 건물의 최대 응답 가속도는 표 3.3.1.3과 그림 3.3.1.9에서 비교하였

다.

표 3.3.1.2 정규화된 최대 층간 변위 응답

	El Centro (0.1395g)	El Centro (0.0697g)	Hachinohe (0.0811g)	Kobe (0.1643g)	Northridge (0.0843g)
Passive-off	0.85	0.81	0.75	0.84	0.90
Passive-on	0.78	0.94	0.62	0.40	1.11
Optimal passive	0.51	0.73	0.43	0.59	0.86
Smart passive	0.57	0.56	0.54	0.50	0.98

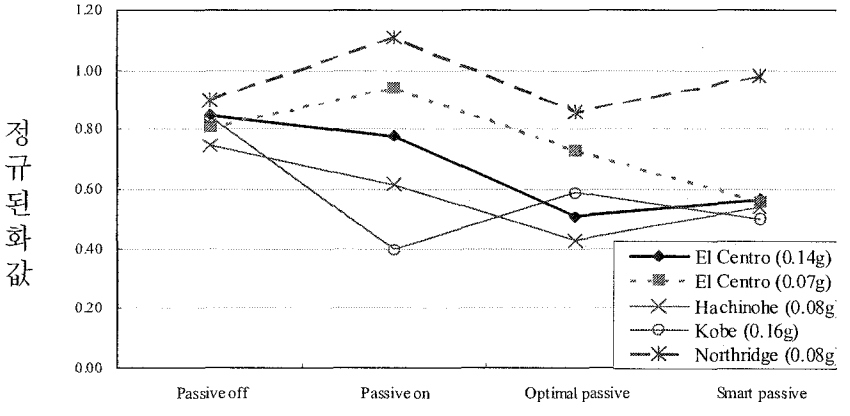


그림 3.3.1.8 정규화된 최대 층간 변위 응답

표 3.3.1.3 정규화된 최대가속도응답

	El Centro (0.1395g)	El Centro (0.0697g)	Hachinohe (0.0811g)	Kobe (0.1643g)	Northridge (0.0843g)
Passive-off	0.85	0.83	0.75	0.84	0.92
Passive-on	0.79	1.03	0.67	0.57	1.09
Optimal passive	0.77	0.90	0.60	0.64	0.85
Smart passive	0.60	0.58	0.54	0.64	0.97

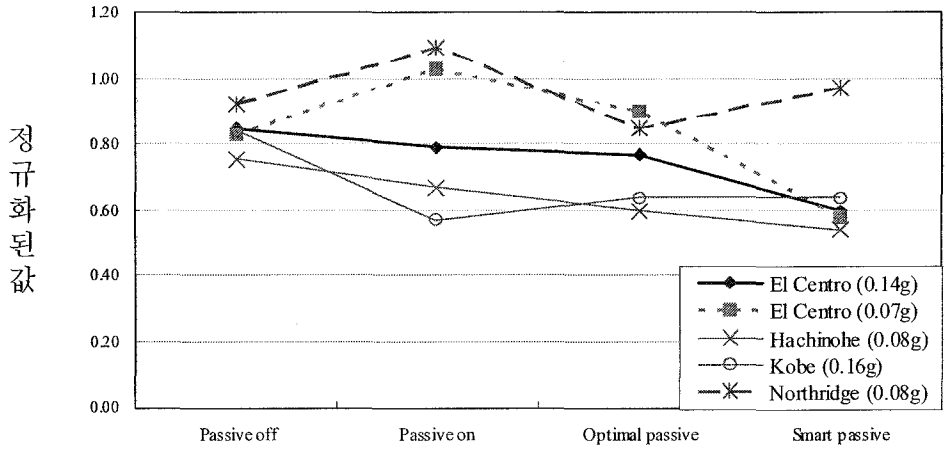


그림 3.3.1.9 정규화된 최대가속도 응답

신개념 스마트 제진 장치의 내진 성능을 수치적으로 검토한 결과, Northridge 지진을 제외하고는 모든 지진에서 뛰어난 내진 성능을 보이는 것을 알 수 있다. Northridge 지진에서는 신개념 스마트 제진 장치가 MR 감쇠기의 passive-off (0 V)와 optimal passive (0.6 V)의 성능과 유사함을 알 수 있다. 결론적으로, 수치해석을 통해 신개념 스마트 제진 장치의 내진 성능이 전반적으로 우수함을 입증하였다.

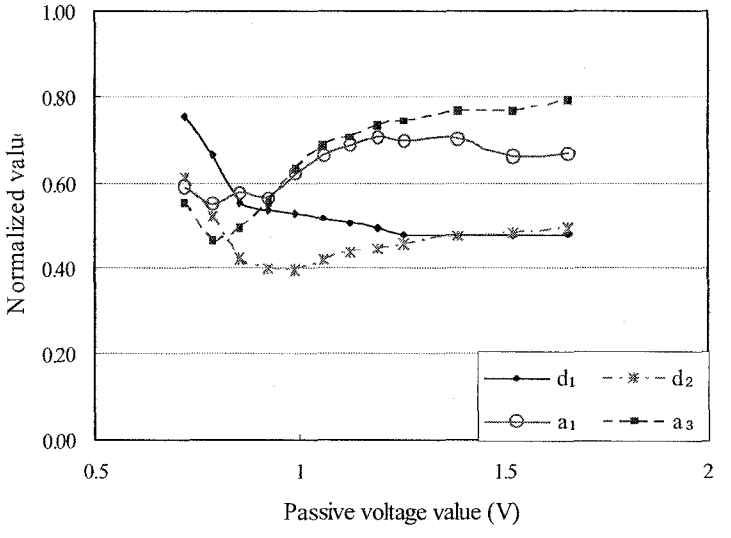
(6) 실험적 검증

가. 최적 수동제어 시스템

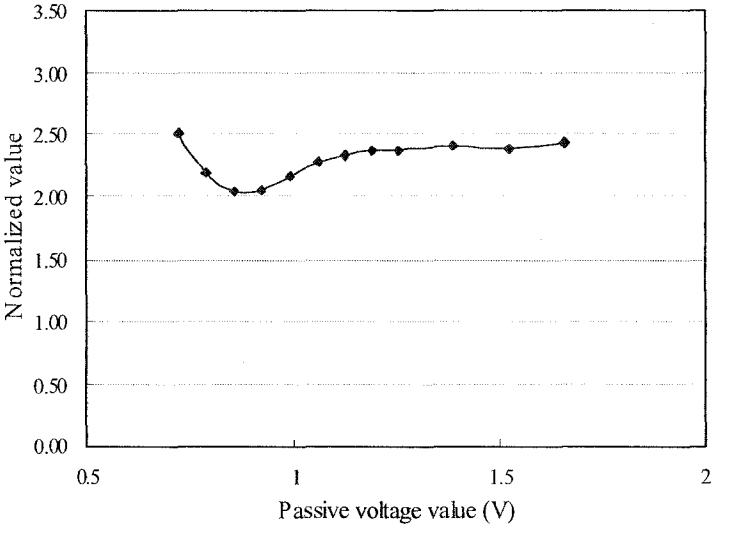
MR 감쇠기의 최적 전압을 결정하기 위하여, 앞에서 수행한 수치해석과 동일한 방법으로 0 V 부터 1.6 V까지 전압을 변화시켜 가면서 최적의 성능을 보이는 전압을 구하였다. 이때 진동대 입력 하중으로 사용한 지진 하중은 N-S component of the El Centro 지진이며, 40%의 크기로 축소되었으며, 기록율은 2배 (PGA 0.1395 g)이다.

그림 3.3.1.10(a)는 1층, 2층의 최대상대변위 (d_1), (d_2)와 1층과 3층의 최대가속도 (a_1), (a_3)에 따른 최적의 전압을 구하였으며, 그림 3.3.1.10(b)는 3.3.1.10(a)의

정규화된 최적의 값을 합산하여 표현하였다. 이를 통해 최적의 수동 MR 감쇠기의 전압은 0.85V인 것을 알 수 있으며, 신개념 스마트 제진 장치의 수치적 내진 성능 평가를 위해 passive-off (0 V), passive-on (1.6 V), 그리고 최적 passive-on (0.85 V)를 비교 검증하였다.



(a) 상대변위와 가속도



(b) 응답에 따른 최적전압

그림 3.3.1.10 최적전압을 위한 정규화된 응답

나. 실험결과

EMI 시스템의 성능 검증을 위해 먼저 제어하지 않은 경우와 비교하였다. 그림 3.3.1.11은 신개념 스마트 제진 장치의 성능을 보여주는 것으로, 2층의 상대변위, 3층의 최대가속도, EMI 시스템으로부터 나오는 전압, 제어력을 보여주고 있다. 가속도와 층간변위응답은 감쇠기가 없을 때보다 크게 감소하였다. 특히, 최대 층간변위는 23.05 mm에서 12.32 mm로 줄어들었으며, 최대가속도는 5.31 m/s^2에서 3.41 m/s^2로 줄어들었다.

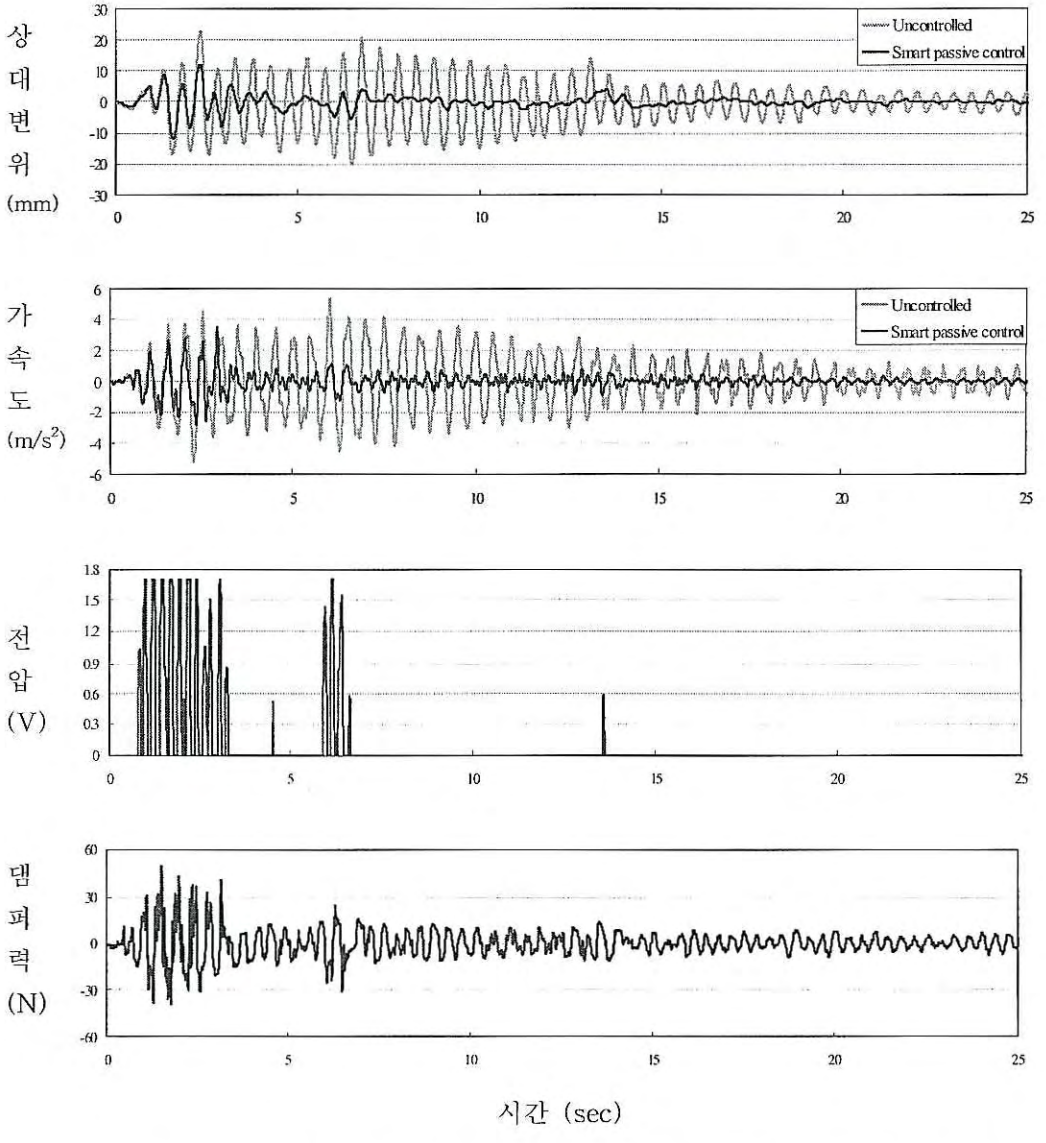


그림 3.3.1.11 스케일된 El Centro 지진 (0.1395 g)하에 실험적인 결과

다음으로 EMI 시스템과 수동제어 시스템과의 성능비교를 위해 EMI 시스템과 passive-off (0 V), passive-on (1.6 V), 그리고 optimal passive (0.85 V)를 비교하였으며, 표 3.3.1.4와 그림 3.3.1.12에서 최대 가속도 응답과 표 3.3.1.5와 그림 3.3.1.13에서 최대 변위응답을 나타내었다. 층간 최대응답에서 신개념 스마트 제진 장치가 passive-off보다 더 좋은 결과를 보여주었다. 또한 가속도 응답에서 신개념 스마트 제진 장치는 passive-on보다 더 나은 결과를 보여주었다. Northridge (0.08g) 지진과 El Centro (0.07g) 지진아래서, passive-on 경우 비제어시의 경우보다 좋지 않는 결과를 보여주고 있다. 이것은 건물의 강성을 증가시키므로, 구조물의 변위는 감소시키고, 동시에 구조물의 가속도는 증가시키기 때문이다. 실험을 통한 비교 검증 결과, 최적의 EMI 시스템은 최적의 MR 수동 시스템과 비교하여 전반적으로 유사한 성능을 보이고 있다. 그러나 다양한 지진하중에 대한 가속도응답에서 EMI 시스템은 더 작은 응답범위를 보여줌으로써 강인성이 더 우수한 것으로 판단된다.

표 3.3.1.4 정규화된 최대 층간 변위 응답

	El Centro (0.1395g)	El Centro (0.0697g)	Hachinohe (0.0811g)	Kobe (0.1643g)	Northridge (0.0843g)
Passive-off	0.77	0.48	0.50	0.86	0.90
Passive-on	0.49	0.63	0.40	0.41	0.82
Optimal passive	0.42	0.43	0.36	0.68	0.77
Smart passive	0.53	0.45	0.40	0.72	0.84

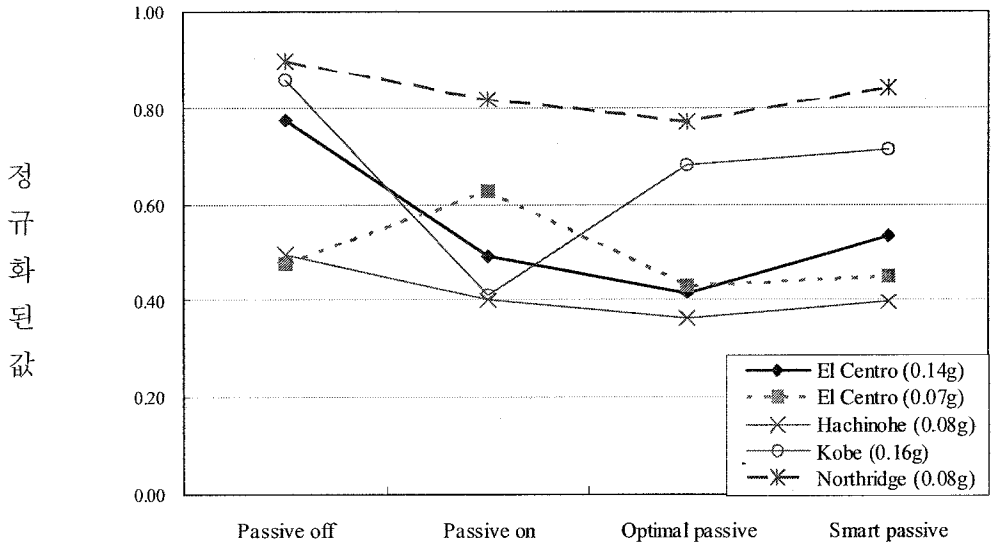


그림 3.3.1.12 정규화된 최대 층간변위 응답

표 3.3.1.5 정규화된 최대 가속도 응답

	El Centro (0.1395g)	El Centro (0.0697g)	Hachinohe (0.0811g)	Kobe (0.1643g)	Northridge (0.0843g)
Passive-off	0.72	0.47	0.45	0.71	0.72
Passive-on	0.79	1.00	0.46	0.60	1.13
Optimal passive	0.52	0.65	0.31	0.42	0.79
Smart passive	0.64	0.46	0.36	0.63	0.64

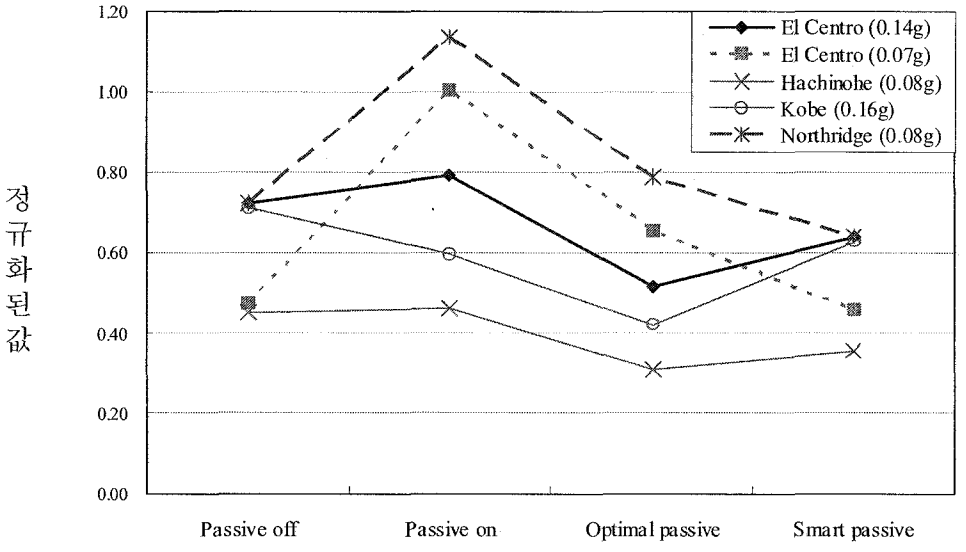


그림 3.3.1.13 정규화된 최대 가속도 응답

신개념 스마트 제진 장치의 주목할 만한 특징은 최적의 수동 MR 감쇠기와 유사한 결과를 가짐과 동시에 외부의 전원장치를 필요로 하지 않고 있다는 점이다. 표 2.1.6은 각각의 제진 시스템을 유지하기 위하여 필요한 에너지를 나타내주고 있다.

표 3.3.1.6 제어 시스템을 유지시키기 위하여 필요한 에너지

	Passive-off	Passive-on	Optimal passive	Smart passive
필요한 에너지 (mJ/sec)	0	720	96	0

(7) 소결

신개념 스마트 제진 장치의 EMI 시스템을 설계하기 위하여 최적의 코일의 감은 수를 다양한 지진 하중을 통하여 결정하였다. 수치해석에서는 대상 구조물에 맞게 축소된 지진하중을 사용하였다. 신개념 스마트 제진 장치의 성능은 모든 응답에서

우수한 성능을 보였으며, Northridge 지진에서의 응답은 Passive-off (0 V)와 최적 수동 제어와 유사하였다. 수치해석 결과, 신개념 스마트 제진 장치의 건물에 대한 내진 성능이 전반적으로 우수함을 확인하였다.

본 연구에서는 수치해석을 통해 우수성이 입증된 신개념 스마트 제진 장치의 내진 성능을 실제적으로 예비 실험을 통해 검증하였다. 이번 실험에서 신개념 스마트 제진 장치는 Passive-off와 Passive-on 그리고 최적 수동제어 시스템과 비교 검증하였다. 실험에서 사용되어진 최적 수동제어 시스템의 최적 전압은 0.85 V이며, Passive-off는 0 V, Passive-on는 1.6 V이다. 실험을 수행한 결과, 신개념 스마트 제진 장치는 Passive-off와 Passive-on보다 더 좋은 내진 성능을 보이며, 최적 수동제어 시스템과 유사한 성능을 보임을 확인하였다.

하지만, 실제 구조물에서 최적 수동제어 시스템은 최적 전압을 구하는데 어려움이 있는 것이 사실일 뿐만 아니라, 신개념 스마트 제진 장치는 자체적으로 MR 감쇠기에 필요한 전압 또는 전류를 만들어내기 때문에 외부전원을 필요로 하지 않다는 측면에서 최적 수동제어 시스템의 단점을 보완하였다고 볼 수 있다. 그러므로 외부전원 공급 장치의 불필요성, 외부하중에 의존하여 구동할 수 있는 매커니즘적 특성, 그리고 실제적인 성능의 우수성 등을 전반적으로 고려한다면, 신개념 스마트 제진 장치가 구조물의 내진 성능 향상 대책으로 유망하다는 결론을 도출할 수 있다.

3.1.2. 6층 축소 건물에 대한 성능평가

이번 절에서는 MR 감쇠기와 전자기유도(EMI) 시스템이 결합된 신개념 스마트 제진 장치가 설치된 6층 축소 건물에 대한 수치해석 및 성능평가 실험에 대해 설명한다.

(1) 대상 건물 모델

6층 시험구조물은 각층의 후판이 4개의 기둥으로 지지되어 있으며, 총 중량은 약 8톤이다. 가로× 세로× 높이가 2,100mm× 1,200mm× 3,500mm 이다. 그림 3.3.1.14와

같이 시험구조물은 대형 진동대 위에 고정되어 있으며, MR 감쇠기는 바닥층과 1층 사이에 약 16° 기울어진 대각선 방향으로 설치되었다. MR 감쇠기의 전원공급장치로 사용되는 EMI 시스템은 대형 진동대 바닥층과 1층 사이에 그림 3.3.1.14와 같이 설치되었다. 여기서 EMI 시스템의 성능을 향상시키기 위하여 그림 3.3.1.15와 같이 1:4 지렛대를 설치하여, 코일의 움직이는 속도를 증폭시켰다. 시험구조물의 1층에 레이저 변위계 (KEYENCE LB-301)를 설치하여 층간 변위를 계측하였고, EMI 시스템 또한 레이저 변위계 (KEYENCE LK-081)을 설치하여 EMI 시스템의 코일이 움직이는 변위를 계측하였다. 또한 각층 후판에 가속도계를 부착하여 제어 전·후의 응답을 계측하였으며, MR 감쇠기의 제어력을 계측하기 위하여 로드셀 (CAS LS-2)을 감쇠기의 한 끝단에 설치하였다. 본 연구에서는 그림 3.3.1.14에서 보는 시험구조물의 수평 좌우방향에 대한 응답만을 고려하였다.

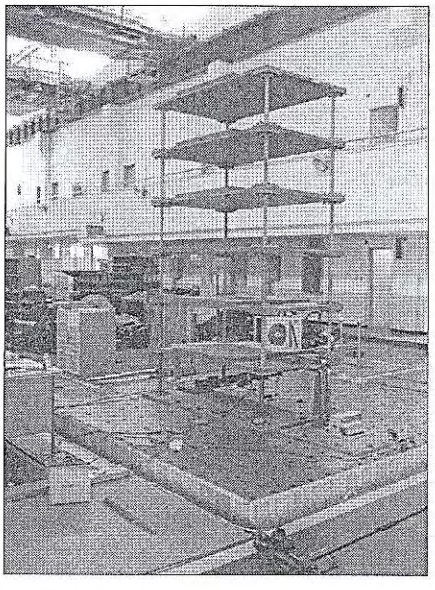


그림 3.3.1.14 대형 진동대 실험

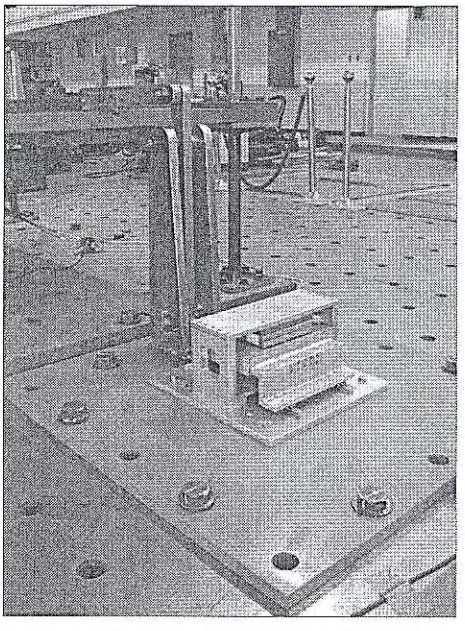


그림 3.3.1.15 설치된 EMI 시스템

시험구조물의 동적 특성치를 구하기 위해 댐퍼가 설치되지 않은 상태에서의 SI (Systems identification)를 수행하였다. 도면으로부터 시험구조물의 질량 및 강성행렬을 예측하고, 랜덤 하중이 가해지는 대형 진동대 시험을 통해 고유진동수 및 진동형별 감쇠계수를 산출하였다. 최종적으로 시험결과와의 비교를 통하여 질량,

감쇠 및 강성 행렬을 완성하였다. 표 3.3.1.7은 시험구조물의 고유진동수와 감쇠계수이다.

표 3.3.1.7 시험구조물의 고유진동수와 감쇠계수

Property \ Mode	1	2	3	4	5	6
Natural frequencies (Hz)	2.39	7.22	11.79	15.92	19.26	21.52
Damping ratios (%)	0.5	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2

그림 3.3.1.16은 6층 가속도 응답의 전달함수로써 시험을 통해 구한 값과 SI를 통해 얻어진 시험구조물의 동적 특성치를 예측한 값을 통해 얻어진 전달함수와 거의 일치하는 것을 보여준다. 즉, 얻어진 시험 구조물의 동적 특성치가 구조물의 동적 거동을 잘 모사해 주는 것을 확인하였다.

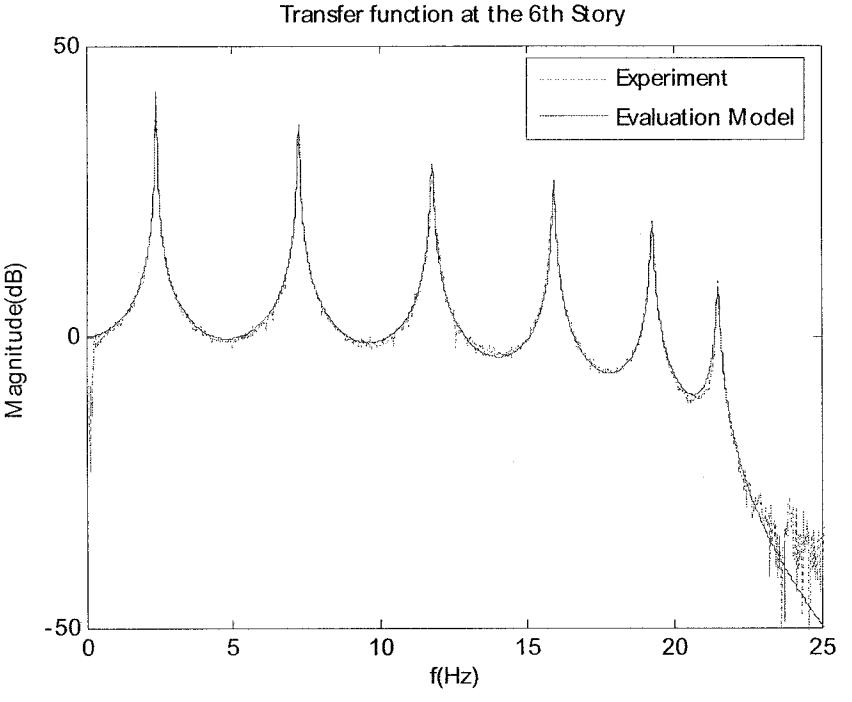


그림 3.3.1.16 6층 가속도 응답의 전달함수

(2) 설계제어력 산정

먼저 본 시험구조물의 설계 제어력을 수치 시뮬레이션을 통해, 기 제작된 1ton급 MR 감쇠기가 적합한지 확인해 보았다. 사용된 기반 가진력은 El Centro 지진(1940년)으로 시험구조물의 고유진동수 및 안전성을 고려하여 지진파형을 1:2.6으로 시간 스케일하고, 최대 가속도 크기를 0.1g 또는 0.2g가 되도록 수정하였다. MATLAB 프로그램을 이용한 수치 시뮬레이션의 도식도는 그림 3.3.1.17과 같다. 그림 3.3.1.18은 PGA가 0.2g 인 El Centro 지진 하에서의 MR 감쇠기가 필요로 하는 제어력과 속도의 시간 이력 곡선이다. 수치 시뮬레이션을 통해 산정된 설계 제어력은 설계 속도 60 mm/s 이며, 이때 설계 제어력은 약 7,000 N 이상이 필요하다는 것은 확인하였다. 즉, 본 연구에서 기 제작된 그리고 시험구조물에 설치된 1ton급 MR 감쇠기가 수치 시뮬레이션을 통해 산정된 설계제어력을 만족시키며, 본 시험구조물을 제어하기에 충분하다는 것을 확인하였다.

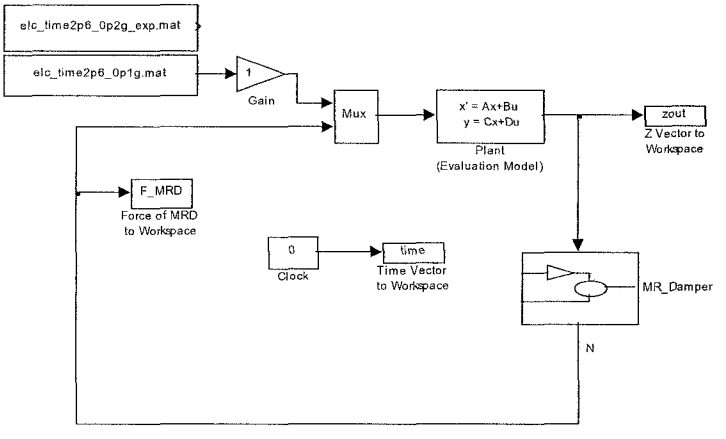


그림 3.3.1.17 수치 시뮬레이션 도식도

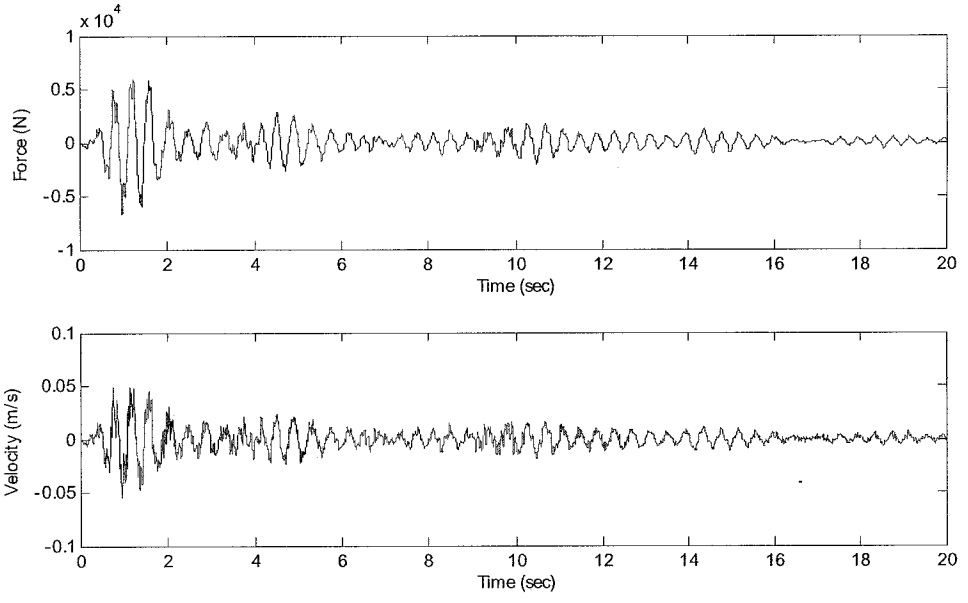
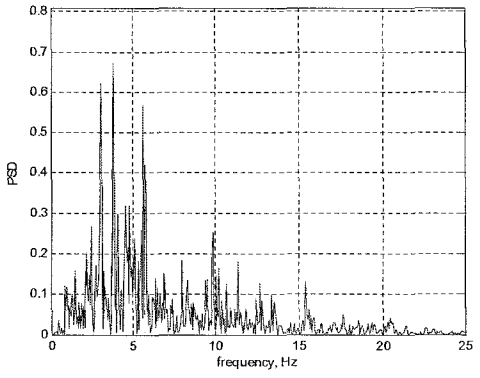


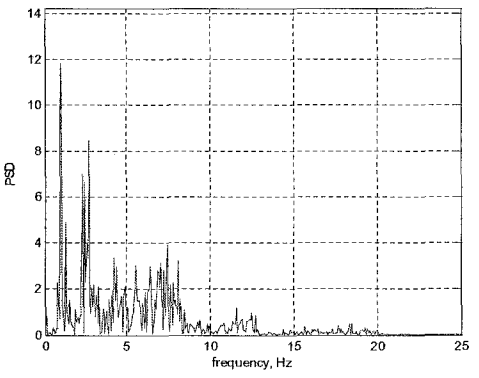
그림 3.3.1.18 0.2g El Centro 지진 하에서의 필요 제어력 및 속도 시간 이력 곡선

(3) 외부가진 하중

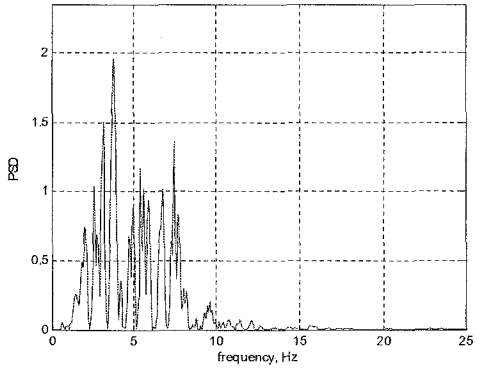
스마트 제진 장치의 특성 및 성능을 평가하기 위해, 다음과 같은 다양한 특성을 갖는 지반 가진시험을 수행하였다. 먼저 RMS가 0.03 g 를 갖는 랜덤파형 가진을 수행하였다. 두 번째로, 시험구조물의 고유진동수와 안전성을 고려하여, 특정 주파수를 갖는 정현파형 가진(2Hz, 2.3Hz, 5Hz, 7Hz, 그리고 12Hz)을 수행하였다. 마지막으로, 5가지의 역사 지진파형에 대한 시험을 수행하였다. 사용된 지진 파형은 El Centro, Hachinohe, Kobe, Mexico, 그리고 Northridge 지진이다. 시험구조물의 고유진동수와 안전성을 고려하여 지진파형을 1:2.6으로 시간 스케일하고, 최대 가속도 크기를 0.1g 그리고 0.2g가 되도록 수정하였다. 사용된 5개의 지진파형은 서로 다른 주파수 특성을 가지고 있다. 각 지진에 대한 주파수 특성은 그림 3.3.1.19에 나타내었다.



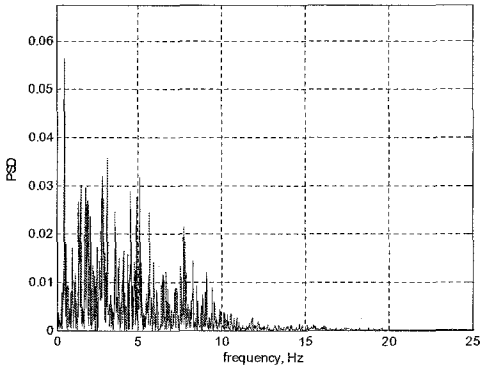
(a) El Centro (0.2g)



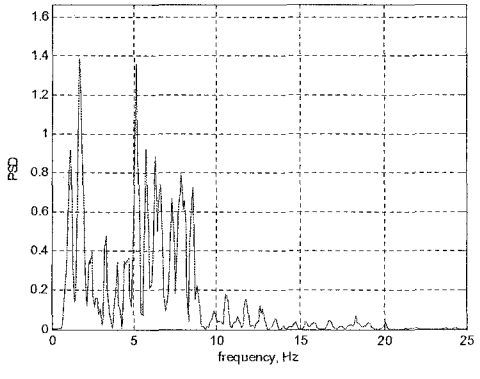
(b) Hachinohe (0.2g)



(c) Kobe (0.2g)



(d) Mexico (0.2g)



(e) Northridge (0.2g)

그림 3.3.1.19 5가지 축소된 역사 지진의 주파수 특성

(4) 반능동 제어 알고리즘

본 연구에서 개발된 스마트 제진 장치의 경우, 수치 시뮬레이션을 통해 알고리즘이 필요 없으면서도 효과적인 성능을 보여주는 것을 이미 확인하였다. 본 장에서는 대형 진동대 시험을 통해 그 성능을 비교 평가하기 위해 기존의 간단한 되먹임 제어 알고리즘을 사용하여 그 성능을 확인하고자 한다. 비교 대상 제어 알고리즘으로는 최대 에너지 소산 알고리즘 (MEDA, Maximum Energy Dissipation Algorithm)과 MHF (Modulated Homogenous Friction)을 사용하였다. 각 제어 알고리즘에 대한 내용은 다음과 같다.

가. 최대 에너지 소산 알고리즘(MEDA)

최대 에너지 소산 알고리즘은 McClamroch 등(1995)이 제안한 Decentralized Bang-Bang 알고리즘을 변형 시킨 것으로, Lyapunov 함수를 식 (3.3.1.4)과 같이 전체 구조물의 상대적인 진동 에너지로 가정하여 진동 에너지를 가장 빠르게 소산시키도록 제어 장치를 구동 시킨다 (Jansen 과 Dyke 2000).

$$K = \frac{1}{2}\eta^T K \eta + \frac{1}{2}\dot{\eta}^T M \dot{\eta} \qquad (3.3.1.4)$$

Lyapunov 안정성 이론에 따라 반능동 제어 장치에 전달되는 입력전압은 식 (3.3.1.5)와 같이 나타난다.

$$V = V_{\max} H(-\dot{\eta}\, \varphi F_d) \qquad (3.3.1.5)$$

즉, 원하고자 하는 MR 감쇠기의 입력 전원을 계산하기 위해서는 MR 감쇠기가 설치된 위치에서의 속도와 MR 감쇠기의 제어력을 되먹임하는 것이 필요한 간단한 알고리즘이다. 본 대형 진동대 실험에서는 1층의 변위와 MR 감쇠기의 제어력을 측정하여 MEDA 알고리즘을 구성하였다.

나. MHF

MHF (Modulated Homogeneous Friction) 알고리즘은 마찰 감쇠기를 위하여 Inaudi (1997)가 제안한 알고리즘이나 마찰 감쇠기와 MR 감쇠기의 거동상의 유사성으로 인하여 MR 감쇠기에 대한 제어 알고리즘으로 사용할 수 있다. 이 알고리즘은 감쇠기의 변형이 증가 하면 감쇠비를 증가시킴으로써 MR 감쇠기의 에너지 능력을 증가 시키는 접근 방식을 취하고 있다. 이러한 개념을 바탕으로 MHF 알고리즘은 최대 변위가 일어나는 시점을 기준으로 감쇠력을 산정하며, 다음 최대 변위가 일어날 때까지 제어 장치에 일정한 감쇠비를 준다. 따라서 감쇠력은 반능동 제어 장치의 변위에 비례하게 산정되며 MR 감쇠기에 주어지는 입력 전압은 식 (3.3.1.6)를 통하여 결정된다.

$$V = V_{\max} H(F_{d_n} - |F_d|) \tag{3.3.1.6}$$

이 때 최대 변위가 일어날 때마다 새롭게 산정되는 최적 감쇠력 F_{d_n}은 식 (3.3.1.7)과 같이 나타난다.

$$F_{d_n} = g_n [P[v_d(t)]] \tag{3.3.1.7}$$

여기서 g_n은 양의 상수이며, 함수 $P[\cdot]$는 $s = \{\min x \geq 0 | \Delta_i(t-s) = 0\}$을 만족하는 s 를 사용하여 식 (3.3.1.8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P[\Delta_i(t)] = \Delta_i(t-s) \tag{3.3.1.8}$$

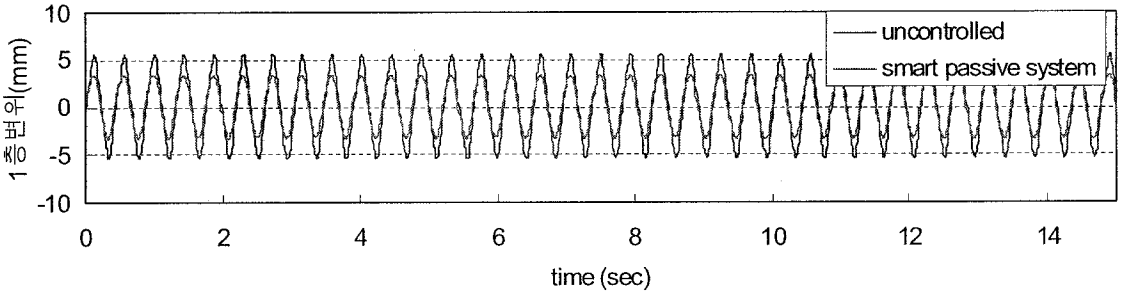
즉, MHF 알고리즘도 마찬가지로 원하고자 하는 MR 감쇠기의 입력 전원을 계산하기 위해서는 MR 감쇠기가 설치된 위치에서의 속도와 MR 감쇠기의 제어력을 되먹임하는 것을 g_n의 변화에 따라 최적의 효과를 낼 수 있도록 하는 간단한 알고

리즘이다. 본 대형 진동대 실험에서는 1층의 변위와 MR 감쇠기의 제어력을 측정하여 계수 g_n을 변화시켜가며 최적의 MHF 알고리즘을 구성하였다. 본 연구에서는 여러 번의 시도 후에 최적 계수 g_n을 1,500 으로 결정하였다.

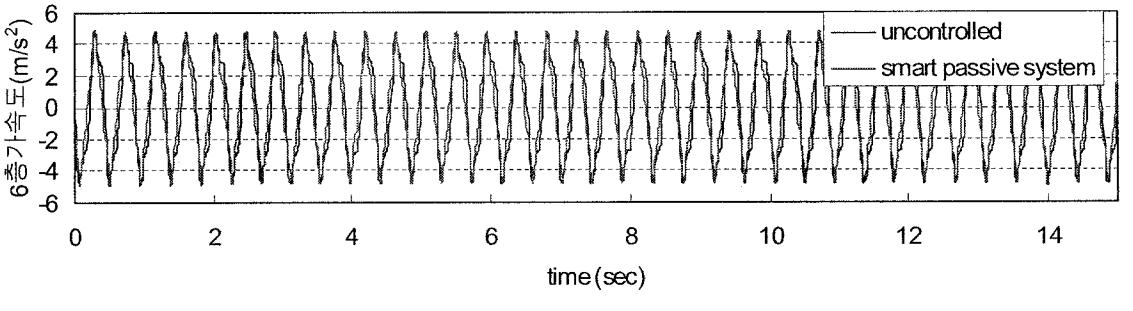
(5) 성능평가 실험

가. 스마트 제진장치의 성능평가

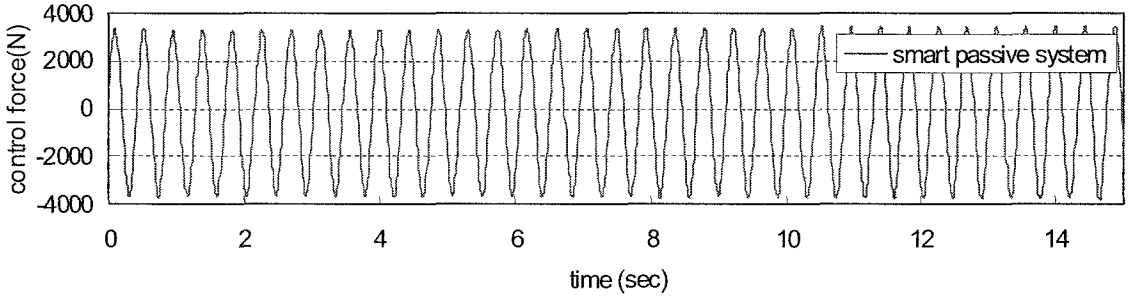
먼저, 시험구조물의 고유진동수와 안전성을 고려하여, 특정 주파수를 갖는 정현파형 가진(2Hz, 2.3Hz, 5Hz, 7Hz, 그리고 12Hz)을 수행한 결과이다. 그림 3.3.1.20은 2.3Hz 주파수와 0.03g 가속도레벨을 갖는 정현파형 가진 시에 MR 감쇠기가 설치된 위치에서의 변위와 지반(진동대) 가속도에 대한 최상층 6층에서의 가속도 응답, MR 감쇠기의 제어력, 그리고 EMI 시스템의 변위 및 유도되는 전류의 시간 이력 곡선을 보여준다.



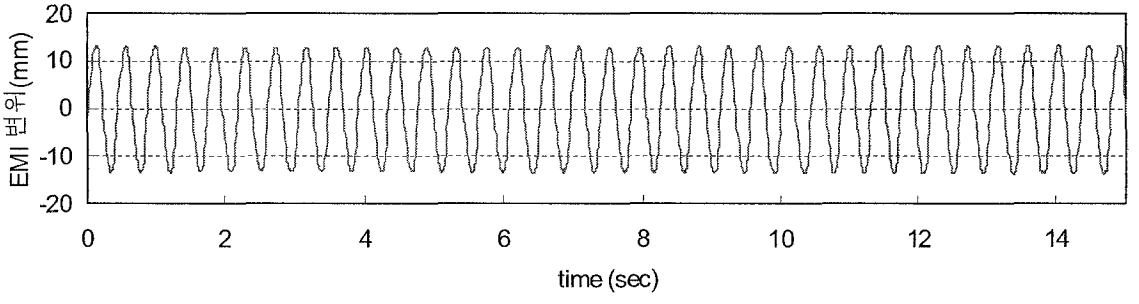
(a) 1층 변위



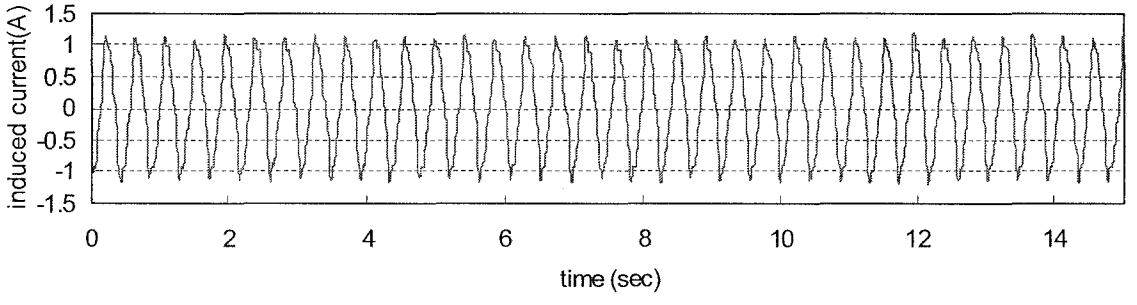
(b) 6층 가속도



(c) MR 감쇠기의 제어력



(d) EMI 시스템 변위



(e) EMI 유도전류

그림 3.3.1.20 정현파 (2.3Hz, 0.03g)에 대한 시간 이력 곡선

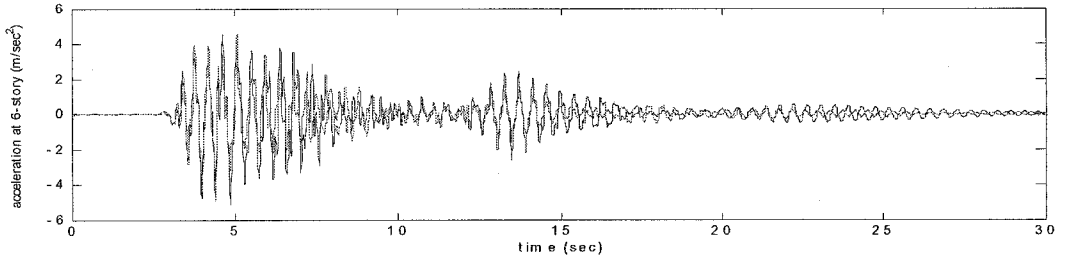
스마트 제진 장치의 설치로 인해 시험구조물의 1층 변위 응답을 줄이면서, 6층 가속도 응답은 제어하지 않은 경우와 비슷한 결과를 보이고 있다. EMI 성능 향상을 위해 설치된 변위 증폭 장치(1:4)로 인해 EMI의 변위가 1층의 변위보다 4배 정도 증가하는 효과를 가져 오는 것 또한 확인할 수 있다.

다른 주파수를 갖는 정현파형 가진(2Hz, 2.3Hz, 5Hz, 7Hz, 그리고 12Hz)의 실험 결과를 표 3.3.1.8에 정리하였다. 모든 수치들은 비제어시 값으로 정규화시킨 값이다. 1차 고유진동수에 맞춘 진동대 가진 시험의 경우, 1층의 변위는 줄어든 반면, 6층 및 최대 층 가속도는 비제어시와 비슷한 결과를 보였다. 2차 및 3차 고유진동수에 맞춘 진동대 가진 시험의 경우, 모든 응답이 비제어시에 비해 향상되는 것을 확인하였다.

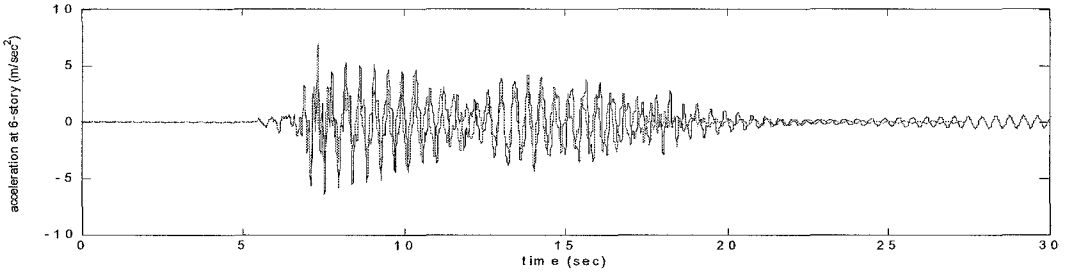
표 3.3.1.8 정현파형 가진 시 실험 결과

지반 진동대 가진	1층 변위	6층 가속도	최대 층 가속도
2Hz (0.05g)	0.60	0.79	0.79
2.3Hz (0.03g)	0.58	**1.04**	**1.04**
5Hz (0.05g)	0.95	**1.04**	**1.26**
7Hz (0.1g)	0.24	0.29	0.57
12Hz (0.1g)	0.79	0.66	0.83

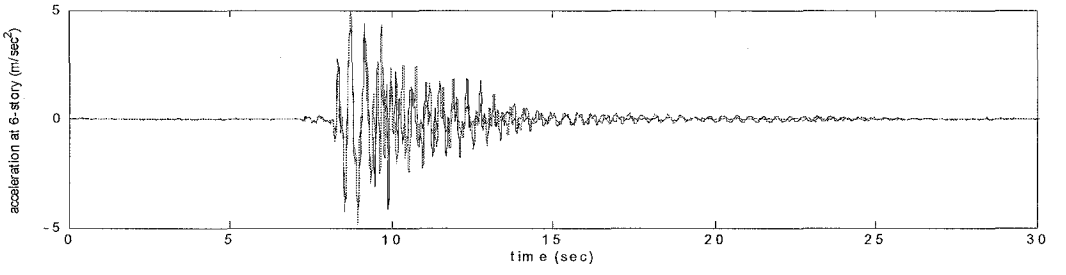
정현파형 가진시험 후 5가지 역사 지진에 대한 시험을 수행하였다. 사용된 지진 파형은 El Centro, Hachinohe, Kobe, Mexico, 그리고 Northridge 지진으로, 시험구조물의 고유진동수와 안전성을 고려하여 지진파형을 1:2.6으로 시간 스케일하고, 최대 가속도 크기를 0.1g 그리고 0.2g가 되도록 수정하였다. 대표적인 시험 결과로서 각 지진파형(최대 가속도 0.2g)에 대한 시험구조물 6층에서 가속도 응답을 그림 3.3.1.21에 보였다.



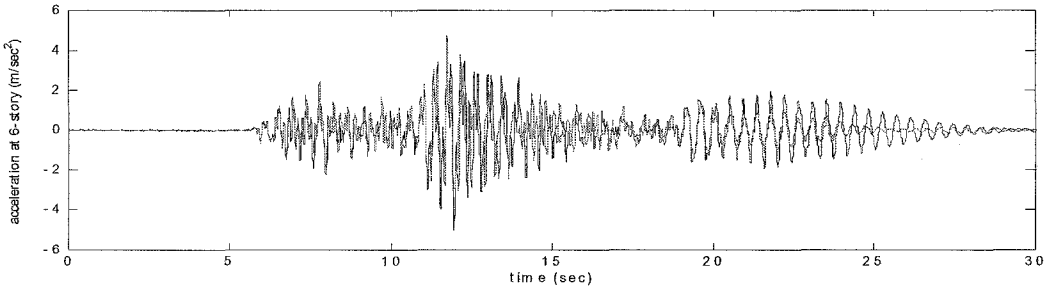
(a) El Centro 지진 (PGA: 0.2g)



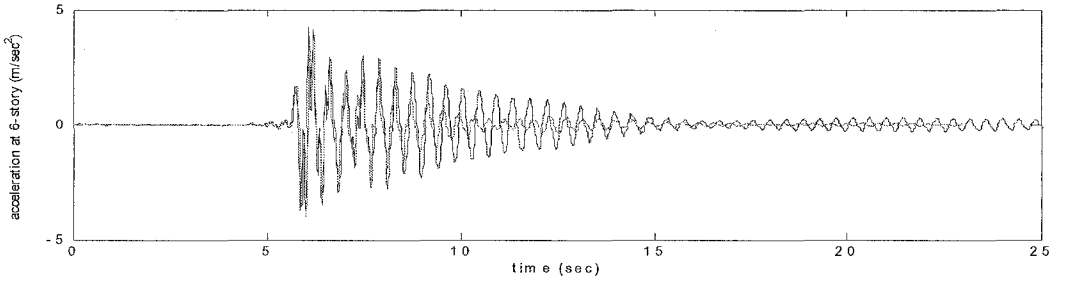
(b) Hachinohe 지진 (PGA: 0.2g)



(c) Kobe 지진 (PGA: 0.2g)



(d) Mexico지진 (PGA: 0.2g)

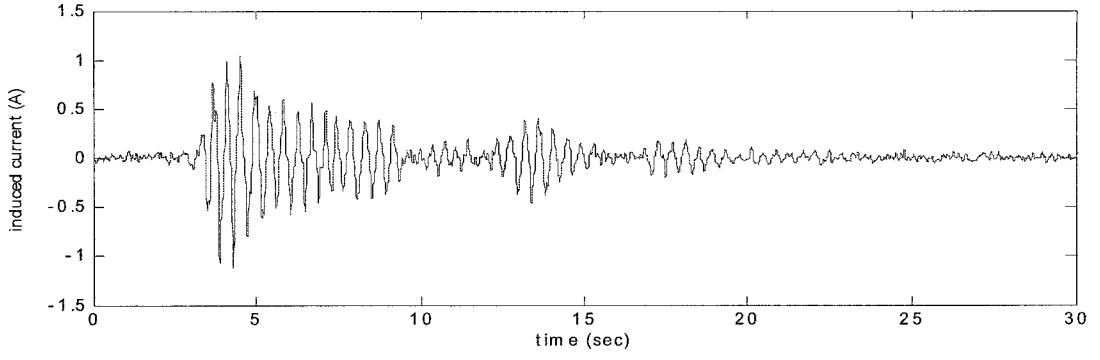


(e) Northridge 지진 (PGA: 0.2g)

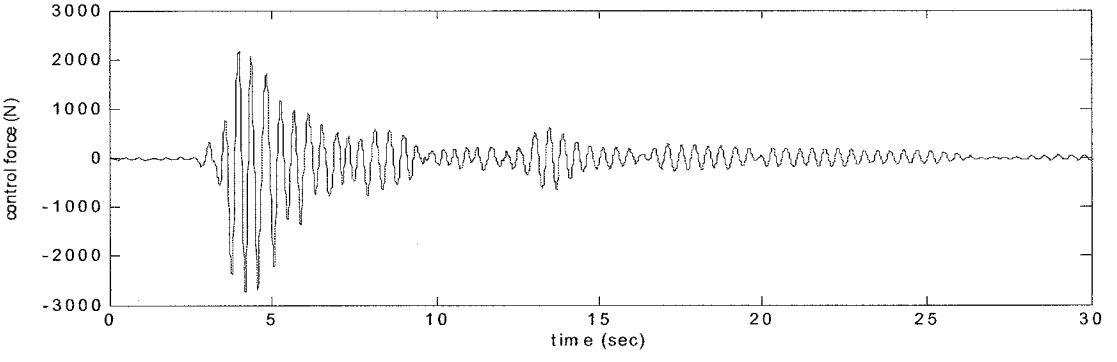
그림 3.3.1.21 모든 지진(PGA: 0.2g)에 대한 6층 가속도 시간 이력 곡선

6층 가속도 응답의 시간 이력곡선에서 살펴볼 수 있듯이, 비제어경우보다 스마트 제진 장치를 설치했을 때, 응답이 확연히 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 그림 3.3.1.22와 3.3.1.23은 El Centro와 Kobe 지진 하에서 EMI 시스템에서 유도되는 전류와 MR 감쇠기의 제어력의 시간 이력 곡선이다. 구조물의 응답을 저감시키기 위

해 MR 감쇠기를 구동시키기 위해 필요로 하는 전원을 EMI 시스템을 통해 충분히 얻어질 수 있음을 알 수 있다.

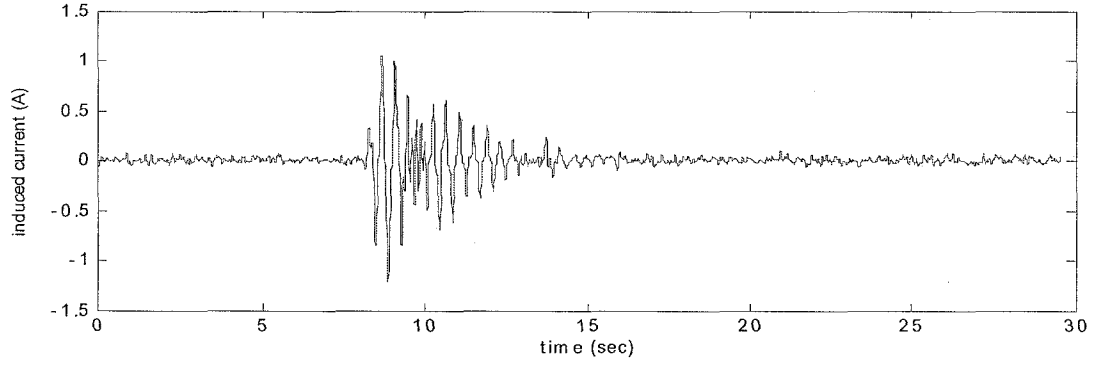


(a) EMI 유도 전류

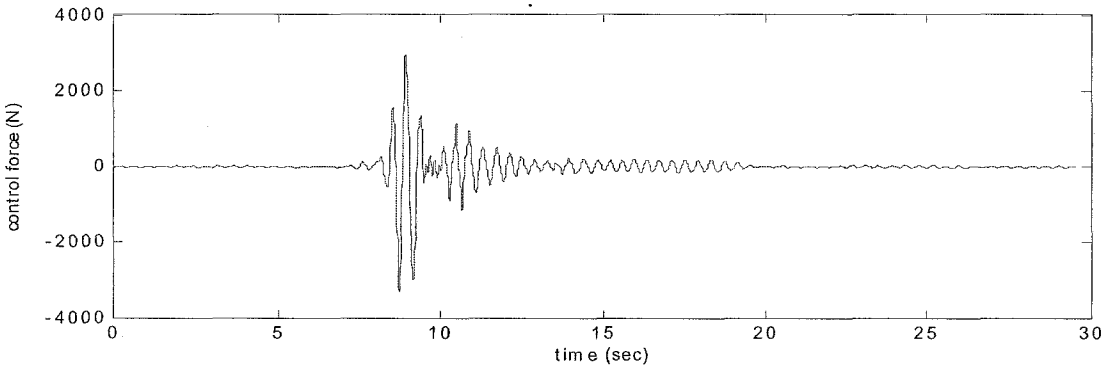


(b) MR 감쇠기의 제어력

그림 3.3.1.22 El Centro (PGA: 0.2g) 지진 하에 발생되는 EMI 유도 전류와 MR 감쇠기의 제어력



(a) EMI 유도 전류



(b) MR 감쇠기의 제어력

그림 3.3.1.23 Kobe (PGA: 0.2g) 지진 하에 발생되는 EMI 유도 전류와 MR 감쇠기의 제어력

모든 지진 가진 하에 시험 구조물 1층에서의 변위, 6층에서의 가속도 및 최대 층 가속도를 비제어시 값으로 정규화시켜 표 3.3.1.9에 정리하였다.

모든 지진파형에 대해 스마트 제진 장치 설치로 인해 시험구조물의 변위진동레벨이 약 21% ~ 50% 정도 감소하는 것을 확인할 수 있다. 6층 가속도는 Kobe 지진의 경우를 제외하고는 대부분 응답이 감소하였다. Kobe 지진은 가진 주파수 성분이 MR 감쇠기가 설치된 시험구조물의 고유진동수에 근접한 성분이 있기 때문이라 생각된다.

표 3.3.1.9 지진 가진 시 실험 결과

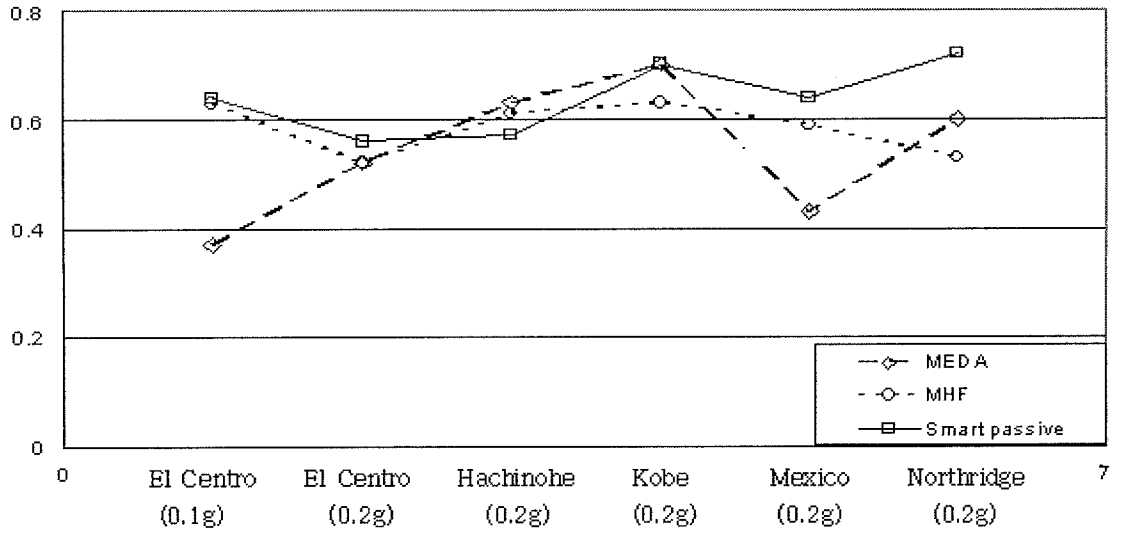
지진 가진	1층 변위	6층 가속도	최대 층 가속도
El Centro (0.1g)	0.64	0.85	0.86
El Centro (0.2g)	0.56	0.96	0.96
Hachinohe (0.1g)	0.50	0.82	0.82
Hachinohe (0.2g)	0.57	0.90	0.92
Kobe (0.1g)	0.78	0.99	**1.03**
Kobe (0.2g)	0.70	**1.09**	**1.13**
Mexico (0.1g)	0.66	0.60	0.78
Mexico (0.2g)	0.64	0.58	0.86
Northridge (0.1g)	0.79	0.82	0.92
Northridge (0.2g)	0.72	0.87	0.96

나. 제어알고리즘을 사용한 반능동 제어와의 비교

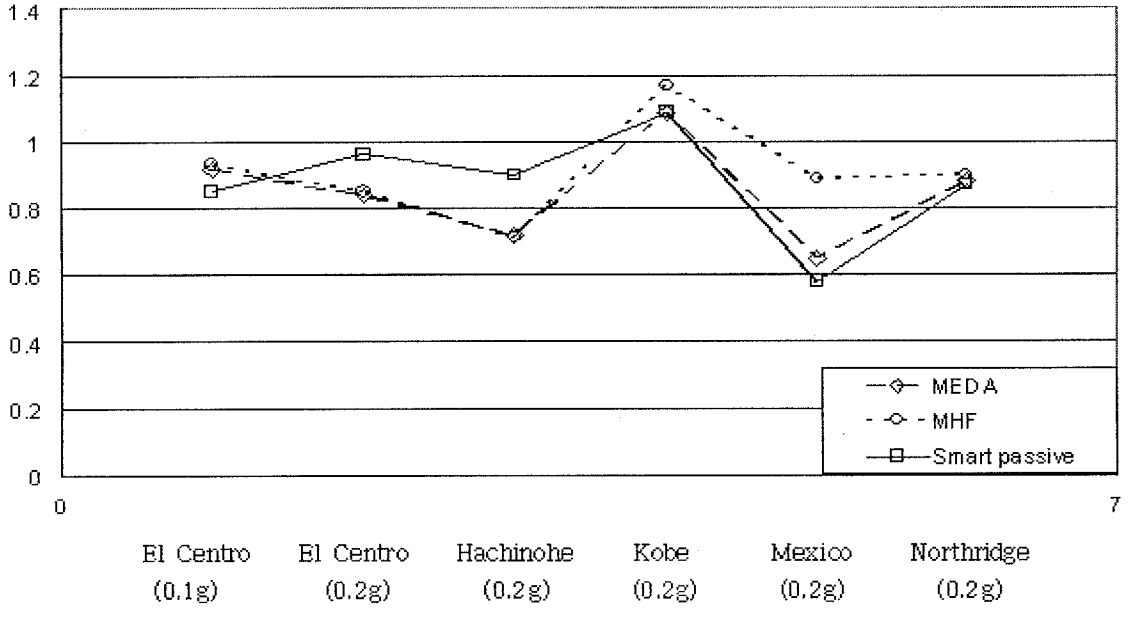
구조물의 응답을 피드백하여 사용하는 기존의 제어 알고리즘을 사용한 방법과 본 연구에서 개발된 센서 및 제어 알고리즘이 전혀 필요없는 신개념 스마트 제진 장치와의 실험 결과를 서로 비교하고자 한다. 여기서 사용된 제어 알고리즘은 앞에서 간단히 설명한 최대 에너지 소산 알고리즘(MEDA)와 MHFA 이다. 다양한 역사 지진 가진 하에서의 시험 구조물의 1층 변위, 6층 가속도, 그리고 최대 층 가속도를 비제어시 값으로 정규화시켜 표 3.3.1.10과 같이 정리하였다. 그리고 최대 MR 감쇠기의 제어력은 시험 구조물의 무게(80,000N)에 대해 정규화시킨 값을 사용하였다. 이를 그래프로 나타내면 그림 3.3.1.24와 같다.

표 3.3.1.10 지진 가진 시 실험 결과

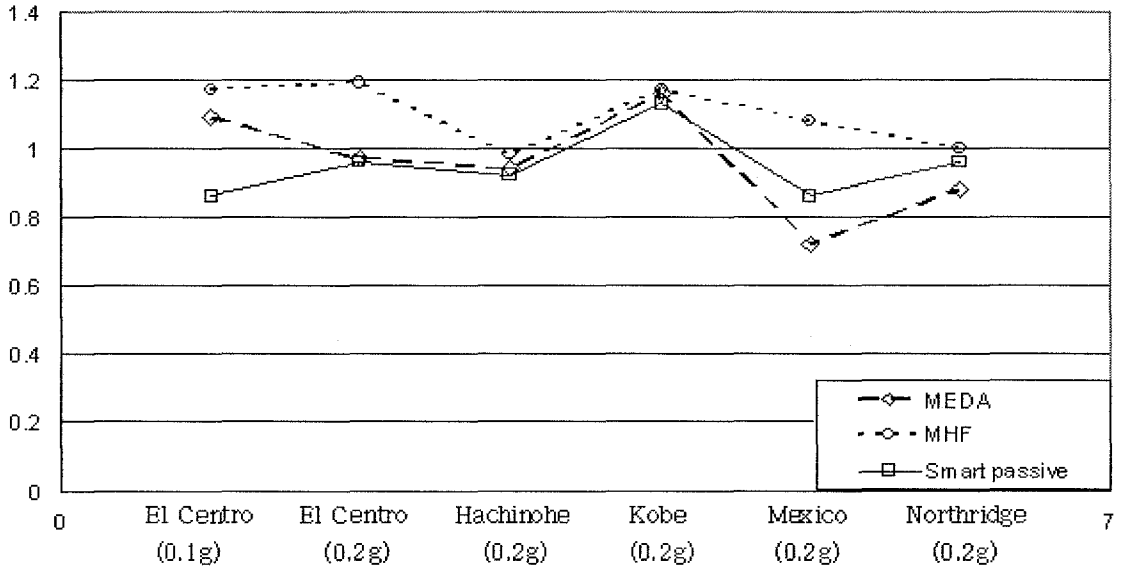
지진 가진	방법	1층 변위	6층 가속도	최대 층 가속도	최대 제어력
El Centro (0.1g)	MEDA	0.37	0.92	**1.09**	0.0653
	MHF	0.63	0.93	**1.17**	0.0655
	Smart passive	0.64	0.85	0.86	0.0150
El Centro (0.2g)	MEDA	0.52	0.84	0.97	0.0703
	MHF	0.52	0.85	**1.19**	0.0814
	Smart passive	0.56	0.96	0.96	0.0338
Hachinohe (0.2g)	MEDA	0.63	0.72	0.94	0.0749
	MHF	0.61	0.71	0.98	0.0992
	Smart passive	0.57	0.90	0.92	0.0396
Kobe (0.2g)	MEDA	0.70	**1.09**	**1.16**	0.0793
	MHF	0.63	**1.17**	**1.17**	0.0826
	Smart passive	0.70	**1.09**	**1.13**	0.0414
Mexico (0.2g)	MEDA	0.43	0.65	0.72	0.0583
	MHF	0.59	0.89	**1.08**	0.0904
	Smart passive	0.64	0.58	0.86	0.0260
Northridge (0.2g)	MEDA	0.60	0.88	0.88	0.0590
	MHF	0.53	0.90	1.00	0.0758
	Smart passive	0.72	0.87	0.96	0.0369



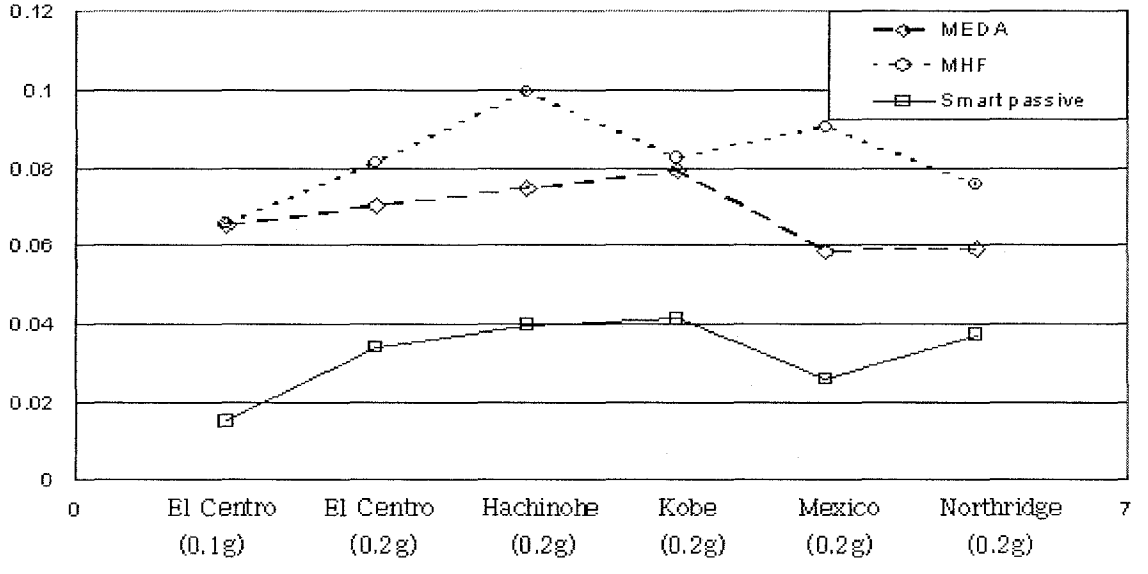
(a) 정규화된 1층 변위



(b) 정규화된 6층 가속도



(c) 정규화된 최대 층 가속도



(d) 정규화된 최대 제어력

그림 3.3.1.24 결과 비교

(6) 소결

실험을 통한 비교 검증 결과, 개발된 스마트 제진 장치의 성능이 센서를 통해 응답을 피드백하고, 이를 컴퓨터를 통한 제어 알고리즘을 사용했을 때와 전반적으로 유사한 성능을 보이고 있다. 1층의 변위 응답의 경우, MR 감쇠기의 입력 전원으로 on(3A)-off(0A)가 아닌 응답의 변화에 따라 입력 전원이 결정되기 때문에, 기존의 제어 알고리즘을 사용했을 경우보다는 성능이 뛰어나지 않다. 그렇지만, 다양한 지진하중에 대한 가속도응답에서 스마트 제진 장치는 더 작은 응답 변위를 보여줌으로써 강인성이 더 우수한 것으로 판단된다. 특히 신개념 제진 장치의 특징인 견줄만한 성능을 가짐과 동시에 외부의 전원장치를 필요로 하지 않다는 점이다.

3.2. 축소교량모형을 이용한 신개념 스마트 제진장치의 내진 성능평가

이번 절에서는 MR 감쇠기와 전자기유도(EMI) 시스템이 결합된 신개념 스마트 제진 장치가 설치된 축소 교량 모형에 대한 수치해석 및 성능평가 실험에 대해 설명한다.

3.2.1. 대상구조물

신개념 스마트 제진장치의 성능을 파악하기 위하여 축소 교량을 대상으로 실험을 수행하였다. 진동대 위에 설치된 축소교량은 마포대교를 상사하여 만들어졌으며 그림 3.3.2.1에 나타난 바와 같다.

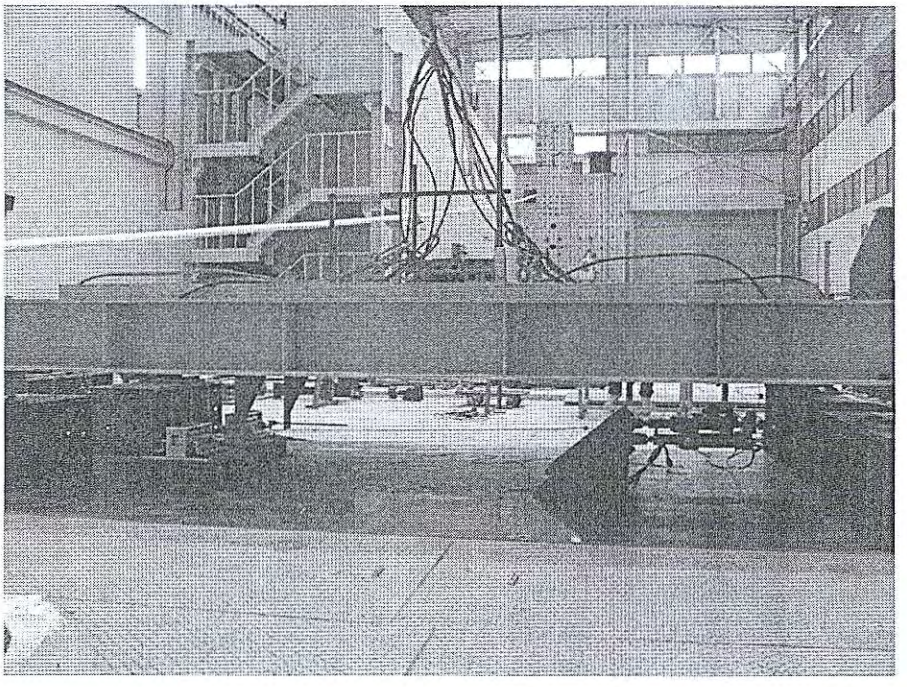


그림 3.3.2.1 축소교량의 모습

표 3.3.2.1에는 축소모형의 상사율을 보이고 있다. 먼저 진동대의 크기를 고려하여 교량의 기하학적 축소율을 1/5로 결정하였다. 다음으로 교량의 지진거동에서 가장 중요한 변수인 가속도를 1/1로 상사시키면 상사법칙에 따라 나머지 상사율이 결정된다. 대상교량 상판의 총중량은 약 12.74 MN으로 모형교량의 중량은 101.9kN이

다.

표 3.3.2.1 교량 모형에 적용된 상사율

변수	기호	상사율(s=5)
길이	L	1/s
시간	t	$1/\sqrt{s}$
질량	M	$1/s^3$
변위	d	1/s
가속도	a	1/1

교량의 변위를 표현하기 위하여 고무받침을 제작하여 설치하였다(그림 3.3.2.2 참조).

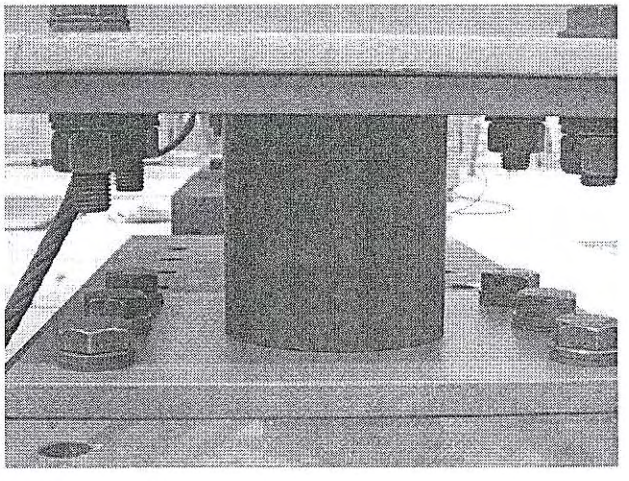


그림 3.3.2.2 RB 고무받침

3.2.2. MR 감쇠기

본 실험에서 사용한 MR 감쇠기는 본 과제 중에 개발한 10kN급 MR 감쇠기로 진동대 바닥과 교량 상판 사이에 2개를 설치하였다(그림 3.3.2.3).

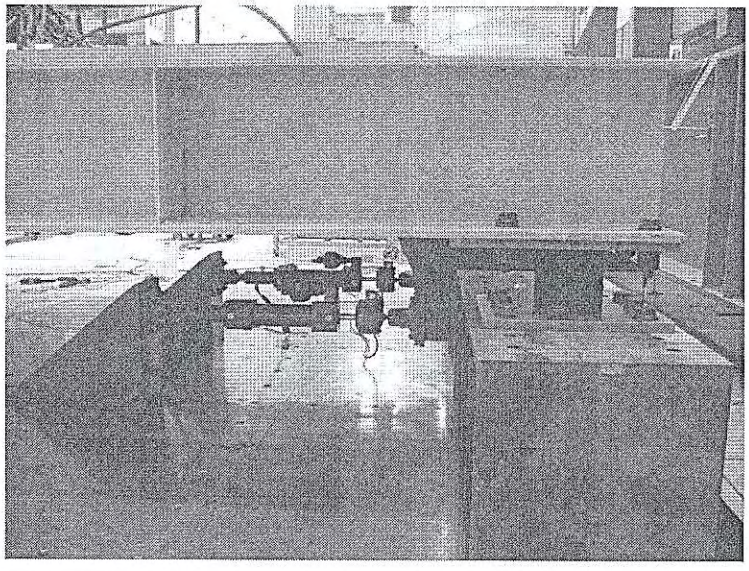


그림 3.3.2.3 MR 감쇠기

3.2.3. EMI 시스템

본 실험에서 사용한 EM 시스템은 본 과제 중에 개발한 대형 EMI 시스템으로 진동대 바닥과 교량 상판 사이에 2개를 설치하였다(그림 3.3.2.4).

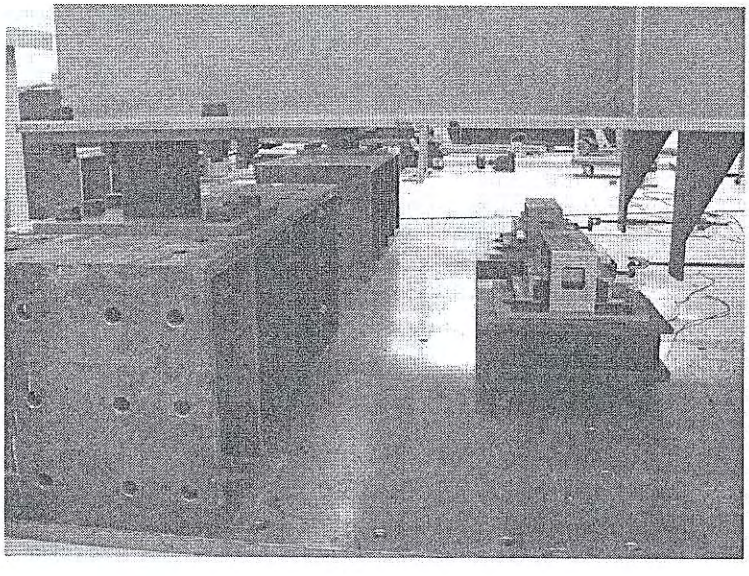


그림 3.3.2.4 EMI 시스템

3.2.4. 진동대

본 실험은 현대건설기술연구소의 대형구조실험동에 설치되어 있는 1방향 대형진동대를 사용하여 수행하였다. 진동대의 평면 크기는 5m x 3m이며 최대적재중량은 300kN이다. 진동대는 수평방향의 유압가력기에 의해 가진되며 최대 입력가속도는 1g이고 최대변위 및 속도는 각각 100mm와 50cm/sec이다. 진동대 가동 중 발생하는 진동이 연구소 주변의 구조물에 전파되는 문제를 방지하기 위하여 진동대의 기초블럭은 3개의 에어스프링에 의해서 지반과 격리된다. 표 3.3.2.2에 진동대의 제원을 나타내었다.

표 3.3.2.2 진동대 제원(현대건설기술연구소)

평면크기	5m x 3m
시험체 최대 중량	300kN
진동대 중량	100kN
가진 방향	1축
최대 입력 변위	±100mm
최대 입력 속도	50cm/sec
최대 입력 가속도	1.0 g
최대 전도모멘트	500kN-m
가진 주파수 대역	DC-30Hz

3.2.5. 계측항목

실험 데이터 측정항목은 교량모형의 상대변위, 가속도, MR 감쇠기의 감쇠력, EMI 시스템의 유도전류이다. 그림 3.3.2.5와 같이 계측센서를 설치하여 각각을 계측하였다.



그림 3.3.2.5 계측센서의 설치

3.2.6. 입력 가진 하중

본 실험에서는 El Centro, Kobe, Northridge, Hachinoe의 4개의 역사지진을 사용하였다.

3.2.7. 실험결과

실험결과를 다음과 같이 정리하였다.

- 교량의 상대변위 실험결과(비제어시에 대해 정규화): 그림 3.3.2.6, 표 3.3.2.3
- 교량의 가속도 실험결과(비제어시에 대해 정규화): 그림 3.3.2.7, 표 3.3.2.4

실험을 통한 비교 검증 결과, 개발된 스마트 제진 장치는 교량의 상대변위를 상당히 감소시킴을 확인할 수 있었다. 또한 대체적으로 교량의 가속도 또한 감소시켰다. 수동제어 제진장치의 경우와 비교했을 때, 상대변위는 비슷하거나 대체적으로 훌륭한 결과를 제시했고, 가속도의 경우 월등한 성능을 보임을 확인 할 수 있었다.

각 지진하중에 대한 주요 결과의 시간이력을 다음과 같이 나타내었다.

- 교량의 상대변위 시간이력(El Centro): 그림 3.3.2.8
- 교량의 가속도 시간이력(El Centro): 그림 3.3.2.9
- MR 감쇠력 시간이력(El Centro): 그림 3.3.2.10

- EMI 시스템 유도전류 시간이력(El Centro): 그림 3.3.2.11

- 교량의 상대변위 시간이력(Kobe): 그림 3.3.2.12
- 교량의 가속도 시간이력(Kobe): 그림 3.3.2.13
- MR 감쇠력 시간이력(Kobe): 그림 3.3.2.14
- EMI 시스템 유도전류 시간이력(Kobe): 그림 3.3.2.15

- 교량의 상대변위 시간이력(Northridge): 그림 3.3.2.16
- 교량의 가속도 시간이력(Northridge): 그림 3.3.2.17
- MR 감쇠력 시간이력(Northridge): 그림 3.3.2.18
- EMI 시스템 유도전류 시간이력(Northridge): 그림 3.3.2.19

- 교량의 상대변위 시간이력(Hachinoe): 그림 3.3.2.20
- 교량의 가속도 시간이력(Hachinoe): 그림 3.3.2.21
- MR 감쇠력 시간이력(Hachinoe): 그림 3.3.2.22
- EMI 시스템 유도전류 시간이력(Hachinoe): 그림 3.3.2.23

표 3.3.2.3 교량의 상대변위 실험결과(비제어시에 대해 최대값 정규화)

가진 하중	신개념 스마트 제진	수동제어
El Centro	0.6108	0.7253
Kobe	0.5113	0.5340
Northridge	0.4544	0.4310
Hachinoe	0.7301	0.8360

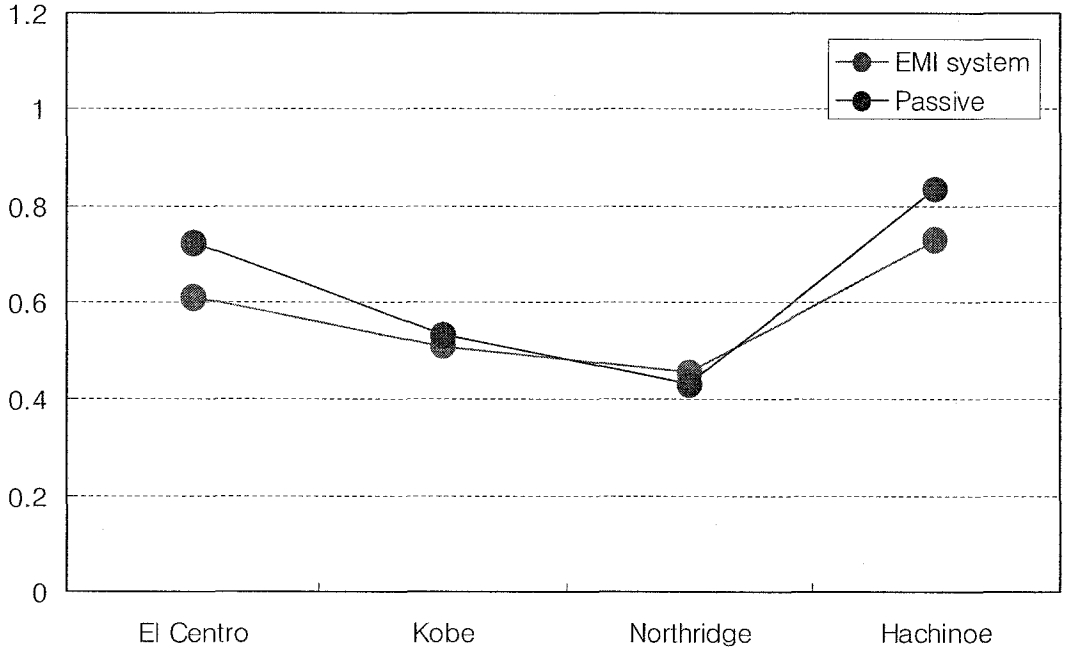


그림 3.3.2.6 교량의 상대변위 실험결과(비제어시에 대해 최대값 정규화)

표 3.3.2.4 교량의 가속도 실험결과(비제어시에 대해 최대값 정규화)

가진 하중	신개념 스마트 제진	수동제어
El Centro	0.9009	1.0975
Kobe	1.0260	1.3489
Northridge	0.4641	0.5172
Hachinoe	0.8893	1.1622

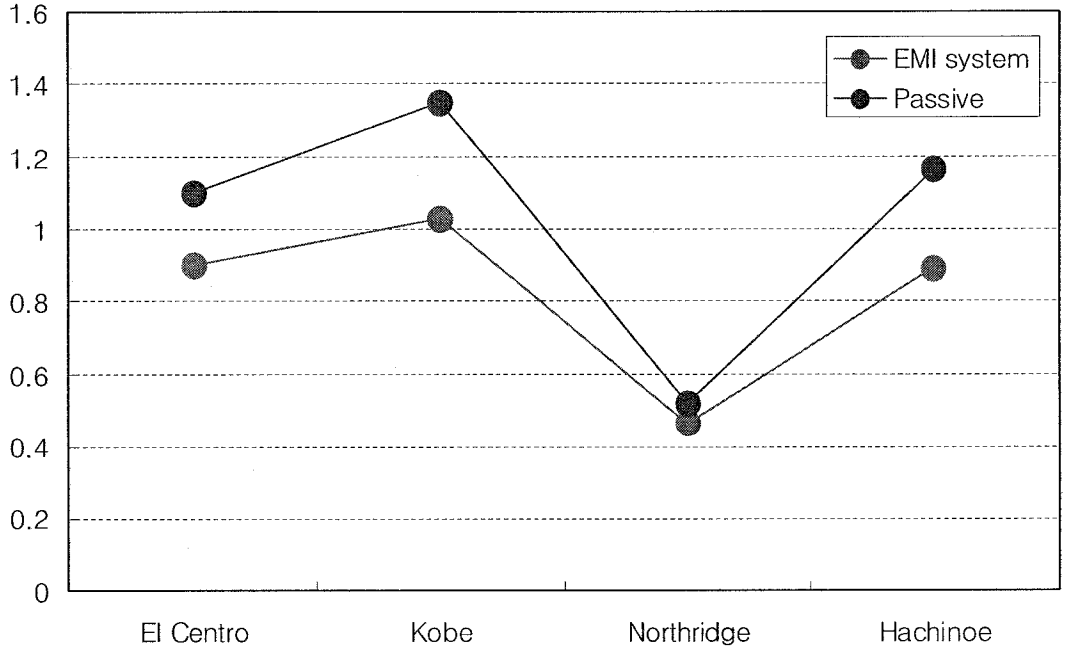


그림 3.3.2.7 교량의 가속도 실험결과(비제어시에 대해 최대값 정규화)

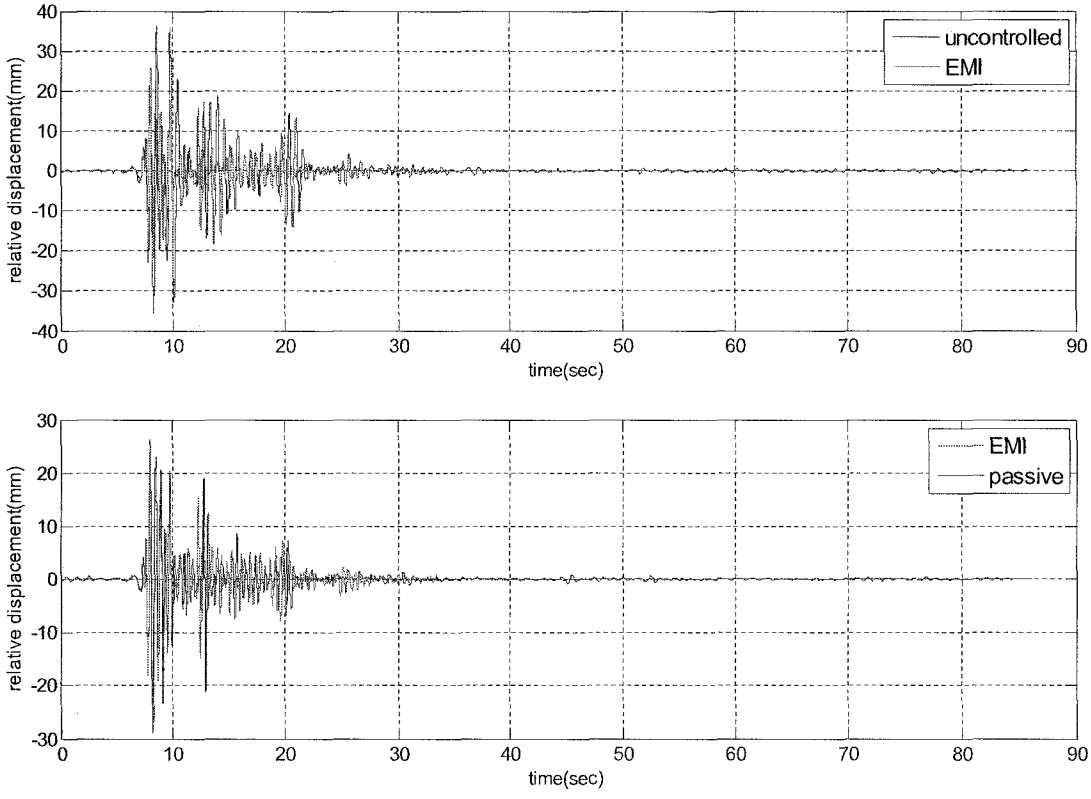


그림 3.3.2.8 교량의 상대변위(El Centro)

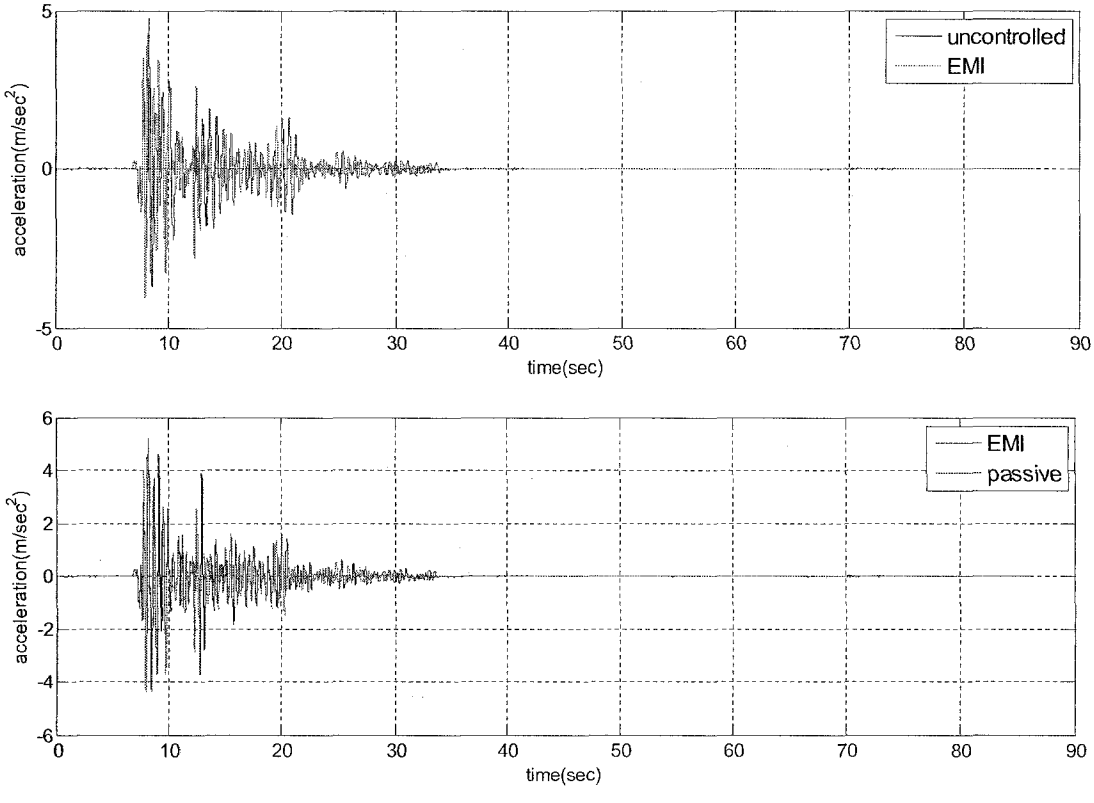


그림 3.3.2.9 교량의 가속도(El Centro)

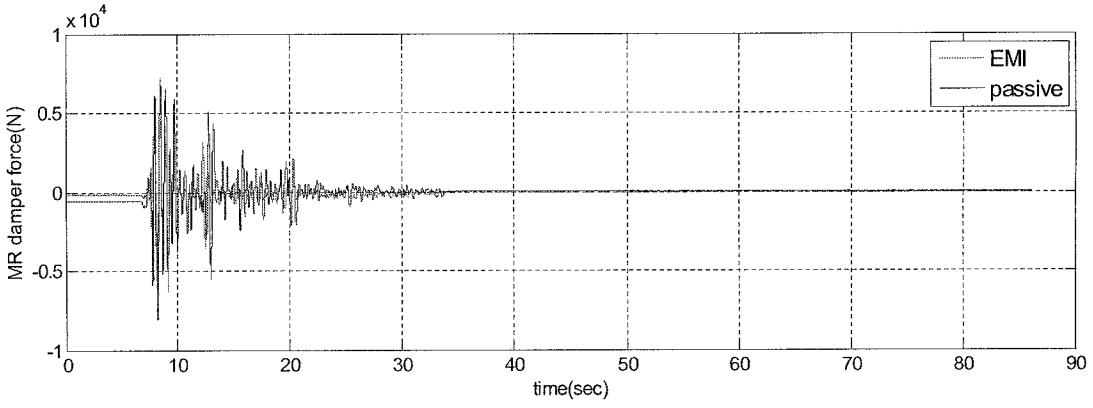


그림 3.3.2.10 MR 감쇠력 (El Centro)

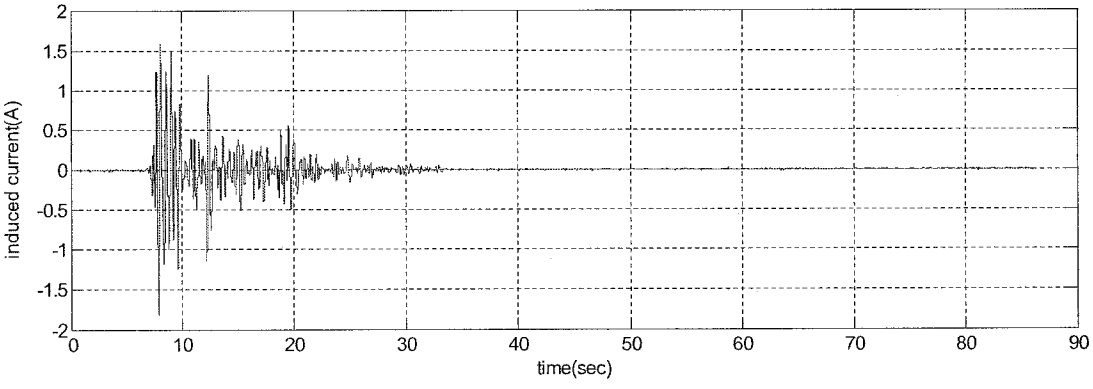


그림 3.3.2.11 발생 유도 전류 (El Centro)

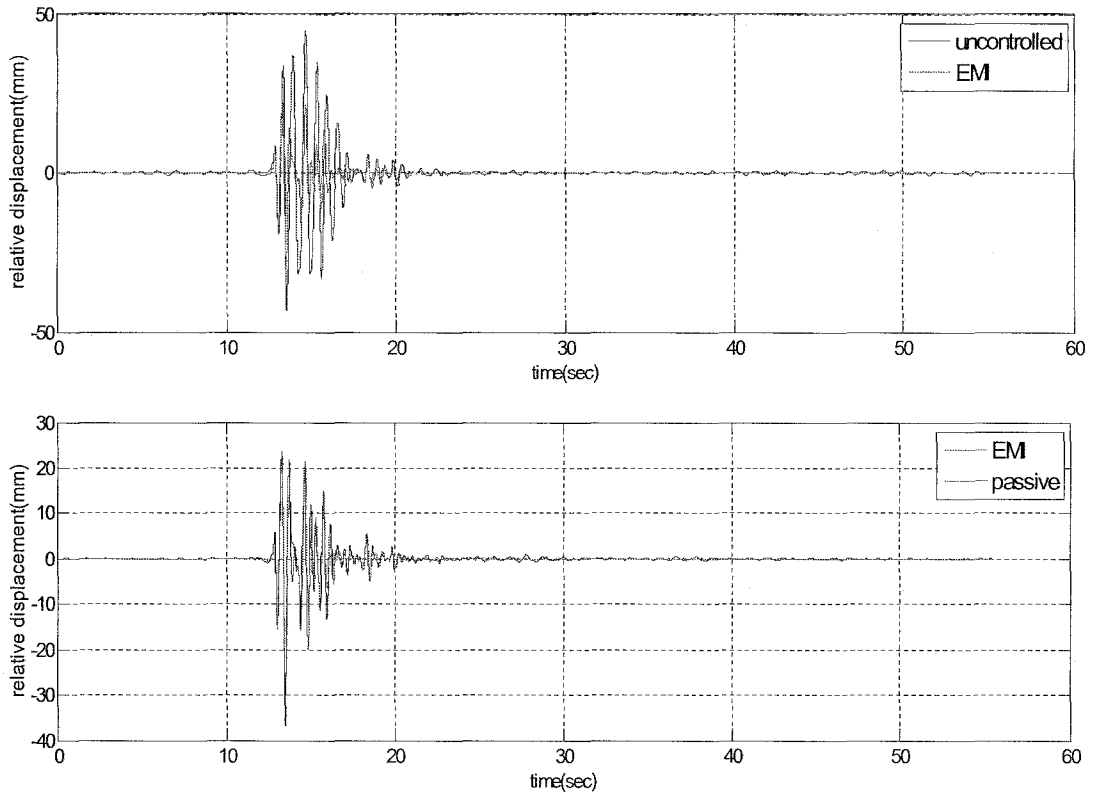


그림 3.3.2.12 교량의 상대변위(Kobe)

