건설핵심기술연구개발사업 제3차년도 최종보고서

R&D / 06건설핵심 D13

에너지 흡수효율 극대화를 위한 면진장치 및 최적면진구조 설계기술개발 연구보고서

2009. 12. 16.

주관연구기관 /(재)포항산업과학연구원
협동연구기관 /(주)동 일 고 무 벨 트
(주)우 진
위탁연구기관 /부 산 대 학 교

국 토 해 양 부
한국건설교통기술평가원

Land Transpot and Maritime R&D Report

제 출 문

국토해양부장관(한국건설교통기술평가원장) 귀하

본 보고서를 “에너지흡수효율 극대화를 위한 면진장치 및 최적 면진구조 설계기술 개발”의 최종보고서로 제출합니다.

2009. 12. 16.

주관연구기관 : (재)포항산업과학연구원
원 장 권 오 준

협동연구기관 : 동일고무벨트(주)
대 표 자 김 세 연

협동연구기관 : (주)우진
대 표 자 유 계 현

위탁연구기관 : 부산대학교
대 표 자 이 상 호

■ 총괄연구책임자 / 책임연구원 김 상 범 프로젝트 수행 총괄

■ 주관연구기관((재)포항산업과학연구원)

참 여 연 구 원	/ 책임연구원 김 상 범	프로젝트 수행 총괄
	/ 선임연구원 유 홍 식	세부 연구수행
	/ 연 구 원 강 영 웅	세부 연구수행

■ 협동연구기관((주)우진)

	/ 책임연구원 김 정 철	복합면진장치 개발 수행
	/ 선임연구원 한 동 운	세부 연구수행
	/ 연 구 원 김