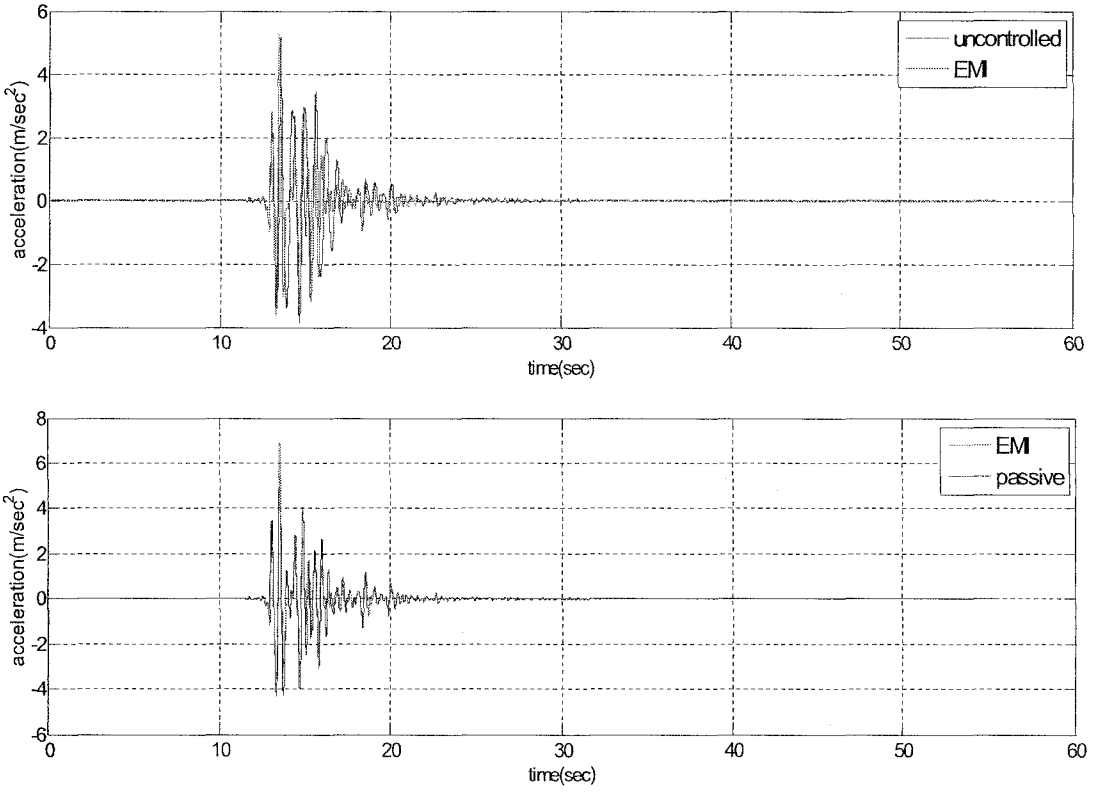


그림 3.3.2.13 교량의 가속도(Kobe)

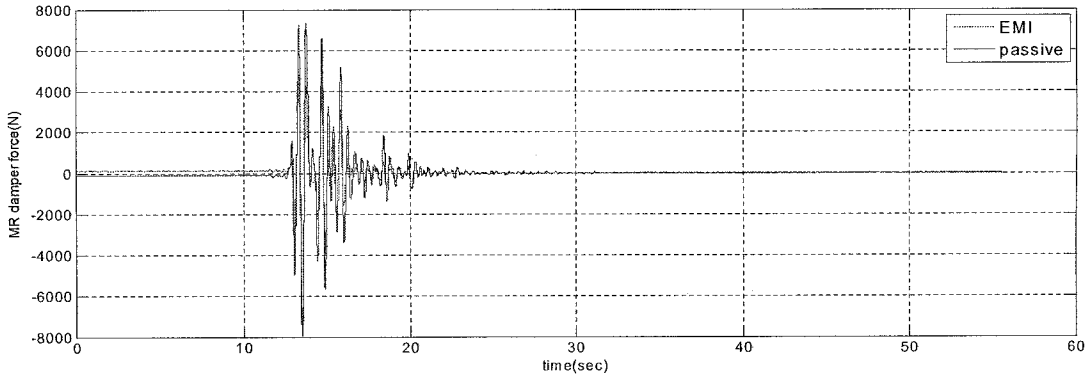


그림 3.3.2.14 MR 감쇠력 (Kobe)

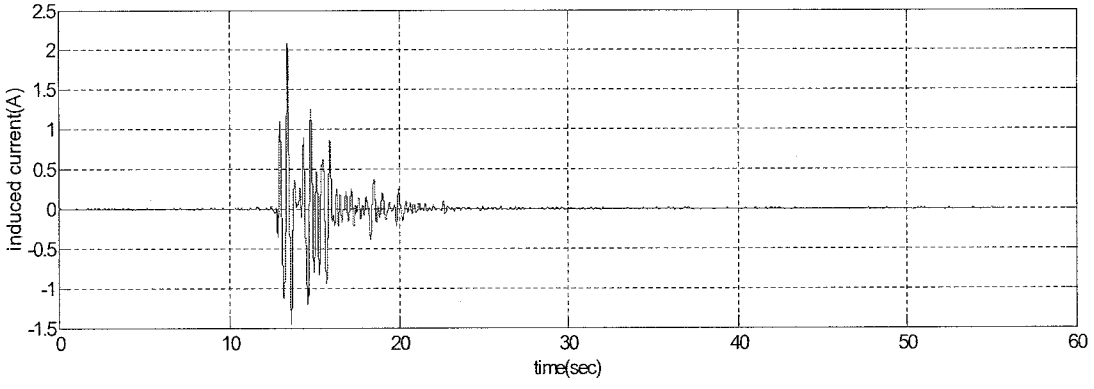


그림 3.3.2.15 발생 유도 전류 (Kobe)

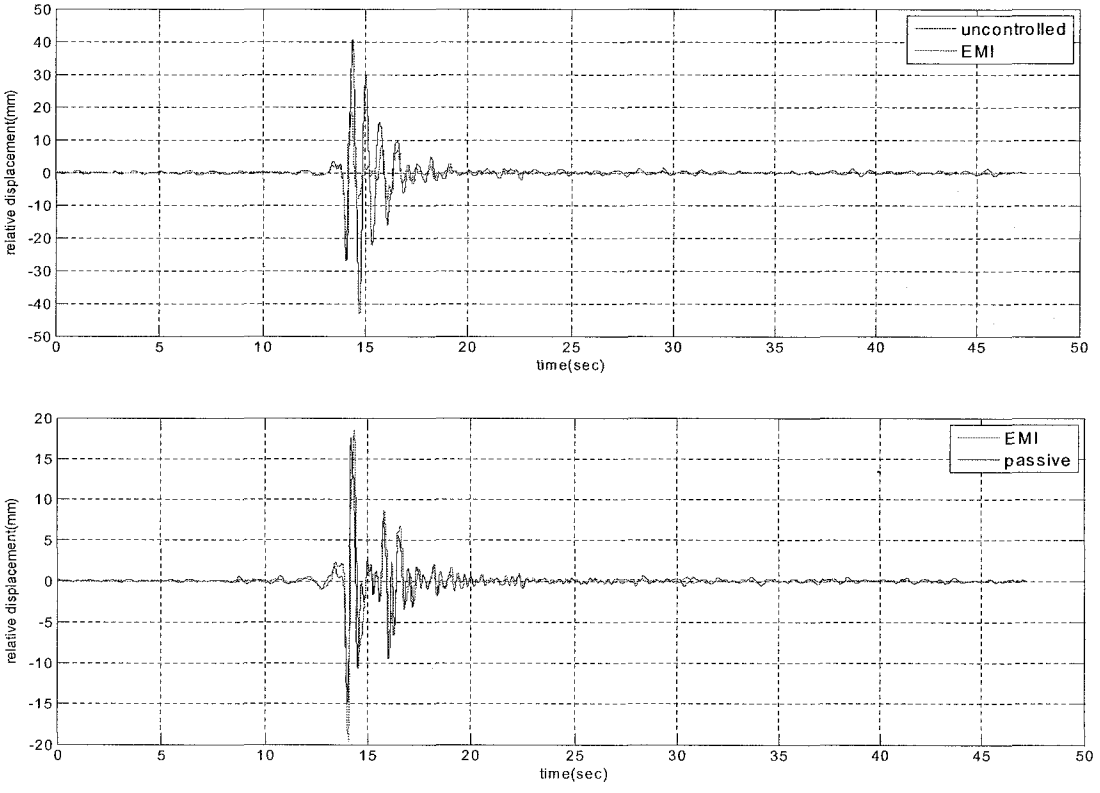


그림 3.3.2.16 교량의 상대변위(Northridge)

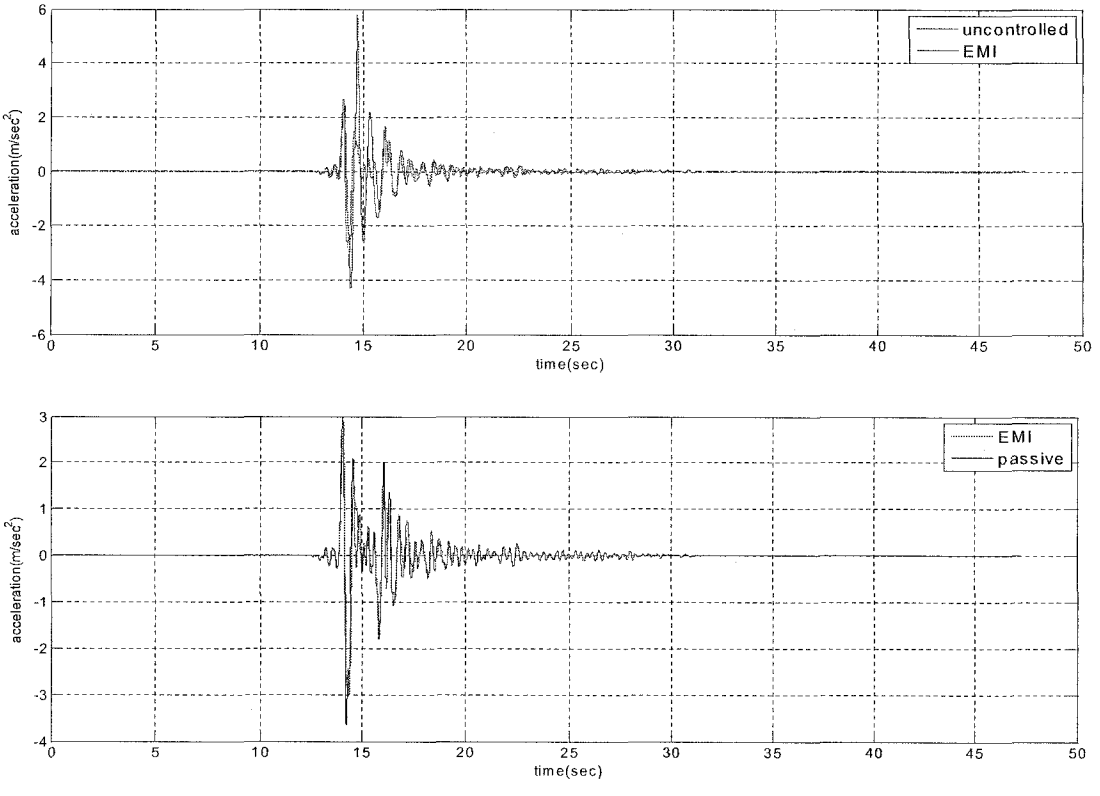


그림 3.3.2.17 교량의 가속도(Northridge)

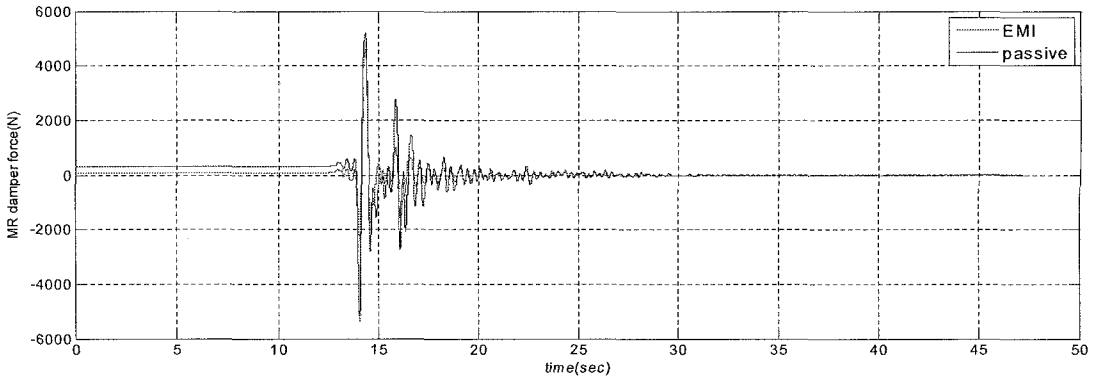


그림 3.3.2.18 MR 감쇠력 (Northridge)

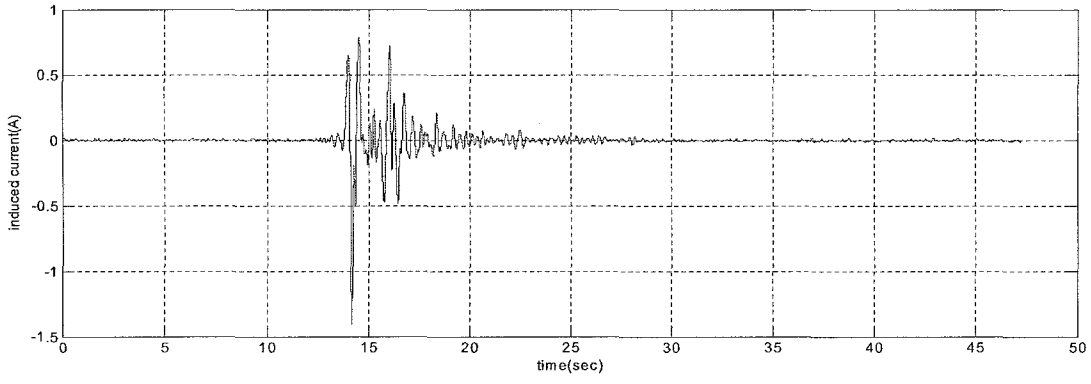


그림 3.3.2.19 발생 유도 전류 (Northridge)

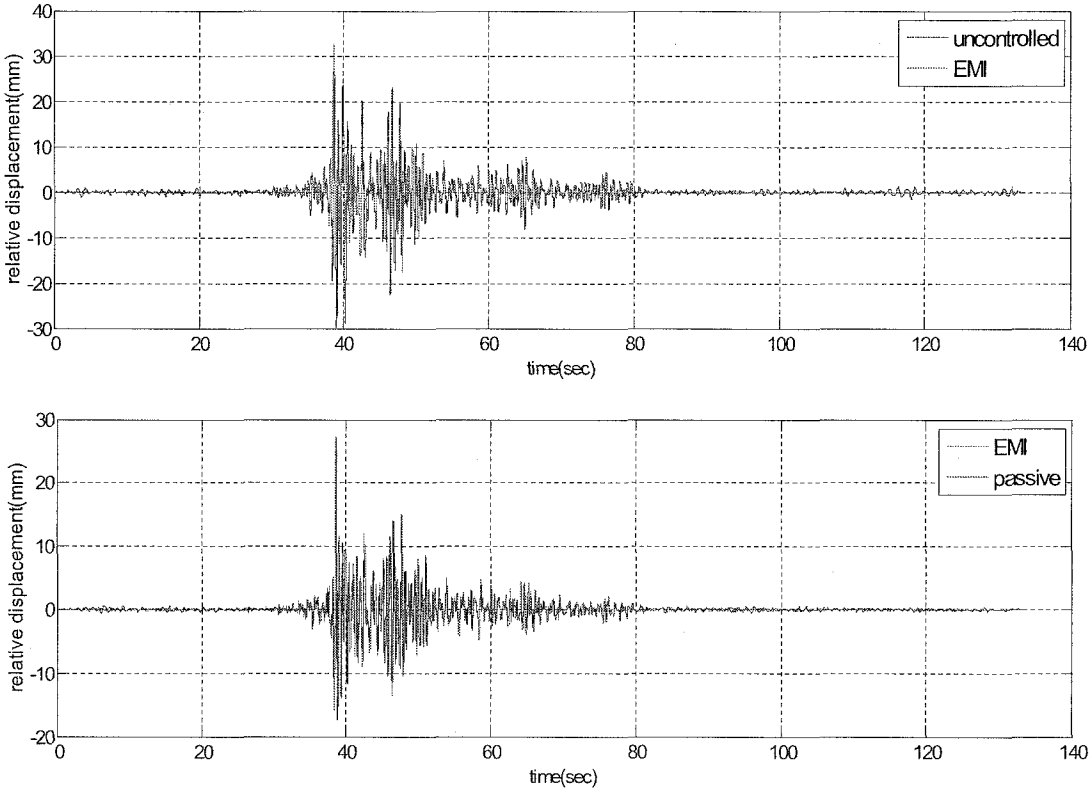


그림 3.3.2.20 교량의 상대변위(Hachinoe)

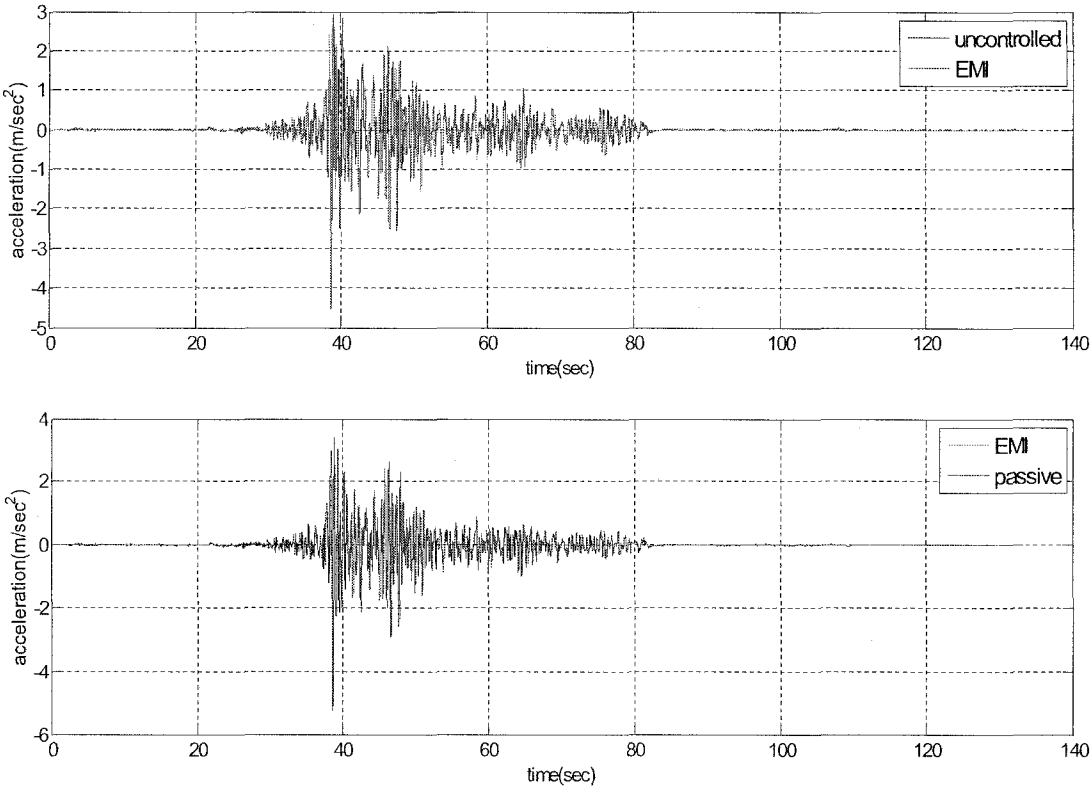


그림 3.3.2.21 교량의 가속도(Hachinoe)

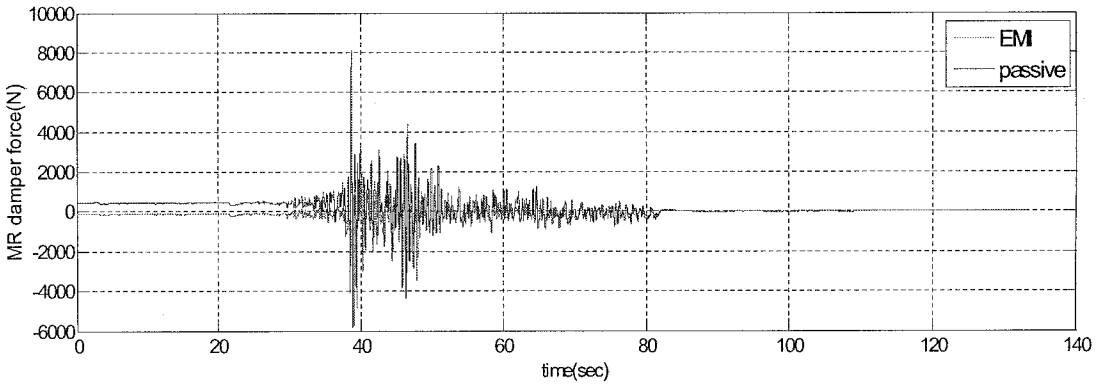


그림 3.3.2.22 MR 감쇠력 (Hachinoe)

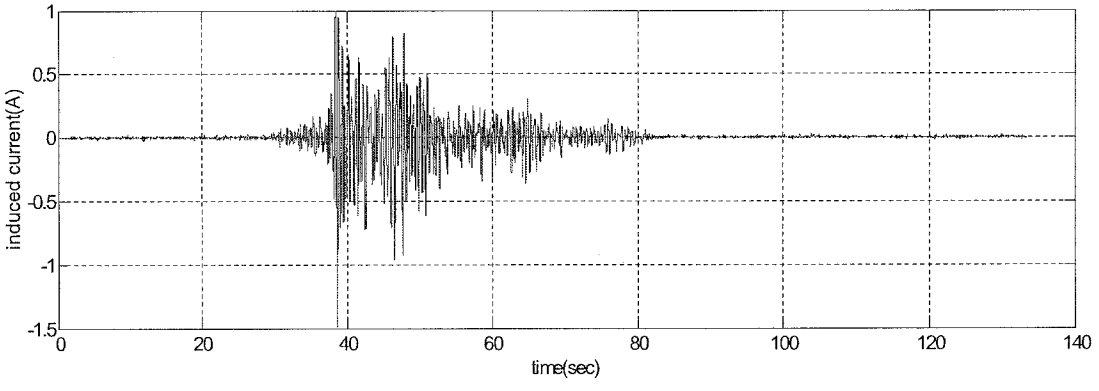


그림 3.3.2.23 발생 유도 전류 (Hachinoe)

3.2.7. 수치해석

실험을 통해 수행한 성능평가를 검증하기 위하여 수치해석을 수행하였다. 축소교량모형은 질량체로, 고무받침은 스프링으로 치환하여 단자유도 시스템으로 고려하였다. 먼저 비 제어시의 sine 하중 가진시의 가속도 계측치를 이용하여 축소교량모형에 대한 System Identification을 수행하여 물성치를 추출하여 표 3.3.2.5와 같이 정리하였다. 실험과 동일한 역사지진이 지반으로부터 가해지는 것으로 가정하여 교량의 가속도와 상대변위를 계산하였다. 실험에서 계측한 결과와 수치해석으로부터 구한 데이터의 시간이력을 비교하면 약간의 차이는 존재하나 전반적으로 유사한 경향으로 나타남을 확인 할 수 있었다. 다만 최대값에서는 약간씩의 차이가 있어 비제어시에 대해 정규화한 최대값에서는 차이가 존재했다. 그러나 실험의 경우와

마찬가지로 개발된 스마트 제진 장치를 통해 교량의 상대변위와 가속도의 크기를 감소시키는 데 훌륭한 성능을 보임을 확인 할 수 있었다. 또한 수동제어 제진장치에 비해서도 우수함을 확인하였다.

표 3.3.2.5 축소교량모형의 물성치

항목	값
질량 (kg)	10,271
감쇠비 (%)	9
고유진동수 (Hz)	1.6076

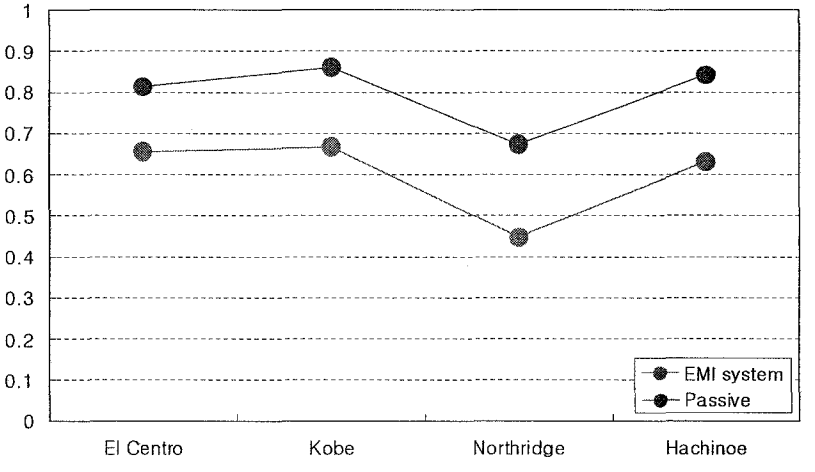


그림 3.3.2.24 교량의 상대변위 실험결과(비제어시에 대해 최대값 정규화)

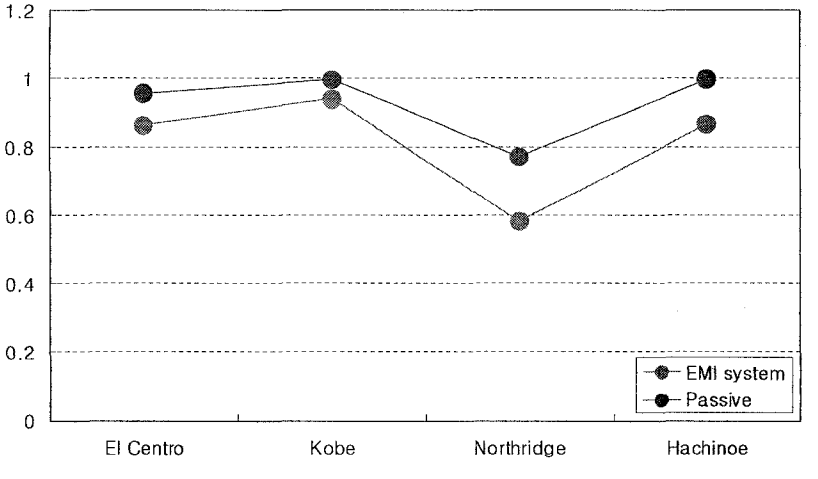
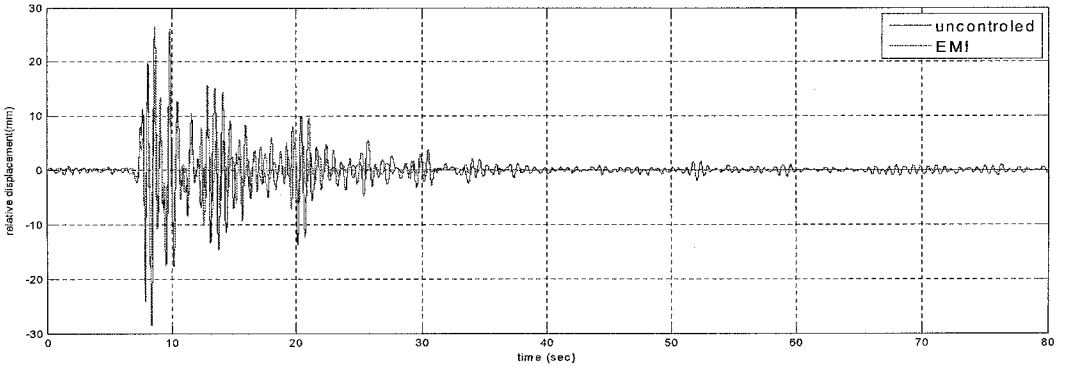
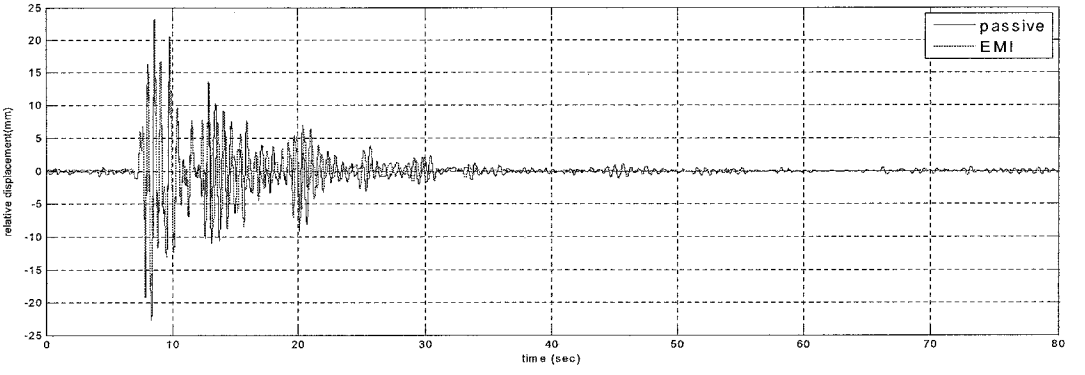


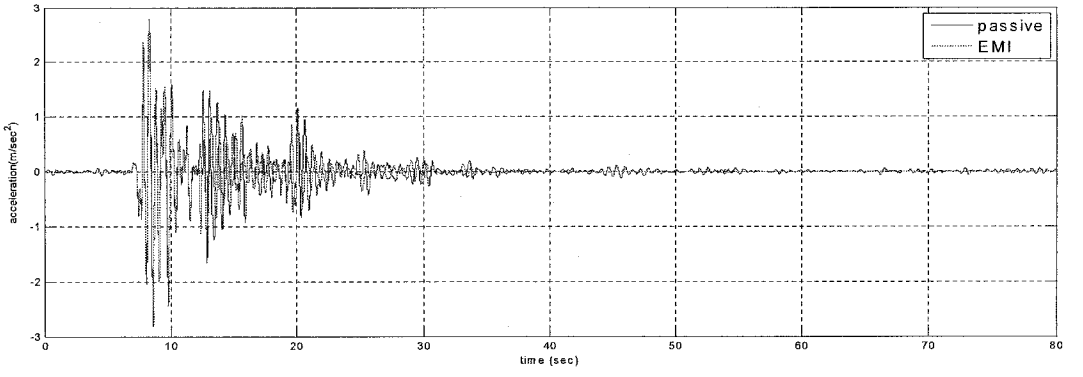
그림 3.3.2.25 교량의 상대변위 실험결과(비제어시에 대해 최대값 정규화)



(a) 교량의 상대변위(EMI-비제어 비교)

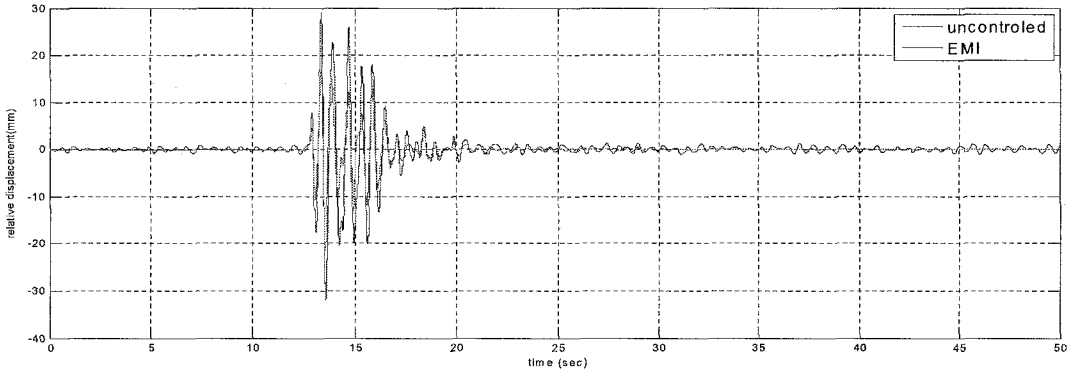


(b) 교량의 상대변위(EMI-passive비교)

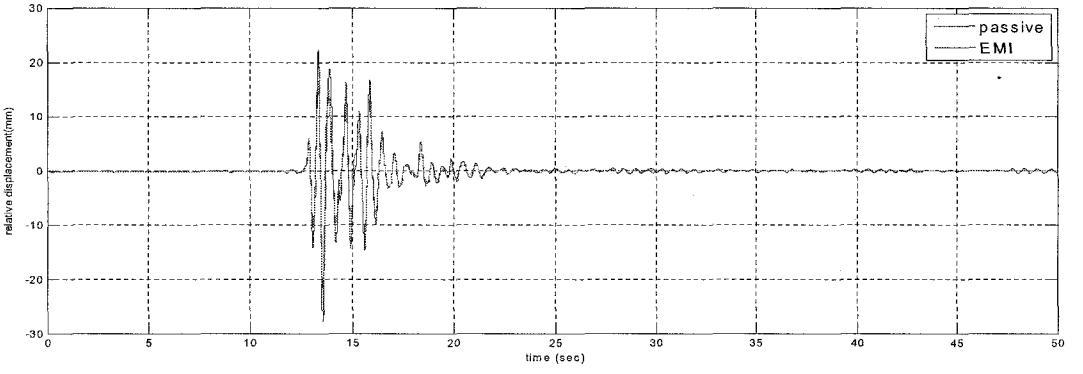


(c) 교량의 가속도 (EMI-passive 비교)

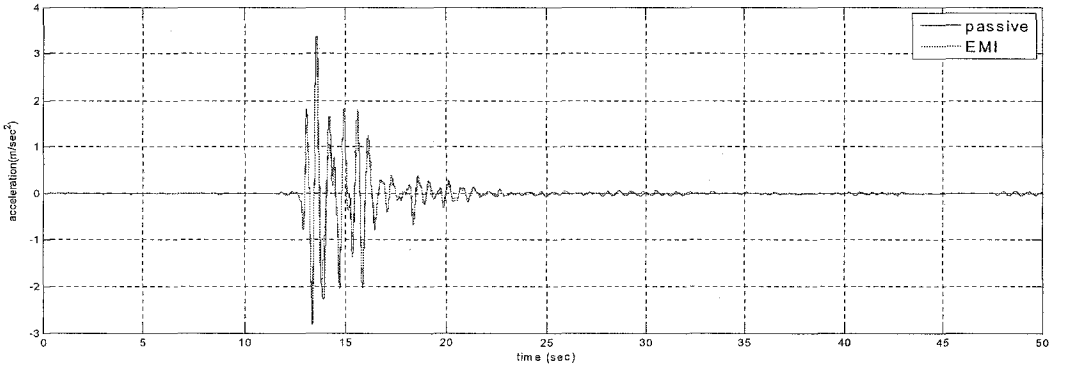
그림 3.3.2.26 수치해석 결과 (El Centro)



(a) 교량의 상대변위(EMI-비제어 비교)

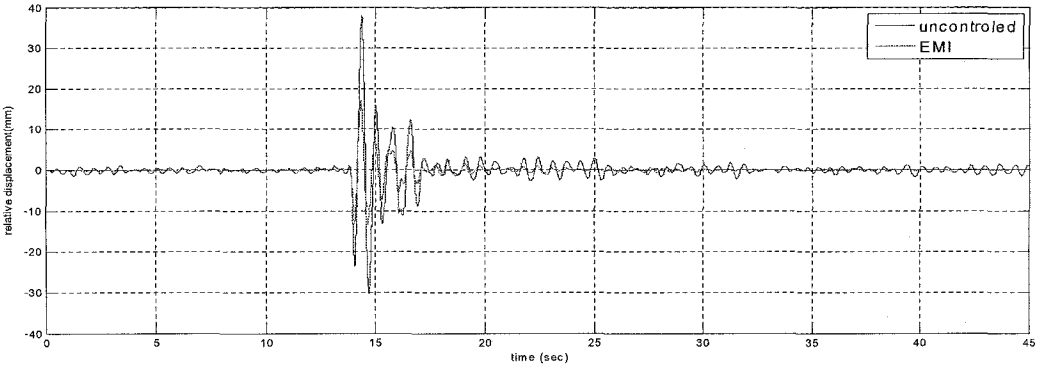


(b) 교량의 상대변위(EMI-passive비교)

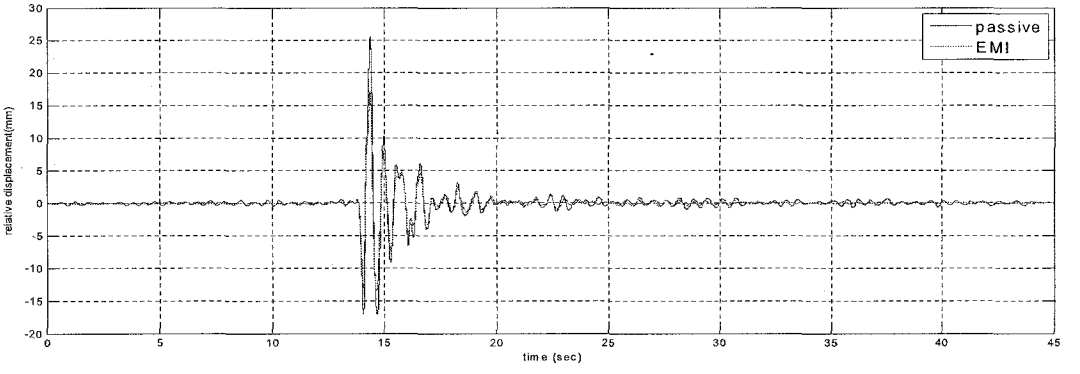


(c) 교량의 가속도 (EMI-passive 비교)

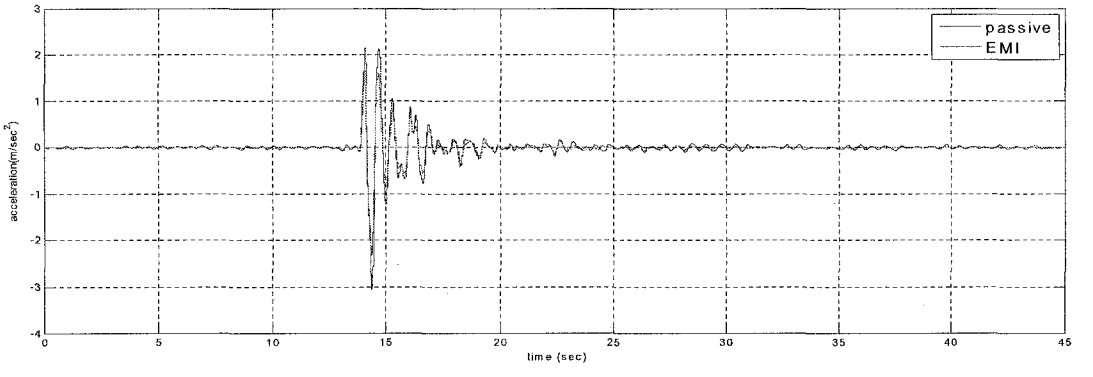
그림 3.3.2.27 수치해석 결과 (Kobe)



(a) 교량의 상대변위(EMI-비제어 비교)

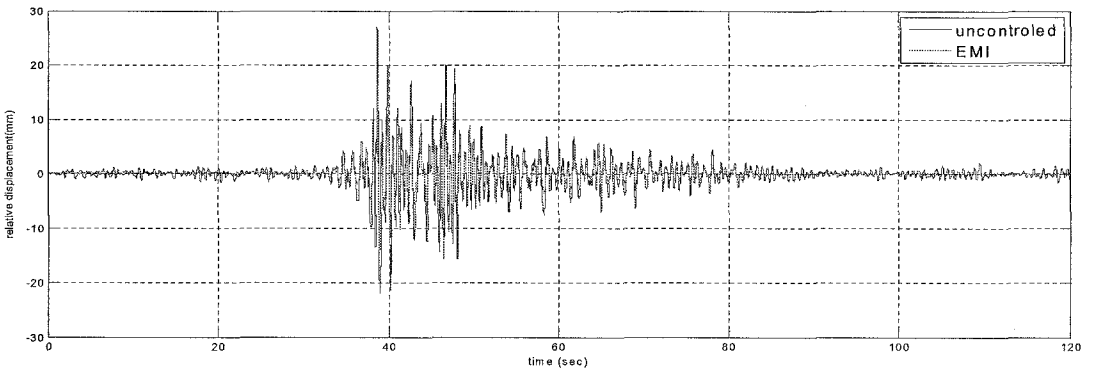


(b) 교량의 상대변위(EMI-passive비교)

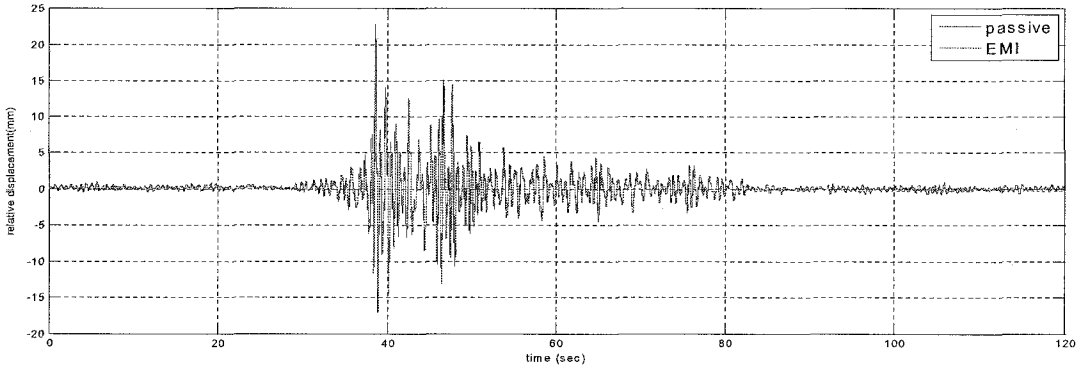


(c) 교량의 가속도 (EMI-passive 비교)

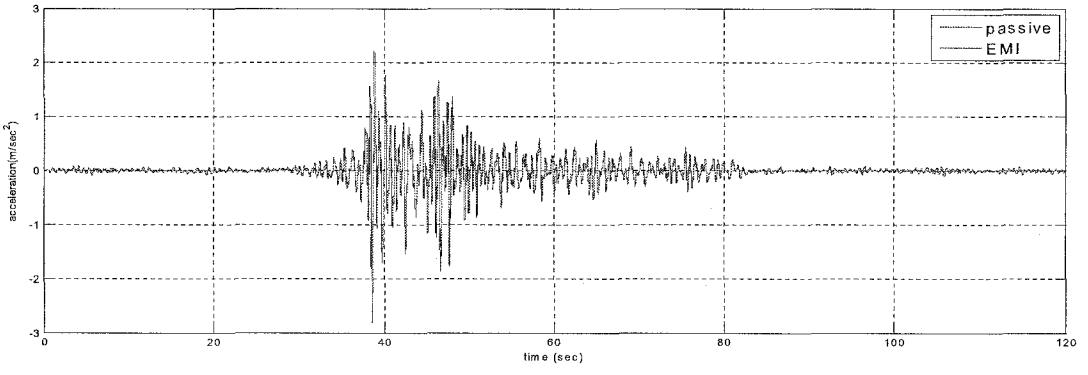
그림 3.3.2.28 수치해석 결과 (Northridge)



(a) 교량의 상대변위(EMI-비제어 비교)



(b) 교량의 상대변위(EMI-passive비교)



(c) 교량의 가속도 (EMI-passive 비교)

그림 3.3.2.29 수치해석 결과 (Hachinoe)

4 절. 실규모 철골 구조물을 이용한 제진 장치의 제진 성능 평가

4.1. 실험배경

본 연구과제에서 개발한 신개념 스마트 제진장치의 실제 적용성을 파악하기 위해서 실규모 철골 구조물에 대한 제진장치만의 제진성능 평가를 수행하였다. 본 실험에서는 본 연구과제에서 제작한 두 개의 10 kN 급 MR 감쇠기를 기반으로 한 수동제어시스템과 반능동제어 시스템, 신개념 스마트 제진 시스템의 제진 성능을 평가하였다.

4.2. 대상 구조물

4.2.1. 개요

본 실험의 대상이 되는 실험구조물은 그림 3.4.2.1과 같은 모형과 그림 3.4.2.2와 같은 입면도를 갖는 실물규모의 5층 철골 구조물이고, 층고 6 m, 슬래브 6 m X 6 m, 층질량 20 ton인 건물이다. 각 층은 4개의 H형강(H-310X310X20X20) 기둥으로 지지되어 있다.

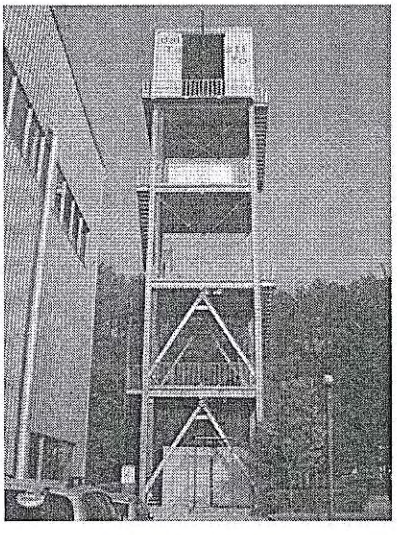
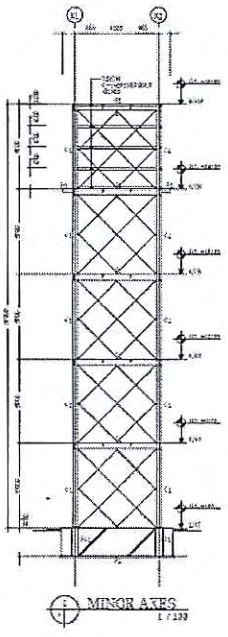
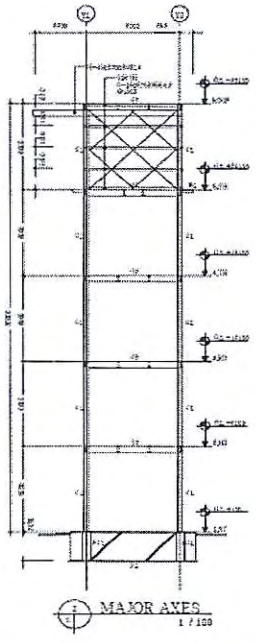


그림 3.4.2.1. 대상 실험구조물



(a) 약축 방향 입면도



(b) 강축 방향 입면도

그림 3.4.2.2. 대상 실험구조물의 입면도

4.2.2. HMD

대상구조물의 4층에는 그림 3.4.2.3과 같은 HMD가 설치되어 있다. 이 HMD는 대용량 리니어 모터를 이용한 감쇠기 (Linear Motor Damper; LMD)로서 코일이 고정되어 있고, 영구자석과 철심이 가동되어 가동질량 (1.5 ton)의 역할을 수행하게 된다. 이를 이용하여 구조물의 가진 및 제어를 할 수 있다. HMD의 구동 방향은 구조물의 약축방향으로 설치되어 있다.

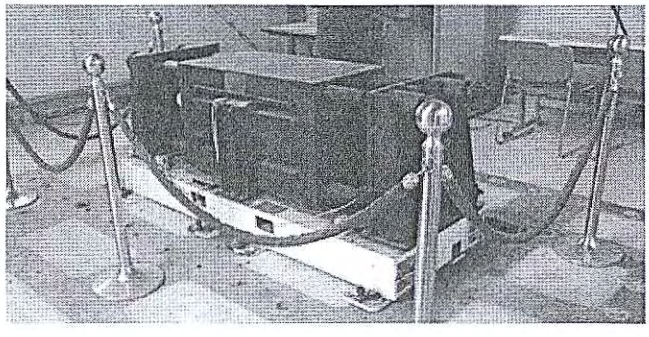


그림 3.4.2.3 HMD

4.2.3. 구조물의 시스템 식별 (System Identification)

구조물의 질량, 감쇠 및 강성 행렬을 구하기 위해 시스템 식별(System Identification: SI)을 수행하였다. SI의 방법에는 여러 가지가 있지만, 본 연구에서는 모드데이터 및 고유치를 이용하여 구조물 고유의 구속조건을 만족하면서 량행렬 또는 강성행렬의 변화를 최소화하는 직접모델갱신법을 이용하였다. 먼저 제어하지 않았을 때 계측된 측정값들을 기반으로 유한요소모델을 구성한 후, 질량행렬과 강성행렬을 추출한다. 갱신할 강성행렬이 정확하다고 가정하고, 대칭행렬이어야 한다는 구속조건 하에 갱신할 강성행렬을 이용하여 모드벡터를 구하여 계측된 모드벡터와 비교하는 방법이다. 식 (3.4.2.1)과 (3.4.2.2)의 구속조건을 만족하면서, 강성의 변화를 최소화하는 식 (3.4.2.3)을 이용하면 식 (3.4.2.4), (3.4.2.5)의 갱신식이 유도된다.

$$K\Phi = M_a \Phi \Lambda, \quad \Phi^T M_a \Phi = I \tag{3.4.2.1}$$

$$K^T = K \tag{3.4.2.2}$$

$$J = \frac{1}{2} \| N^{-1}(K - K_a)N^{-1} \| \tag{3.4.2.3}$$

$$\Phi = \Phi_m \left[\Phi_m^T M_a \Phi_m \right]^{-1/2} \tag{3.4.2.4}$$

$$\begin{aligned} K = K_a - K_a \Phi\Phi^T M_a - M_a \Phi\Phi^T K_a \\ + M_a \Phi\Phi^T K_a \Phi\Phi^T M_a + M_a \Phi\Lambda\Phi^T M_a \end{aligned} \tag{3.4.2.5}$$

여기서, M_a와 K_a는 해석모델의 질량, 강성행렬이고, Φ_m와 Λ는 각각 계측된 고유벡터 행렬과 측정된 고유값이며, N은 $N = M_a^{1/2}$의 값이다. 표 3.4.2.1에서는 해석모델을 통해 추정한 고유주파수와 직접측정한 고유주파수, 직접모델갱신기법을 이용하여 최종적으로 얻게 된 실험구조물의 고유주파수를 비교하고 있다. 결

과적으로 표 3.4.2.2에는 직접모델갱신법을 이용한 동적특성 식별의 결과를 나타내고 있다. 여기서 감쇠비는 각각의 모드에 대해 1.96 %로 가정하였다.

표 3.4.2.1. 실험구조물의 고유주파수

	1st mode	2nd mode	3rd mode	4th mode	5th mode
해석모델 추정	0.5022	1.5623	2.74	3.91	4.83
실제측정	0.5249	1.7578	2.94	3.67	5.38
직접모델갱신기법	0.5249	1.7578	2.95	3.67	5.38

표 3.4.2.2. 실험구조물의 질량, 강성, 감쇠 행렬

질량행렬	$m=\begin{bmatrix} 2.12\times10^4 & 1.09\times10^2 & 4.09\times10^2 & 1.09\times10^3 & -1.39\times10^3 \\ 1.09\times10^2 & 1.76\times10^4 & -7.33\times10^2 & 1.14\times10^3 & -5.50\times10^2 \\ 4.09\times10^2 & -7.33\times10^2 & 1.90\times10^4 & 2.79\times10^2 & -5.32\times10^2 \\ 1.09\times10^3 & 1.14\times10^3 & 2.79\times10^2 & 1.86\times10^4 & -2.73\times10^2 \\ -1.39\times10^3 & -5.50\times10^2 & -5.32\times10^2 & -2.73\times10^2 & 2.18\times10^4 \end{bmatrix}$
강성행렬	$k=\begin{bmatrix} 7.47\times10^6 & -4.86\times10^6 & 1.30\times10^6 & -9.08\times10^5 & 4.32\times10^5 \\ -4.86\times10^6 & 9.64\times10^6 & -6.64\times10^6 & 2.45\times10^6 & -9.27\times10^5 \\ 1.30\times10^6 & -6.64\times10^6 & 1.09\times10^7 & -6.01\times10^6 & 7.49\times10^5 \\ -9.08\times10^5 & 2.45\times10^6 & -6.01\times10^6 & 9.13\times10^6 & -4.85\times10^6 \\ 4.32\times10^5 & -9.27\times10^5 & 7.49\times10^5 & -4.85\times10^6 & 4.54\times10^6 \end{bmatrix}$
감쇠행렬	$c=\begin{bmatrix} 1.30\times10^4 & -5.42\times10^3 & -4.30\times10^2 & -3.13\times10^2 & -1.78\times10^2 \\ -5.42\times10^3 & 1.45\times10^4 & -5.54\times10^3 & -5.18\times10^2 & -4.17\times10^2 \\ -4.30\times10^2 & -5.54\times10^3 & 1.44\times10^4 & -5.66\times10^3 & -7.06\times10^2 \\ -3.13\times10^2 & -5.18\times10^2 & -5.66\times10^3 & 1.41\times10^4 & -6.15\times10^3 \\ -1.78\times10^2 & -4.17\times10^2 & -7.06\times10^2 & -6.15\times10^3 & 9.23\times10^3 \end{bmatrix}$

4.3. 가진시스템 설계

구조물의 가진은 4층에 설치된 HMD를 구동시킴으로써 이루어진다. 지진하중을 고려하기 위해서는 구조물의 바닥, 즉 지반을 가진해야 하지만, 이는 실질적으로 불가능하기 때문에 HMD를 이용하여 구조물을 가진시켰을 때 구조물의 응답이 지진하중이 가해졌을 때 나타나는 응답과 비슷하도록 HMD 가진시스템을 설계하였다.

지반가속도 $\ddot{u}_g$와 HMD 가속도 $\ddot{u}_h$의 가진을 받는 n-자유도 구조물의 상태공간방정식은 식 (3.4.3.6)과 같다.

$$\dot{z} = Az + B_g\ddot{u}_g + B_h\ddot{u}_h \qquad (3.4.3.1)$$
$$y = Cz + D_g\ddot{u}_g + D_h\ddot{u}_h$$

여기서 z는 $2n\times 1$의 상태변수벡터이며 y는 출력벡터이다. 식 (3.4.3.2)는 $\ddot{u}_g$와 $\ddot{u}_h$의 출력전달함수를 나타내는데, 이때 출력은 모두 절대가속도이므로 지반가속도의 전송행렬 D_g는 0이 된다.

$$T_h = \frac{Y_h(s)}{U_h(s)} = C(sI - A)^{-1}B_h + D_h \qquad (3.4.3.2)$$
$$T_g = \frac{Y_g(s)}{U_g(s)} = C(sI - A)^{-1}B_g$$

여기서 U_h, U_g는 각각 HMD와 지반가속도이고 Y_h, Y_g는 각각에 대한 구조물의 응답이다. 지반가속도에 대한 응답과 HMD 가진에 대한 응답이 서로 일치할 경우의 라플라스 변환한 응답식은 식 (3.4.3.3)과 같이 표현할 수 있다.

$$U_h(s) = T_h^{-1}Y_h(s) = T_h^{-1}Y_g(s) = T_h^{-1}T_gU_g(s) \qquad (3.4.3.3)$$

이때 식 (3.4.3.3)이 성립할 조건은 구조물의 역전달함수는 n개의 출력을 가지므

로 구조물의 목표응답이 가진기 수만큼만 선택되어야 하며 선택된 구조물의 목표응답이 주어졌을 때 최종적으로 식 (3.4.3.4)와 같이 유도된다.

$$\ddot{x}_h(s) = \tilde{T}_{h-1} T_g \ddot{x}_g(s) \qquad (3.4.3.4)$$

여기서, $\tilde{T}_{h-1}$은 T_h^{-1}의 부분행렬이며 T_h^{-1}의 목표응답에 따른 열벡터로부터 추출할 수 있다. 따라서 구조물의 역전달함수의 부분행렬 $\tilde{T}_{h-1}$와 지반가속도를 이용하여 HMD가 구현해야할 가속도를 구할 수 있다.

4.4. 실험준비

4.4.1. MR 감쇠기 설치

대상구조물에는 지반과 1층 사이, 그리고 1층과 2층 사이에 제어장치를 설치하기 위한 브레이싱이 설치되어 있다. 본 연구과제에서는 간단한 수치해석을 수행한 결과, 대부분의 외부하중에 대해 지반과 1층사이가 가장 큰 층간변위를 갖는다는 사실을 확인하고, 지반과 1층 사이에 새로 제작된 MR 감쇠기를 설치하였다. 구조시스템의 약축방향으로 북쪽과 남쪽에 각각 하나씩의 MR 감쇠기를 설치하였고, 비틀림이나 편심현상을 대비하여 그림 3.4.4.1과 같이 양쪽에 힌지를 직각방향이 되도록 설치하였고, MR 감쇠기에서 발생되는 힘을 측정하기 위해 2 ton 규모의 로드셀을 MR 감쇠기와 힌지연결부 사이에 고정하였다.

제작된 MR 감쇠기는 4개의 stage를 가지고 있고, 각 stage들은 300 kg의 용량을 가지고 있다. 실험을 수행하기 앞서 실시된 수치해석에서 대상구조물을 제어하기 위해 필요한 제어력 용량이 1.5 ton 정도(scaled Kobe 지진, clipped-optimal 알고리즘)였기 때문에 4개의 stage를 직렬로 연결하여 모두 사용하였다. 제작된 MR 감쇠기의 최대 스트로크는 35 cm, 최대 제어력은 1.2 ton, 최대 전류는 3.0 A이다.

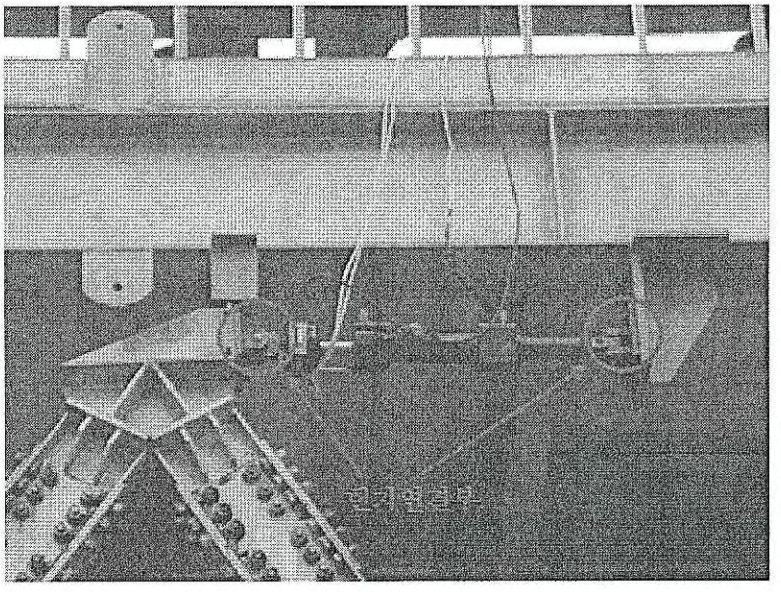


그림 3.4.4.1 MR 감쇠기 설치모습 (양끝단 힌지)

4.4.2. 계측 시스템

실험에 사용된 센서들은 각각 다음과 같다(그림 3.4.4.2 참조).

I) 변위계 : 각각의 MR 감쇠기에서 발생되는 지반과 1층의 상대 변위 측정
- 레이저 변위계 (Keyence , CD4-350) 이용

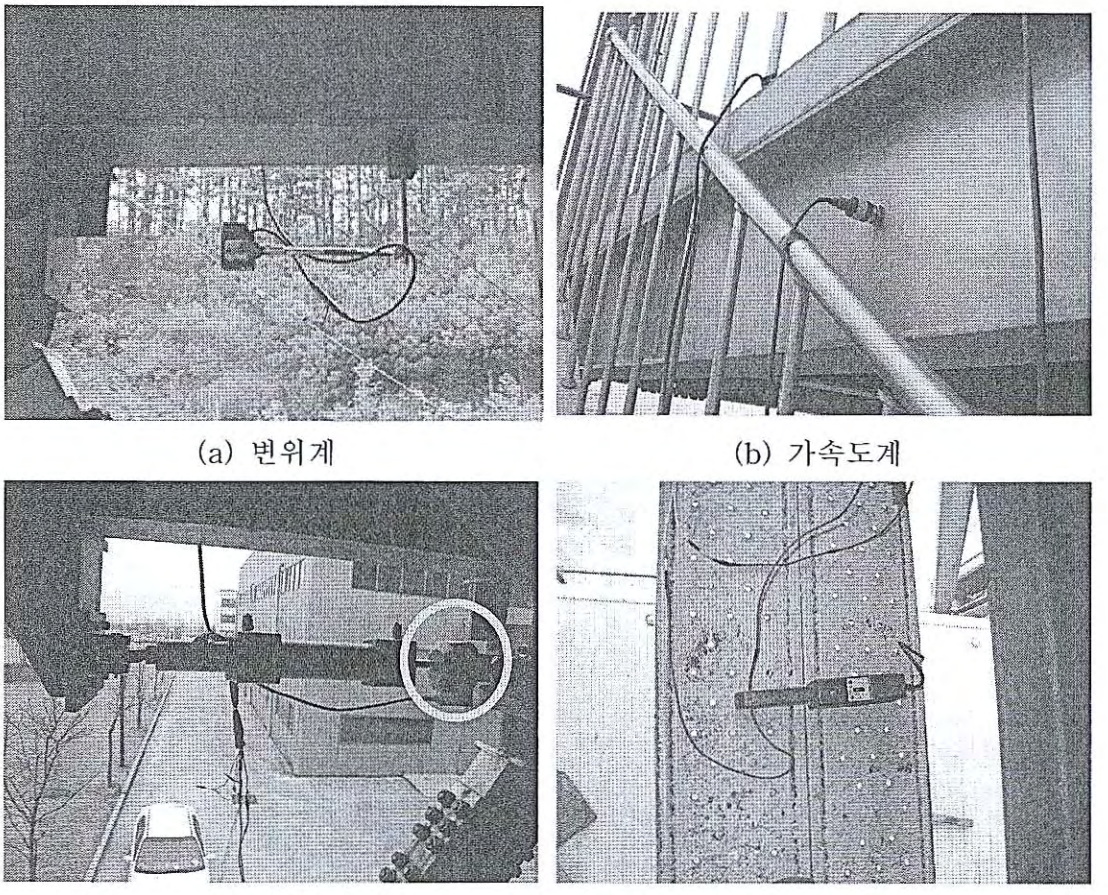
II) 가속도계 : 각 층과 HMD의 절대가속도 측정
- 각 층 : PCB 393A03 가속도계 5EA
- HMD : Kyowa AS-2GB 가속도계 1EA

III) 로드셀 : 각각의 MR 감쇠기에서 발생되는 제어력 측정,
CAS load cell LS-2T 2EA

IV) 전류계 : 각각의 MR 감쇠기에 명령전압에 의해 흐르는 전류측정,
Tektronix A622 2EA

이상 언급한 계측 데이터는 NI DAQ Card-6062E에서 수집하여 디지털 데이터로 변환하였다. 수집된 디지털 데이터들은 각각의 제어 알고리즘에 의해 취사선택되어지고 최종적으로 명령전압을 출력으로 내보내게 된다. 명령전압의 출력은 상응하는

전류로 변환되어 각각의 MR 감쇠기로 보내지고 이로써 대상구조물을 제어할 수 있게 된다. 결론적으로 그림 3.4.4.3와 같이 12개의 입력채널과 2개의 출력채널을 갖는 제어시스템을 구성하였다.



(a) 변위계 (b) 가속도계

(c) 로드셀 (d) 전류계

그림 3.4.4.2 계측 센서

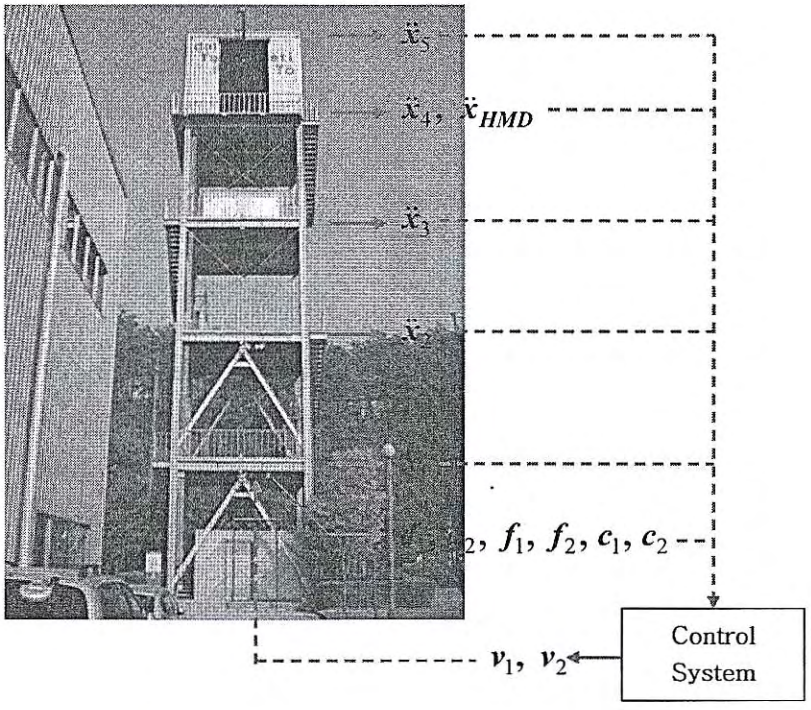


그림 3.4.4.3 실규모 철골 구조물 제진실험의 계측 시스템

4.4.3. 입력 가진 하중

반능동 제어 알고리즘 및 수동 제어 시스템, 그리고 신개념 스마트 제진 시스템의 제어 성능을 다방면으로 평가하기 위해 다양한 지진하중 및 조화하중이 고려되었다. 가진기로 사용되는 HMD의 최대변위는 안전을 위해 제한되어 있기 때문에, 각각의 지진하중 및 조화하중은 HMD의 최대변위를 넘지 않도록 규모를 조정하였다. 실험에서 고려된 지진하중 및 조화하중은 다음과 같다.

(i) El Centro 지진 (The N-S component recorded at the Imperial Valley Irrigation District substation in El Centro, California, during the Imperial Valley, California earthquake of May 18, 1940) : 최대변위에 맞춰 규모 축소 (PGA 0.303 g)

(ii) Hachinohe 지진 (The N-S component recorded at Hachinohe City during the Tokachi-oki earthquake of May 16, 1968) : 최대변위에 맞춰 규모 축소 (PGA 0.265 g)

(iii) Kobe 지진 (The N-S component recorded at the Kobe Japanese Meteorological Agency (JMA) station during the Hyogoken Nanbu earthquake of January 17, 1995) : 최대변위에 맞춰 규모 축소 (PGA 0.318 g)

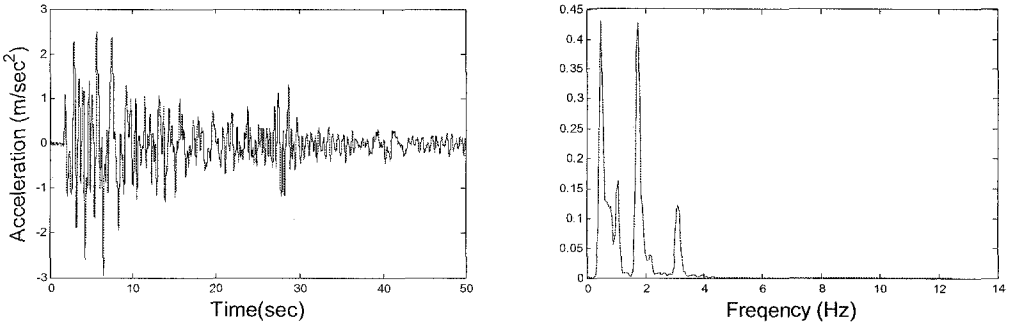
(iv) Northridge 지진 (The N-S component recorded at Sylmar County Hospital parking lot in Sylmar, California, during the Northridge, California earthquake of January 17, 1994) : 최대변위에 맞춰 규모 축소 (PGA 0.227 g)

(v) 인공지진 : Kanai-Tajimi 필터를 이용하여 만든 인공지진 (PGA 0.113 g)

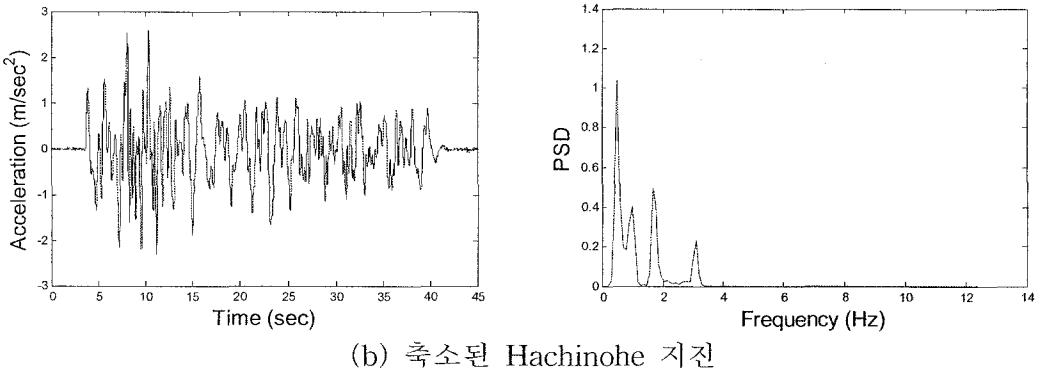
(vi) White noise

(vii) sine 하중: 구조물의 1차고유진동수에 동조시켜 건물 가진

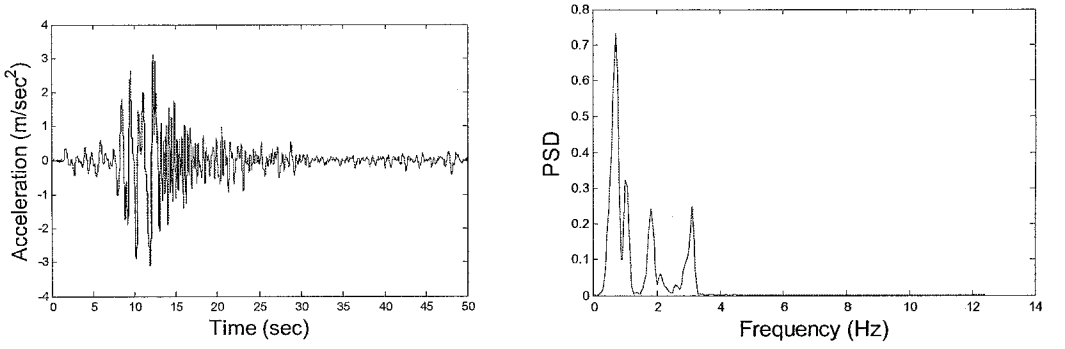
각각의 지진하중의 HMD의 가속도에 대한 시간이력곡선과 파워 스펙트럼 밀도 (power spectral density: PSD)는 다음 그림 3.4.4.4와 같다.



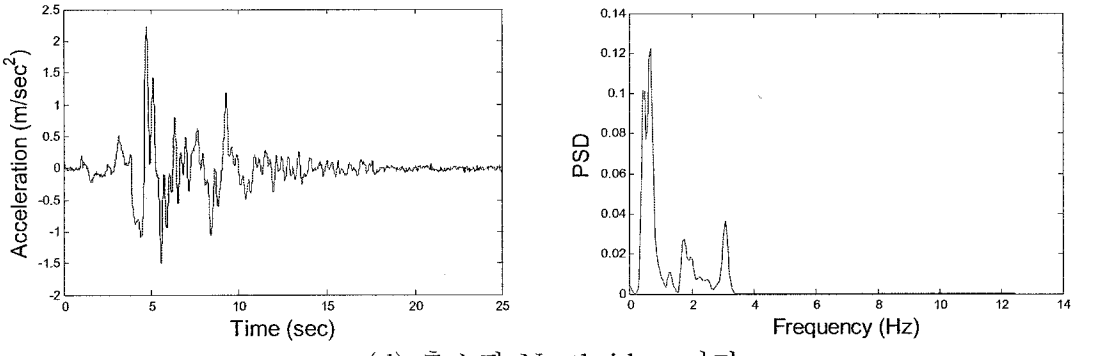
(a) 축소된 El Centro 지진



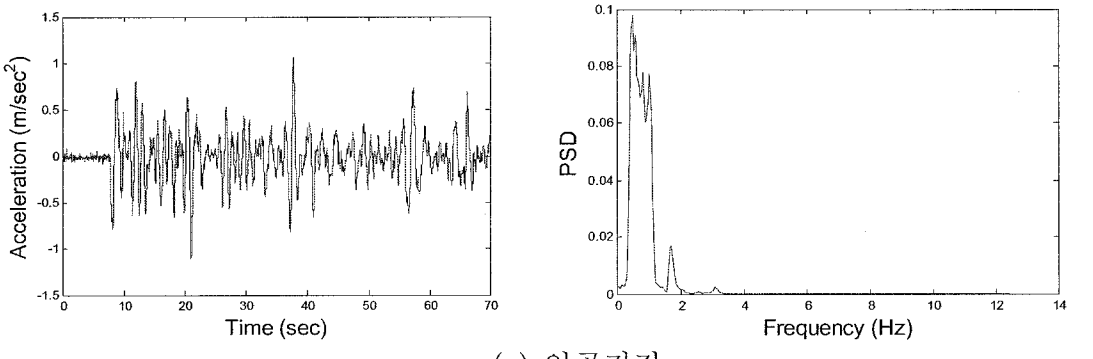
(b) 축소된 Hachinohe 지진



(c) 축소된 Kobe 지진



(d) 축소된 Northridge 지진



(e) 인공지진

그림 3.4.4.4 지진하중의 시간이력곡선과 파워 스펙트럼 밀도

4.4.4. 제진 시스템

(1) 수동제어 시스템

MR 감쇠기의 수동제어 시스템은 MR 감쇠기에 흐르는 전류를 일정하게 유지하는 시스템을 뜻한다. Passive-off 상태는 MR 감쇠기에 전류를 전혀 흐르지 않게 하는 시스템이고, 반대로 Passive-on 상태는 최대의 전류를 흐르게 하는 시스템이다. Passive-optimal 시스템은 0 A부터 3.0 A 까지 전류를 변화해 가면서 제어성능을 평가하여 가장 최적의 제어성능을 보이는 수동제어 시스템을 의미한다.

(2) 반능동 제어 시스템

반능동 제어기의 역할은 구조물의 응답을 계측하여 가장 효과적인 감쇠력을 전달 할 수 있도록 감쇠기의 특성을 바꾸는 것이다. 이때 가장 효과적인 감쇠력을 산정하기 위해서 사용하는 알고리즘을 반능동 제어 알고리즘이라고 일컫는다. 그러나 반능동 제어기의 일종인 MR 감쇠기는 능동 제어기와는 달리 원하는 감쇠력을 직접 발생시키기 어렵고, 감쇠기에 주어진 전압과 감쇠기 양단의 거동(변위, 속도 등)에 따라 감쇠력이 정해진다. 따라서 반능동 제어 알고리즘도 이러한 반능동 감쇠기의 특성을 고려하여 구조물의 거동에 따라 필요한 감쇠력을 발휘할 수 있는 감쇠기의 전압을 산정하는 식을 제안하거나 MR 감쇠기가 원하는 감쇠력에 최대한 비슷한 제어력을 발생시키도록 유도하는 clipped 알고리즘을 사용하고 있다. 현재까지 반능동 제어기를 위한 다양한 알고리즘들이 발표되어졌으며 본 연구에서는 그 중 가장 효율적이라 알려진 Lyapunov 알고리즘, clipped-optimal 알고리즘, maximum energy dissipation 알고리즘, modulated homogeneous 알고리즘, clipped neuro-control 알고리즘의 다섯 가지 알고리즘을 적용하였다.

(3) 신개념 스마트 제진 시스템

MR 감쇠기의 동작을 위해서는 MR 감쇠기 내의 자기장 변화를 위해 전류를 가해줘야 한다. 여기에 필요한 전류를 본 연구과제에서 개발한 EMI 시스템에서 생산하여 MR 감쇠기에 입력한 것이 신개념 스마트 제진 시스템이다.

4.5. 실험결과

4.5.1. 수동제어 시스템

그림 3.4.5.1과 3.4.5.2는 각각 여러 가지 지진에 대한 수동제어시스템의 전류의 변화에 따른 최대가속도와 최대변위(1층)를 나타낸 그래프이다.

결과를 살펴보면 먼저 최대변위의 경우 대체적으로 MR 감쇠기에 흐르는 전류가 증가할 수록 제어성능이 좋아지는 것을 확인할 수 있다. 전반적으로 passive-off 시스템의 제어성능이 가장 좋지 않고, 1.0 A, 1.5 A 혹은 3.0 A에서 가장 좋은 제어성능을 보이는 것으로 나타났다. 그러나 최대가속도의 경우에는 특정한 경향을 가지지 않은채, 각 지진에 따라 최적의 제어성능을 보이는 전류값이 모두 다른 것으로 보인다. 그러나 Kobe 지진을 제외하고는 대체적으로 2.0 A의 전류값에서 좋은 성능을 나타내고 있는 것으로 판명되었다. 이상을 정리해 보면, passive-optimal 시스템은 대략 2.0 A 의 전류값을 MR 감쇠기에 흘려보내줄 때라는 것을 알 수 있다. 그러므로 이후에 반능동 제어 알고리즘과의 비교에서 passive-optimal 시스템은 MR 감쇠기에 2.0 A 의 전류를 흘려보내주는 경우로 정의하도록 한다.

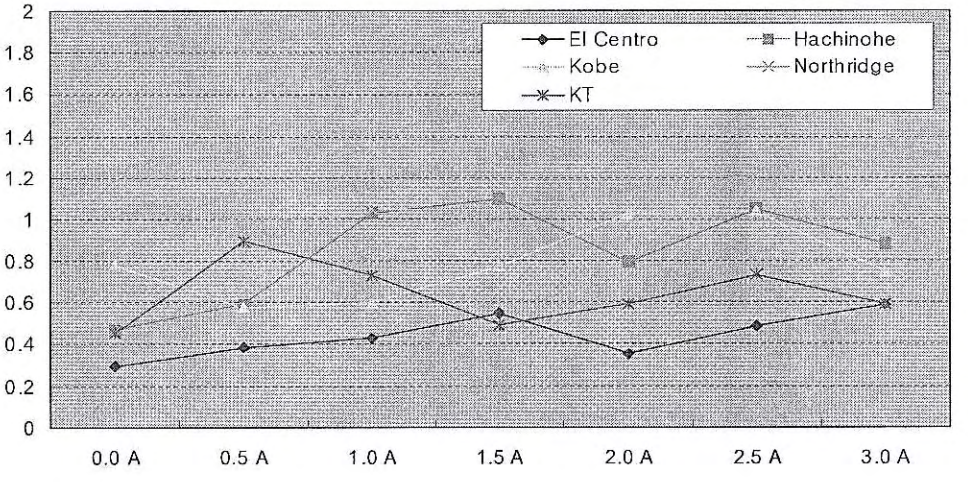


그림 3.4.5.1. 여러 가지 지진하중에 대한 수동제어시스템의 정규화된 최대가속도

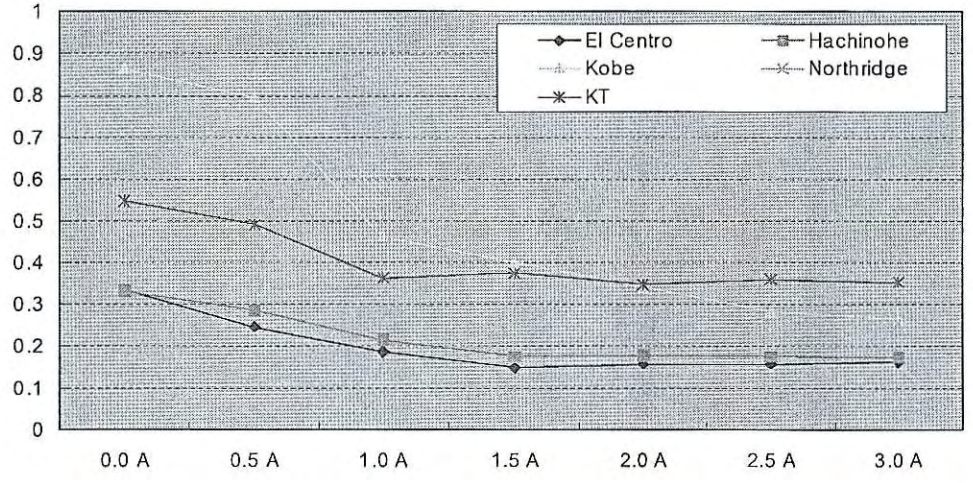


그림 3.4.5.2. 여러 가지 지진하중에 대한 수동제어시스템의 정규화된 최대변위(1층)

4.5.2. 반능동제어 시스템

다섯 가지의 반능동제어 시스템의 제어성능을 최대가속도와 최대변위(1층)에 대해 passive-optimal 결과와 비교하였다. 북쪽과 남쪽에 각각 설치된 MR 감쇠기의 용량이 서로 같은데도 불구하고, 대상구조물의 특성상 북쪽의 변위가 남쪽의 변위에 비해 적었고, MR 감쇠기에서 발생하는 감쇠력은 더 컸다. 그랬기 때문에 최대변위에 대한 성능을 평가할 때는 북쪽과 남쪽의 변위의 평균값의 최대값을 대상으로 비교하였다. 그림 3.4.5.3부터 그림 3.4.5.6까지는 각각의 지진하중에 대한 각각의 반능동 제어 시스템의 1층 변위, 5층의 가속도, MR 감쇠기에 흐르는 전류, MR 감쇠기의 감쇠력의 시간이력을 보여주고 있다. 전반적으로 반능동 제어시스템의 제어성능이 제어하지 않았을 때와 비교하여 뛰어난 것을 알 수 있고, 감쇠력도 Kobe 지진일 경우 감쇠기 하나에서 8 kN 정도 발생했던 것으로 나타나서, 최대 16 kN, 즉 1.6 ton 정도의 감쇠력이 발생된 것으로 볼 수 있다.

그림 3.4.5.7과 그림 3.4.5.8은 각각의 지진하중에 대한 반능동 제어 시스템의 제어성능을 최대변위(1층)와 최대가속도에 대해 비교하는 그래프이다. 최대변위(1층)에 대한 제어성능부터 살펴보면, MEDA 제어 시스템과 Passive-optimal 제어 시스템의 성능이 가장 좋고, 신경망 제어 시스템의 성능이 가장 좋지 않으며, 나머지

제어 시스템은 그 중간 정도의 서로 비슷한 제어성능을 나타내고 있다. 그러나 어떠한 제어 시스템도 제어하지 않았을 경우보다는 응답을 줄인 것으로 나타났다. 또한, 최대가속도에 대한 제어성능을 살펴보면, MEDA 제어시스템의 성능이 가장 나쁘고 MHF 제어 시스템과 Passive-optimal 제어 시스템의 성능이 그 다음으로 나쁘며, 나머지 제어 시스템은 비슷한 제어성능을 보여주고 있는 가운데, 신경망 제어 시스템의 성능이 가장 좋다는 것을 확인할 수 있다. 이는 대부분의 제어 시스템이 최대변위에서 좋은 성능을 나타내기 위해 최대가속도에서 어느 정도의 희생을 하거나, 반대로 최대가속도에서 좋은 성능을 나타내기 위해 최대변위에서 희생을 하는 보상효과(trade-off)를 보여주고 있는 것으로 나타났다. 또한, MEDA 제어 시스템이나 MHF 제어 시스템, passive-optimal 제어 시스템의 경우 최대가속도에서 제어하지 않은 경우보다 제어성능이 더 나빠진 경우가 있었다. 결론적으로 Clipped-optimal 제어 시스템이나 Lyapunov 제어 시스템의 성능이 가속도나 변위를 동시에 줄이는데 있어선 가장 효율적인 제어 시스템이었고, 신경망 제어 시스템은 가속도 응답을 줄이는데 있어서, MEDA, MHF, Passive-optimal 제어 시스템은 변위 응답을 줄이는데 있어 뛰어난 성능을 보여주었다.

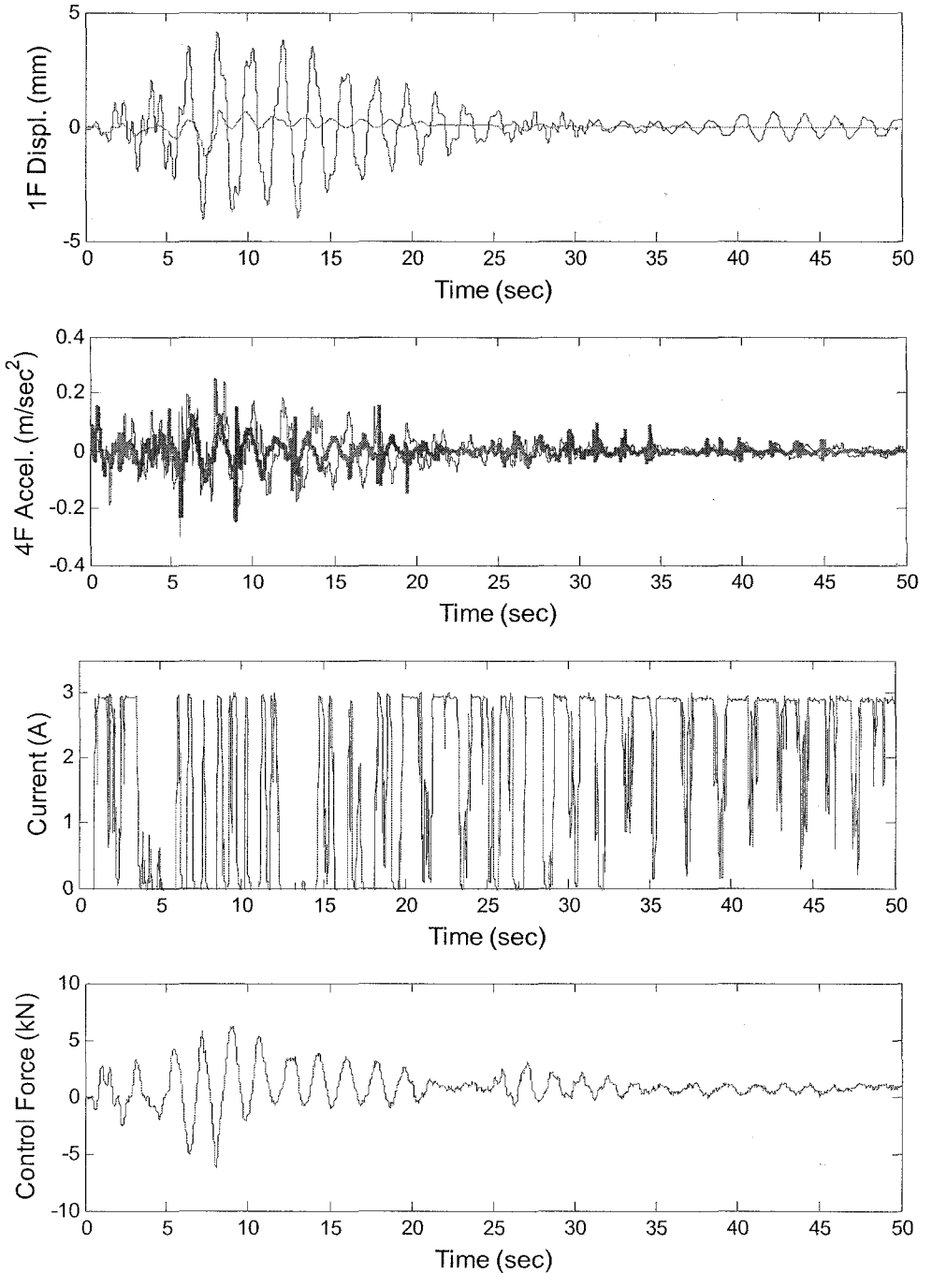


그림 3.4.5.3 El Centro 지진하중에 대한 MHF 제어시스템의 실험결과

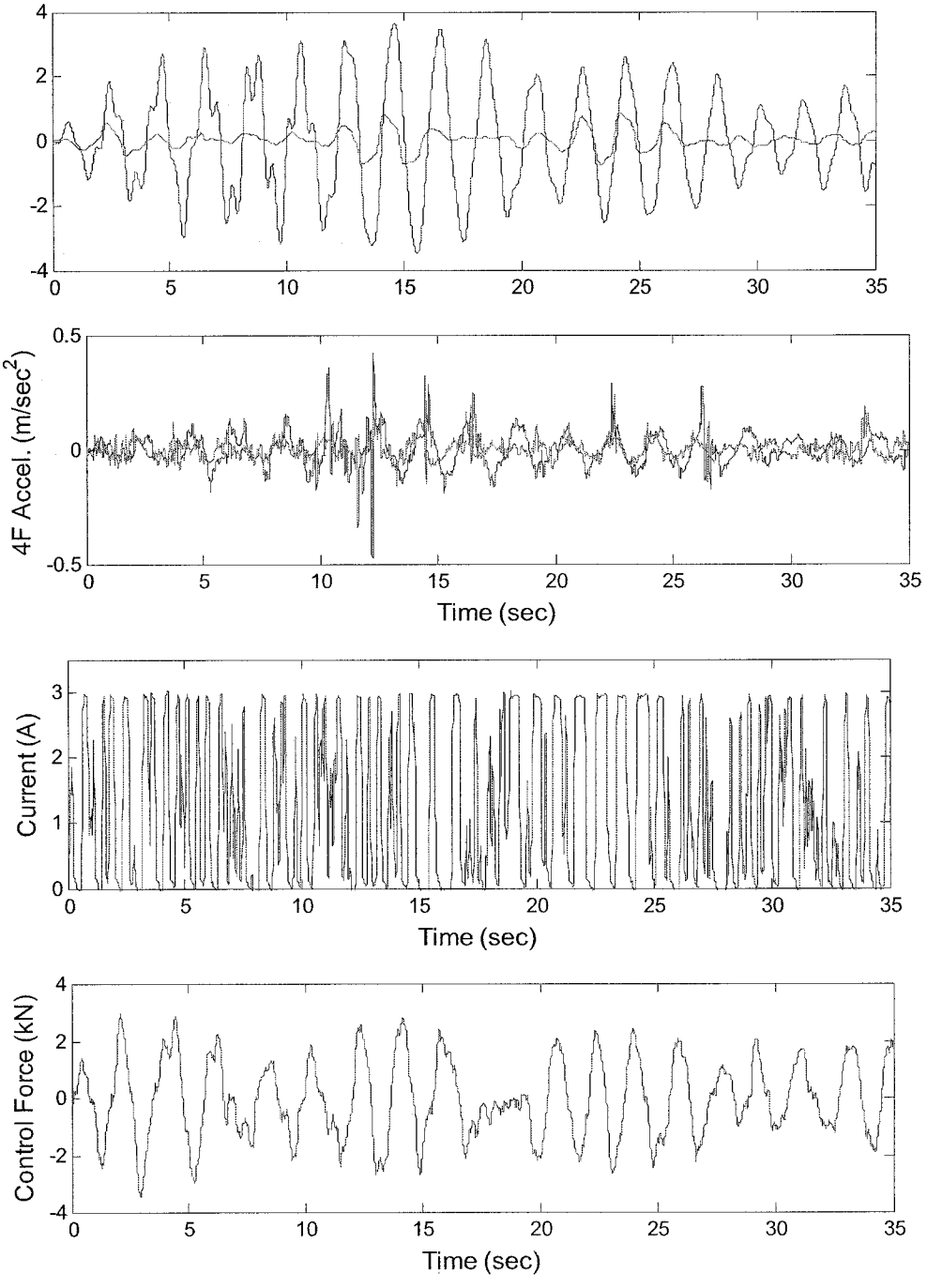


그림 3.4.5.4 Hachinohe 지진하중에 대한 Lyapunov 제어시스템의 실험결과

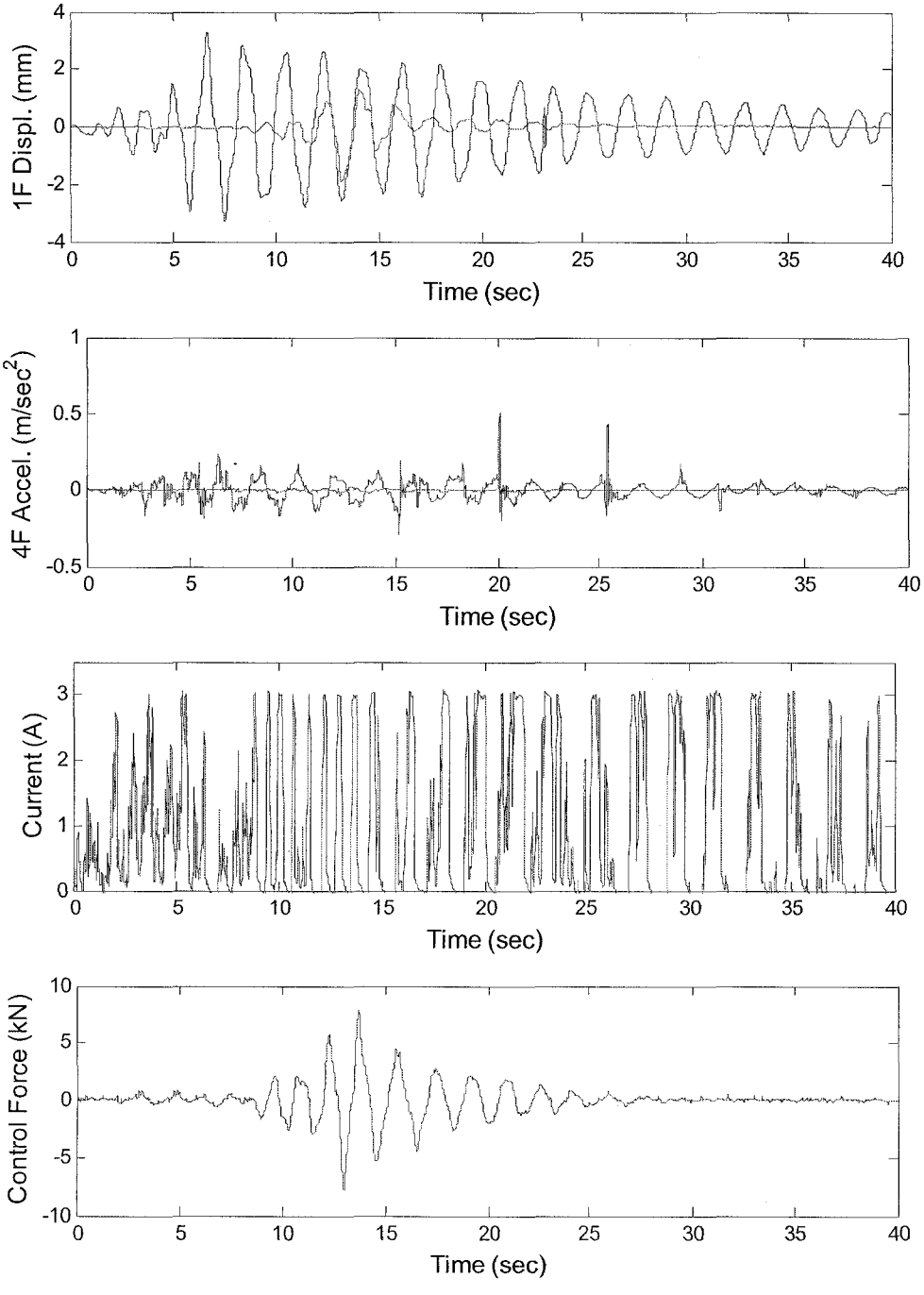


그림 3.4.5.5 Kobe 지진하중에 대한 Clipped-optimal 제어시스템의 실험결과

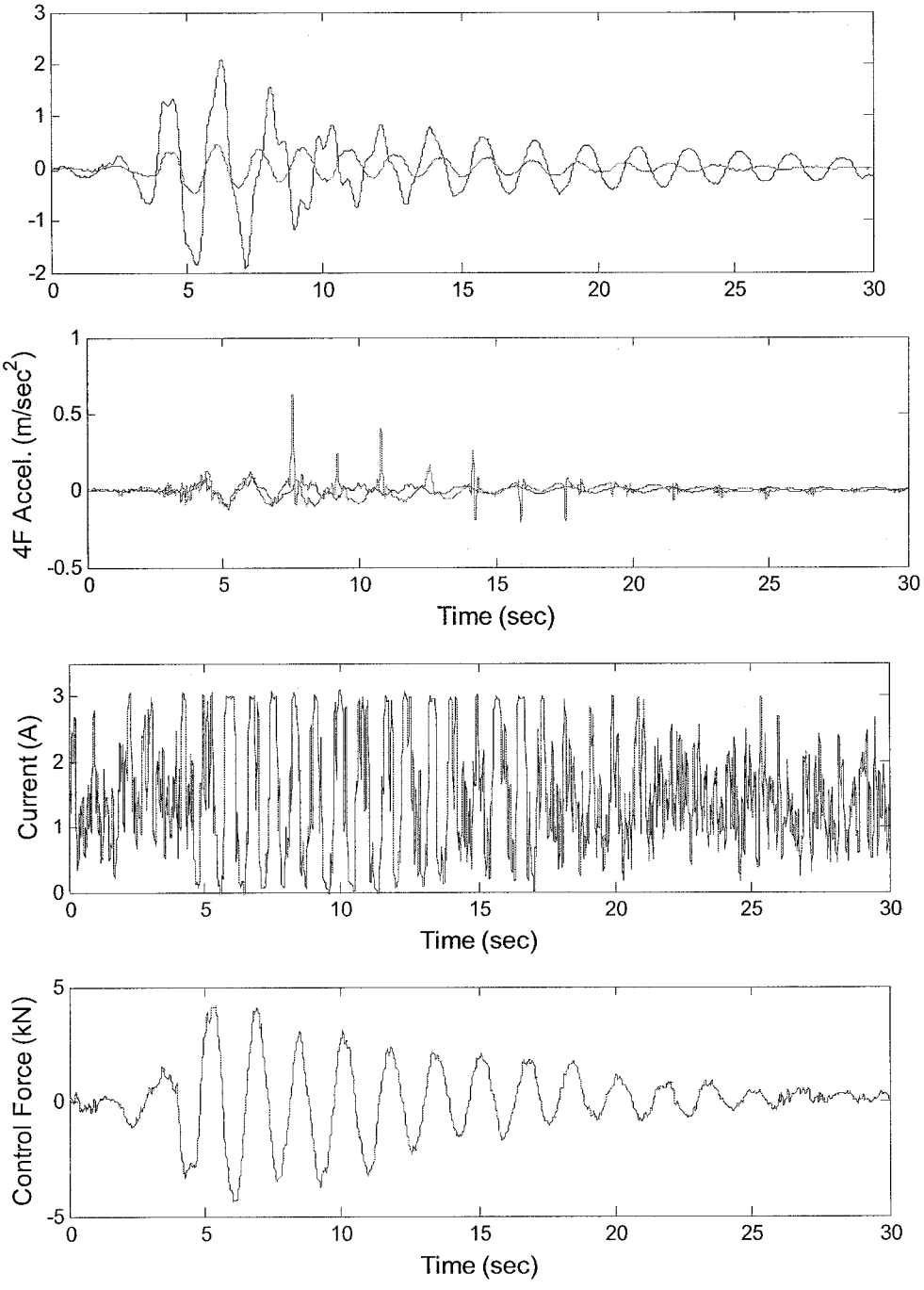


그림 3.4.5.6 Northridge 지진하중에 대한 MEDA 제어시스템의 실험결과

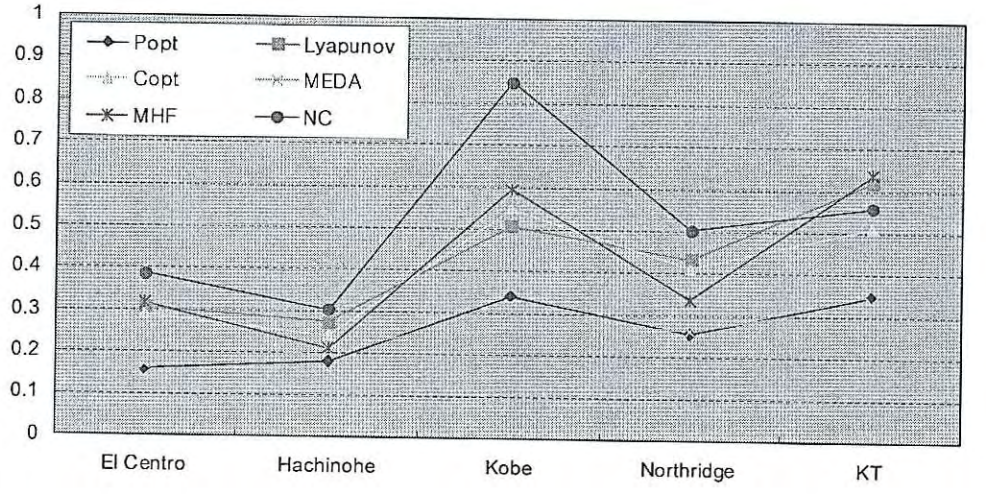


그림 3.4.5.7 각각의 반능동 제어시스템의 최대변위(1층)에 대한 제어성능 평가 (제어하지 않았을 때로 정규화된 값)

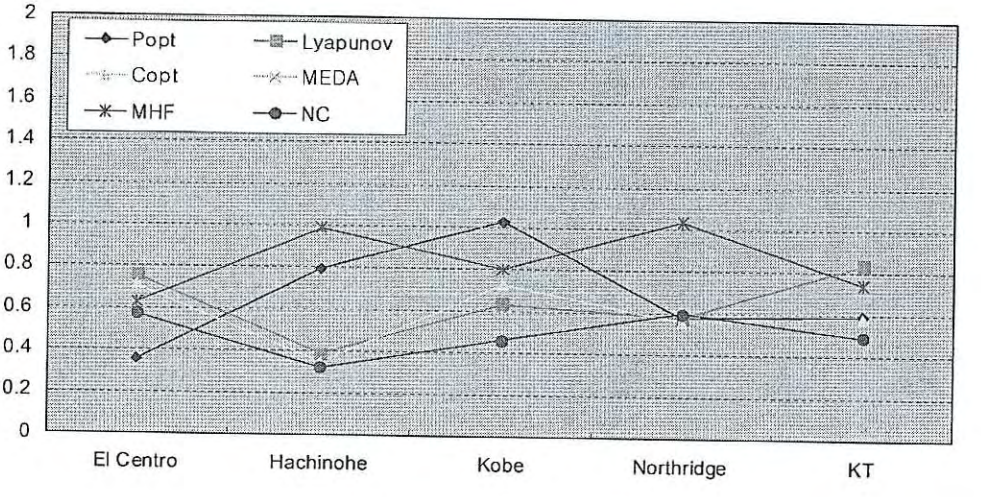


그림 3.4.5.8 각각의 반능동 제어시스템의 최대가속도에 대한 제어성능 평가 (제어하지 않았을 때로 정규화된 값)

4.5.3. 신개념 스마트 제진 시스템

반능동 제어 시스템은 제어 성능은 훌륭하지만 설치 및 유지관리가 어렵고 비용이 많이 들며 계측기, 제어용 컴퓨터, 전원공급장치, 전선 등의 부대 장치가 너무 많이 필요한 등의 단점이 있다. 이런 단점들을 극복하기 위해 본 연구과제에서 개

발한 것이 신개념 스마트 제진 시스템이기 때문에 본 연구에서 신개념 스마트 제진 시스템의 제진 성능을 최적 수동제어 시스템의 경우와 비교하였다.

최적 수동제어 시스템과 비교한 신개념 스마트 제진 시스템의 제진 성능 결과를 표 3.4.5.1과 그림 3.4.5.9에 나타내었다. 주된 제어 대상인 1층 변위의 경우 입력 가진 하중에 따라 14 ~ 35% 정도의 감소효과를 나타내었다. 2층 상대 변위의 경우 입력 가진 하중에 따라 증감되는데 대체적으로 비슷한 값을 나타내었다. 4층 가속도의 경우 2층 상대 변위의 경우와 마찬가지로 입력 가진 하중에 달라지면서 특별한 경향을 나타내지는 않았다.

각 입력 가진 하중에 따른 1층에서의 변위, 2층에서의 상대변위, 4층 가속도에 대한 수동제어 시스템과 신개념 스마트 제진 시스템의 경우의 시간이력곡선과 신개념 스마트 제진 시스템에서 유도된 유도전류의 시간이력곡선을 그림 3.4.5.10 ~ 그림 3.4.5.16에 도시하였다.

표 3.4.5.1 신개념 스마트 제진 시스템의 제진성능(passive 제어에 대해 정규화)

가진 하중	1층 변위	2층 상대 변위	4층 가속도
El Centro	0.6565	0.9533	1.1653
Kobe	0.8767	0.9977	1.0686
Northridge	0.7615	0.9325	1.6292
Hachinoe	0.8573	1.1285	0.8468
Kanai Tajimi	0.6651	1.0757	0.8403
White Noise	0.8665	1.0413	1.1614

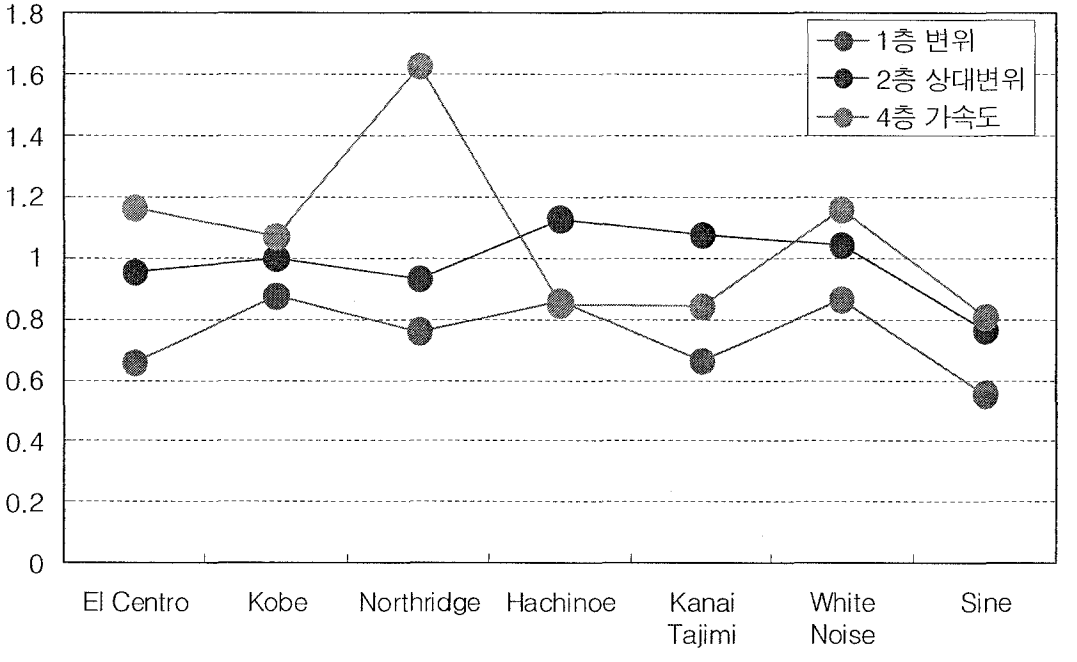
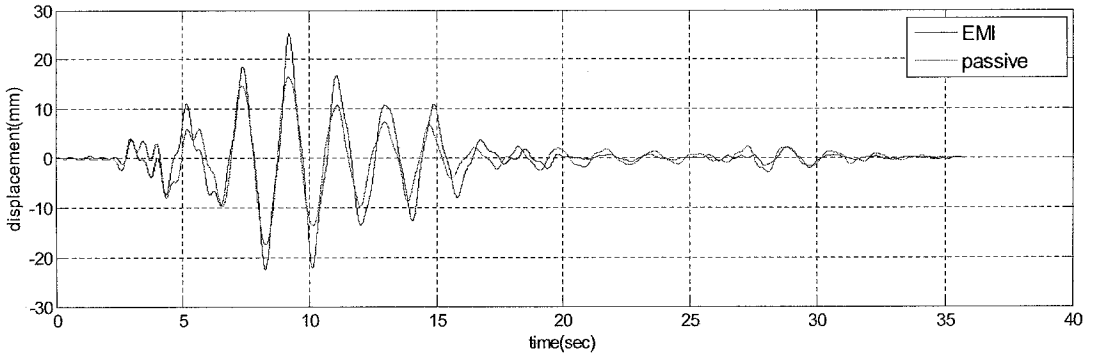
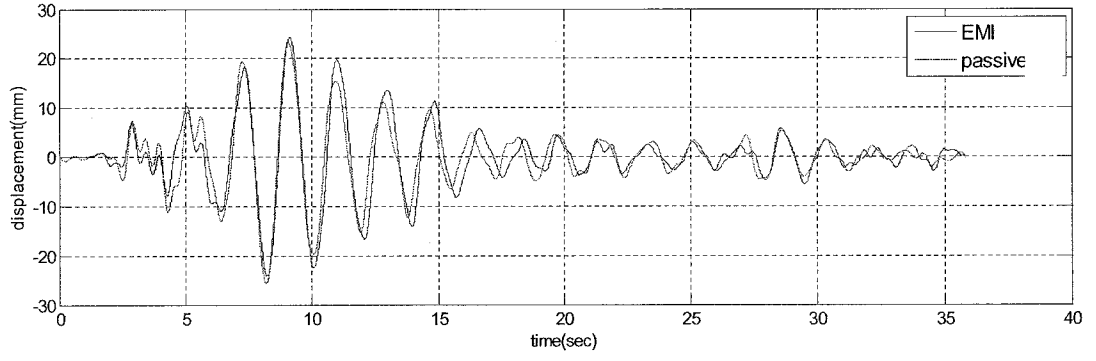


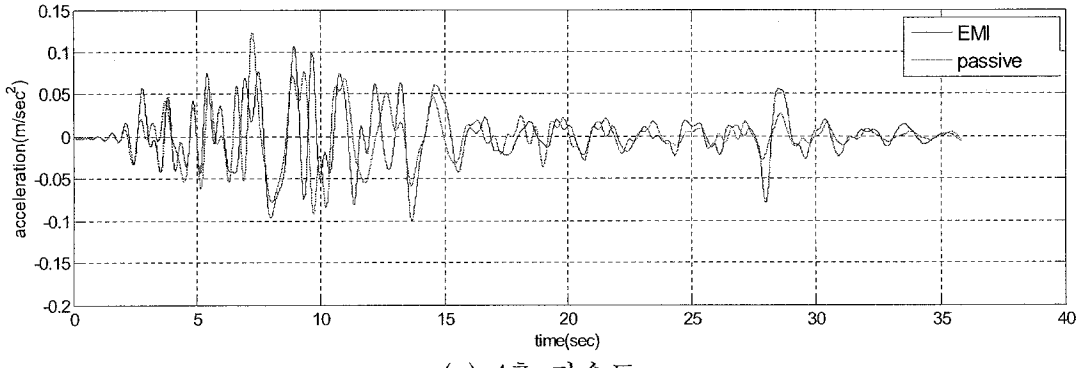
그림 3.4.5.9 신개념 스마트 제진 시스템의 제진성능(passive 제어에 대해 정규화)



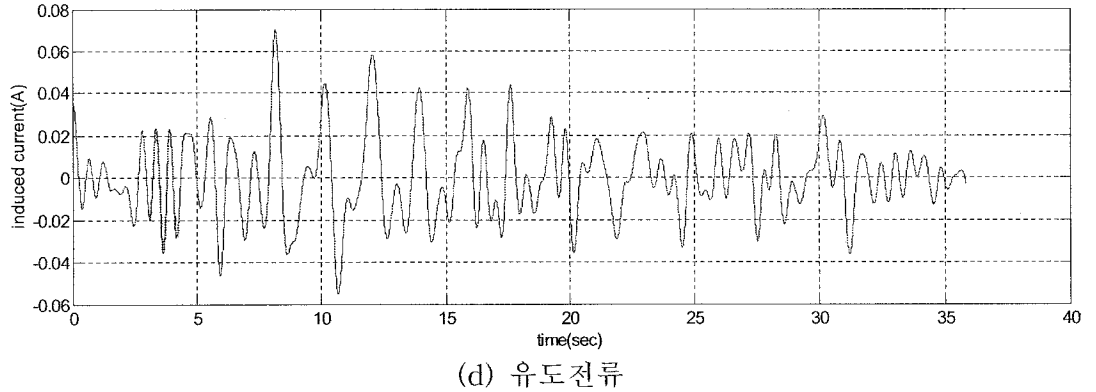
(a) 1층 변위



(b) 2층 상대변위

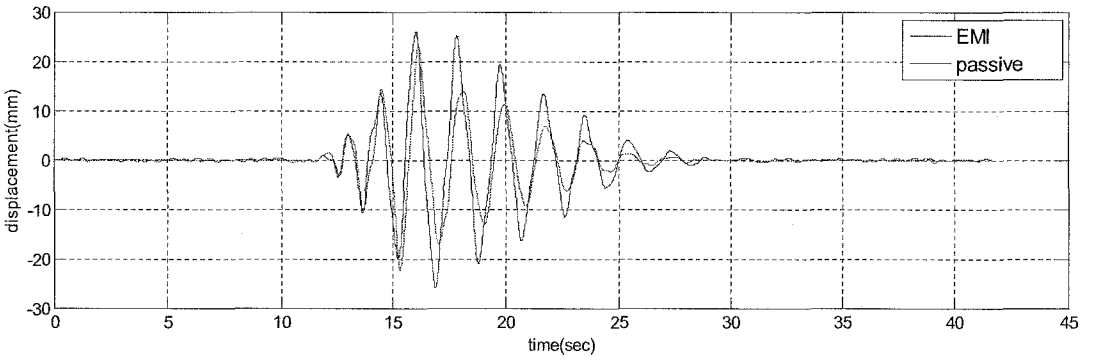


(c) 4층 가속도

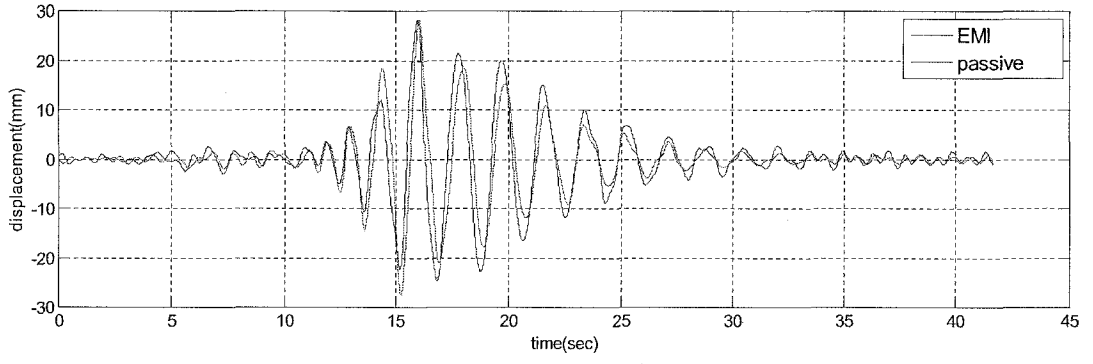


(d) 유도전류

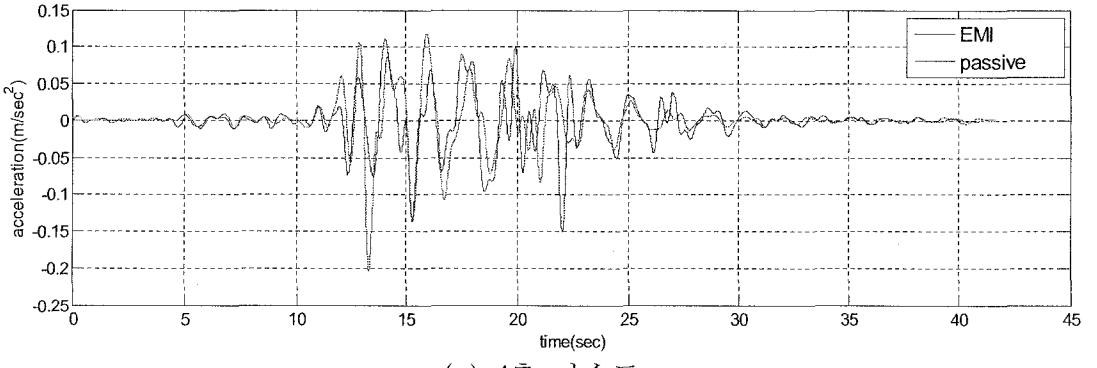
그림 3.4.5.10 신개념 스마트 제진 시스템 실험 결과(El Centro)



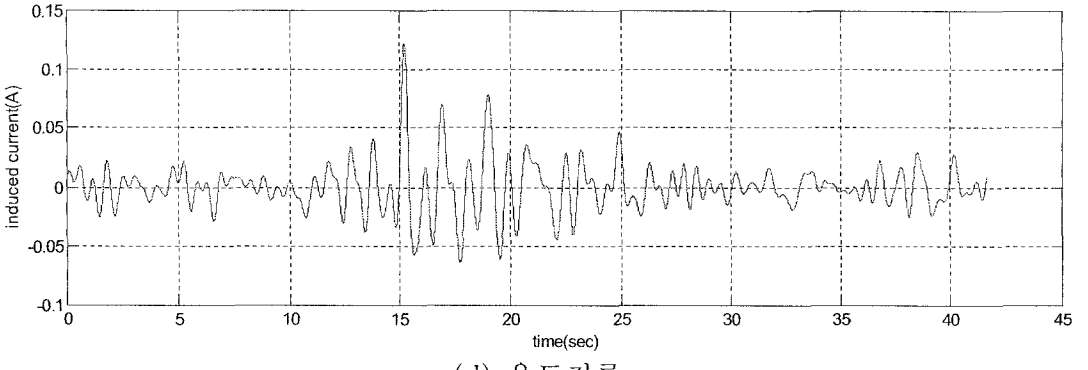
(a) 1층 변위



(b) 2층 상대변위

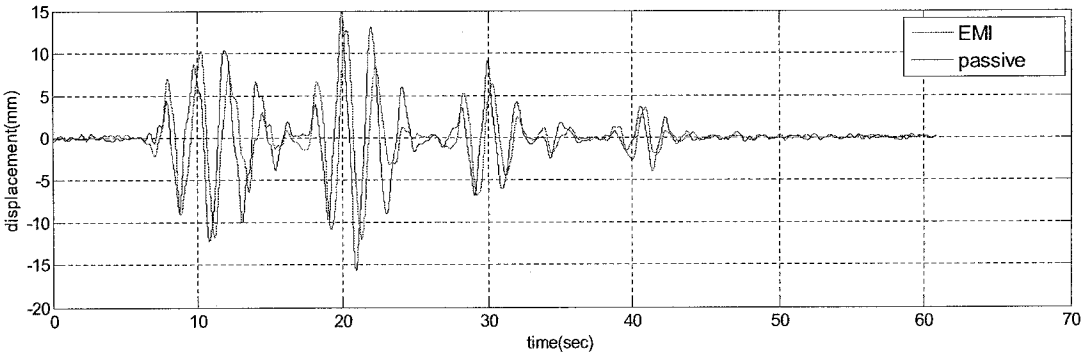


(c) 4층 가속도

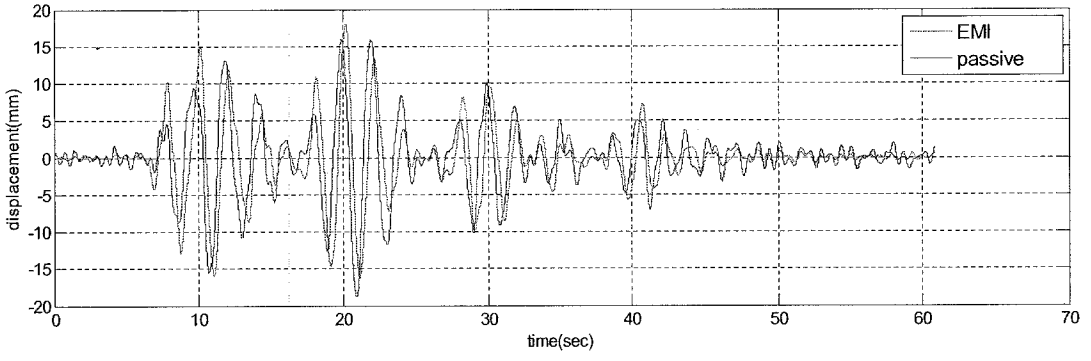


(d) 유도전류

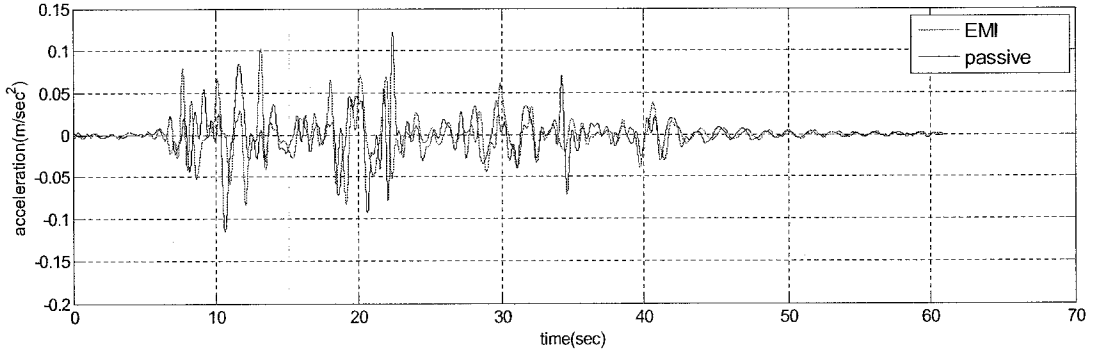
그림 3.4.5.11 신개념 스마트 제진 시스템 실험 결과(Kobe)



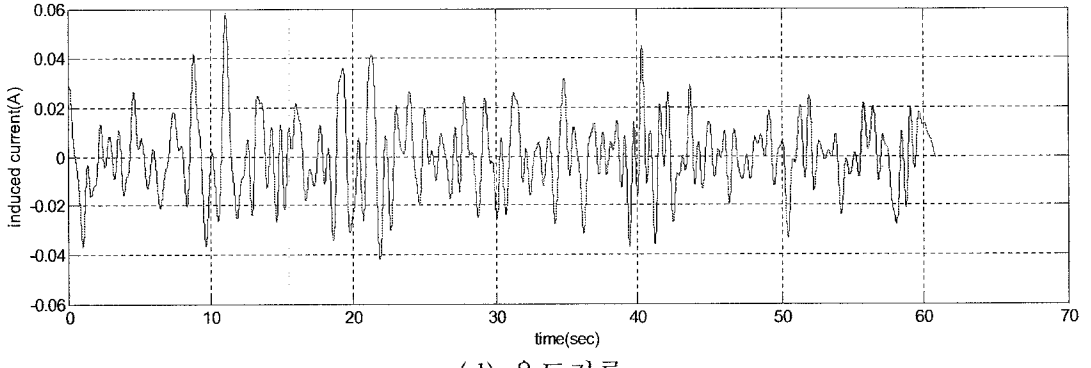
(a) 1층 변위



(b) 2층 상대변위

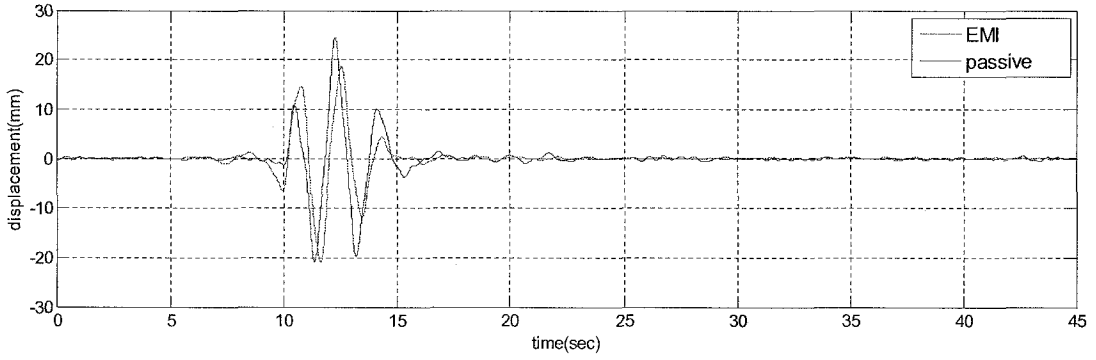


(c) 4층 가속도

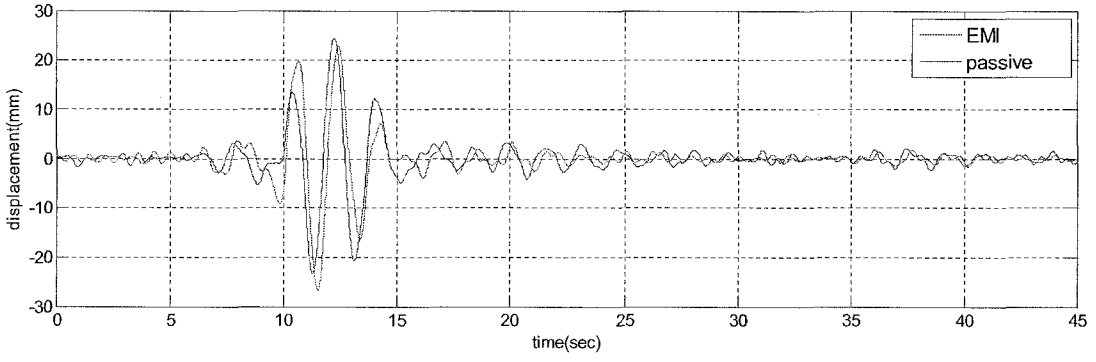


(d) 유도전류

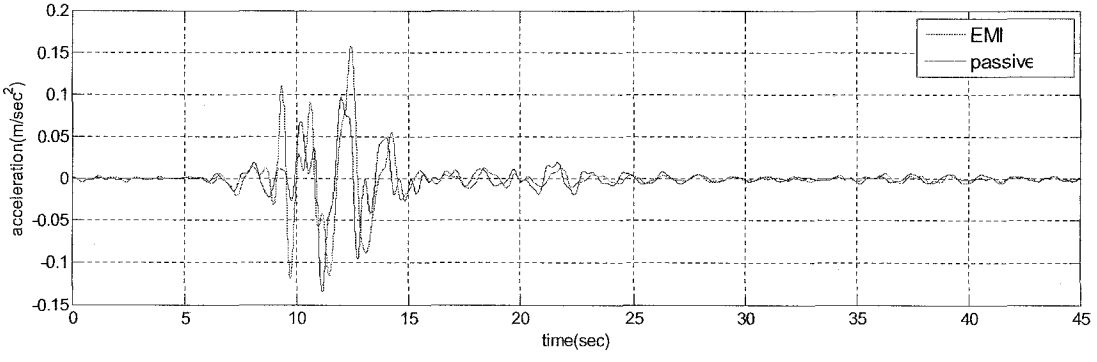
그림 3.4.5.12 신개념 스마트 제진 시스템 실험 결과(Hachinoe)



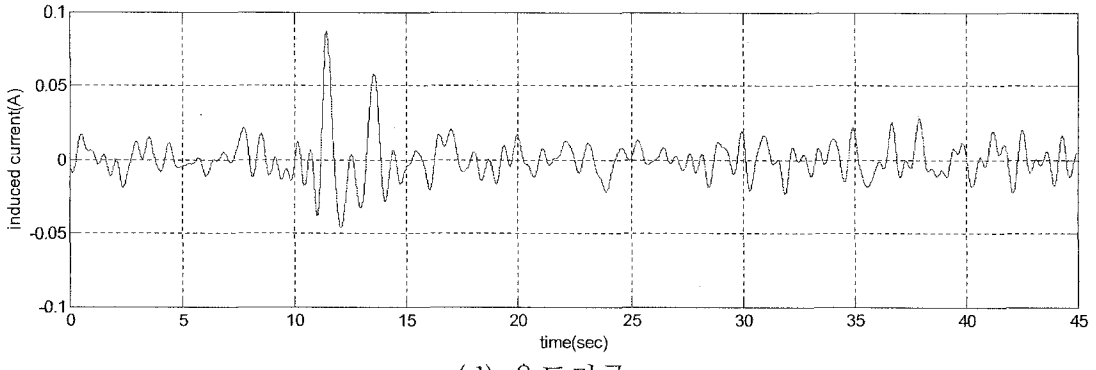
(a) 1층 변위



(b) 2층 상대변위

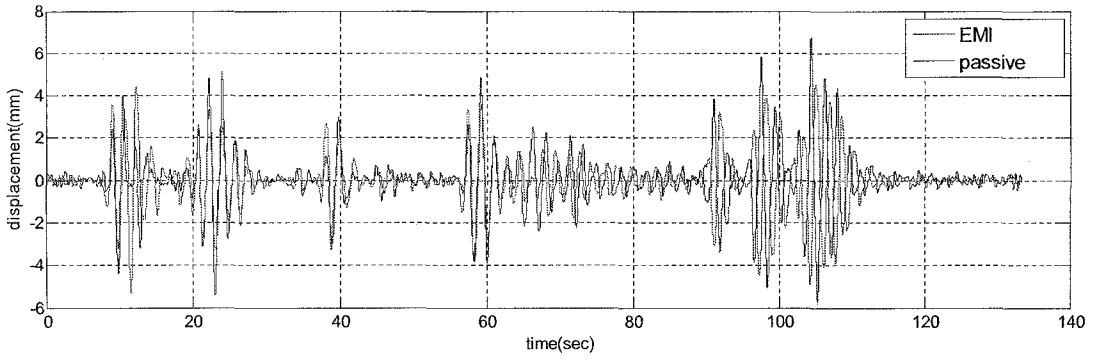


(c) 4층 가속도

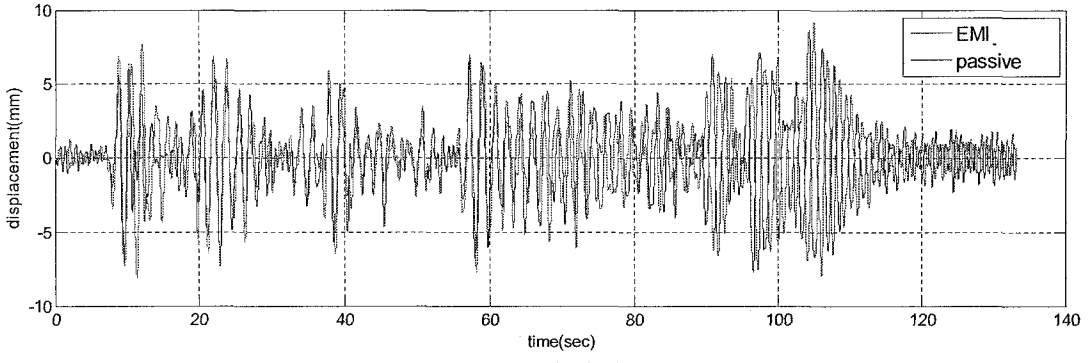


(d) 유도전류

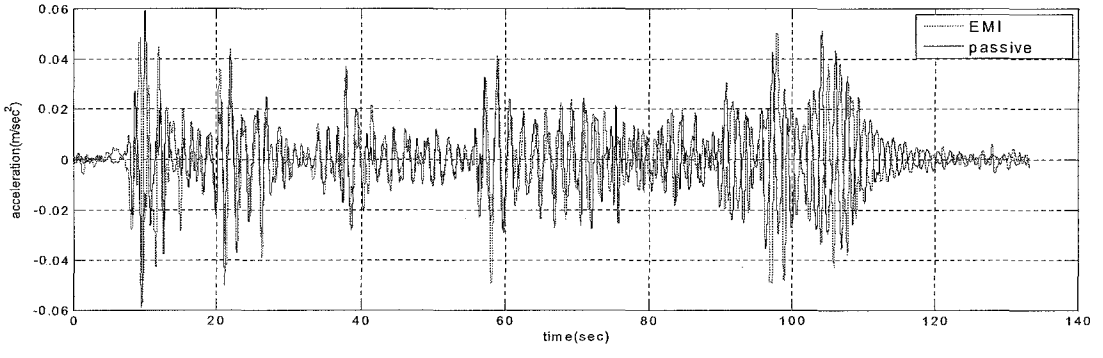
그림 3.4.5.13 신개념 스마트 제진 시스템 실험 결과(Northridge)



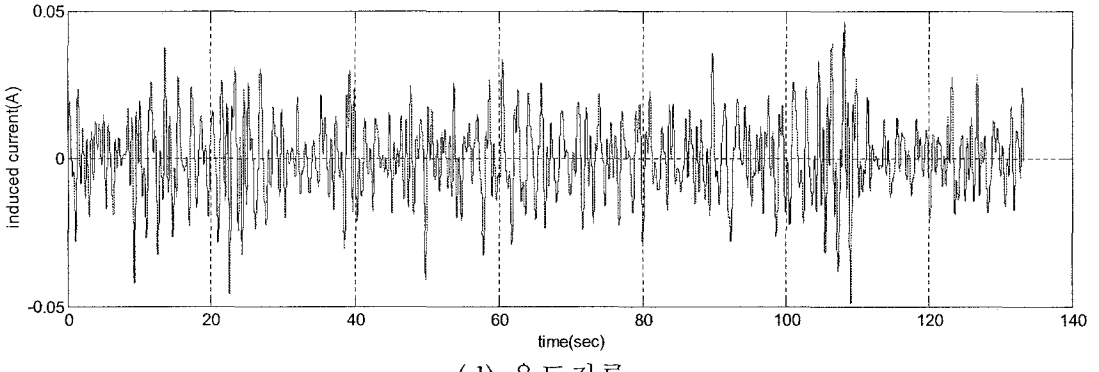
(a) 1층 변위



(b) 2층 상대변위

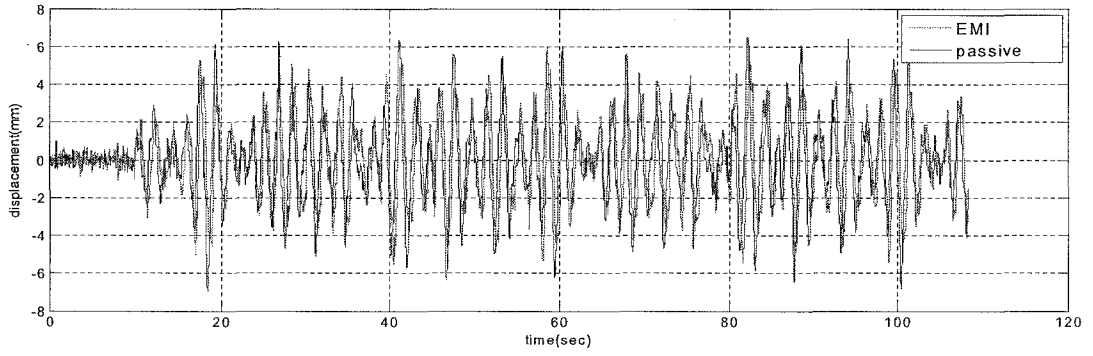


(c) 4층 가속도

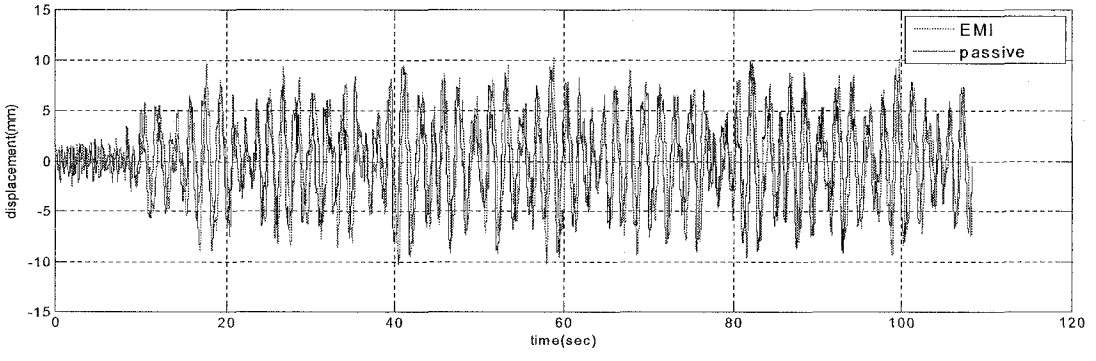


(d) 유도전류

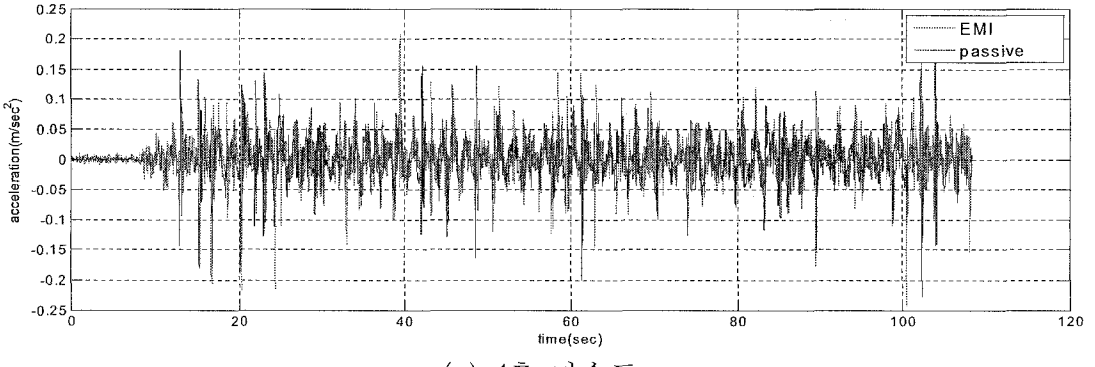
그림 3.4.5.14 신개념 스마트 제진 시스템 실험 결과(Kanai Tajimi)



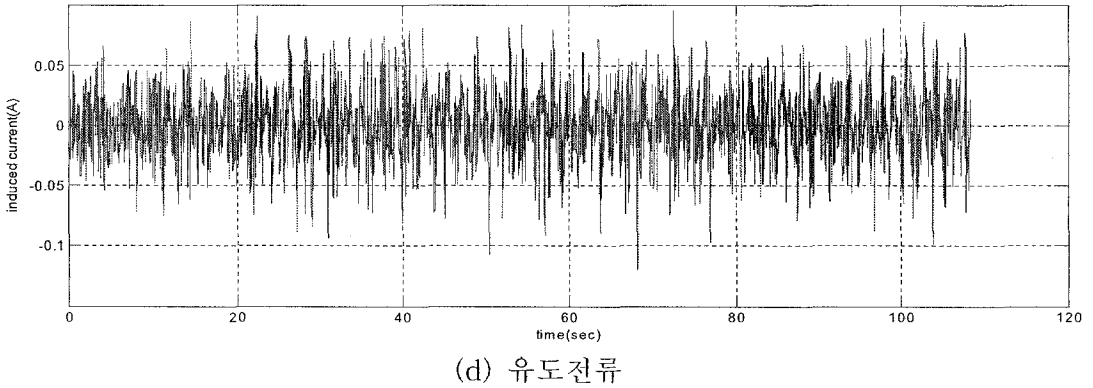
(a) 1층 변위



(b) 2층 상대변위

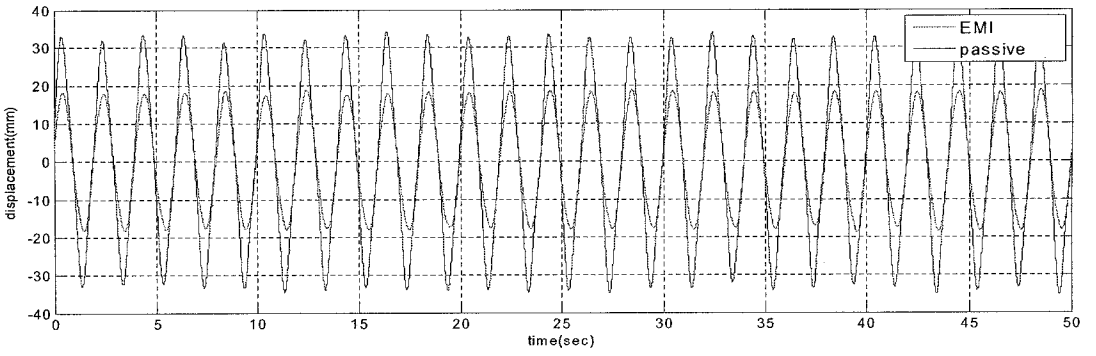


(c) 4층 가속도

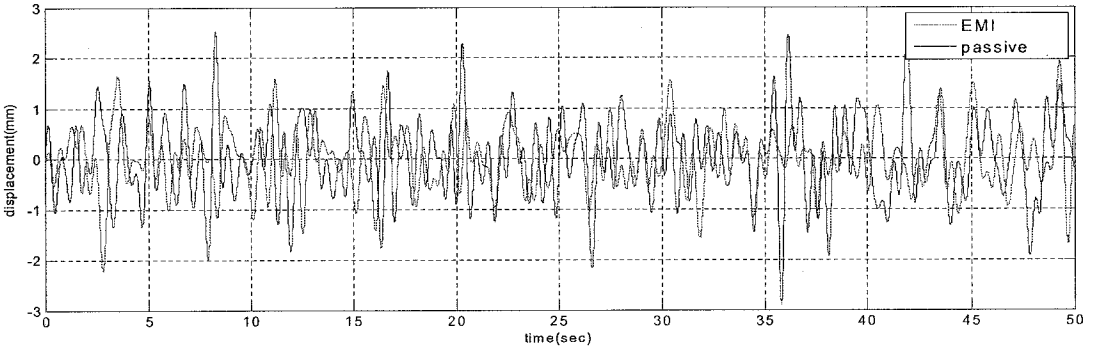


(d) 유도전류

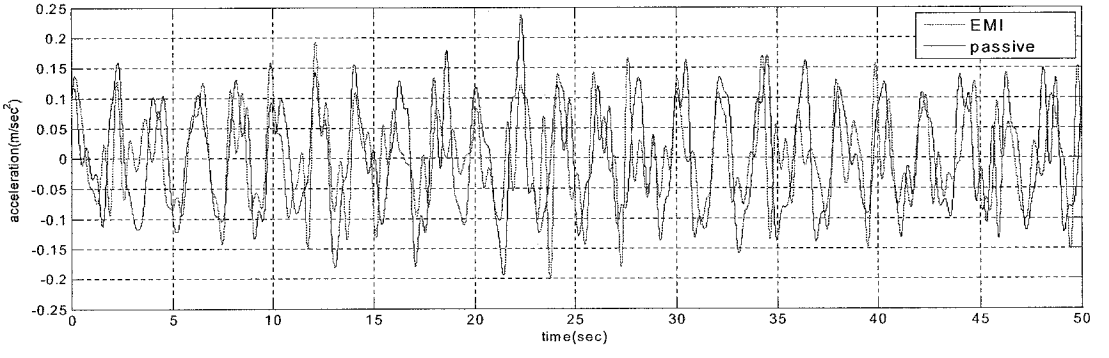
그림 3.4.5.15 신개념 스마트 제진 시스템 실험 결과(White Noise)



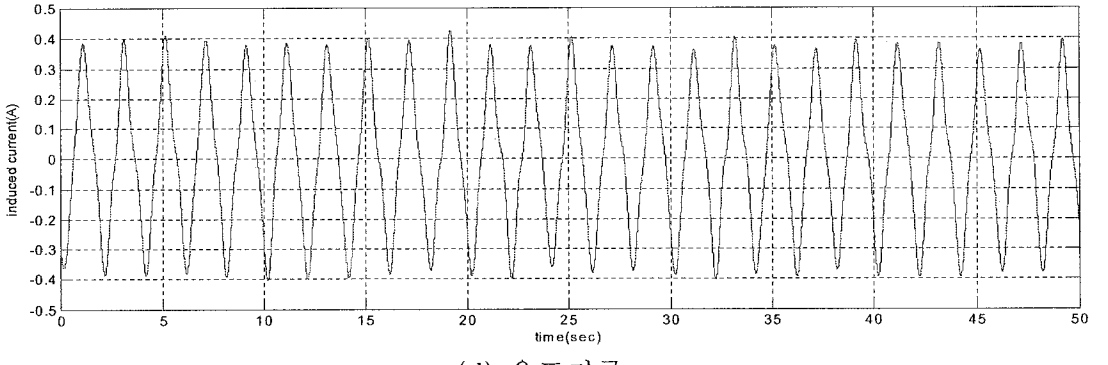
(a) 1층 변위



(b) 2층 상대변위



(c) 4층 가속도



(d) 유도전류

그림 3.4.5.16 신개념 스마트 제진 시스템 실험 결과(sine 하중)

4.6. 수치해석

실험을 통해 수행한 성능평가를 검증하기 위하여 수치해석을 수행하였다. 철골구조물은 5자유도 전단건물로 모델링하였고 건물의 각 물성치는 4.2절에서 수행한 System Identification을 통해 구한 표 3.4.2.1과 3.4.2.2를 사용하였다. 실험시와 마찬가지로 4층에 있는 HMD의 관성력을 통해 구조물을 가진하도록 묘사하였으며 HMD의 관성력은 HMD에서 계측한 가속도값에 HMD의 질량은 곱하여 구하였다.

실험에서 계측한 결과와 수치해석으로부터 구한 데이터의 시간이력을 비교하면 약간의 차이는 존재하나 전반적으로 유사한 경향으로 나타남을 확인 할 수 있었다.

수치해석에 의한 성능평가 결과 수동제어에 비해 스마트 제진장치의 진동저감 효과가 우수함을 확인할 수 있었다. 그림 3.4.5.9와 그림 3.4.6.1을 비교해보면 하중에 따라 실험과 수치해석 결과에 있어 차이가 있음을 알 수 있다. 그러나 전반적인 감소되는 경향은 비슷하기 때문에 수치해석을 통해 실험을 검증하거나, 실험에 앞서 미리 선행연구로 수치해석을 이용할 수 있다.

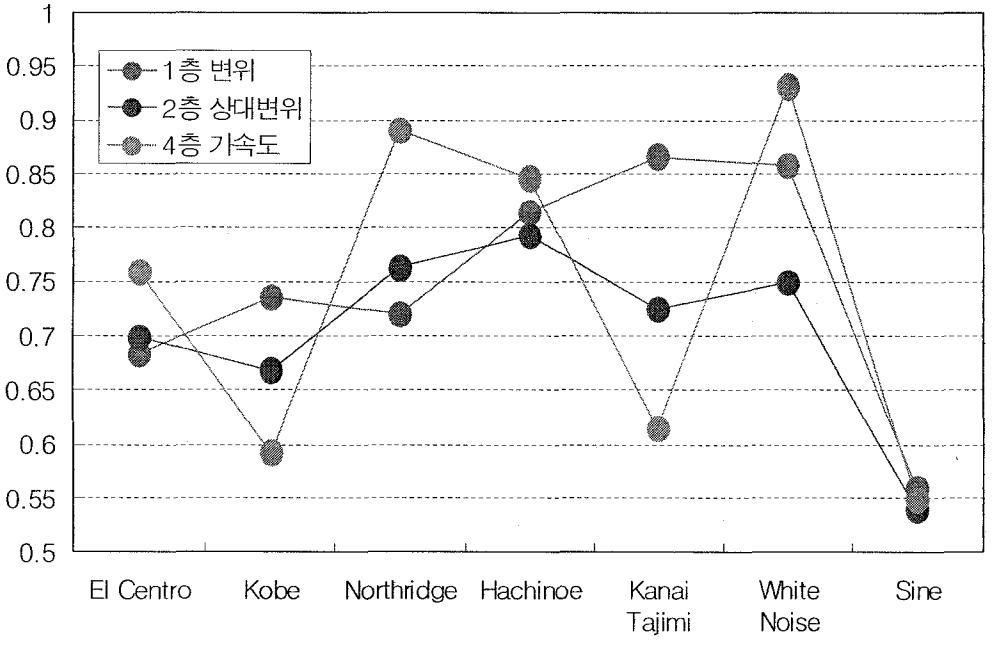
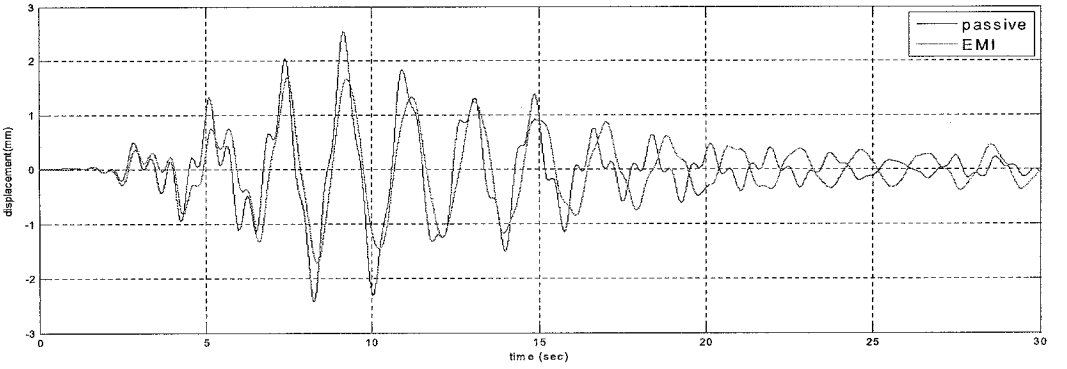
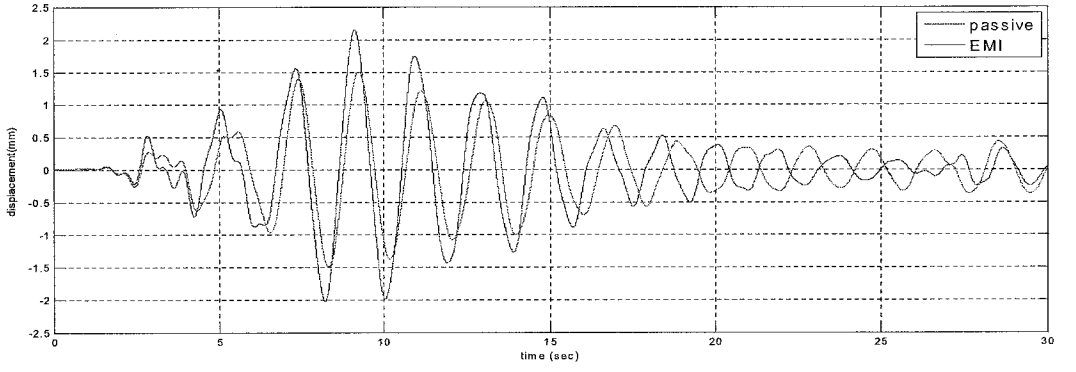


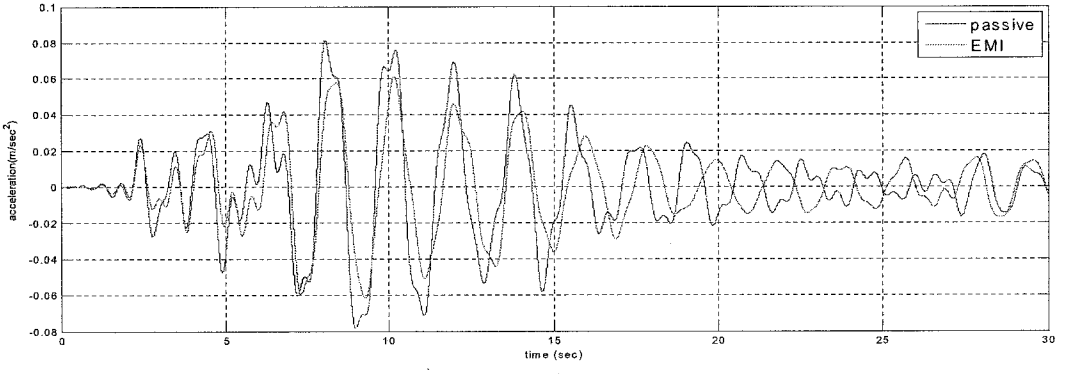
그림 3.4.6.1 수치해석 성능평가 (passive 에 대해 정규화)



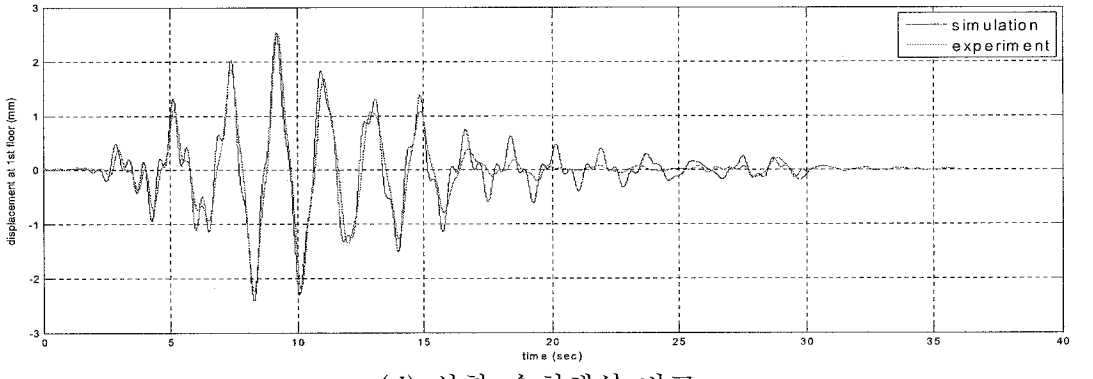
(a) 1층 변위



(b) 2층 상대변위

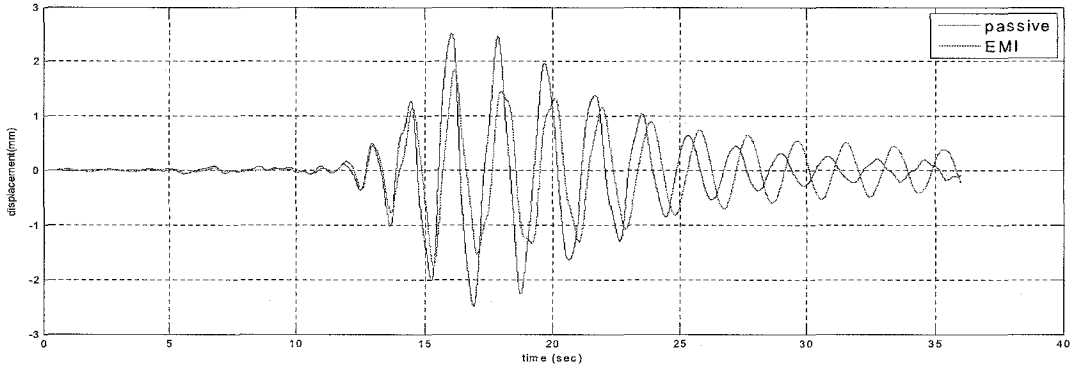


(c) 4층 가속도

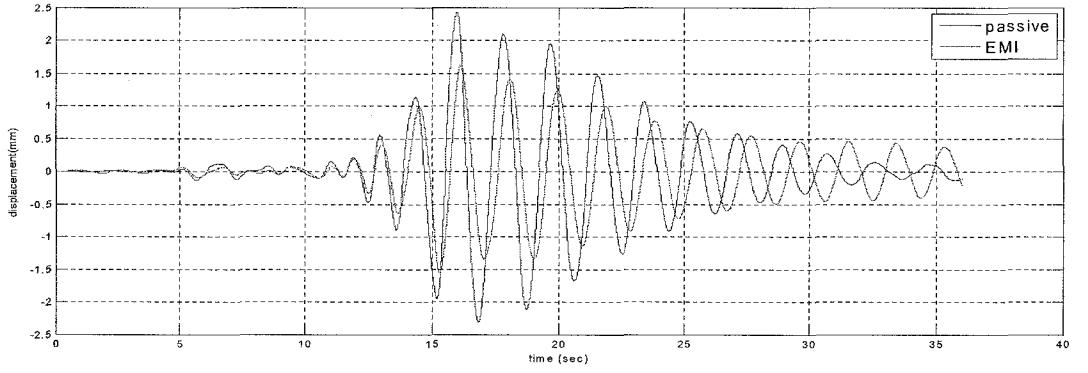


(d) 실험-수치해석 비교

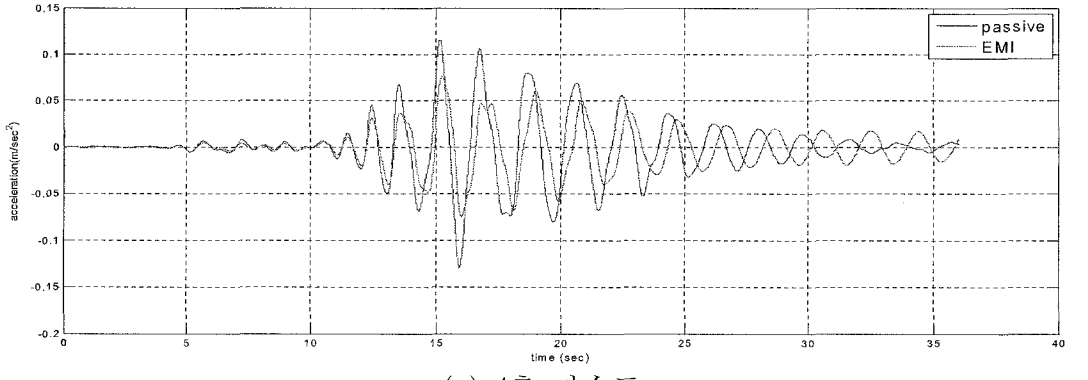
그림 3.4.6.2 신개념 스마트 제진 시스템 수치해석 결과(El Centro)



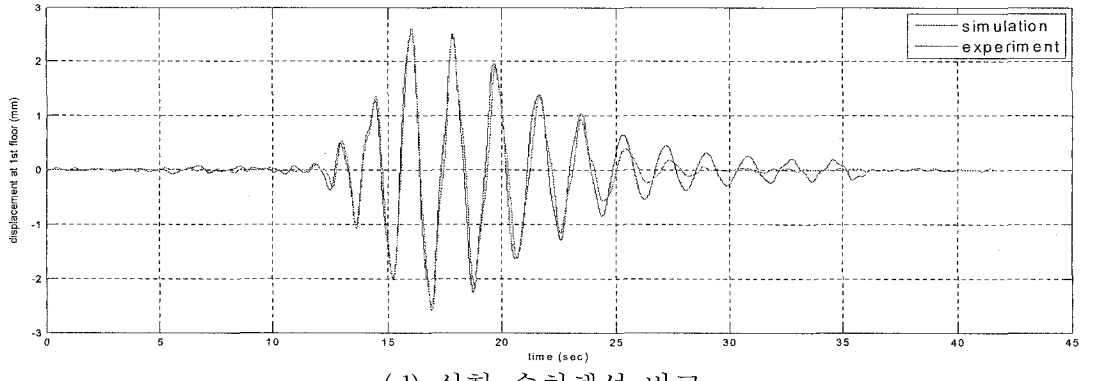
(a) 1층 변위



(b) 2층 상대변위

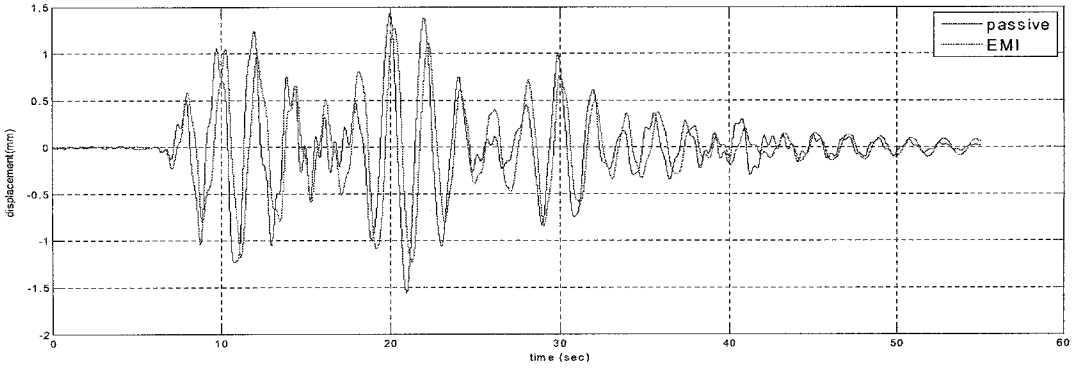


(c) 4층 가속도

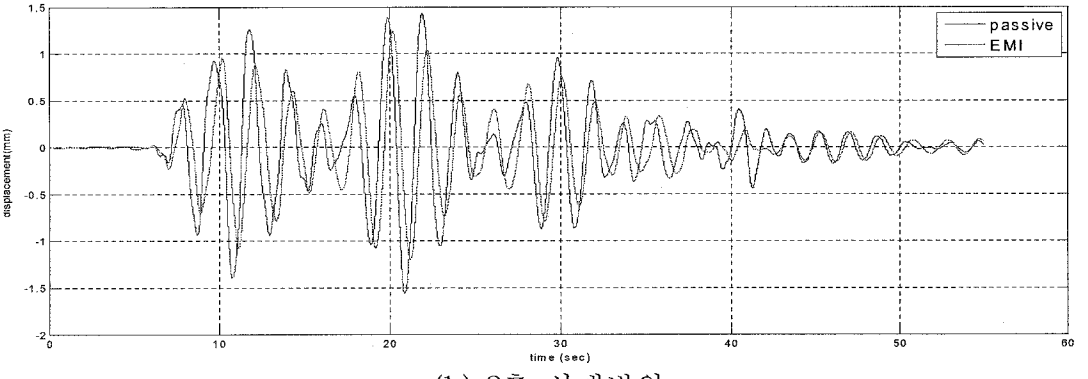


(d) 실험-수치해석 비교

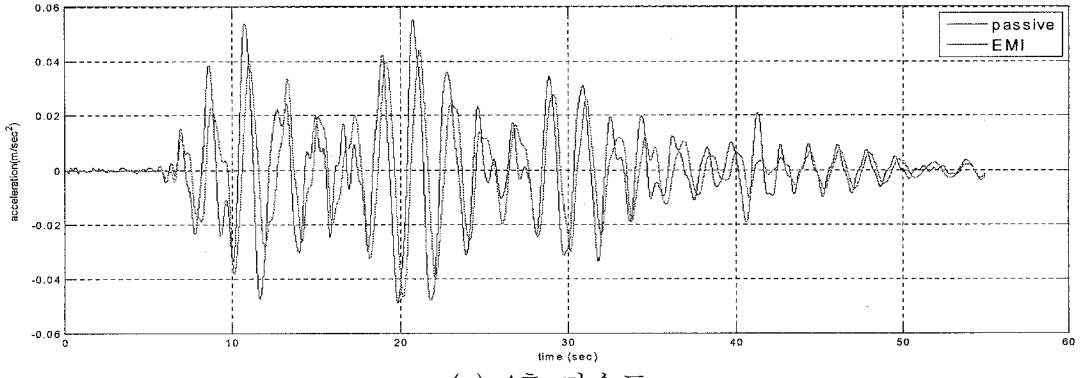
그림 3.4.6.3 신개념 스마트 제진 시스템 수치해석 결과(Kobe)



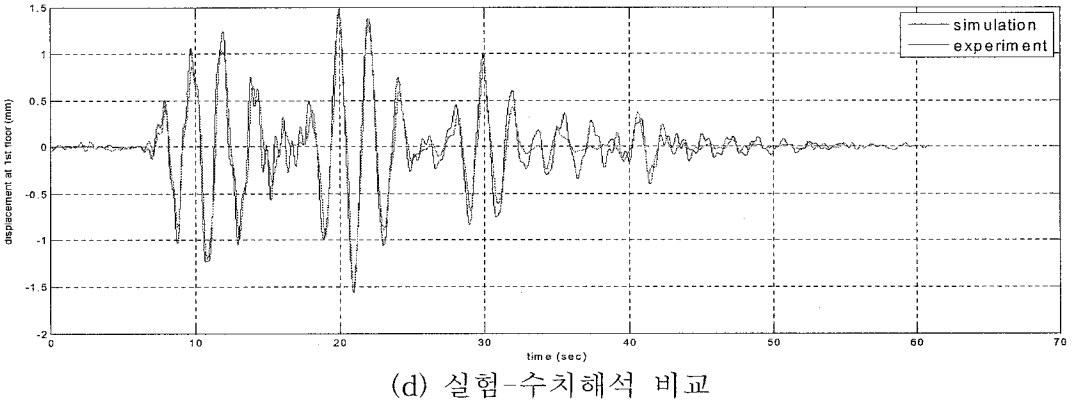
(a) 1층 변위



(b) 2층 상대변위

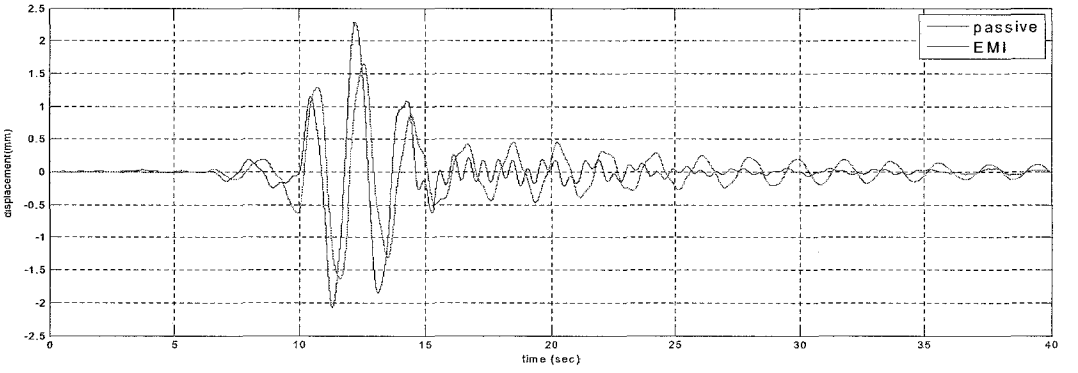


(c) 4층 가속도

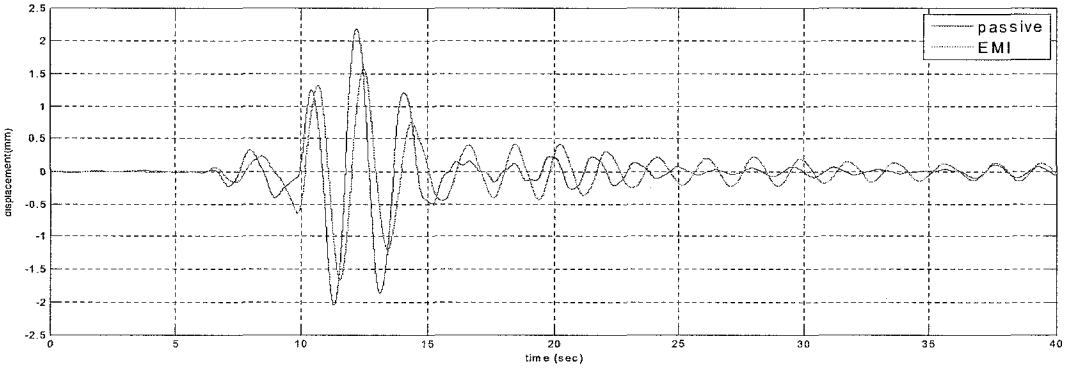


(d) 실험-수치해석 비교

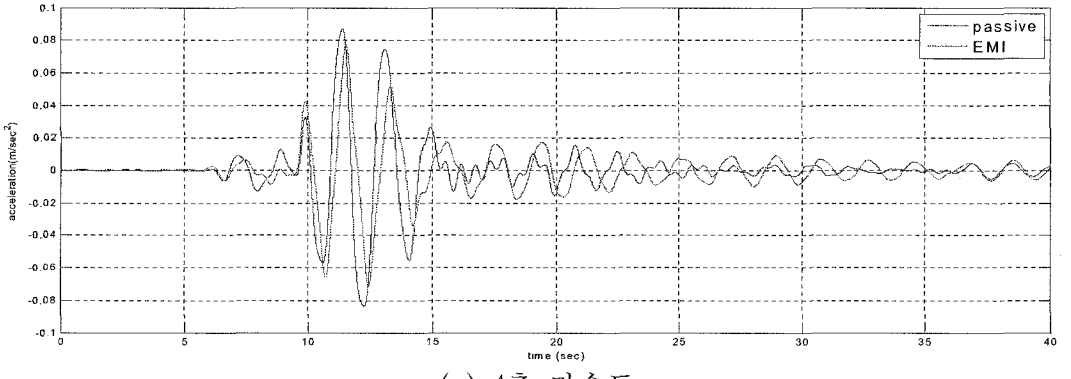
그림 3.4.6.4 신개념 스마트 제진 시스템 수치해석 결과(Hachinoe)



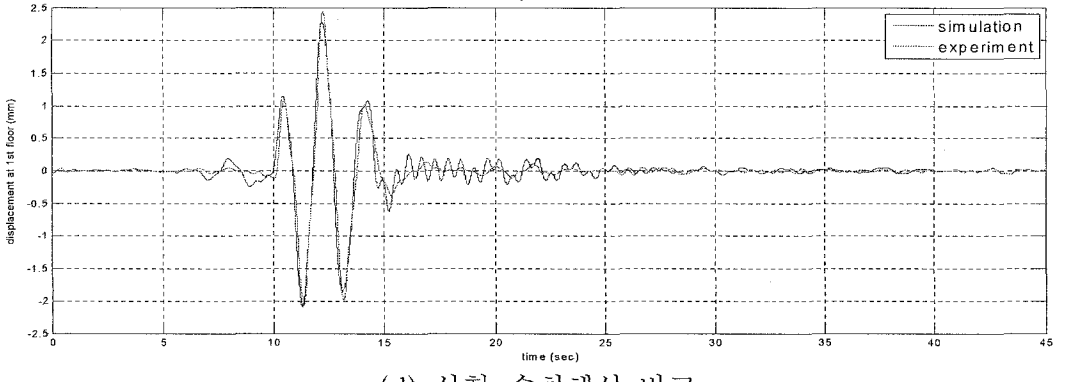
(a) 1층 변위



(b) 2층 상대변위

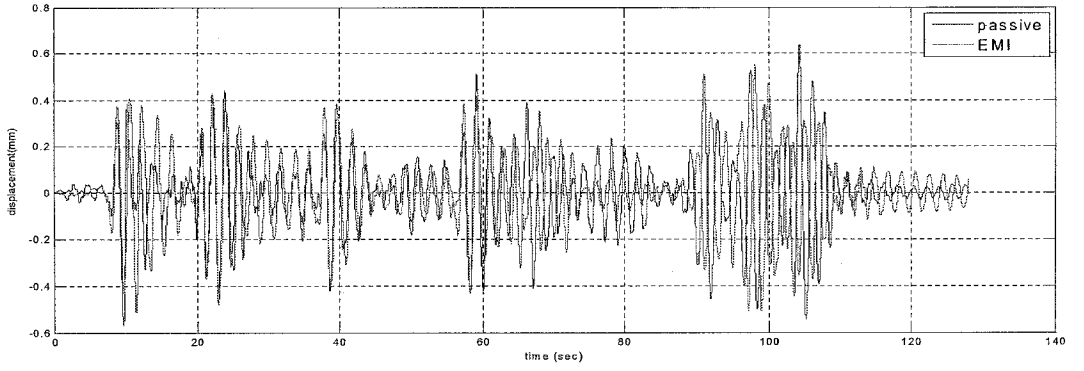


(c) 4층 가속도

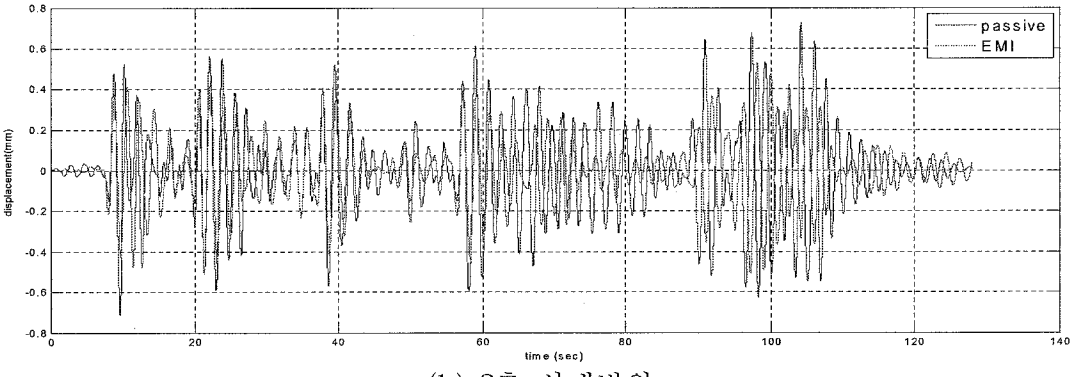


(d) 실험-수치해석 비교

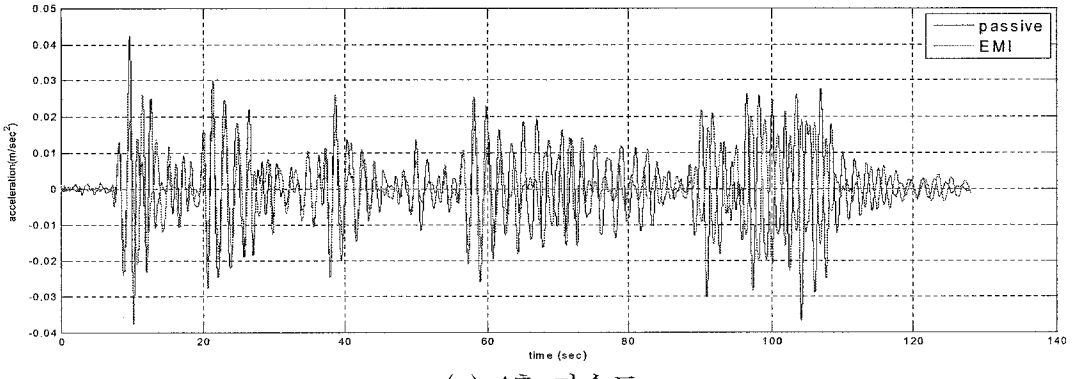
그림 3.4.6.5 신개념 스마트 제진 시스템 수치해석 결과(Northridge)



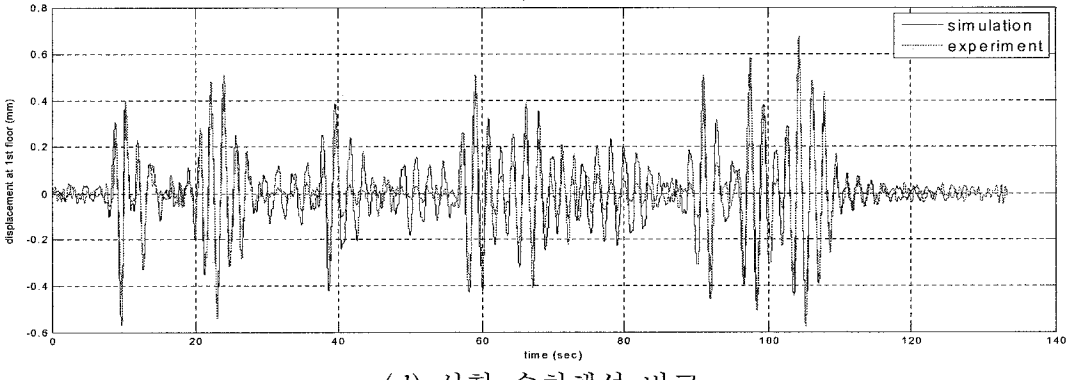
(a) 1층 변위



(b) 2층 상대변위

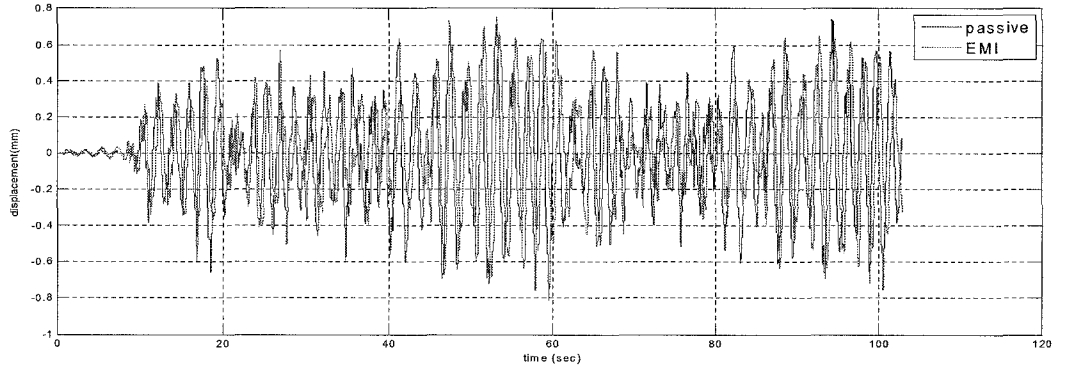


(c) 4층 가속도

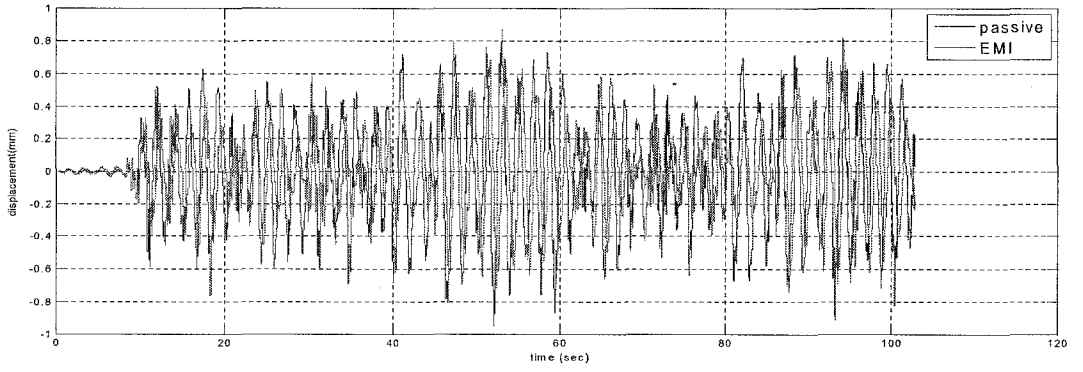


(d) 실험-수치해석 비교

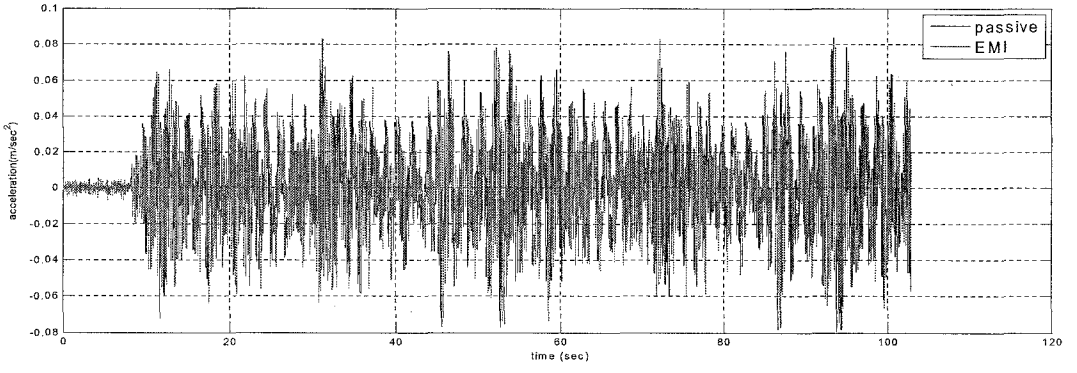
그림 3.4.6.6 신개념 스마트 제진 시스템 수치해석 결과(Kanai Tajimi)



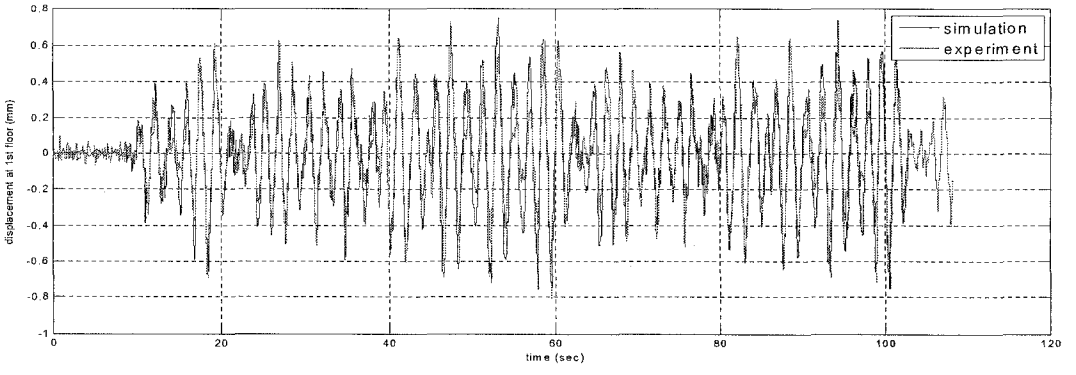
(a) 1층 변위



(b) 2층 상대변위

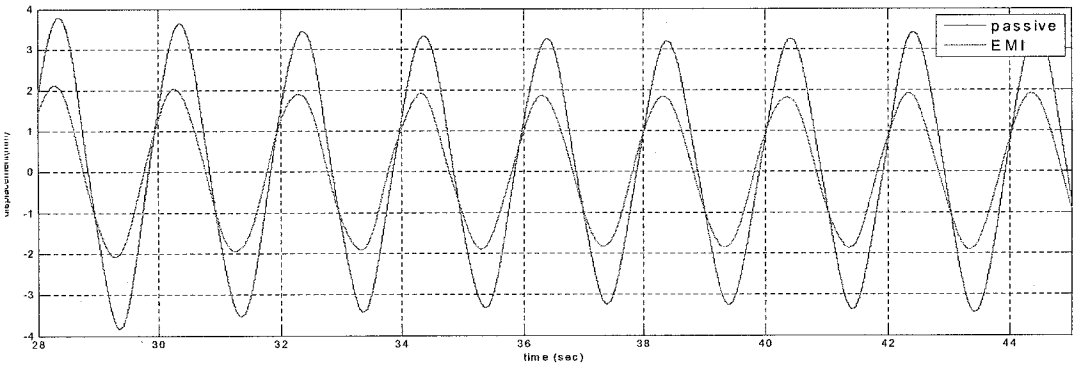


(c) 4층 가속도

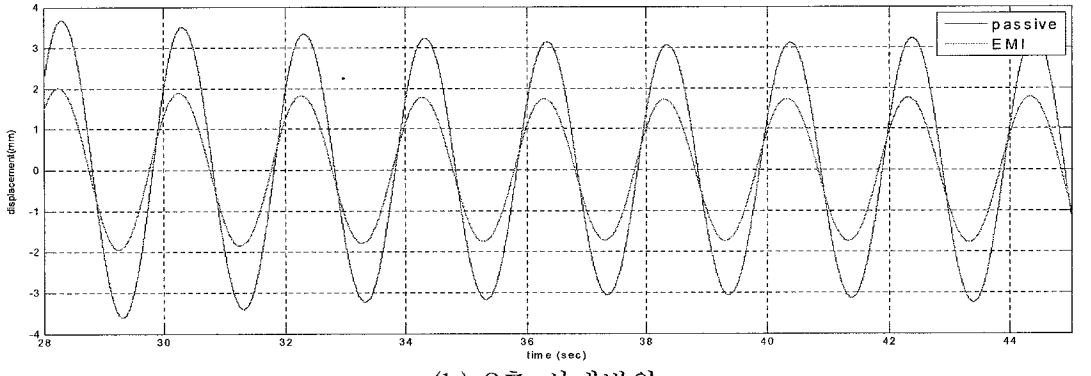


(d) 실험-수치해석 비교

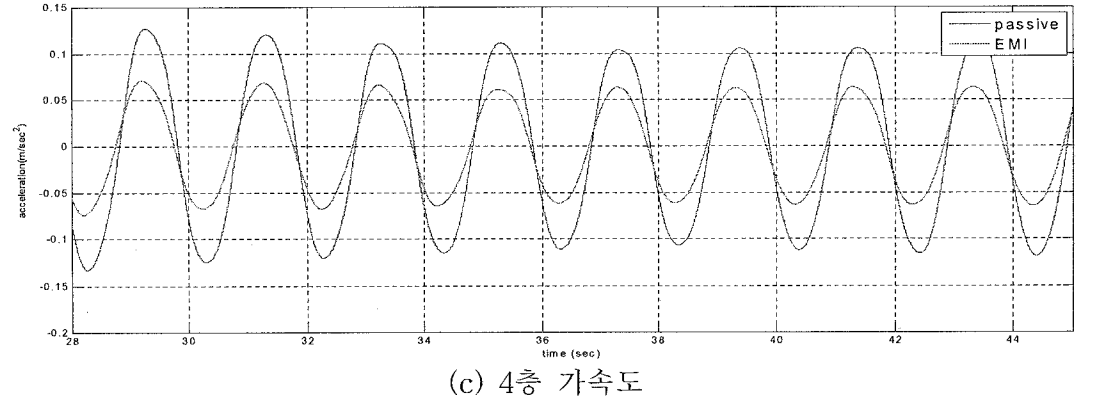
그림 3.4.6.7 신개념 스마트 제진 시스템 수치해석 결과(White Noise)



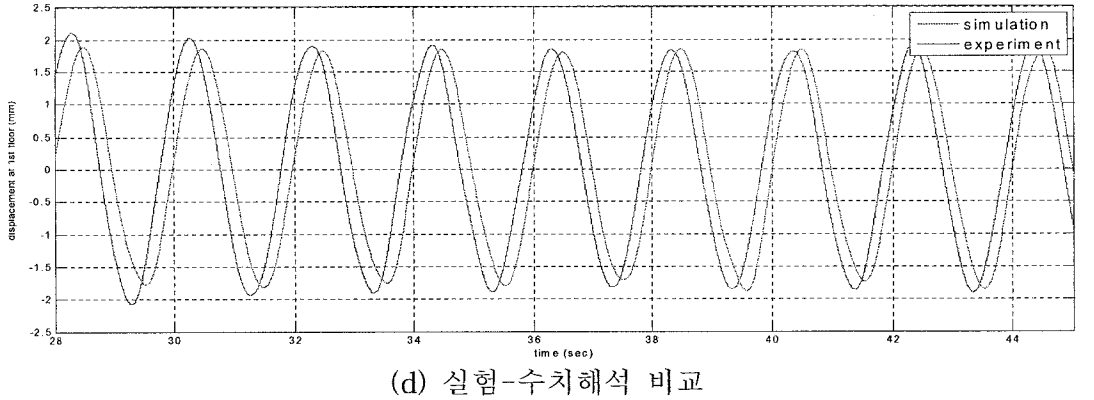
(a) 1층 변위



(b) 2층 상대변위



(c) 4층 가속도



(d) 실험-수치해석 비교

그림 3.4.6.8 신개념 스마트 제진 시스템 수치해석 결과(Sine)

5 절. 사장 케이블을 이용한 제진 장치의 제진 성능 평가

5.1. 44.7 m 사장 케이블에 대한 MR 댐퍼 기반 스마트 제진시스템 성능평가

5.1.1. 반 능동 제어 알고리즘

MR 감쇠기는 원하는 감쇠력을 직접 강사장 케이블에 전달할 수 없고, 감쇠기에 주어진 전압과 케이블의 거동에 따라 감쇠력이 정해지기 때문에, 제어 알고리즘도 그러한 반능동 감쇠기의 특성을 고려하여 케이블의 거동에 따라 필요한 감쇠력을 발휘할 수 있는 감쇠기의 전압을 산정하는 식을 제안하고 있다. 다양한 반능동 제어 알고리즘이 개발되었지만, 본 연구에서는 아래에서 간략하게 기술된 네 가지 제어 알고리즘만을 고려하였다.

(1) Lyapunov 안정론-기반 제어 알고리즘

Lyapunov 안정성 이론은 Lyapunov 함수 ($\dot{V}(z)$)를 도입하여 함수값의 변화율이 negative semi-definite 일 때 그 시스템은 Lyapunov 관점에서 안정하다는 이론이다. 이 이론을 이용하여 최대한 Lyapunov 함수값이 음이 되도록 하는 감쇠력을 구조물에 전달하는 것이 제어 알고리즘의 목적이 된다. 이때, Lyapunov 함수에 따라 제어 알고리즘이 다양하게 제시 될수 있으며, 이 논문에서는 Leitmann (1994)이 반능동 제어기에 적용한 Lyapunov 이론을 사용하였다. 여기서 선택된 Lyapunov 함수값은 식 (3.5.1.1)에 의해 결정되어 진다.

$$V(z) = \frac{1}{2} \| z \|_p^2 \tag{3.5.1.1}$$

여기서, $\| z \|_p$는 상태의 P-norm으로 식 (3.5.1.2)과 같이 정의 된다.

$$\| z \|_p = [z^T P z]^{1/2} \tag{3.5.1.2}$$

여기서, P는 실수이고, symmetric이며 positive definite한 matrix를 가지고 있다.

선형 시스템의 케이스에서는 확보된 $\dot{V}$는 negative definite이고, matrix P는 Lyapunov 식을 사용하여 찾을 수 있다.

$$A^T P + PA = -Q_p \tag{3.5.1.3}$$

여기서 Q_p는 positive definite matrix이고, 해석을 위해 Lypunov 함수의 유도된 식은 다음과 같다.

$$\dot{V} = -\frac{1}{2} z^T Q_p z + z^T PBf + z^T PE\ddot{x}_g \tag{3.5.1.4}$$

상태 방정식을 통하여 도출된 이 식에서 control voltage의 변화에 의한 직접적인 영향을 줄 수 있는 유일한 항은 force vector인 f가 포함된 두 번째 항이다. 즉, 식(3.5.1.4)에서 첫 번째와 세 번째 term은 고려되지 않고 $z^T PBf$만 control voltage에 영향을 준다. 따라서, minimize $\dot{V}$인 control law는 다음 식과 같이 표현될 수 있다.

$$v_i = V_{\max} H((-z)^T PB_i f_i) \tag{3.5.1.5}$$

여기서, $V_{\max}$는 감쇠기의 최대 입력 전압을 나타내고, $H(\bullet)$는 Heaviside step 함수이다.

(2) Maximum Energy Dissipation 알고리즘

Maximum Energy Dissipation 알고리즘은 구조물의 전체 진동 에너지를 감소시키도록 감쇠력을 산정하는 알고리즘으로 Lyapunov 함수로 상대적인 진동 에너지에 대한 함수를 사용하고 함수값이 최소가 되도록 유도한다. 이 알고리즘은 식(3.5.1.6)와 같이 댐퍼에 전달되는 전압을 결정한다.

$$v_i = V_{\max} H(-q^T \dot{\Phi}_d F_d) \tag{3.5.1.6}$$

즉, 이 알고리즘은 에너지가 소산되는 경우에만 최대 전압을 MR 감쇠기에 전달하게 된다.

(3) Clipped Optimal 제어 알고리즘

Clipped Optimal 제어 알고리즘은 MR 감쇠기의 특성을 잘 나타내도록 Dyke(1996) 등이 제안한 알고리즘으로, 선형 최적 제어기로부터 감쇠력을 산출한다. 그러나 MR 감쇠기의 특성상 구조물의 반응에 제한되어 작용하기 때문에 식 (3.5.1.7)을 통하여 반능동 댐퍼가 최대한 산출된 제어력과 유사한 제어 효과를 발휘하도록 유도하는 알고리즘이다.

$$v_i = V_{\max} H(\{F_{dci} - F_d\} F_d) \qquad (3.5.1.7)$$

여기서 F_{dci}는 계산된 제어력이고 F_d는 피드백을 통하여 확인된 제어력이다.
즉, 그림(3.5.1.1)에서 보면 알 수 있듯이 MR 감쇠기의 실제 제어력과 계산된 제어력을 비교하여, 제어력이 더 큰 경우에는 입력전압을 최대값으로 취해주고, 그렇지 않은 경우에는 입력전압을 0으로 하는 알고리즘이다.

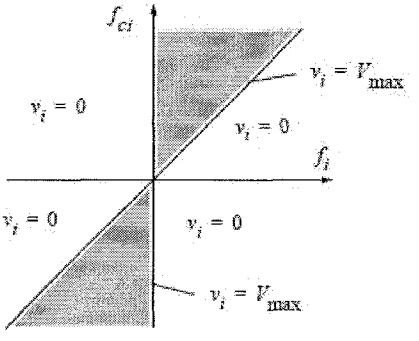


그림 3.5.1.1 Clipped Optimal

(4) Modulated Homogeneous Friction 알고리즘

Modulated Homogeneous Friction 알고리즘은 마찰 댐퍼를 위하여 Inaudi (1997)가 제안한 알고리즘이지만, 마찰 댐퍼와 MR 감쇠기의 거동상의 유사성으로 인하여 반능동 감쇠기에 대한 제어 알고리즘으로 사용할 수 있다. 이 알고리즘은 최대 변위가 일어나는 시점을 기준으로 감쇠력을 산정하며, 다음 최대 변위가 일어날 때까지 일정한 감쇠 효과를 구조물에 가하게 된다. 이때 감쇠력은 반능동 제어 장치의 변

위에 비례하게 산정되며 반능동 감쇠기에 주어지는 입력 전압은 식 (3.5.1.8)를 통하여 결정된다.

$$v_i = V_{\max} H(F_{di} - |F_d|) \qquad (3.5.1.8)$$

여기서, F_{di}는 원하는 제어력을 의미한다.

그림 3.5.1.2에서 보면 $f_{ni} = g_{ni}\triangle_i$는 dashed line이고 각각의 peak에서 f_{ni}를 만나면 미끌어져서 계속해서 update되는 것을 확인할수 있다.

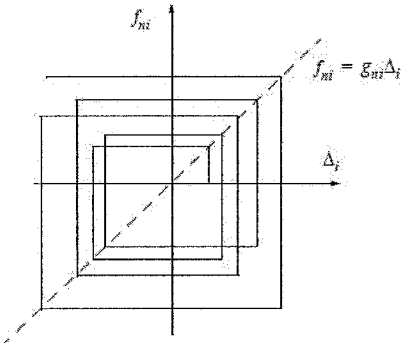


그림 3.5.1.2 Modulated Homogeneous Friction

즉, 원하는 제어력이 측정된 제어력보다 커서 양수가 되면 0을 입력하고, 반대로 원하는 제어력이 측정된 제어력보다 작아서 음수가 되면 1을 입력하여 $V_{\max}$의 전압을 입력하는 알고리즘이다.

5.1.2. 실험적 검증

(1) 케이블 감쇠 실험의 setup

MR 감쇠기의 감쇠실험을 수행하기 위해 실제 사용중인 현대기술개발연구소의 44.7m 케이블에 대하여 실험을 실시하였다. 케이블 감쇠실험에서의 조직도는 그림 3.5.1.3과 같다.

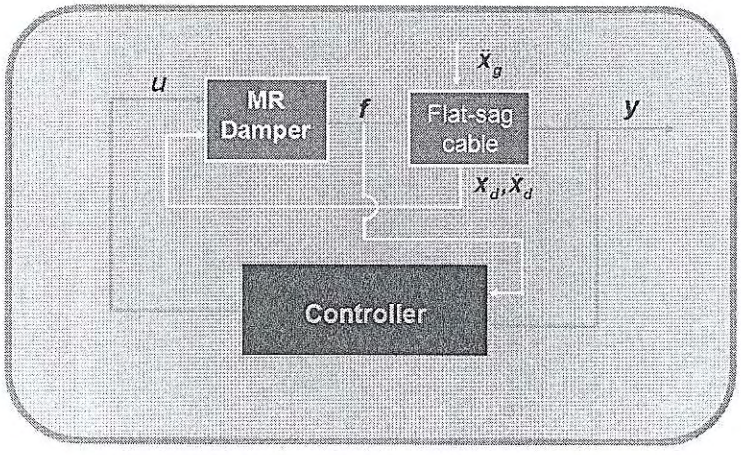


그림 3.5.1.3 케이블 감쇠실험의 조직도

그림과 같이 $\ddot{x}_g$와 같은 하중이 케이블에 작용할 때 센서를 통해 Controller로 피드백 된다. 그래서 알고리즘을 통해서 얻어진 전압이 MR 감쇠기에 입력전압으로 계산되어 f와 같은 댐퍼 감쇠력으로 케이블의 진동을 제어하는 것이다. 좀 더 쉽게 이해하려면 다음 그림 3.5.1.4를 보면 알 수 있다.

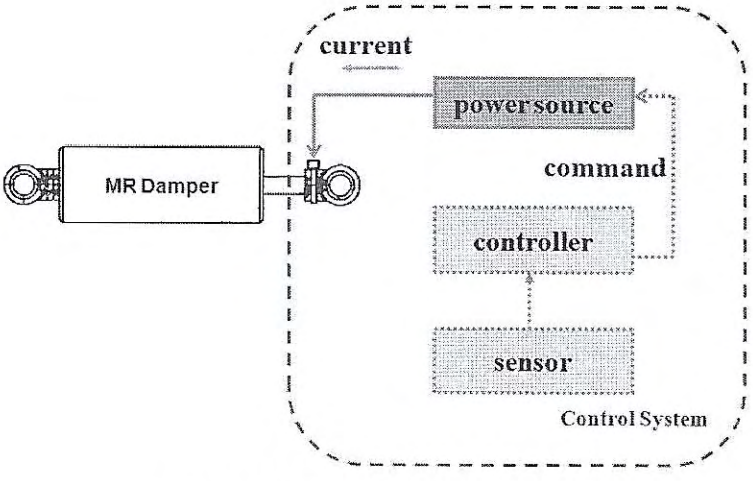


그림 3.5.1.4 MR 감쇠기 기반의 시스템

그림 5.1.2.2는 MR 감쇠기 기반의 시스템을 나타낸다. 센서에 의해 얻어진 변위, 가속도같은 값들을 계측하여 controller로 보내진다. controller는 수동형의 경우 일정한 값을 입력전압으로 하고, 반능동 제어 알고리즘의 경우는 계산을 통하여 입력전압을 결정하고 MR 감쇠기에 전압을 공급하게 된다. 전압이 공급된 MR 감쇠기가

거동을 하여 케이블의 진동을 제어 한다. 이렇게 반복되는 과정을 통해 케이블의 진동을 제어 하는 것이다. 그림의 순서를 따라가면 위에서 설명한 것을 쉽게 이해 할 수 있을 것이다.

(2) 케이블 모델

Flat-sag 케이블은 그림 3.5.1.5과 같은 PVC로 마감된 PWS-type의 실제 사용되고 있는 고장력 케이블을 사용하였다.

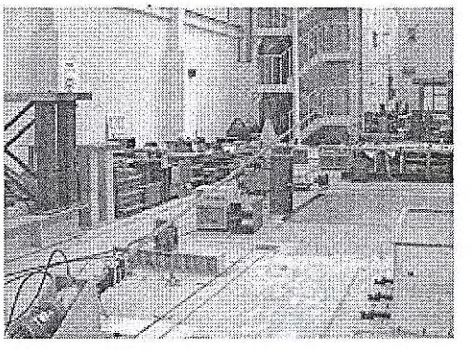


그림 3.5.1.5 실험에 사용된 케이블

해석 케이블에 대한 MR 감쇠기의 제원은 표 3.5.1.1에 나타나 있다.
여기서 L은 케이블의 길이, m는 케이블 단위 길이당 질량, T는 케이블의 장력, 그리고 ζ는 케이블의 모달 감쇠비이다. 또한 E, EI, EA는 각각 탄성계수, 굽힘강도, 축강도 이다.

표 3.5.1.1 케이블의 제원 (현대)

항 목	제원
L	44.7 m
m	0.090 kN/m
T	500 kN
ζ	$\zeta_1 = 0.0015$ $\zeta_{i \geq 1} = 0.0005$
E	1.89×10^8 kN/m^2
EI	3.79×10^5 kNm^2
EA	77.36 kN

(3) Megnetorheological (MR) Damper

본 실험에서 사용된 반능동 감쇠기는 그림 3.5.1.6와 같은 미국의 Load사에서 제작된 RD-1005-03 MR damper이다. MR 감쇠기는 케이블 전체 길이의 3%에 해당되는 케이블 하단으로부터 1.34m되는 지점에 그림 3.5.1.7와 같이 설치하였다. RD-1005-03 MR 감쇠기의 최대 감쇠력은 ±2000N이고, 실험에서 사용한 최대 전압은 0.5A를 초과하면 MR 감쇠기에 무리가 가기 때문에 4.45V를 사용하였다.

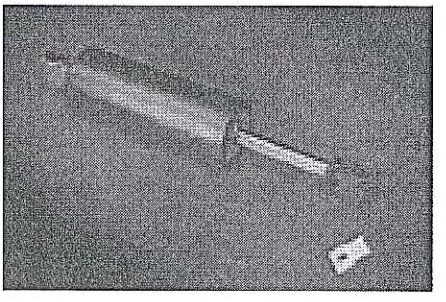


그림 3.5.1.6 RD-1005-03 MR damper

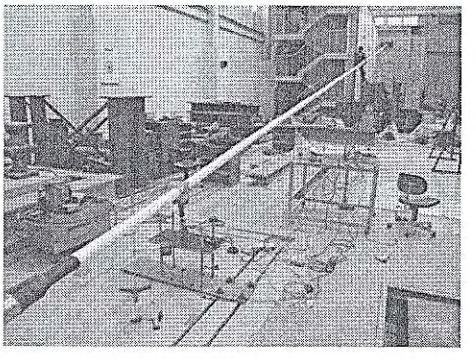


그림 3.5.1.7 Installation of MR damper

(4) 케이블 가진 시스템

본 실험에서 사용된 케이블 가진 시스템 (김남식, 2003)은 그림 3.5.1.8과 그림 3.5.1.9에서 보듯이 두 개의 추가 달린 하드웨어로서 Digital controller를 통해 조화가진을 하게 된다.

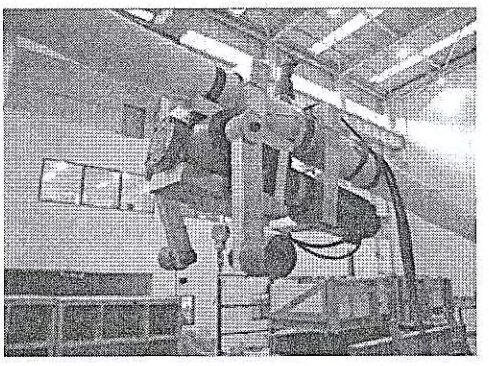


그림 3.5.1.8 케이블 가진기

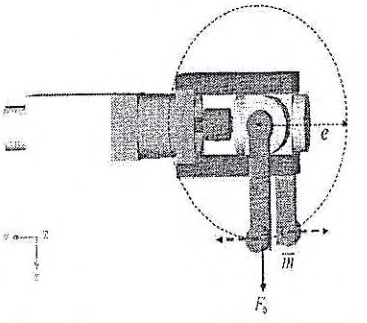


그림 3.5.1.9 Schematic of exciter

위의 그림처럼 m이라는 질량을 가진 두 개의 추가 서로 반대 방향으로 움직여 케이블을 가진 하는 형식으로 케이블 가진 시스템에 대한 식을 정의하면 식 (3.5.1.9)과 같다.

$$F(t) = \overline{m}e\overline{w^2}sin\overline{w}t \tag{3.5.1.9}$$

여기서, $\overline{m}$은 두 개의 회전하는 추의 질량, e는 회전을 통해 만들어지는 원의 반지름, 그리고 $\overline{w}$는 회전하는 추의 주파수를 의미한다.

(5) 케이블의 진동제어

사장 케이블의 진동을 저감시키기 위하여 많은 제어 알고리즘들이 개발되었다(정형조, 2008). 이 실험에서는 MR 감쇠기 기반의 수동 제어 시스템과 Modulated homogeneous friction 을 이용한 반 능동 제어 시스템에 대하여 실험을 수행하여 성능을 비교해 보았다.

수동형 제어 시스템의 경우 MR 감쇠기에 일정한 전압을 공급하는 형식으로 이 실험에서는 passive-off case에는 0 Volts의 전압을 입력하였고, passive-on case의 최대 전압은 0.5A에서 MR 감쇠기의 안정성이 문제가 되므로 4.45 Volts의 전압을 입력하였다. 실제 실험에서는 MR 감쇠기에 일정한 간격의 전압을 공급하여 해석하였으나, 최대 전압에서 최적의 성능을 보였으므로 성능의 차이를 쉽게 확인하기 위하여 uncontrolled case와 passive-off/on case를 고려하였다.

반 능동 제어 시스템은 현재 많은 알고리즘들이 연구되고 있고, 본 실험에서도 여

러 알고리즘에 대해 실험을 수행하였으나 여기서는 Modulated homogeneous friction 알고리즘을 통하여 uncontrolled case와 passive case와의 성능을 비교하여 보기로 한다.

Modulated homogeneous friction 알고리즘은 최대 변위가 일어나는 시점을 기준으로 감쇠력을 산정하며, 다음 최대 변위가 일어날 때까지 일정한 감쇠 효과를 구조물에 가하게 된다. 이때 감쇠력은 반능동 제어 장치의 변위에 비례하게 산정되며 반능동 감쇠기에 주어지는 입력 전압은 식 (3.5.1.10)를 통하여 결정된다.

$$v_i = V_{\max} H(F_{di} - |F_d|) \qquad (3.5.1.10)$$

(6) 실험 결과

사장 케이블의 수동 제어 성능의 효과를 먼저 알아보고자 한다. 앞에서 이미 언급했듯이 수동 제어의 경우 passive-off case인 0 V의 전압을 MR 감쇠기에 공급하는 경우에서 1 V씩 전압의 세기를 증가시켜 4.45 V까지 공급하여 감쇠 성능을 평가하였다. 그림 3.5.1.10를 보면 모든 passive case가 제어 하지 않았을 때보다 성능이 좋은 것을 확인할 수 있다.

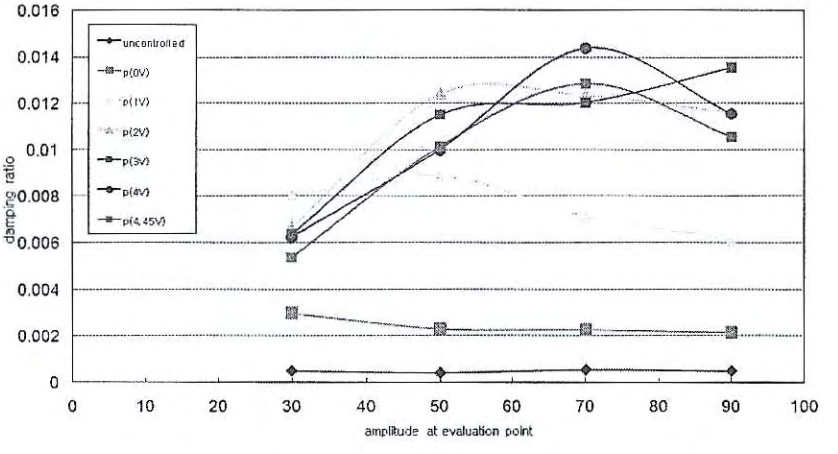


그림 3.5.1.10 비제어시와 passive case의 비교

passive-off case와 비 제어시의 그래프를 보면 감쇠비가 일정한 것을 알수 있고,

다른 passive-on type의 경우는 amplitude가 변함에 따라 감쇠비가 변형 되는 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 경우는 수동형 작동 시스템이 자극강도의 변화에 대한 적응성이 없기 때문에 이러한 현상이 나타난다고 할 수 있다.

다음으로 비 제어시와 passive-on/off case, 그리고 Modulated homogeneous friction (MHF) 알고리즘을 사용한 반 능동 제어 알고리즘을 비교해 보았다. 실험에서는 다양한 반능동 제어 알고리즘을 사용하여 감쇠 성능을 평가하였지만, 그중 가장 좋은 성능을 보인 MHF와 비교하였다.

그림 3.5.1.11는 비제어시, passive-off/on, 그리고 MHF에 대해서 사장케이블의 mid-point 가속도의 시간 이력 곡선이다. 시간 이력 곡선을 비교해보면, 모든 제어 시스템의 감쇠 성능이 비제어시보다 뛰어난 것을 확인할 수 있다. 게다가 반능동 제어 시스템의 경우와 passive-on case의 경우가 passive-off case보다 성능이 뛰어난 것도 확인할 수 있다. 그림 3.5.1.11.c와 그림 3.5.1.11.d에서 보면 주목할 만한 결과가 보인다. 두가지의 경우 두 개의 part로 나눌 수 있는데, 그림에서 보듯이 part 1의 감쇠 곡선이 part 2에 비해 빠른 것을 확인할 수 있다. 이러한 현상은 많은 케이블의 연구에서 발표되고 있는 일반적인 현상으로 Coulomb 마찰 거동이라 여겨진다. 좀 더 깊이 생각해보면, 실제 실험에서 MR 감쇠기 위치에서의 변위를 측정하였는데 part 1과 part 2의 변곡점에서 0에 가까운 값을 얻었다. 즉, 처음 케이블이 진동을 할 때 감쇠기가 작동을 하여 제어를 하고, 변곡점에서는 MR 감쇠기는 움직이지 않고, 자유 진동 하는 형태이므로 두 개의 part가 된 것이다.

그림 3.5.1.12은 모든 제어 시스템과 비제어시의 경우에 대한 감쇠비를 그래프로 나타낸 것이다. Passive-off case와 비제어시의 감쇠비는 일정한 것을 확인할 수 있고, Modulated homogeneous friction 알고리즘을 사용한 반능동 제어 시스템은 모든 경우의 제어 시스템보다 성능이 뛰어난 것을 확인할 수 있다.

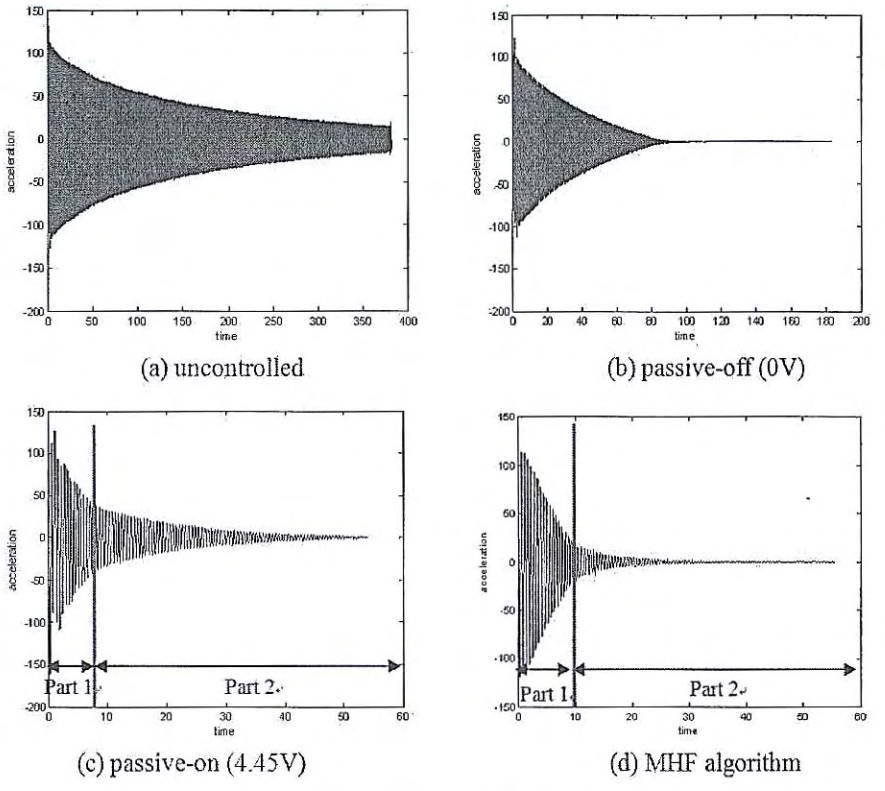


그림 3.5.1.11 midpoint 가속도의 시간 이력 곡선

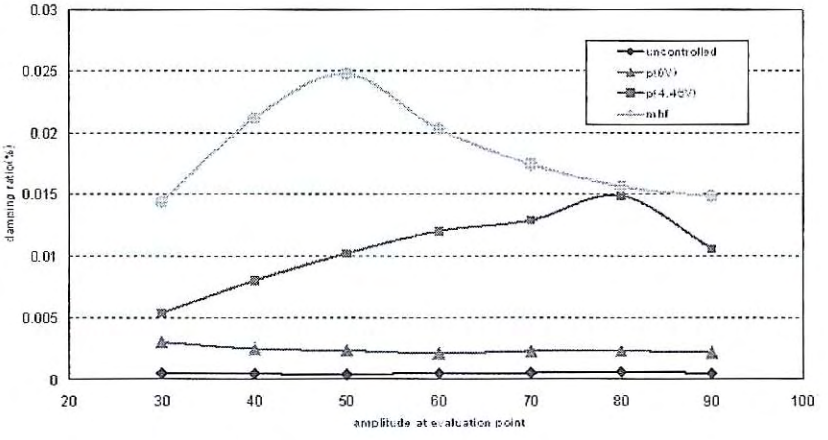


그림 3.5.1.12 제어 시스템의 감쇠비

5.1.3. 수치적 검증

(1) 케이블 모델

사장 케이블은 일반적으로 큰 장력이 가해지기 때문에 매우 작은 처짐 (1% sag-to-length ratio or less)을 갖는다. 이와같은 작은 처짐을 가질 때 그림 3.5.1.13과 같이 처짐을 갖지 않는 이상적인 사장 케이블로 모델링 할수 있으며 (Irvine, 1981), 이때 케이블의 지배 미분 방정식은 식 (3.5.1.11)과 같다.

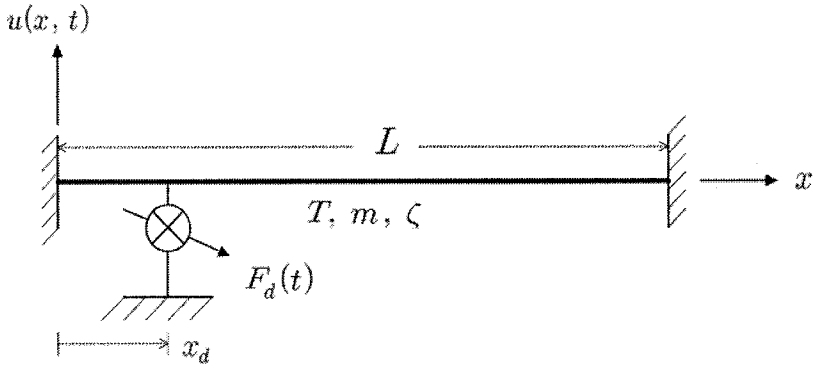


그림 3.5.1.13 제진장치가 설치된 케이블 모델

$$m\ddot{u}(x,t)+c\dot{u}(x,t)-Tu''(x,t)=f(x,t)+F_d(t)\delta(x-x_d) \qquad (3.5.1.11)$$

여기서, L은 케이블의 길이, $u(x,t)$는 케이블의 연직방향의 변위, c는 케이블 길이당 감쇠 계수, T는 케이블의 장력, m은 케이블의 길이당 질량, $f(x,t)$는 케이블의 가진을 위한 외부하중, $F_d(t)$는 감쇠기로부터 케이블에 전달되는 감쇠력, x_d는 케이블 하단부로부터 감쇠기까지의 길이 이다.

케이블의 수직방향의 변위 형상이 유한한 케이블의 모드들로 표현되어 진다고 가정하면 케이블의 응답은 식 (3.5.1.12)와 같이 근사 할 수 있다.

$$u(x,t)=\sum_{j=1}^{n}\Phi_j(x)\eta_j(t) \qquad (3.5.1.12)$$

여기서, n은 고려된 모드의 개수, $\eta_j(t)$는 일반화된 변위, $\Phi_j(x)$는 형상 함수 이다. 케이블의 변위를 잘 표현 하기 위해 정현 함수를 형상 함수로 사용하는 것이 일반

적이나 감쇠기가 설치 된 경우 케이블의 거동을 모사하기 위해서는 수백 개의 정현 함수가 필요하기 때문에 이는 수치 해석뿐만 아니라 제어기를 설계할 때에도 많은 문제점들을 유발한다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 Johnson 등(2000)은 감쇠기가 설치된 지점에서 감쇠력에 의하여 유발된 케이블의 변형 형상을 형상함수로 도입함으로써 정현 함수를 사용한 경우보다 필요한 형상 함수의 개수를 크게 감소시키는 동시에 케이블의 거동을 보다 정확하게 모사 할수 있음을 보였다.
식 (3.5.1.13)을 형상함수로 사용하고 표준 Galerkin Method를 이용하면 식 (3.5.1.12)으로부터 식 (3.5.1.14)과 같은 행렬로 이루어진 지배방정식이 도출되었다.

$$\begin{aligned} \phi_{j+1} &= \sin\pi jx & j \geq 1 \\ \phi_1(x) &= \begin{cases} x/x_d \\ (L-x)/(L-x_d) \end{cases} & \begin{matrix} 0 \leq x \leq x_d \\ x_d \leq x \leq L \end{matrix} \end{aligned} \tag{3.5.1.13}$$

$$M\ddot{\eta}(t) + C\dot{\eta}(t) + K\eta(t) = f(t) + \Psi F_d(t) \tag{3.5.1.14}$$

여기서, M은 질량 행렬, K는 강성 행렬, C는 감쇠 행렬, f는 하중 벡터, 그리고Ψ는 감쇠력 벡터이다. 각각에 대한 값들은 다음과 같이 구할수 있다.

$$M = [m_{ij}],\ m_{ij} = m\int_0^L \phi_i(x)\phi_j(x)dx, \tag{3.5.1.15}$$

$$K = [k_{ij}],\ k_{ij} = -T\int_0^L \phi_i'(x)\phi_j'(x)dx, \tag{3.5.1.16}$$

$$f = [f_i],\ f_i = \int_0^L f(x,t)\phi_i(x)dx, \tag{3.5.1.17}$$

$\Psi = \phi(x_d) = [\phi_1(x_d)\phi_2(x_d) \cdot \cdot \cdot \phi_n(x_d)]^T$이다. (3.5.1.18)

마지막으로 감쇠행렬인 C는 위의 질량 행렬, 강성 행렬 그리고 모달감쇠비로부터 구할 수 있다. 식 (3.5.1.14)를 상태 공간방정식으로 표현하면 다음의 식 (3.5.1.19)~(3.5.1.11)과 같이 나타낼 수 있다(Johnson 등, 2001).

$$\dot{z} = Az + BF_d(t) + Gf \tag{3.5.1.19}$$

$$Z = C_Z z + D_Z F_d(t) + H_Z f + v \tag{3.5.1.20}$$

$$y = C_y z + D_y F_d(t) + H_y f + v \tag{3.5.1.21}$$

여기서, $z = [\eta \ \dot{\eta}]^T$와 $Z = [\eta \ \dot{\eta} \ \ddot{\eta}]^T$는 상태 벡터이고, $y = [v(x_d, t) \ \ddot{v}(x_d, t)] + v$는 계측된 벡터이다. 여기서 v는 센서잡음을 나타내며, 식 (3.5.1.19)~(3.5.1.21)의 각 행렬은 다음의 식 (3.5.1.22)~(3.5.1.24)와 같다(Johnson 등, 2001).

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}\Psi \end{bmatrix} \quad G = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1} \end{bmatrix} \tag{3.5.1.22}$$

$$C_Z = \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix} \quad D_Z = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ M^{-1}\Psi \end{bmatrix} \quad H_Z = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ M^{-1} \end{bmatrix} \tag{3.5.1.23}$$

$$C_y = \begin{bmatrix} \Psi^T & 0 \\ -\Psi^T M^{-1}K & -\Psi^T M^{-1}C \end{bmatrix} \quad D_y = \begin{bmatrix} 0 \\ \Psi^T M^{-1} \end{bmatrix} \quad H_y = \begin{bmatrix} 0 \\ \Psi^T M^{-1} \end{bmatrix} \tag{3.5.1.24}$$

(2) 반 능동 MR 감쇠기 모델

본 연구에서는 반능동 감쇠기로 MR 감쇠기를 사용하였고, 수치해석에 필요한 MR 감쇠기의 간단한 동적 모델은 Terasawa(2004)에 의해 제안된 모델을 사용하였다. MR 감쇠기의 동적 모델에서 감쇠력 $F_d(t)$는 식 (3.5.1.25)와 식 (3.5.1.26)과 같이 표현될 수 있다.

$$F_d = \sigma_a w + \sigma_0 w V + \sigma_1 \dot{w} + \sigma_2 \dot{v}_d + \sigma_b \dot{v}_b V \tag{3.5.1.25}$$

$$\dot{w} = \dot{v}_d - a_0 |\dot{v}_d| w \tag{3.5.1.26}$$

여기서, $w(t)$는 내부상태변수 (m), $v_d(t)$는 감쇠기 위치에서 케이블의 변위 (m), $V(t)$는 MR 댐퍼 입력전압, σ_0는 $V(t)$에 의해 영향을 받는 $w(t)$의 강성 $(N/(mV))$, σ_1은 $w(t)$의 감쇠계수 (Ns/m), σ_2는 점성 감쇠계수 (Ns/m), σ_a는 $w(t)$의 강성 (N/m), σ_b는 $V(t)$에 영향을 받는 점성감쇠계수 $(Ns/(mV))$, 그리고 a_0 는 일정한 값 $(1/m)$이다.

(3) 해석 대상 구조물의 제원

본 수치해석에서 고려한 강사장 케이블은 그림 3.5.1.14와 같은 PVC 마감된 실존하는 고장력 케이블이고, flat-sag 케이블은 PWS type의 케이블이다. 케이블의 제원은 표 3.5.1.2과 같다.

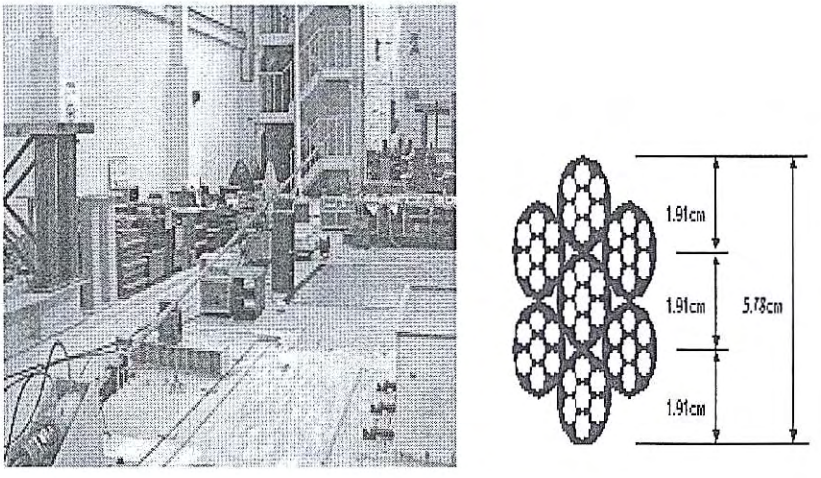


그림 3.5.1.14 실제 사장 케이블과 단면

표 3.5.1.2 케이블의 제원

항 목	제원
케이블 길이, L	44.7 m
길이당 질량, m	0.090 kN/m
케이블 장력, T	500 kN
모달 감쇠비, ζ	$\zeta_1 = 0.0015$ $\zeta_{i \geq 1} = 0.0005$
탄성계수, E	1.89×10^8 kN/m^2
굽힘강도, EI	3.79×10^5 kNm^2
축강도, EA	77.36 kN

표 3.5.1.3 MR 감쇠기 변수

항목	제원	항목	제원
$\sigma_0(N/(mV))$	28815 MF	$\sigma_a(N/m)$	30542 MF
$\sigma_1(Ns/m)$	0.131 MF	$\sigma_b(Ns/(mV))$	16.3 MF
$\sigma_2(Ns/m)$	29.6 MF	$a_0(V/N)$	3198

MR 감쇠기는 Load사에서 제작된 RD-1005-03을 고려하여 Terasawa (2004)가 고안해낸 MR 댐퍼를 대상으로 수치해석을 수행하였다. 여기서 MR 감쇠기의 최대 감쇠력은 약 ±2000N이고, 최대 전압은 10V이다. 그리고 MR 감쇠기는 케이블 전체 길이중 하단부에서 0.03%에 해당되는 1.34m에 설치되었다.

(4) 평가 지표

본 연구에서 반능동 제어 시스템의 제어성능을 평가하기 위해 고려한 평가지표는 네 가지로서 다음과 같다. 첫 번째와 두 번째 평가지표는 각각 케이블의 중간지점과 1/4 지점의 최대변위에 대한 지표이고, 세 번째와 네 번째 평가지표는 변위와 속도에 대한 RMS (root mean square) 값이다. 각각의 평가 지표들은 제어하지 않았을 때의 값으로 정규화 시켰으며, 다음 식과 같이 정의된다.

$$J_1 = \frac{\max(v_{midspan}(t))}{\max(v_{midspan}(t))|_{uncontrolled}} \tag{3.5.1.27}$$

$$J_2 = \frac{\max(v_{quarterspan}(t))}{\max(v_{quarterspan}(t))|_{uncontrolled}} \tag{3.5.1.28}$$

$$J_3 = \frac{\sigma^2_{disp}(t)}{\sigma^2_{disp}(t)|_{uncontrolled}} \tag{3.5.1.29}$$

$$J_4 = \frac{\sigma^2_{vel}(t)}{\sigma^2_{vel}(t)|_{uncontrolled}} \tag{3.5.1.30}$$

여기서,

$$\sigma_{disp}^2(t) = E\left[\int_0^L u^2(x,t)dx\right] = trace\{M^{1/2}E[\eta(t)\eta^T(t)]M^{1/2}\} \quad (3.5.1.31)$$

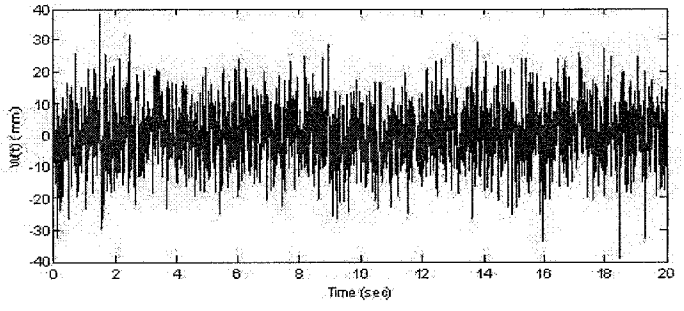
$$\sigma_{vel}^2(t) = E\left[\int_0^L \dot{u}^2(x,t)dx\right] = trace\{M^{1/2}E[\dot{\eta}(t)\dot{\eta}^T(t)]M^{1/2}\} \quad (3.5.1.32)$$

(5) 외부 하중

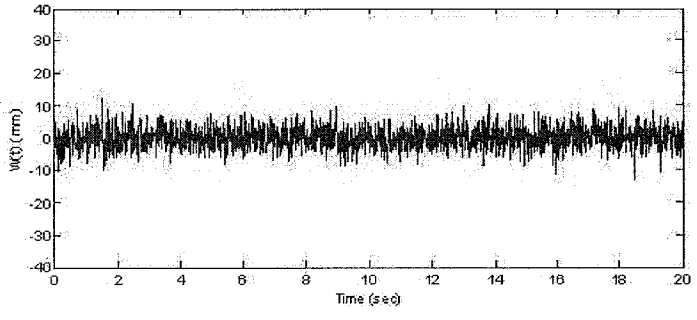
제어 알고리즘의 감쇠 평가를 위해 강사장 케이블에 적용되는 하중은 케이블 전 영역에 작용하는 분포하중으로, 평균이 0인 Gaussian 백색 잡음 (White Noise)을 사용하였다. 하중은 연속된 부분집합을 가정하여 식 (3.5.1.33)과 같이 사용될 수 있다.

$$f(x,t) = W(t)\sin\pi\frac{x}{L} \quad (3.5.1.33)$$

여기서, $W(t)$는 평균이 0인 Gaussian 백색 잡음으로 $E[W(t)W(t+\tau)] = \delta(\tau)$와 빌딩을 위한 Third Generation Benchmarks의 풍하중으로부터 가정되었다.
또한, 수동 제어 방법에 대한 반능동 제어 방법의 특성을 확인하기 위하여 풍하중의 크기를 달리 한 두가지 경우에 대하여 수치해석을 수행하였다. 첫 번째 경우 (Case 1)는 상대적으로 커다란 풍하중을 고려하였고, 두 번째 경우 (Case 2)는 Case 1의 1/3 크기의 풍하중을 고려하였다. 각각의 풍하중의 시간이력은 그림 3.5.1.15와 같다.



(a) Case 1



(b) Case 2

그림 3.5.1.15 수치해석에 쓰인 외부하중 (가우시안 백색 잡음)

(6) 수치해석 결과

제어되지 않은 경우에 대하여 응답을 사장 케이블의 중앙 지점과 케이블 길이의 1/4 지점에서의 최대 변위 그리고 RMS 변위와 속도에 대하여 Case 1과 Case 2를 비교한 결과를 표 3.5.1.4 ~표 3.5.1.7에서 각각 확인할 수 있다. 그림 3.5.1.16와 그림 3.5.1.17은 수치해석 결과를 그래프로 나타낸 것이다. x축은 각각의 제어 알고리즘이고, y축은 비제어시 응답에 대한 response ratio이다. 여기서, MR 댐퍼를 수동형 댐퍼로 활용한 passive-on 경우와 passive-off 경우의 제진 성능과 반능동 제어 알고리즘의 성능을 비교해보면, 수동형 제어 시스템의 하중 변화에 대한 적응성 한계를 명확하게 알 수 있다. 즉, 하중이 큰 경우에는 passive-on이 성능이 좋고 passive-off는 성능이 나쁜 반면에, Case2와 같은 하중이 1/3으로 작아진 경우에는 그 반대 현상이 나타나는 것을 알 수 있다. 하지만, 수동제어의 경우에는 댐퍼의

감쇠특성이 미리 정해지기 때문에 다양한 하중에 대해서 항상 좋은 제진 성능을 나타낼 수 없다. 반면에, 반능동 제어 시스템은 MED의 경우만 제외하고 두 경우 모두 우수한 제진 성능을 나타내었다. 반능동 제어 시스템 중에서는 CO와 MHF 알고리즘이 다른 알고리즘에 비해서 뛰어난 제진 성능을 보여주었다.

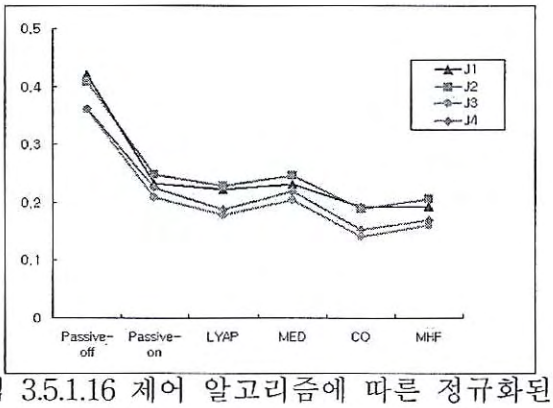


그림 3.5.1.16 제어 알고리즘에 따른 정규화된 응답 (Case 1)

표 3.5.1.4 제어 알고리즘에 따른 정규화된 응답 (Case 1)

Control algorithms	Passive-off	Passive-on	LYAP	MED	CO	MHF
J_1 (max. displ. at mid-span)	0.4203	0.2326	0.2215	0.2316	0.1918	0.1935
J_2 (max. displ. at quarter-span)	0.4078	0.2479	0.2283	0.2455	0.1891	0.2063
J_3 (RMS displ.)	0.3605	0.2090	0.1785	0.2047	0.1412	0.1611
J_4 (RMS velocity)	0.3617	0.2249	0.1884	0.2197	0.1527	0.1700

표 3.5.1.5 각각의 제어 알고리즘의 제어력 (Case 1)

Control algorithms	Passive-off	Passive-on	LYAP	MED	CO	MHF
Max. control force	240.15	1439.2	1821.1	1452.0	1858.4	1478.6
RMS control force	123.34	754.75	506.82	759.77	458.6	517.4

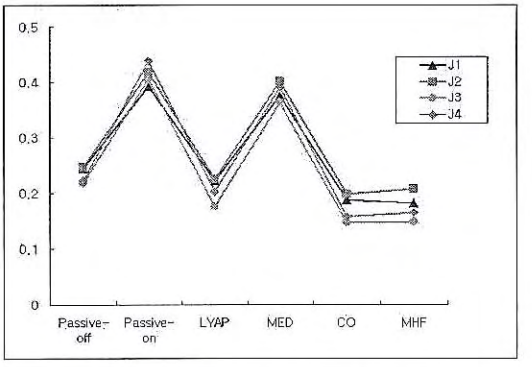


그림 3.5.1.17 제어 알고리즘에 따른 정규화된 응답 (Case 2)

표 3.5.1.6 제어 알고리즘에 따른 정규화된 응답 (Case 2)

Control algorithms	Passive-off	Passive-on	LYAP	MED	CO	MHF
J_1 (max. displ. at mid-span)	0.2442	0.3921	0.2229	0.3749	0.1874	0.1814
J_2 (max. displ. at quarter-span)	0.2464	0.4169	0.2249	0.4011	0.1977	0.2077
J_3 (RMS displ.)	0.2175	0.4054	0.1750	0.3628	0.1470	0.1484
J_4 (RMS velocity)	0.2216	0.4388	0.2026	0.3908	0.1570	0.1656

표 3.5.1.7 각각의 제어 알고리즘의 제어력 (Case 2)

Control algorithms	Passive-off	Passive-on	LYAP	MED	CO	MHF
Max. control force	123.59	1147.0	1376.3	1120.7	1338.1	1128.1
RMS control force	82.12	542.90	251.17	516.39	176.46	195.0

이상의 수치해석을 통해서, Clipped optimal 제어 알고리즘이나 Modulated homogeneous friction 알고리즘을 사용한 MR 댐퍼-기반 스마트 제진 시스템이 다양한 풍하중을 받는 강사장 케이블의 진동을 효과적으로 감소시킬 수 있음을 확인하였다.

추가로 수치해석 결과와 실험결과를 비교하기 위해 자유진동 해석을 통하여 감쇠비를 산정하였다.

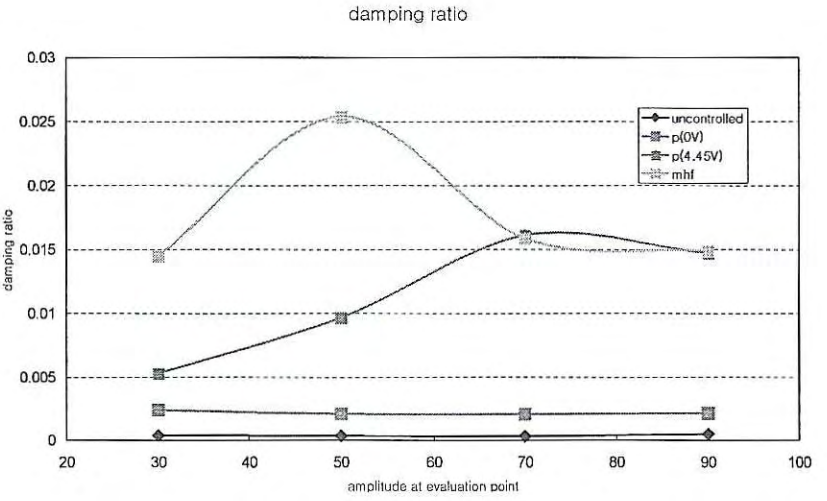


그림 3.5.1.18 제어 시스템의 감쇠비

그림 3.5.1.18에서 제어 시스템의 감쇠비를 비교하면 passive-off (0V)일때와 비제어시는 감쇠비가 일정한 것을 확인할 수 있고 passive-on (4.45V)와 반능동 제어 알고리즘인 MHF는 감쇠비가 변하고 성능도 좋은 것을 확인할 수 있다. 특히, MHF 알고리즘은 처음에는 4.45Volt를 입력전압으로 하기 때문에 passive-on과 성능이 비슷하지만 뒤로 갈수록 감쇠 성능이 뛰어난 것을 확인할 수 있었다.

5.1.4. 수치해석과 실험결과의 비교

수치해석과 실험결과를 비교하기 위해 같은 조건의 가진 후 자유 진동 해석을 수행하였다. 또한 각각의 응답에 대해 감쇠비를 산정하여 수치해석과 실험결과를 비교 하였다. 그림 3.5.1.19은 각각의 감쇠비의 비교를 나타낸것이다. 여기서 실선은 실험결과를 감쇠비로 나타낸 것이고, 점선은 수치해석 결과를 감쇠비로 나타낸 것이다. 그리고 표 3.5.1.8는 비교한 감쇠비의 차이를 나타낸 것이다.

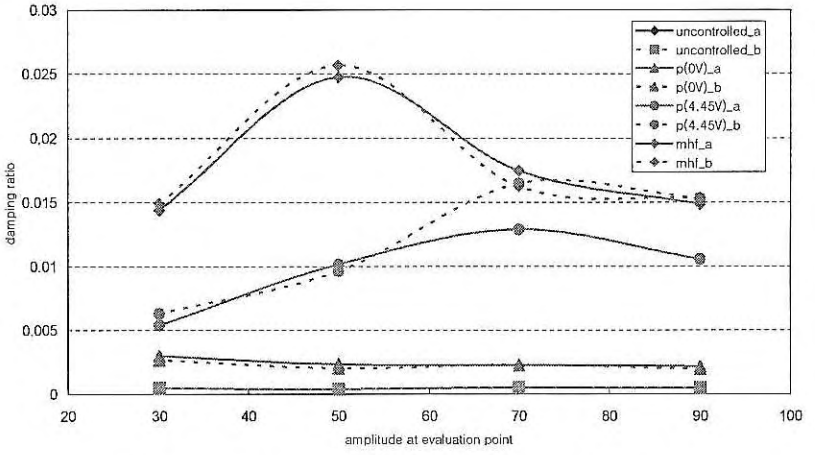


그림 3.5.1.19 수치해석과 실험의 감쇠비 비교

표 3.5.1.8 수치해석 값 대비 실험 값 감쇠비 (%)

	uncontrolled	passive-off	passive-on	mhf
90	0.21	8.96	-44.75	-3.22
70	-0.11	-0.16	-27.82	7.00
50	1.09	13.21	5.15	-3.68
30	0.20	10.40	-17.37	-3.37

그림 3.5.1.19과 표 3.5.1.8를 보면 수치해석 결과와 실험 결과를 확인할 수 있다. 그결과 비제어시에는 수치해석과 실험결과가 비슷하였지만, 다른 제어 알고리즘에 대해서는 약간의 차이가 있다는 것을 확인할 수 있었다. 10%미만의 오차에 대해서는 실험시 수치해석의 경우보다 시간 이력곡선이 짧기 때문에 감쇠비 산정에 있어서의 오차라고 생각된다. 그러나 passive-on (4.45V)의 경우에는 자유 진동이 시작되는 시점에서 수치해석의 결과에 비해 감쇠성능이 떨어지는 것을 확인할 수 있었다. 이는 실험 조건상 가진이 시작되고 공진이 된 다음 전압을 입력하는데 여기서 오는 오차라고 사료된다.

그러나 그림 3.5.1.19을 보면 알 수 있듯이 반능동형 제어 알고리즘과 passive-on의 경우는 비제어시와 passive-off의 경우보다 감쇠성능이 뛰어난 것을 확인 할수 있다. 또한 반능동형 제어 알고리즘의 경우 처음 제어가 시작될때 passive-on과 같은 전압이 입력되기 때문에 비슷한 감쇠성능을 나타내었지만 케이블의 진동이 바뀜에 따라 수동형 제어 보다 더 뛰어난 성능을 나타낸 것을 확인할 수 있다.

5.2. 100 m 사장케이블에 대한 MR 댐퍼 기반 스마트제진시스템 성능평가

5.2.1. 실험 결과

(1) 케이블 감쇠 실험의 setup

MR 감쇠기의 감쇠실험을 수행하기 위해 5.1절과 다른 제원의 케이블에 대하여 실험을 수행하였다. 실험 대상 케이블은 도로공사 연구소의 100m 길이의 케이블으로써 실제 존재하는 케이블이다. 도로공사 케이블의 경우 가진 실험이 목적이였기 때문에 수치해석은 수행하지 않았고, 수동형 제어 실험만을 수행하였다. 이번 실험에서 사용된 MR 감쇠기는 5.1절의 MR 감쇠기와 같은 종류지만 케이블의 길이나 두께로 인해 그림 3.5.2.1와 같이 twin system을 적용하였다.

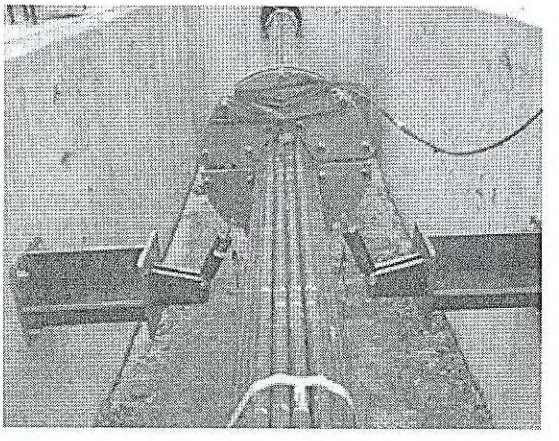


그림 3.5.2.1 twin system

(2) 케이블 모델

도로공사 케이블은 그림 3.5.2.2과 같이 수평한 100m 길이의 케이블이고, MR 감쇠기의 감쇠실험을 하기 위해 5.1절과 다른 제원의 케이블에 대하여 실험을 수행하였다. 실험 대상 케이블의 제원은 표 3.5.2.1와 같다.

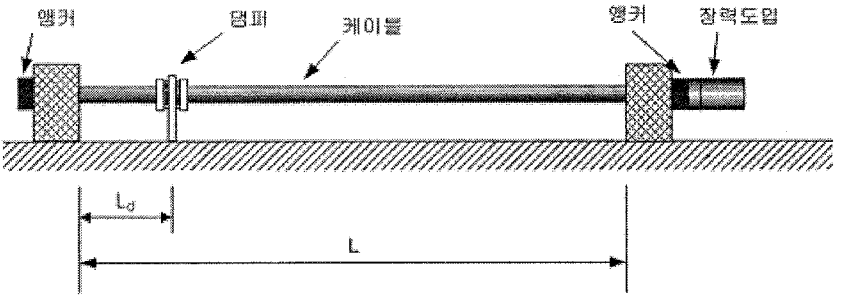


그림 3.5.2.2 실험 케이블

표 3.5.2.1 케이블의 제원 (도로공사)

항 목	제원
L	100 m
m	0.4283 kN/m
T	1470 kN
f_1	0.92 Hz
A	0.00555 m^2

여기서, L은 케이블의 길이, m은 케이블 길이당 단위질량, T는 케이블의 장력, f_1은 케이블의 고유주파수, A는 케이블의 면적이다.

(3) Megnetorheological (MR) Damper

본 실험에서 사용한 MR 감쇠기는 현대 실험에서 사용하였던 감쇠기와 동일한 모델으로서 Load사에서 제작된 RD-1005-03 MR 감쇠기이다.

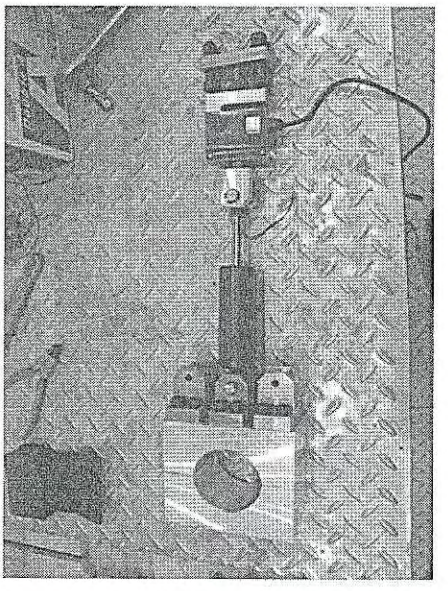


그림 3.5.2.3 MR damper

(4) 케이블 가진 시스템

본 실험에서 사용한 케이블 가진 시스템은 현대 실험에서 사용한 케이블 가진 시스템과 다른 모습을 보인다. 또한 전체적인 메카니즘은 비슷하지만, 다른 거동을 나타낸다(김재민, 2008). 그림 3.5.2.4는 실험에서 사용되었던 케이블에 설치된 가진 로봇이고, 가진 로봇의 제원은 표 3.5.2.2과 같다.

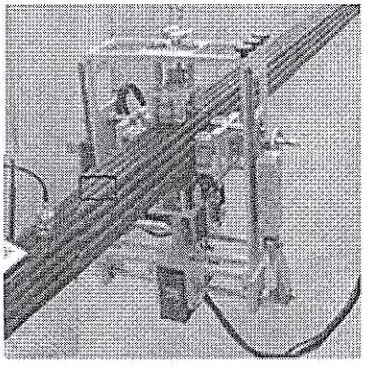


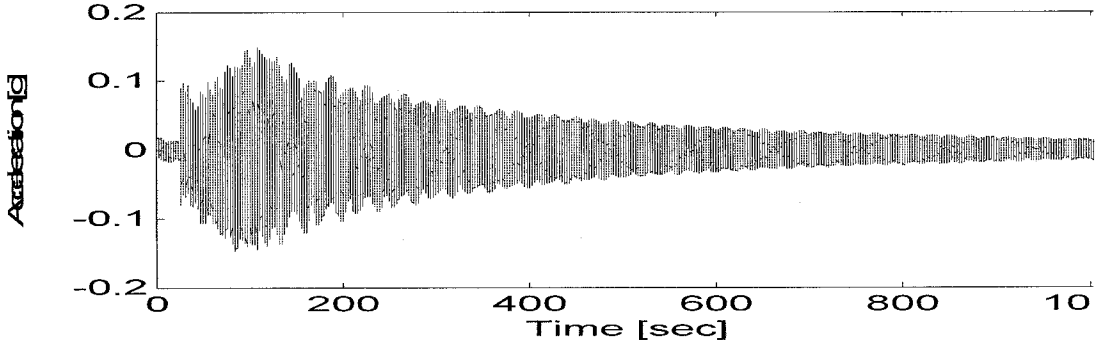
그림 3.5.2.4 케이블 가진 로봇

표 3.5.2.2 가진 로봇의 제원

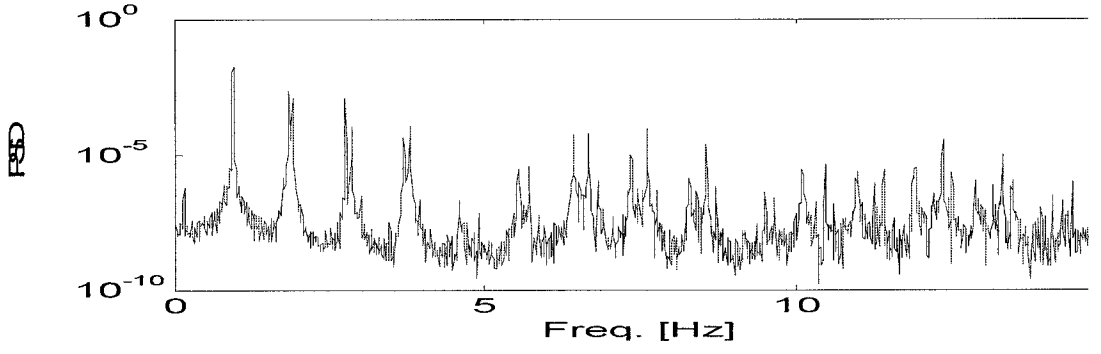
Items	Characteristics
Stroke	250 mm
Excitation Methods	Linear
Frequency Range	0.3 ~ 3Hz
System Weight	25kg
Added mass	5kg, 10kg
Power	wired / wireless (AC 220V, DC24V)
Cable diameter acceptable	150-210mm

(5) 실험 결과

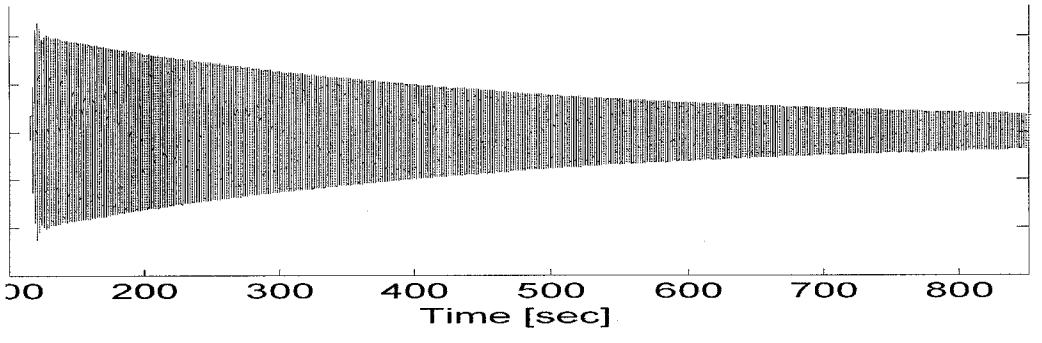
도로 공사 케이블의 경우 실험과정에서 다른 케이블로 교체가 되었기 때문에 수동형 시스템에 대해서만 성능을 비교하였다. 수동 제어에서 passive-off case인 0 V의 전압을 MR 감쇠기에 공급하는 경우에서 1 V씩 전압의 세기클 증가시켜 4.5 V까지 공급하여 감쇠 성능을 평가하였다. 그 결과 그림 3.5.2.5.부터 그림 3.5.2.10.의 그래프를 통해 제어시와 비제어시의 MR 댐퍼 성능을 평가할 수 있었다. 특히 그림 3.5.2.10은 100m 케이블에서의 각각의 case에 대한 감쇠비를 나타낸 것이다. 감쇠비의 비교에서 비제어시의 감쇠비는 일정하고 다른 경우에 대해서는 변화하는 것을 확인할 수 있다. 또한 모든 수동 제어 시스템은 비제어시보다 좋은 성능을 보이는 것을 확인할 수 있다. 다만, 케이블의 제원이 달라짐에 따라 현대실험과는 달리 도로공사 케이블이 경우 1V에서 가장 좋은 성능을 나타내었는데 passive-off 이후에 1V에서 가장 좋은 성능을 나타냈었기 때문에 좀더 새밀하게 입력 전압을 나누어 추가 실험을 수행해야 할 것이다.



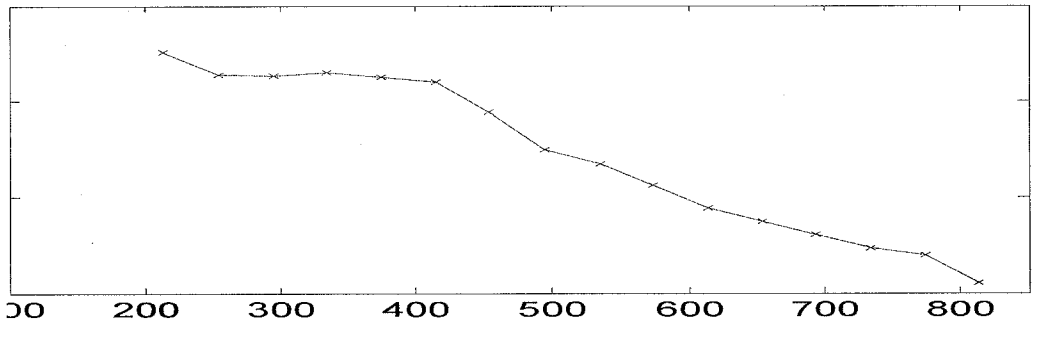
(a) 시간이력 곡선



(b) 파워 스펙트럼

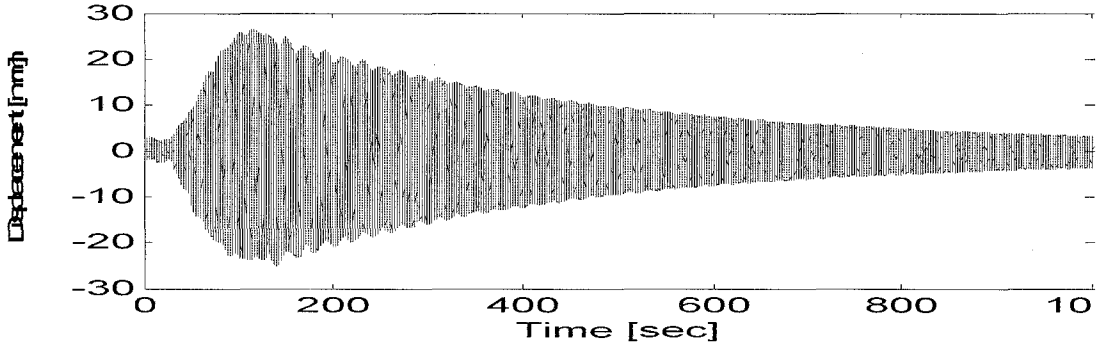


(c) 필터링 된 자유 진동

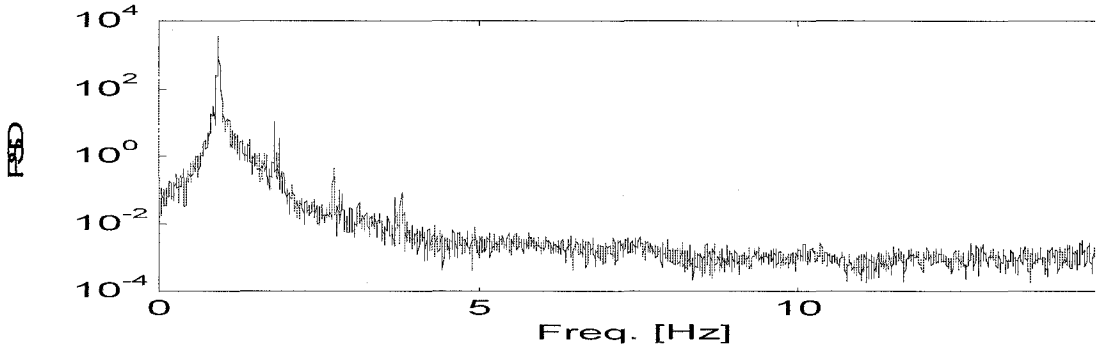


(d) 추정된 감쇠비

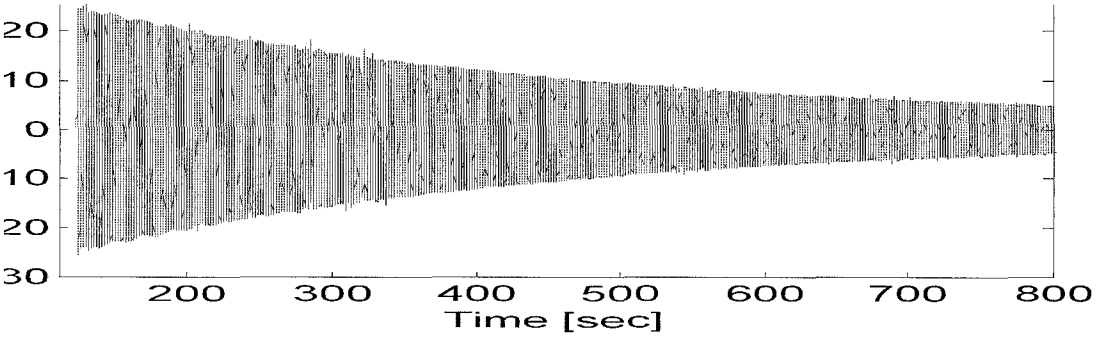
그림 3.5.2.5. 비제어시의 결과 (가속도)



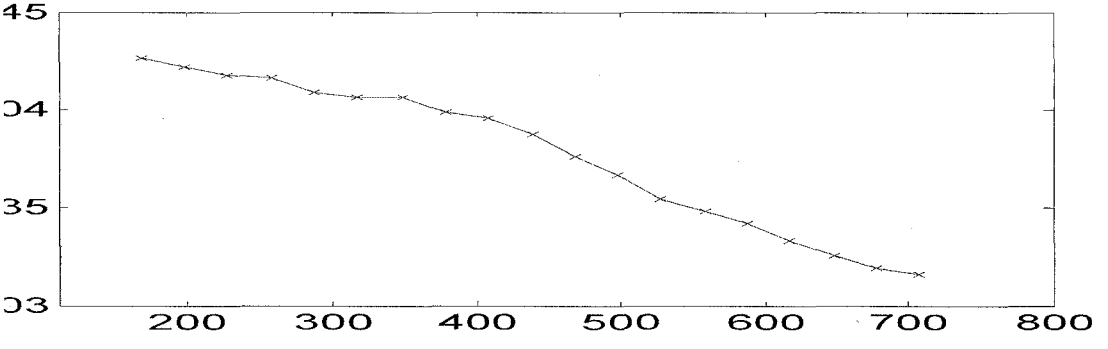
(a) 시간이력 곡선



(b) 파워 스펙트럼



(c) 필터링 된 자유 진동



(d) 추정된 감쇠비

그림 3.5.2.6. 비제어시의 결과 (변위)

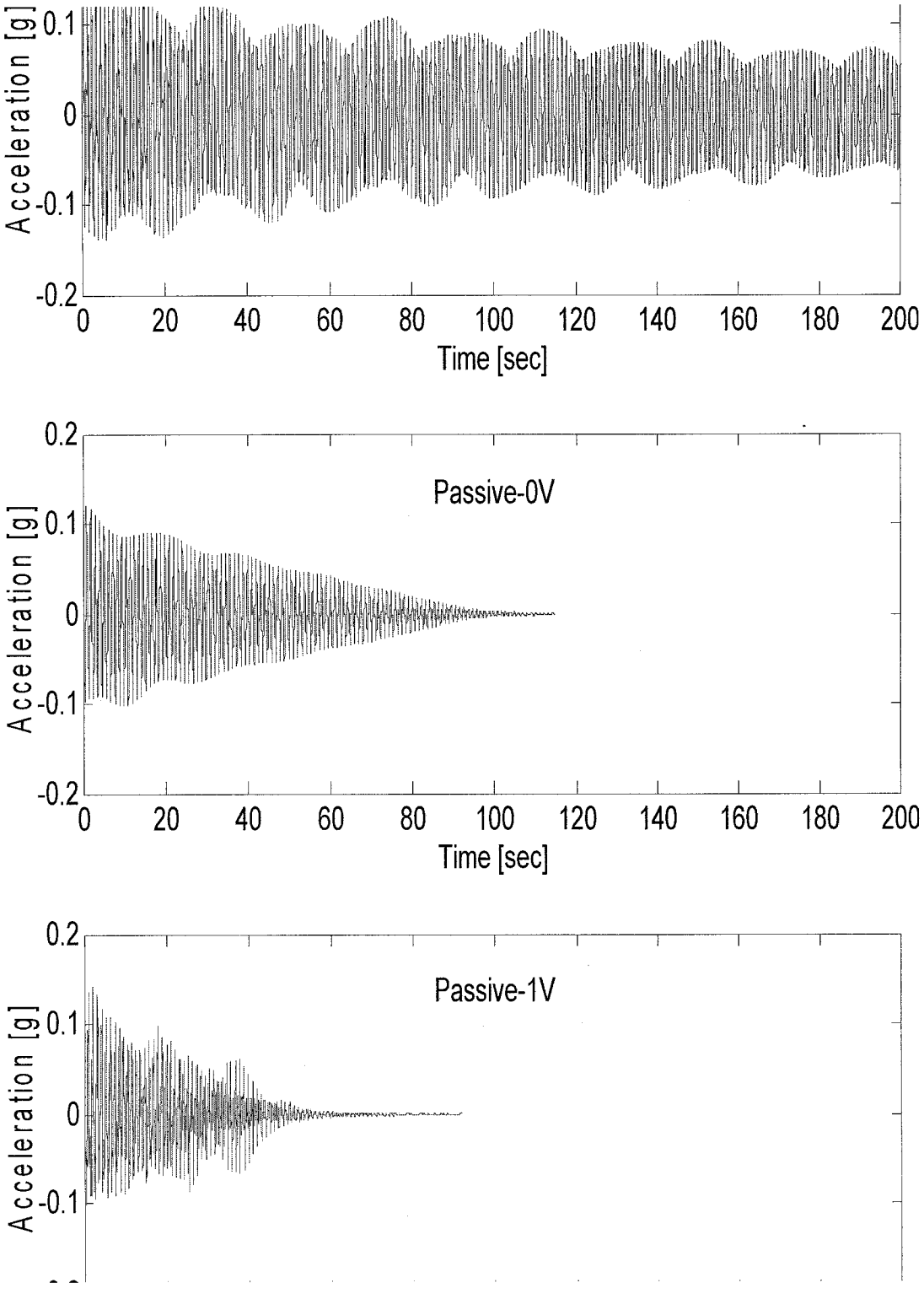


그림 3.5.2.7. 비제어시와 제어시의 시간 이력 곡선 (가속도)

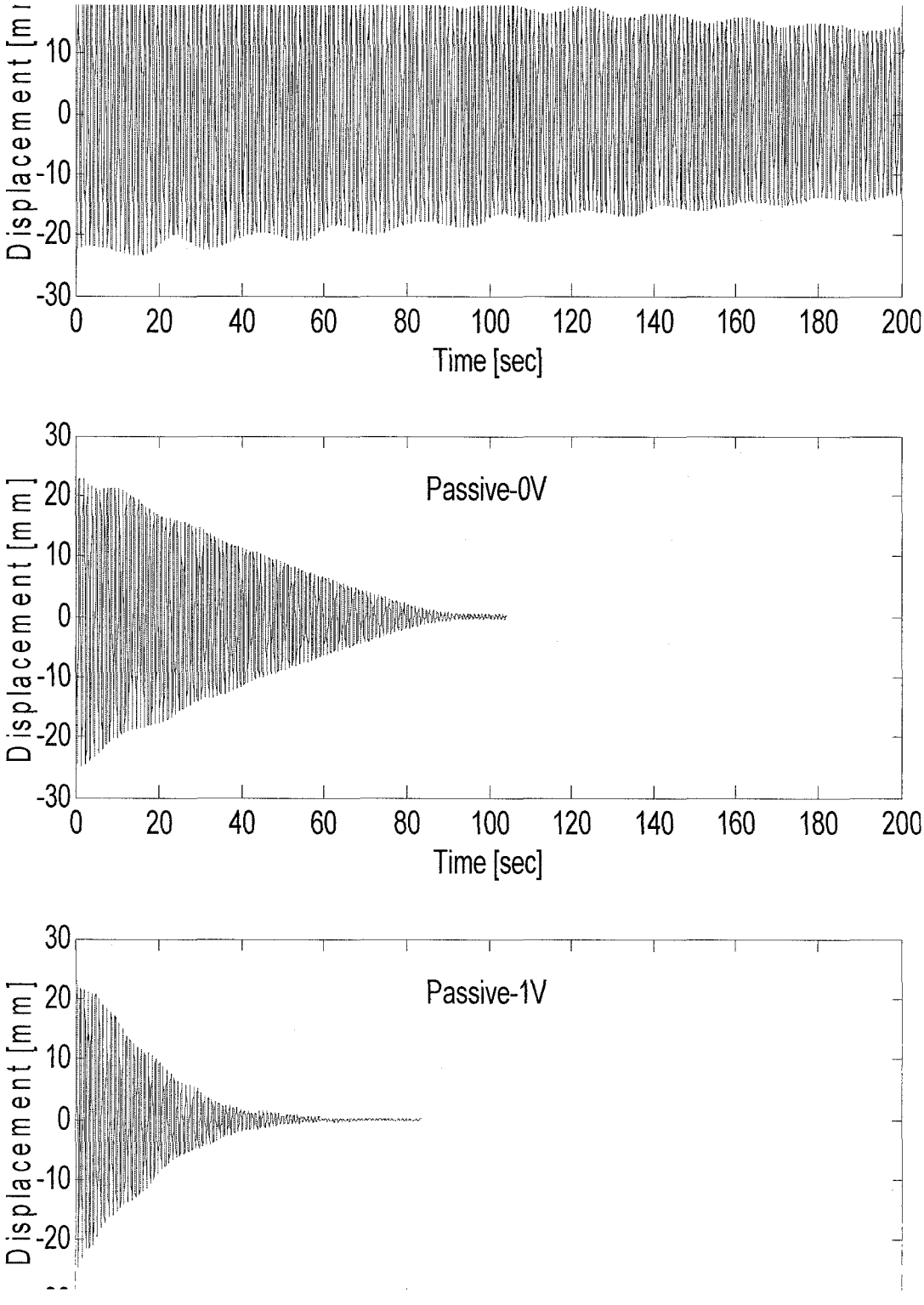
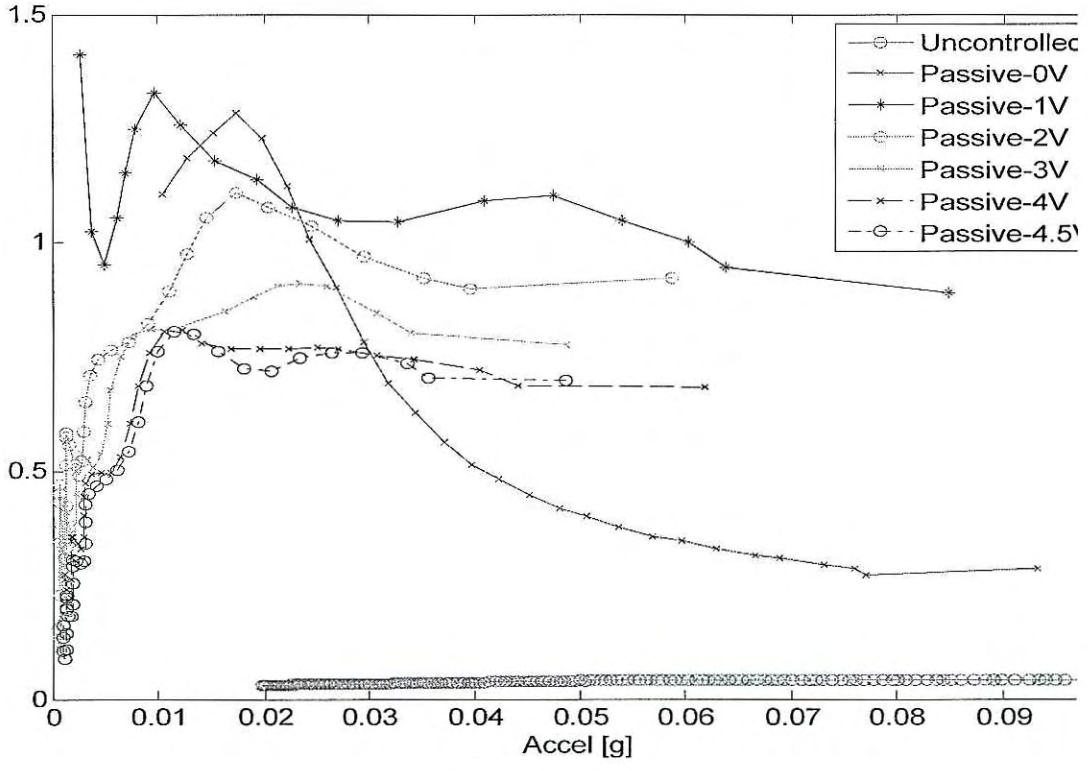
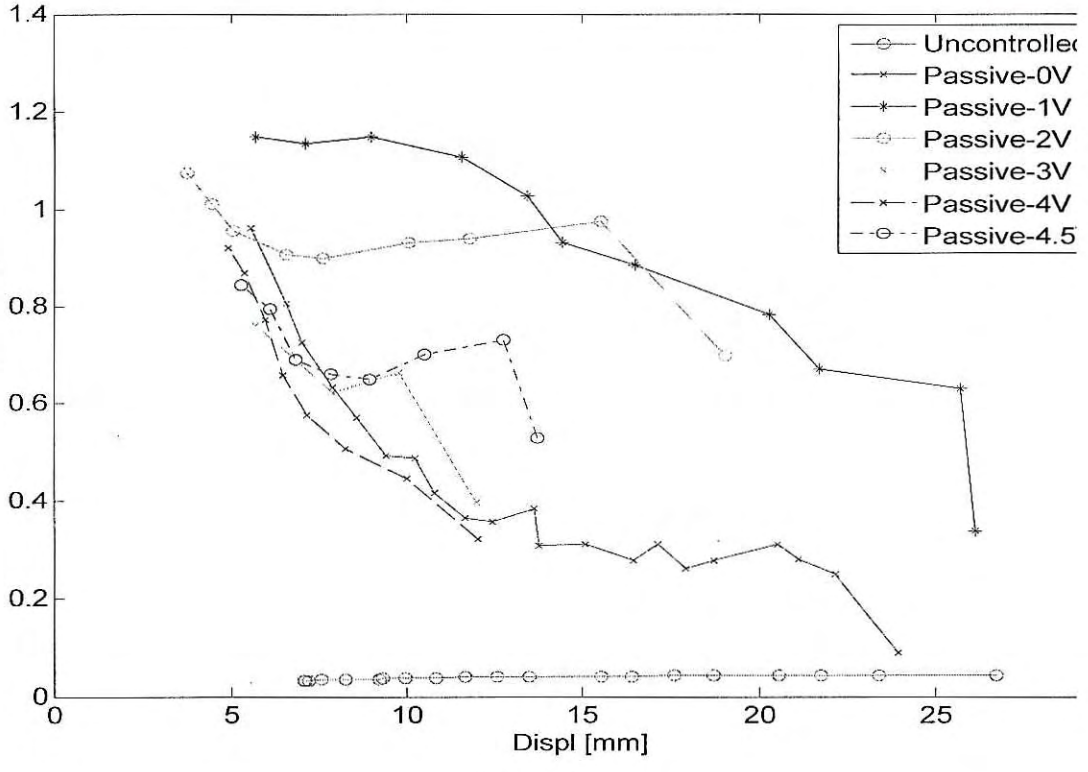


그림 3.5.2.8. 비제어시와 제어시의 시간 이력 곡선 (변위)



(a) 가속도



(b) 변위

그림 3.5.2.9. 제어시와 비제어시의 감쇠비 비교

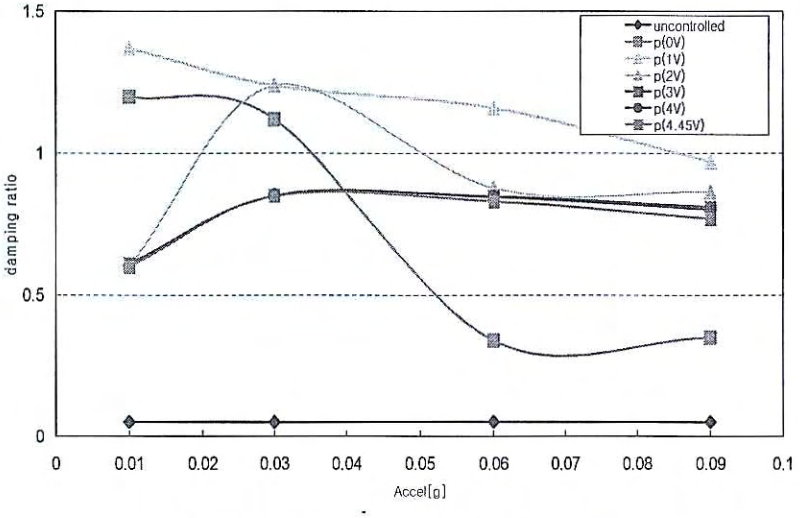


그림 그림 3.5.2.10. Damping ratio

5.3. 44.7 m 사장케이블에 대한 신개념 스마트 제진장치 성능평가

5.3.1. 실험 결과

(1) 케이블 감쇠 실험의 setup

본 절은 신개념 제진장치의 성능평가를 위해 5.1절과 동일한 조건에서 EMI시스템만을 추가하여 실험을 수행하였다.
MR 감쇠기는 감쇠기 내부에 장착된 전자석에 전류를 가해서 자기장을 형성시켜 자기유변유체의 점성 특성을 변화시키는 과정을 통해 효율적으로 구조물의 진동을 감쇠시키는 장치이다. 따라서 MR 감쇠기를 이용하여 구조물의 응답을 효과적으로 감쇠시키기 위해서는 그림 3.5.3.1과 같이 전원, 제어기, 그리고 센서들로 이루어진 제어시스템이 필요하다.

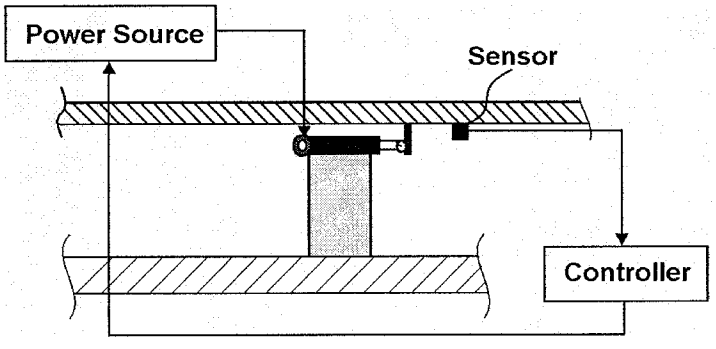


그림 3.5.3.1. MR 감쇠기를 위한 제어 시스템

하지만, 이러한 복잡한 제어시스템은 큰 규모의 토목구조물에 적용하기 어려우므로 본 연구과제에서는 그림 3.5.3.2와 같이 패러데이의 전자기유도법칙에 의해 진동에너지를 전기에너지로 변환시키는 EMI 시스템을 MR 감쇠기에 장착하여 제어시스템과 외부 전원을 대신하도록 하였다.

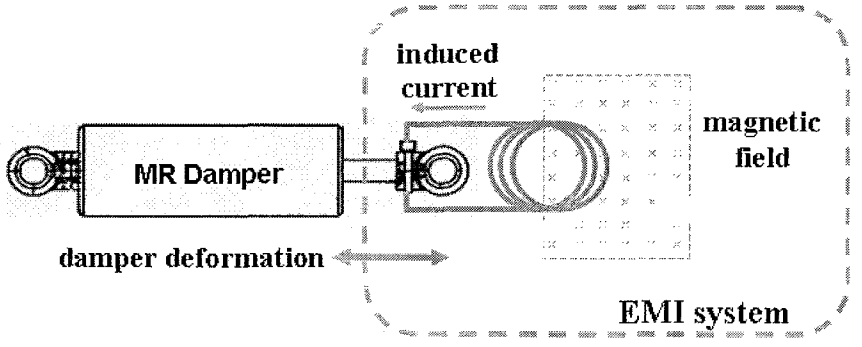
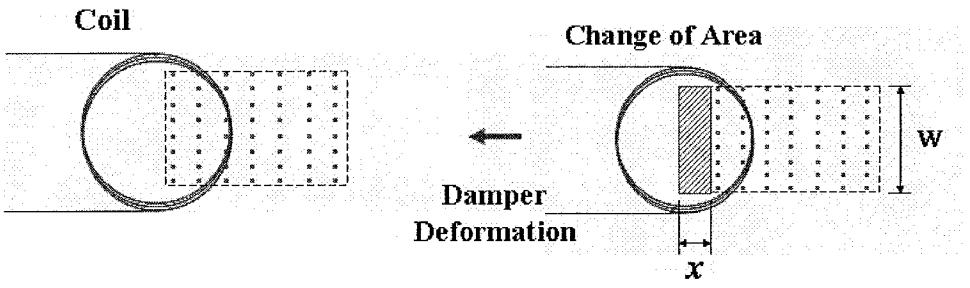


그림 3.5.3.2. EMI 시스템을 구비한 MR 감쇠기의 개략도

EMI 시스템은 코일과 자기장을 형성할 수 있는 영구 자석으로 이루어지며 식 (3.5.3.1)과 같은 패러데이의 전자기 유도법칙에 따라 코일과 영구자석의 상대 속도에 비례하여 유도전류를 생성하게 된다.

$$\varepsilon = -n\frac{d\Phi_B}{dt} = -n \times B\frac{dA}{dt} \tag{3.5.3.1}$$

여기서, ε는 유도 기전력, n은 코일이 감긴 횟수, Φ_B는 Magnetic Flux, B는 자기장의 세기, A는 자기장 내부에 위치한 코일의 면적이다.
즉, 그림 3.5.3.3a와 같이 한 개의 코일이 영구 자석에 의하여 생성된 자기장 내부에 존재할 때 감쇠기에 발생된 변위에 의하여 그림 3.5.3.3b와 같이 코일의 위치가 변하게 되고, 코일 내부의 자기장 변화량을 상충하기 위하여 코일 내부에 유도전류가 흘러 코일이 연결된 MR 감쇠기에 전원을 공급한다. 다시 말하면, 코일과 영구자석 사이의 상대변위에 의한 운동에너지가 MR 감쇠기의 전원으로 사용되는 전기에너지로 변환이 되는 것이다.



(a) 전자기 유도부 변위 생성 전 (b) 전자기 유도부 변위 생성 후

그림 3.5.3.3. EMI 시스템의 거동 원리

따라서 빠른 변위는 코일 내부의 자기장량이 크게 변화하게 하므로 큰 전력이 생성되고 느린 변위는 자기장량이 크게 변화하지 않으므로 작은 전력이 생성되게 된다. 이는 MR 감쇠기에 전달되는 전류량의 크기가 댐퍼에 유발된 변위에 의하여 결정되므로 일종의 제어기로서의 역할을 수행하게 된다. 즉 빠른 속도가 유발되면 더 큰 제어력을 발생하도록 전원을 공급하고 느린 속도가 유발되면 작은 제어력으로 구조물을 제어하도록 한다. 따라서 EMI 시스템은 MR 감쇠기에 전원을 공급하는 동시에 복잡한 계측시스템과 제어기의 역할까지 수행하게 된다.

본 연구에서는 사장교 케이블의 신개념 제진장치의 성능 평가를 위해 5.1절의 케이블과 동일한 44.7m 케이블을 대상으로 실험을 수행하였고, 그림 3.5.3.4.과 같이 지그과 EMI 시스템을 케이블의 0.06%되는 지점에 설치하였다.

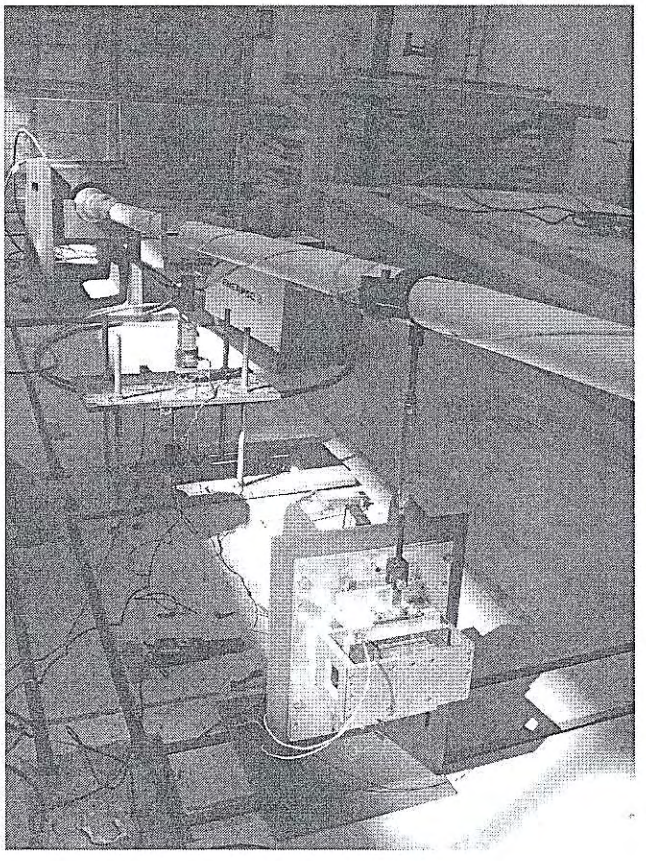


그림 3.5.3.4. 신개념 제진장치

(2) 케이블의 진동제어

사장 케이블의 신개념 제진장치의 성능평가를 위해 EMI 시스템이 결합된 Case와 결합되지 않은 Passive type Case의 실험을 수행하여 비교하였다.
EMI가 결합되지 않은 상태에서는 각각 0A, 0.4A, 0.6A, 0.8A, 1.0A로 전류를 바꿔가며 실험을 수행하였고, 케이블의 장력은 52.14 ton, 가진은 댐퍼 위치에서의 변위가 6mm인 진동에서 자유진동 실험을 수행하였다.

(3) EMI 시스템이 결합된 신개념 제진장치의 실험 결과

MR 댐퍼에서 1.4m 떨어진 곳에 설치된 EMI 시스템은 케이블이 진동함에 따라 페러데이법칙에 의해 전류가 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 그림 3.5.3.5는 케이블

이 가진되어 발생하는 EMI의 전류를 시간 이력 곡선으로 나타낸 것이다. 여기서 가로축은 시간을 나타내고, 세로축은 전류를 나타낸 것이다.

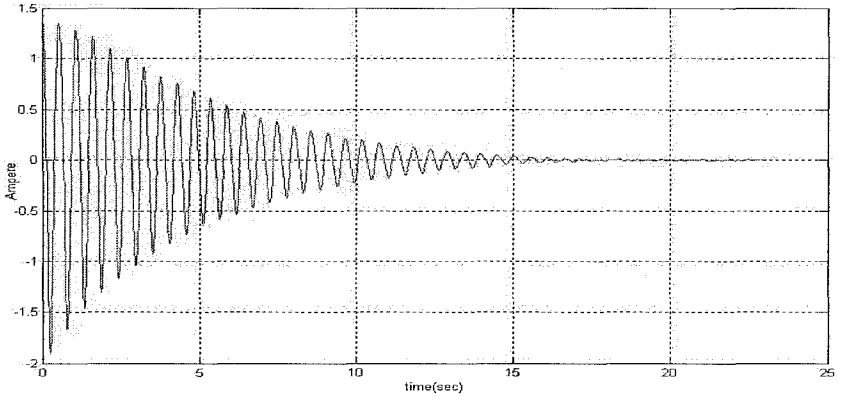


그림 3.5.3.5. EMI 시스템에서 발생한 전류

그림 3.5.3.5에서 보면 케이블이 진동하면서 EMI 장치가 움직여 전류를 발생 시켰음을 알 수 있다. 이로 인해 신개념 제진장치는 자체적으로 전류를 발생하여 다른 전원장치 없이도 케이블을 제어할 수 있다. 그림 3.5.3.6은 EMI 장치가 결합된 신개념 제진장치의 시간 이력 곡선이다. 여기서 가로축은 시간을 나타내고, 세로축은 케이블의 중앙지점에서의 가속도를 나타낸다.

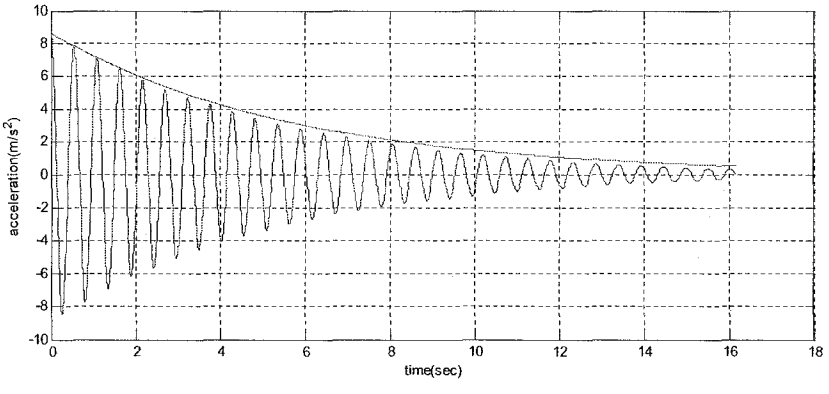


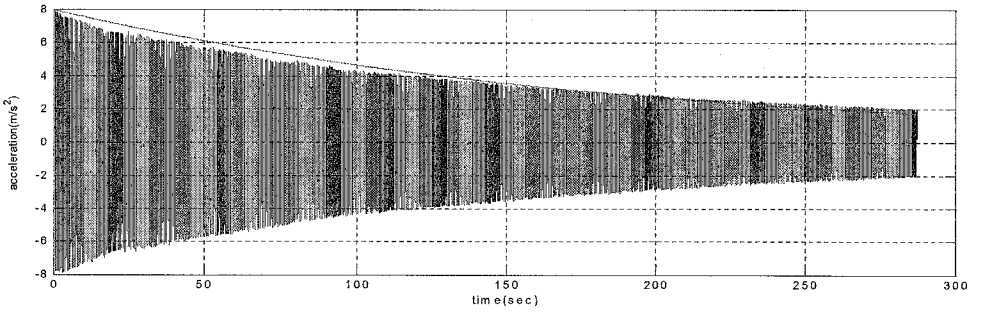
그림 3.5.3.6. 신개념 제진장치의 시간이력곡선

그림 3.5.3.5와 그림 3.5.3.6는 동일한 범위내에서 각각 발생하는 전류와 케이블 중앙지점의 가속도의 시간이력곡선을 나타낸 그래프이다. 그래프를 확인하면 별도의

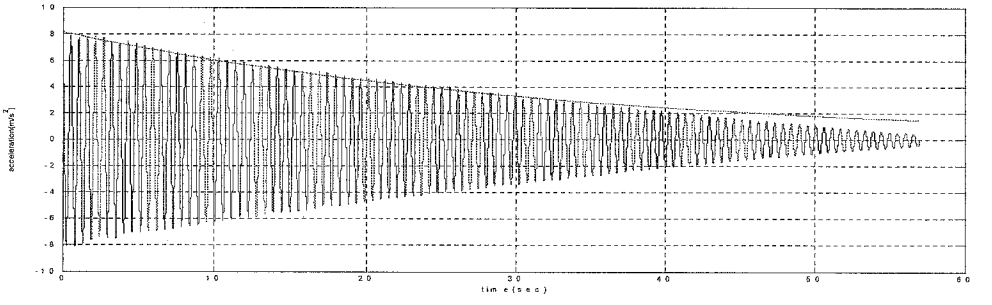
전원공급 없이도 EMI 시스템의 자체적인 전원공급으로 인해 감쇠성능이 발휘함을 확인할 수 있다.

(4) EMI 시스템이 결합되지 않은 수동형 Case의 결과

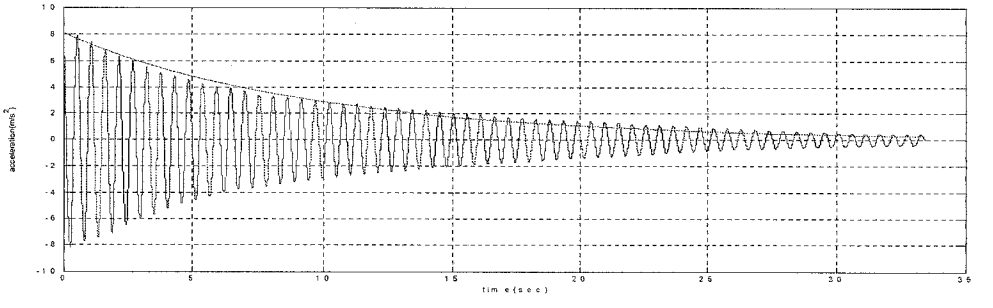
본 Case는 케이블에서 EMI시스템을 제거하고 MR 댐퍼에 직접 전류를 공급하여 실험을 수행하였다. 실험방법은 0A부터 일정한 간격으로 1.0A까지 두 번씩 실험을 수행하였다. 그림 3.5.3.7는 각각의 전류에 따른 시간 이력 곡선이다.



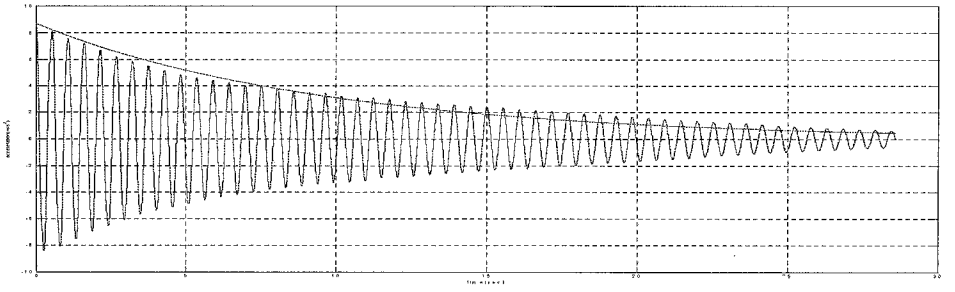
(a) Uncontrolled



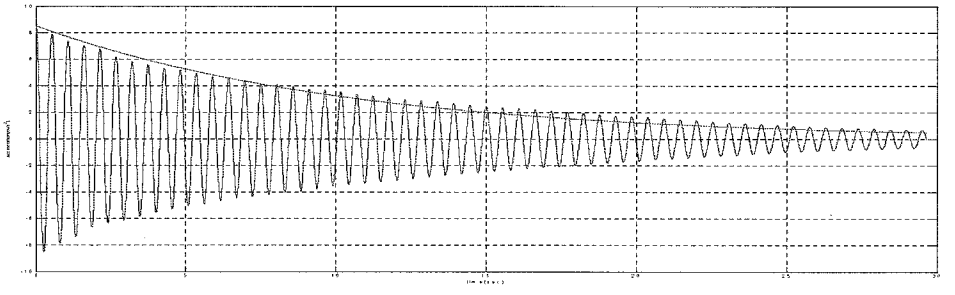
(b) passive 0A



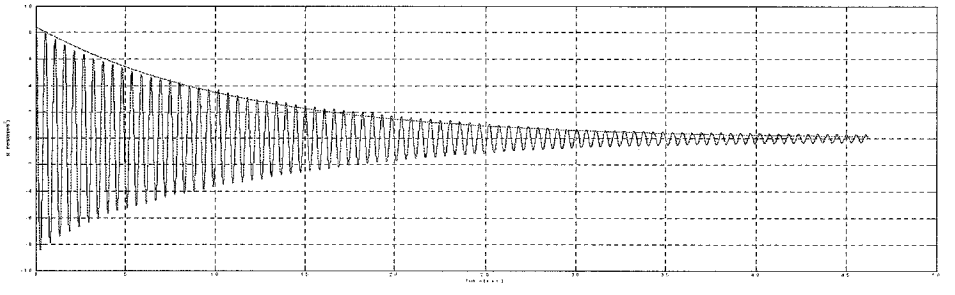
(c) passive 0.4A



(d) passive 0.6A



(e) passive 0.8A



(f) passive 1.0A

그림 3.5.3.7. 각각의 전류에 대한 케이블의 가속도 시간 이력 곡선

그림 3.5.3.7의 결과를 확인해보면 uncontrolled에 비하여 passive-off 의 시간이력 곡선 감쇠가 더 잘된 것을 확인할 수 있고, passive-on이 passive-off일때의 감쇠보다 감쇠성능이 뛰어난 것을 확인할 수 있었다.

(5) 수동형 장치와 신개념 제진장치의 감쇠비 비교

제어되지 않은경우와 수동형으로 제어된 경우, 그리고 EMI 시스템이 결합된 신개념 제진장치로 제어된 경우에 대하여 위의 시간 이력 곡선을 이용하여 그림 3.5.3.8과 같이 감쇠비를 산정하여 각각의 제어방법의 성능을 비교해 보았다. 여기서, 가로축은 가속도의 크기이고 세로축은 감쇠비이다.

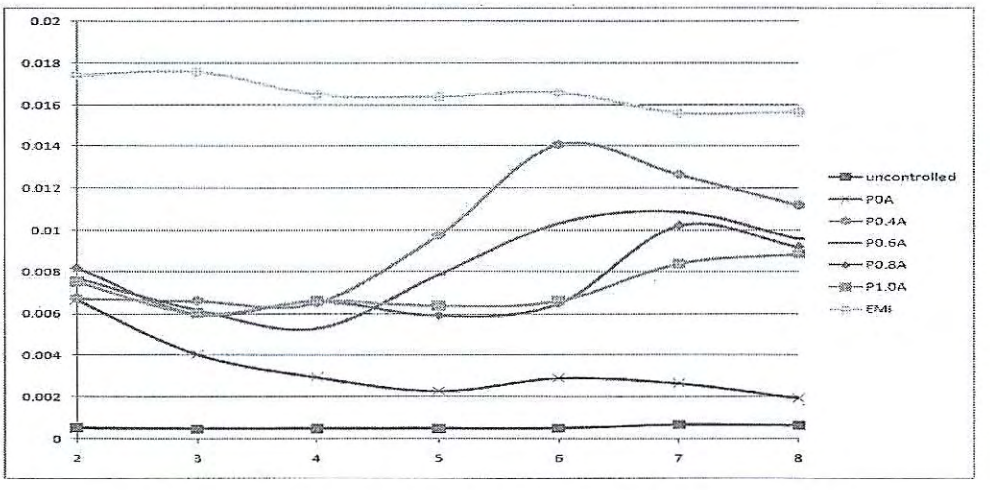


그림 3.5.3.8. 수동형 장치와 신개념 제진장치의 감쇠비 비교

그림 3.5.3.8에서 보면 알수 있듯이 비제어시는 감쇠비의 변화가 일정하다는 것을 확인할 수 있다. 또한 passive-off (0A)일 경우 비제어시보다는 좋은 성능을 보이지만 다른 방법의 제어보다는 가장 성능이 좋지 않음을 확인할 수 있다. 수동형 제어일 경우에는 0.4A로 제어할 경우 가장 좋은 성능을 나타내었으며, 1.0A로 전류를 크게할 경우 점차 감쇠비가 주는걸로 보아 0.4A의 전류가 passive-optimal인 것으로 확인 되었다. 그래프에서 한가지 주목해야 할 부분은 EMI 시스템이 결합된 신개념 제진장치로 제어할 경우 다른 어떤 경우보다 가장 뛰어난 성능을 보임을 확인할 수 있다. 이는 기존의 제진장치보다 장점인 자체적인 전원공급외에도 감쇠 성능에서도 뛰어난 것은 신개념 제진장치의 성능이 뛰어남을 확인할 수 있다.

6 절 대형 풍동 실험을 통한 제진 장치의 내풍 성능 평가

6.1. 개요

6.1.1. 실험배경

교량에 있어서 케이블은 사장교의 사재, 현수교의 주케이블 및 행어케이블, 닐슨 아치의 행어케이블 그리고 최근에는 엑스트라도즈교의 인장케이블 등 다양하게 사용된다. 교량에 사용되는 케이블의 소재는 다양하나, 그 형상은 원형단면으로 거의 일정하다고 할 수 있다. 따라서 케이블의 내풍성을 고려할 때 원형단면에 대한 항력계수, 와류방출특성(Strouhal number)등 기본적인 내풍특성은 잘 알려져 있으나, 감쇠율이 매우 낮고 유연하다는 점과 여러 형태로 설치 또는 배치된다는 점에서 교량 구조물 중에서도 가장 진동에 민감한 부재라고 할 수 있다. 실제로 바람에 의한 케이블의 진동사례는 수없이 많으며 이에 대한 원인 규명실험, 대책 등이 필요한 형편이다.

본 연구과제는 3차년도 연구계획으로 신개념 스마트 제진장치의 실제 교량 케이블에 대한 적용성을 확인하기 위하여 바람에 대한 케이블 진동현상에 대한 제진성능을 대형풍동실험을 통해 확인하기로 하였고, 바람에 대한 케이블의 여러 가지 진동현상 중 공기역학적 부감쇠력이 높아 다른 풍진동에 비해 제어가 어려운 웨이크갤로핑을 제어대상으로 하였다. 이러한 신개념 스마트 제진장치의 실제 실험에 앞서 2차년도에는 예비실험의 성격으로 케이블강체모형을 이용한 부분모형실험(Sectional Model Test)을 수행하여 케이블 중심간격에 따른 웨이크갤로핑의 발생특성을 파악하였다. 3차년도에는 고차모드의 진동이 가능한 탄성체모형실험을 통한 케이블의 진동특성 파악을 위한 실험을 진행하였으며, 강체모형과 탄성체모형실험을 통해 파악한 저차 및 고차모드의 케이블의 진동특성에 적합한 제진장치를 적용하여 케이블 탄성체모형에 제진장치를 부착하여 동일한 실험을 반복하여 수행하였다. 제진장치 설치 전과 설치후의 케이블의 동특성 파악 및 내풍특성의 파악을 통해 신개념 스마트 제진장치의 적용성을 파악하는 것이 실험의 목적이다.

6.1.2. 풍하중에 의한 케이블의 진동현상

일반적으로 케이블에서 발생하는 공기력진동현상은 다음과 같이 구분할 수 있다.

① 와류진동(Vortex Induced Vibration)
② 풍우진동(Rain-Wind Induced Vibration)
③ 갤로핑(Galloping)

④ 웨이크 갤로핑(Wake Galloping)

⑤ 버페팅(Buffeting)

와류진동은 바람이 작용할 경우, 기류의 박리현상에 의해 케이블에서 방출되는 와류의 주기성과 케이블의 고유진동수가 일치하는 풍속에서 발생하는 일종의 공진현상이며, 따라서 진동발생 풍속보다는 진폭이 중요하다. 와류진동의 진폭은 케이블의 질량, 감쇠율에 의해 좌우되며 여기에 난류효과도 영향을 미친다.

풍우진동의 경우, 사장교의 케이블과 같이 경사진 원형케이블에서 발생하는 경우가 있다. 그러나 풍우진동은 발생조건이 매우 제한적이라서 이 진동이 발생하는 경우는 흔치 않다. 풍우진동의 발생조건은 10m/s정도의 풍속, 적절한 강우량, 특정된 경사각과 풍향, 케이블의 고유진동수는 1Hz~3Hz, 폴리에틸렌피복케이블, 해안가와 같은 난류강도, 케이블의 감쇠율은 0.1%정도 등 상당히 제한적이다.

갤로핑은 비대칭단면에서 발생할 수 있는 공기력 불안정현상으로 한정된 풍속에서 상대적으로 작은 진폭으로 진동하는 와류진동과는 달리 임계풍속을 초과하는 모든 풍속에서 상대적으로 큰 진폭으로 진동할 수 있다. 케이블의 경우 단면 자체는 대칭이지만 경사케이블에 바람이 10°~20° 정도로 비스듬히 부는 경우나 케이블에 눈이나 얼음이 부착되는 경우는 바람에 대해 비대칭 단면이 되며 갤로핑 현상이 이론적으로 발생할 수 있다. 그러나 현재까지 실제 교량에서 발생한 사례는 거의 보고되지 않고 있다.

한편 병렬케이블(twin cable)에서는 웨이크 갤로핑과 웨이크 플러터가 문제가 되는 경우가 있다. 특히 웨이크 갤로핑의 경우, 사장교에서 발생사례가 매우 많고 진동제어가 매우 어려워 병렬케이블에서는 반드시 안정성을 확인하여야 한다. 일반적으로는 케이블의 중심간격이 케이블의 직경의 2~6정도에서는 웨이크갤로핑, 10~20정도에서는 웨이크플러터가 발생가능성이 있다고 알려져 있다.

이외에도 바람의 변동성분에 의한 버페팅이 발생할 수 있다. 버페팅은 풍속의 증가에 따라 점진적으로 증가하는데 버페팅진동이 케이블의 응력 및 피로문제를 일으킬 만한 강풍이 불 확률은 상대적으로 작기 때문에, 풍상측의 매우 거친 지형 때문에 난류강도가 커지는 경우를 제외하면 일반적으로 케이블에 큰 문제가 되지 않는다.

6.2. 케이블 강체모형실험(Sectional model test)

6.2.1. 풍동 및 측정기자재

케이블 강체모형실험에 사용된 풍동의 제원은 그림 3.6.2.1과 같다. 측정부의 크기는 폭(W) x 높이(H) x 길이(L) = 1m x 1.5m x 6m이며 풍속의 범위는 0.3m/s ~ 22.5m/s이다.

풍속의 측정은 피토관(pitot tube)에서 얻어지는 동압을 digital manometer를 이용하여 풍속으로 환산하였다. 강체모형실험에 있어서 변위측정은 수평과 수직변위를 동시에 계측할 수 있는 1개의 광학식변위계를 이용하였다. 광학식변위계로 계측한 데이터는, Low pass filter를 거치고 A/D변환 후 PC에 저장하고 아날로그신호는 pen oscillograph에 출력시켰다. 각 실험에서의 진동수의 측정은 sampling rate 200Hz로 20초의 데이터를 A/D변환 후 PC에 저장된 데이터를 분석하여 산출하였다. 난류강도의 측정은 열선풍속계를 이용하였다.

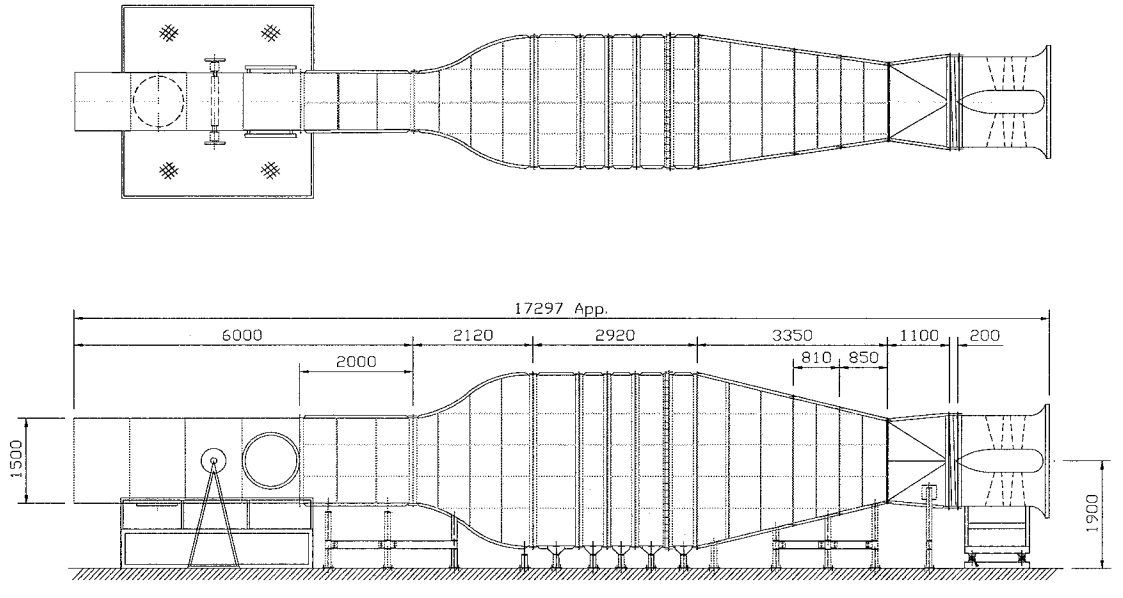


그림 3.6.2.1. 단면모형실험 전용풍동

표 3.6.2.1. 계측기 목록

측정항목	계 측 기 명	모델번호	제조사
풍 속	Pitot Tube	LK-5	Okano(일본)
	Digital Micromanometer	DP-20A	Okano(일본)
진동변위	Position Sensor (2sets)	C2399	Hamamatsu(일본)
	Low Pass Filter	9B02	NEC(일본)
	Pen Oscillograph	8K-33	NEC(일본)
진 동 수	FFT Analyzer		B&K(독일)
난류강도	Hot-wire Anemometer	IFA300	TSI(미국)

6.2.2. 기류조건 및 모형

실험풍속은 무차원풍속(Ur = U/fD)으로 평가하였으며 약 0 ~ 230 범위에서 약 40 point의 풍속에서 진동변위를 측정하였다. 실험대상 기류의 경우, 케이블 진동의 특성을 보다 확실하게 파악하기 위하여 공기력진동과 버페팅진동의 구분이 용이한 등류조건에서 수행하였다.

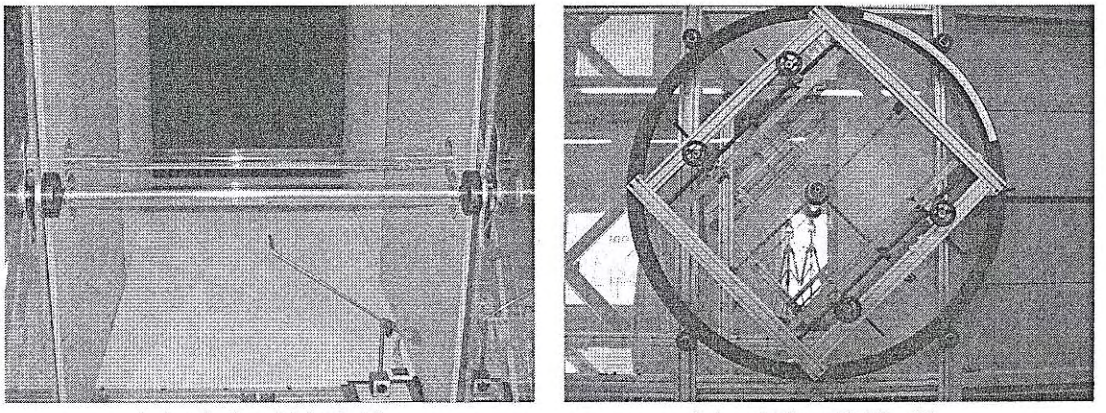
케이블 강체모형의 직경은 50mm로 하였고 고유진동수는 무차원풍속으로 평가되므로 임의로 결정하였다. 모형의 제원은 표 3.6.2.2와 같으며 상류측 및 하류측 모두 동일한 케이블모형을 사용하였다. 웨이크갤로핑 현상을 보다 확실하게 발현시키기 위해 낮은 감쇠율과 단위질량을 적용하였다.

표 3.6.2.2 모형의 제원

구분	길 이	단위중량	고유진동수	감쇠율(2.5mm)
PWS	0.85m	8.184kg/m	1.56Hz	δ=0.006

- 케이블 강체모형의 Scruton Number :

$$Sc = \frac{2 \cdot m \cdot \delta}{\rho \cdot D^2} = \frac{2 \cdot 8.184 \cdot 0.006}{1.225 \cdot 0.05^2} = 32.0$$



(a) 강체모형(정면) (b) 강체모형(측면)

그림 3.6.2.2. 강체모형의 Set-up

6.2.3. 실험 Case

일반적으로 웨이크갤로핑이 발생하는 범위는 케이블 중심간격 2D~6D로 알려져 있으나, 본 실험에서는 웨이크플러터의 발생가능성도 감안하여 3D~13D까지 2D간격으로 진동실험을 수행하였다. 케이블 간격의 정의 및 풍향의 정의는 그림 3.6.2.3과 같다.

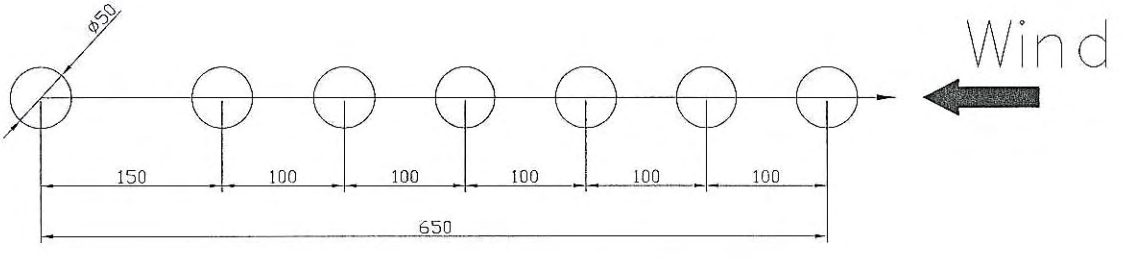


그림 3.6.2.3. 케이블간격 및 풍향

6.2.4. 실험결과

중심간격에 따른 병렬케이블의 실험결과(등류)를 그림 3.6.2.4부터 그림 3.6.2.9에 나타낸다.

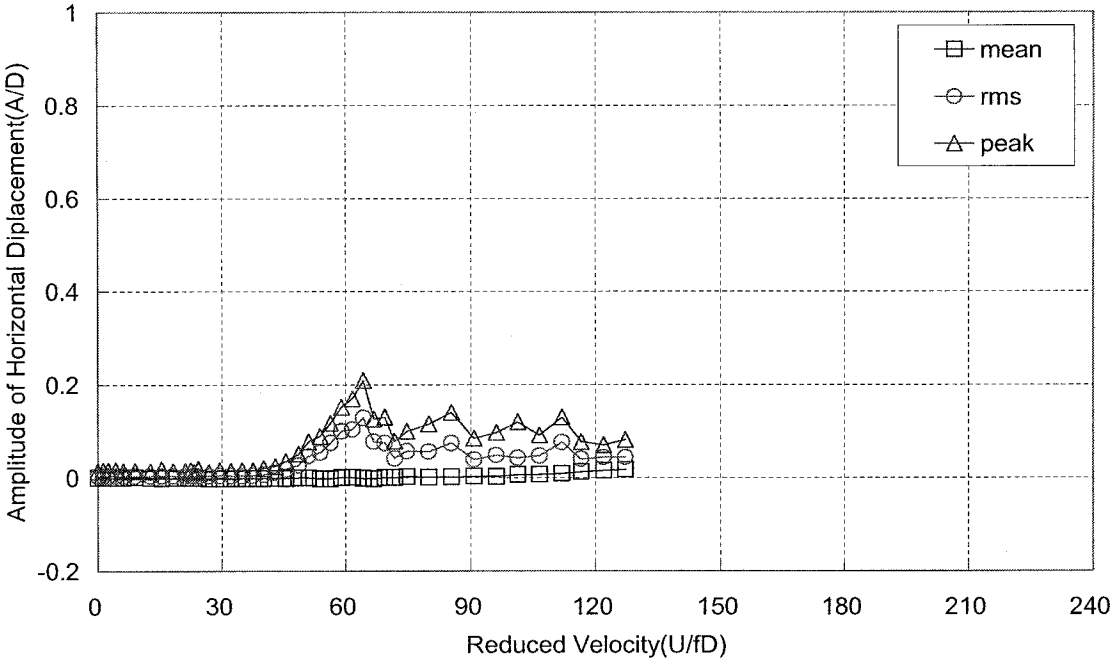
실험결과에 의하면, 중심간격 3D의 경우 무차원풍속(Ur) 60 부근에서 진동이 발생하며 본격적인 웨이크갤로핑은 무차원풍속 110정도에서 발생한다. 무차원풍속 60정도에서는 수평방향의 진동이 수직방향의 진동에 비해 더 크게 발생하나 수평방향의 진동은 풍속의 증가에 따라 점차 감소하며 수평방향의 진동의 거의 소멸된 무차원풍속 110정도에서 웨이크갤로핑이 확실하게 발생하는 것을 볼 수 있다.

중심간격 5D의 경우, 무차원풍속 60 이전에 웨이크갤로핑이 발생하며 풍속의 증가에 따라 진폭이 커짐을 볼 수 있다. 중심간격 3D에 비해 더 낮은 풍속에서 더욱 분명하게 진동이 발현함을 알 수 있다.

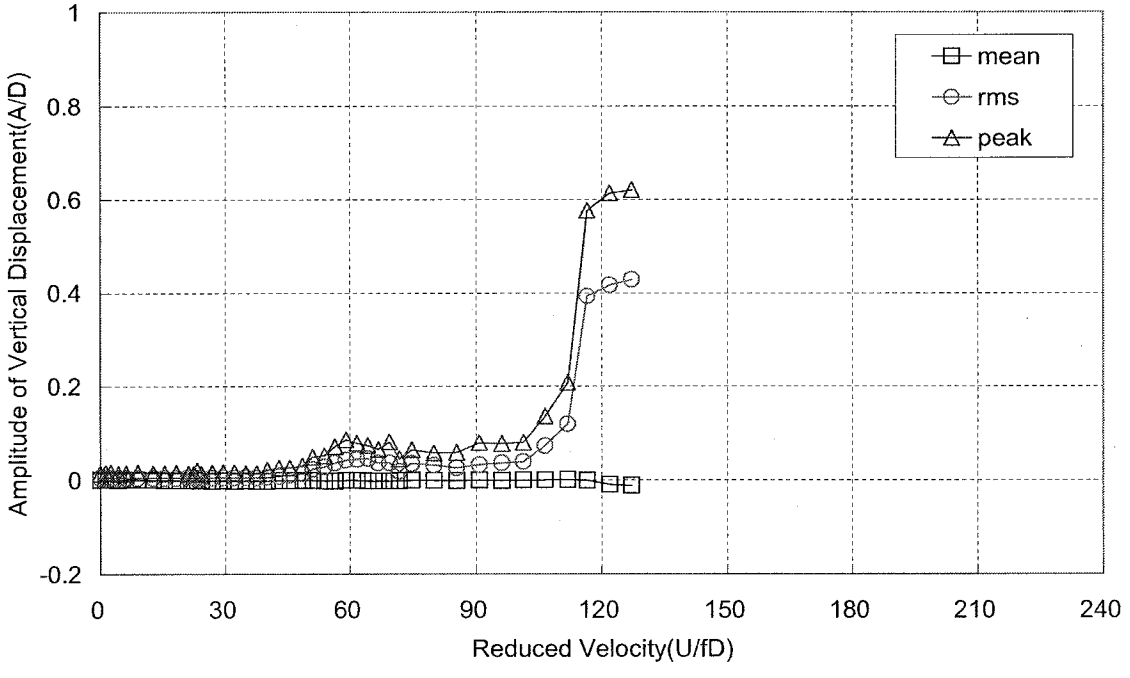
중심간격 7D의 경우, 무차원풍속 90 부근에서 수직방향의 진동이 발생하나 풍속의 증가에 따라 진폭이 감소하며 와류진동과 비슷한 양상을 보이고 있다.

중심간격 9D 이상인 경우, 와류진동 또는 웨이크갤로핑과 같은 공기력진동은 발생하지 않고, 풍속의 증가에 따라 버페팅 진동이 약간 발생하고 있다.

참고로 중심간격 7D 이상인 경우도 병렬케이블의 중심축과 풍축이 이루는 각도가 5°~10° 정도가 되면 웨이크갤로핑이 발생할 수 있다고 알려져 있으나, 본 연구에서는 조사대상으로 삼지 않았다.

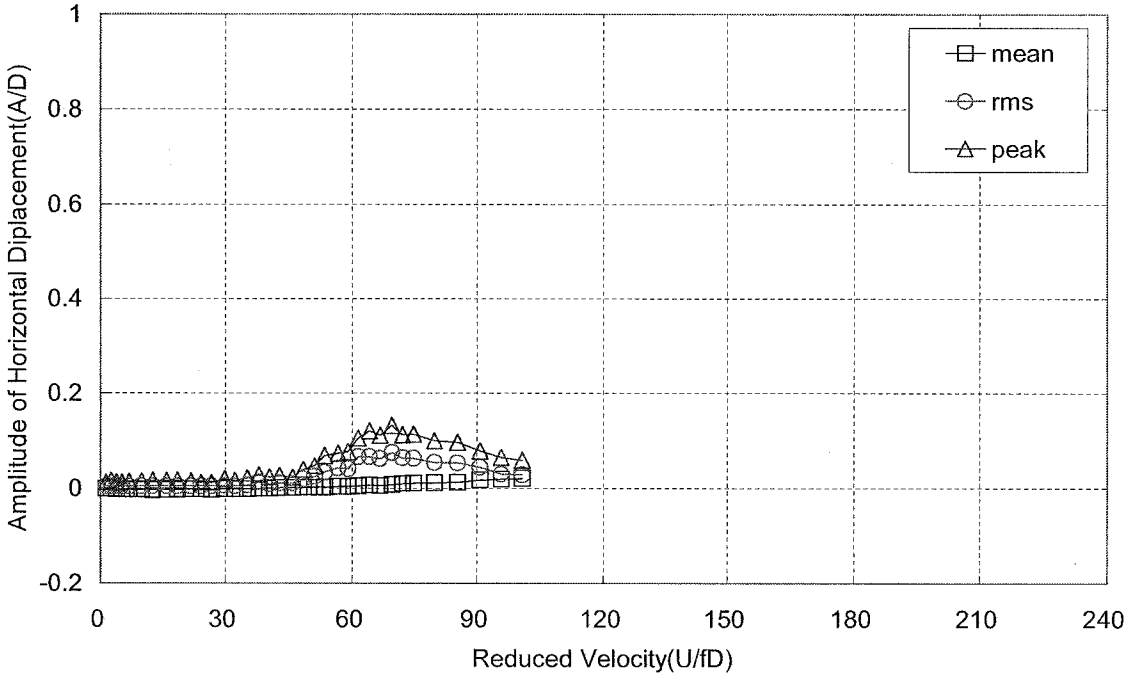


(a) 수평변위

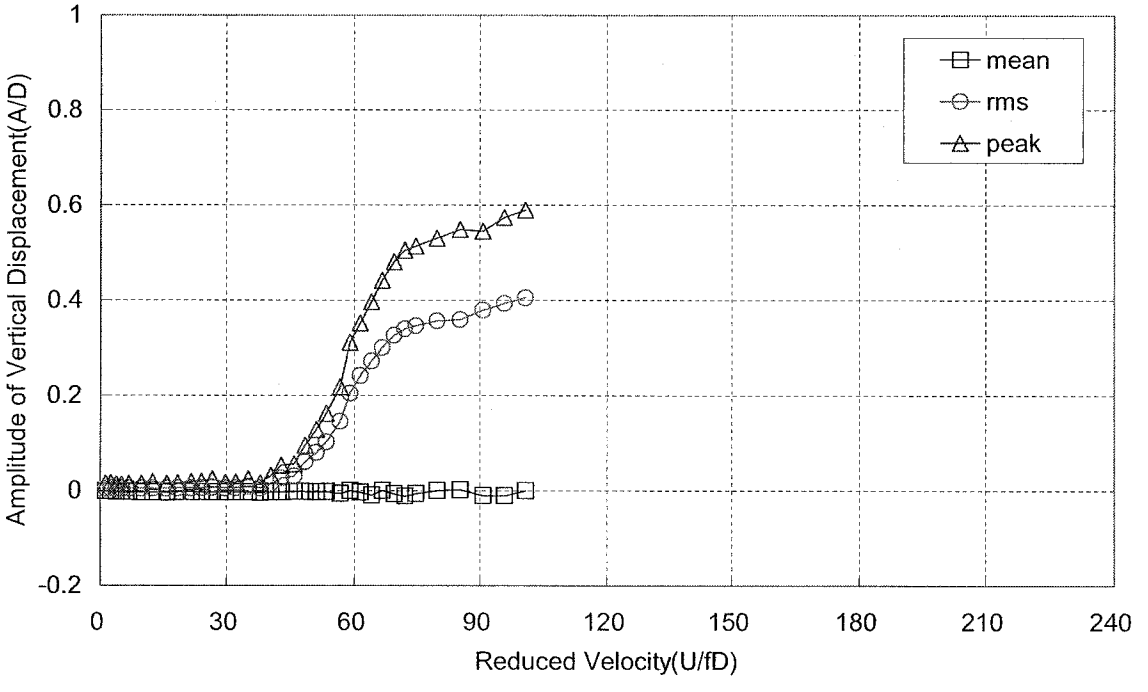


(b) 수직변위

그림 3.6.2.4. 병렬케이블(간격3D)의 내풍특성

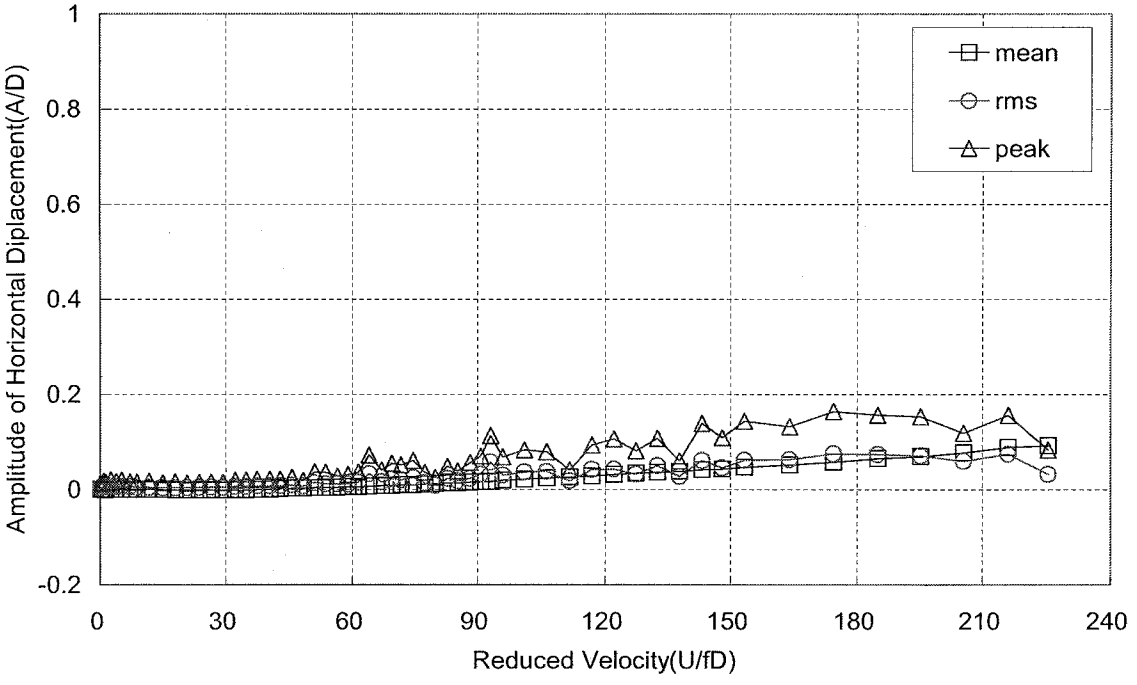


(a) 수평변위

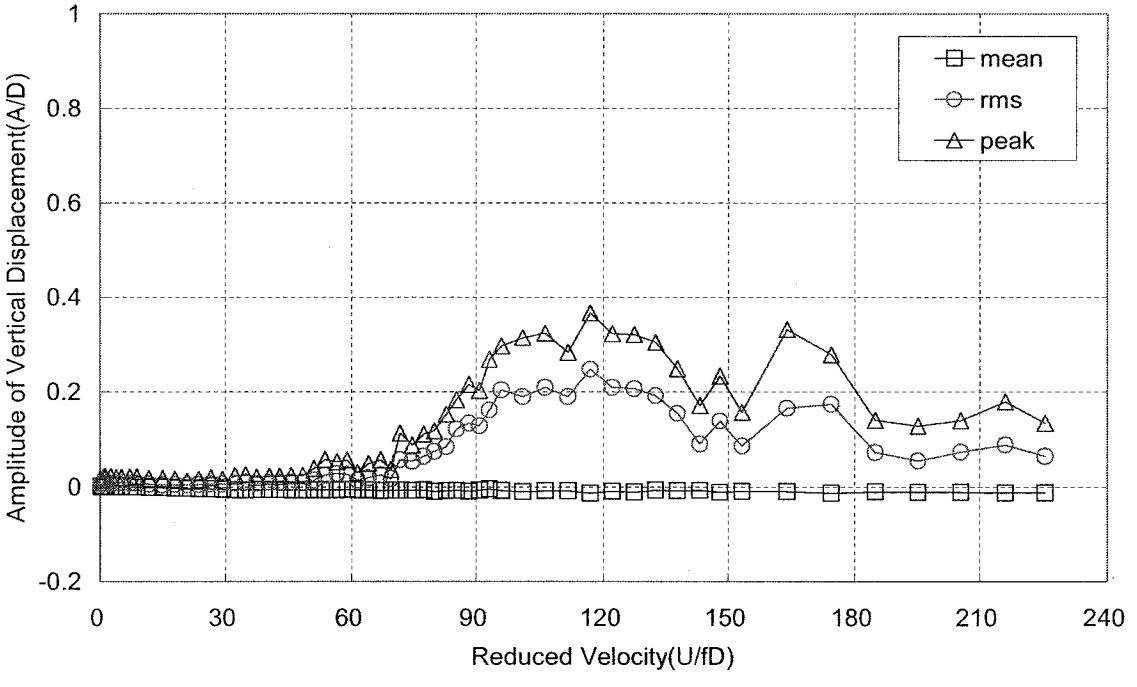


(b) 수직변위

그림 3.6.2.5. 병렬케이블(간격5D)의 내풍특성

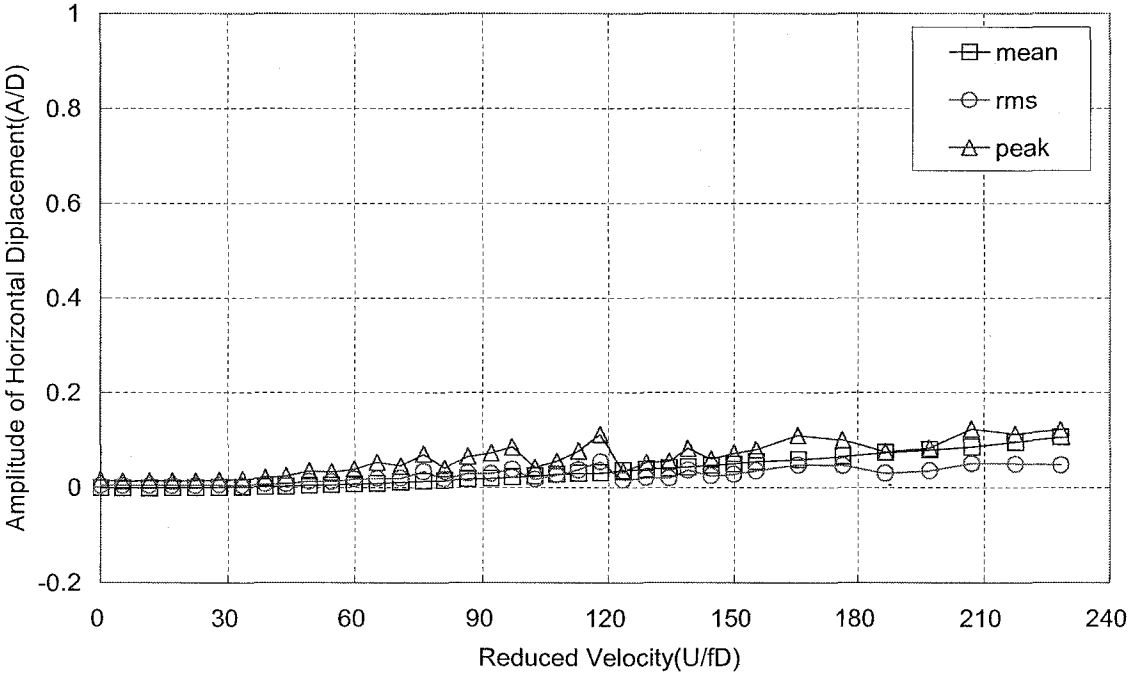


(a) 수평변위

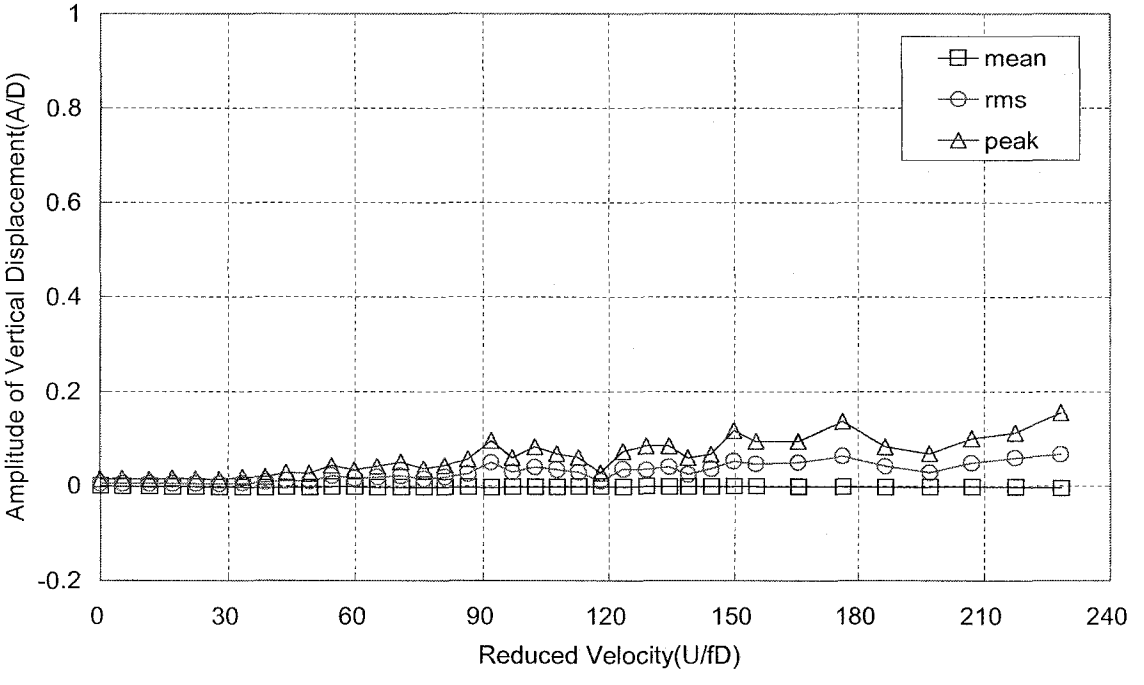


(b) 수직변위

그림 3.6.2.6. 병렬케이블(간격7D)의 내풍특성

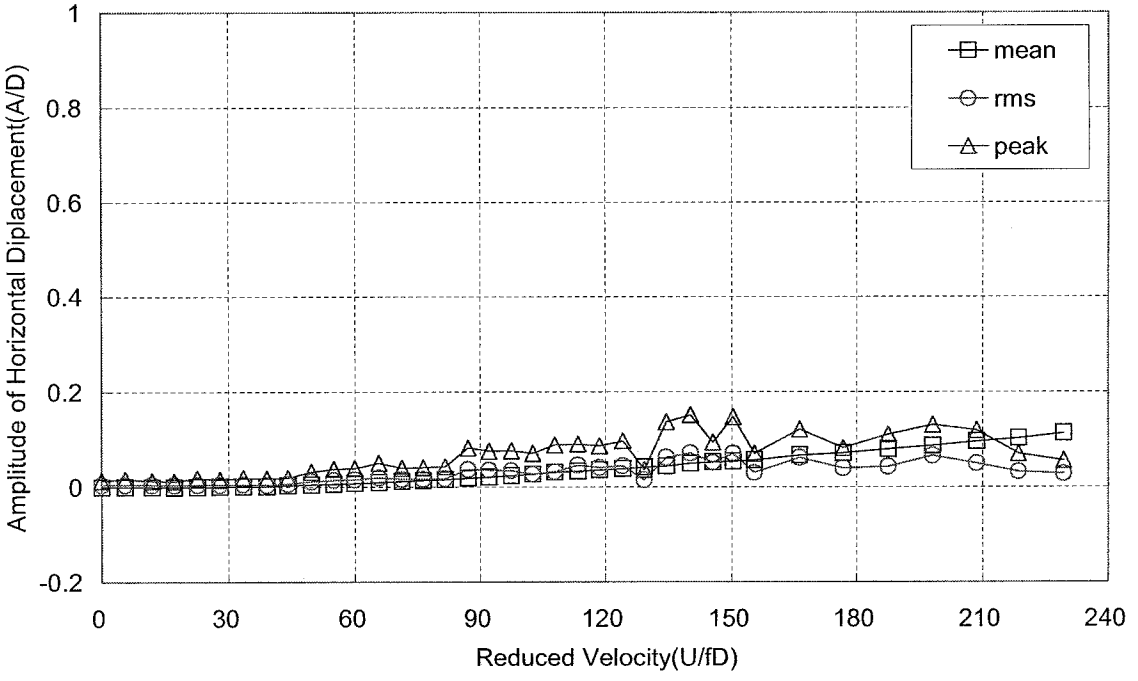


(a) 수평변위

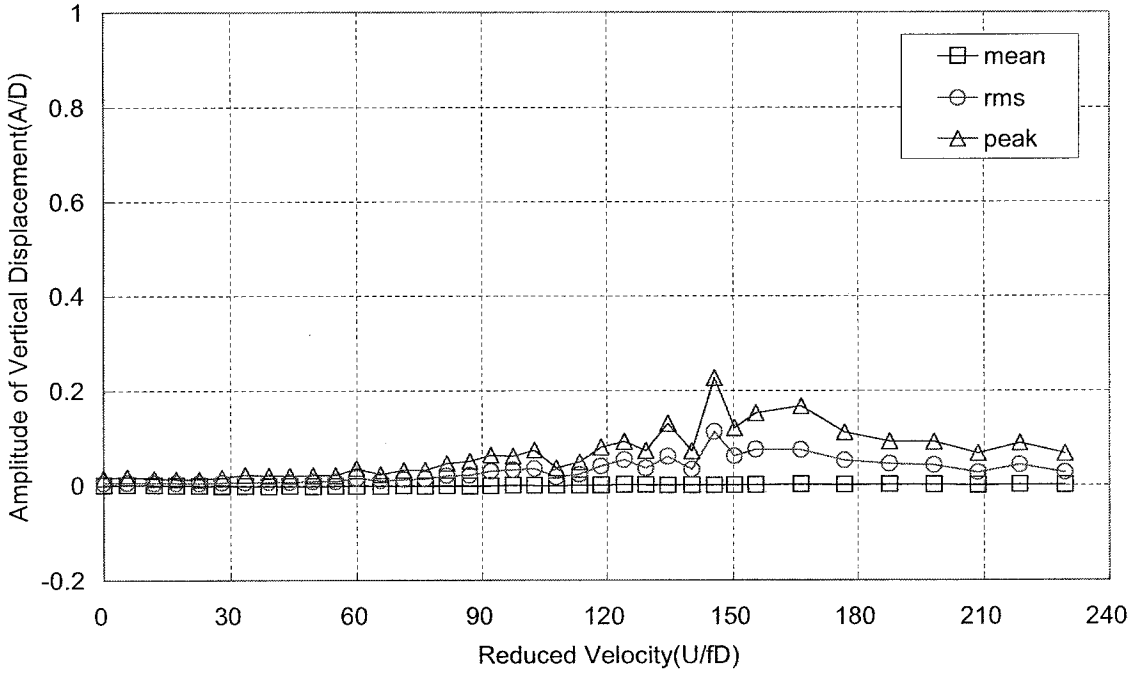


(b) 수직변위

그림 3.6.2.7. 병렬케이블(간격9D)의 내풍특성

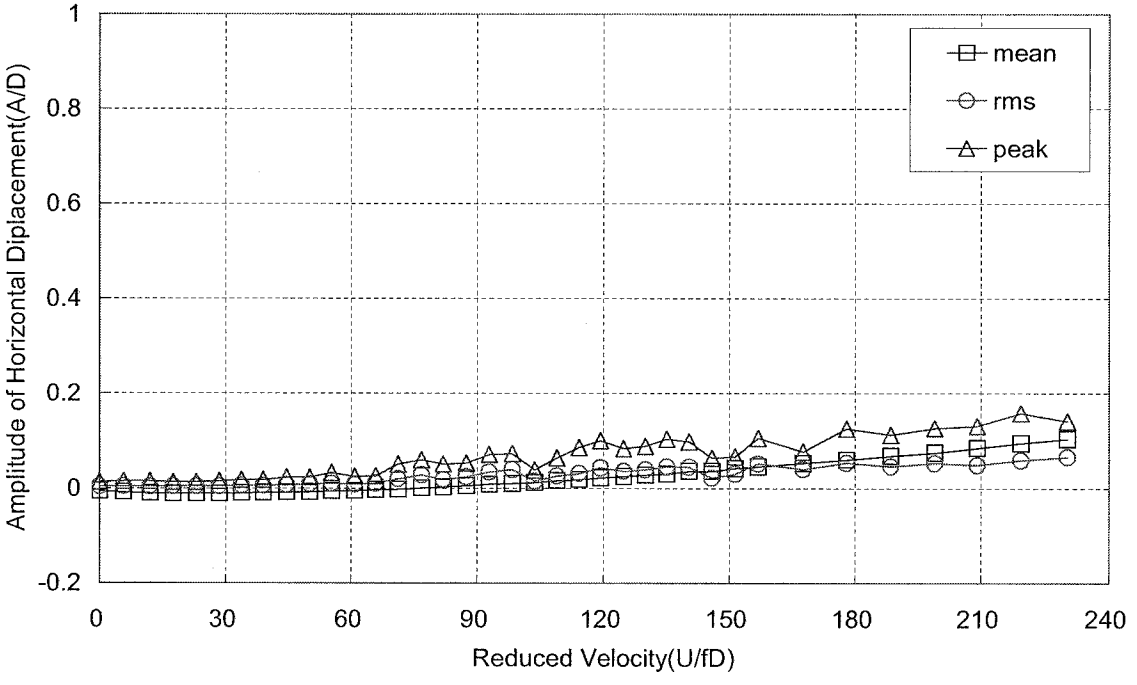


(a) 수평변위

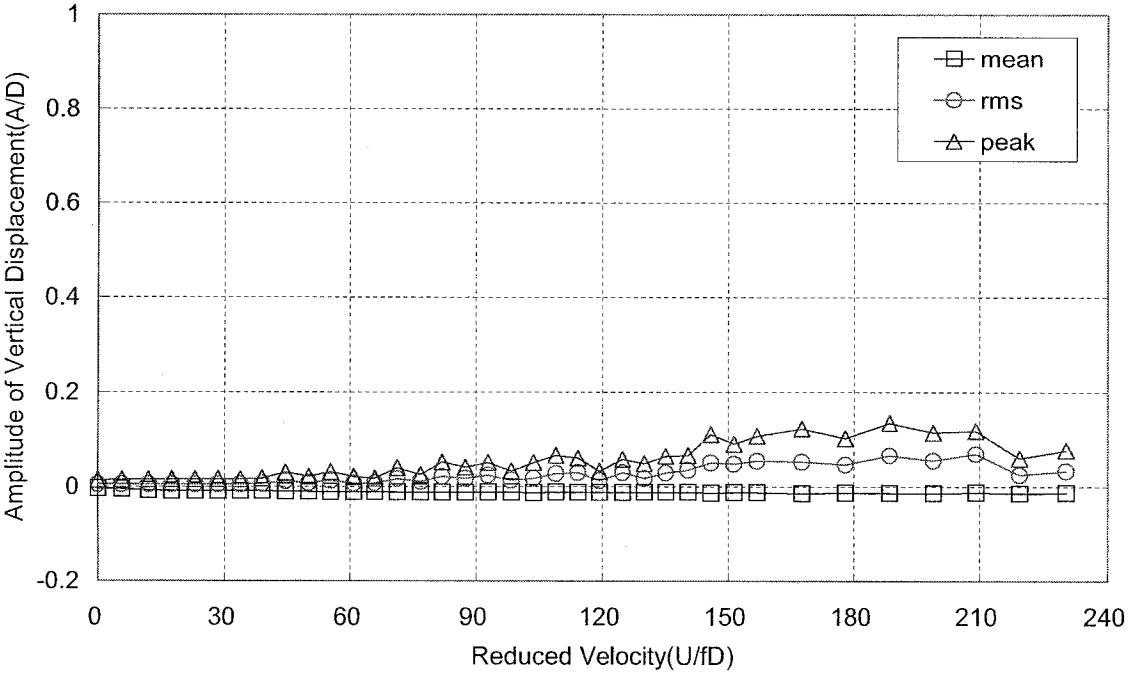


(b) 수직변위

그림 3.6.2.8. 병렬케이블(간격11D)의 내풍특성



(a) 수평변위



(b) 수직변위

그림 3.6.2.9. 병렬케이블(간격13D)의 내풍특성

6.3. 케이블 탄성체모형실험(Aeroelastic model test)

6.3.1. 풍동 및 측정기자재

본 실험에 사용된 풍동의 제원은 그림 3.6.3.1과 같은 대형 경계층풍동이며 실험에 사용된 측정기자재의 사양은 다음과 같다. 케이블 탄성체모형실험에 있어서 변위측정은 수평과 수직변위를 동시에 계측할 수 있는 광학식변위계를 실험모형의 1/2지점, 1/4지점, 1/8지점에 설치하여 고차모드의 진동을 계측할 수 있도록 하였다.

- **풍동의 제원**
  - 형　　식 : Eiffel type
  - 전　　장 : 36.825m
  - 측정부크기 : 8(W)m x 2.5(H)m x 23.2(L)m
  - 풍속 범위 : 0.3 - 11.5 m/s
  - 난류 강도 : 0.5% 이하
  - 풍속 편차 : 1.0% 미만
  - Turntable : 직경 = 3.0m, ± 250°회전, 전동식
  - Traverse : x-axis = 3m, y-axis = 3m, z-axis =1.35m, 전동식
  - 송 풍 기 : 직경 1.5m, 최대1200rpm (x3EA)
  - 모　　터 : AC motor, 132kw (x3EA)

- **측정기자재**
  - 다점풍속계 : 64점동시계측
  - 다점풍압계 : 256점동시계측
  - 3분력계 : drag, lift, pitching, 5kgf용, 2set
  - 5분력계 : drag, side, pitching, rolling, yawing, 5kgf용
  - 열선풍속계 : u, v, w-component 동시계측
  - 광학식변위계 : 6ch.(x, y-component 동시계측)
  - 레이저변위계 : 2ch.
  - Pen oscillograph : 4ch.
  - Dynamic apmlifier : 6ch.
  - Low pass filter : 6ch.
  - Digital manometer : 20.00mmH_2O, 2set
  - Signal Analyzer

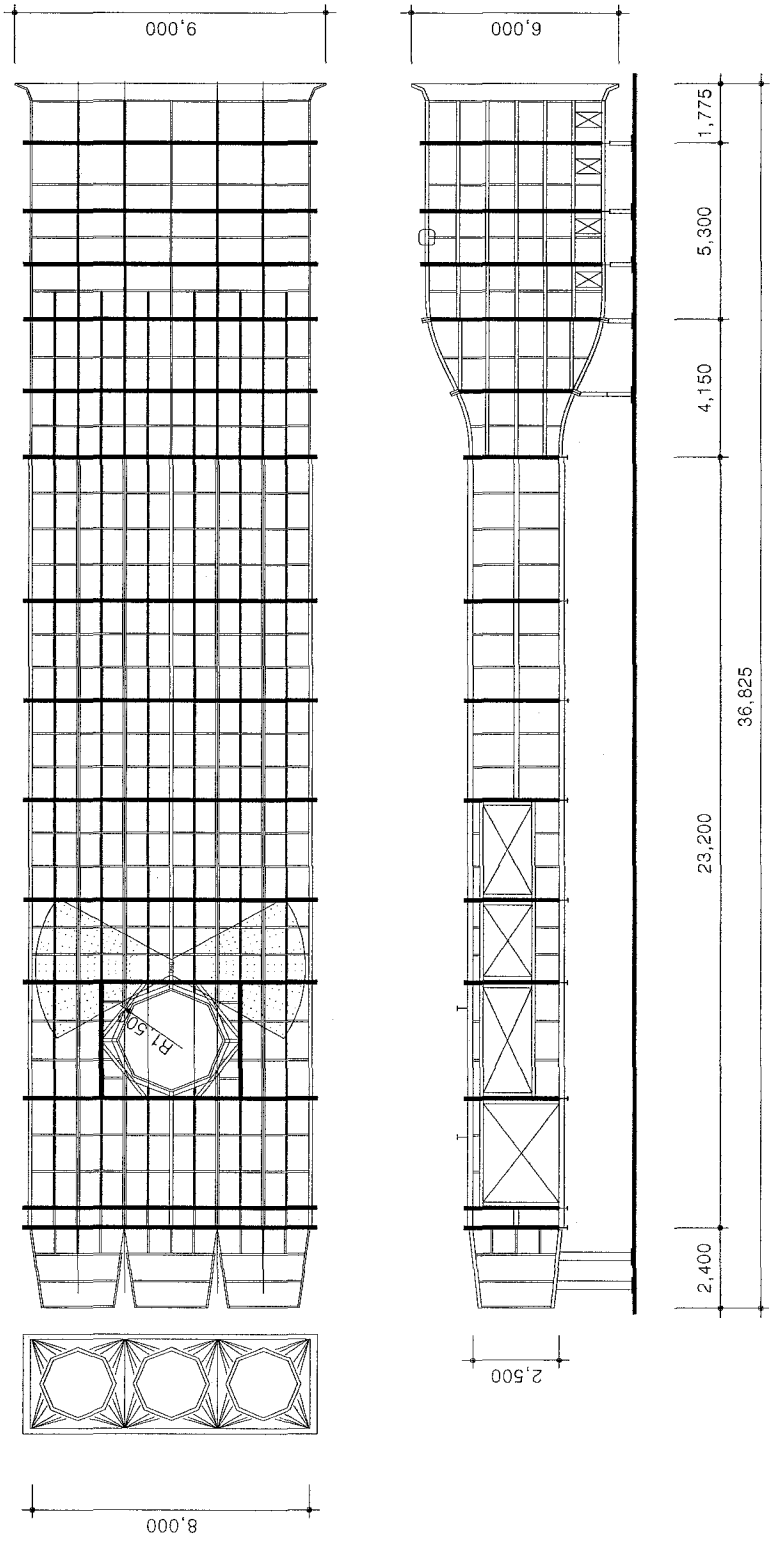


그림 3.6.3.1. 대형경계층풍동

6.3.2. 기류조건 및 모형

실험풍속은 무차원풍속(Ur = U/fD)으로 평가하였다. 강체모형실험과 달리 대형 경계층풍동에서 실험을 수행하였는데, 대형풍동의 경우 단면모형전용풍동에 비해 최대풍속이 1/2 정도로 낮아 웨이크갤로핑이 풍동풍속 내에서 충분히 발현하게 하기 위해서는 모형의 진동수를 낮추거나 Scruton수를 낮출 필요가 있었다. 모형의 진동수를 낮출 경우 탄성체모형의 경우 케이블의 sag가 커지므로 본 실험에서는 케이블 모형의 Scruton수를 낮추기로 하였다.

모형의 제원은 표 3.6.3.1과 같으며 상류측 및 하류측 모두 동일한 케이블모형을 사용하였다. 케이블 탄성체모형을 구현하기 위해 직경 2mm의 와이어를 이용하여 케이블의 강성을 모사하였고, 와이어에 직경 50mm, 길이 400mm의 아크릴 모형을 각각 16개씩 이용하여 케이블의 외형을 모사하였다. 모형의 제원은 표 3.6.2.1와 같으며 상류측 및 하류측 모두 동일한 케이블모형을 사용하였다. 웨이크갤로핑을 확실하게 발현시키기 위해 낮은 감쇠율과 단위질량을 적용하였으며 제작된 탄성체모형의 Scruton수는 강체모형의 1/18 정도로 가볍게 제작되었다. 케이블 양단은 케이블 간격의 조정이 용이하며 지점의 진동이 발생하지 않도록 큰 규모의 지지대를 설치하였고, 케이블 지지점에서 장력을 조절하여 케이블모형의 sag 및 고유진동수를 조정하였다. 케이블모형의 고유진동수는 무차원으로 평가되므로 임의로 결정하였다. 모형의 set-up은 그림 3.6.3.2와 같다. 탄성체모형의 경우 강체모형과 달리 수직방향의 sag가 있기 때문에 수직과 수평모드의 진동수가 다르게 된다. 따라서 실험풍속을 모형의 크기와 진동수로 무차원화한 풍속은 수직과 수평모드의 풍속이 다르게 되어, 수평모드의 경우 무차원풍속 0~100 범위에서 실험을 수행하였고, 수직모드의 경우 무차원풍속 0~70 범위에서 실험을 수행하였다.

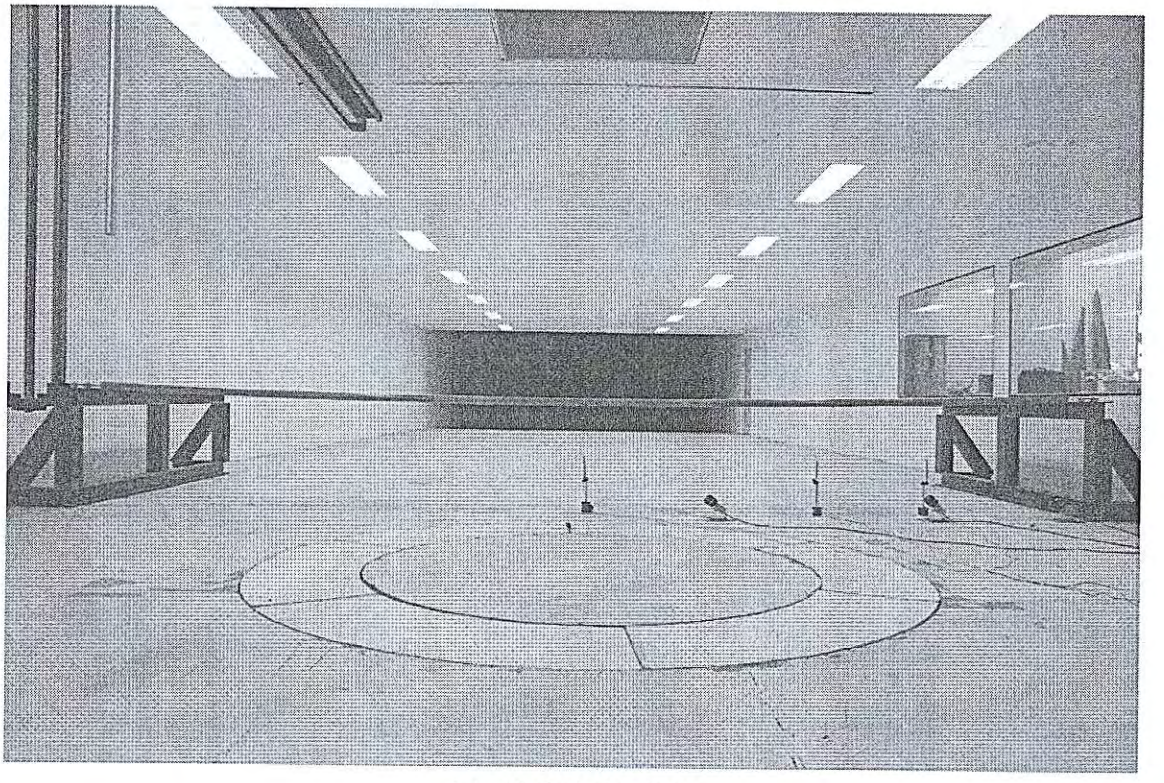
실험대상 기류의 경우, 케이블 진동의 특성을 보다 확실하게 파악하기 위하여 공기력진동과 버페팅진동의 구분이 용이한 등류조건에서 수행하였다.

표 3.6.3.1 모형의 제원

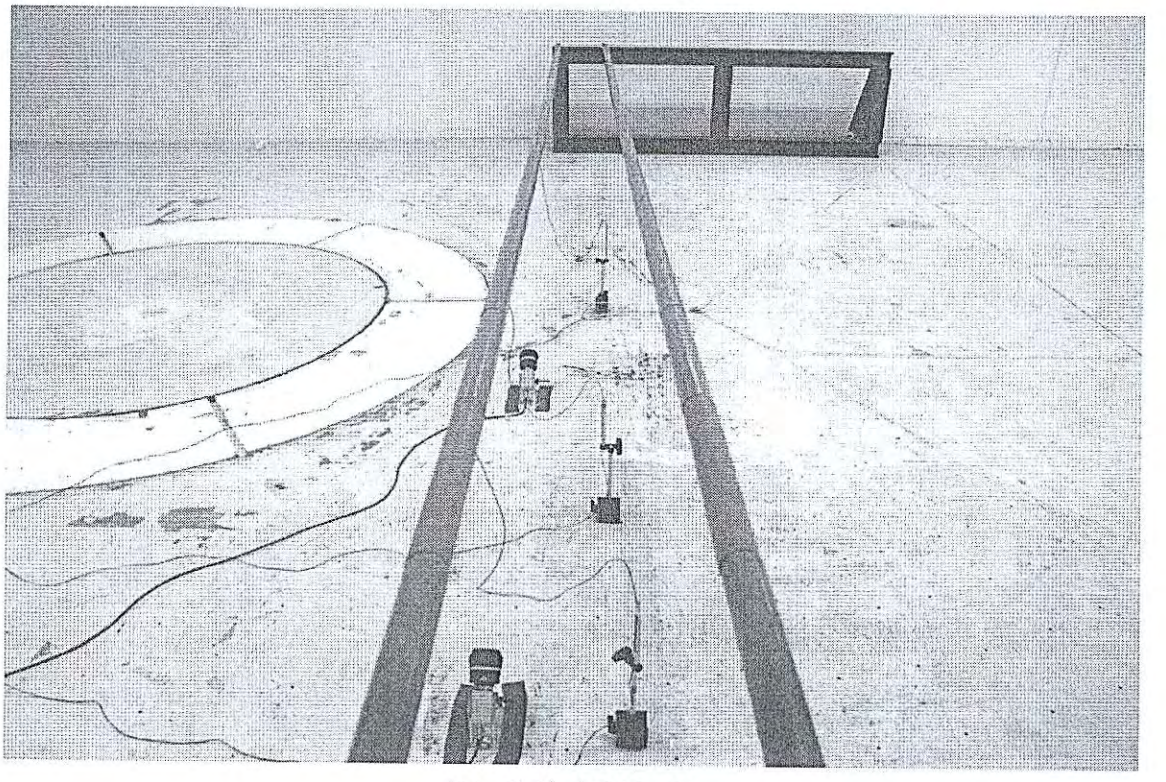
구분	길 이	단위중량	고유진동수	감쇠율(2.5mm)
PWS	6.56m	0.452kg/m	2.89Hz(수직) 2.08Hz(수평)	δ=0.006(수직) δ=0.005(수평)

- 케이블모형의 Scruton Number :

$$Sc = \frac{2 \cdot m \cdot \delta}{\rho \cdot D^2} = \frac{2 \cdot 0.452 \cdot 0.006}{1.225 \cdot 0.05^2} = 1.77$$



(a) 실험전경(정면)



(b) 실험전경(측면)

그림 3.6.3.2. 모형의 Set-up

6.3.3. 실험 Case

강체모형실험의 경우, 3D~13D까지 2D간격으로 진동실험을 수행하였는데 9D 이상에서는 웨이크갤로핑이 발생하지 않았기 때문에 탄성체모형실험에서는 3D~7D까지 2D간격으로 진동실험을 수행하였다. 케이블 간격의 정의 및 풍향의 정의는 그림 3.6.3.3과 같다.

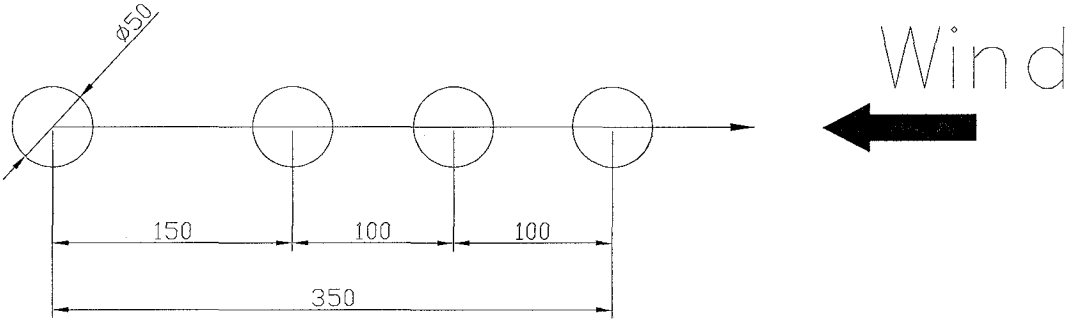


그림 3.6.3.3. 케이블간격 및 풍향

6.3.4. 실험결과

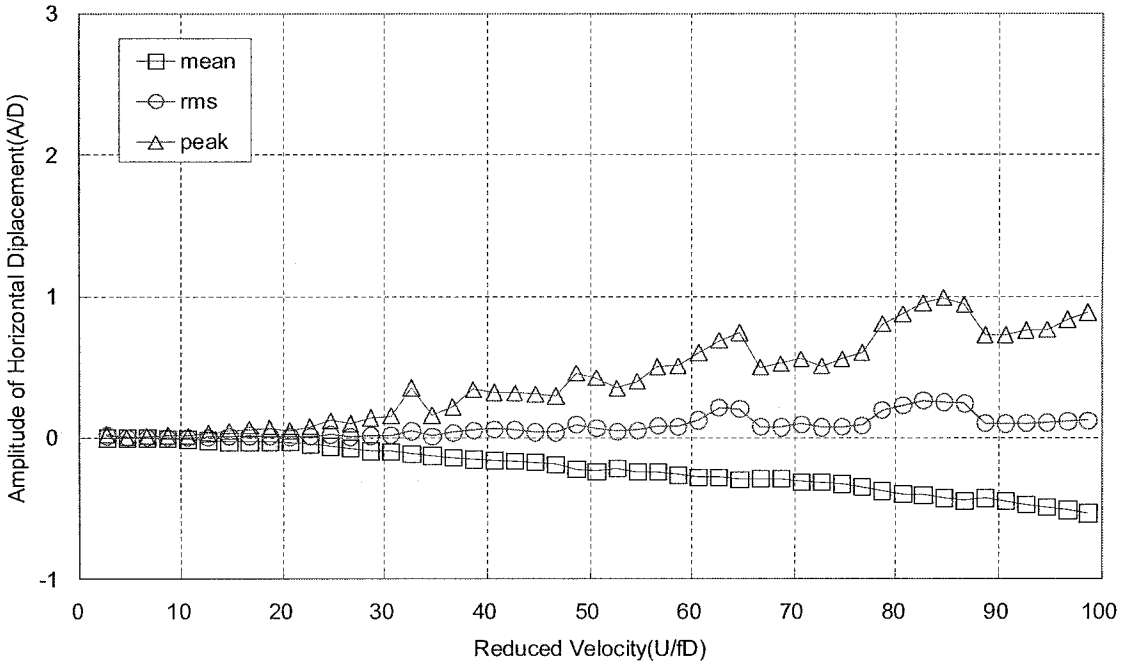
중심간격에 따른 병렬케이블의 실험결과(등류)를 그림 3.6.3.4부터 그림 3.6.3.6에 나타낸다.

실험결과에 의하면, 중심간격 3D의 경우 무차원풍속(Ur) 30 부근에서 웨이크갤로핑이 발생한다. 수직모드의 경우 2차모드의 진동이 지배적이기 때문에 1/2지점에서의 변위보다 1/4지점에서의 변위가 크게 발생하고, 수평모드의 경우 1차모드와 2차모드가 섞여 복잡한 거동을 한다.

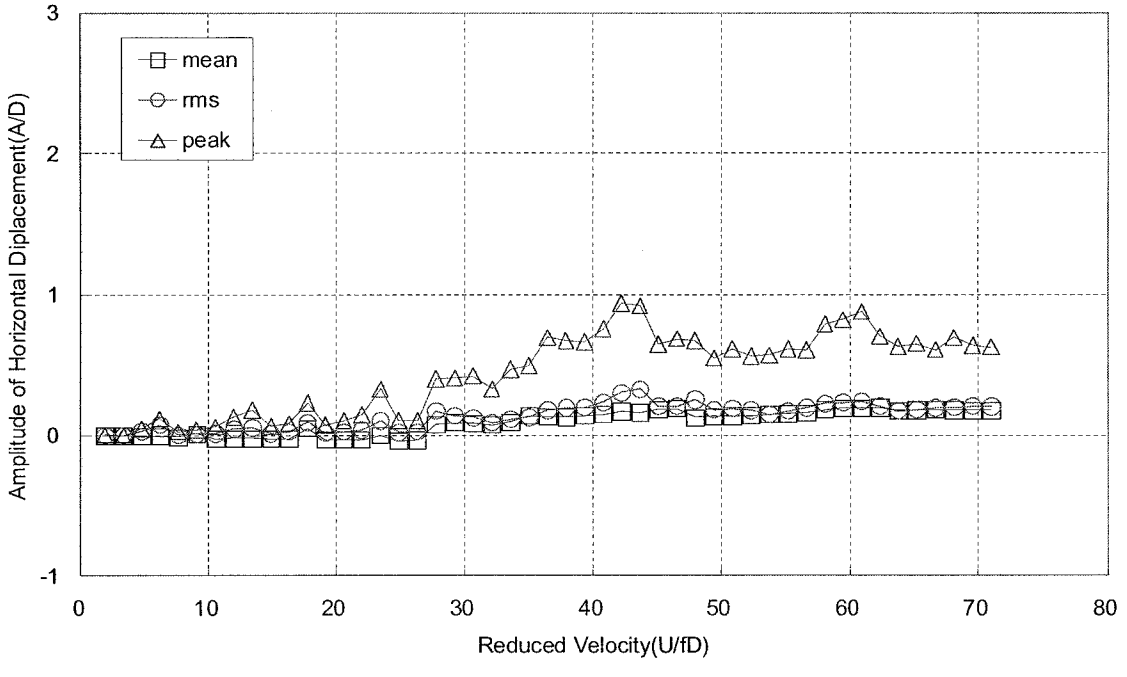
중심간격 5D의 경우, 무차원풍속 15 정도에서 진동이 발생하기 시작하며 무차원풍속 25 정도에서 수직 2차모드의 웨이크갤로핑이 확실히 발생한다. 3D의 경우와 마찬가지로 수직모드의 경우 2차모드로 진동이 발생하여 1/2지점에서의 변위보다 1/4지점에서의 변위가 크게 발생하고, 수평모드의 경우 1차모드와 2차모드가 섞여 복잡한 거동을 한다.

중심간격 7D의 경우, 무차원풍속 15 정도에서 진동이 발생하기 시작하지만, 케이블 간격이 좁을 때에 비해 웨이크갤로핑의 최대진폭은 감소함을 알 수 있다.

케이블 강체모형실험과 비교할 때 진동발생의 무차원풍속이 훨씬 낮아졌고, 최대진폭의 크기가 커졌음을 알 수 있다. 이는 케이블의 Scruton수를 의도적으로 낮게 했기 때문인 것으로 사료된다. 한편, 탄성체모형의 특성상 다양한 모드의 진동이 발생하여 풍속의 증가에 따라 저차모드의 와류진동이 고차모드의 와류진동으로 발전하고, 풍속이 더욱 높아지면 웨이크갤로핑이 발현하는 것을 볼 수 있다.

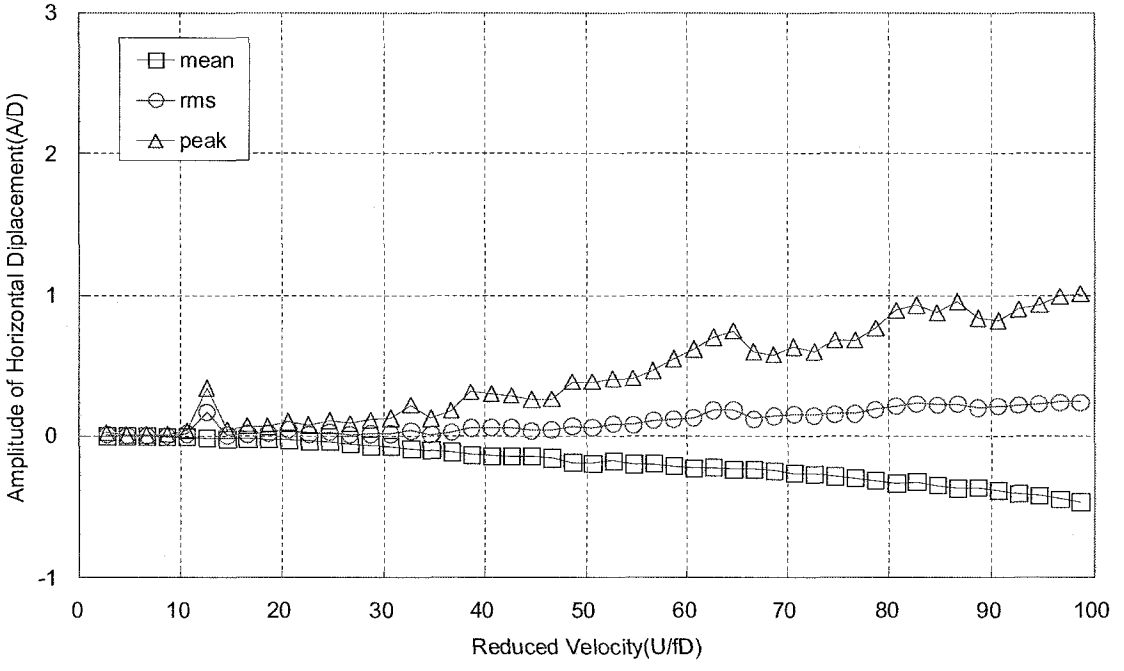


(a) 수평변위(1/2지점)

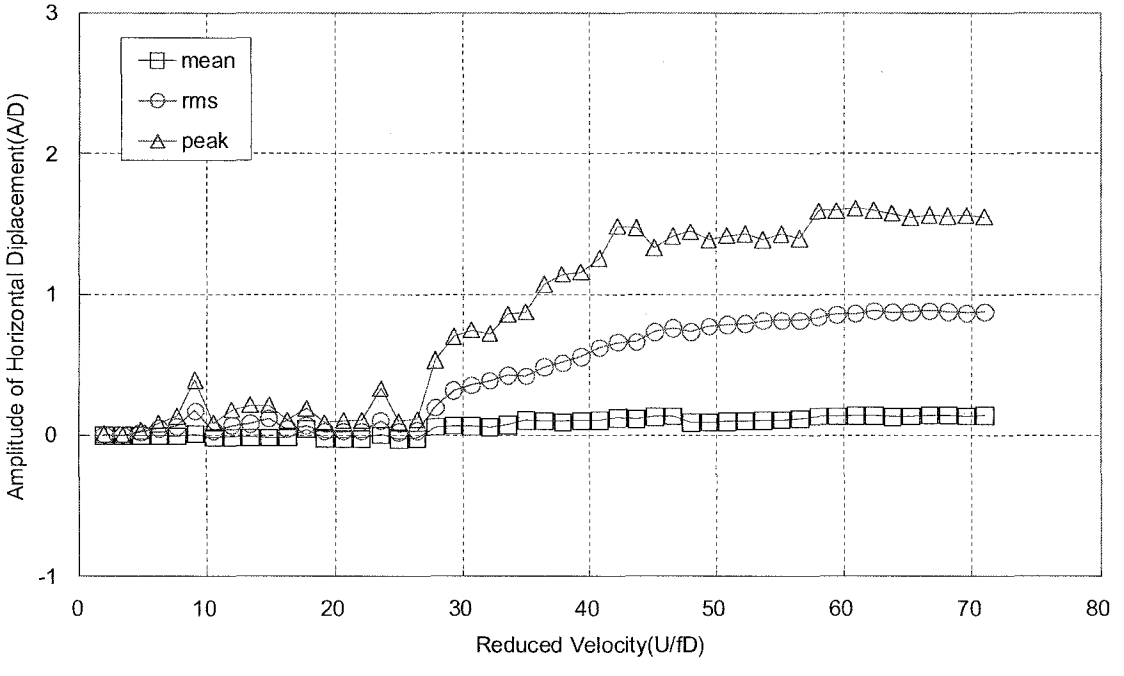


(b) 수직변위((1/2지점)

그림 3.6.3.4. 병렬케이블(간격3D)의 내풍특성 (1/3)



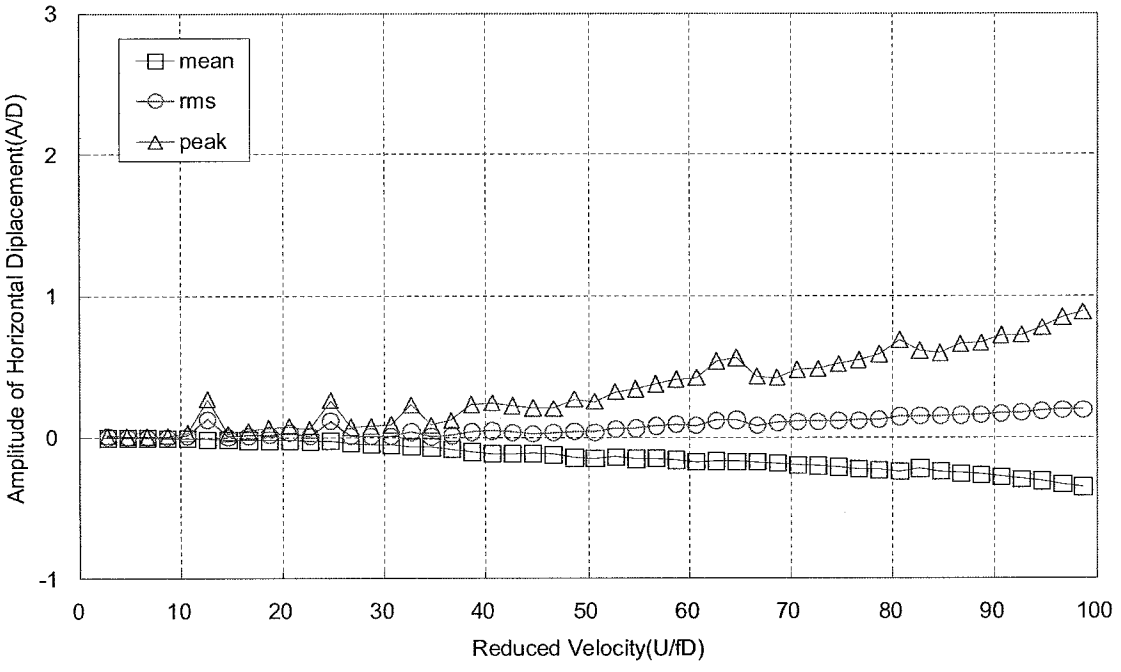
(c) 수평변위(1/4지점)

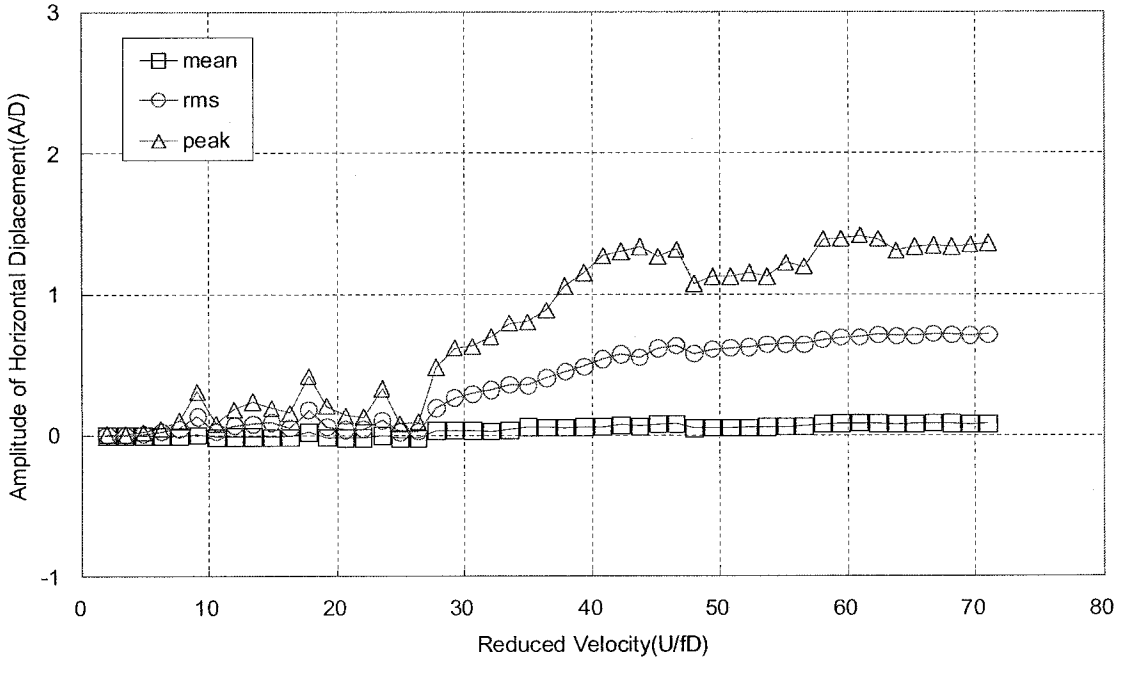


(d) 수직변위((1/4지점)

그림 3.6.3.4. 병렬케이블(간격3D)의 내풍특성 (2/3)

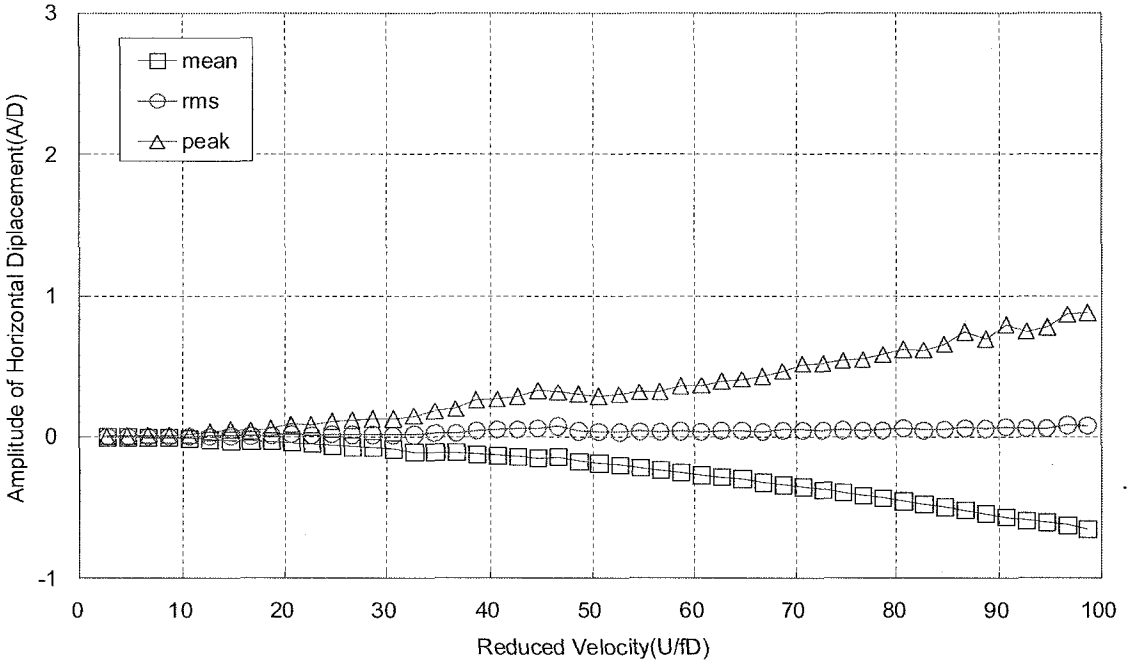
(e) 수평변위(1/8지점)



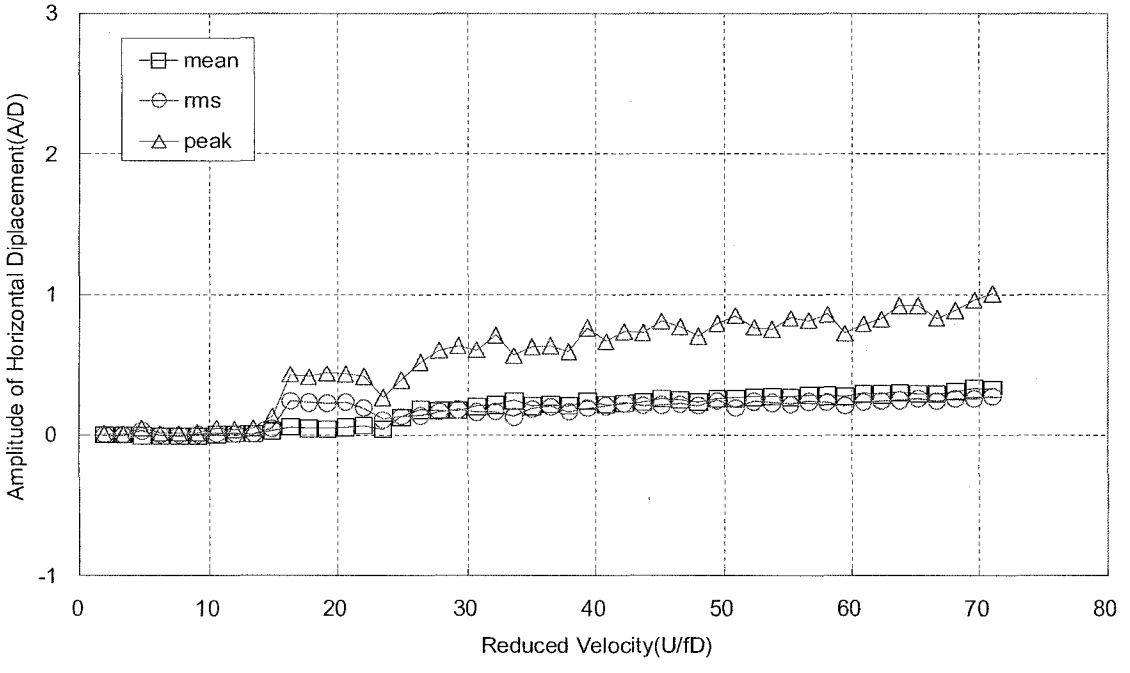


(f) 수직변위((1/8지점)

그림 3.6.3.4. 병렬케이블(간격3D)의 내풍특성 (3/3)

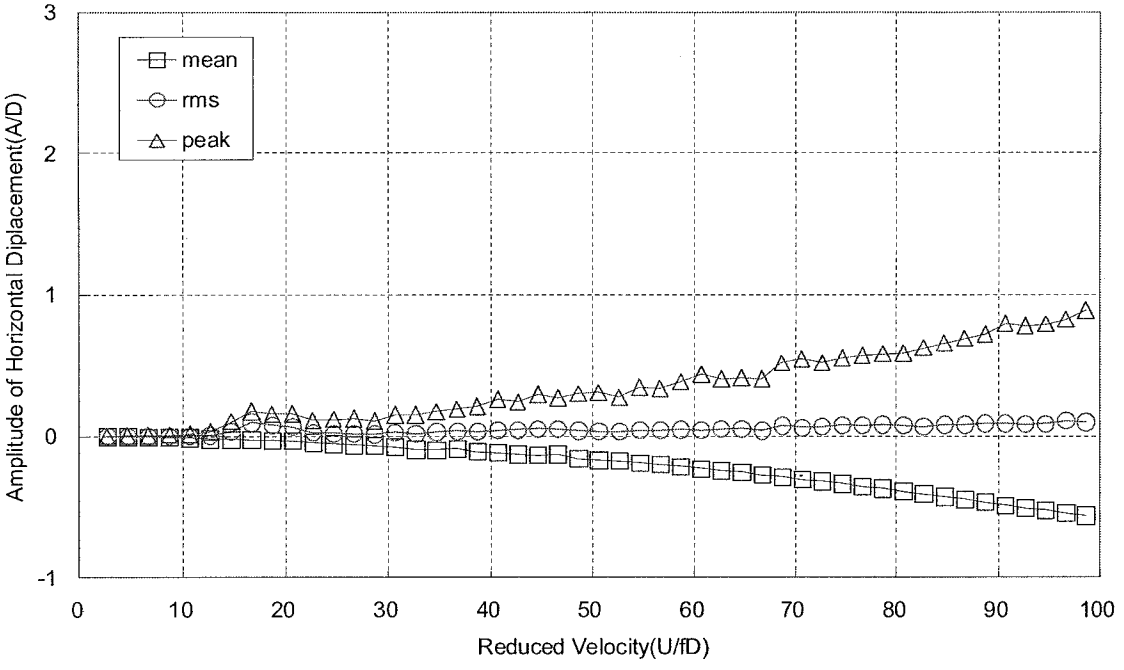


(a) 수평변위(1/2지점)

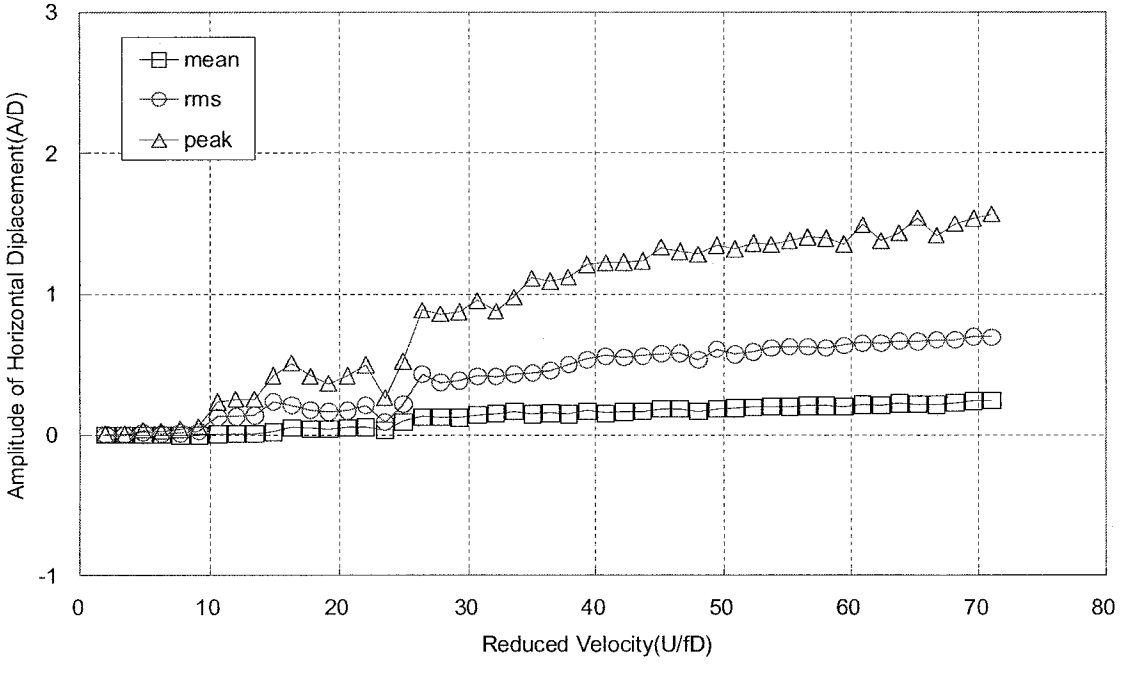


(b) 수직변위((1/2지점)

그림 3.6.3.5. 병렬케이블(간격5D)의 내풍특성 (1/3)

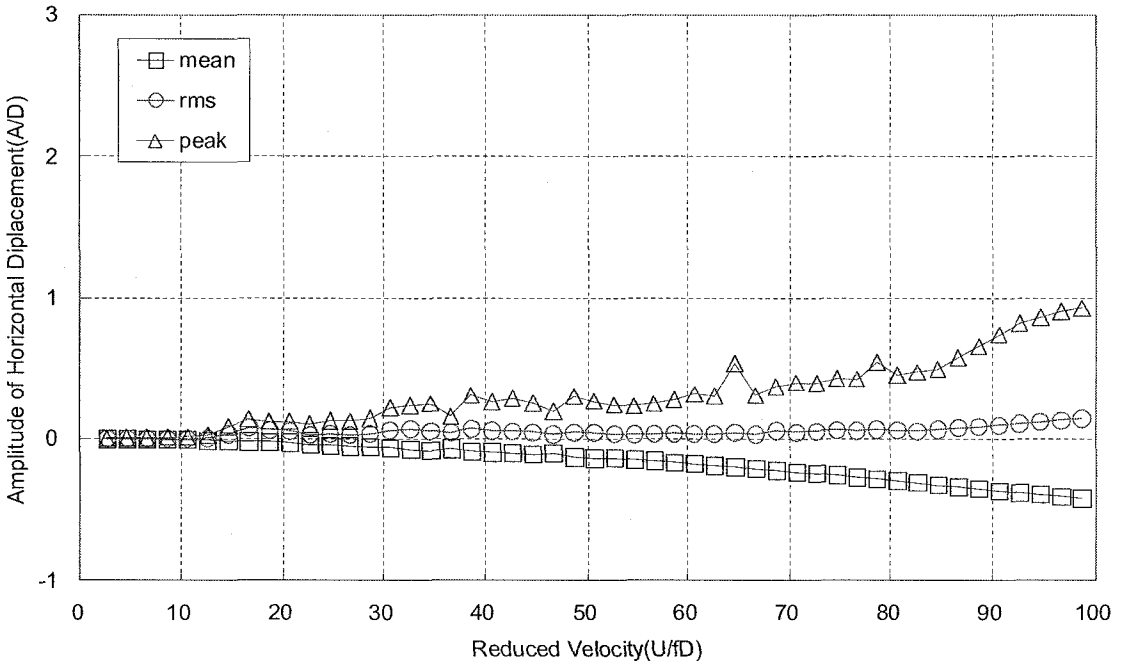


(c) 수평변위(1/4지점)

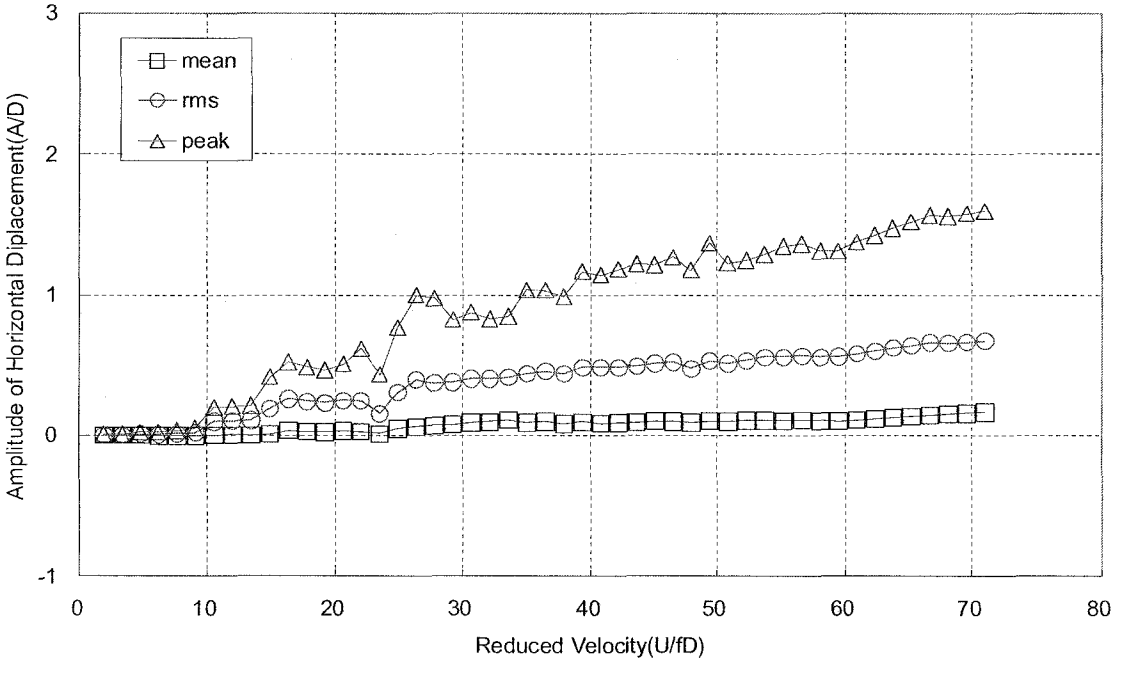


(d) 수직변위((1/4지점)

그림 3.6.3.5. 병렬케이블(간격5D)의 내풍특성 (2/3)

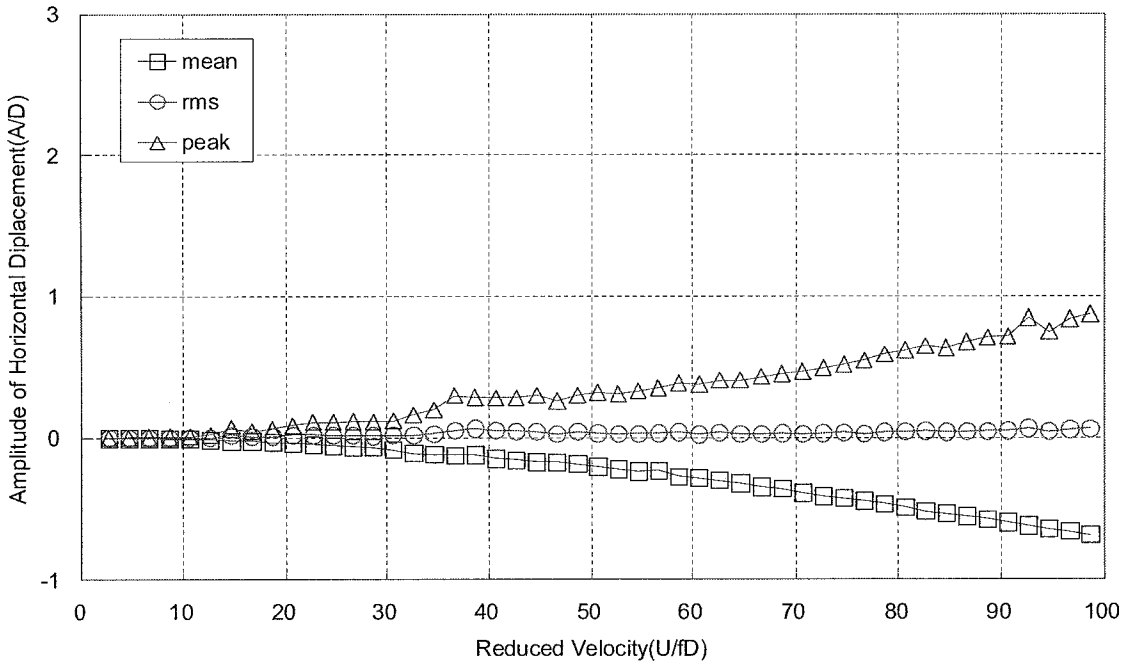


(e) 수평변위(1/8지점)

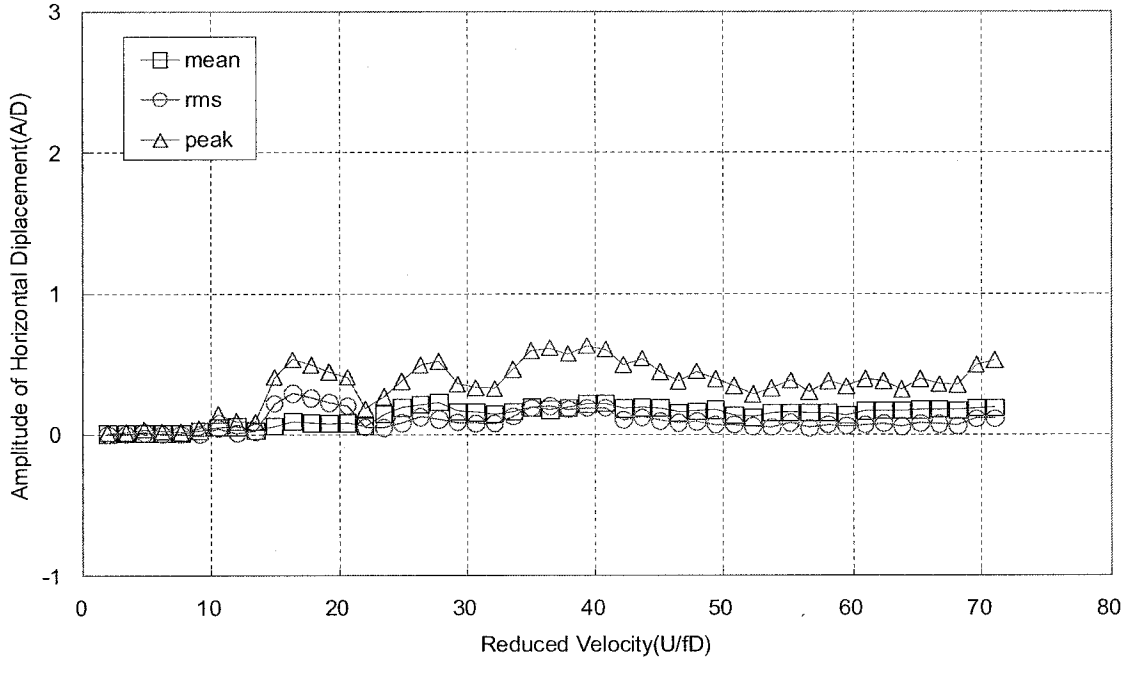


(f) 수직변위((1/8지점)

그림 3.6.3.5. 병렬케이블(간격5D)의 내풍특성 (3/3)

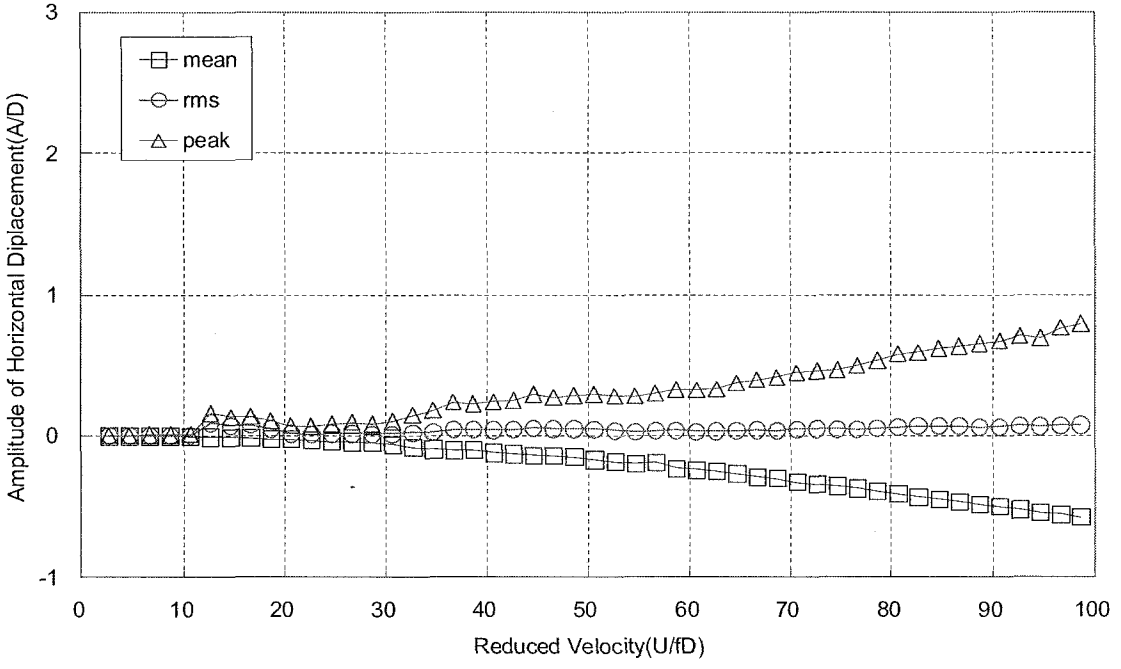


(a) 수평변위(1/2지점)

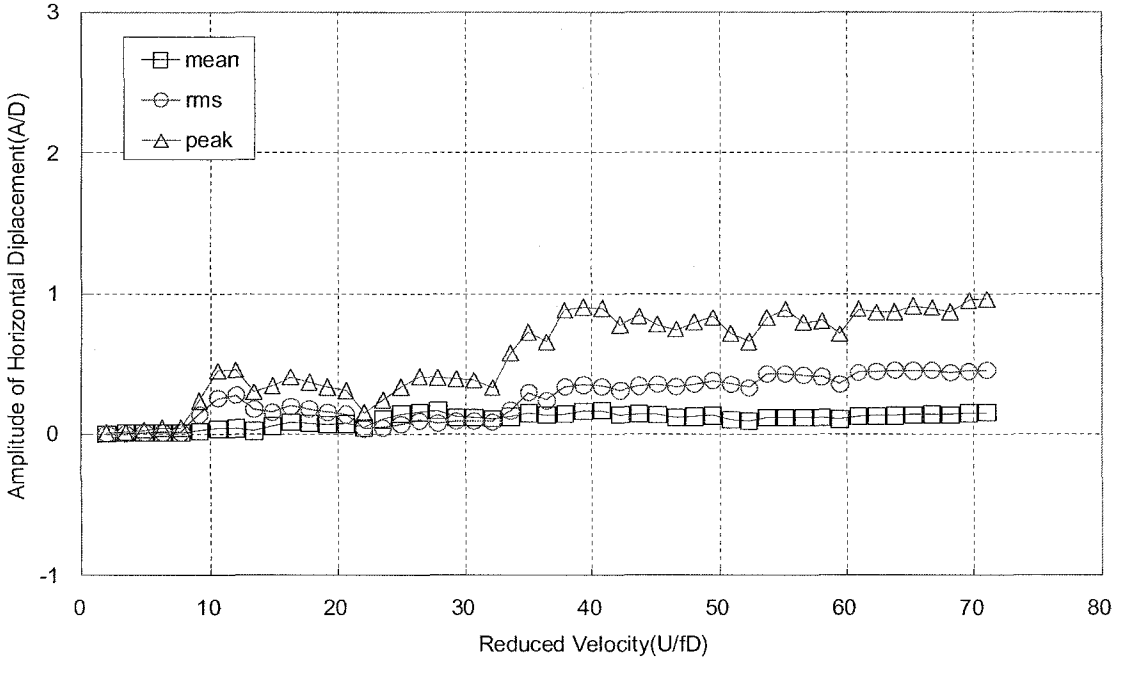


(b) 수직변위((1/2지점)

그림 3.6.3.6. 병렬케이블(간격7D)의 내풍특성 (1/3)

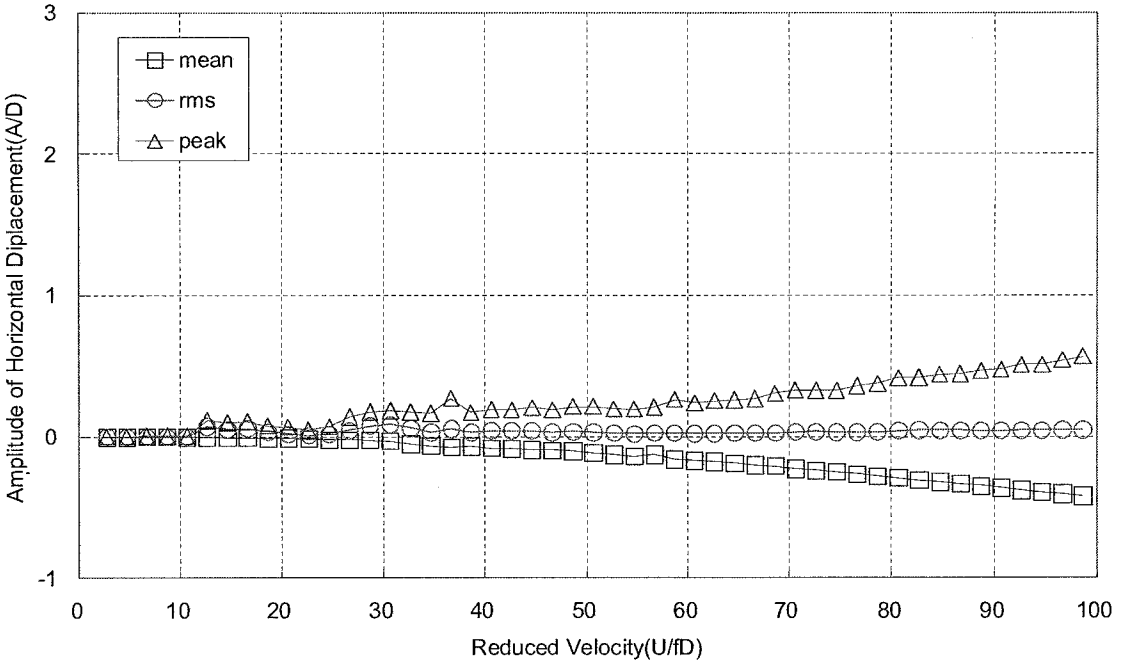


(c) 수평변위(1/4지점)

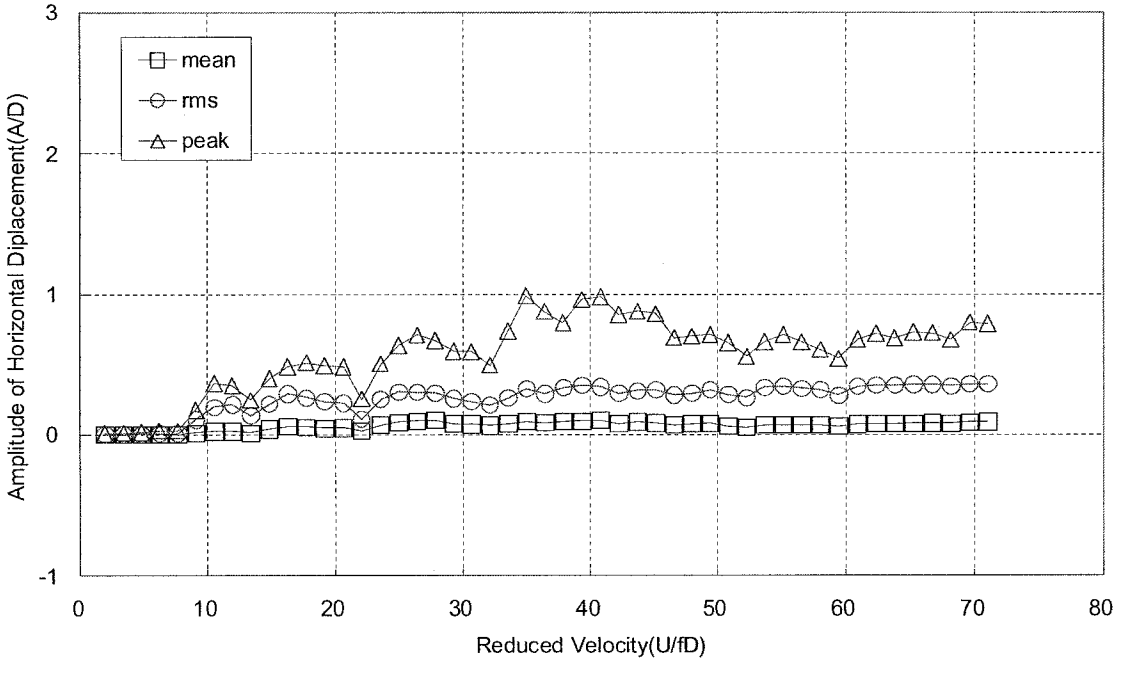


(d) 수직변위((1/4지점)

그림 3.6.3.6. 병렬케이블(간격7D)의 내풍특성 (2/3)



(e) 수평변위(1/8지점)



(f) 수직변위((1/8지점)

그림 3.6.3.6. 병렬케이블(간격7D)의 내풍특성 (3/3)

6.4. 스마트 제진장치를 이용한 케이블 제진실험

6.4.1. 개요

본 절에서는 풍진동에 대하여 시제품 제진장치의 적용성능 및 안정성을 평가하기 위하여 대형풍동실험시설을 이용하여 케이블 제진실험을 실시하였다. 먼저, 무풍(無風) 상태에서 케이블의 감쇠비를 측정하고, 스마트 제진장치를 설치한 후 스마트 제진장치의 입력 전압을 0에서 Max(12V)까지 조정하면서 케이블의 감쇠비 변화를 측정하였다. 다음으로 풍속을 최대 10m/s까지 2m/s 간격으로 증가시키면서 제진장치 적용전과 적용후 입력전압의 변화에 따른 케이블의 감쇠비를 동일한 방법으로 측정하였다. 이러한 방법으로 풍속 증가에 따른 스마트 제진장치의 입력전압의 최적값을 조사하고 최적의 전압이 제진장치에 입력될 수 있는 적절할 제어알고리즘을 찾고 제진장치가 풍진동(주로 웨이크갤로핑)에 대해서도 효율적으로 또한 안정적으로 작동할 수 있는지를 파악하는 것을 실험의 목적으로 하였다.

6.4.2. 실험방법 및 조건

① 대상 케이블

실험에 사용한 케이블은 6.3절에서 사용한 내풍특성을 파악하기 위하여 사용한 케이블 탄성체모형이다. 탄성체 모형실험에서는 케이블의 sag로 인하여 수직 및 수평진동수의 차이가 컸던 점을 고려하여 제진실험에서는 케이블의 장력을 증가시켜 케이블의 sag를 줄였고, 이로 인해 수직 및 수평모드의 1차 고유진동수가 3.13~3.23Hz로 높아졌고, 수직 및 수평모드의 진동수 차이가 크게 감소하였다.

표 3.6.4.1 모형의 제원

구분	길 이	단위중량	고유진동수	감쇠율(2.5mm)
PWS	6.56m	0.452kg/m	3.23Hz(수직) 3.13Hz(수평)	δ=0.013(수직) δ=0.006(수평)

- 케이블모형의 Scruton Number :

$$Sc = \frac{2 \cdot m \cdot \delta}{\rho \cdot D^2} = \frac{2 \cdot 0.452 \cdot 0.013}{1.225 \cdot 0.05^2} = 3.84$$

② 스마트 제진장치

실험에 사용한 스마트 제진장치는 미국 Lord Corporation에서 제작한 MR 감쇠기 (모델명: RD-1097-01)이다 (그림 3.6.4.2 참조). 1개의 감쇠기를 케이블 1/8 지점

에 그림 3.6.4.4과 같이 케이블의 수직모드를 제어하는 방향으로 설치하였다. 케이블의 수평모드에 대해서는 감쇠기의 축이 자유롭게 회전할 수 있도록 하여 본 실험에서는 수평모드는 제어하지 않는 것으로 하였다. 감쇠기의 용량은 $\pm 100N$ 이다. 감쇠기의 입력전압을 컴퓨터를 사용하여 제어하였는데, 그림 3.6.4.3와 같이 컴퓨터에서 출력전압이 MR 감쇠기 전용 증폭기를 거쳐 MR 감쇠기의 입력전압으로 작용하도록 시스템을 구성하였다. 컴퓨터의 출력전압과 MR 감쇠기 전용 증폭기를 통과한 후 MR 감쇠기의 입력전압과의 관계는 표 3.6.4.2 및 그림 3.6.4.1과 같이 약간의 비선형성이 있음을 확인하였다.

표 3.6.4.2 PC 출력전압과 MR 감쇠기 입력전압

PC 출력전압 (Volt)	0.73	0.89	1.02	1.15	1.26	1.37	1.47	1.56	1.65	1.73
MR 감쇠기 입력전압 (Volt)	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00	8.00	9.00	10.0

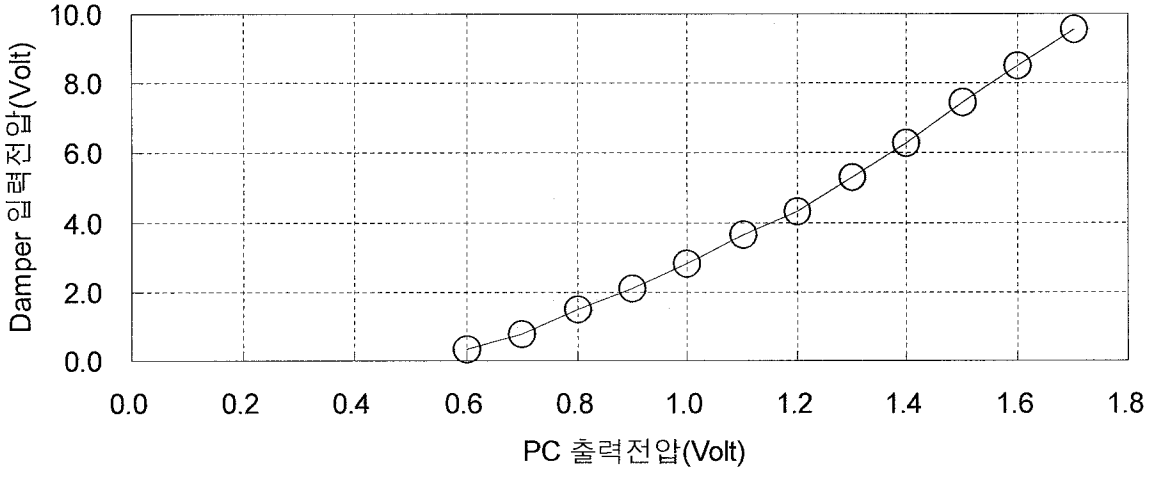


그림 3.6.4.1 PC 출력전압과 MR 감쇠기 입력전압

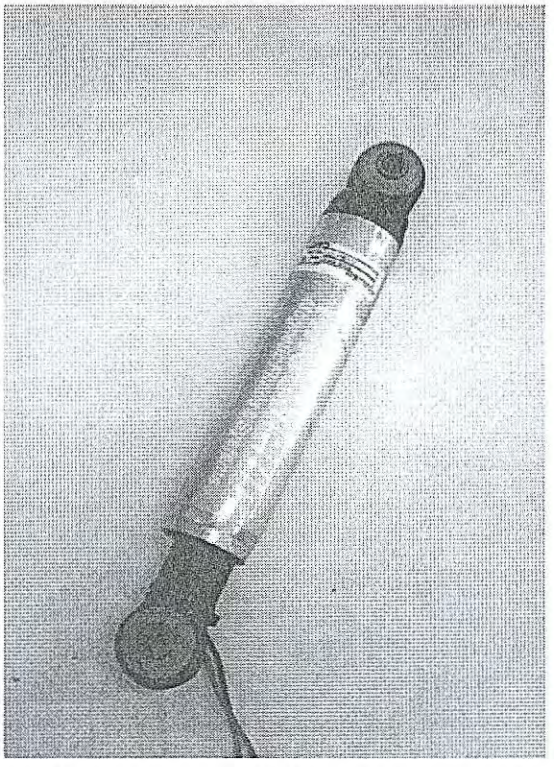


그림 3.6.4.2 MR 감쇠기 (RD-1097-01)

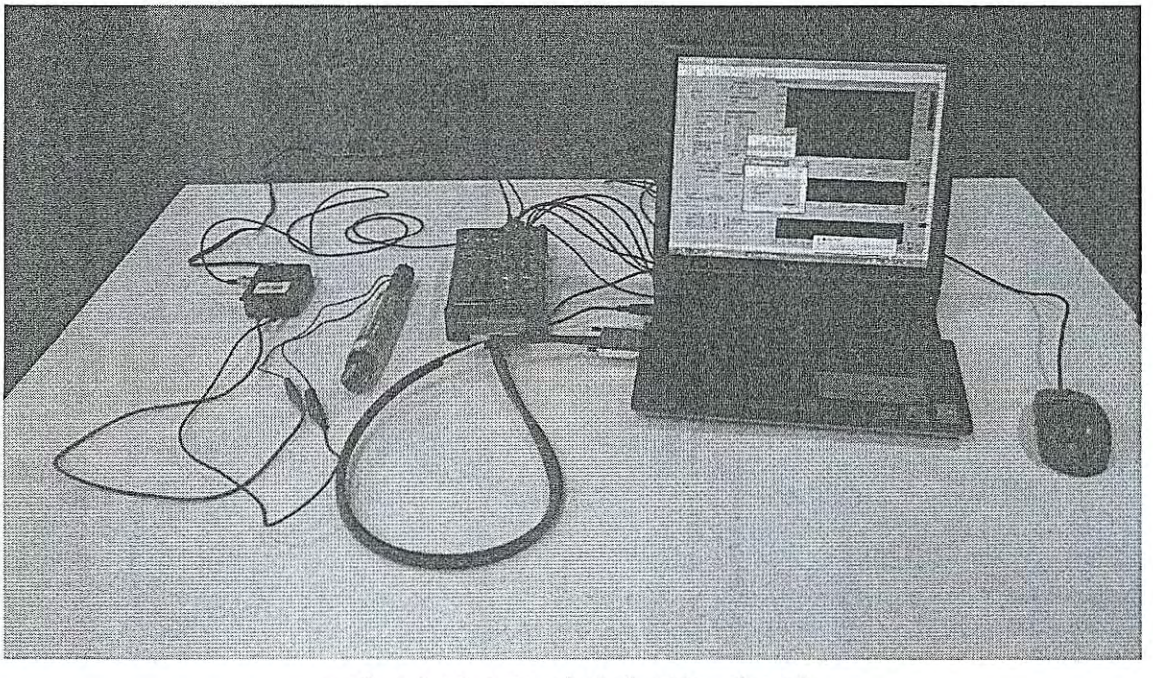


그림 3.6.4.3 MR 감쇠기 구동 시스템

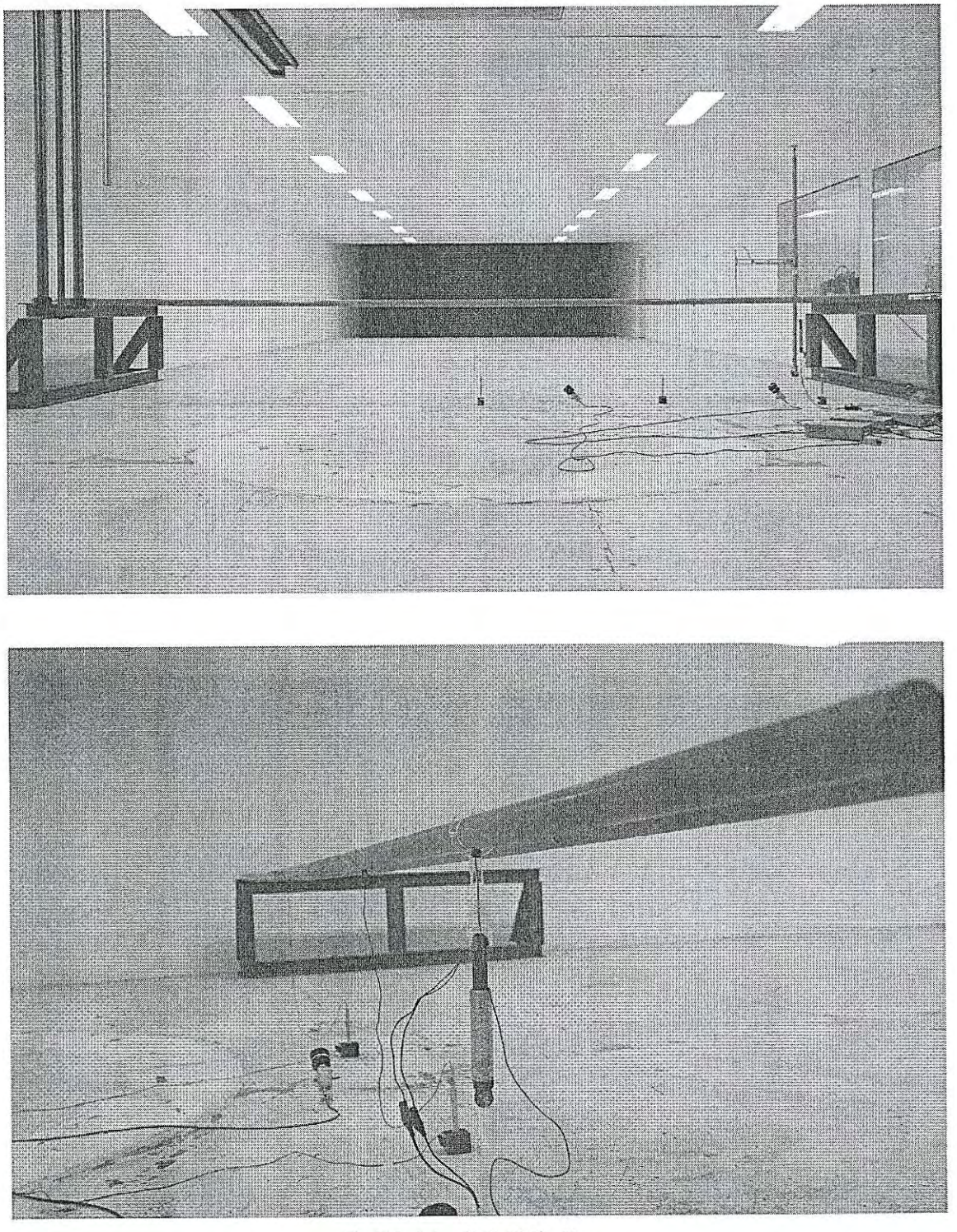


그림 3.6.4.4 제진실험 Set-up

6.4.3. 강제진동 실험결과

각 풍속별 감쇠비가 최대가 되는 스마트 제진장치의 입력전압을 확인하기 위해

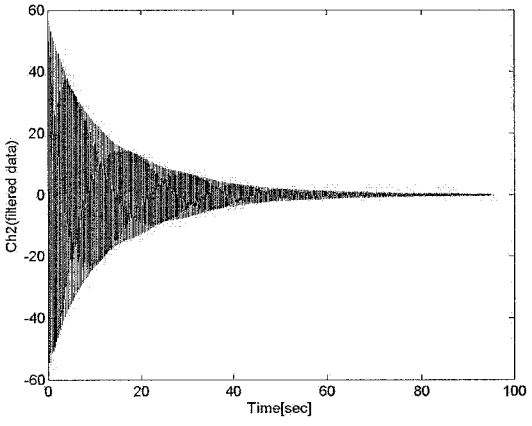
풍속을 0m/s(無風)에서 10m/s까지 2m/s 간격으로 증가시키면서 제진장치 적용전과 적용후 입력전압의 변화에 따른 케이블의 감쇠비를 계측하였다. 각 Case별로 케이블 1/2지점에서의 자연감소응답을 그림 3.6.4.5~3.6.4.10에 나타내고, 진동응답의 진폭별 감쇠비를 그림 3.6.4.11에 나타내었다. 그림 3.6.4.11에서 풍속이 증가함에 따라 감쇠가 표시되지 않은 경우가 있는데, 이것은 그 진폭에서 감쇠가 '-'임을 의미한다. 자연상태에서 기계적 감쇠(Mechanical Damping)은 음수가 될 수 없지만, 바람이 구조물에 작용할 때 생기는 공기역학적 감쇠(Aerodynamic Damping)은 음수가 될 수 있고, 바람을 받는 구조물의 감쇠는 Mechanical Damping과 Aerodynamic Damping의 합이기 때문에 공기역학적 부감쇠(Aerodynamic Negative Damping)가 커질 경우 풍진동이 발생하게 된다. 한편 기계적 감쇠 및 공기역학적 감쇠 모두 진폭의존성이 있기 때문에 공기역학적 부감쇠가 커져 풍진동이 발생하더라도 진폭이 무한대로 커지지는 않고 기계적 감쇠와 공기역학적 부감쇠가 평형을 이루는 진폭으로 수렴하게 된다.

먼저 무풍시(v=0m/s)의 감쇠비를 비교하면, 제진장치를 부착하기 전 케이블의 감쇠비는 진폭에 따라 0.24%(진폭 2.5mm)에서 0.35%(진폭 20mm)정도로 나타났다. 제진장치를 부착한 후 0V에서 12V사이에서 스마트 제진장치의 입력전압을 변화시켜가며 케이블의 감쇠비를 측정한 결과 모든 진폭에서 0V에서 감쇠비가 최대인 것으로 나타났다.

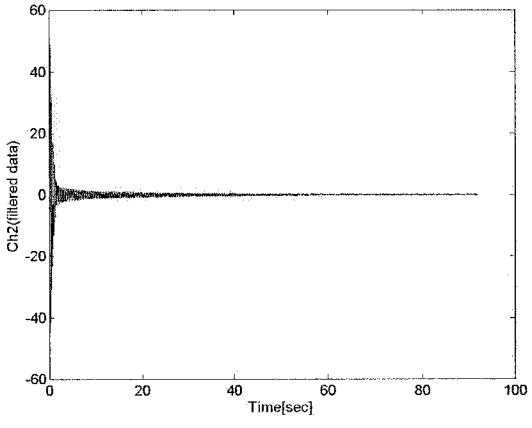
풍속이 2m/s로 증가할 경우 감쇠특성은 별다른 차이를 보이지 않지만, 풍속이 4m/s로 증가할 경우 제진장치를 부착하지 않은 케이블에서 공기력진동이 발생하여 진폭 2.5~20mm 범위에서는 감쇠비가 '-'로 나타났다. 제진장치를 부착한 케이블의 경우 상당한 제진효과가 보이고 있으며 입력전압이 작을수록 좋은 제진성능을 보였다. 입력전압이 4V일 경우 진폭 2.5~5mm 범위에서는 감쇠비가 '-'로 나타났고, 입력전압이 5~12V일 경우 공기력진동이 발생하지는 않지만 감쇠비가 무풍시에 비해 작아졌음을 알 수 있다.

풍속이 6m/s로 증가할 경우 제진장치의 입력전압이 0V 및 1V일 경우를 제외한 모든 경우에 공기력진동(웨이크갤로핑)이 발생하였고, 풍속이 8m/s로 증가할 경우 입력전압이 0V 인 경우를 제외한 모든 경우에 공기력진동(웨이크갤로핑)이 발생하였다. 풍속이 10m/s로 증가할 경우 입력전압이 0V 인 경우를 포함하여 모든 실험대상 케이블에서 공기력진동(웨이크갤로핑)이 발생하였다.

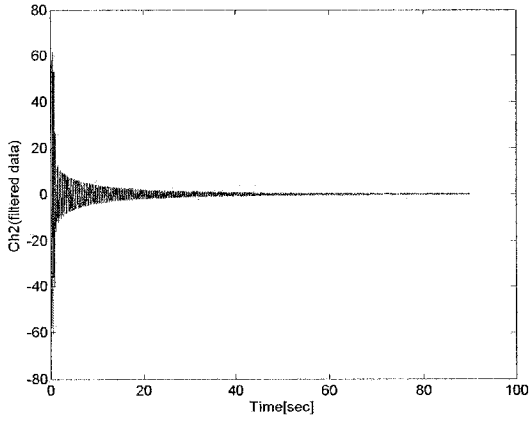
이상의 실험결과로부터 모든 풍속범위에서 제진성능이 가장 뛰어난 것은 입력전압이 0V(Passive-off) 상태인 것으로 나타났다.



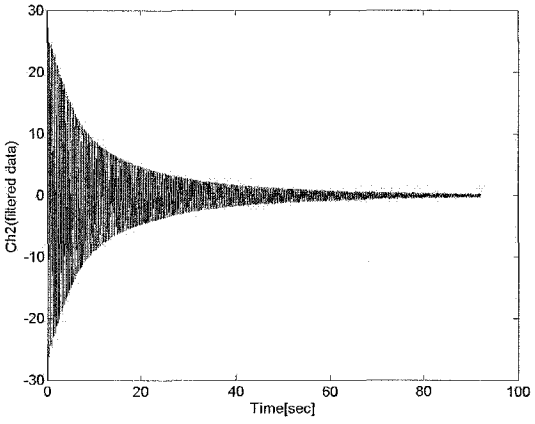
without MR-Damper



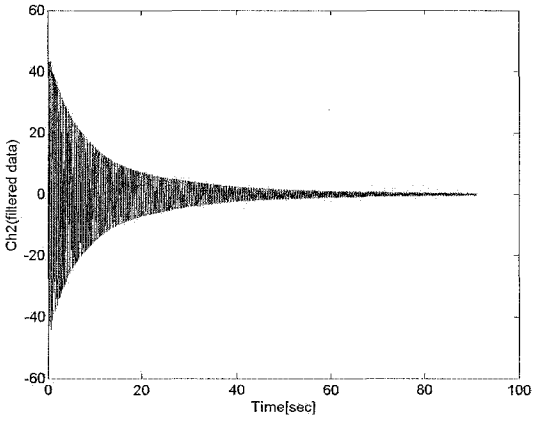
MR-Damper 0V



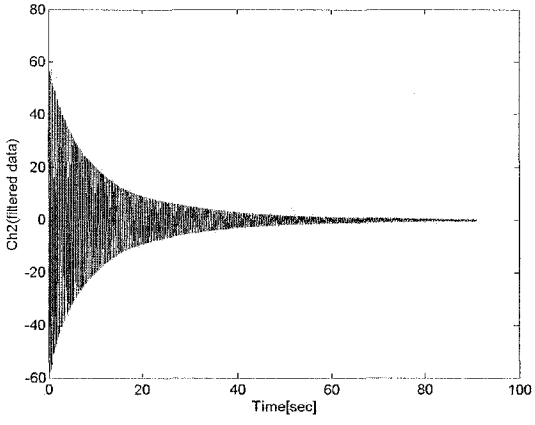
MR-Damper 1V



MR-Damper 2V

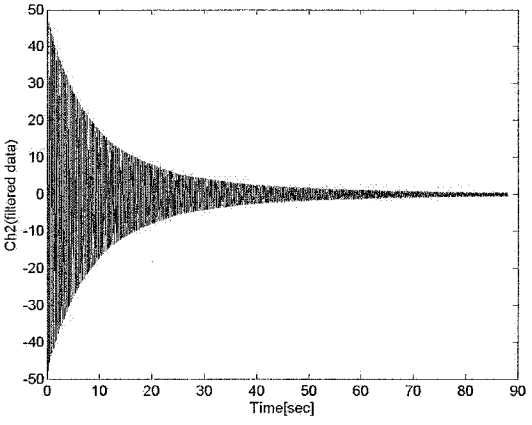


MR-Damper 3V

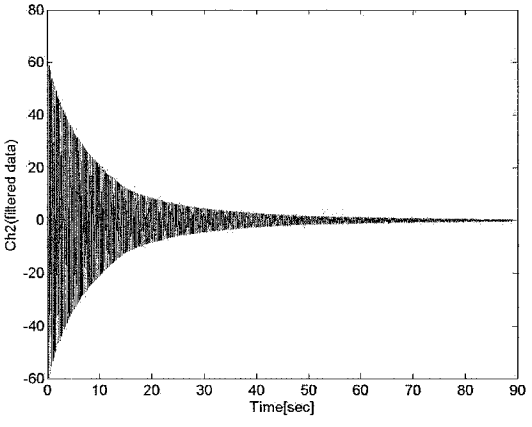


MR-Damper 4V

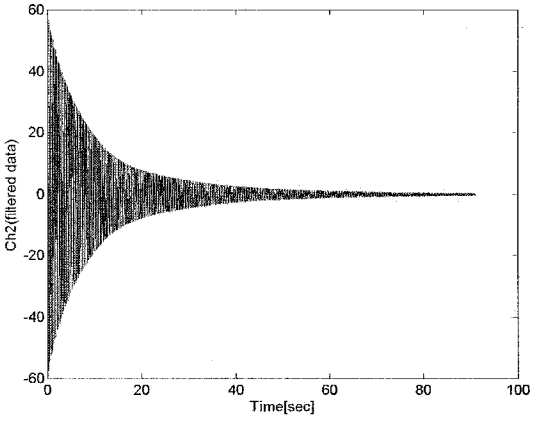
그림 3.6.4.5(a) 풍속 0m/s에서 Damper 입력전압별 자연감소응답



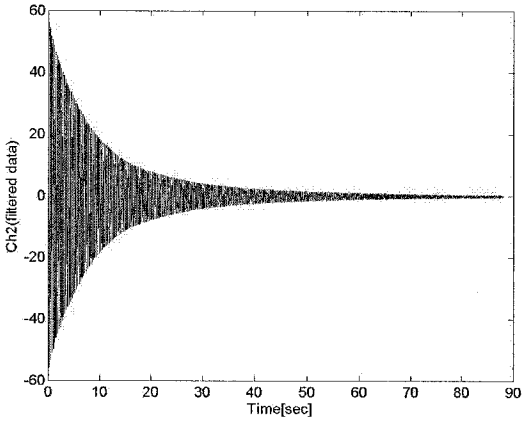
MR-Damper 5V



MR-Damper 8V

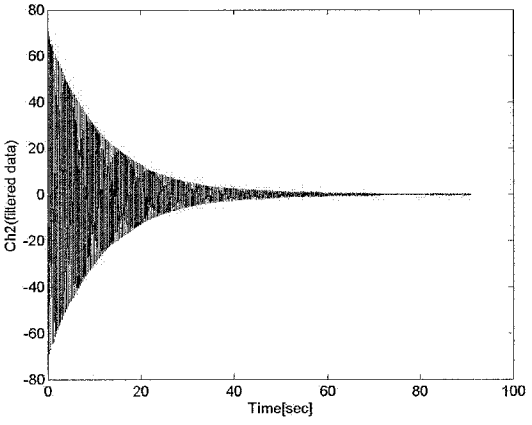


MR-Damper 10V

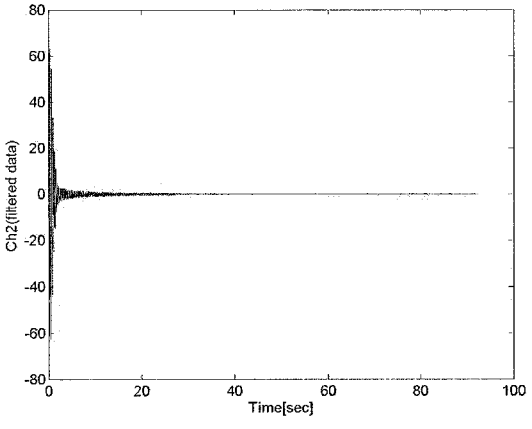


MR-Damper 12V

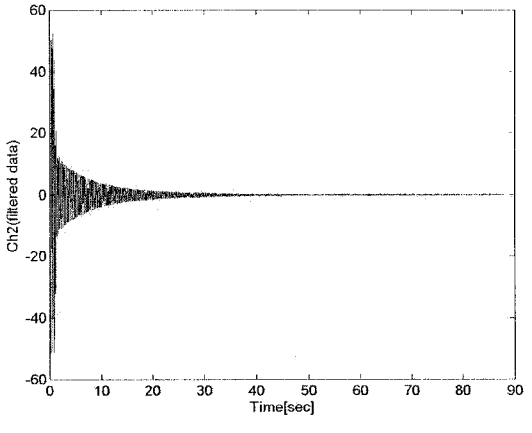
그림 3.6.4.5(b) 풍속 0m/s에서 Damper 입력전압별 자연감소응답



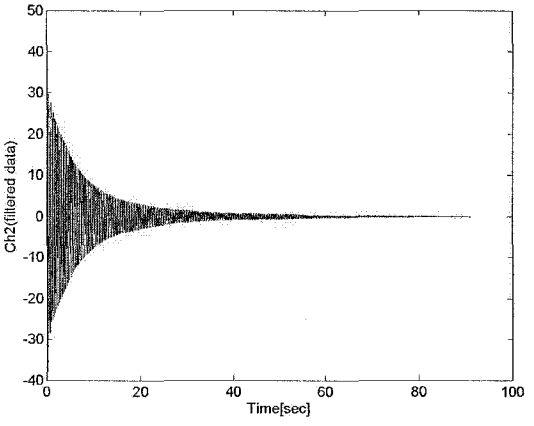
without MR-Damper



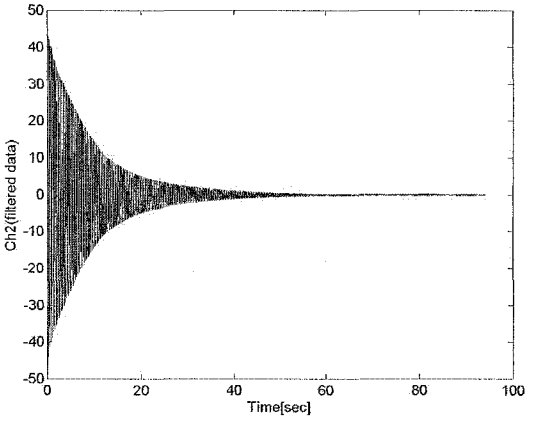
MR-Damper 0V



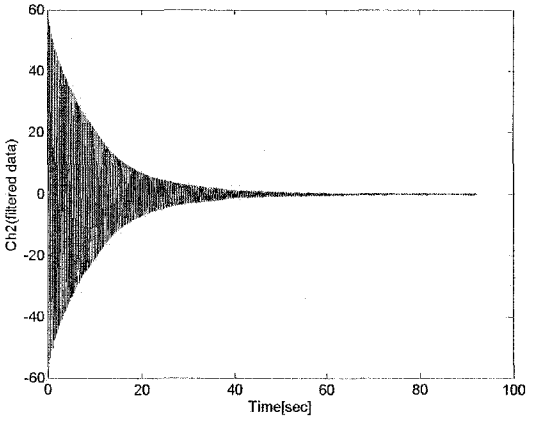
MR-Damper 1V



MR-Damper 2V

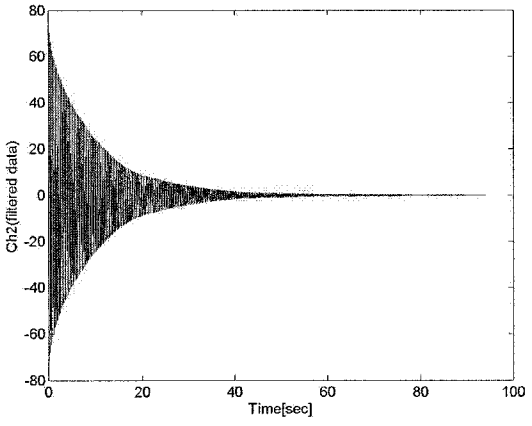


MR-Damper 3V

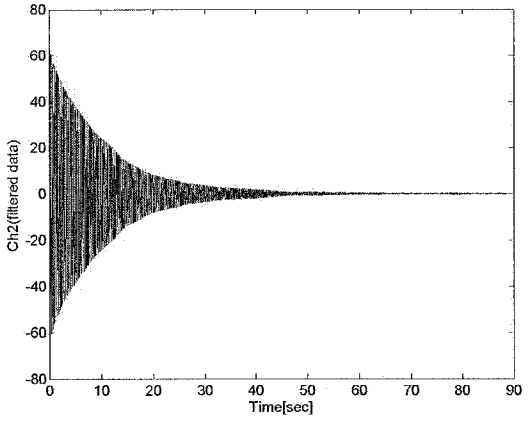


MR-Damper 4V

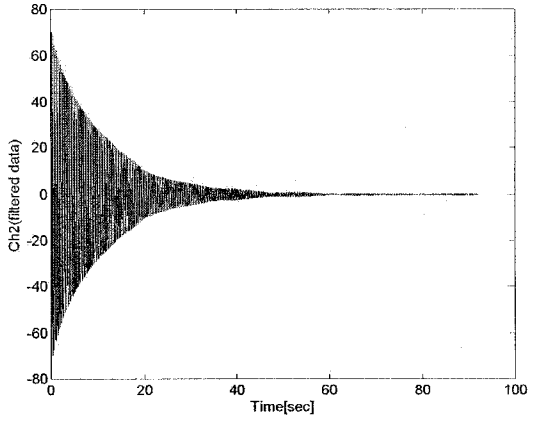
그림 3.6.4.6(a) 풍속 2m/s에서 Damper 입력전압별 자연감소응답



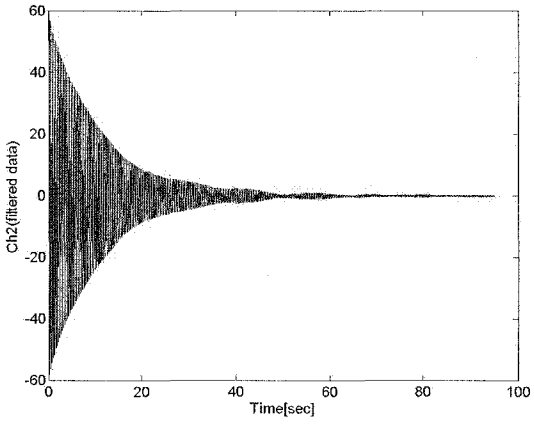
MR-Damper 5V



MR-Damper 8V

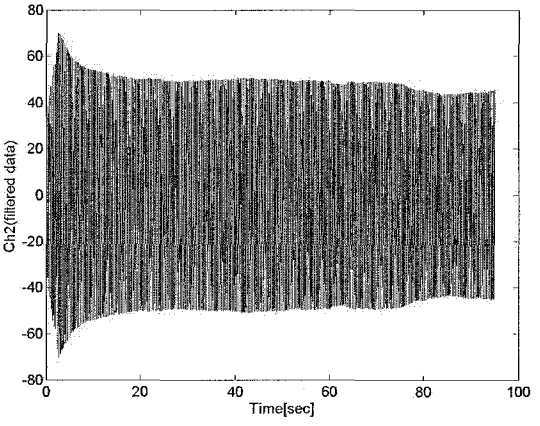


MR-Damper 10V

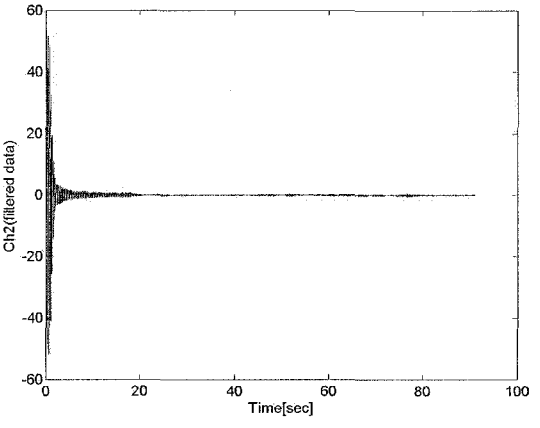


MR-Damper 12V

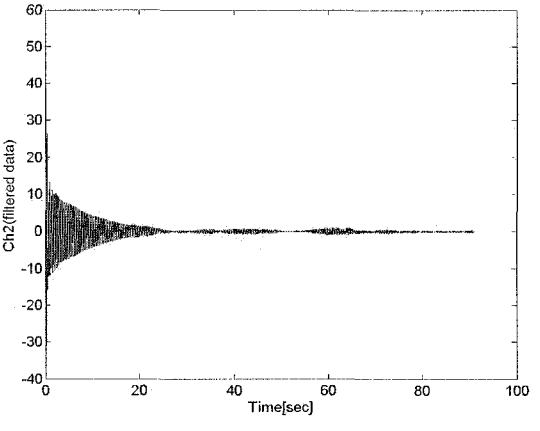
그림 3.6.4.6(b) 풍속 2m/s에서 Damper 입력전압별 자연감소응답



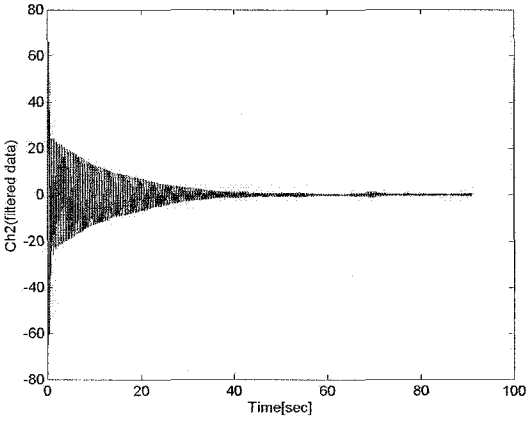
without MR-Damper



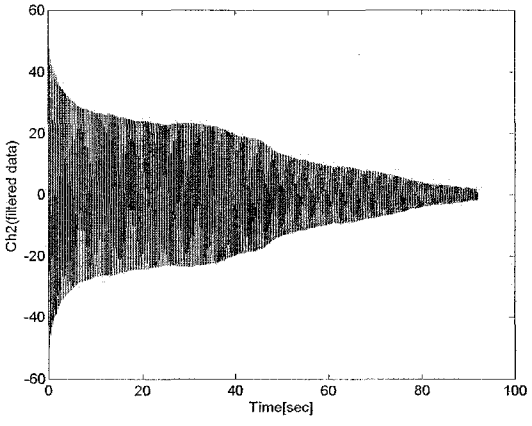
MR-Damper 0V



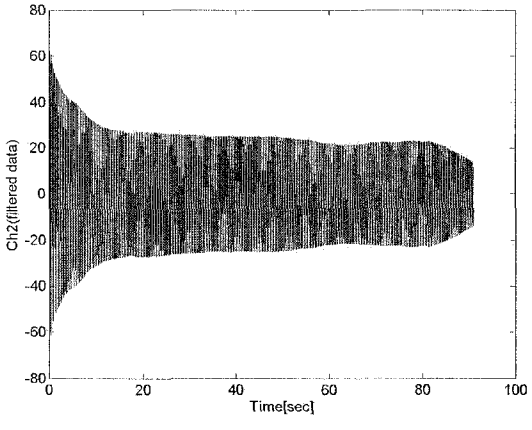
MR-Damper 1V



MR-Damper 2V

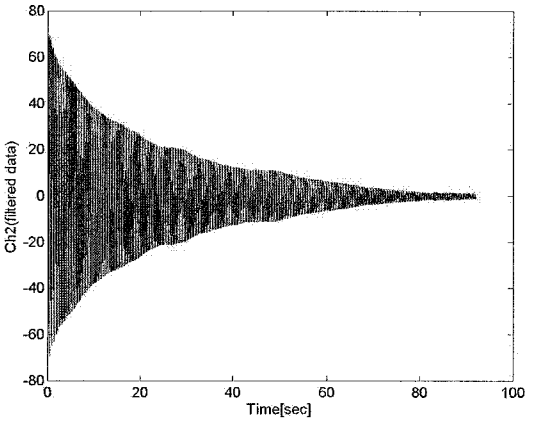


MR-Damper 3V

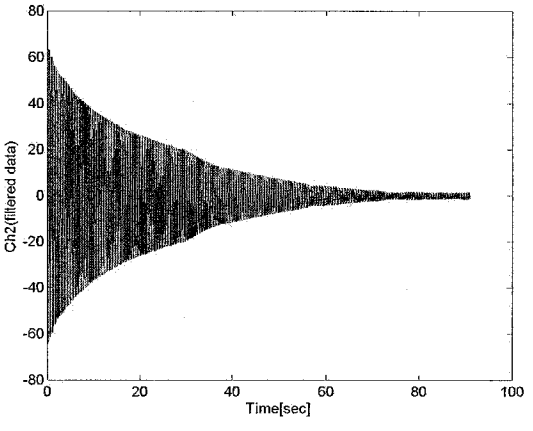


MR-Damper 4V

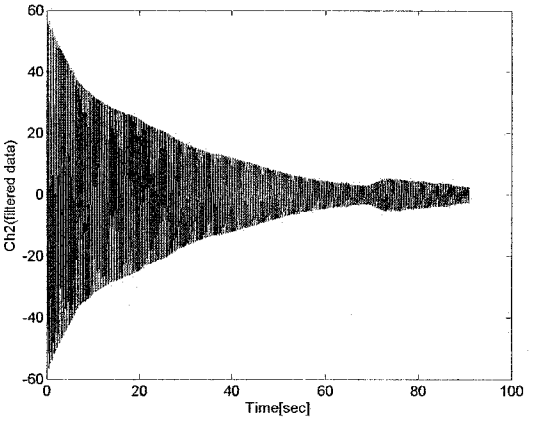
그림 3.6.4.7(a) 풍속 4m/s에서 Damper 입력전압별 자연감소응답



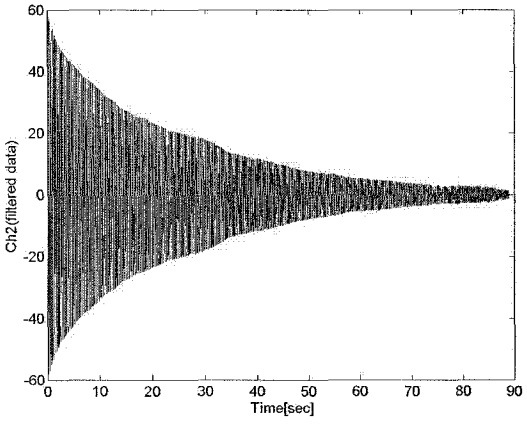
MR-Damper 5V



MR-Damper 8V

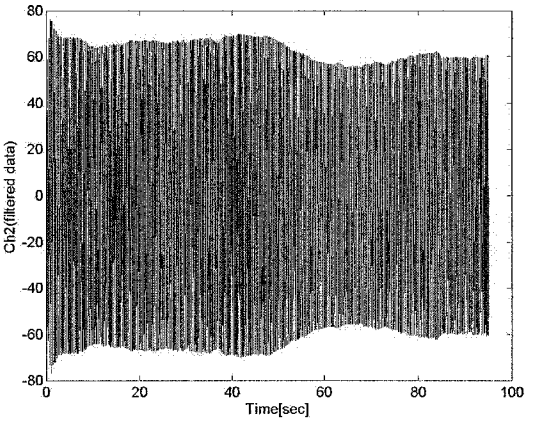


MR-Damper 10V

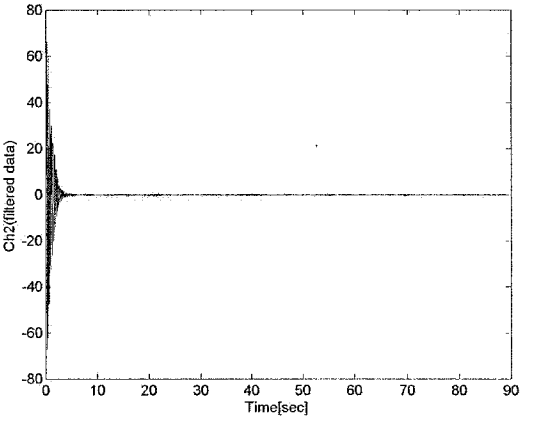


MR-Damper 12V

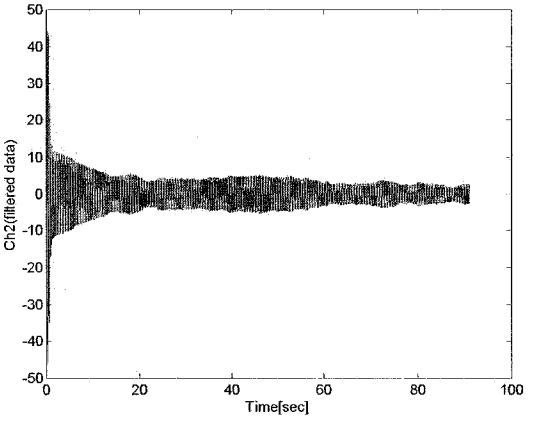
그림 3.6.4.7(b) 풍속 4m/s에서 Damper 입력전압별 자연감소응답



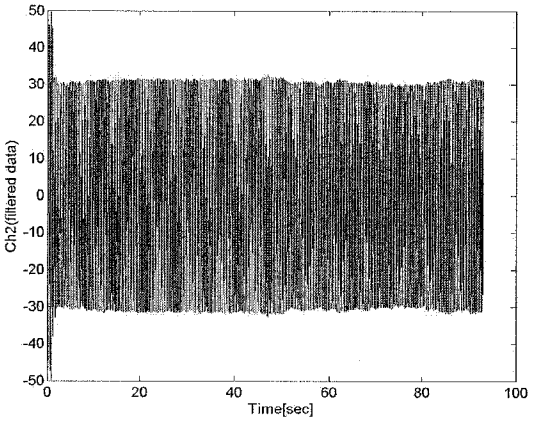
without MR-Damper



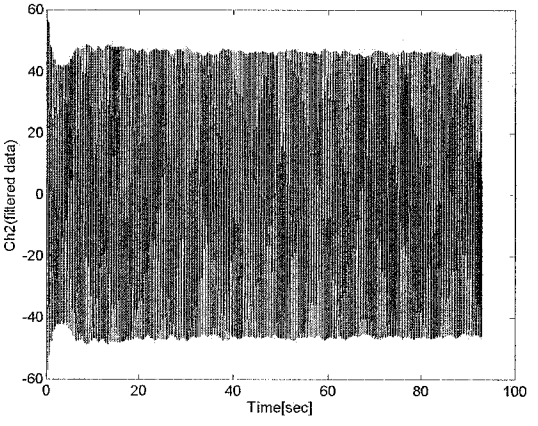
MR-Damper 0V



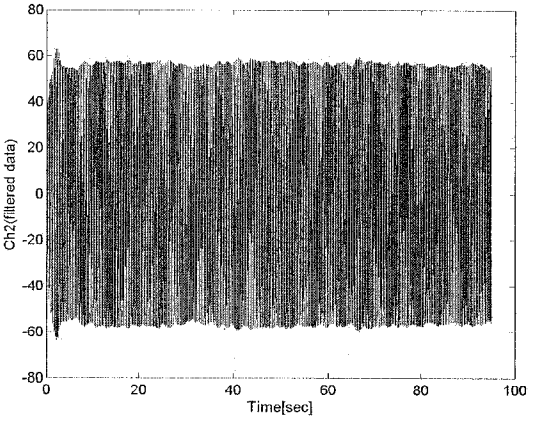
MR-Damper 1V



MR-Damper 2V

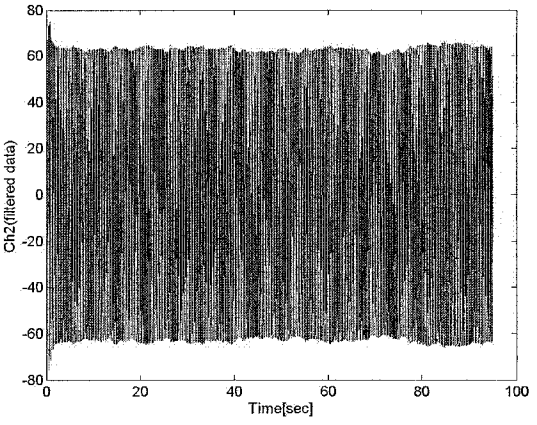


MR-Damper 3V

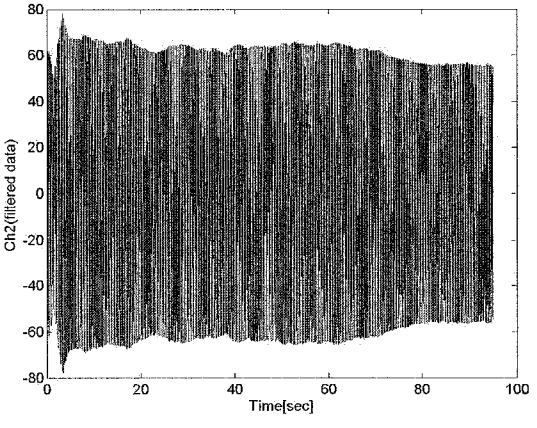


MR-Damper 4V

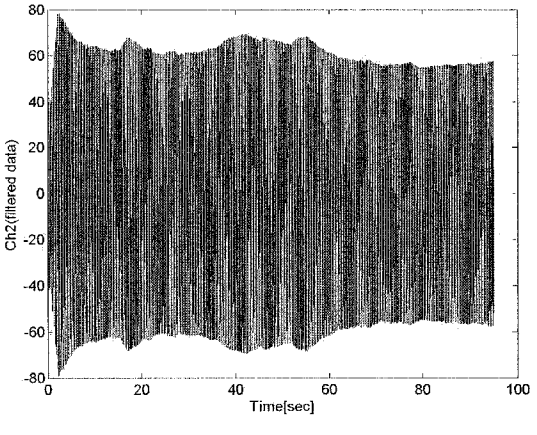
그림 3.6.4.8(a) 풍속 6m/s에서 Damper 입력전압별 자연감소응답



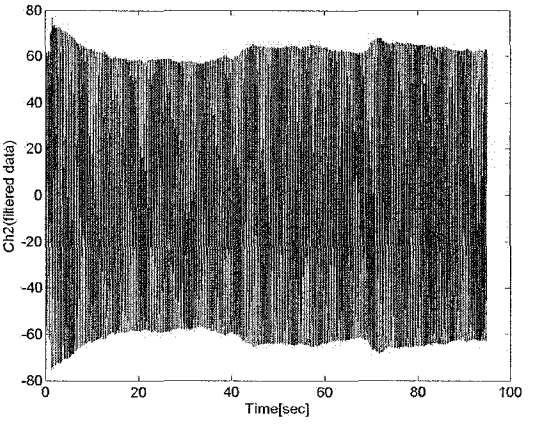
MR-Damper 5V



MR-Damper 8V

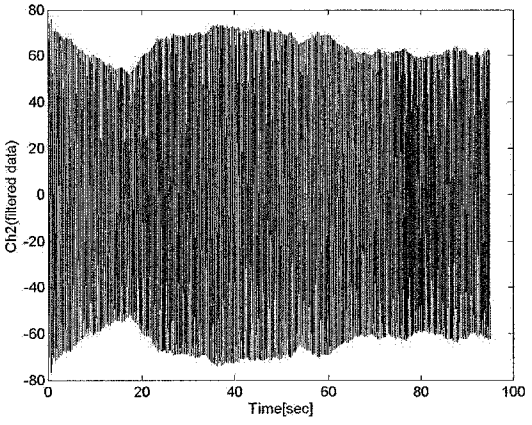


MR-Damper 10V

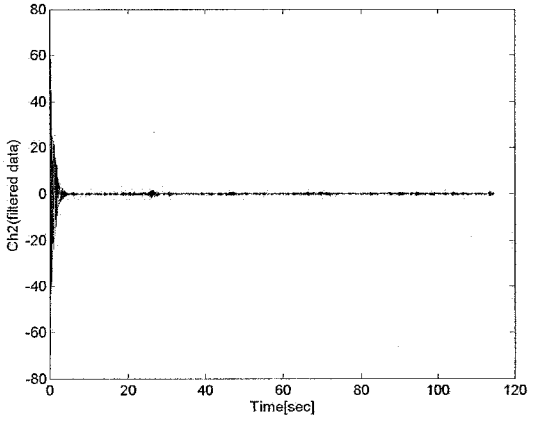


MR-Damper 12V

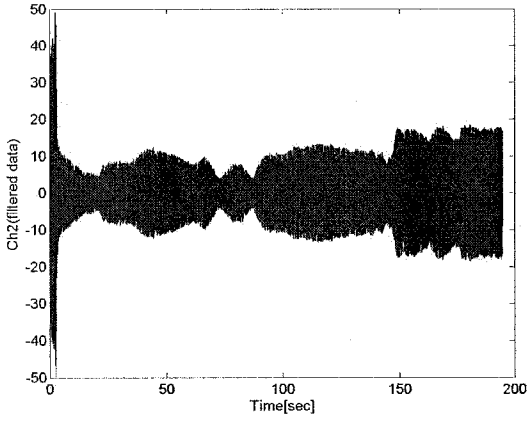
그림 3.6.4.8(b) 풍속 6m/s에서 Damper 입력전압별 자연감소응답



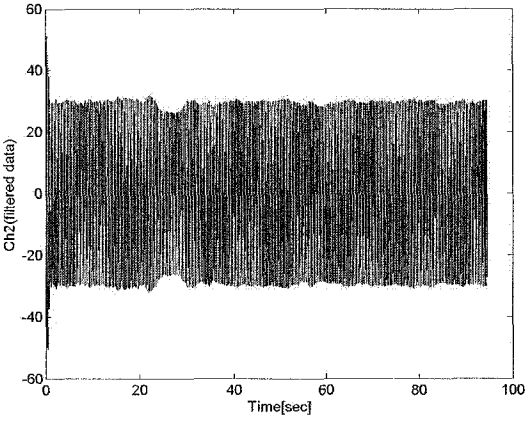
without MR-Damper



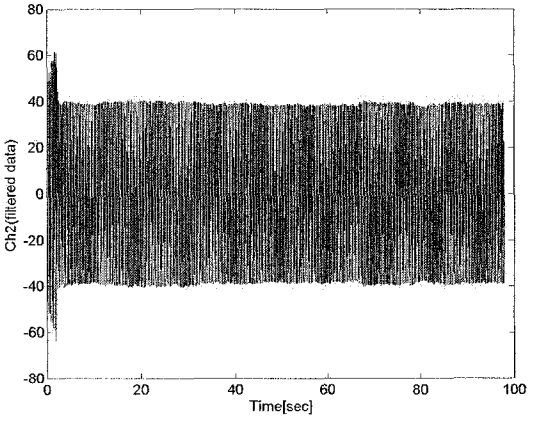
MR-Damper 0V



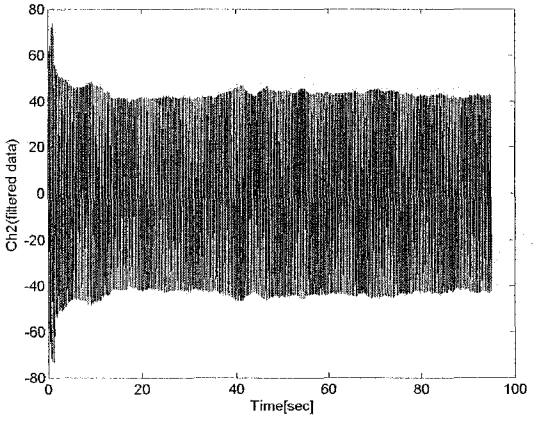
MR-Damper 1V



MR-Damper 2V

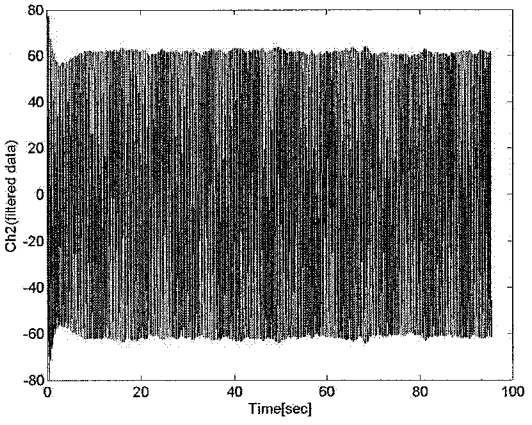


MR-Damper 3V

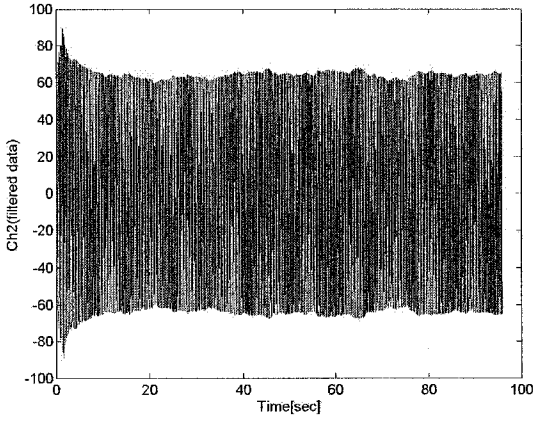


MR-Damper 4V

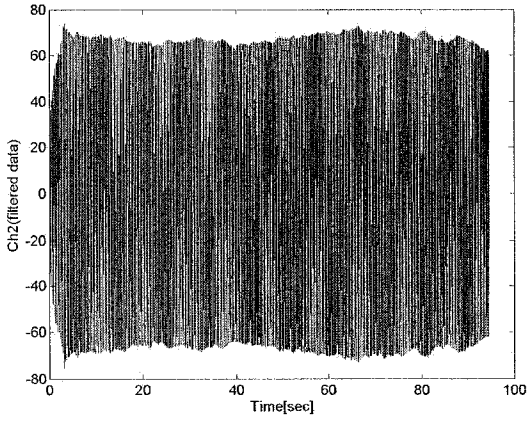
그림 3.6.4.9(a) 풍속 8m/s에서 Damper 입력전압별 자연감소응답



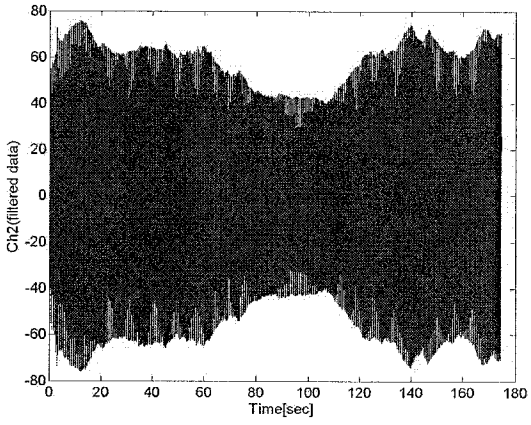
MR-Damper 5V



MR-Damper 8V

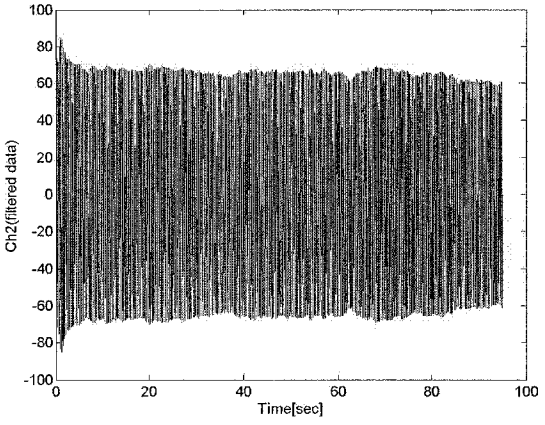


MR-Damper 10V

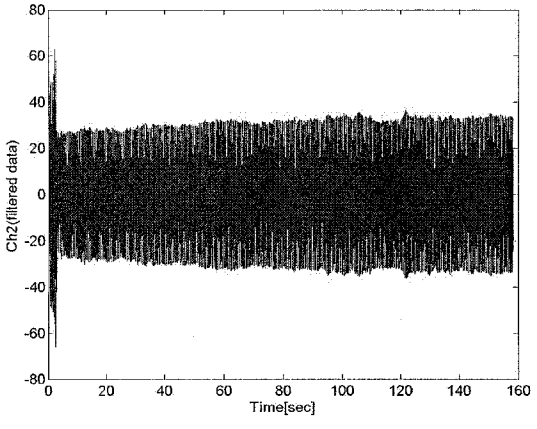


MR-Damper 12V

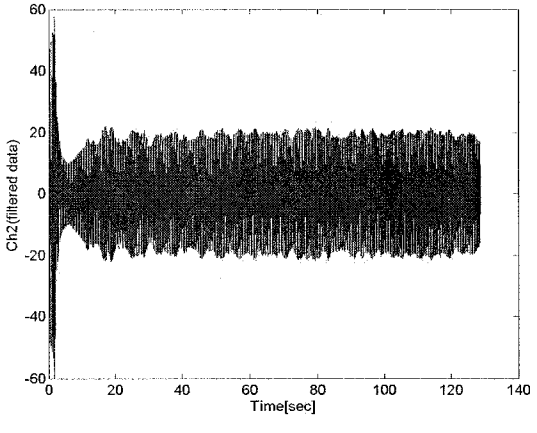
그림 3.6.4.9(b) 풍속 8m/s에서 Damper 입력전압별 자연감소응답



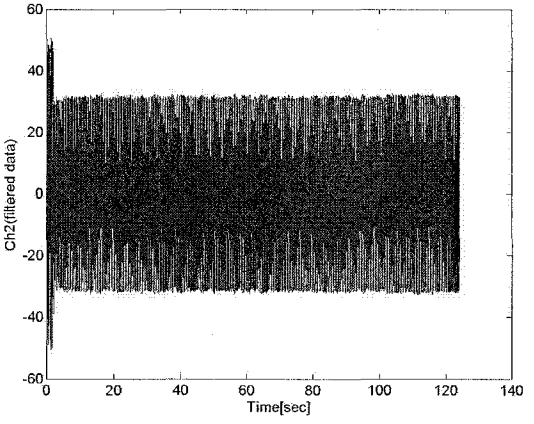
without MR-Damper



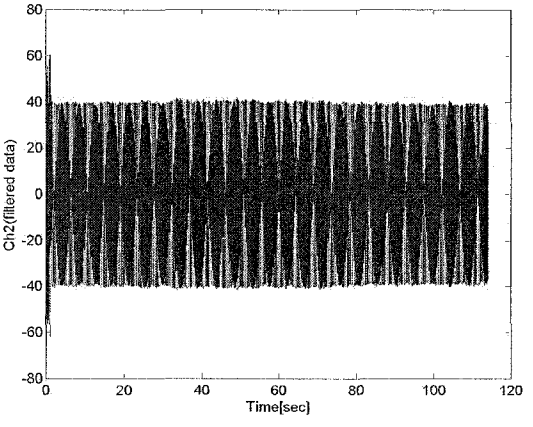
MR-Damper 0V



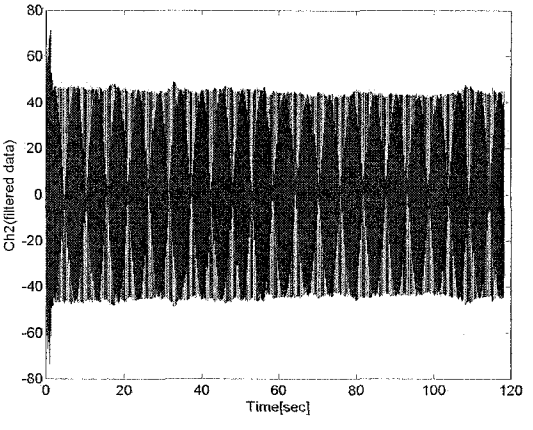
MR-Damper 1V



MR-Damper 2V

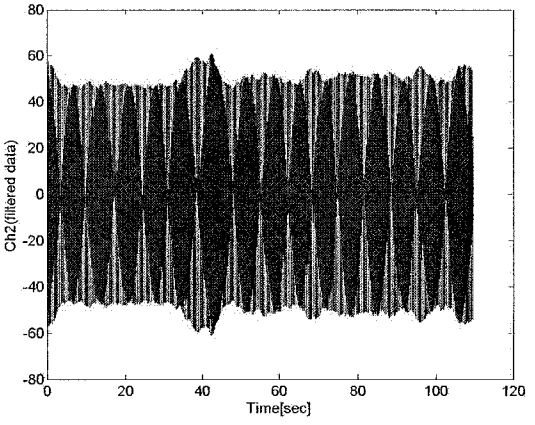


MR-Damper 3V

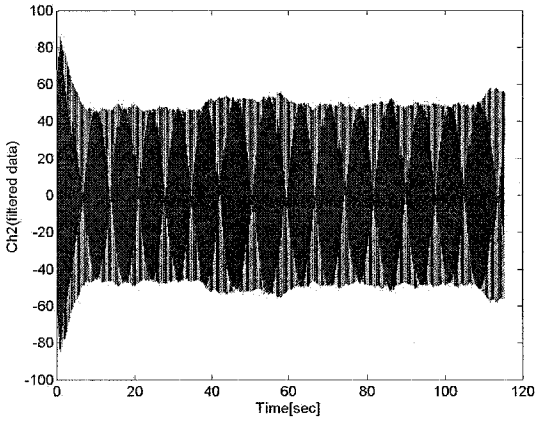


MR-Damper 4V

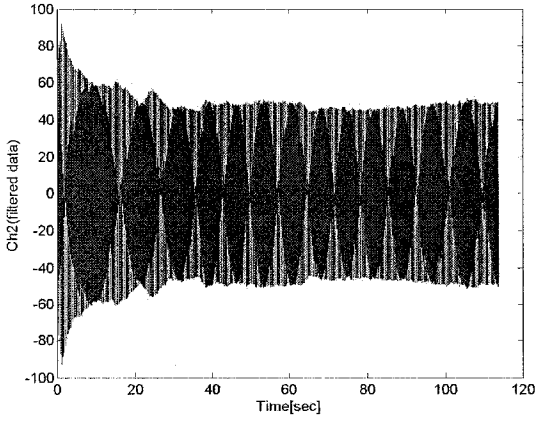
그림 3.6.4.10(a) 풍속 10m/s에서 Damper 입력전압별 자연감소응답



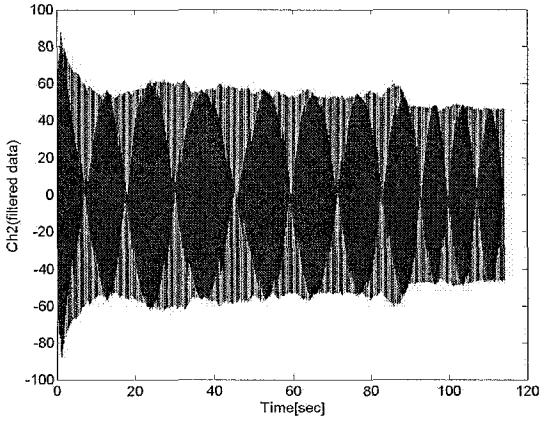
MR-Damper 5V



MR-Damper 8V



MR-Damper 10V



MR-Damper 12V

그림 3.6.4.10(b) 풍속 10m/s에서 Damper 입력전압별 자연감소응답

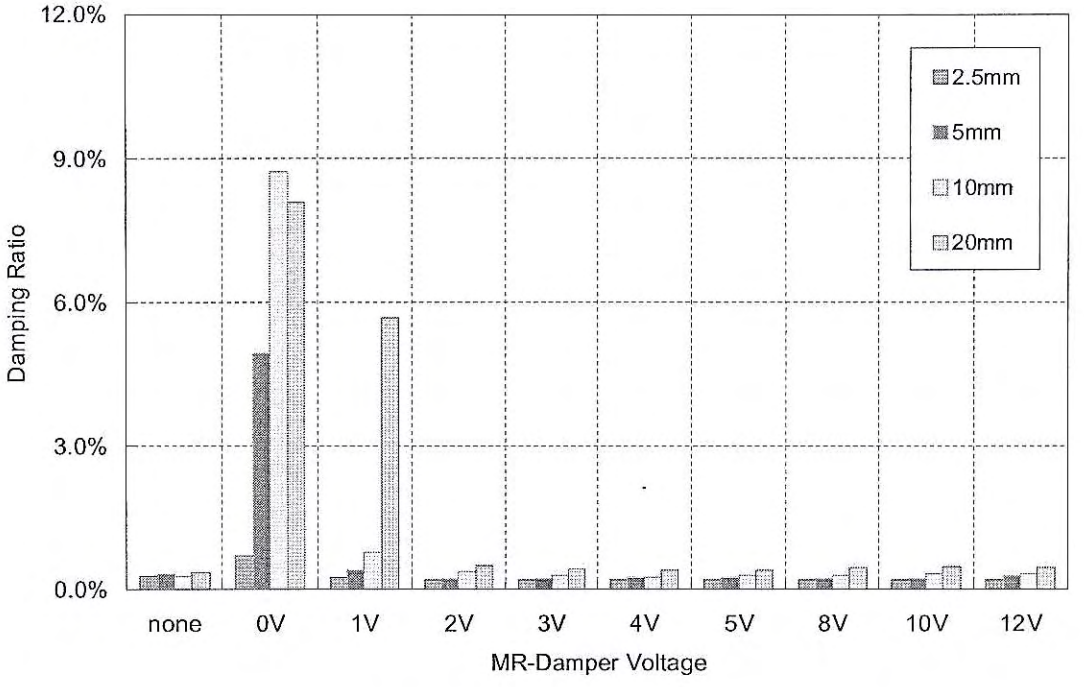


그림 3.6.4.11(a) 풍속 0m/s에서 Damper 입력전압별 Damping Ratio

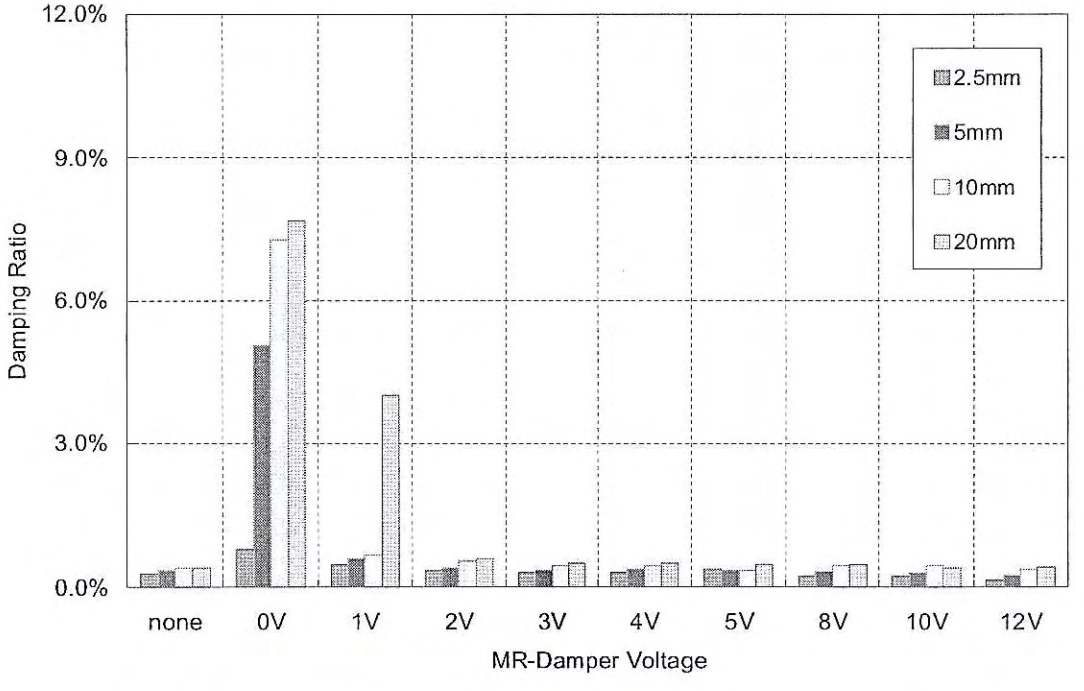


그림 3.6.4.11(b) 풍속 2m/s에서 Damper 입력전압별 Damping Ratio

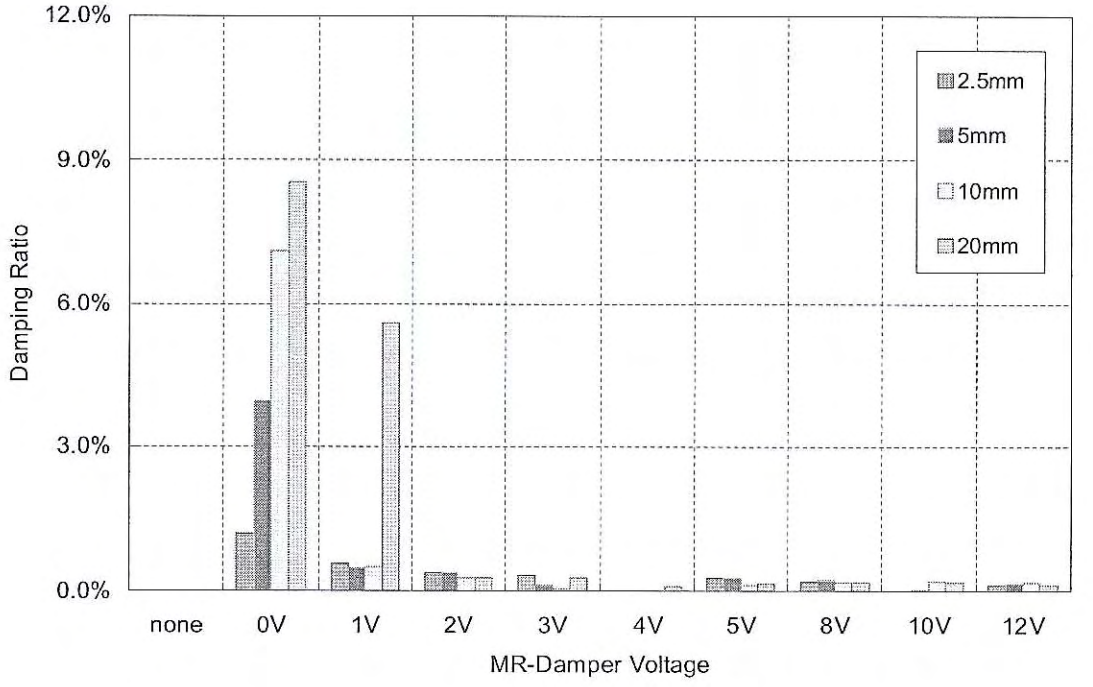


그림 3.6.4.11(c) 풍속 4m/s에서 Damper 입력전압별 Damping Ratio

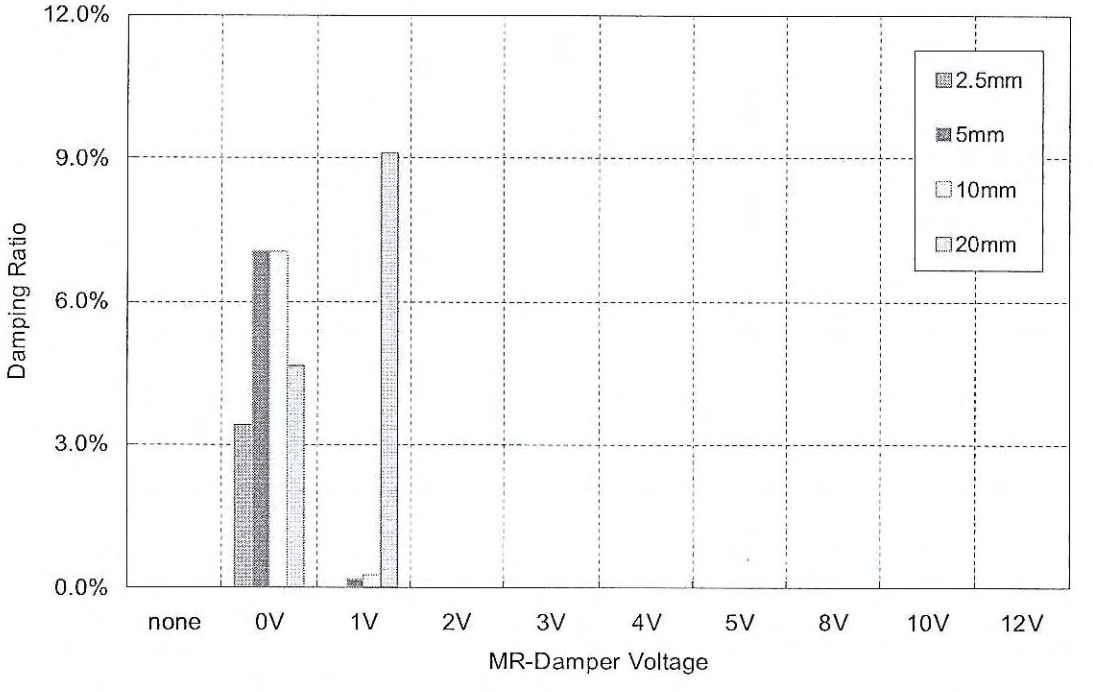


그림 3.6.4.11(d) 풍속 6m/s에서 Damper 입력전압별 Damping Ratio

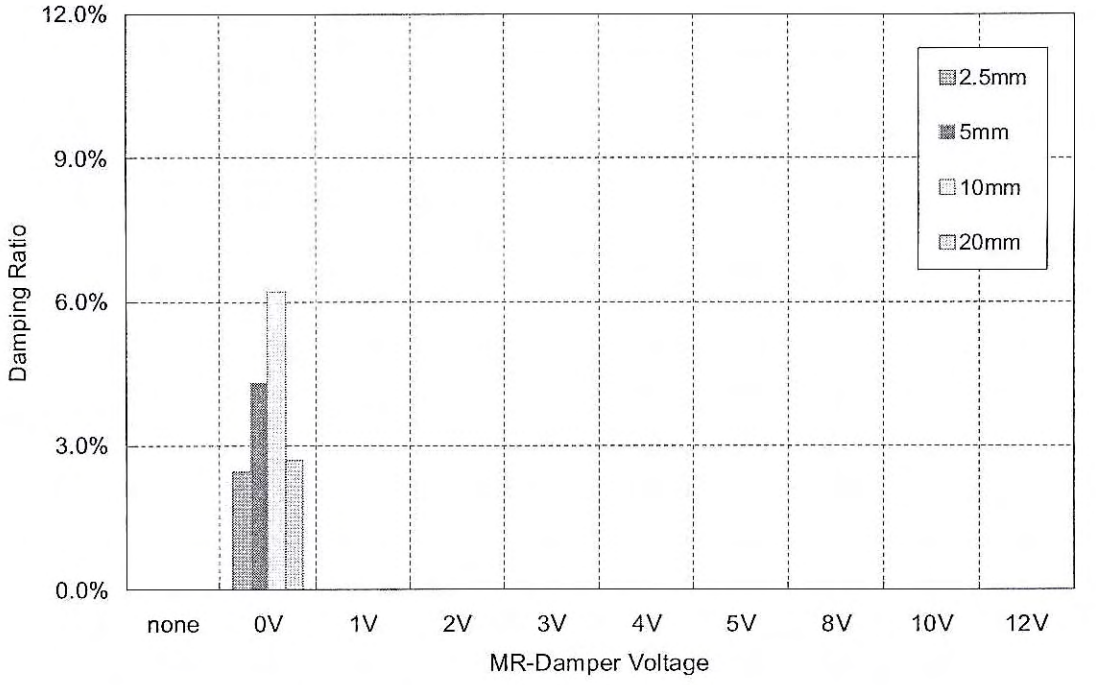


그림 3.6.4.11(e) 풍속 8m/s에서 Damper 입력전압별 Damping Ratio

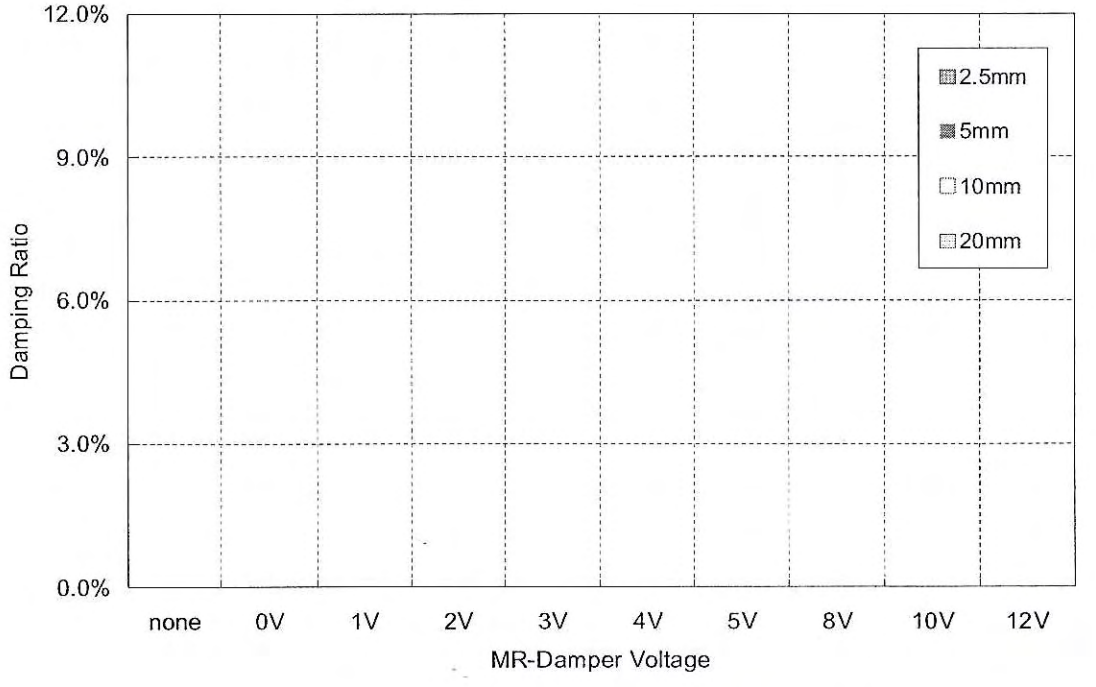


그림 3.6.4.12(f) 풍속 10m/s에서 Damper 입력전압별 Damping Ratio

6.4.4. 제진성능 실험결과

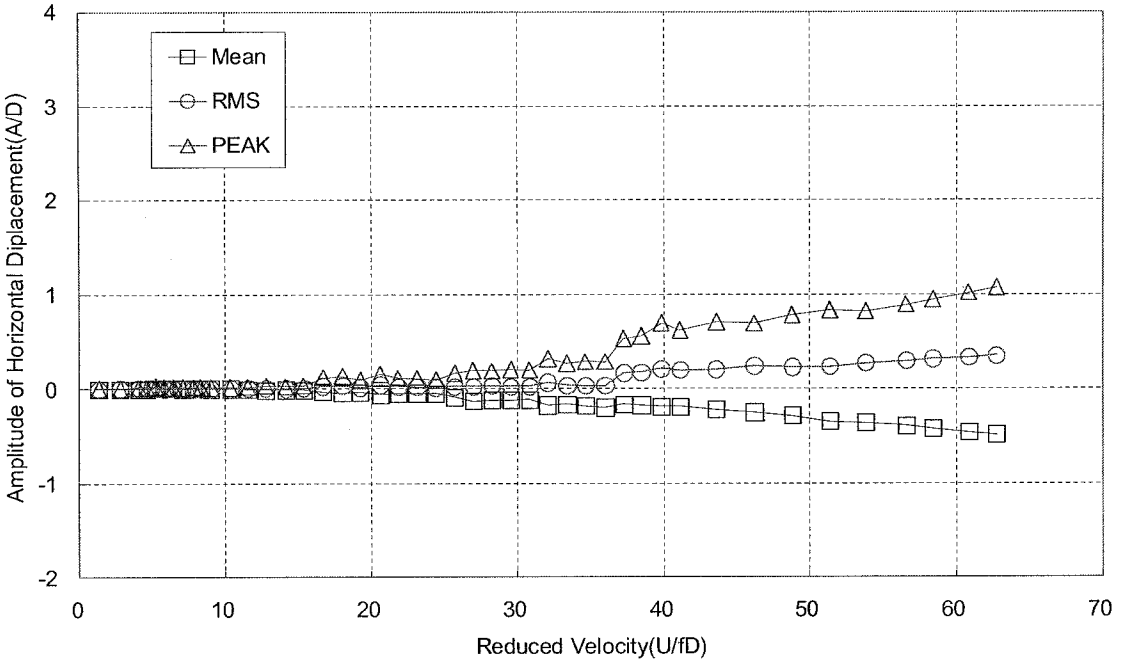
전절에서 각 풍속별 감쇠비가 최대가 되는 스마트 제진장치의 입력전압을 확인하기 위한 실험을 실시하였다. 실험결과 모든 풍속에서 입력전압이 0V(Passive-off)인 경우에 감쇠비가 최대가 되는 것으로 나타나 제진장치에 전압을 입력/제어하는 전자기유도부 (electromagnetic induction (EMI) system)는 적용할 필요가 없는 것으로 나타났다.

본 절에서는 전절에서 확인한 스마트 제진장치의 Passive-off상태에서의 제진성능을 확인하기 위해서 제진장치 적용전과 적용후(Passive-off) 케이블 탄성체모형의 진동실험을 수행하였다. 또한, 스마트 제진장치에 최대전압(12V)이 작용할 경우에 대한 진동실험을 실시하여 스마트 제진장치 자체의 안정성과 구조물(케이블)에 대한 안정성을 조사하였다.

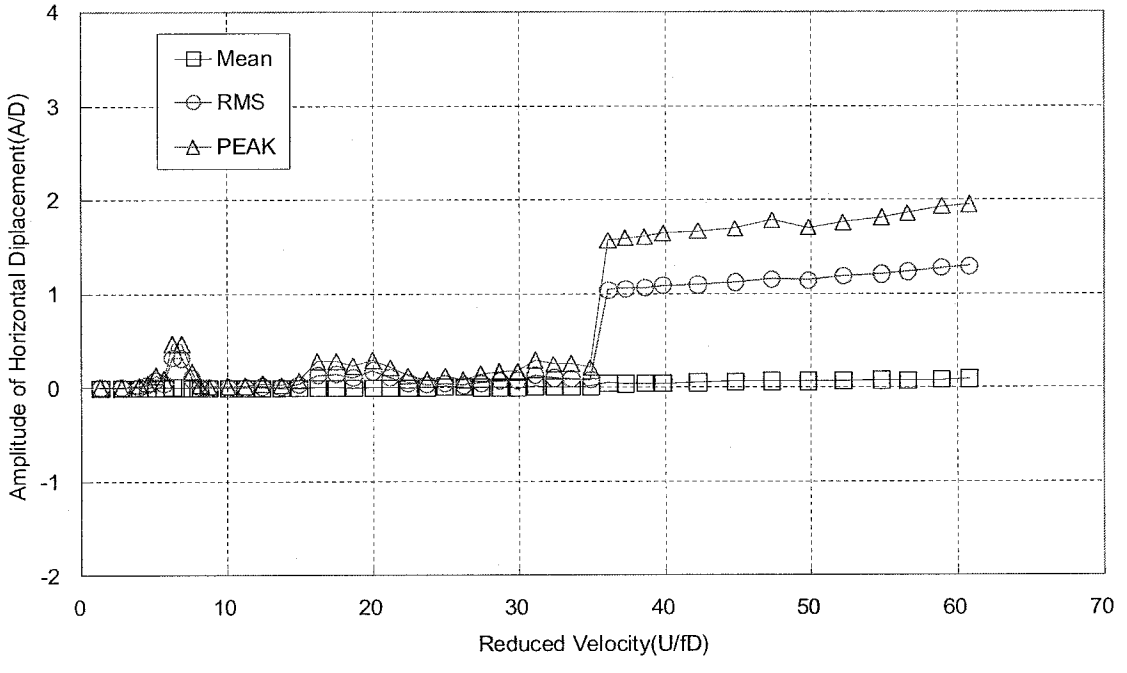
제진장치를 부착하지 않은 단면의 진동실험 조건은 6.3절의 케이블 특성실험과 비교할 때 케이블의 sag를 줄이기 위해 장력이 크게 도입되었고, 감쇠율이 바뀌면서 Scruton수의 차이가 발생하였고 이로 인해 실험결과가 다소 상이하다. 실험결과를 그림 3.6.4.13에 나타내었다. 실험결과에 의하면, 중심간격 3D의 경우 무차원풍속(Ur) 35 부근에서 웨이크갤로핑이 발생하며 최대진폭은 케이블 직경의 2배정도이다. 6.3절의 케이블 특성실험에서는 수직 2차모드가 지배적이었는데, 장력이 크게 도입되자 수직 1차모드의 웨이크갤로핑이 지배적으로 발생하였다. 한편, 와류진동이 발생하는데 무차원풍속 6 정도에서 1차모드의 와류진동이 발생하였고, 12정도에서 2차모드의 와류진동이 발생하며, 18정도에서 3차모드의 와류진동이 발생하였다. 또한, 1/8지점에서의 결과를 확인하면 무차원 풍속 24정도에서 4차모드의 와류진동이 발생하는 것을 알 수 있으나, 다른 모드의 진동과 혼재하여 명확히 나타나지는 않는다.

스마트 제진장치 Passive-off상태에서의 제진실험결과를 그림 3.6.4.14에 나타내었다. 실험결과에 의하면, 무차원풍속 50까지 와류진동, 웨이크갤로핑과 같은 공기력진동이 전혀 발생하지 않으며 무차원풍속 50 이상에서는 웨이크갤로핑이 수평방향으로 발생함을 볼 수 있다. 수직방향의 경우 실험풍속 범위에서는 거의 진동이 발생하지 않아 매우 좋은 제진성능을 보였다.

스마트 제진장치 Passive-on(12V)상태에서의 제진실험결과를 그림 3.6.4.15에 나타내었다. 실험결과에 의하면, 제진장치를 부착하지 않은 경우에 비하여 와류진동은 감소하였지만, 웨이크갤로핑은 여전히 발생함을 알 수 있다. 1/8지점에서의 변위를 보면 댐퍼가 설치된 지점에서는 거의 변위가 발생하지 않아 적정값 이상의 입력전압이 가해질 경우 제진장치가 강체(rigid body)처럼 작동하게 되고 케이블에서는 그 지점이 절점이 되는 새로운 모드의 진동이 발생하게 됨을 알 수 있다.

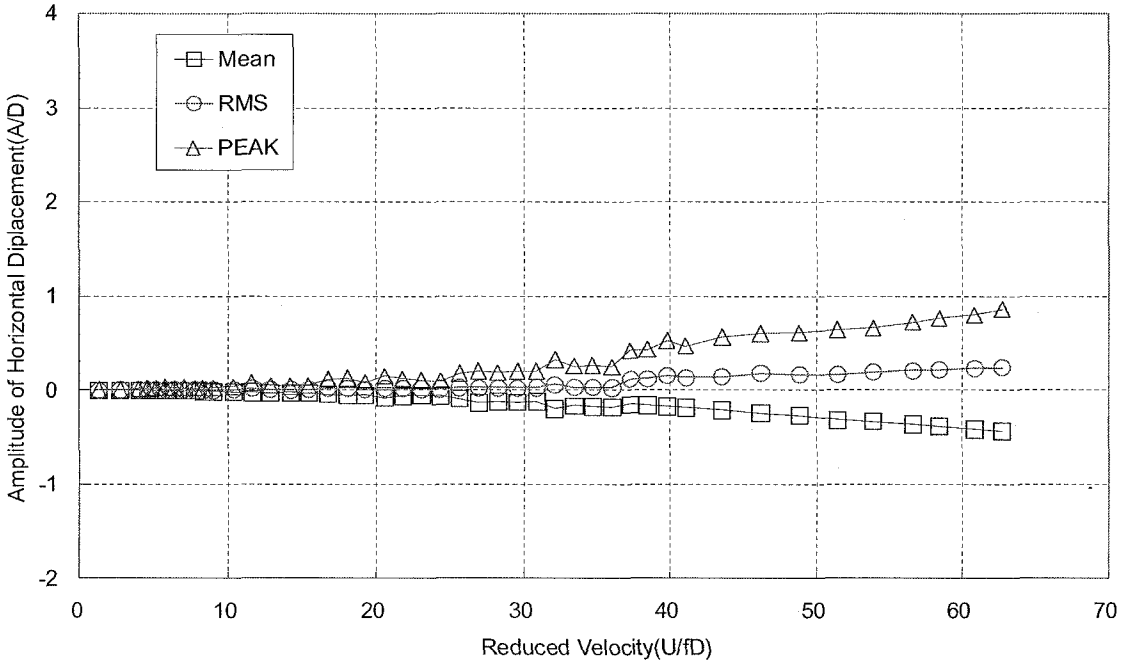


(a) 수평변위(1/2지점)

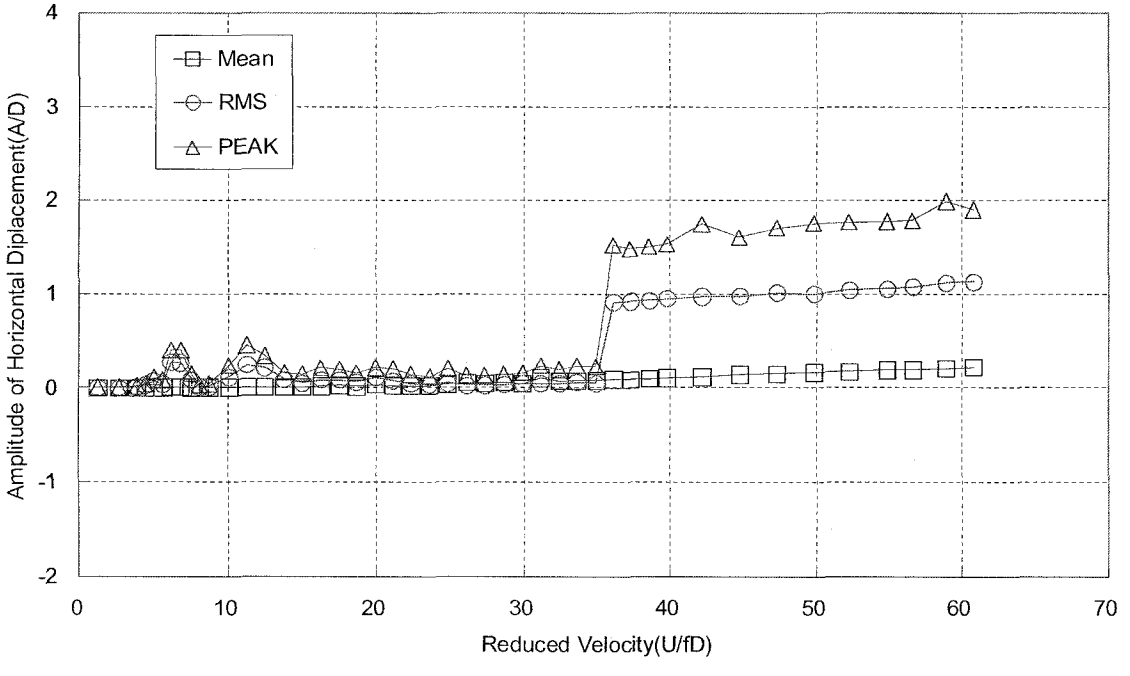


(b) 수직변위((1/2지점)

그림 3.6.4.13. 병렬케이블(간격3D)의 내풍특성(without damper) (1/3)

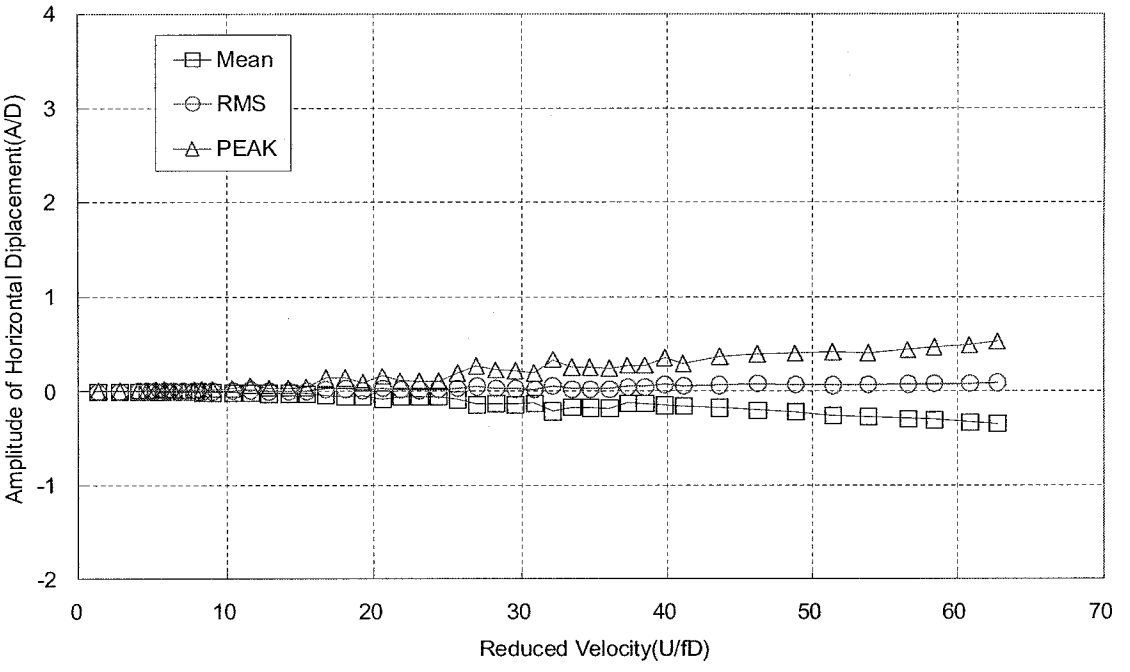


(c) 수평변위(1/4지점)

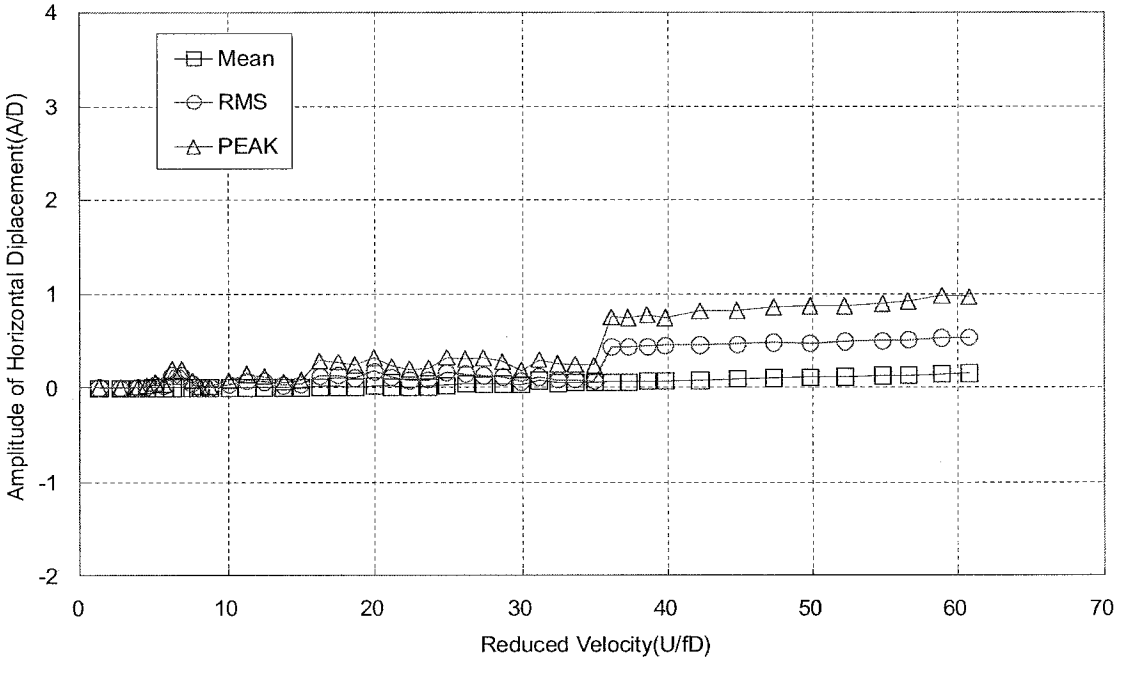


(d) 수직변위((1/4지점)

그림 3.6.4.13. 병렬케이블(간격3D)의 내풍특성(without damper) (2/3)

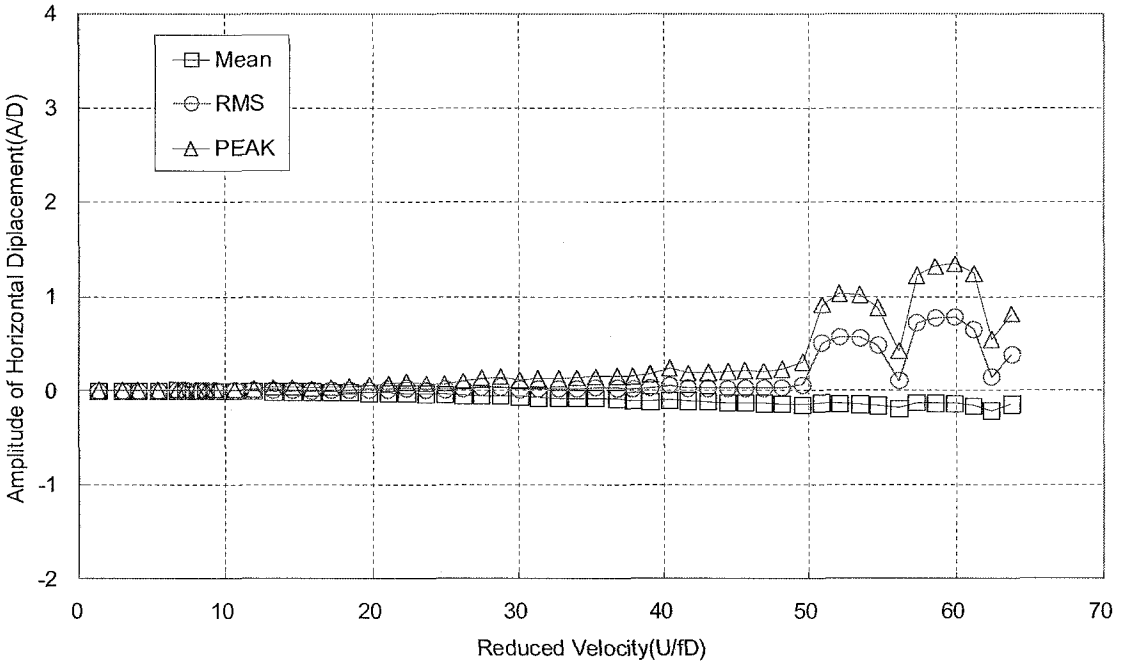


(e) 수평변위(1/8지점)

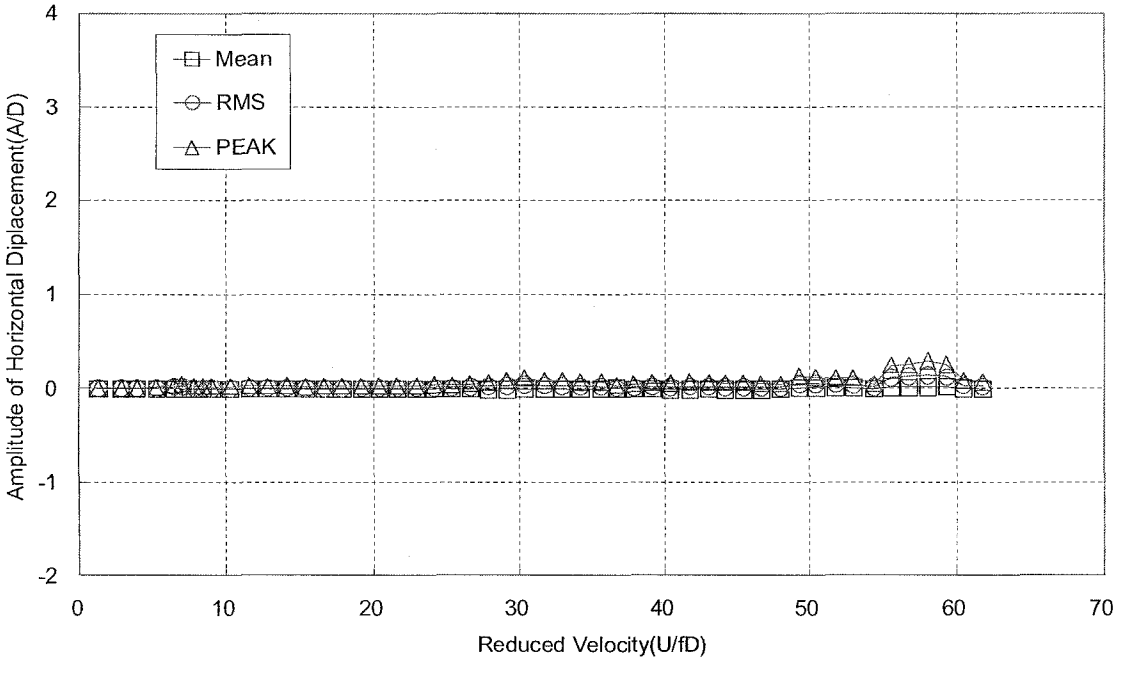


(f) 수직변위((1/8지점)

그림 3.6.4.13. 병렬케이블(간격3D)의 내풍특성(without damper) (3/3)

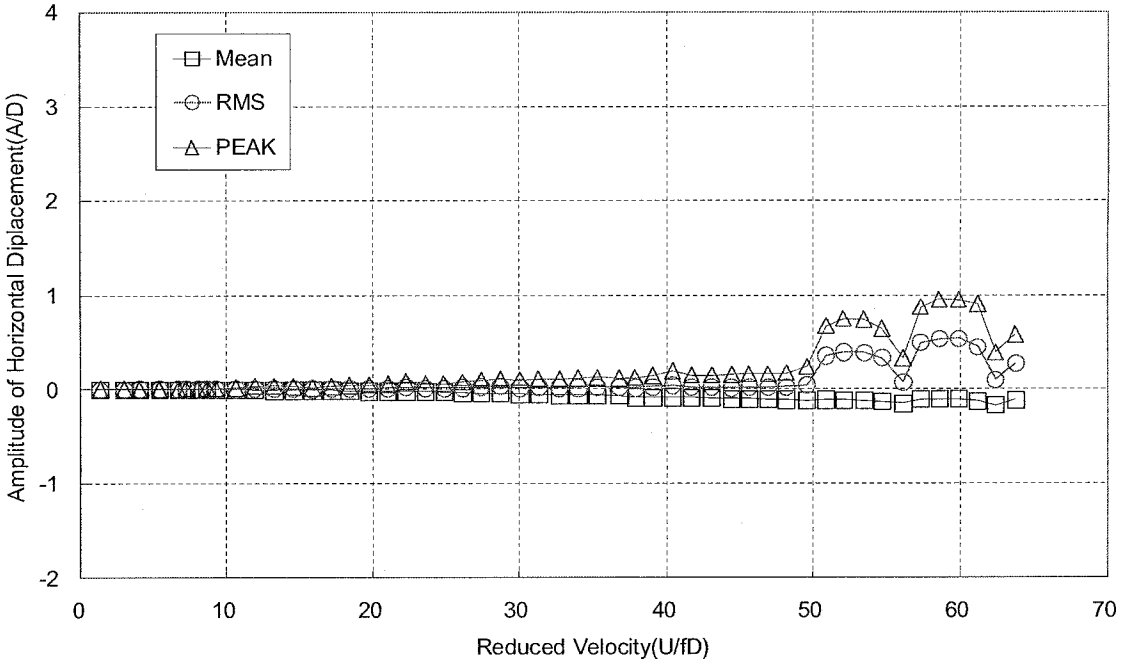


(a) 수평변위(1/2지점)

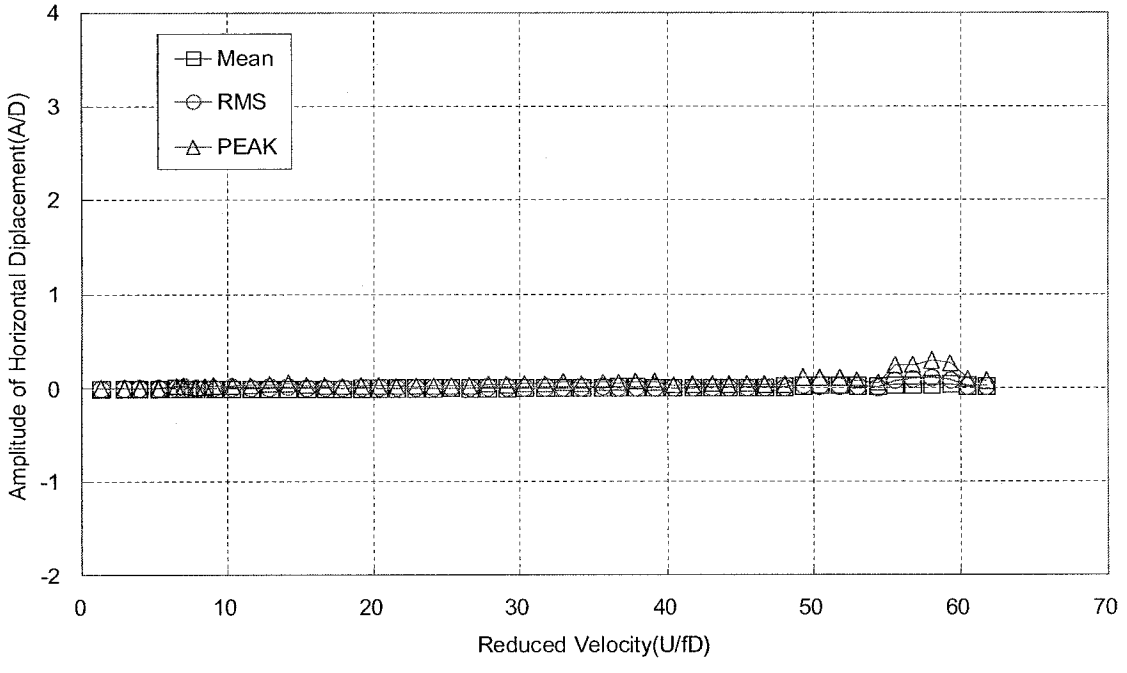


(b) 수직변위((1/2지점)

그림 3.6.4.14. 스마트 제진장치의 제진성능(Passive-off) (1/3)

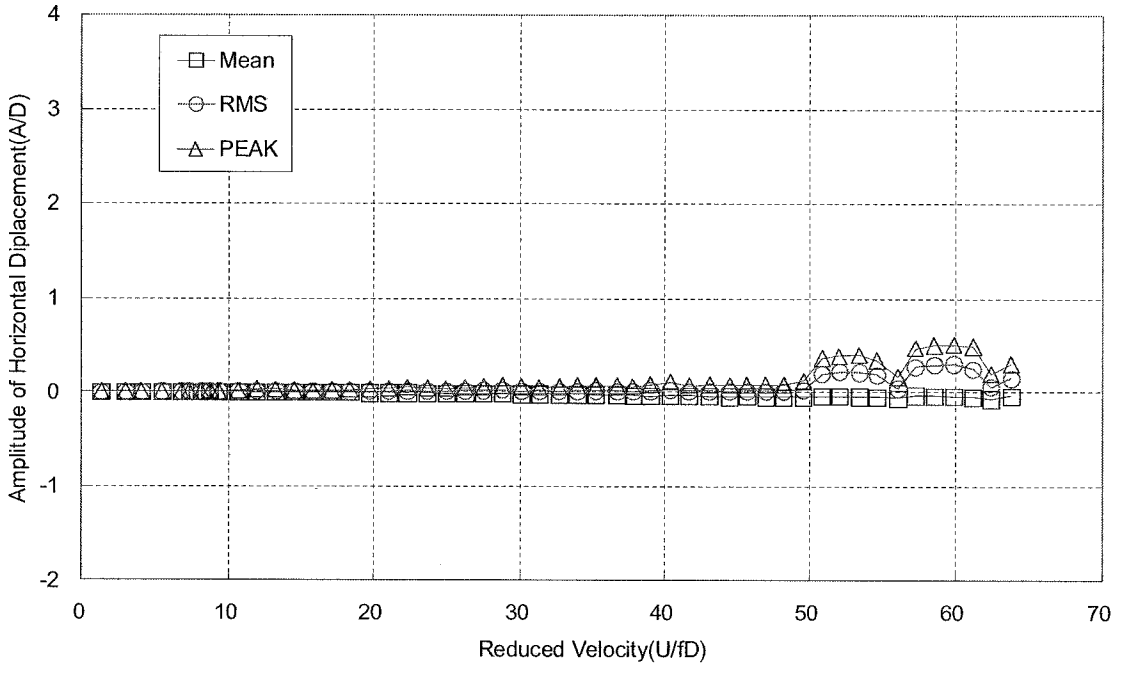


(c) 수평변위(1/4지점)

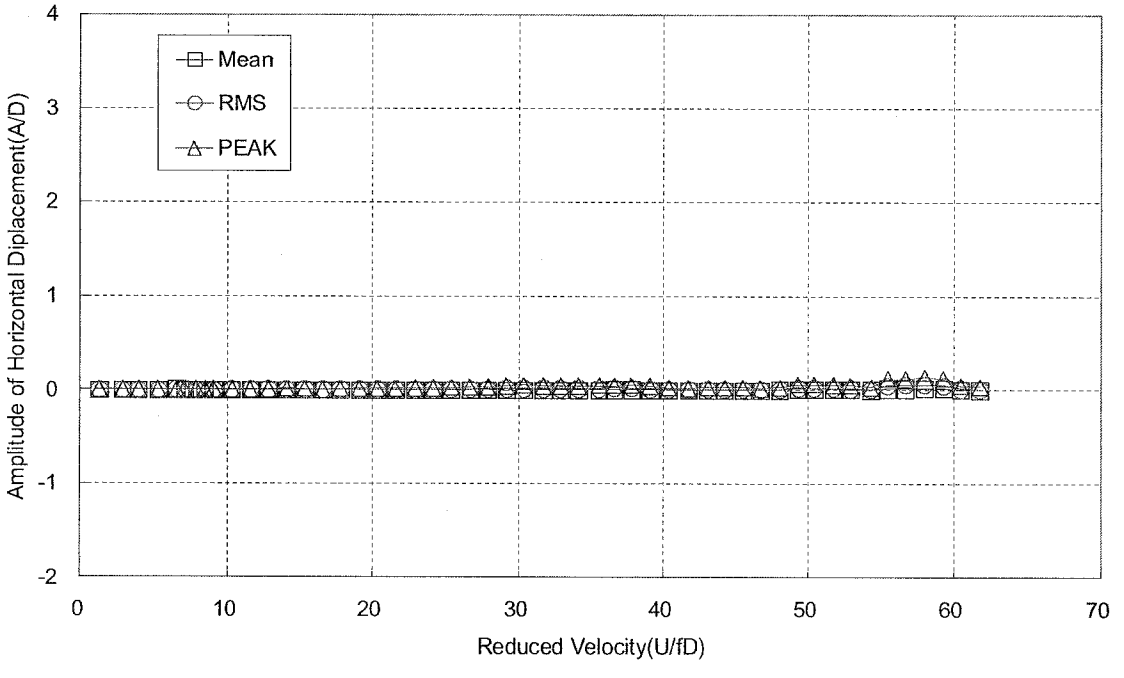


(d) 수직변위((1/4지점)

그림 3.6.4.14. 스마트 제진장치의 제진성능(Passive-off) (2/3)

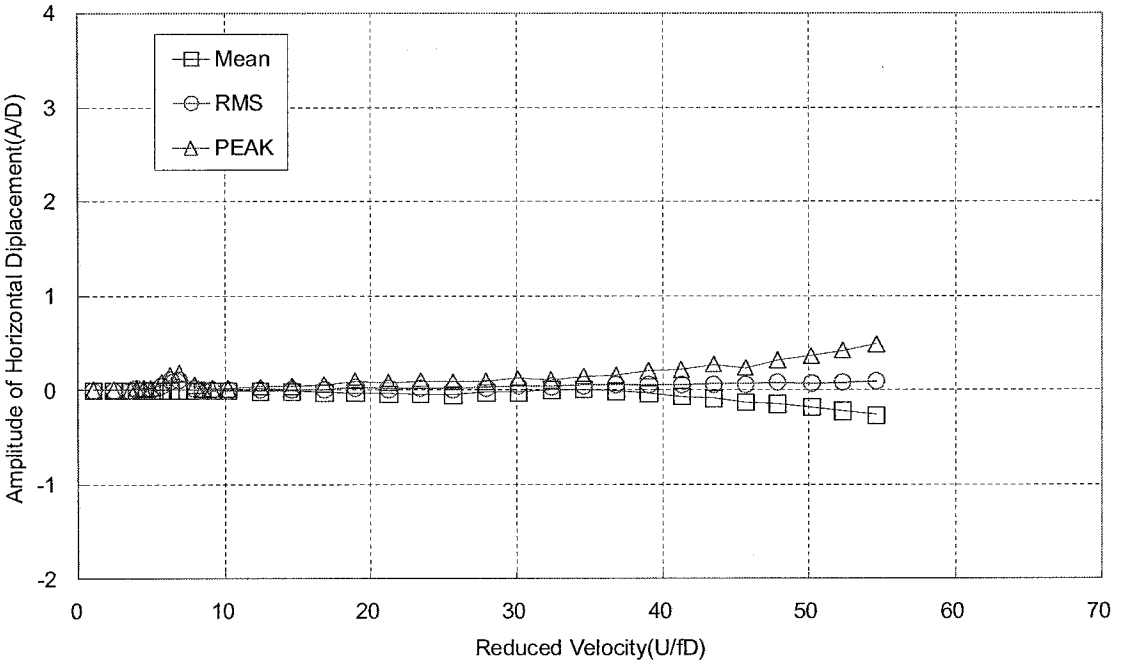


(e) 수평변위(1/8지점)

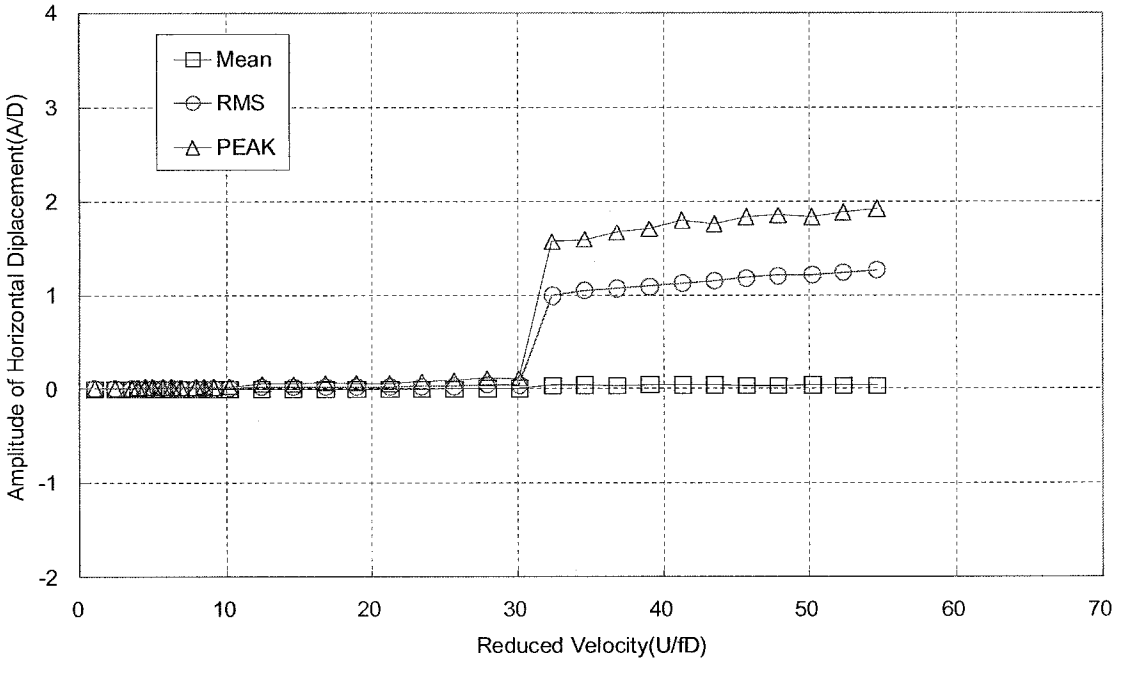


(f) 수직변위((1/8지점)

그림 3.6.4.14. 스마트 제진장치의 제진성능(Passive-off) (3/3)

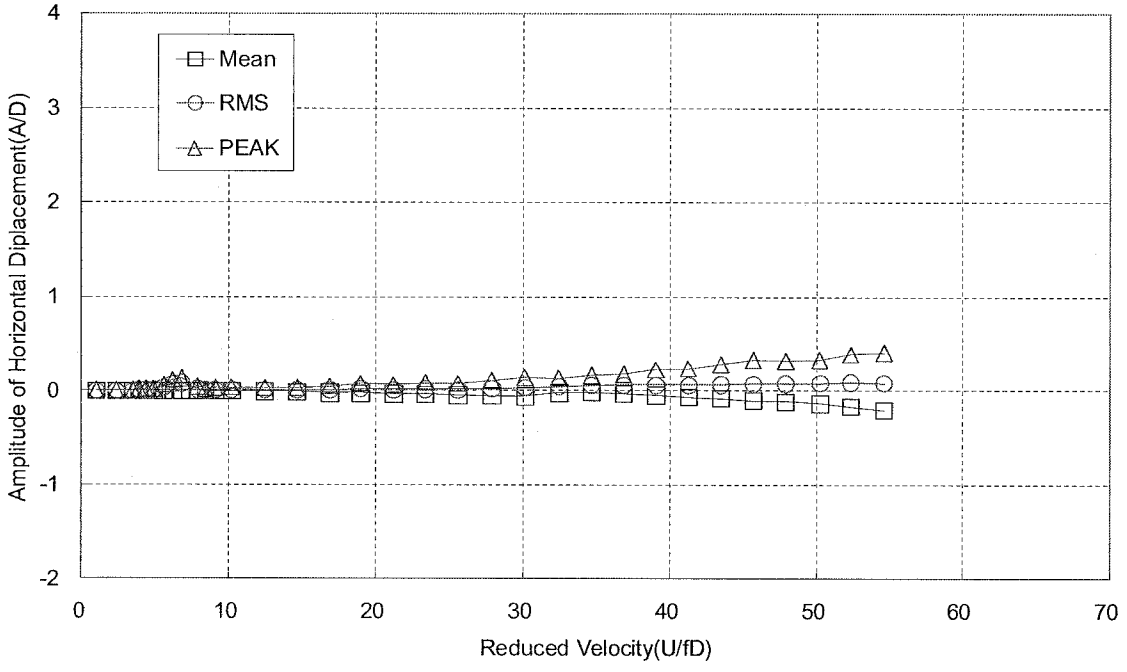


(a) 수평변위(1/2지점)

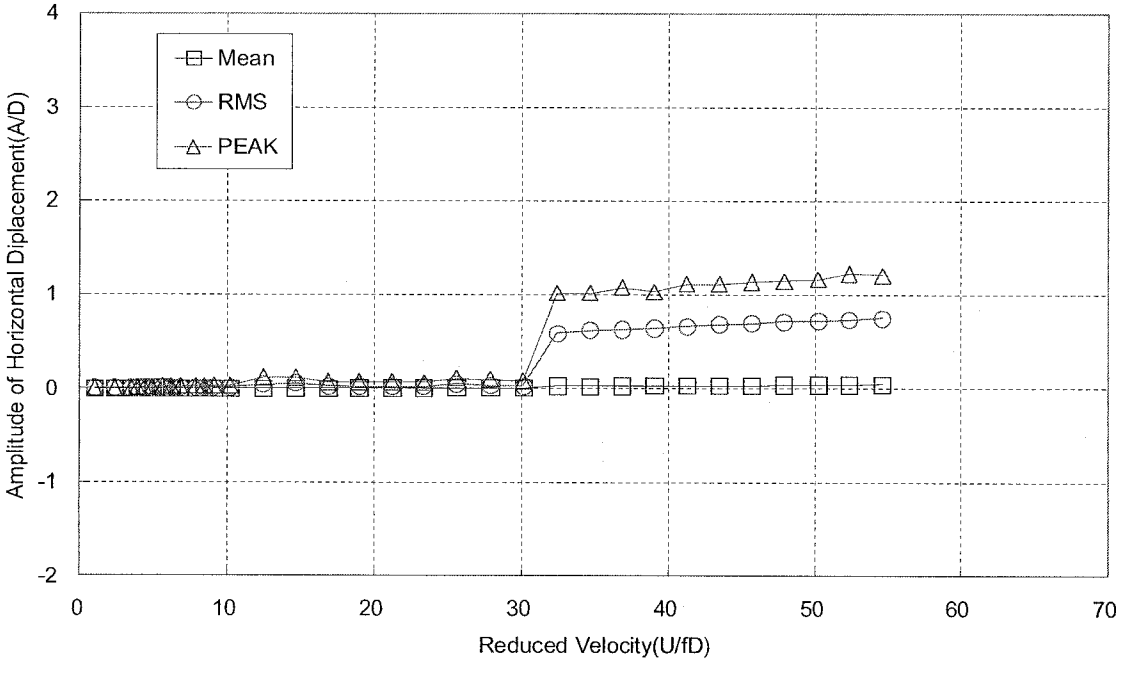


(b) 수직변위((1/2지점)

그림 3.6.4.15. 스마트 제진장치의 안정성 실험(Passive-on, 12V) (1/3)

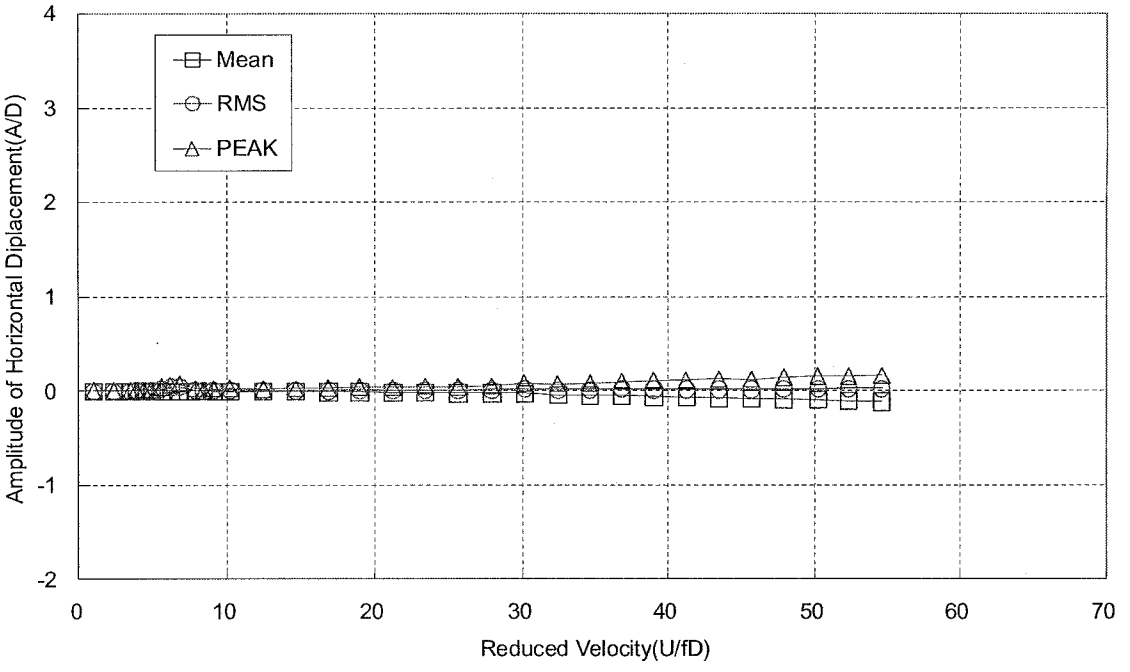


(c) 수평변위(1/4지점)

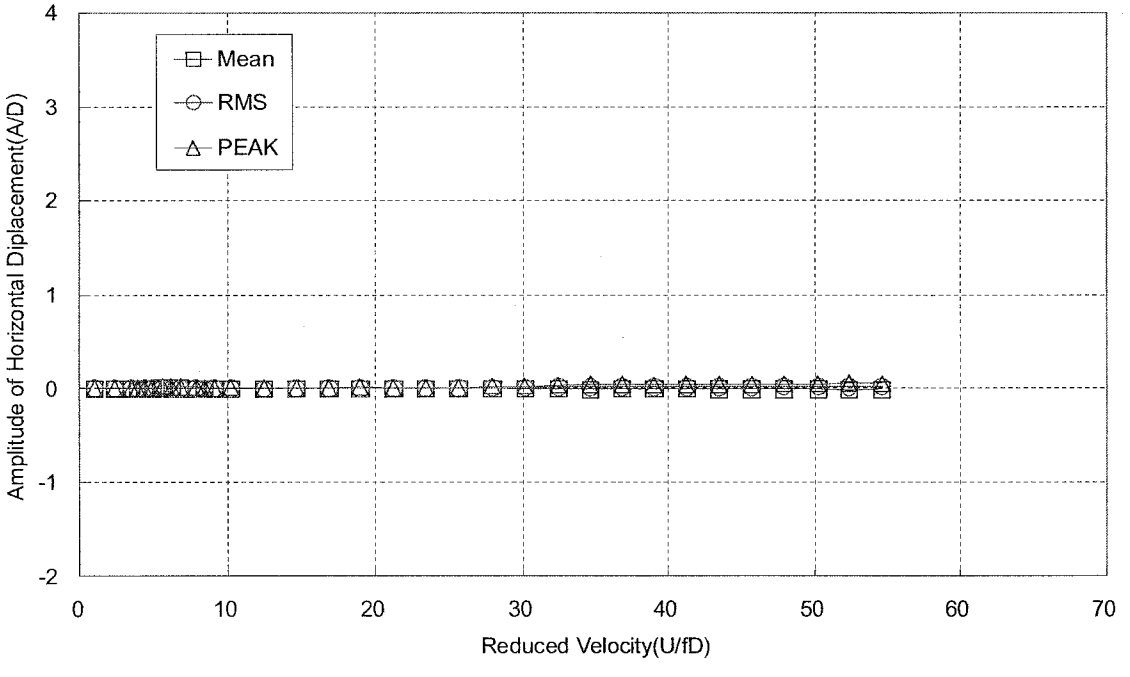


(d) 수직변위((1/4지점)

그림 3.6.4.15. 스마트 제진장치의 안정성 실험(Passive-on, 12V) (2/3)



(e) 수평변위(1/8지점)



(f) 수직변위((1/8지점)

그림 3.6.4.15. 스마트 제진장치의 안정성 실험(Passive-on, 12V) (3/3)

6.5. 소결

실교량 케이블에 대한 신개념 스마트 제진장치의 제진성능을 평가하기 위하여 케이블 강체모형과 케이블 탄성체모형의 공기력진동특성을 파악하기 위한 실험을 실시하였다. 스마트 제진장치의 입력전압에 따른 케이블의 감쇠성능을 확인하기 위하여 케이블 탄성체 모형의 강제진동실험을 수행하였고, 마지막으로 최적의 감쇠성능을 발휘하는 것으로 나타난 Passive-off 조건으로 스마트 제진장치를 설치하여 풍진동에 대한 제진성능을 확인하였다. 각 실험에서 얻어진 결과는 다음과 같다.

1. 케이블 강체모형실험에서는 케이블 간격을 3D~13D 범위에서 2D간격으로 실험을 수행하였다. 실험결과 웨이크갤로핑은 케이블 간격이 3D~7D 조건일 때 발생하며 케이블의 Scruton수가 높을 경우 웨이크갤로핑이 저풍속에서 발생하기 어렵다는 사실을 확인하였다.

2. 케이블 강체모형 실험결과를 참고하여, 케이블 탄성체모형실험을 3D~7D 조건에서 Scruton수를 낮게 하여 진동특성을 파악하였다. 실험결과 케이블 탄성체모형실험에서는 케이블 강체모형실험과 달리 다양한 모드의 와류진동과 웨이크갤로핑이 발생함을 확인하였다. 또한, 케이블 sag의 영향으로 1차모드의 웨이크갤로핑보다 고차모드의 웨이크갤로핑이 더 분명하게 발생할 수 있는 것으로 나타났다.

3. 스마트 제진장치의 감쇠성능을 확인하기 위하여 풍속을 증가시켜가며 케이블에 강제진동을 가한 후 제진장치의 입력전압별 자연감소응답을 측정하였다. 실험결과 모든 풍속에서 입력전압이 0V(Passive-off)인 경우에 감쇠비가 최대가 되는 것으로 나타나 제진장치에 전압을 입력/제어하는 전자기유도부(electromagnetic induction (EMI) system)는 적용할 필요가 없는 것으로 나타났다.

4. 스마트 제진장치의 감쇠성능이 최대가 되는 Passive-off상태에서의 제진성능을 확인하기 위해서 제진장치 적용전과 적용후(Passive-off) 케이블 탄성체모형의 진동실험을 수행하였다. 실험결과 스마트 제진장치를 적용한 수직모드에서는 모든 풍속범위에서 진동이 거의 발생하지 않아 우수한 제진성능을 나타냈다. 한편 스마트 제진장치 Passive-on(12V)상태에서의 제진실험을 통해 적정값 이상의 입력전압이 가해질 경우 제진장치가 강체(rigid body)처럼 작동하게 되고 케이블에서는 그 지점이 절점이 되는 새로운 모드의 진동이 발생하게 됨을 확인하였다.

7 절. 신개념 스마트 제진장치 설계 및 제작 지침서

7.1. MR 감쇠기

7.1.1. 일반사항

(1) 적용범위

본 지침서는 MR 유체를 이용하여 감쇠력을 적절히 조절할 수 있는 MR 감쇠기의 설계 및 제작에 대한 것이다.

(2) 일반사항

① MR 유체란 미세한 자성을 띤 입자를 분산시킨 유체로 평소에는 일반적인 점성 유체처럼 자유롭게 유동하다가 자기장이 가해지면 자성을 띤 입자들이 정렬을 해서 유체의 유동을 제한하고 결과적으로 항복강도를 발생시키는 유체를 말한다.

② 감쇠기란 구조물의 운동에너지를 흡수, 산란시켜 에너지를 소산시켜 주는 장치로 구조물의 운동에너지를 소산시킴으로써 구조물의 진동을 약화시키게 된다.

③ MR 감쇠기의 사양은 사용용도에 따라 달라지므로 이를 먼저 명확히 해야 한다.

④ MR 감쇠기의 감쇠력은 제어력과 비제어력으로 구분되며 비제어력은 소성점성력과 마찰력으로 나누어진다.

⑤ MR 감쇠기의 동적범위는 제어력의 비제어력에 대한 비로서 표현되며, 동적범위가 클수록 성능 및 실제 적용성이 좋기 때문에 중요한 설계 조건이 된다.

7.1.2. MR 감쇠기 설계

(1) 사용용도, 대상구조물에서 필요로 하는 제어력, 요구최대변위, 동적범위 등을 계산한다. 이는 외부하중을 적절히 고려하여 구조해석 및 동특성 해석을 통하거나 실험을 통해 산정한다.

(2) (1)에서 구한 요구제어력에 적절한 안전율을 고려하여 설계 제어력을 산정한다.

(3) 항복응력을 가정하여 적절한 MR 유체를 선정한다.

(4) 감쇠기의 주요치수를 결정한다.

감쇠기의 주요치수는 피스톤 헤드의 직경, 피스톤 로드의 직경, pole의 유효길이, 간극 크기 등이 포함되며 동적범위가 최대가 되도록 하는 최적화 문제를 설정하여 계산한다.

(5) 자기회로를 구성하는 설계변수들의 치수를 결정한다.

자기회로를 구성하는 설계변수에는 외부 링의 두께, 마찰물질의 두께, 피스톤 코어의 두께, 자기회로 길이, 코일 턴수, 직경 등이 포함되며 전자기력 해석을 통해 계산한다.

(6) (4), (5)에서 구한 설계변수들이 (1), (2), (3)의 제한조건을 만족하는지 확인한다. 또한 기하학적 구성 가능 여부를 확인한다. 만족하지 못하면 (3) 혹은 (5)로 돌아가 설계변수들을 재계산한다.

이상의 과정을 그림 3.7.1.1의 flow chart로 정리하였다

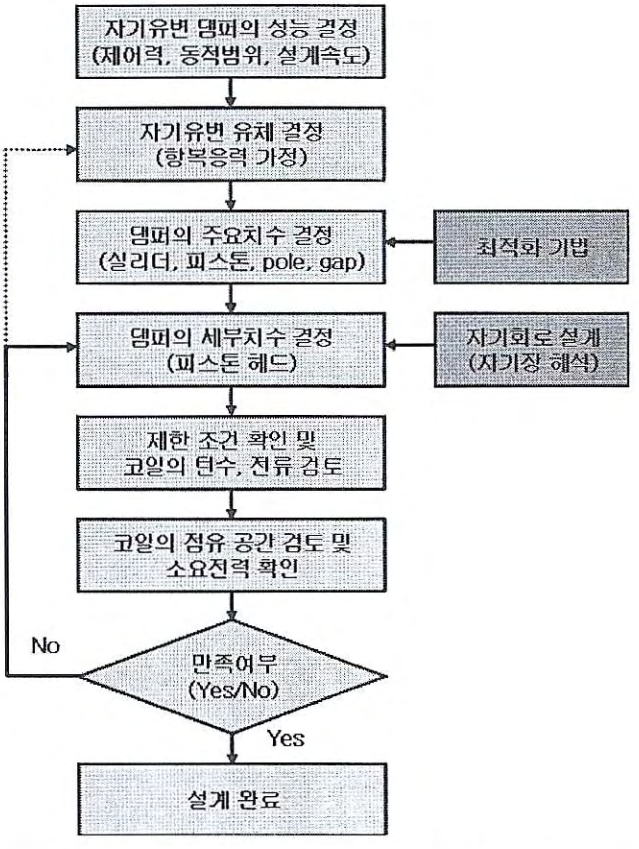


그림 3.7.1.1 Design flow chart for MR dampers

7.1.3. 5kN급 MR 감쇠기 설계/제작 예시

이상의 일련의 설계/제작과정을 통해 5kN급 MR 감쇠기를 설계/제작하였다. 본 절에서는 이에 대해 설명한다.

(1) 1단계 최적 설계

성능이 우수한 MR 감쇠기를 설계하기 위해서는 의 동적 범위가 크면서, 기하학적 제한조건을 만족하는 설계변수들을 찾아야 한다. 따라서 최적설계 식은 아래와 같이 정의할 수 있다.

Object function: Max. D (> 10) (3.7.1.1)

Constraint condition

- Controllable force $F_\tau \fallingdotseq$ 5,000 N @ 60 mm/s
- Geometric constraint Eq. (4) $wh^2 = \frac{12k}{c}(\frac{\eta}{\tau_0})(\frac{F_\tau}{F_\eta})Q$

Design variables

- D_1 : Diameter of the piston head
- D_0 : Diameter of the piston rod
- L : effective axial pole length ($= \sum L_i$, i=1,3)
- h : gap size ($= (D_2-D_1)/2$)

위 식 중에서 설계속도(v_0), 자기유변 유체의 항복응력(τ_0)및 소성 점성도(η_s)는 다음과 같이 가정하여 사용하였다. 항복응력은 MR 유체에 작용하는 자기장의 세기에 따라 결정되는 유체 고유의 특성이며, 소성 점성도와 함께 유체의 제조자가 제공하고 있다. 본 연구에선 Lord 사의 MRF-336으로 가정하였다.

- v_0 = 60 mm/s
- τ_0 = 40 kPa @ 150 kA/m - η_s = 1.5 Pa · s

식 (3.7.1.1)의 최적설계 식을 풀기 위해 MATLAB® Optimization Toolbox에서 제공하고 있는 'fmincon'함수를 사용하였으며, 이때 사용된 설계변수의 초기조건은 다음과 같다.

- 10 mm < D_1 < 50 mm
- 10 mm < D_0 < 30 mm
- 3 mm < L < 100 mm
- 0.5 mm < h < 2 mm

해석결과를 통해 얻어진 설계변수 최적값을 통해 [D_1 D_0 L h] ≒ [46 22 86 2] mm로 결정하였으며, 이때 동적 범위 및 제어력은 각각 약 17 및 4,800 N이다.

(2) 2단계 최적 설계

1단계 최적설계에서는 감쇠기의 실린더 및 피스톤의 크기, 자기장이 형성되는 pole 및 gap의 크기를 결정하였다. 2단계는 1단계에서 결정된 최적값을 이용하여 세부적인 피스톤 헤드의 형상을 결정하는 단계로서, 자기 회로의 설계 및 해석을 통해 피스톤 헤드의 주요 설계변수를 결정한다. 단, 이때 주의할 점은 1단계에서 가정한 유체의 항복응력이 발생할 수 있는 자기유도가 형상되어야만 1단계 결과가 유효할 수 있다. 즉 τ_0 = 40 kPa @ 150 kA/m를 만족하는 자기회로를 구성해야 한다. 또한 자기포화를 고려하기 위해 자기밀도는 1.5 T이하로 설계되어야 한다. 그림 3.7.1.2에 보는 바와 같이 피스톤 헤드의 stage가 3개인 경우, 2단계에서 정의된 설계변수는 다음과 같다.

- t_r : thickness of outer ring
- t_p : thickness of the frictional material (plastic)
- t_c : thickness of the piston core
- $L_{1,3}$: effective axial pole length
- L_2 : length
- N : coil turns

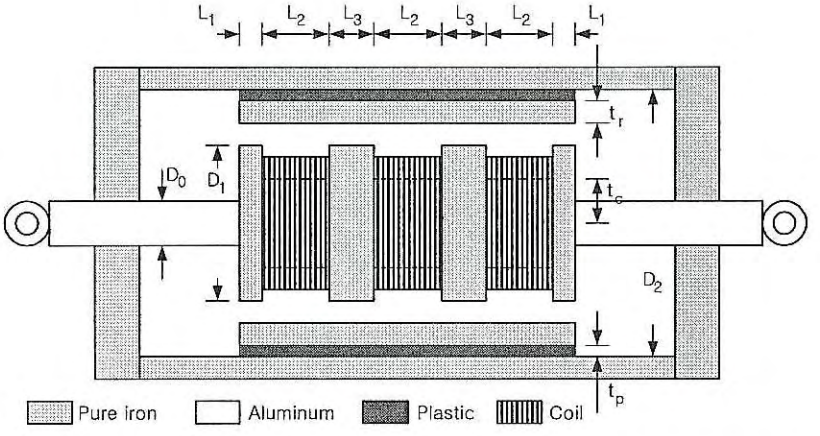


그림 3.7.1.2 Conceptional design for 5,000 N MR dampers

자기 회로가 구성되는 부분은 순철의 사용을 가정하였으며, 구성되지 않는 부분은 반자성체인 알루미늄을 사용하여 누자를 방지하였다. 또한 내부 링과 실린더 사이에는 플라스틱을 삽입하여 누자를 최소화하고자 하였다. Stage가 1개인 경우와 2개인 경우, 자기장 해석을 통해 제한조건을 만족할 수 없음을 확인하였으므로 stage가 3개인 경우의 결과를 보이고자 한다. 자기해석을 위해 전자기력 해석 프로그램인 Finite Element Method Magnetics (version 3.4)를 사용하였다. 감쇠기가 상하 대칭이므로 상부 반 부분만 모델링하여 해석하였으며, 그 결과는 그림 3.7.1.2와 같다. 이때 사용된 코일의 턴수 및 전류는 각각 200 turns 및 3 A이다.

그림 3.7.1.3에서 보는 바와 같이 자기밀도는 1.5 T이하이므로 제한조건을 만족하는 반면, MR 유체가 작용하는 자기유도 세기는 150 kA/m를 만족하지 못하는 것을 알 수 있다. 다음은 사용된 코일의 양이 실제 감길 수 있는 공간을 확인해야 하며, 확인결과 20 AWG 코일이 230 turns 감길 수 있음을 확인하였다. 따라서 코일이 230 turns 사용할 경우, 해석을 통해 가능성을 확인해 보았다 (그림 3.7.1.4 참조). 그림 3.7.1.4를 살펴보면, MR 유체가 작용하는 자기유도 세기 제한조건 150 kA/m는 만족하는 반면, 자기밀도는 1.5 T이하 조건은 만족하지 못하는 것을 알 수 있다.

위에서 만족하지 못하고 있는 제한 조건을 만족하는 감쇠기를 설계하기 위해 stage가 4개인 경우에 대해 해석을 수행하였다. 해석한 결과는 그림 3.7.1.5와 같다. 이 경우 위에서와 똑같은 순서가 적용되었으며, 코일의 점유공간을 고려하여 21 AWG 코일이 230 turns 감기는 것으로 결정하였다. 그림 3.7.1.5에서 확인되는 바

와 같이 stage가 4개인 경우 두 가지 제한 조건을 모두 만족하고 있음을 알 수 있으며, 그 결과 최종적으로 설계된 MR 감쇠기의 각 설계변수의 치수는 그림 3.7.1.6과 같이 결정될 수 있다.

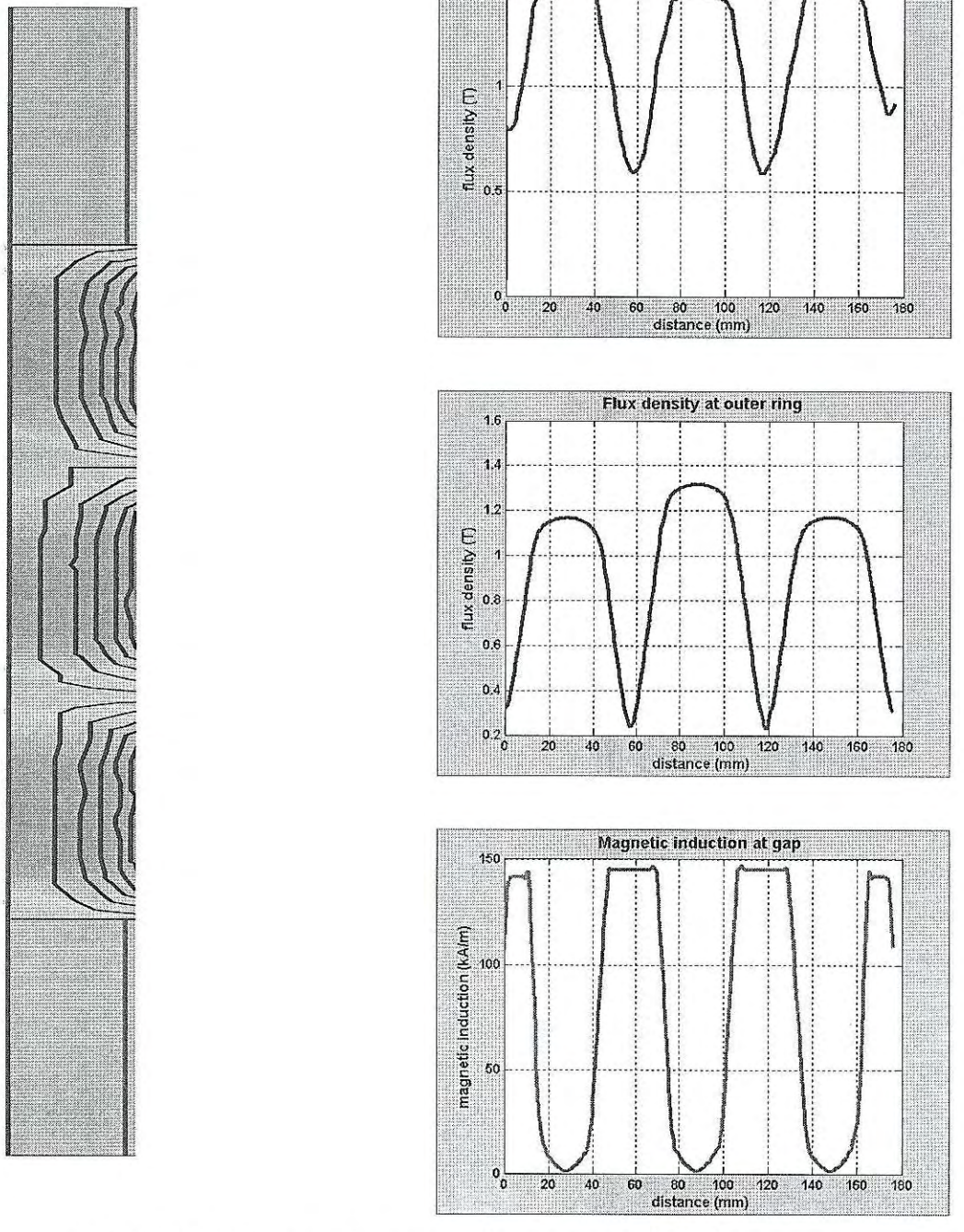


그림 3.7.1.3 First simulation results in the 2nd design stage

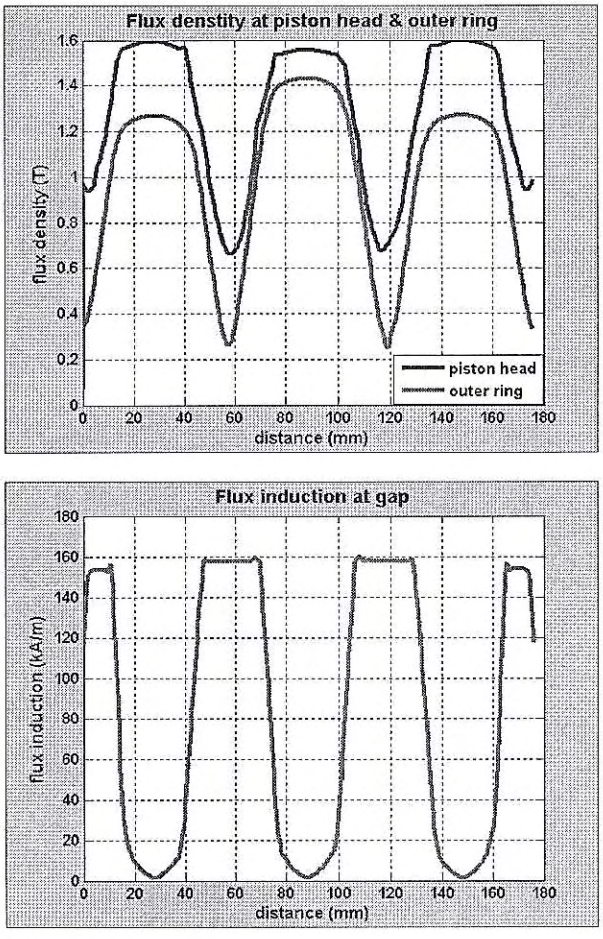


그림 3.7.1.4 Second simulation results in the 2nd design stage

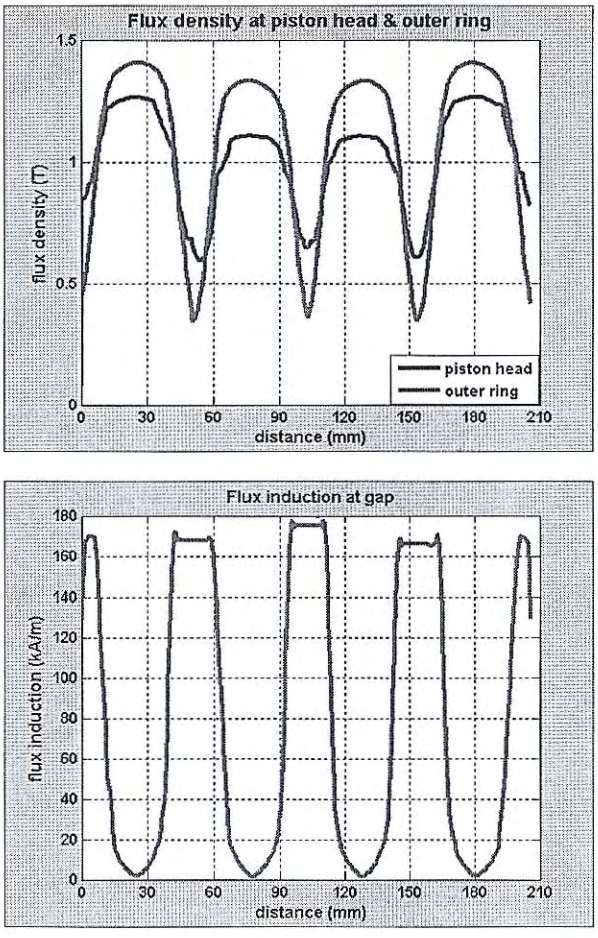


그림 3.7.1.5 Third simulation results in the 2nd design stage

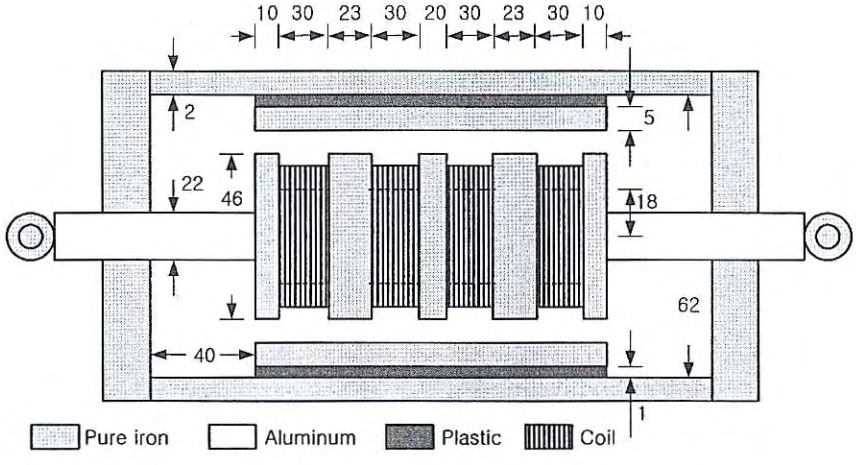


그림 3.7.1.6 Final conceptional design for 5,000 N MR dampers

(3) 3단계 민감도 해석

1, 2단계에서 MR 감쇠기의 설계 및 제작에 필요한 치수를 산정하였다. 본 단계에서는 3개의 설계변수에 대해 민감도 해석을 수행하였다. 선정된 설계변수는 t_p, t_r 및 t_c이며, 설계변수의 범위는 아래와 같이 고려하였다. 민감도 해석 결과를 표 3.7.1.1에 정리하였다.

- t_p = [0 0.5 1.0 1.5 2.0] mm
- t_r = [3 4 5 6 7] mm
- t_c = [14 16 18 20 22] mm

표 3.7.1.1 Sensitivity analysis for 5 kN MR damper

t_p [mm]	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	
H [kA/m]	165	161	161	160	157	> 150
B_outer [T]	0.67	1.41	1.41	1.41	1.42	< 1.5
B_piston [T]	1.32	1.28	1.27	1.26	1.26	< 1.5
t_r [mm]	3	4	5	6	7	
H [kA/m]	128	152	161	160	161	> 150
B_outer [T]	1.78	1.63	1.41	1.18	1.00	< 1.5
B_piston [T]	1.03	1.20	1.27	1.29	1.29	< 1.5
t_c mm]	14	16	18	20	22	
H [kA/m]	139	156	161	160	163	> 150
B_outer [T]	1.19	1.32	1.41	1.44	1.57	< 1.5
B_piston [T]	1.69	1.50	1.27	1.04	0.89	< 1.5

(4) MR 감쇠기의 상세 설계 및 제작

MR 감쇠기의 제작은 (주) 동양시스템에서 수행하였다. 제작업체와의 설계 및 제작 논의를 거쳐 최종적 제작도면을 완성하였다(그림 3.7.1.7 및 그림 3.7.1.8 참조). 중요 변경사항은 피스톤 헤드의 코일 장착에 많은 어려움이 예상되어 L1의 치수를 10 mm에서 12 mm로 증가시켰으며, 코일설치 공간의 확보를 위해 코일을 22 AWG에서 23 AWG로 변경하였다. 이외의 내용은 변화가 없다. MR 유체는 미국 Lord사의 상용제품을 입수하여 MRF-140CG 또는 MRF-132DG를 사용하였다.

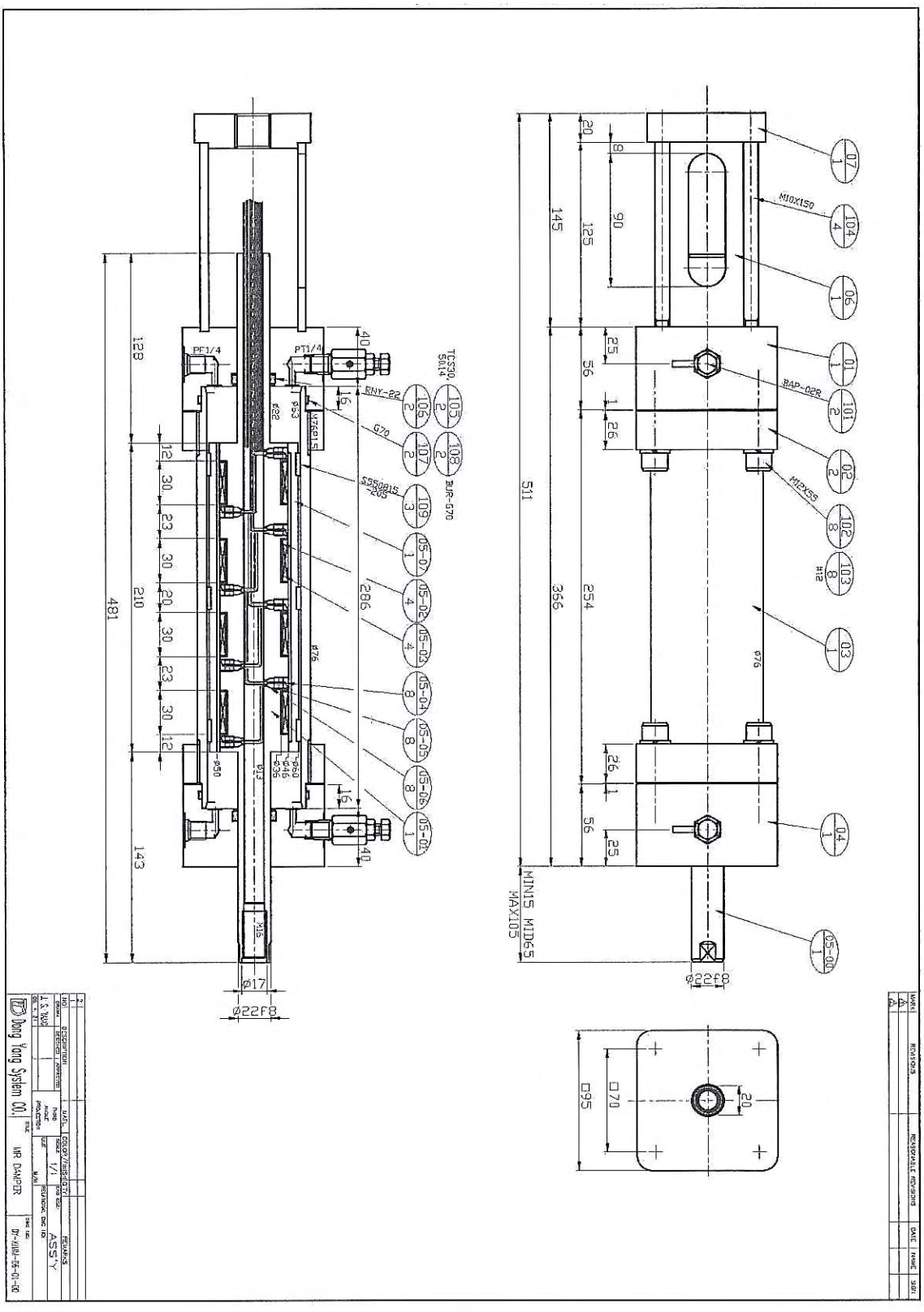


그림 3.7.1.7 Drawings for 5 kN MR damper (1/2)

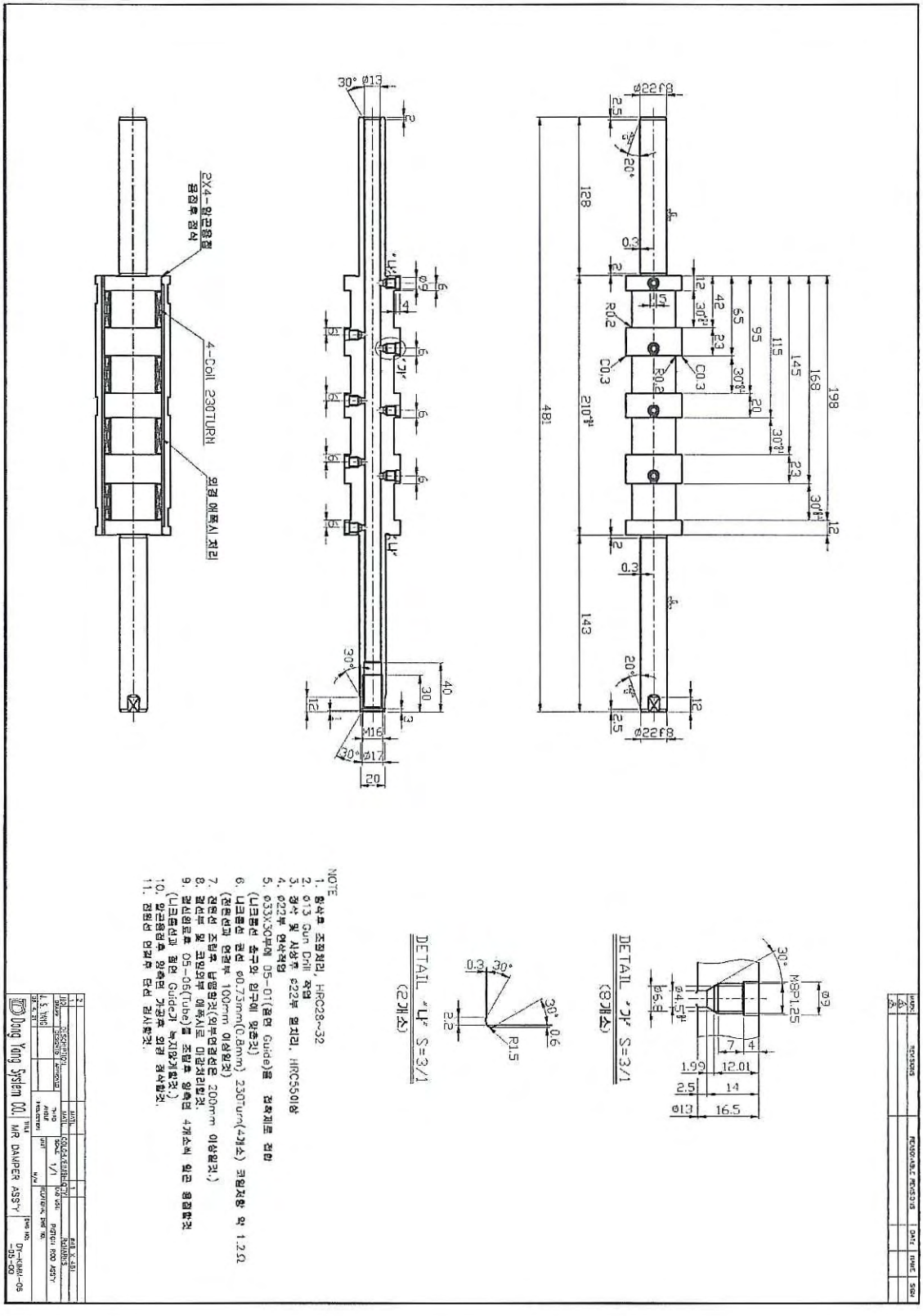


그림 3.7.1.8 Drawing for 5 kN MR damper (2/2)

그림 3.7.1.9는 제작도면을 기준으로 자기장 해석을 한 결과를 보여주고 있다. 또한 그림 3.7.1.10 ~ 그림 3.7.1.13는 MR 감쇠기의 부품 모습을 보여주고 있다.

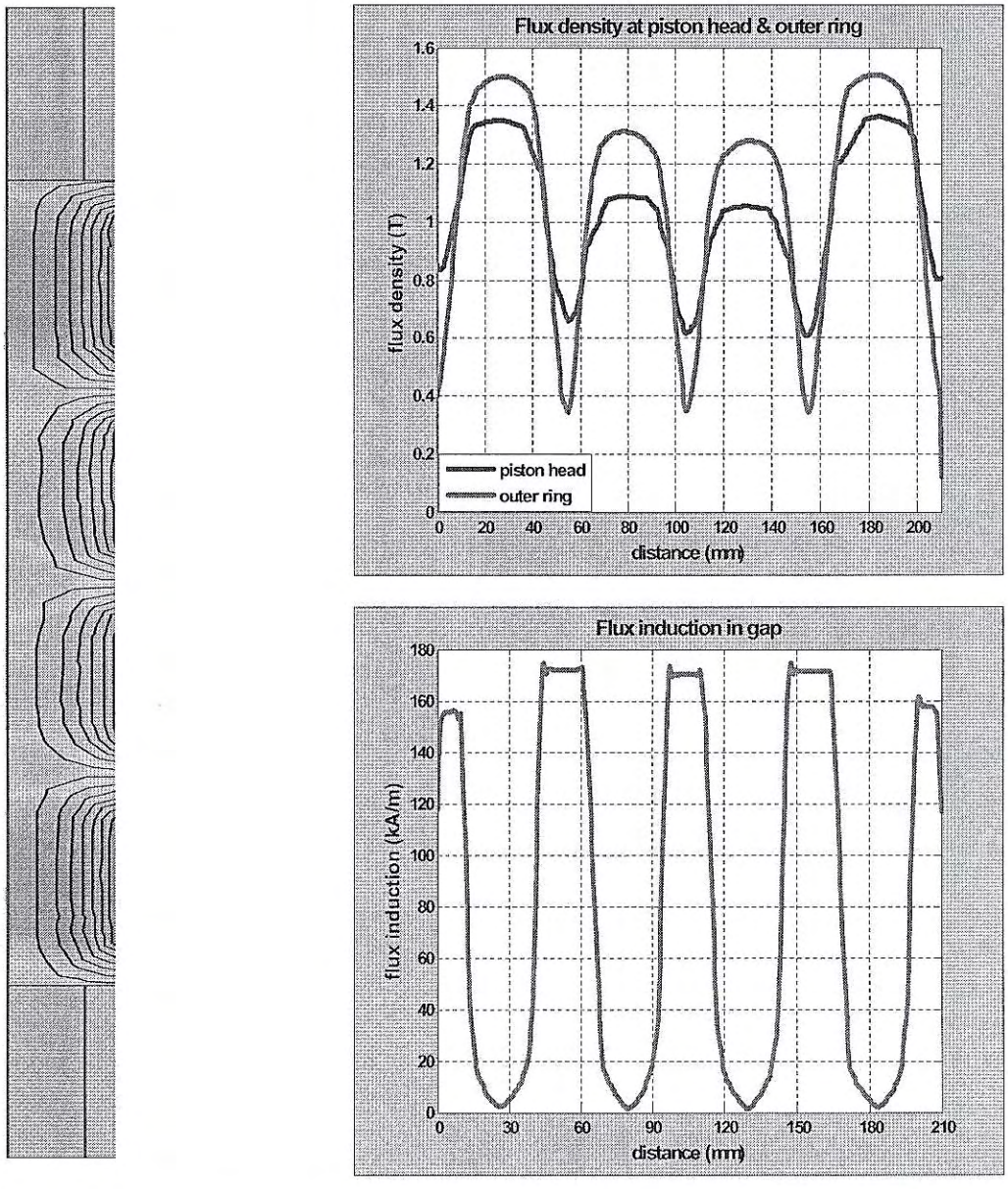


그림 3.7.1.9 Final simulation results

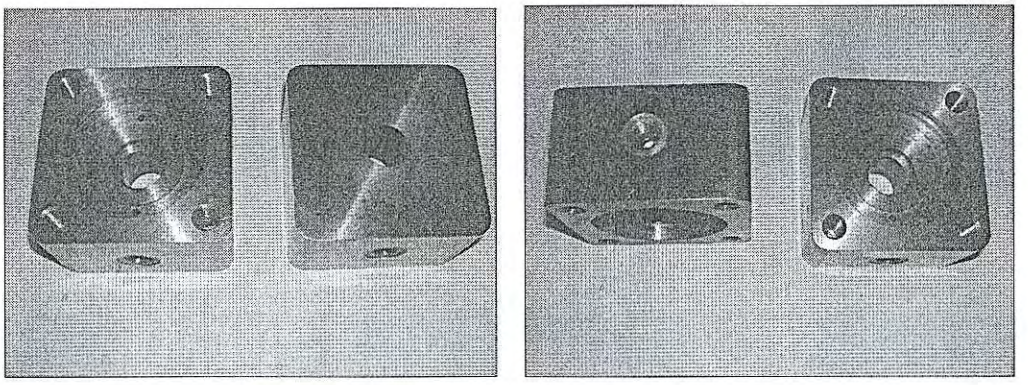


그림 3.7.1.10 Parts of the MR damper (1/4)

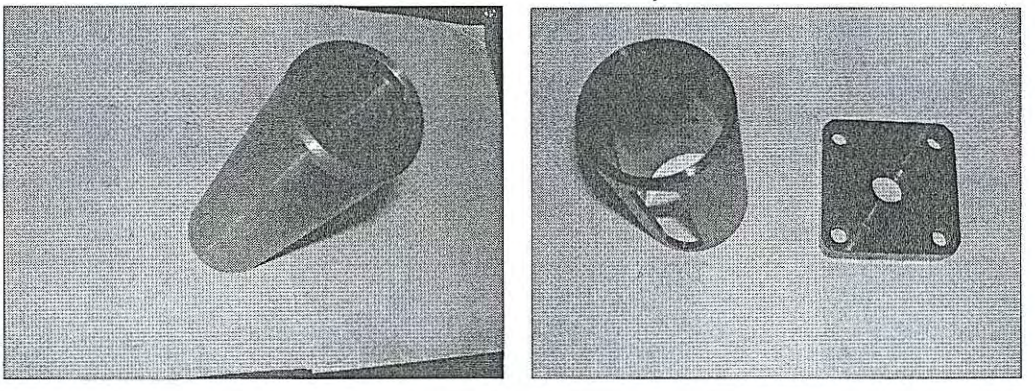


그림 3.7.1.11 Parts of the MR damper (2/4)

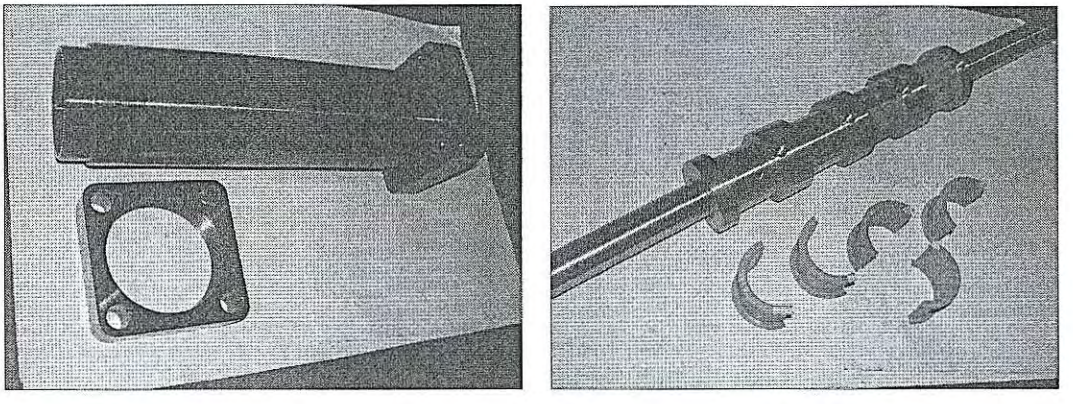


그림 3.7.1.12 Parts of the MR damper (3/4)

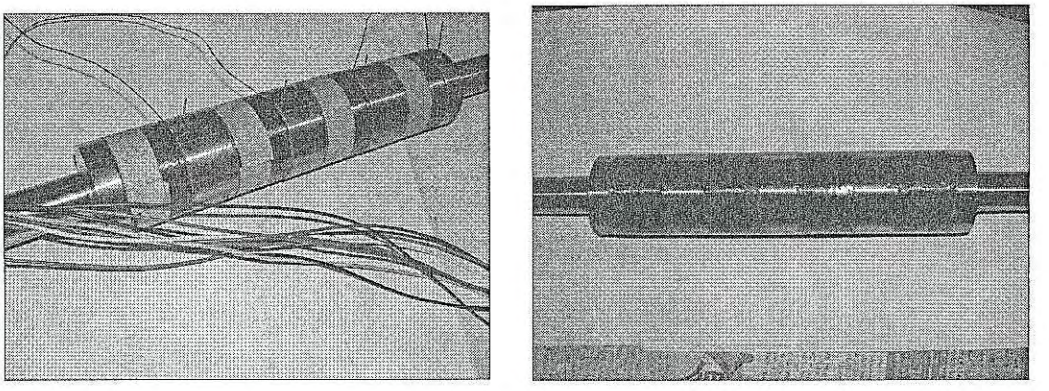


그림 3.7.1.13 Parts of the MR damper (4/4)

7.2. MR 감쇠기와 EMI 시스템의 통합설계

7.1.1. 일반사항

(1) 적용범위

본 지침서는 MR 감쇠기와 MR 감쇠기에 인가해주는 전압을 생성하기 위한 장치인 EMI 시스템의 통합 설계 및 제작에 대한 것이다.

(2) 일반사항

① EMI 시스템은 자기장 내에서 코일을 움직이게 되면 코일 주위의 자기장의 변화로 인해 코일에 유도전류가 흐르게 되는 페러데이의 전자기 유도법칙을 이용한 장치이다.

② EMI 시스템은 크게 자기장을 형성해주는 영구자석과 원활한 코일의 움직임을 위한 솔레노이드로 구분된다.

③ EMI 시스템에서 생성되는 유도전류는 자석의 자속밀도, 코일의 직경, 턴수 등의 함수로 나타나기 때문에 이것들이 주 설계변수가 된다.

④ EMI 시스템은 전류를 생성해 MR 감쇠기에 전달해주기 때문에 MR 감쇠기와 하나의 회로를 구성하게 된다. 따라서 MR 감쇠기와 구성된 폐회로 내에 흐르는 전류를 최대화하는 것이 본 설계의 목적이다.

7.1.2. MR 감쇠기와의 통합설계

(1) 7.1.1. 절의 (1)~(4)의 과정을 통해 MR 감쇠기의 주요치수를 계산한다.

(2) EMI 시스템의 주요 치수를 결정한다.

EMI 시스템의 주요치수는 솔레노이드의 폭과 높이, 코일의 직경, 코일 턴수 등을 포함하며 폐회로 내에 흐르는 유도전류가 최대가 되도록 하는 최적화 문제를 설정하여 계산한다.

(3) MR 감쇠기의 자기회로를 구성하는 설계변수들의 치수를 결정한다.

자기회로를 구성하는 설계변수에는 피스톤 코어의 두께, 자기회로 길이, 코일 턴수, 코일의 직경 등이 포함되며 폐회로 내에 흐르는 유도전류가 최대가 되도록 전자기

력 해석을 통해 계산한다.

(6) FEM Magnetics 해석을 통해 MR 감쇠기의 외부 링의 두께, 마찰물질의 두께, 유효 축방향 pole의 길이를 결정한다.

7.1.3. 5kN급 MR 감쇠기 설계/제작 예시

이상의 일련의 설계/제작과정을 통해 2kN급 MR 감쇠기와 이를 위한 EMI시스템을 통합 설계/제작하였다. 본 절에서는 이에 대해 설명한다.

(1) MR 감쇠기의 설계 사양

cable용 MR 감쇠기를 개발하기 위해서는 먼저 개발하고자 하는 MR 감쇠기의 설계사양을 결정해야 한다. 이를 위해 현대건설기술연구소에 있는 사장교용 케이블을 실험대상체로 선정하였다(그림 3.7.2.1 참조). 케이블의 특성치를 표 3.7.2.1에 정리하였다. 대상 케이블에 대한 각종 실험 및 해석으로부터 결정된 MR 감쇠기의 요구사양 및 설계사양은 아래와 같다.

- 요구 제어력: 1,100 N @ 60 mm/s
- 요구 최대 변위: ± 15 mm
- 설계 제어력: 2,000 N @ 60 mm/s (안전율 약 2.0 고려
- 설계 허용 변위: ± 20 mm

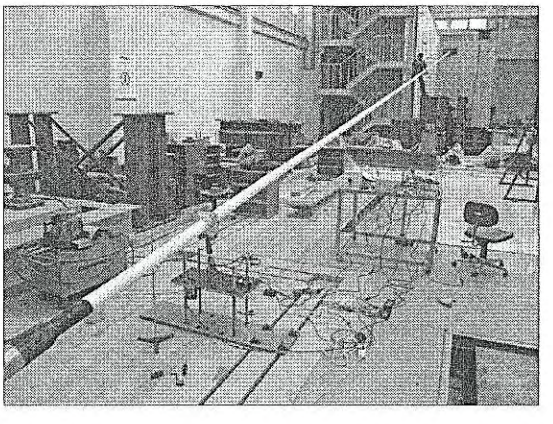


그림 3.7.2.1 Stay cable for MR damper testing

표 3.7.2.1 Cable characteristics of the stay cable

Parameter	Value
Length	44.7 m
Mass per length	20.3 kg/m
Tension	50 ton
Damping ratio	0.08 %
Fundamental frequency	1.81 Hz

(2) 1단계

위에서 제시된 설계사양을 만족하면서 동적범위(dynamic range)가 최대인 MR 감쇠기를 설계하기 위해서 그림 3.7.2.2와 같은 multi-stage를 갖는 감쇠기형상을 기본으로 하였다. 감쇠기의 작용력은 제어력(controllable force, F_τ)과 비제어력(uncontrollable force)으로 나눌 수 있으며, 비제어력은 다시 plastic viscous force (F_η)와 friction force(F_f)로 나눌 수 있다. 그림 3.7.2.3은 감쇠기의 작용력을 도시화하여 보여주고 있다.

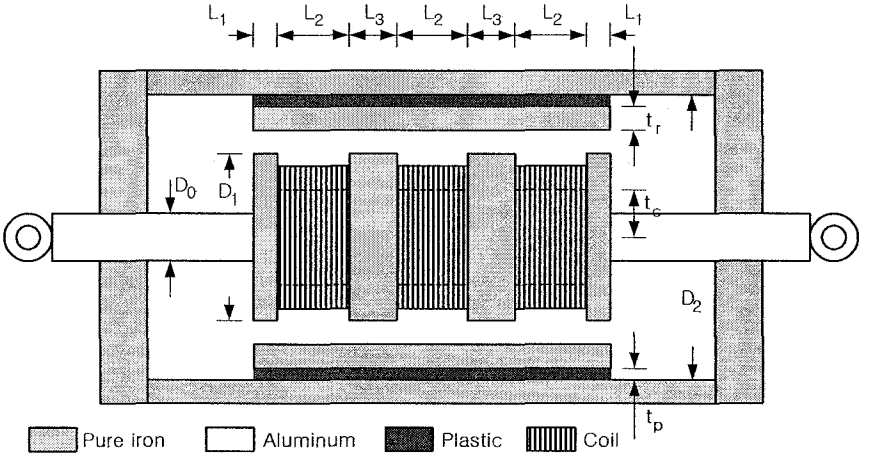


그림 3.7.2.2 Basic model for conceptional design of MR dampers

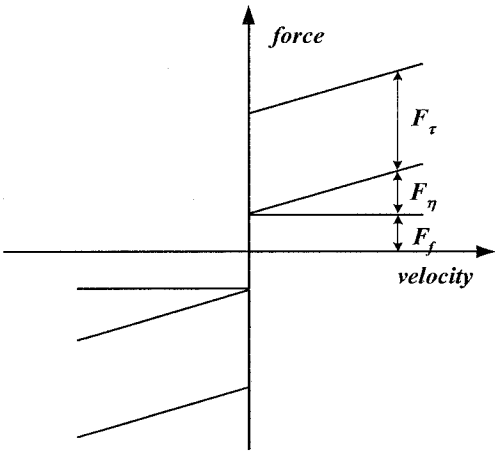


그림 3.7.2.3 Illustration of force decomposition of MR dampers [Yang, 2001]

동적범위(dynamic range, D)는 제어력과 비제어력의 비로서 나타낼 수 있으며, 감쇠기가 얼마나 잘 설계되었는지를 나타내는 인자로 사용될 수 있다. 다음의 식 (3.7.2.1)로 나타낼 수 있다.

$$D = \frac{F_\tau}{F_{uc}} = \frac{F_\tau}{F_\eta + F_f} \tag{3.7.2.1}$$

제어력과 비제어력은 식 (3.7.2.2)과 (3.7.2.3)과 같이 표현할 수 있다.

$$F_\tau = c\frac{\tau_0 L A_p}{h} = \left(2.07 + \frac{12Q\eta}{12Q\eta + 0.4wh^2\tau_0}\right)\frac{\tau_0 L A_p}{h} \tag{3.7.2.2}$$

$$F_\eta = \left(1 + \frac{whv_0}{2Q}\right)\frac{12\eta Q L A_p}{wh^3} \tag{3.7.2.3}$$

여기서, 각 변수는 다음과 같이 정의된다.

- h : gap size (= $(D_2-D_1)/2$)
- w : mean circumference of the damper's annular flow path
- τ_0 : fluid yield stress

- η : plastic viscosity
- A_p : cross section area of the piston head
- v_0 : piston head velocity
- Q : volume flow rate (= $A_p \times v_0$)
- L : effective axial pole length (= $\sum L_i$, i=1,3)

식 (3.7.2.1)과 (3.7.2.2)로부터 식 (3.7.2.4)와 같은 기하학적 제한조건이 유도될 수 있다.

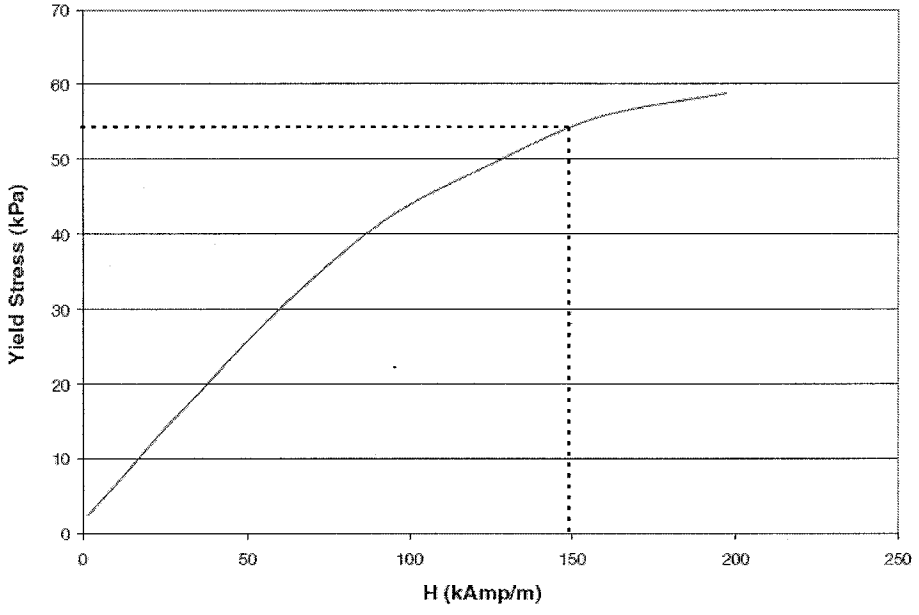
$$wh^2 = \frac{12k}{c}\left(\frac{\eta}{\tau_0}\right)\left(\frac{F_\tau}{F_\eta}\right)Q \qquad (3.7.2.4)$$

여기서, $k = 1 + (whv_0)/(2Q)$

감쇠기의 기본설계는 단계별로 수행되었다. 먼저 주요 기하학적 치수를 산정하기 위해 최적화 문제를 다음과 같이 정의하였다.

- Object function: Max. D (동적범위)
- 제한 조건
  - 제어력 $F_\tau \fallingdotseq$ 2,000 N @ 60 mm/s (허용오차 ± 20%)
  - 식 (3.1.6.9) $wh^2 = \frac{12k}{c}\left(\frac{\eta}{\tau_0}\right)\left(\frac{F_\tau}{F_\eta}\right)Q$
- 설계 변수
  - D_1 : Diameter of the piston head
  - D_0 : Diameter of the piston rod
  - L : effective axial pole length (= $\sum L_i$, i=1,3)
  - h : gap size (= $(D_2-D_1)/2$)
- 가정 변수
  - v_0 = 60 mm/s (설계 속도)
  - τ_0 = 50 kPa @ 150 kA/m (그림 3.7.2.4 참조)

· η = 0.280 Pa · s



3.7.2.4 Yield stress vs. magnetic field strength for MRF-140CG

위에서 정의된 문제를 풀기 위해 MATLAB Optimization toolbox에서 제공하고 있는 'fmincon' 함수를 사용하였다. 각 설계변수의 상/하한치는 다음과 같이 설정하였다.

· 10 mm < D_I < 30 mm
· 5 mm < D_O < 10 mm
· 5 mm < L < 20 mm
· 0.5 mm < h < 1 mm

최적화 문제의 해법을 통해 얻은 설계변수들의 결과는 다음과 같다.

· [D_I D_O L h] = [30.0 10.0 10.0 0.5] mm
· $D \fallingdotseq 10.2$
· F_τ = 1,400 N

(3) 2단계

EMI 시스템과 MR 감쇠기가 결합된 폐회로 내에 흐르는 유도전류는 다음 식과 같이 표현된다.

$$i = \frac{\varepsilon}{R_E + R_M} \tag{3.7.2.5}$$

여기서 ε 는 유도기전력, R_E 와 R_M 는 EMI와 MR 감쇠기의 저항값이다. 실제적으로 코일과 MR감쇠기의 인덕턴스도 고려해야 하지만, 여기에서는 저항값에 비해 작은 값이기 때문에 무시하였다.

유도기전력의 최대값은 다음 식과 같이 표현된다.

$$\varepsilon_{\max} = -N_E B\left(\frac{dA}{dt}\right)_{\max} = -N_E Bw\left(\frac{dx}{dt}\right)_{\max} \tag{3.7.2.6}$$

성능검증 실험을 위한 EMI 시스템의 변위는 8mm, 적용 대상인 케이블의 고유진동수는 1.81 Hz, 자속밀도는 0.6T이고, 코일의 턴수는 $N_E = (h_c / d_E)n_t$ 와 같이 표현되기 때문에 식 (3.7.2.6)은 다음과 같이 계산된다.

$$\varepsilon_{\max} = -0.0546 w h_c n_t / d_E \tag{3.7.2.7}$$

EMI시스템의 코일의 저항은 다음과 같이 계산된다.

$$R_E = \rho\frac{l}{S} = 1.72\times10^{-8}\frac{N_E l_E}{\pi d_E^2/4} = 5.50\times10^{-8}\frac{h_c n_t(2w + 0.02 + 2\pi n_t d_E)}{\pi d_E^3} \tag{3.7.2.8}$$

여기서, ρ 는 저항성(구리 1.72×10^{-8}), l 과 S는 코일의 길이와 단면적이고,

l_E 는 코일 한턴에 해당하는 코일의 평균길이이다(그림 3.7.2.5 참조).

마찬가지로 MR 감쇠기의 코일 부분 저항은 다음과 같다.

$$R_M = 1.72\times10^{-8}\frac{N_M l_M}{\pi d_M^2/4} = 1.72\times10^{-8}\frac{(D_1^2 - t_c^2)L_2}{d_M^4} \tag{3.7.2.9}$$

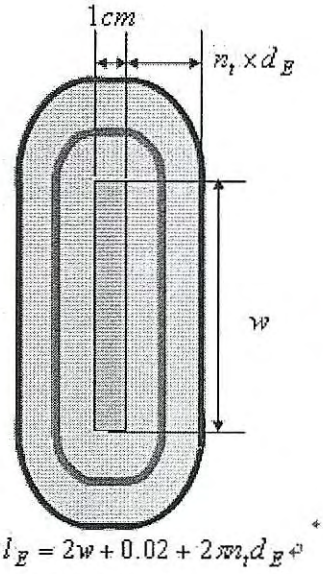


그림 3.7.2.5 Averaged length of one turn of EMI part coil (red line)

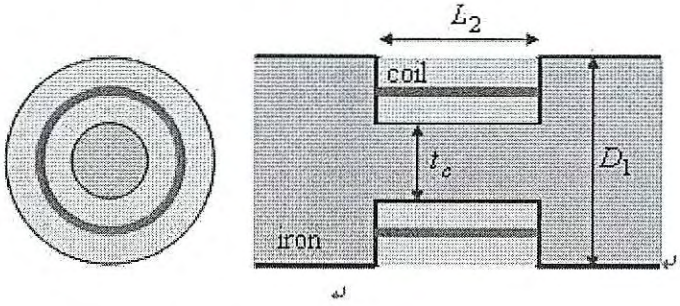


그림 3.7.2.6 Cylinder, spool, and coil of MR damper

그림 3.7.2.6에서 MR 감쇠기 코일의 턴수 N_M 과 한턴의 평균길이 l_M 은 다음식으로 계산된다.

$$N_M = \frac{(D_1 - t_c)/2}{d_M}\times\frac{L_2}{d_M} = \frac{(D_1 - t_c)L_2}{2d_M^2} \tag{3.7.2.10}$$

$$l_M = \pi\left(\frac{D_1 + t_c}{2}\right) \tag{3.7.2.11}$$

여기에서, 피스톤 헤드의 직경 D_1 은 앞서 설명한 대로 30mm이다.

이상의 조건들을 이용해 다음의 최적화 문제를 설정하여 변수들을 계산하였다.

- Object function: Max. i (유도전류)
- 제한 조건

$$N_M \cdot i \geq H_{fluid} h + H_{steel} L$$

- 설계 변수

w : EMI 코일 폭

h_c : height of the coil core (EMI part),

n_t : outward number of turn for coil (EMI part)

d_E : diameter of EMI part coil

d_M : diameter of MR damper coi

t_c : thickness of the piston core(MRdamper)

L_2 : length of non-effective axial pole (MRdamper)

- 제한조건

50 mm < w < 100 mm, 10 mm < h_c < 25 mm

5 turns < n_t < 80 turns, 0.1 mm < d_E < 1 mm

0.1 mm < d_M < 1 mm , 22 mm < t_c < 28mm

5 mm < L_2 < 12 mm

위에서 정의된 문제를 풀기 위해 MATLAB Optimization toolbox에서 제공하고 있는 'fmincon' 함수를 사용하였다.

최적화 문제의 해법을 통해 얻은 설계변수들의 결과는 다음과 같다.

$$[w \;\; h_c \;\; n_t \;\; d_E \;\; d_M \;\; t_c \;\; L_2] = [100 \;\; 25 \;\; 36(turns) \;\; 1 \;\; 0.32 \;\; 22 \;\; 11] \;\; \text{mm}$$

$$\begin{aligned} &[\;\; N_E \qquad N_M \qquad R_E \qquad R_M \qquad i \qquad N_M \cdot I] \\ &= [703 turn \;\; 423 turn \;\; 8.31\Omega \;\; 7.41\Omega \;\; 0.428 A \;\; 181] \end{aligned}$$

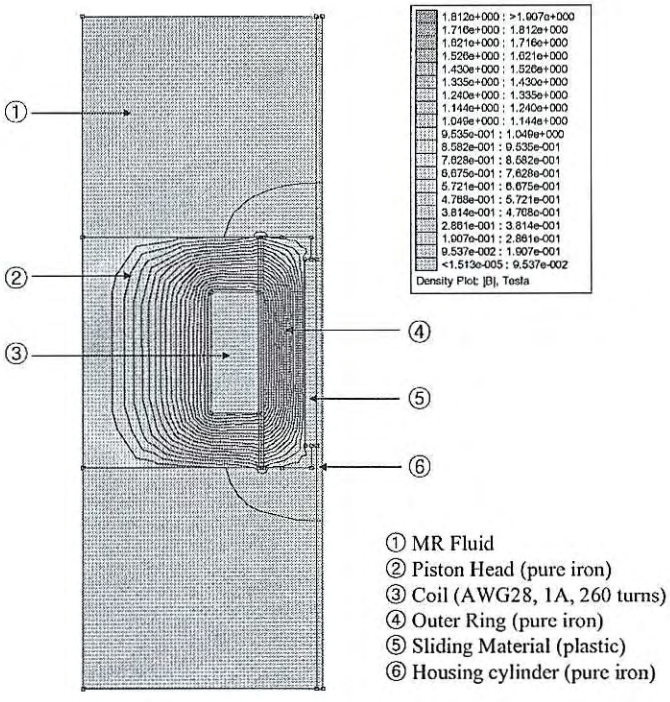
(4) 3단계

3단계에서는 자기회로를 구성하고 있는 설계변수들의 기하학적 치수를 결정하고자 하였다. 제한조건으로서는 MR 유체에 작용하는 자기유도밀도가 150 kA/m 이상이고, 피스톤 부품에 작용하는 자기밀도는 자기포화 현상을 고려하여 1.5 T 이하로 설정하였다. 각 설계변수는 다음과 같이 정의하였다.

- t_r : thickness of outer ring
- t_p : thickness of the frictional material (plastic)
- t_c : thickness of the piston core
- $L_{1,3}$: effective axial pole length
- L_2 : length
- N : coil turns

전자기력 해석을 통해 각 설계변수를 결정하였으며, 사용된 S/W는 Finite Element Method Magnetics Version 4.0이다. 앞서 설계된 MR 감쇠기는 대용량이므로 3개의 spool로 구성된 형태로 설계되었으나, 케이블용 감쇠기의 요구 사양는 소용량이므로 가능하다면 1개의 spool로 설계하도록 시도하였다. 전자기력 해석을 통해 얻은 설계변수는 다음과 같다. 이때 코일의 NI = 260 turn · A이며, N = 260 turn, I = 1 A로 가정하였다

- $[t_r \;\; t_p \qquad t_c \;\; L_1 \;\; L_2 \;\; L_3]$ = [4.0 0.5 11.0 5.0 11.0 5.0] mm



3.7.2.7 Magnetostatic Analysis

그림 3.7.2.7은 전자기력 해석에 사용된 모델과 해석 결과 중 일부를 보여주고 있다. 그림 3.7.2.8와 그림 3.7.2.9은 제한조건으로 고려한 피스톤 부품에 작용하는 자기밀도와 MR 유체에 작용하는 자기유도밀도의 크기를 보여주고 있다. 모두 제한조건을 만족하고 있는 것을 확인할 수 있다.

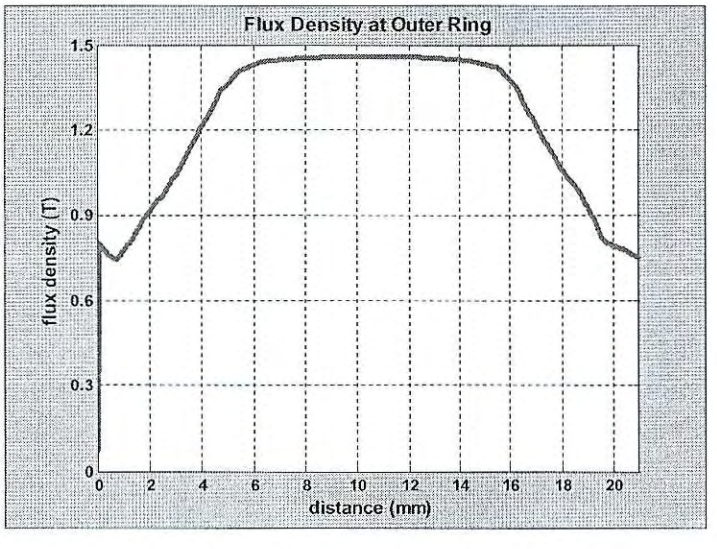


그림 3.7.2.8 Flux density at outer ring

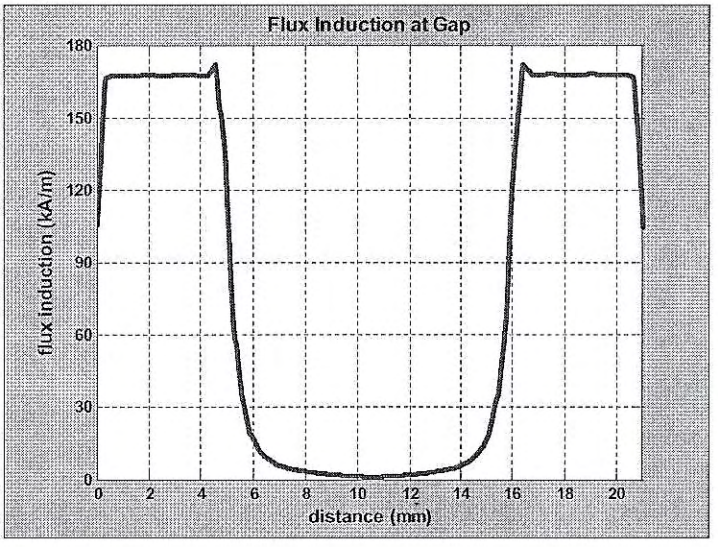


그림 3.7.2.9 Flux induction at gap

코일은 흐르는 전류의 양을 고려하여 28 AWG를 채택하였으며, 코일이 감기는 공간을 검토하였다. 코일의 직경, 단면적등을 고려하여 필요한 공간을 산출하고 확보된 공간과 비교함으로서 검토를 하였다.

- 코일의 직경 (d = 1000×0.00826×1.123^(-AWG)) = 0.32 mm
- 코일의 단면적 (Sc = pi×(d^2)/4) = 0.0809 mm^2
- 필요한 공간 (Sw = 코일턴수×코일 단면적 / Fp(=0.7)) : 30 mm^2
- 확보한 공간 = 11 mm×4 mm = 44 mm^2 → O.K.

이상의 단계로 통해 최종적으로 설계된 기본적인 형상은 그림 3.7.2.10과 같다. 설계를 통해 얻는 결과를 정리하면 다음과 같다.

- RD-1005-3 MR 감쇠기와 유사함
- 단(single) 로드 방식의 감쇠기
- 축압기(accumulator 내부 설치)
- 실린더의 두께: 0.5 mm 이하
- 코일: MR 감쇠기 28 AWG (직경 0.32 mm), 400turns, 공간: 11 mm×4 mm
  EMI 시스템 18 AWG

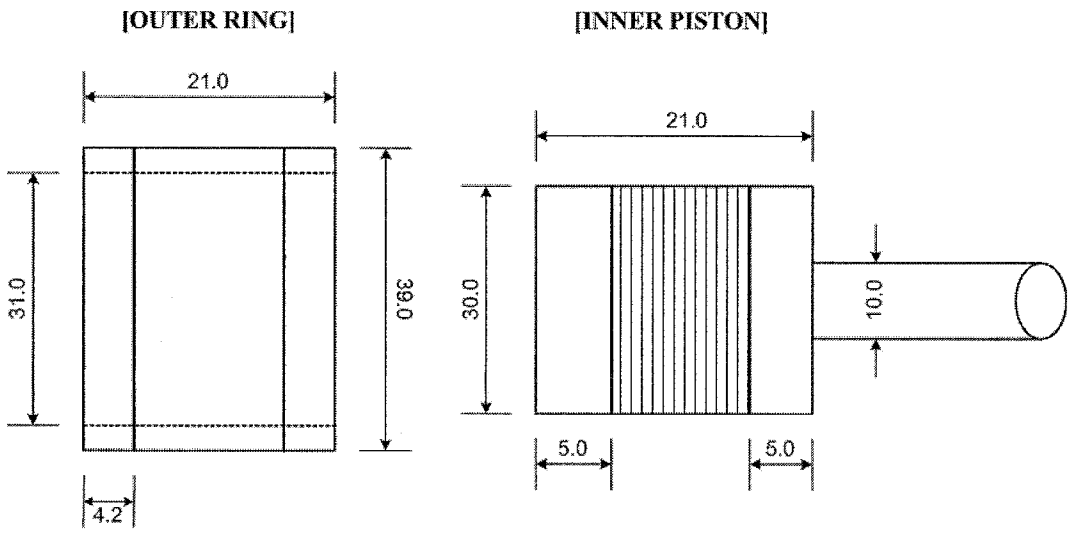


그림 3.7.2.10 Final design

(5) MR 감쇠기 상세설계 및 제작

MR 감쇠기는 기본 설계를 바탕으로 동양시스템(주)에서 상세설계 및 제작을 담당하였다. 앞에서 설계한 MR 감쇠기와 달리 축압기가 실린더 내부에 설치되므로, MR 유체의 충진에 많은 문제점이 발생하였다. 예를 들면 대량생산제품이 아니므로 전용 설비를 마련하기가 어려워 진공상태를 유지할 수 없었으며, 유체를 충진하는 동시에 실린더 내부에 있는 기포 등을 빼낼 수 없었다. 따라서 설계한 사양을 만족하는 감쇠기를 제작하기가 어려웠다. 또한 제작과정에서 코일을 감는 공간이 부족하여 기하학적 치수를 변경하였다. 그림 3.7.2.11는 제작도면을 보여주고 있다.

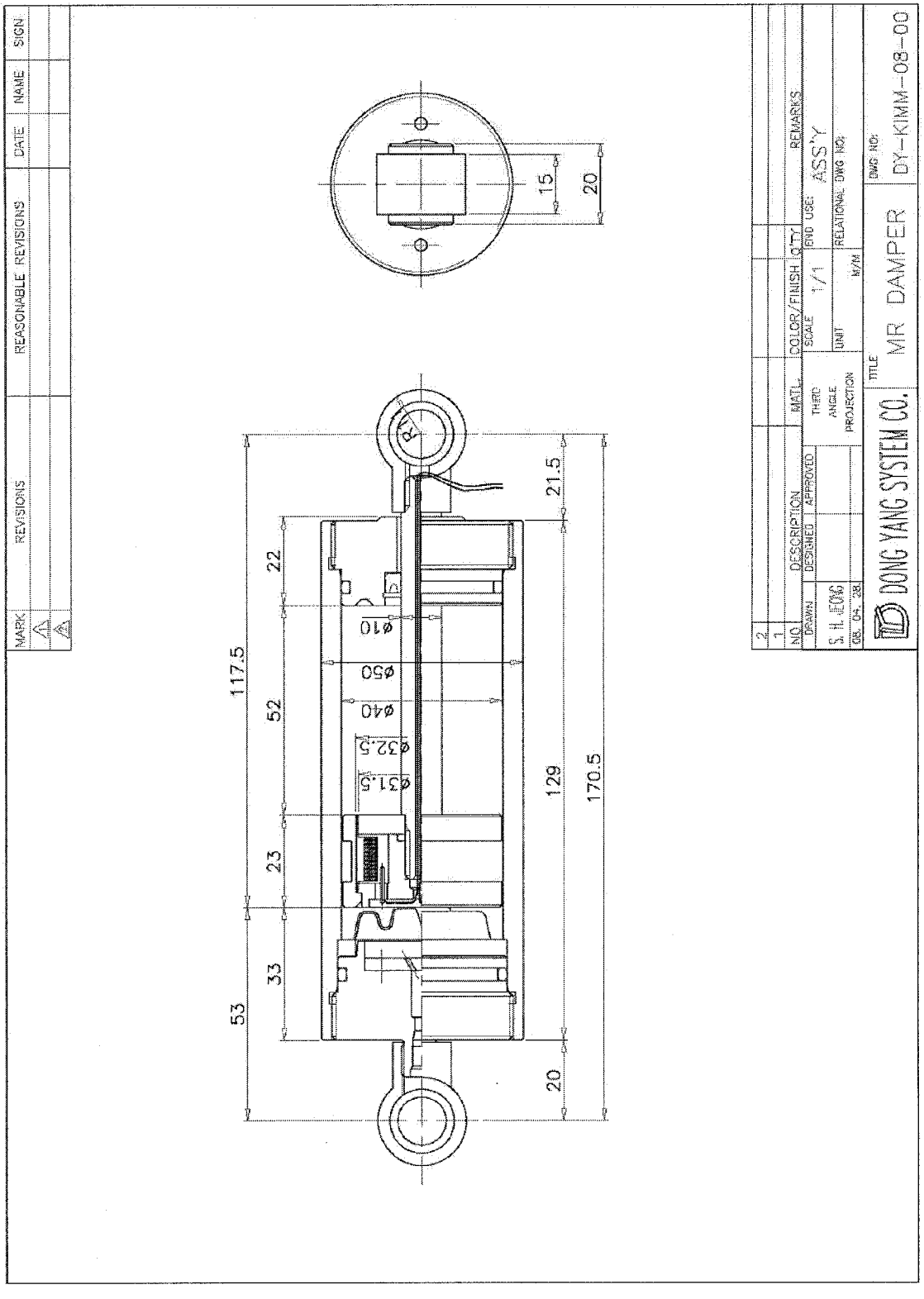
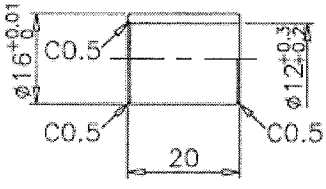


그림 3.7.2.11 Drawings of the MR damper (1/17)

MARK	REVISIONS	REASONABLE REVISIONS	DATE	NAME	SIGN
1					
2					





NOTE

1. 외경 ø16부 압입 공차입니다.

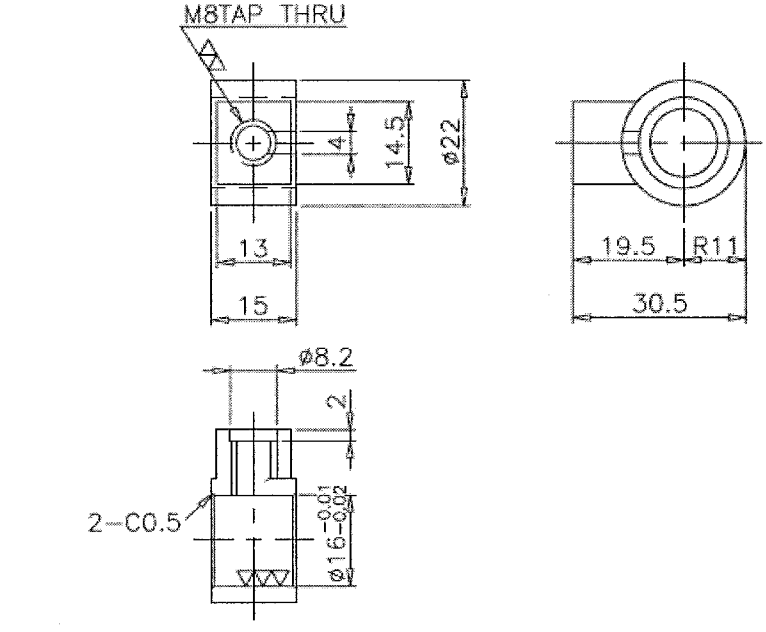
NO	DESCRIPTION	MATL.	COLOR/FINISH	Q'TY	REMARKS
2					
1		RULON		2	ø16 X 20

DRAWN	DESIGNED	APPROVED		SCALE	END USE:
S. H. JEONG			THIRD ANGLE PROJECTION	1/1	RING
08. 03. 21.				UNIT M/M	RELATIONAL DWG NO:

DONG YANG SYSTEM CO.	TITLE: MR DAMPER	DWG NO: DY-KIMM-08-01

그림 3.7.2.11 Drawings of the MR damper (2/17)

MARK	REVISIONS	REASONABLE REVISIONS	DATE	NAME	SIGN
1					
2					



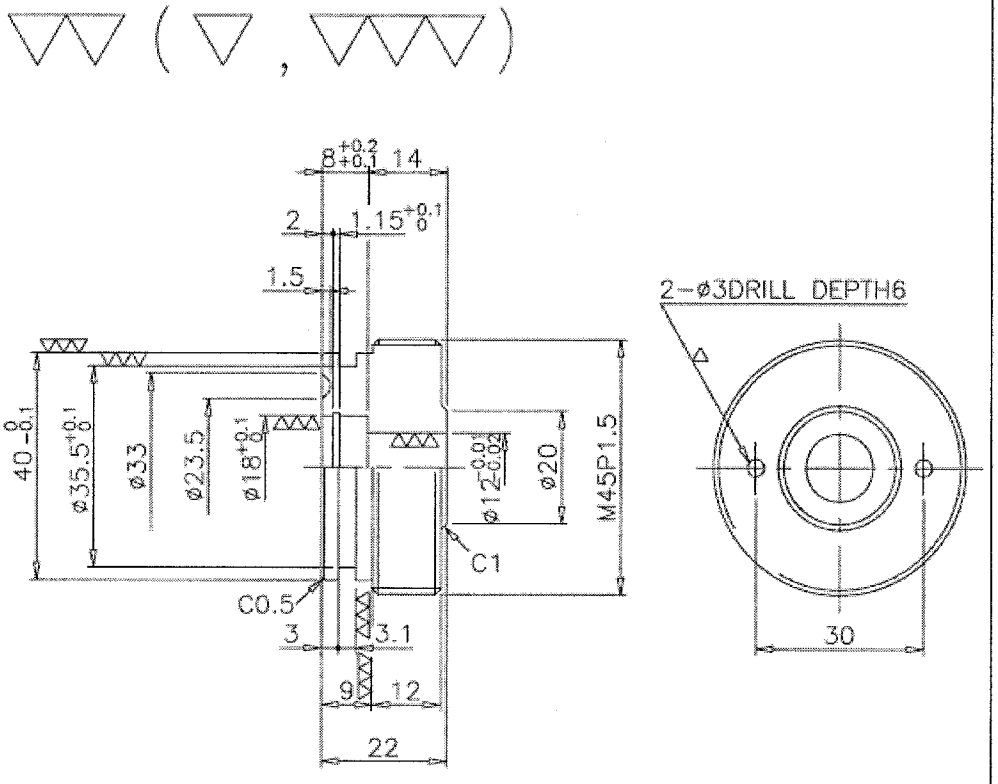
NO	DESCRIPTION	MATL.	COLOR/FINISH	Q'TY	REMARKS
2					
1		S45C		1	15 X 22 X 30.5

DRAWN	DESIGNED	APPROVED	THIRD ANGLE PROJECTION	SCALE 1/1	END USE: FLANGED BRACKET(1)
S. H. JEONG				UNIT M/M	RELATIONAL DWG NO:
08. 03. 21.					

DONG YANG SYSTEM CO.	TITLE: MR DAMPER	DWG NO: DY-KIMM-08-02

그림 3.7.2.11 Drawings of the MR damper (3/17)

MARK	REVISIONS	REASONABLE REVISIONS	DATE	NAME	SIGN
1					
2					



NOTE

1. ⌀12부 RULON(⌀12X14) 압입할것.

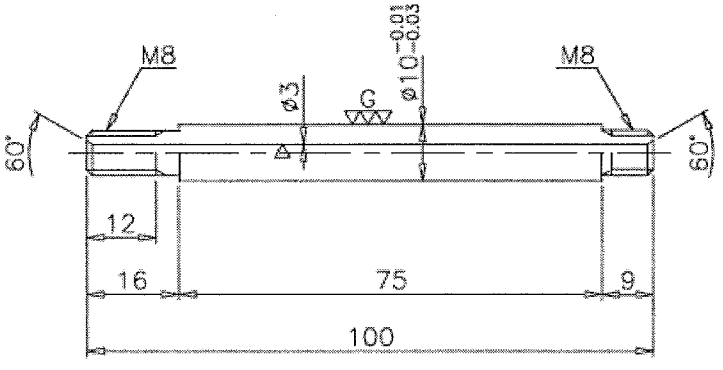
NO	DESCRIPTION	MATL.	COLOR/FINISH	Q'TY	REMARKS
5		RULON		1	ø12 X 14
4		SWP		1	#18
3		NBR		1	SKY-10
2		NBR		1	ARP-126
1		S45C		1	ø45 X 22

DRAWN	DESIGNED	APPROVED		SCALE 1/1	END USE: FRONT COVER
S. H. JEONG			THIRD ANGLE PROJECTION	UNIT M/M	RELATIONAL DWG NO:
08. 03. 21.					

DONG YANG SYSTEM CO.	TITLE: MR DAMPER	DWG NO: DY-KIMM-08-03

그림 3.7.2.11 Drawings of the MR damper (4/17)

MARK	REVISIONS	REASONABLE REVISIONS	DATE	NAME	SIGN
1					
2					



NOTES

1. 조질처리 할것.
2. ø10부 크롬도금(도금두께0.01mm) 처리할것.

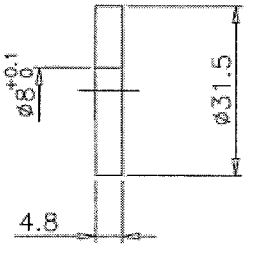
NO	DESCRIPTION	MATL.	COLOR/FINISH	Q'TY	REMARKS
2					
1		SCM440		1	ø10 X 100

DRAWN	DESIGNED	APPROVED		SCALE 1/1	END USE: ROD
S. H. JEONG			THIRD ANGLE PROJECTION	UNIT M/M	RELATIONAL DWG NO:
08. 03. 21.					

DONG YANG SYSTEM CO. | TITLE: MR DAMPER | DWG NO: DY-KIMM-08-04

그림 3.7.2.11 Drawings of the MR damper (5/17)

MARK	REVISIONS	REASONABLE REVISIONS	DATE	NAME	SIGN
1					
2					



NOTE

1. 외경 ø31.5부 조립 및 코일 에폭시 작업 완료후 정삭 가공할것.

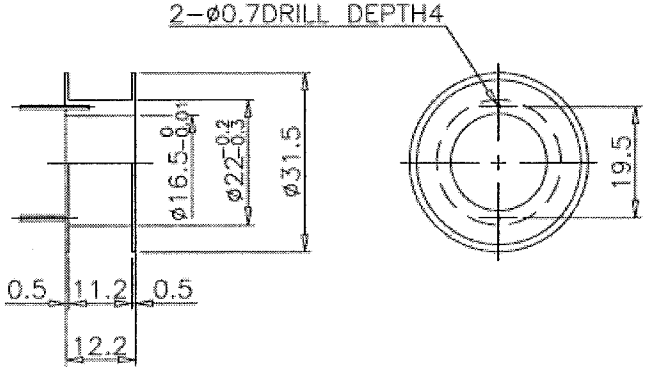
NO	DESCRIPTION	MATL.	COLOR/FINISH	Q'TY	REMARKS
2					
1		S45C		1	ø31.5 X 4.8

DRAWN	DESIGNED	APPROVED		SCALE 1/1	END USE: WASHER
S. H. JEONG			THIRD ANGLE PROJECTION	UNIT M/M	RELATIONAL DWG NO:
08. 04. 28.					

DONG YANG SYSTEM CO. | TITLE: MR DAMPER | DWG NO: DY-KIMM-08-05

그림 3.7.2.11 Drawings of the MR damper (6/17)

MARK	REVISIONS	REASONABLE REVISIONS	DATE	NAME	SIGN
1					
2					



NOTES

1. ⌀0.8 X 12 니크롬선 압입
2. 니크롬선 권선 ⌀0.32mm, 400Turn 작업
3. 결선부 및 코일외부 에폭시로 마감처리 할것.
4. 전원선 연결후 단선 검사할것.

NO	DESCRIPTION	MATL.	COLOR/FINISH	Q'TY	REMARKS
2					
1		ACETAL		1	ø31.5 X 12.2

DRAWN	DESIGNED	APPROVED	THIRD ANGLE PROJECTION	SCALE 1/1	END USE: INSULATION GUIDE
S. H. JEONG				UNIT M/M	RELATIONAL DWG NO:
08. 03. 21.					

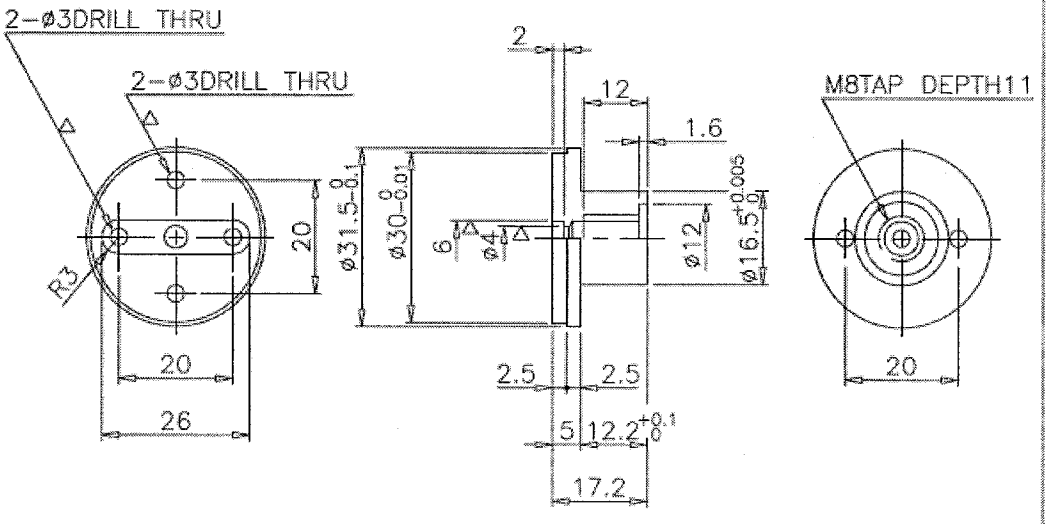
DONG YANG SYSTEM CO.

TITLE: MR DAMPER

DWG NO: DY-KIMM-08-06

그림 3.7.2.11 Drawings of the MR damper (7/17)

MARK	REVISIONS	REASONABLE REVISIONS	DATE	NAME	SIGN
1					
2					



NOTE

1. 외경 ø30 & ø31.5부 조립 및 코일 에폭시 작업 완료후 정삭 가공할것.

NO	DESCRIPTION	MATL.	COLOR/FINISH	Q'TY	REMARKS
2		NBR		1	P-9
1		S45C		1	ø31.5 X 17.2

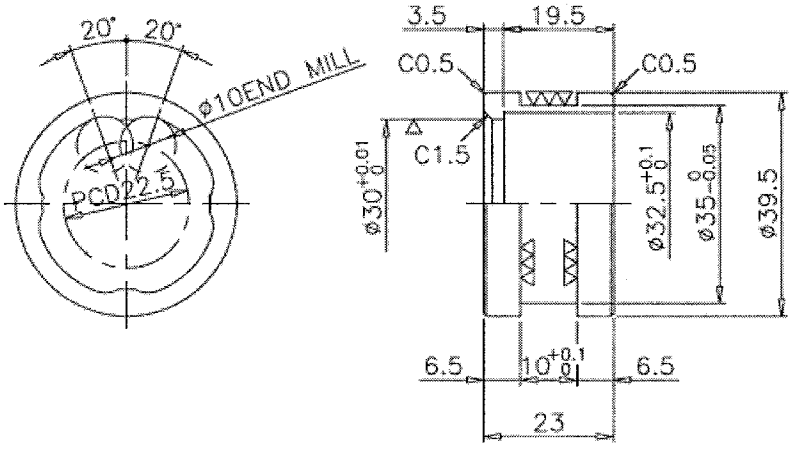
DRAWN	DESIGNED	APPROVED		SCALE 1/1	END USE: HOLDER SHAFT
S. H. JEONG			THIRD ANGLE PROJECTION	UNIT M/M	RELATIONAL DWG NO:
08. 04. 28.					

DONG YANG SYSTEM CO.	TITLE: MR DAMPER	DWG NO: DY-KIMM-08-07

그림 3.7.2.11 Drawings of the MR damper (8/17)

MARK	REVISIONS	REASONABLE REVISIONS	DATE	NAME	SIGN
1					
2					





NOTES

1. 내경 END MILL 가공 할것.
2. HOLDER SHAFT와 측면 알곤용접후 외경 및 WEAR RING 홈 가공할것.

NO	DESCRIPTION	MATL.	COLOR/FINISH	Q'TY	REMARKS
2		TURCITE-B		1	S-55910
1		S45C		1	ø39.5 X 23

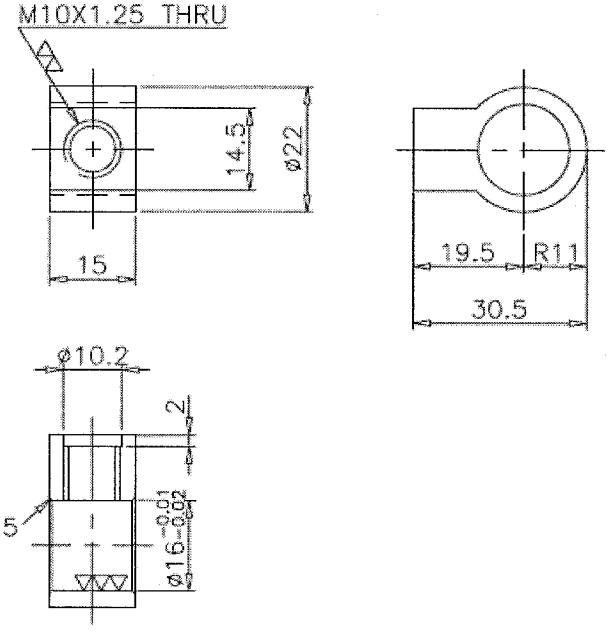
DRAWN	DESIGNED	APPROVED		SCALE	END USE:
S. H. JEONG			THIRD ANGLE PROJECTION	1/1	PISTON
08. 04. 28.				UNIT M/M	RELATIONAL DWG NO:

DONG YANG SYSTEM CO.	TITLE	DWG NO:
	MR DAMPER	DY-KIMM-08-08

그림 3.7.2.11 Drawings of the MR damper (9/17)

MARK	REVISIONS	REASONABLE REVISIONS	DATE	NAME	SIGN
1					
2					





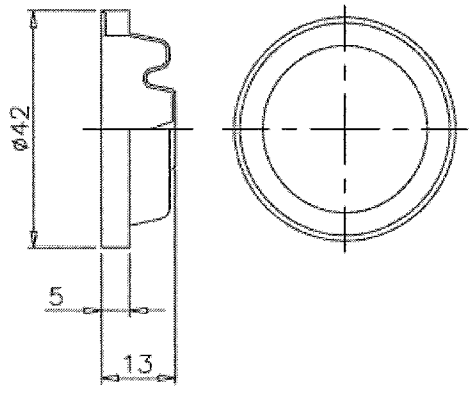
NO	DESCRIPTION	MATL.	COLOR/FINISH	Q'TY	REMARKS
2					
1		S45C		1	15 X 22 X 30.5

DRAWN	DESIGNED	APPROVED		SCALE	END USE:
S. H. JEONG			THIRD ANGLE PROJECTION	1/1	FLANGED BRACKET(II)
08. 03. 21.				UNIT M/M	RELATIONAL DWG NO:

DONG YANG SYSTEM CO.	TITLE: MR DAMPER	DWG NO: DY-KIMM-08-09

그림 3.7.2.11 Drawings of the MR damper (10/17)

MARK	REVISIONS	REASONABLE REVISIONS	DATE	NAME	SIGN
1					
2					



NO	DESCRIPTION	MATL.	COLOR/FINISH	Q'TY	REMARKS
3					
2					
1		NBR		1	ø42 X 13

DRAWN	DESIGNED	APPROVED		SCALE 1/1	END USE: ACC' RUBBER
S. H. JEONG			THIRD ANGLE PROJECTION	UNIT M/M	RELATIONAL DWG NO:
08. 03. 21.					

DONG YANG SYSTEM CO.	TITLE: MR DAMPER	DWG NO: DY-KIMM-08-10

그림 3.7.2.11 Drawings of the MR damper (11/17)

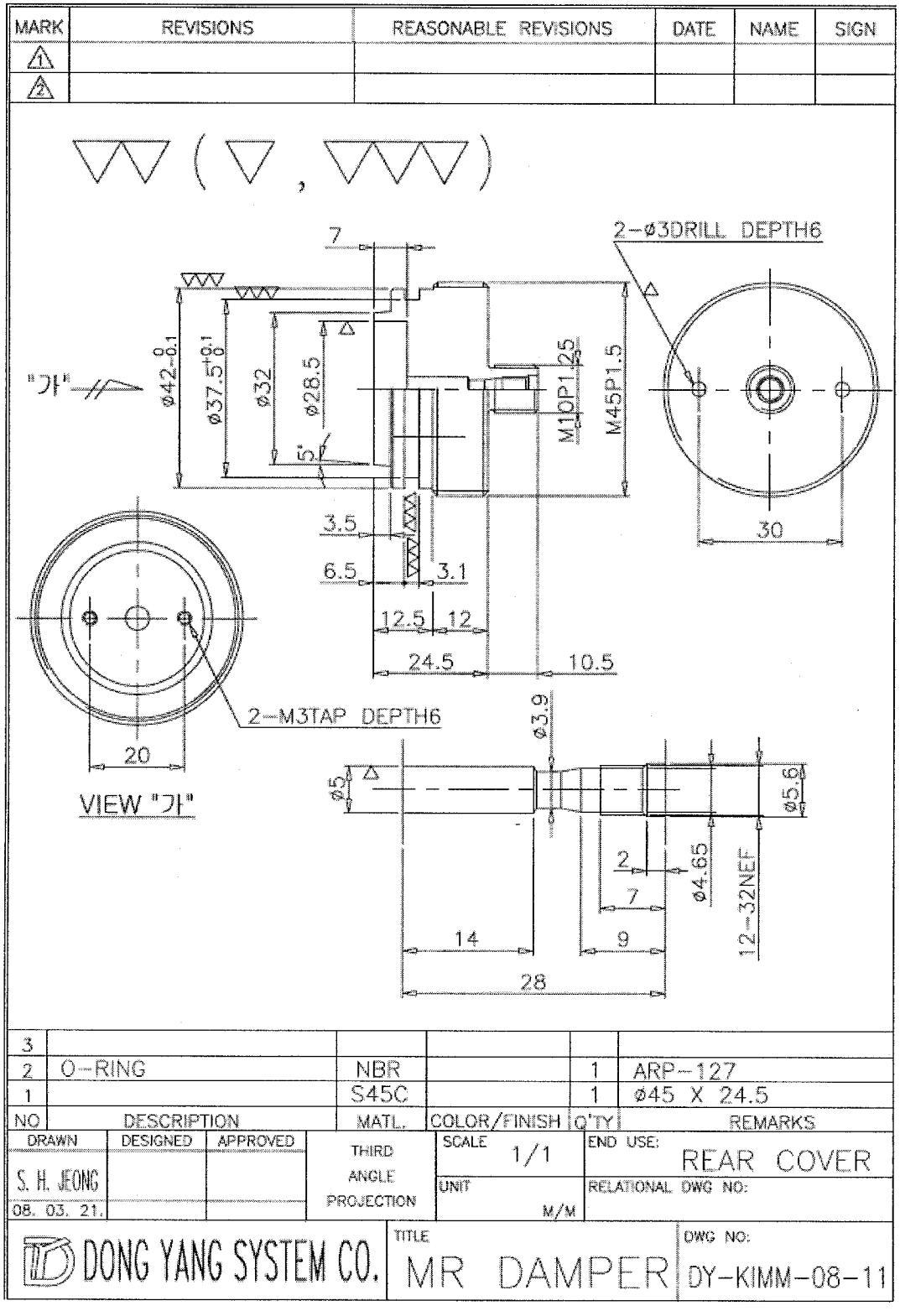
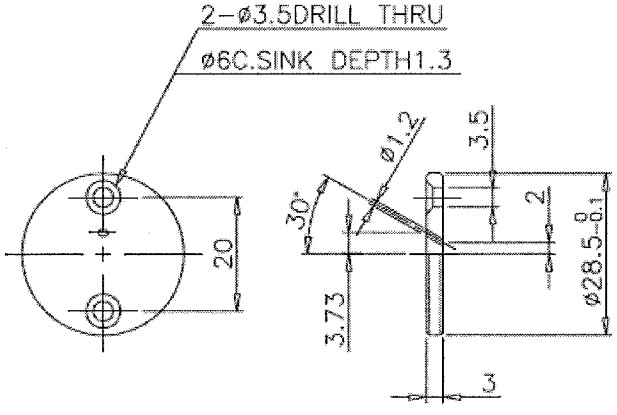


그림 3.7.2.11 Drawings of the MR damper (12/17)

MARK	REVISIONS	REASONABLE REVISIONS	DATE	NAME	SIGN
1					
2					



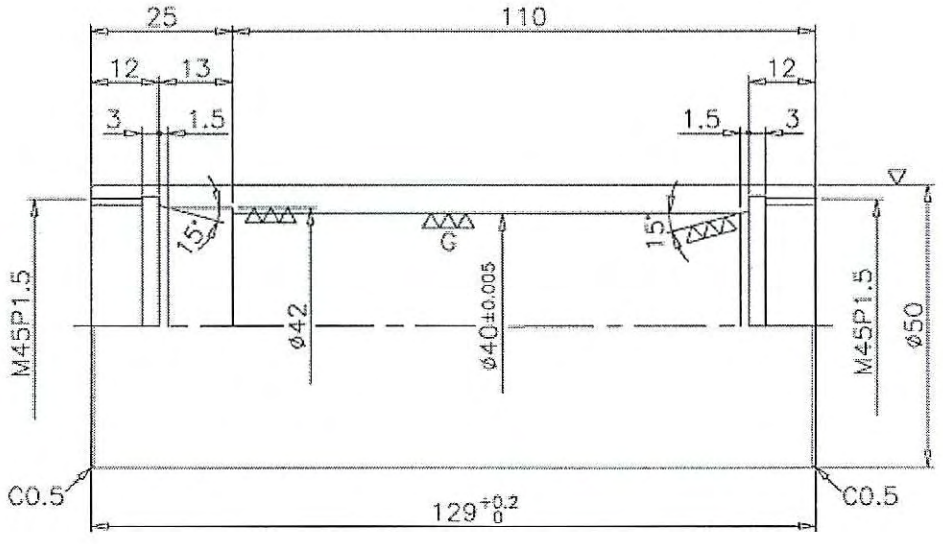
NO	DESCRIPTION	MATL.	COLOR/FINISH	Q'TY	REMARKS
3					
2					
1		S45C		1	ø28.5 X 3

DRAWN	DESIGNED	APPROVED		SCALE 1/1	END USE: REAR COVER WASH
S. H. JEONG			THIRD ANGLE PROJECTION	UNIT M/M	RELATIONAL DWG NO:
08. 03. 21.					

DONG YANG SYSTEM CO.	TITLE: MR DAMPER	DWG NO: DY-KIMM-08-12

그림 3.7.2.11 Drawings of the MR damper (13/17)

MARK	REVISIONS	REASONABLE REVISIONS	DATE	NAME	SIGN
1					
2					



NOTE

1. 호닝 파이프 구입후 가공 처리할것.

NO	DESCRIPTION	MATL.	COLOR/FINISH	Q'TY	REMARKS
2					
1		STKM13C		1	ø40 X ø50 X 129

DRAWN	DESIGNED	APPROVED		SCALE 1/1	END USE: TUBE
S. H. JEONG			THIRD ANGLE PROJECTION	UNIT M/M	RELATIONAL DWG NO:
08. 03. 21.					

DONG YANG SYSTEM CO. | TITLE: MR DAMPER | DWG NO: DY-KIMM-08-12

그림 3.7.2.11 Drawings of the MR damper (14/17)

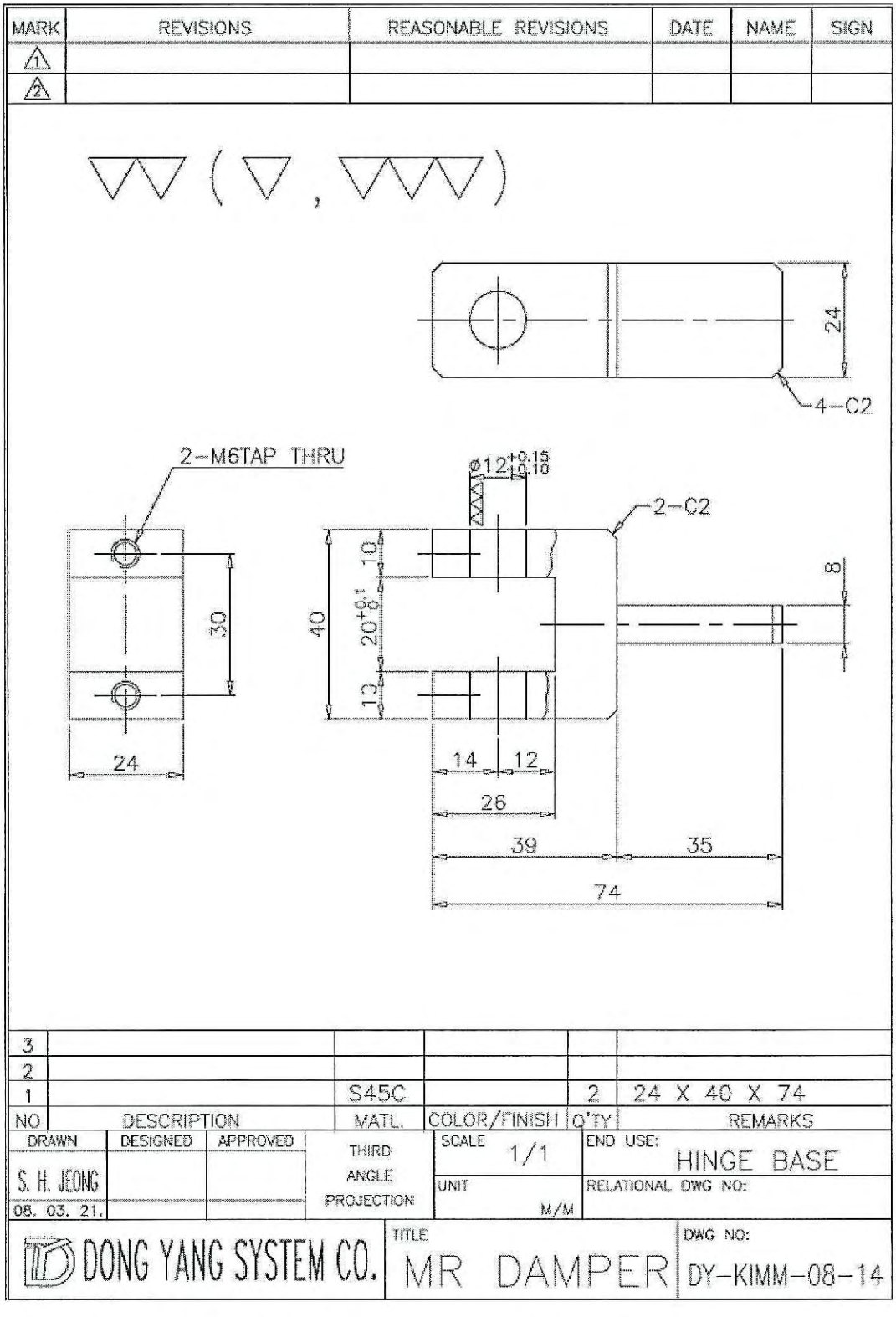
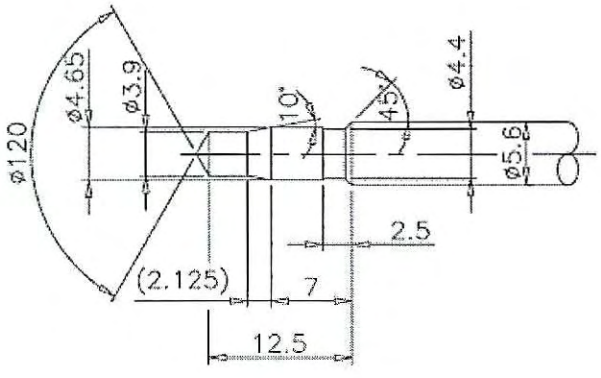


그림 3.7.2.11 Drawings of the MR damper (15/17)

MARK	REVISIONS	REASONABLE REVISIONS	DATE	NAME	SIGN
1					
2					



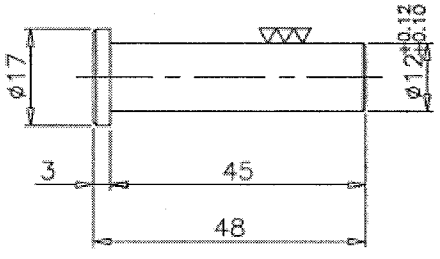
NO	DESCRIPTION	MATL.	COLOR/FINISH	Q'TY	REMARKS
2					
1				1	

DRAWN	DESIGNED	APPROVED		SCALE 1/1	END USE: TOOL
S. H. JEONG			THIRD ANGLE PROJECTION	UNIT M/M	RELATIONAL DWG NO:
08. 03. 21.					

DONG YANG SYSTEM CO. | TITLE: MR DAMPER | DWG NO: DY-KIMM-08-14

그림 3.7.2.11 Drawings of the MR damper (16/17)

MARK	REVISIONS	REASONABLE REVISIONS	DATE	NAME	SIGN
1					
2					



NO	DESCRIPTION	MATL.	COLOR/FINISH	Q'TY	REMARKS
3					
2					
1		S45C		2	ø17 X 48

DRAWN	DESIGNED	APPROVED		SCALE 1/1	END USE: HINGE BASE
S. H. JEONG			THIRD ANGLE PROJECTION	UNIT M/M	RELATIONAL DWG NO:
08. 03. 21.					

DONG YANG SYSTEM CO.	TITLE: MR DAMPER	DWG NO: DY-KIMM-08-15

그림 3.7.2.11 Drawings of the MR damper (17/17)

케이블용 MR 감쇠기는 총 5개가 제작되었으며, 3개(L1, L2, L3)에는 당초 설계에서 고려하였던 미국 Lord Corporation의 MR 유체 (MRF-140CG)를 하였다. 나머지 2개(K1, K2)에는 감쇠기의 국산화 추진을 위해 한국 (주) 스마트로닉스의 MR 유체를 주입하였다. 각 감쇠기의 계측된 저항은 L1(8.0Ω), L2(8.3Ω). L3(8.1Ω), K1(8.0Ω), K2(8.1Ω)이다.

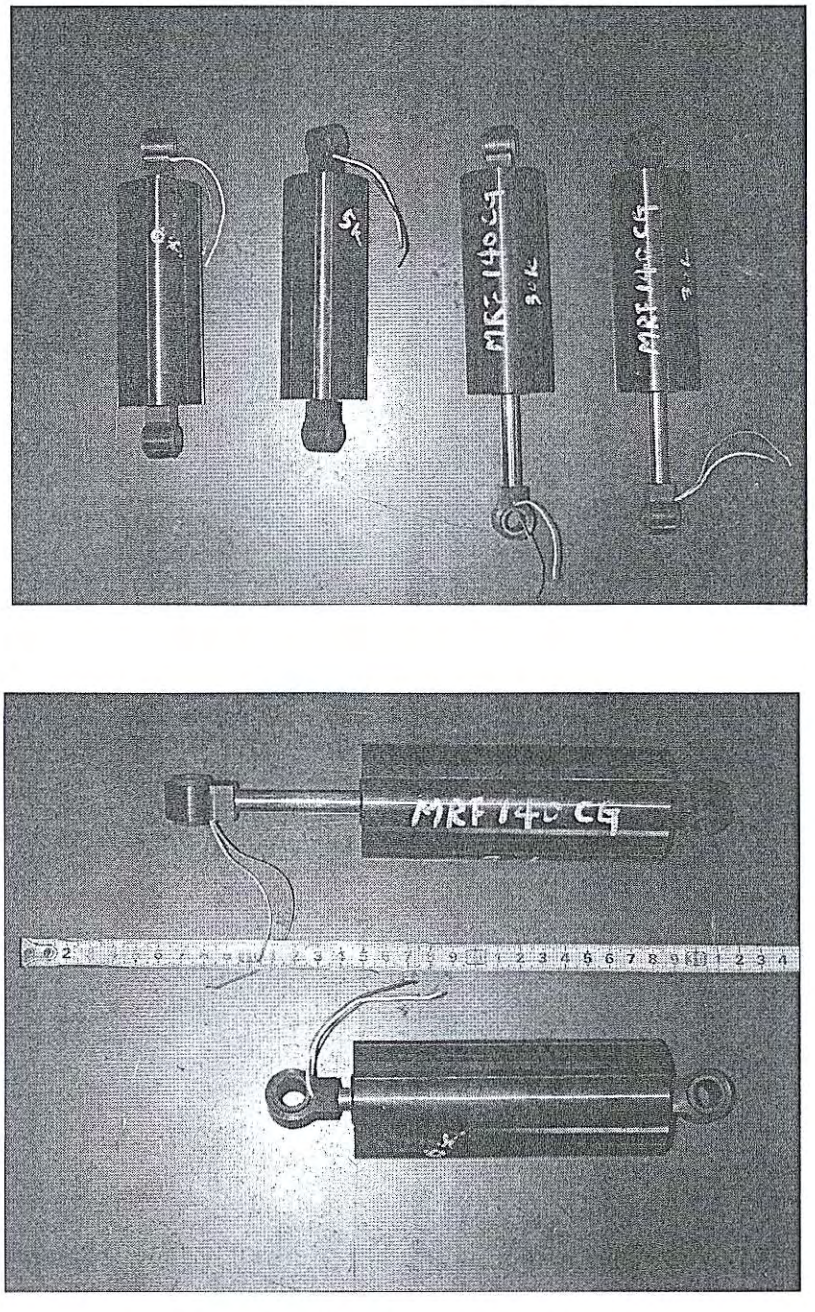


그림 3.7.2.12 MR dampers for stay cables

(6) EMI 시스템 상세설계 및 제작

EMI 시스템은 기본 설계를 바탕으로 경인시스템(주)에서 상세설계 및 제작을 담당하였다. 자기장을 형성하는 영구자석을 윗면과 아랫면에 2개씩 나란히 배열하였으며 그 사이를 코일을 감은 솔레노이드가 움직이도록 되어 있다. 그림 3.7.2.13는 제작도면을 보여주고 있다.

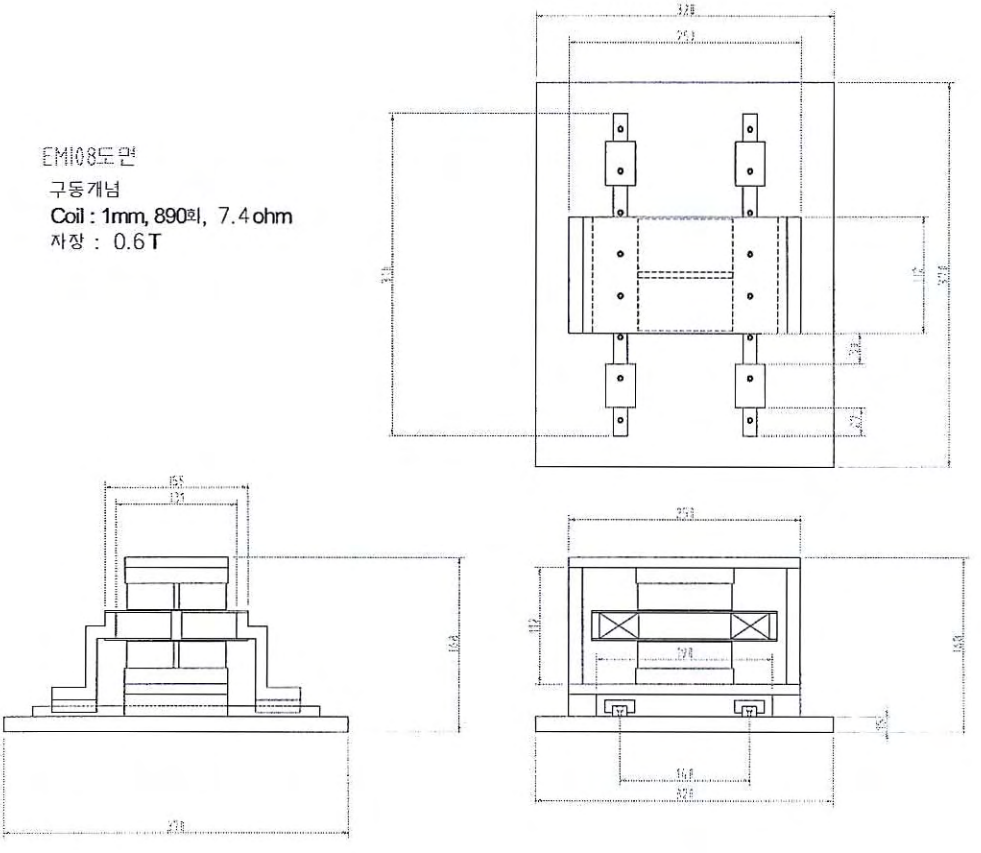


그림3.7.2.13 케이블용 EMI 외형도면

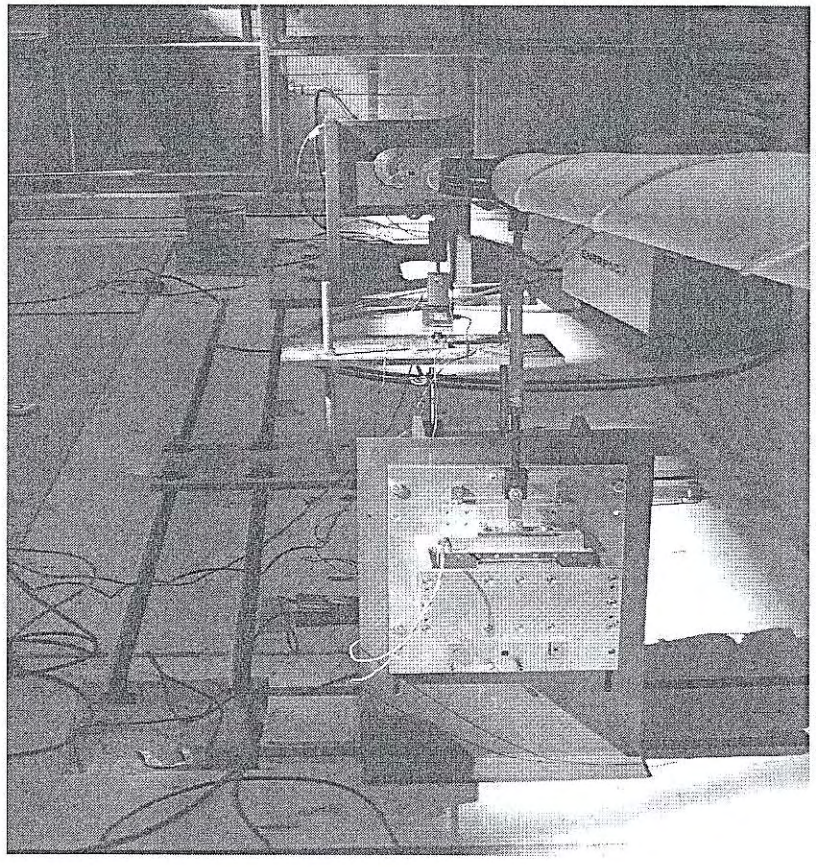


그림3.7.2.14 케이블용 EMI 시스템

8 절. 신개념 스마트 제진장치 성능평가 지침서

8.1. 목적

제작한 스마트 제진장치가 사양을 만족하는 특성과 기능을 갖는 것을 확인한다.

8.2. 목표성능

스마트 제진장치의 설계사양에 따라 성능평가를 위한 목표 성능을 설정한다. 스마트 제진장치의 목표성능의 예는 아래와 같다.

- 요구 제어력: 1,100 N @ 60 mm/s
- 요구 최대 변위: ± 15 mm
- 설계 제어력: 2,000 N @ 60 mm/s (안전율 약 2.0 고려)
- 설계 허용 변위: ± 20 mm

8.3. 시험항목

(1) Load-Displacement relation at design speed
(2) Load-Displacement relation at constant frequency
(3) Load-Displacement relation at constant displacement

8.4. 계측기기

(1) servo analyzer
(2) FFT
(3) DSP
(4) Data Recorder
(5) Portable Printer

(6) 가속도계

(7) 변위계

(8) Loadcell

(9) Digital tester

8.5. 계측항목

(1) 저항계측

(2) 설계속도에서의 제어력

변위 / 제어력 /전류, 주파수

(3) 설계주파수에서의 제어력

변위 / 제어력 /전류, 주파수

(4) 설계변위에서의 제어력

변위 / 제어력 /전류, 주파수

8.6. 성능평가시험 결과의 검증

성능시험결과가 재진장치의 목표성능을 만족하는지 확인한다.

8.7. MR 댐퍼의 성능평가 시험 사례

현대건설기술연구소에 있는 사장교용 케이블을 실험대상체로 선정하여 대상 케이블에 대한 각종 실험 및 해석으로부터 결정된 MR 댐퍼의 요구사양 및 설계사양은 아래와 같다.

- 요구 제어력: 1,100 N @ 60 mm/s
- 요구 최대 변위: ± 15 mm
- 설계 제어력: 2,000 N @ 60 mm/s (안전율 약 2.0 고려)
- 설계 허용 변위: ± 20 mm

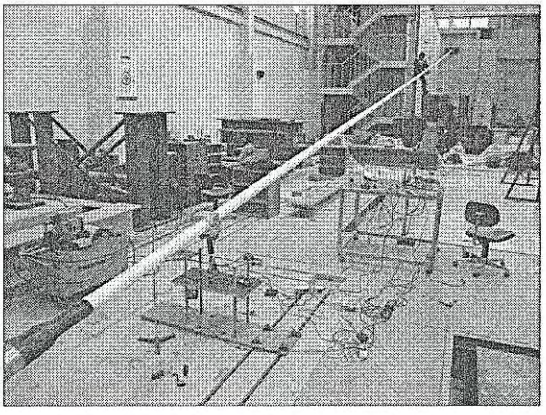


그림 3.8.7.1 Stay cable for MR damper testing

표 3.8.7.1 Cable characteristics of the stay cable

Parameter	Value
Length	44.7 m
Mass per length	20.3 kg/m
Tension	50 ton
Damping ratio	0.08 %
Fundamental frequency	1.81 Hz

이러한 설계사양을 만족하도록 제작된 스마트 제진장치의 특성을 고찰하기 위해 만능시험기를 이용하여 성능평가시험을 수행하였다. 시험에 사용된 시험계획서는 Fig. 2와 같다. Fig. 3은 만능시험기에 설치된 MR 댐퍼의 모습을 보여주고 있다.

Cable용 MR damper의 동특성 실험 계획

작성자: KIMM 문 석준
작성일: 2008.05.26

■ 목표 성능
- 제어력: 2,000 N @ 60 mm/s
- Cable의 1차 고유진동수: 1.81 Hz
- 최대 전류: 0.428 A
- 예상 저항: 7.41 Ω

■ 실험 대상품: Cable용 MR 댐퍼: 4 sets
- Lord사 MR 유체사용: 2 set
- 국내사 MR 유체사용: 2 set

■ 기본 계측항목 (4 set)
- 저항 계측
- 설계 속도 (60 mm/s)에서의 제어력: 파일로 저장
  · 변위 / 제어력 / 전류
- 실험 조합
  · 6.37 mm @ 1.5 Hz / 0 A, 0.3 A, 0.4 A, 0.45 A, 0.5 A, 0.6 A, 1 A
  · 5.97 mm @ 1.6 Hz / 0 A, 0.3 A, 0.4 A, 0.45 A, 0.5 A, 0.6 A, 1 A
  · 5.31 mm @ 1.8 Hz / 0 A, 0.3 A, 0.4 A, 0.45 A, 0.5 A, 0.6 A, 1 A
  · 4.77 mm @ 2.0 Hz / 0 A, 0.3 A, 0.4 A, 0.45 A, 0.5 A, 0.6 A, 1 A
  · 4.34 mm @ 2.2 Hz / 0 A, 0.3 A, 0.4 A, 0.45 A, 0.5 A, 0.6 A, 1 A
  · 3.98 mm @ 2.4 Hz / 0 A, 0.3 A, 0.4 A, 0.45 A, 0.5 A, 0.6 A, 1 A
  · 3.82 mm @ 2.5 Hz / 0 A, 0.3 A, 0.4 A, 0.45 A, 0.5 A, 0.6 A, 1 A

■ 추가 계측항목 (2 set)
- Constant-displacement test
  · 5.5 mm / 0.5 Hz, 1.0 Hz, 1.5 Hz, 1.8 Hz, 2.0 Hz
  · 0 A, 0.3 A, 0.4 A, 0.45 A, 0.5 A, 0.6 A, 1 A
- Constant-frequency test
  · 1.81 Hz / 3 mm, 4 mm, 5 mm, 6 mm, 7 mm
  · 0 A, 0.3 A, 0.4 A, 0.45 A, 0.5 A, 0.6 A, 1 A

그림 3.8.7.2 Test plan for MR dampers

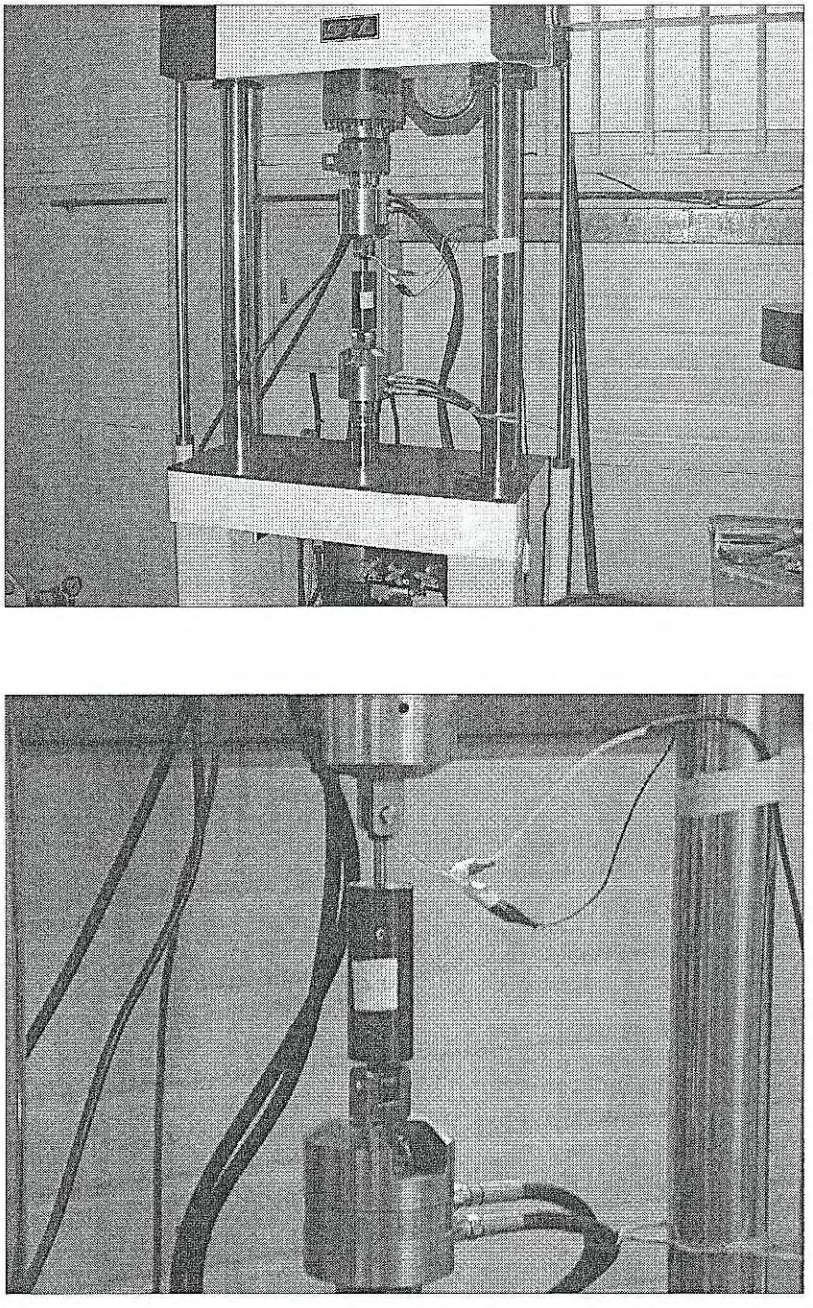


그림 3.8.7.3 MR dampers tested using UTM

시험계획서에 따라 시험한 결과를 아래의 그림에 정리를 하였다. 설계속도에서의 특성, 일정 주파수에서의 특성 및 일정 변위에서의 특성 등 다양한 실험을 수행하였다.

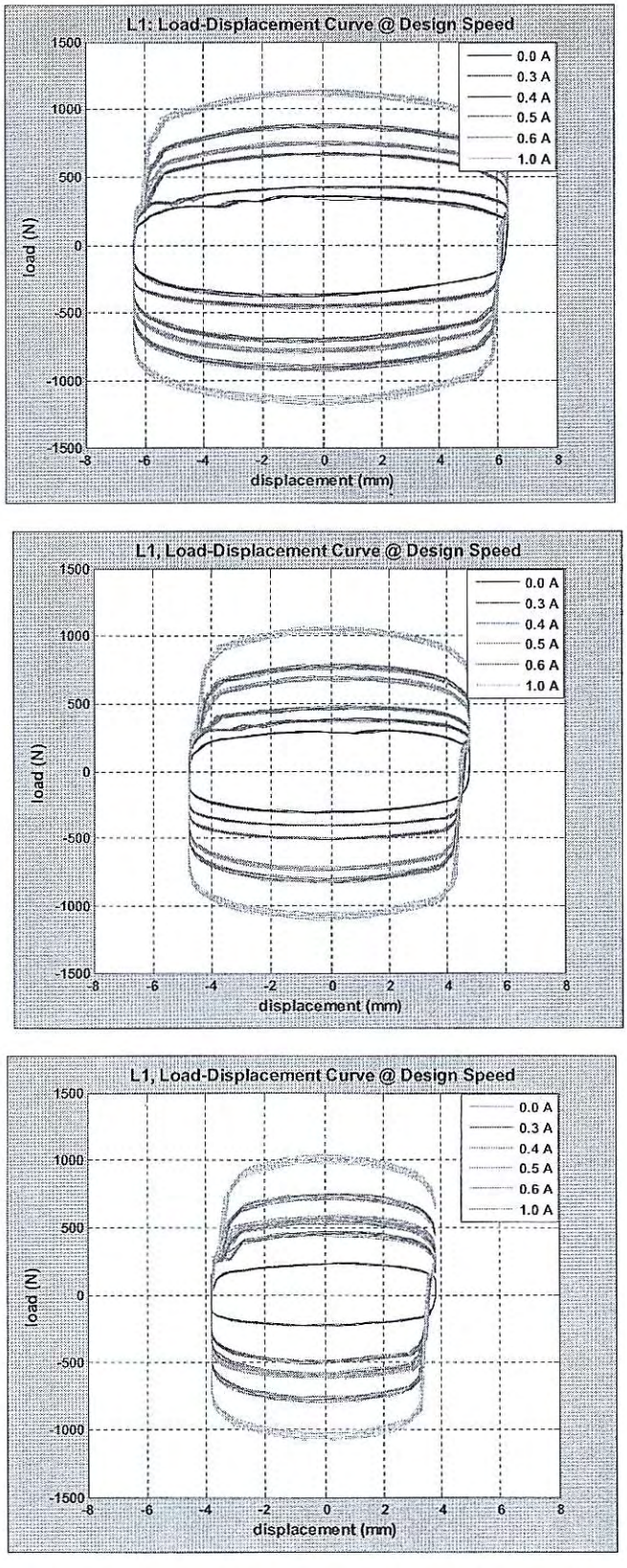


그림 3.8.7.4 Load-displacement curves at design speed for L1 damper

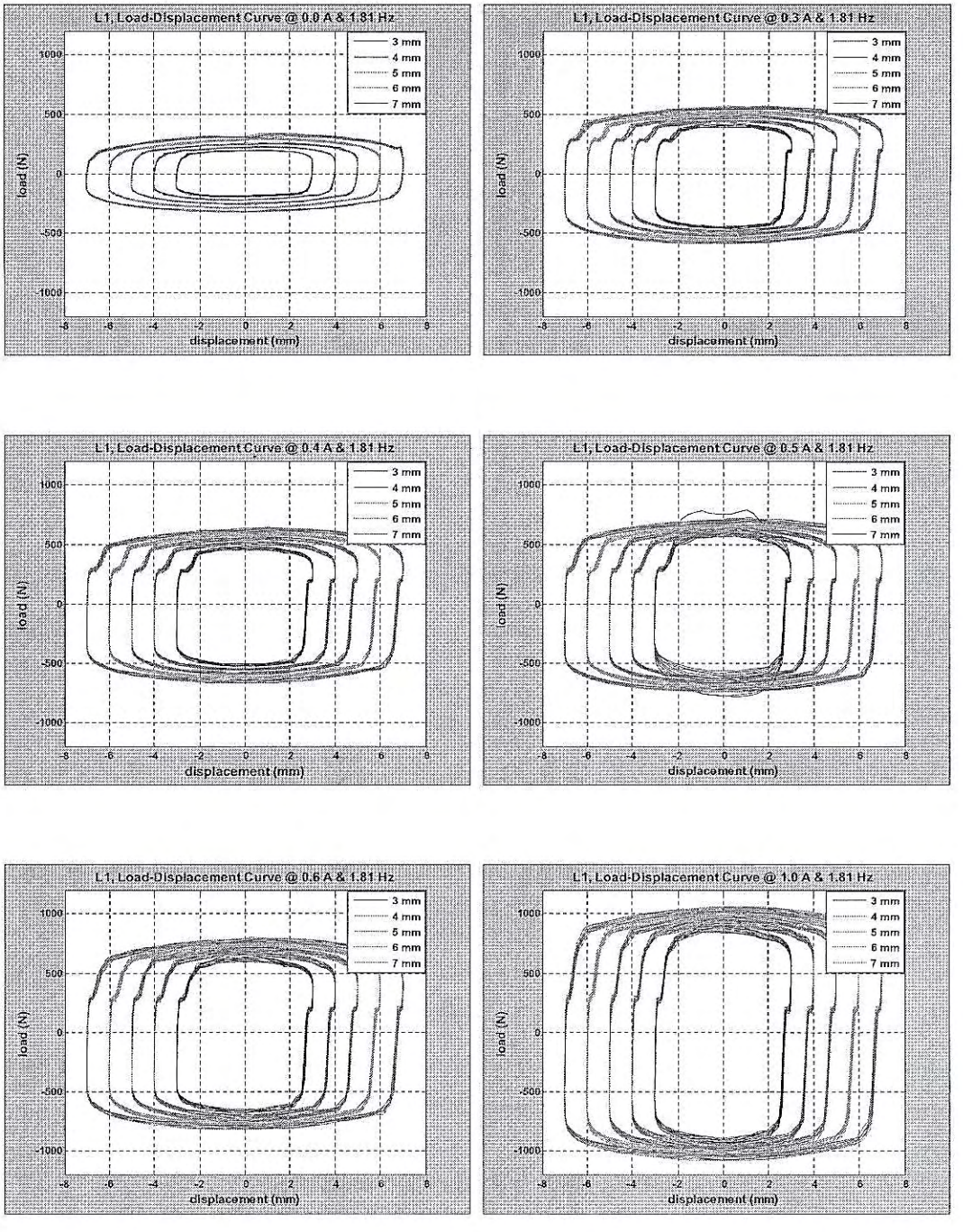


그림 3.8.7.5 Load-displacement curves at constant frequency for L1 damper

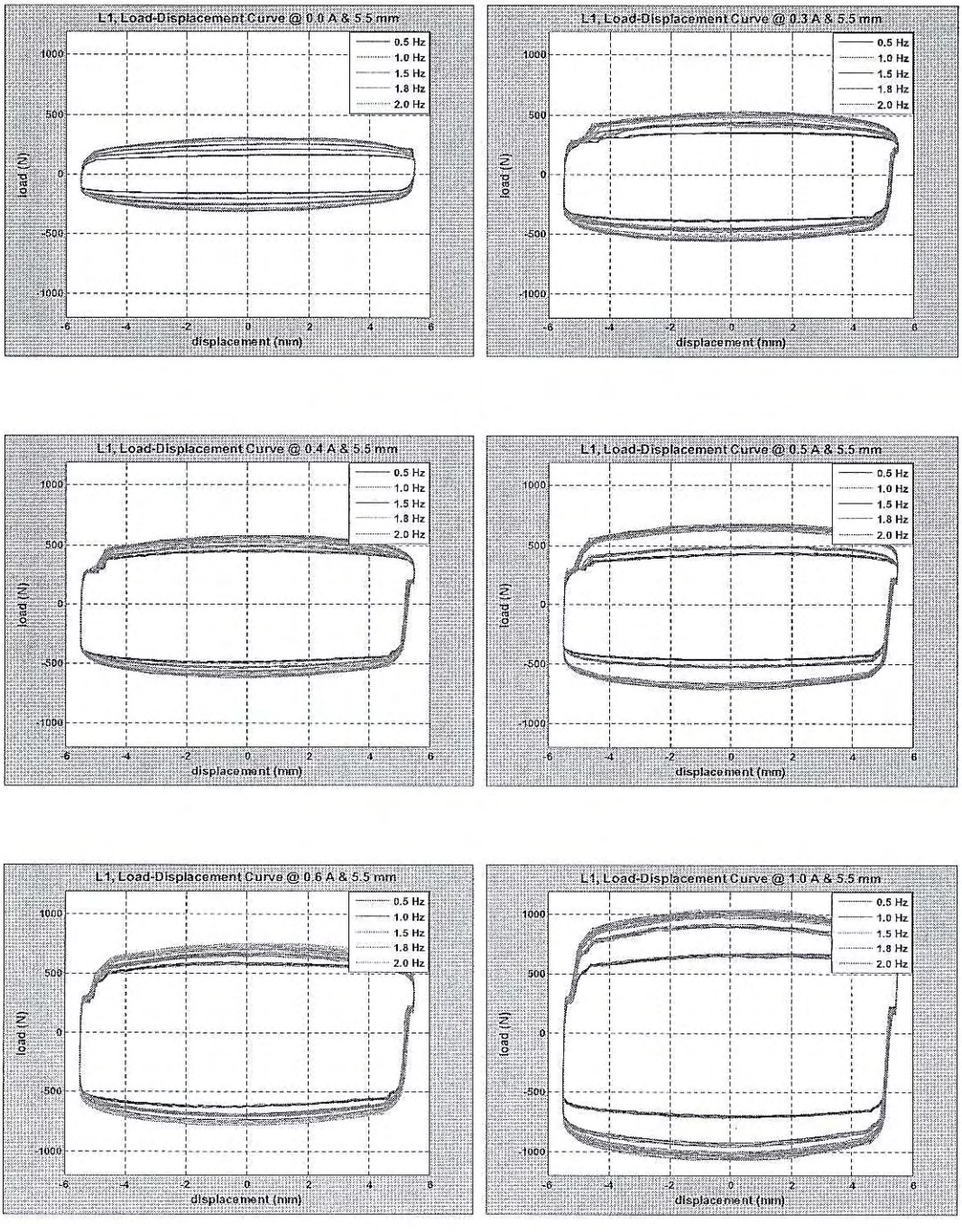


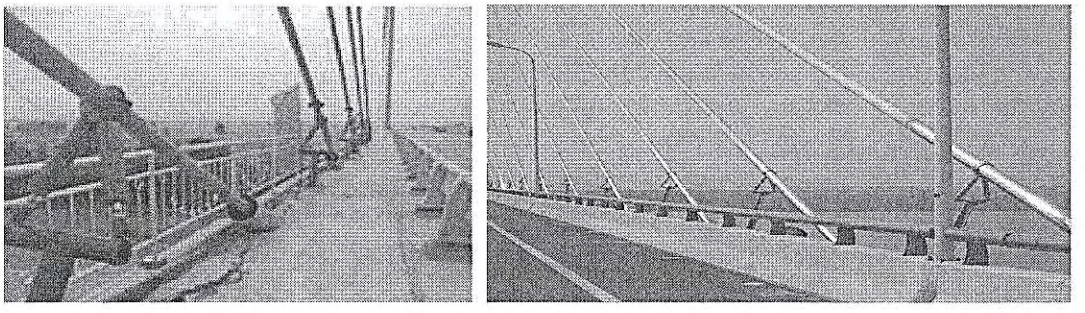
그림 3.8.7.6 Load-displacement curves at constant displacement for L1 damper

9 절. 실용화 검토시 고려사항

9.1. 실구조물 적용계획

9.1.1. 사장교 케이블 적용계획

사장케이블 또는 현수교 행어와 같은 케이블은 감쇠율이 매우 낮고 유연하다는 점과 질량이 상대적으로 작기 때문에 교량 구조물 중에서도 가장 진동에 민감한 부재라고 할 수 있다. 사장교 케이블에 MR 감쇠기를 적용한 사례로는 중국 Dongting Lake 사장교와 중국 Binzhou 사장교가 있고, 현재 시공 중에 있는 홍콩의 Stonecutter 사장교나 중국의 Sutong 사장교에도 케이블 내진 대책으로 MR 감쇠기를 계획하고 있다.



(a) 중국 Binzhou사장교 케이블감쇠기 (b) 중국 Dongting 사장교 케이블 감쇠기

그림 3.9.1.1 스마트 제진 장치 실제 구조물 적용사례

그러나 대표적인 스마트 제진 장치인 MR 감쇠기를 교량에 적용하는 것은 수동형 제진 장치에 비해 설치 및 유지관리가 어렵고, 계측기, 제어용 컴퓨터, 전원공급 장치, 전선 등 부대 장치가 많으며, 극한 환경에 설치된 구조물에 적용하기 어렵다는 점에서 문제점이 있다.

본 연구에서 개발한 스마트 제진장치는 이러한 문제점을 상당부분 해소하였으며, 국내에 건설중인 교량의 케이블에 적용하기 위한 협의를 계속해서 진행하는 중이다. 먼저, 주경간 400m의 마창대교 사장케이블에 적용하기 위한 설치를 위한 검토

를 하였으나 마창대교 케이블 정착부는 그림 3.9.1.2와 같이 스마트 제진장치의 설치를 위한 지그 설치 등이 매우 어렵고 위험하여 설치 계획은 포기하였다. 이와 별개로 광주에 건설중인 운남대교(그림 3.9.1.3)과 목포에 건설중인 남창3교(그림 3.9.1.4)에 스마트 제진장치를 설치하기 위한 협의 및 적용성 검토를 진행하고 있는 중이다.

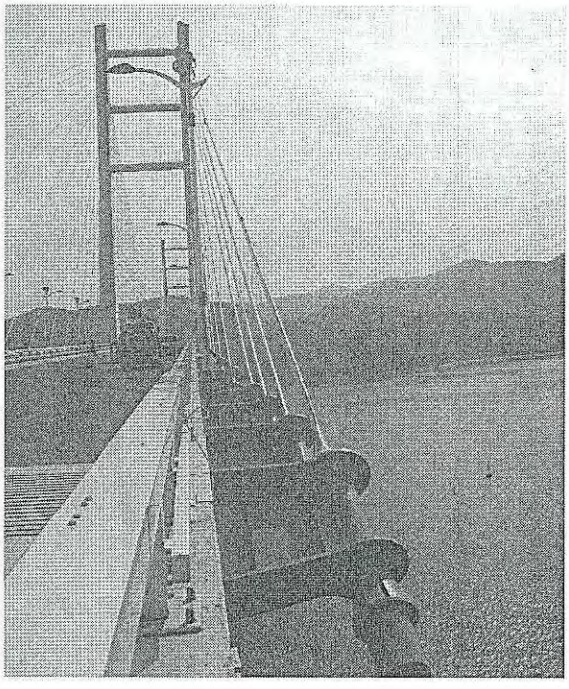


그림 3.9.1.2 마창대교 케이블 정착부

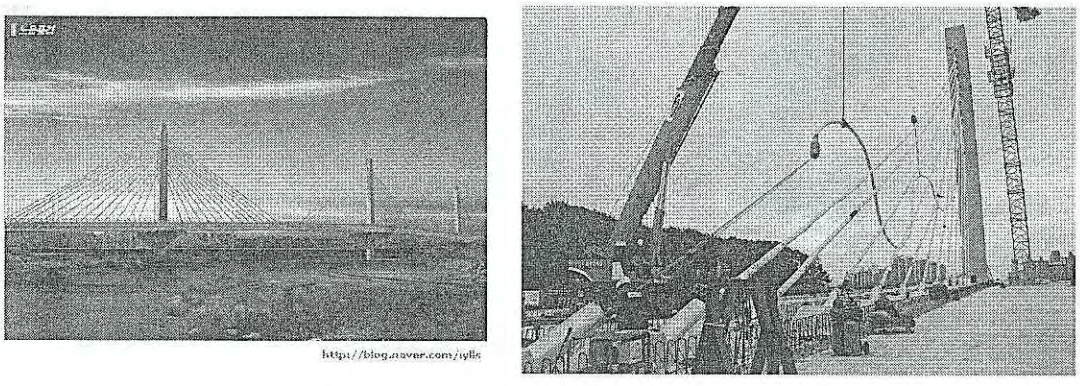


그림 3.9.1.3 운남대교 조감도 및 가설 사진

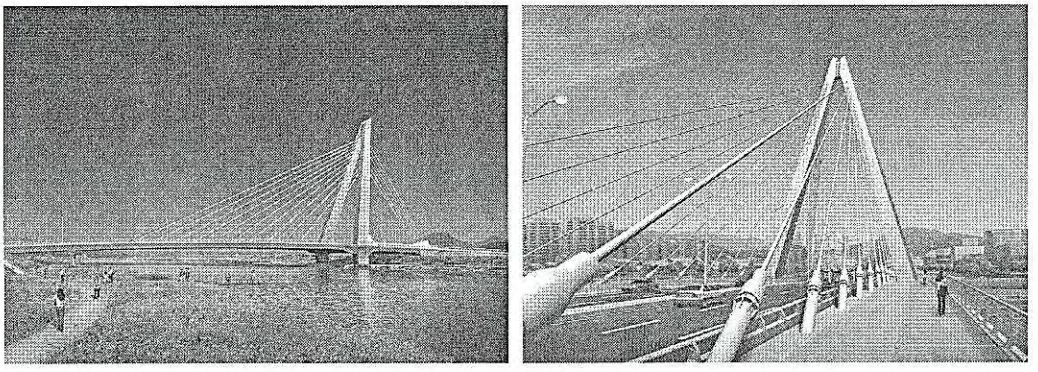


그림 3.9.1.4 남창3교 전경 및 사장케이블 조감도

9.1.2. 보도교 제진장치 적용계획

보도교의 경우 지간이 길지 않더라도 경량의 철골구조물로 설계되어 있어서, 구조적 안정성은 기본적으로 만족되나 시공완료 후 보행자에 의한 수직 및 수평진동에 대한 사용성의 문제가 발생하는 경우가 많다. 이러한 진동을 제어하기 위해 TMD(Tuned Mass Damper)와 같은 제진장치가 사용되는 경우가 많다(군산 은파보도교, 화성동탄 자전거입체시설 등). 이러한 제진장치는 보도교 가설중(골조공사 후)에 설치되는데 성능을 발휘하기 위해서는 교량 가설후(마감공사 후)에 교량의 동특성을 파악하기 위한 실험을 수행하여 TMD의 강성과 감쇠비가 최적값을 갖도록 Tuning을 해야 한다. 따라서, TMD는 교량의 동특성을 파악한 후 강성과 감쇠비의 조정이 가능해야 하는데 실제의 경우 교량의 설계값과 실제 교량의 물성치가 크게 달라 튜닝이 가능한 범위를 벗어나는 경우가 많다. TMD의 감쇠비를 조정하기 위해 본 연구에서 개발한 스마트 제진장치를 적용할 경우 교량의 물성치가 크게 달라져도 충분한 적응성을 갖는다는 장점과 일반 댐퍼에 비해 저렴한 비용으로 설치가 가능하며 케이블에 설치할 때와 마찬가지로 일반적인 스마트 제진시스템에 비해 유지관리 및 전원공급 등에서 장점을 갖는다.

본 연구에서 개발한 스마트 제진장치를 실제 보도교 TMD에 적용하기 위해 본 연구과제의 참여기업인 (주)티이솔루션에서 최근에 제작, 설치한 천안 천호지변 현수보도교 제진장치(그림 5)에 본 연구에서 개발한 스마트 제진장치를 적용하기로 협의하였다. 현재 현수보도교 제진장치는 공장시험을 마치고 골조공사가 끝난 현

장에 설치가 된 상태이며 보도교 공사가 마무리되면 교량의 동특성실험을 마친 후 사진에서 붉은 타원으로 표시한 부분에 스마트 제진장치가 설치될 예정이다. 또한, 천호지변에 적용된 스마트 제진장치의 성능과 경제성, 유지관리 측면 등이 우수한 것으로 판명될 경우 향후 (주)티이솔루션에서 제작 및 설치하기로 계획되어 있는 서울 여의도 샛강 문화다리 제진장치(TMD)와 서울의 하늘공원과 노을공원을 연결하는 하늘다리에 설치할 제진장치(TMD)에도 감쇠력의 조정을 위해 스마트 제진장치를 적용할 계획이다.

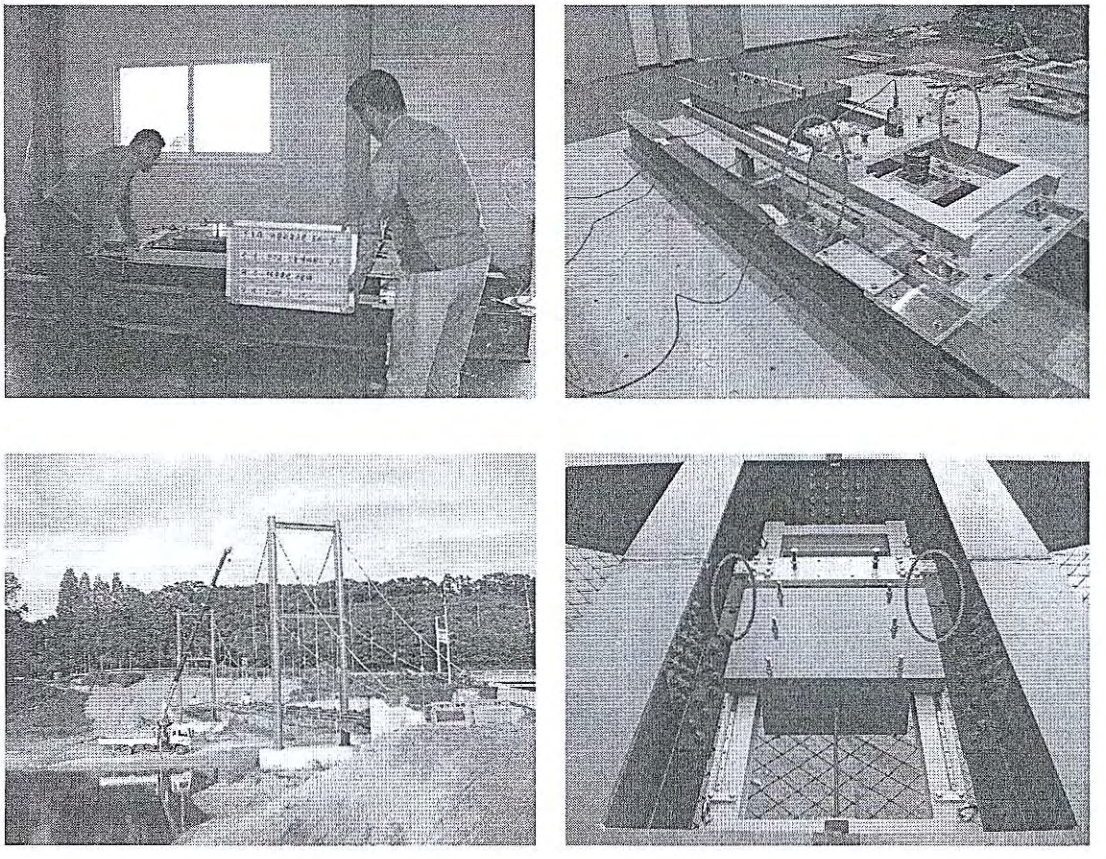


그림 3.9.1.5 천호지변 현수교 제진장치 공장시험 및 현장설치 사진

9.2. 경제성 검토

기존 MR 댐퍼-기반 스마트 제진 시스템은 아래 그림과 같이 센서, 제어기, 전원 공급장치로 구성된 피드백 제어 시스템이 반드시 필요하므로 설치 및 유지관리가 용이하지 않으며 비용도 많이 소요된다. 반면에 신개념 스마트 제진장치는 피드백 제어 시스템을 EMI 시스템으로 대체하기 때문에 설치, 유지관리가 훨씬 용이하고 비용도 크게 절감할 수 있는 매우 경제적인 대안으로 사료된다.

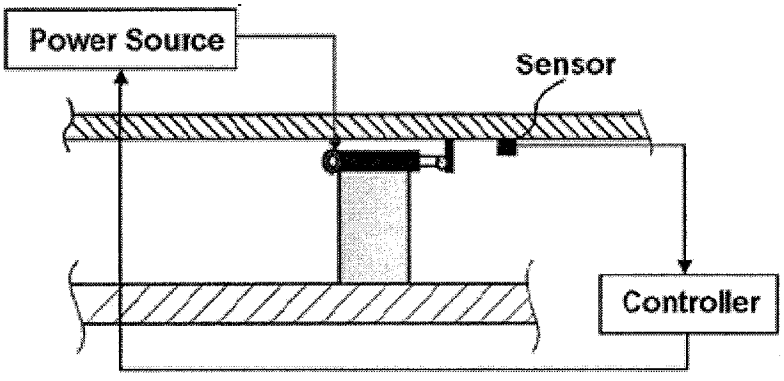


그림 3.9.2.1 기존 MR 댐퍼-기반 스마트 제진 시스템

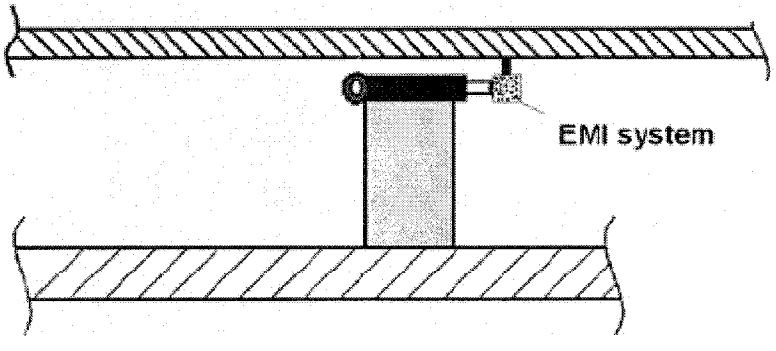


그림 3.9.2.2 신개념 스마트 제진 시스템

앞 절에서 살펴본 바와 같이, 신개념 스마트 제진장치는 기존 MR 댐퍼-기반 스마트 제진 시스템과 비교하여 제어 성능이 크게 뒤떨어지지 않기 때문에 경제성 부분에서 이점이 분명하게 확인된다면 기존 시스템을 대체할 수 있을 것으로 사료된다.

간단하게 경제성을 비교 분석하기 위하여 길이가 100m 정도되는 사장 케이블에 제진장치를 적용하는 경우에 소요되는 비용 및 기간을 대략적으로 아래 표와 같이 정리하여 보았다.

표3.9.2.1 소요 비용 및 기간 비교 (100m 사장 케이블 제진용 기준)

항목		기존 MR 감쇠기-기반 스마트 제진 시스템	신개념 스마트 제진 시스템	감소율
비용	주요 장치	MR 댐퍼 1개 = 약 100만원	MR 댐퍼 1개 = 약 100만원 EMI system = 약 100만원	
	부대 장치	계측기 (가속도계, Load Cell) : 약 300만원 제어용 컴퓨터 및 DAQ system : 약 500만원 기타 부대비용(전원, 공간 등)	- 해당사항 없음	
	계	900만원 이상	200만원	78% 이상
기간	설치 기간	3일	1일	67%

이상과 같이 제어성능은 비슷하게 유지하면서도, 설치 비용이 훨씬 절감되고 또한 유지관리도 상대적으로 용이한 신개념 제진장치가 기존 MR 댐퍼-기반 스마트 제진장치보다 건설 분야의 구조물의 제진 대책으로 더욱 적합하리라 사료된다.

9.3. MR 감쇠기 내구성 검토

실제 토목 구조물 적용시 MR 댐퍼는 무한히 반복되는 왕복운동을 하게 된다. MR 댐퍼 설계시 고려된 감쇠력은 대상구조물에 대한 동적해석을 통해 계산된 값이기 때문에 오랫동안 성능발현을 위해서는 장기간의 왕복운동에도 초기 감쇠력의 저하가 없어야 한다.

장기간의 왕복운동에 대한 MR 댐퍼의 성능을 확인하기 위하여 본 연구과제에서 설계/제작한 MR 댐퍼를 이용하여 내구성 검토를 위한 피로시험을 수행하였다.

그림 3.9.3.1과 같이 KAIST 교육지원동에 있는 UTM기에 MR 댐퍼를 설치한 후 반복하중을 가하였다. UTM의 stroke는 위아래로 가각 10mm이며 가진 주파수는 2Hz로 설정하였고 총 100만회의 왕복운동을 수행하였다.

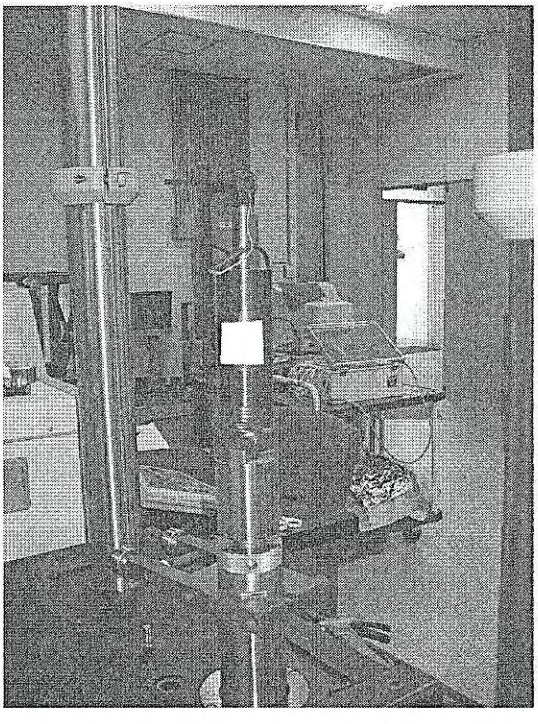


그림 3.9.3.1 피로시험을 위한 setup

피로시험 수행결과를 그림 3.9.3.2에 도시하였다. 100,000회마다의 stroke-하중의 이력곡선으로 각 회마다 100 cycle을 나타냈으며 1 cycle마다 10개의 data를 추출하였다.

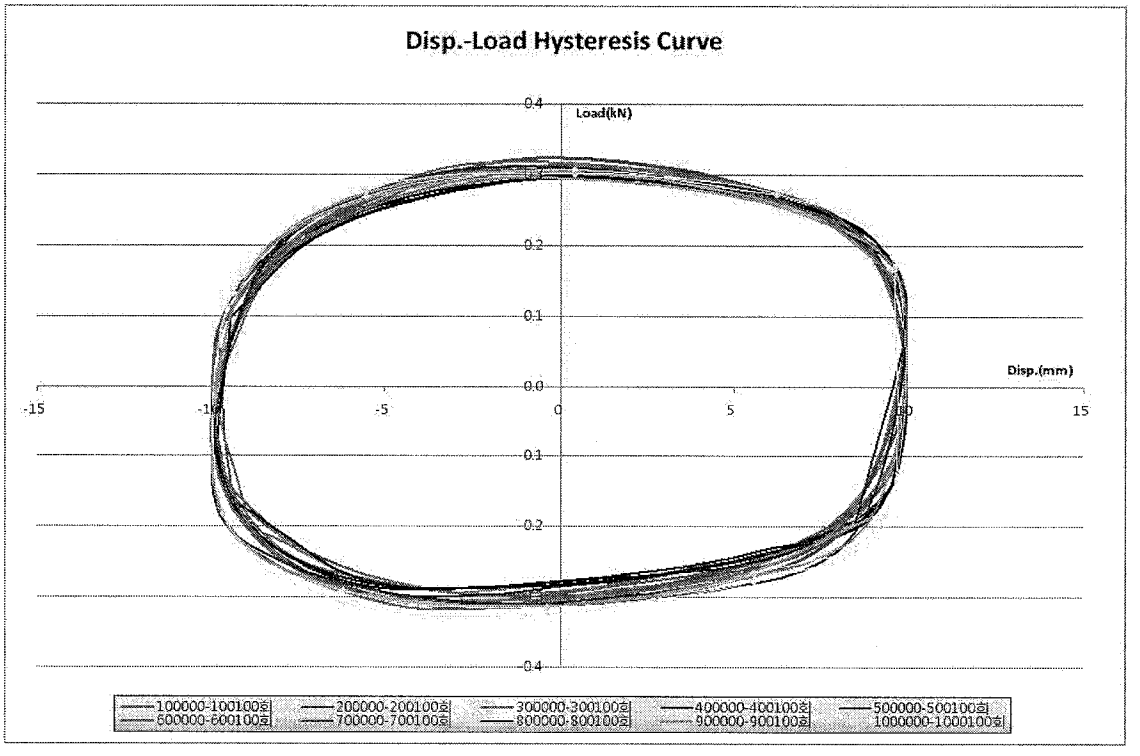


그림 3.9.3.2 변위-하중 이력곡선

본 연구과제에서 설계/제작한 MR 댐퍼에 대한 피로시험결과 장기간의 반복하중에도 감쇠력 저하가 발생하지 않음을 확인하였다.

9.4. 영구자석 자력유지 및 MR 유체 특성 검토

실제 토목 구조물 적용시 EMI 시스템은 장기간 외부환경에 노출되고, 수많은 반복운동으로 인해 영구자석의 자력의 손실이나 솔레노이드 부분의 코일의 임피던스 값의 변화로 인해 EMI 시스템의 성능 하락에 대한 우려가 제기되었다.

영구자석의 자력변화에 대한 검토 결과 본 연구과제에서 제작한 EMI 시스템에 사용된 자석의 경우 실제 구조물 사용년수 내에서는 성능에 대한 신뢰성에 문제를 일으킬 만한 변화는 없는 것으로 파악되었다.

일반적으로 영구자석은 그 자체가 자기 에너지를 갖고 있어 외부 에너지의 공급이 필요치 않다. 그러나 여러 가지 요인으로 인해 에너지의 손실이 발생한다. 그 중 가장 크고 대부분의 손실은 열에 의해 발생한다. 본 연구과제에서 사용한 영구

자석은 NdFeb (네오데뮴)계열 자석으로 퀴리온도 (물질이 자성을 잃는 온도)는 섭씨 340도이며 동작온도는 섭씨 -20도~200도이다. 또한 자기부상열차의 개발에도 사용이 고려되고 있는 종류이다.

MR 유체는 자기장 150~250kA/m 작용시 최대응력 50~100 kpa을 발휘하는 철 입자로 만들어지는데 습도나, 온도 등에 의한 영향이 적다. 본 연구과제에서 사용한 MR 유체는 Lord Corp.(USA)에서 제조한 것으로 섭씨 -40~130도 범위에서 성능감소가 없는 것으로 검증된 제품이다.

9.5. 국제 기술 선도/선점 전략

본 연구과제를 통해 개발된 대용량 신개념 스마트 제진장치 기술은 향후 초고층 건물 및 장대 교량을 제진 성능 향상을 위해 효과적으로 적용될 수 있는 핵심 기술 중 하나이다. 따라서, 국내 건설 업체가 세계 건설 시장에서 경쟁력을 갖기 위해서는 본 기술을 적극 활용할 필요가 있다.

본 기술은 대형 구조물 제진 분야에서 다른 기술에 비해 다음과 같은 특징이 있다.

- 일반 능동형 제진 장치는 물론이고 기존 스마트 제진 장치와 비교해서도 훨씬 간단하며 경제적이고, 제진 성능도 크게 차이나지 않는다.
- 일반 수동형 제진 장치에 비해 우수한 제진 성능과 적응성을 기대할 수 있다.

위와 같은 우수한 특성 때문에 본 기술이 향후 국제 관련 기술 분야에서 독자적인 위치를 차지할 수 있으리라 사료된다. 또한, 본 기술을 기반으로 하여 추가적인 연구개발을 수행한다면 보다 우수한 제진 기술을 확보할 수 있을 것이며, 관련 분야 세계 시장을 선점할 수 있을 것으로 기대된다.

위와 같은 분석을 바탕으로 아래와 같은 국제 기술 선도/선점 전략을 수립하였다.

단계	핵심 내용	주요 내용
1단계	국내외 학계/산업계 홍보 단계	학술대회나 기업체 강연 등을 통해 연구 성과를 보다 적극적으로 관련 분야 전문가들에게 홍보한다. 위와 같은 적극적인 성과 발표를 통해 관련 분야에서 본 기술의 중요성을 제고함으로써 첨단 기술 개발 주도권을 확보한다. 또한, 실 구조물 적용에 필요한 여러 가지 보완 연구를 수행하여 바로 상용화가 가능한 제품 수준의 장치를 준비한다.
2단계	실건물 및 실교량 적용을 통한 구체적인 검증단계	실제 시공 중이거나 공용 중인 건물 또는 교량에 본 기술을 적용하고, 다양한 각도에서 성능을 검증하여 기술의 우수성을 실질적으로 확인한다.
3단계	건설업체 등에 기술이전 및 세계 건설시장 진출 단계	본 기술을 국내 건설업체에 기술이전함으로써 기술의 경쟁력을 제고하고, 이를 통해 세계 건설시장에서 국내 건설업체의 점유율을 높이는 데 일조하도록 노력한다.

제 4 장. 연구개발목표 달성도 및 관련분야에의 기여도

1 절. 연구개발 수행 진도율

1.1. 1차년도 연구개발 수행 진도율

구분 / 개발내용	연구개발기간 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	진도(%)
신개념 제진장치 특성 실험	----	----	----	----									100%
신개념 제진장치 내진 평가 실험			----	----	----	----							100%
변위증폭장치를 이용한 케이블 제진 실험					----	----	----						100%
5kN MR 감쇠기 설계/제작 및 특성실험						----	----	----	----	----	----	----	100%
내진 성능 수치적 평가			----	----	----	----	----						100%
내풍 성능 수치적 평가						----	----	----	----	----			100%
총 진도율													100%

..... 당초계획

——— 실 적

1.2. 2차년도 연구개발 수행 진도율

구분 / 개발내용	연구개발기간 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	진도(%)
신개념 제진장치의 설치위치 및 최적용량에 대한 연구	··· —	··· —	··· —	··· —									100
대용량 전자기유도(EMI) 시스템 설계/제작 및 특성 실험					··· —	··· —	··· —	··· —	··· —				100
신개념 제진장치의 수치적 검증			··· —	··· —	··· —	··· —	··· —	··· —					100
대형 진동대시험을 통한 내진성능 평가					··· —	··· —	··· —	··· —	··· —	··· —			100
대형 풍동실험을 통한 내풍성능 평가							··· —	··· —	··· —	··· —	··· —	··· —	100
실규모 대형 철골구조물에 대한 제진 성능 평가								··· —	··· —	··· —			100
총 진도율													100

····· 당초계획

——— 실 적

1.3. 3차년도 연구개발 수행 진도율

구분 / 개발내용	연구개발기간 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	진도 (%)
추가적인 풍동 및 진동대 실험	··· —	··· —	··· —	··· —	··· —	··· —							100
최종 제품 설계 및 제작				··· —	··· —	··· —	··· —	··· —	··· —	··· —	··· —		100
신개념 제진장치의 특성 분석					··· —	··· —	··· —	··· —					100
실 구조물 또는 실물크기 구조물에 적용 시제품의 내진/내풍성능평가				··· —	··· —	··· —	··· —	··· —	··· —	··· —			100
설계 및 제작 지침서 작성 /성능평가기술 표준화								··· —	··· —	··· —	··· —		100
총 진도율													100

····· 당초계획

——— 실 적

2 절. 연구개발 목표의 달성도

2.1. 1차년도 연구개발 목표의 달성도

목 표	달 성 도 (%)	내 용
신개념 스마트 제진 장치의 장점을 최대화한 시제품 설계/제작	100%	신개념 스마트 제진 장치를 구성하는 EMI 시스템을 설계/제작하고 이에 대한 특성실험을 수행하였으며, 5kN 용량의 MR 감쇠기도 자체적으로 설계한 후 제작 중에 있다.
시제품에 대한 동특성 실험 수행	100%	EMI 시스템에 대한 특성실험을 수행하였으며, MR 감쇠기와 결합된 신개념 스마트 제진장치를 이용한 건물의 내진성능 평가를 위한 진동대 실험도 수행하였다. 또한, MR 감쇠기와 변위증폭장치로 구성된 제진 장치에 대한 내풍 성능 평가 실험도 수행하였다. 5kN 용량의 MR 감쇠기가 5월 중으로 제작 완료되면 이에 대한 특성실험도 1차년도 연구기간 내에 완료할 예정이다.
제진 장치 고려한 구조물 성능 평가	100%	건물, 면진 교량, 면진 건물 등과 같은 다양한 형태의 구조물에 대한 신개념 스마트 제진 장치의 내진 성능 평가를 수치적으로 수행하였다. 또한, 사장 케이블에 대한 내풍 성능 평가도 수치적으로 수행하여 신개념 스마트 제진 장치의 특징을 파악하고 효용성을 검증하였다.

2.2. 2차년도 연구개발 목표의 달성도

목 표	달 성 도 (%)	내 용
신개념 제진장치의 설치위치 및 최적용량에 대한 연구	100%	신개념 스마트 제진 장치의 주요 특성을 파악하여, 구조물에서의 최적 위치를 결정하였으며, 이를 빌딩 및 사장교 케이블에 적용하였다. 또한 전자기유도(EMI)시스템과 MR 감쇠기가 결합된 스마트 제진 장치의 최적 용량을 결정한 통합설계가 가능하였다.
대용량 전자기유도(EMI) 시스템 설계/제작 및 특성 실험	100%	대용량 전자기유도(EMI)시스템을 설계 및 제작하여 진동대 실험을 통하여 그 특성을 파악하였다. 이론적인 접근과 비교하여 추후 다양한 용량에 적합한 전자기유도 시스템을 제작 가능성을 보였다. 또한 부가적으로 발생되는 전자기유도감쇠력을 파악하여 추후 다양한 하중 및 요구에 따라 제작하는 것이 가능해졌다.
대형 진동대시험을 통한 내진 성능 평가	100%	8톤 규모의 6층 철골 시험구조물에 신개념 스마트 제진 장치를 설치하여, 대형 진동대를 이용하여 내진 성능 평가를 실험적으로 수행하였다. 실제 적용가능성을 파악하였다.
대형 풍동실험을 통한 내풍 성능 평가	100%	측정부의 폭원이 8m인 대형풍동에 케이블의 탄성체모형을 설치하여, 스마트 제진장치 설치 전후의 내풍거동을 실험적으로 확인하기 위한 예비실험을 수행하였다.
실규모 대형 철골구조물에 대한 제진 성능 평가	100%	20톤 규모의 실규모 5층 철골구조물에 실제 설치 용이하도록 제작된 MR 감쇠기 2기를 설치하여 내진 성능 평가를 실험적으로 수행하였다. 다양한 제어 알고리즘을 사용하여 그 성능을 비교 평가하였으며, 실규모에 적합한 신개념 제진 장치의 설계/설치 및 그 성능의 가능성을 확인하였다.

2.3. 3차년도 연구개발 목표의 달성도

목 표	달 성 도 (%)	내 용
추가적인 대규모 진동대 실험을 통한 성능평가	100%	축소 면진 교량 구조물에 신개념 스마트 제진 장치를 설치하여, 대형 진동대를 이용하여 그 내진 성능에 대한 우수성을 확인하였다.
대형 풍동실험을 통한 내풍 성능 평가	100%	대형 풍동 실험장치에 케이블의 탄성체 모형을 설치하여, 스마트 제진 장치 설치 전후의 내풍 거동을 실험적으로 확인하였다. 향후 실제 풍진동에 대한 신개념 스마트 제진 장치의 적용가능성을 파악을 위한 기초자료를 마련하였다.
실규모 대형 철골구조물에 대한 제진 성능 평가	100%	20톤 규모의 실규모 5층 철골구조물에 실제 설치 용이하도록 제작된 신개념 스마트 제진장치 (MR 감쇠기 및 EMI 시스템) 2개를 설치하여 내진 성능 평가를 성공적으로 수행하였다.
실규모 사장 케이블에 대한 내풍 성능 평가	100%	길이 100m 및 44.7m의 실규모 사장 케이블에 신개념 스마트 제진장치 설치하여 내진 성능 평가를 성공적으로 수행하였다.
최종제품 설계/ 제작	100%	통합설계를 통해 얻어진 상세도면을 이용하여 사장 케이블 제진용 신개념 스마트 제진장치를 제작하였다.
제진 장치 제품화/상용화를 위한 제작 및 성능평가기술 표준화	100%	신개념 스마트 제진장치의 제품화/상용화를 위한 기초단계로 설계 및 제작 지침서와 성능평가기술 지침서를 작성하였다.

3절 관련분야의 기술발전에의 기여도

1. 기술의 개요

본 기술은 최근에 관심이 고조되고 있는 스마트 제진장치를 실제 대형 토목/건축물에 적용하기 용이하도록 개선한 내용이다. 즉, 센서, 제어기, 전원공급장치 등과 같은 부대장치가 필요하여 설치 비용이 과다하고 설치 및 유지관리가 어려운 기존 시스템에 비해 신개념 스마트 제진장치는 위에서 언급된 모든 부대장치들을 필요로 하지 않고 그 대신에 영구자석과 코일로 이루어진 전자기유도부(EMI part)를 사용하여 구조물의 응답에 비례한 유도전압을 패러데이법칙에 따라 얻은 후 이값을 통해 MR 댐퍼의 감쇠 특성을 적응적으로 조절하여 구조물의 응답을 감소시키는 방법이다. 따라서, 이 제진 장치는 매우 단순하고 설치 및 유지관리가 용이하며 경제적인 신개념 스마트 제진장치라고 할 수있다.

2. 기술적 특징

- 패러데이의 전자기유도 법칙을 이용하여 운동에너지를 전기에너지로 변환하는 Energy Harvesting 기법을 도입한 신개념 스마트 제진 시스템이다.

- 기존 시스템의 국부적인 개선이나 단순한 결합이 아닌 전혀 새로운 차원의 제진 시스템을 의미한다.

- 기존 MR 댐퍼-기반 스마트 제진 시스템에서 필요로 하는 센서, 제어기, 전원공급장치 등이 전혀 필요없는 매우 단순하고 설치, 유지관리가 용이한 경제적인 스마트 제진 장치이다.

- 자체적으로 전원을 발생시키기 때문에 이를 활용하여 다양한 형태의 추가적인 연구 수행이 가능한 원천기술이다.

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

1. 건설 현장에서 적극 활용

- 효과적이고 경제적인 제진 장치의 실용화로 인한 인명·재산 피해의 방지
  - 사장교 케이블의 과도한 진동 문제 해결을 위해 사용
  - 면진 교량의 수평변위 감소를 위해 기존에 사용되는 댐퍼를 대체
  - 중장기적으로 고층건물 제진 대책 및 면진 건물 변위 제어를 위해 사용
- 국내 건설 시장의 수입대체에 활용: 외국에서 수입하는 사장교 케이블용 댐퍼와 면진교량용 댐퍼를 대체할 수 있음
- 해외 건설 시장 경쟁력 확보에 활용: 국내보다 실제 구조물에 적용이 많은 외국 건설 시장에서 우수한 성능 및 경제성을 바탕으로 시장 개척 가능

2. 교육용으로 활용

- 개발된 제진장치 설계 및 해석기법을 Benchmark로 한 연구 활성화
- 관련기관 및 산업체에서 시행하는 기술 교육용으로 활용

3. 새로운 연구에 활용

- 개발된 제진 장치의 설계, 제작 및 특성시험 기술을 새로운 제진기법 개발에 이용
- 차량하중, 파랑하중 및 소음제어 기술에 응용

4. 관련 후속연구개발의 전망

- 현재는 EMI 시스템을 단순히 MR댐퍼를 위한 전원공급장치로만 사용하였으나, 제어알고리즘이 들어있는 board나 chip과 결합하여 보다 적응성이 뛰어난 제진 시스템을 구축할 수 있으며 이에 대한 후속연구가 추진중에 있음

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

○ 최근 국제학술대회 참석 등을 통해 수집한 해외과학기술정보에 의하면 Energy Harvesting 방법을 토목 및 건축 구조물에 활용하여 모니터링하고 제어하는 분야에 관심이 고조되고 있다. 본 연구과제는 패러데이의 전자기 유도법칙을 통해 Power를 만들어내는 기본 원리를 가지고 신개념 스마트 제진 장치를 개발한 것이기 때문에, 위의 방법 중 하나로 볼 수 있다. 따라서, 이 연구가 실용화되면 국2내외적으로 파급효과가 매우 크고 관련 분야 연구를 선도할 수 있는 가능성이 높다고 사료된다.

제 7 장 참고문헌

1. 정형조, 이인원, "토목/건축 분야의 스마트제어 기술," *전산구조공학회지*,Vol. 16, No. 3, pp. 41-50, 2003. 9
2. 정형조, Billie F. Spencer, Jr., 이종헌, 이인원, "Semi-active Control Strategies for Seismic Responses of Cable-Stayed Bridges," *KSCE Journal of Civil Engineering*, 7권, 6호, pp. 735-745, 2003. 11.
3. 정형조, 박규식, Billie F. Spencer, Jr.,이인원, "사장교를 위한 LRB-기반 복합 기초격리 시스템," *한국지진공학회논문집*, Vol. 8, No. 3, pp. 63-75, 2004. 6.
4. 정형조, 최강민, 장지은, 이인원, "MR 감쇠기가 설치된 지진격리 건물의 스마트 진동제어," *2005년도 한국지진공학회 학술발표회*, 서울, 2005. 3. 18.
5. 박규식, 정형조, Billie F. Spencer, Jr., 이인원, "수동, 능동, 반능동 및 복합 시스템을 이용한 사장교의 지진응답제어," *한국지진공학회 논문집*, 7권, 1호, pp. 17-29, 2003. 2.
6. Hyung-Jo Jung, Heon-Jae Lee, Woo-Hyun Yoon, Ju-Won Oh & In-Won Lee, "Semiactive Neurocontrol for Seismic Response Reduction Using Smart Damping Strategy," *ASCE Journal of Computing in Civil Engineering*, Vol. 18, No. 3, pp. 277-280, July 2004.
7. Sang-Won Cho, Hyung-Jo Jung, Jong-Heon Lee & In-Won Lee, "Smart Passive System Based on MR Damper," *10th JSSI Symposium on Performance of Response Controlled Buildings,* Yokohama, Japan, Nov. 17-19, 2004.
8. Sang-Won Cho, Kyu-Sik Park, Chun-Ho Kim & In-Won Lee, "Smart Passive System Based on MR Damper," *1st International Conference "From Scientific Computing to Computational Engineering",* Athens, Greece, Sep. 8-10, 2004.
9. Hyung-Jo Jung, Billie F. Spencer, Jr. & In-Won Lee, "Control of a Seismically Excited Cable-Stayed Bridge Employing MR Fluid Dampers," *ASCE Journal of Structural Engineering*, 129(7), 873-883, 2003. 7.

10. Kyu-Sik Park, Hyung-Jo Jung, Jeong-Gyu Park, In-Won Lee, "Integrated passive-active system for seismic protection of a cable-stayed bridge," *Journal of Earthquake Engineering*, 7(4), 615-633, 2003. 8.
11. Hyung-Jo Jung, Billie F. Spencer, Jr., Yi Qing Ni & In-Won Lee, "State-of-the-art of Semiactive Control Systems Using MR Fluid Dampers in Civil Engineering Applications," *Structural Engineering and Mechanics*, 17(3-4), 493-526, 2004. 3.
12. Kang-Min Choi, Sang-Won Cho, Hyung-Jo Jung & In-Won Lee, "Semiactive Fuzzy Cotrol for Seismic Response Reduction Using MR Damper," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 33(6), 723-736, 2004. 5.
13. Hyung-Jo Jung, Kyu-Sik Park, Billie F. Spencer, Jr. & In-Won Lee, "Hybrid Seismic Protection of Cable-Stayed Bridges," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 33(7), 795-820, 2004. 6.
14. Hyung-Jo Jung, Heon-Jae Lee, Woo-Hyun Yoon, Ju-Won Oh & In-Won Lee, "Semiactive Neuro-Control of Seismic Response Reduction Using Smart Damping Strategy," *ASCE Journal of Computing in Civil Engineering*, 18(3), 277-280, 2004. 7.
15. Johnson, E.A., Baker, G.A., Spencer, Jr., B.F., and Fujino, Y. (2002) Semiactive damping of stay cables neglecting sag, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE.
16. Johnson, E.A., Christenson, R.A., and Spencer, Jr., B.F. (2003) Semiactive damping of stay cables with sag, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 18, 132-146.
17. Liao, W.H. and Lai, C.Y. (2002) Harmonic analysis of a magnetorheological damper for vibation control, *Smart Materials and Structures*, 11, pp.288-296.
18. Duan, Y.F., Ni, Y.Q., and Ko, J.M. (2005) State-derivative feedback control of cable vibration using semiactive magnetorheological dampers, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 20, 431-449.

19. Yang, J.N., Agrawal, A.K, Samali, B., and Wu, J.C. (2004) Benchmark problem for response control of wind-excited tall buildings, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 130(4), pp.437-446.
20. 정형조, 조상원, 장지은, 이인원 (2005) 스마트 수동 감쇠 시스템을 이용한 사장 케이블의 진동 제어, *2005년 봄 학술발표회*, 인천.
21. 조상원 (2004) Simple control algorithms for MR dampers and smart passive control system, 박사학위논문, 한국과학기술원.
22. 장종우 (2004) 지진 하중을 받는 빌딩에 대한 자기유변유체 감쇠기의 최적위치 결정, 석사학위논문, 한국과학기술원.
23. 조상원, 장지은, 윤우현, 이인원 (2005) 자기유변유체 감쇠기에 기반한 스마트 수동 감쇠 시스템의 성능 평가, *2005년도 한국지진공학회 학술발표회*, 서울.
24. 문석준, 김병현, 정종안, "반능동형 오리피스 유체댐퍼를 이용한 구조물 진동제어에 관한 실험적 연구", 한국지진공학회 논문집, 제8권, 제2호, 2004
25. 문석준, 김병현, 정종안, "지반기진력을 받는 구조물의 진동제어를 위한 자기유변 감쇠기의 실험적 연구", 한국소음진동공학회 논문집, 제14권, 제8호, 2004
26. G. Yang, Large-Scale Magnetorheological Fluid Damper for Vibration Mitigation: Modeling, Testing and Control, Ph.D. Dissertation, Univ. of Notre Dame, IN, USA, 2001
27. RD-1005-3 Product Bulletin, Lord Corporation, 2003
28. D. Meeker, User's Manual for Finite Element Method Magnetics Version 3.4, http://femm.berlios.de, 2004
29. (주) 동양시스템 홈페이지, http://www.dongyangsys.co.kr/
30. Hydrocarbon-Based MR Fluid MRF-140CG Product Bulletin, Lord Corporation, 2005
31. Hydrocarbon-Based MR Fluid MRF-132DG Product Bulletin, Lord Corporation, 2005
32. Hong, S.R., Choi, S.B., Choi, Y.T., and Wereley, N.M., "Non-dimensional analysis and design of a magneto-rheological damper", Journal of Sound and Vibration, Vol.288, 2005, pp.847-863

여 백

[붙 임 1]

자체평가의견서

1. 과제 현황

사업 명	건설기술혁신사업			
연구 과제	과 제 명	**내진 및 내풍 대책으로 적합한 신개념 스마트 제진 장치의 실용화**		
	주관연구기관	세종대학교 산학협력단	주관연구책임자	이 기 학
연구 기간	2007. 8. 17 ~ 2008. 8. 16			
협동연구기관	기 관 명		연 구 책 임 자	
	한국과학기술원, 한국기계연구원		이행기, 문석준	
위탁연구기관	기 관 명		위탁연구책임자	
	(주)티이솔루션		김윤석	
참여기업	기업체명		대 표 자	
	(주)티이솔루션, (주)내경엔지니어링		김윤석, 강한구	
연 구 비 (천원)	연차	정부	민간	계
	1차년도	201,000	67,000	268,000
	2차년도	287,000	95,667	382,667
	3차년도	271,000	90,333	361,333
	계	759,000	253,000	1,012,000

2. 평가일 : 2008. 8. 11.

3. 평가자(연구책임자) 확인

본인은 평가대상 연구과제의 연구결과에 대하여 객관적으로 기술하였으며, 공정하게 평가하였음을 확약합니다.

소 속	직 위	성 명	확약(서명, 인)
세종대학교 건축공학과	부교수	이기학	

[붙 임 1]

자체평가의견서

1. 과제 현황

사업 명	건설기술혁신사업			
연구 과제	과 제 명	**내진 및 내풍 대책으로 적합한 신개념 스마트 제진 장치의 실용화**		
	주관연구기관	세종대학교 산학협력단	주관연구책임자	이 기 학
연구 기간	2007. 8. 17 ~ 2008. 8. 16			
협동연구기관	기 관 명		연 구 책 임 자	
	한국과학기술원, 한국기계연구원		이행기, 문석준	
위탁연구기관	기 관 명		위탁연구책임자	
	(주)티이솔루션		김윤석	
참여기업	기업체명		대 표 자	
	(주)티이솔루션, (주)내경엔지니어링		김윤석, 강한구	
연 구 비 (천원)	연차	정부	민간	계
	1차년도	201,000	67,000	268,000
	2차년도	287,000	95,667	382,667
	3차년도	271,000	90,333	361,333
	계	759,000	253,000	1,012,000

2. 평가일 : 2008. 8. 11.

3. 평가자(연구책임자) 확인

본인은 평가대상 연구과제의 연구결과에 대하여 객관적으로 기술하였으며, 공정하게 평가하였음을 확약합니다.

소 속	직 위	성 명	확약(서명, 인)
세종대학교 건축공학과	부교수	이기학	

Ⅰ. 연구개발 실적

평 가 항 목	가중치 (A)	평가척도(B) 수 5	우 4	미 3	양 2	가 1	득점 (A×B)	평 기 의 견
연구수행								
① 연구개발 결과의 우수성 및 창의성	2	○					10	다양한 실험 및 해석 수행 결과, 신개념 스마트 제진 장치가 내진 및 내풍 대책으로 적합한 것으로 확인 되었고, 이 장치는 국내외적으로 유일한 창의적인 제진 시스템이다.
② 연구개발 수행노력의 성실도	2	○					10	협동기관과 참여기업은 정기적으로 연구회의를 가졌으며 각 분야 전문가로부터 자문을 받아 연구진행상의 문제점을 보완하였다. 연구 계획상의 여러 가지 실험 및 수치해석을 성실히 수행하였다.
③ 연구개발 결과에 대한 활용가능성	2	○					10	수치해석 및 실험적으로 성능이 검증된 신개념 스마트 제진 장치는 사장 케이블 및 실규모 건물/교량 등에 폭넓게 활용 가능하다.
④ 연구개발 결과의 파급효과	2	○					10	본 연구에서 제안된 신개념 제진 장치는 다양한 토목/건축 구조물은 물론이고 기계, 조선 구조물에도 적용 가능한 원천 기술이다. 따라서, 실용화 완성에 따른 파급효과가 매우 클 것으로 사료된다.
⑤ 공개 발표된 연구개발 성과 (논문 게제 또는 산업재산권 출원 및 심사 가능성, 발표회개최 등)	2	○					10	본 연구와 관련되어 다음과 같이 많은 연구결과가 나왔다. (1) 국제학술지논문: 6편 게재, 1편 게재승인 (SCI급) (2) 국내학술지논문: 4편 (3) 국제학술발표논문: 27편 (4) 국내학술발표논문: 10편 (5) 국내특허출원,등록: 1건(등록), 2건(출원)

평 가 항 목	가중치 (A)	평가척도(B) 수 5	우 4	미 3	양 2	가 1	득점 (A×B)	평 기 의 견
연구목표 달성도(연구개발계획서상에 기술된 연구목표)								
⑥ 신개념 스마트 제진 장치의 설계/제작/평가 기술 개발	1	○					5	신개념 스마트 제진 장치의 특성을 완벽히 파악하여, MR 댐퍼와 EMI가 동시에 고려된 통합설계를 수행하였고, 이를 통해 설계/제작/성능평가 기술을 확보하였다.
⑦ 대용량 전자기유도(EMI) 시스템 설계/제작 및 특성 실험	0.5	○					2.5	대용량 전자기유도(EMI)시스템을 설계 및 제작하여 진동대 실험을 통하여 그 특성을 파악하여 다양한 용량에 적합한 시스템 제작 가능성을 확인하였다. 또한 부가적으로 발생되는 전자기유도감쇠력에 대한 특성을 파악하였으며, 이를 고려하여 추후 다양한 하중 및 요구에 따라 제작하는 것이 가능해졌다.
⑧ 신개념 제진장치의 내진 및 내풍 성능 수치적 검증	1	○					5	면진건물, 면진교량, 사장교 및 사장교 케이블을 대상으로 스마트 제진 장치의 내진 및 내풍 성능을 수치적으로 검증하였으며, 이에 신개념 제진 장치의 내진 및 내풍 성능에 대한 우수성을 확인하였다.
⑨ 대형 진동대시험을 통한 내진성능 평가	1	○					5	8톤 규모의 6층 철골 시험구조물 및 축소 면진 교량 구조물에 신개념 스마트 제진 장치를 설치하여, 대형 진동대를 이용하여 그 내진 성능에 대한 우수성을 확인하였다.

⑩ 대형 풍동실험을 통한 내풍성능 평가		1	○					5	대형 풍동 실험장치에 케이블의 탄성체 모형을 설치하여, 스마트 제진 장치 설치 전후의 내풍 거동을 실험적으로 확인하였다. 향후 실제 풍진동에 대한 신개념 스마트 제진장치의 적용가능성을 파악을 위한 기초자료를 마련하였다.
⑪ 최종제품 설계/제작		1	○					5	통합설계를 통해 얻어진 상세도면을 이용하여 사장 케이블 제진용 신개념 스마트 제진장치를 제작하였다.
⑫ 실규모 대형 철골구조물에 대한 제진 성능 평가		1	○					5	20톤 규모의 실규모 5층 철골구조물에 실제 설치 용이하도록 제작된 신개념 스마트 제진장치 (MR 감쇠기 및 EMI 시스템) 2개를 설치하여 내진성능 평가를 성공적으로 수행하였다.
⑬ 실규모 사장 케이블에 대한 내풍 성능 평가		0.5	○					2.5	길이 100m 및 44.7m의 실규모 사장 케이블에 신개념 스마트 제진장치 설치하여 내진성능 평가를 성공적으로 수행하였다.
⑭ 제진 장치 제품화/상용화를 위한 제작 및 성능 평가기술 표준화		1	○					5	신개념 스마트 제진장치의 제품화/상용화를 위한 기초단계로 설계 및 제작 지침서와 성능평가기술 지침서를 작성하였다.
소계	전문가 평가점수 (100점 만점)	20						100	

II. 종합의견

1. 연구개발결과에 대한 종합의견

○ 신개념 스마트 제진 장치는 대표적인 반능동 제어 장치인 MR 댐퍼에 EMI (전자기유도) 장치를 결합한 것으로서, 본 연구에서는 이러한 신개념 스마트 제진 장치의 상세한 거동 특성을 이론적, 실험적으로 상세하게 파악하였고, 실 구조물에 적용할 수 있는 대용량 신개념 제진장치를 설계/제작/평가하는 기술을 확보하였다.

○ 신개념 스마트 제진장치의 내진/내풍 성능을 파악하기 위해 다양한 구조물 (면진 건물, 면진 교량, 사장교, 사장 케이블 등)에 대한 수치모의실험을 수행하였으며, 축소 건물 모형 및 축소 면진 교량에 대한 진동대 실험도 수행하였다. 또한, 실규모 철골구조물 및 사장 케이블에 대한 실험을 통해 적용가능성에 대해서도 검토하였다. 대형 풍동 실험을 통해 실제 풍하중하에서의 신개념 제진장치의 제진 성능에 대한 검토도 수행되었다. 이상의 연구 성과를 바탕으로, 신개념 스마트 제진 장치가 대형 토목/건축 구조물의 내진 및 내풍 대책으로 실제적으로 유용하게 활용될 수 있음이 검증되었다.

○ 변위증폭장치를 도입한 제진 시스템의 경우에는, 사장 케이블 제진 대책으로 유용하게 활용될 수 있음이 44.7m 길이의 사장 케이블 실험을 통해 확인되었다. 또한, 이에 대한 연구 성과를 바탕으로 특허를 신청하여 등록되었다 (명칭: 사장케이블 제진을 위한 감쇠장치, 등록번호: 10-0770433호). 특히, 최근 국내 사장교 설계/시공이 증대되고 있는 시점에서 사장교 케이블 제진 문제가 매우 주요한 이슈로 부각되고 있기 때문에, 이 연구 결과를 좀 더 발전되어 활용된다면 그 기대효과는 매우 막대하리라 사료된다.

○ 신개념 스마트 제진장치의 실용화를 위해 설계, 제작 및 성능평가 기술을 표준화하려고 노력하였으며, 이에 대한 지침서를 마련하였다. 또한, 기존 MR 댐퍼-기반 스마트 제진장치와의 경제적인 장단점을 비교하여 신개념 스마트 제진장치가 훨씬 경제적임을 확인하였다.

2. 평가시 고려할 사항 또는 요구사항

○ 본 연구에서 개발하고자 하는 신개념 스마트 제진 장치는 국내외적으로 유일한 장치이고 다양한 전공 분야의 지식을 요구하고 있기 때문에, 토목, 건축, 기계, 풍 공학 전문가들의 다학제간 연구가 필수적이다. 그리고, 본 연구팀은 정기적인 연구회의 및 자문 등을 통해 효과적으로 이에 대한 연구를 수행하고 있다.

○ 협동연구기관인 한국과학기술원, 한국기계연구원 및 참여기업인 티이솔루션과 정기적으로 연구회의를 가졌으며, 관련 분야 전문가의 자문을 통해 연구진행 상의 문제점을 지속적으로 보완할 수 있도록 노력하였다. 그 결과로 각 참여기간 관의 공고한 협력체제 하에 기업이 요구하는 실용적인 제진 장치의 개발이 가능하였다.

○ 본 연구팀의 노력 결과로 본 연구와 밀접하게 관련되어 있는 특허가 1편 등록되었으며 (명칭: 사장케이블 제진을 위한 감쇠장치, 등록번호: 10-0770433호), 추가적으로 2편이 출원된 상태이다.

○ 본 연구팀의 노력 결과로 본 연구와 밀접하게 관련되어 있는 다수의 연구결과가 국내외 학계에 발표되었다. 감사의 글이 들어간 SCI급 국외 전문 학술지 7편 (6편 게재, 1편 게재승인), 국내 전문 학술지 4편 (학회지 포함), 국제학술대회 및 국내학술대회에서도 30편이 넘게 발표하였다.

3. 연구결과의 활용방안 및 향후조치에 대한 의견

○ 본 연구를 통해 개발된 신개념 스마트 제진 장치는 다양한 토목/건축 구조물의 제진을 위해 활용될 수 있다. 먼저, 사장 케이블의 내풍 대책으로 바로 활용될 수 있으며, 이를 위해 출원한 특허 (명칭: 사장케이블 제진을 위한 감쇠장치)가 2007년 10월 19일에 등록된 바 있다 (등록번호: 10-0770433호). 새로 등록된 특허는 다양한 제원을 갖는 사장 케이블에 보다 쉽게 감쇠장치를 설치하는 내용이므로 신개념 스마트 제진장치의 장점을 더욱 부각시킬 수 있을 것으로 사료되며, 이를 통해 보다 적극적은 활용이 이루어질 수 있다.

○ 축소된 면진 교량의 진동대 시험 결과를 살펴보면 알 수 있듯이, 본 제진 장치는 면진 교량의 수평 변위를 조절하기 위한 감쇠장치로도 매우 효율적으로 활용될 수 있으리라 기대된다.

○ 신개념 스마트 제진 장치의 실용화를 위해, 실 구조물에 설치하여 적용성을 검사하는 단계가 매우 중요하다. 이를 위해, 산업체 담당자 및 관련 분야 전문가 등과 긴밀하게 협의하고 있으며, 근 시일 내에 실제 구조물에 시험 시공이 가능하리라 사료된다.

○ 신개념 스마트 제진 장치는 토목/건축 구조물뿐만 아니라 기계/조선 분야에도 적용이 가능한 원천 기술이기 때문에, 협동연구기관인 기계연구원의 도움을 받아 타 분야로의 기술 활용을 적극 시도할 것이다.

주 의 사 항

1. 본 보고서는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 건설기술 연구개발사업의 최종(중간) 연구보고서입니다.
2. 본 보고서의 내용을 발표할 때에는 반드시 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 건설기술연구개발사업임을 밝혀야 합니다.
3. 국가보안 차원에서 필요하다고 인정되는 내용은 대외적으로 발표 및 공개하여서는 아니 됩니다.

본 보고서와 관련하여 문의를 원하시는 분은 아래의 문의처로 연락을 주시기 바랍니다.

■ 문의처 : 한국건설교통기술평가원 TEL 031)381-6311
세종대학교 산학협력단 TEL 02)3408-3286
한국과학기술원 TEL 042)869-3626
한국기계연구원 TEL 042)868-7428

R&D / 05건설핵심C21

내진 및 내풍 대책으로 적합한 신개념 스마트 제진 장치의 실용화
최종보고서

■ 발행일 / 2008. 8. 14.
■ 발행처 / 세종대학교 산학협력단
서울시 광진구 군자동 98번지
TEL : 02-3408-3286
■ 인쇄처 / 카피마당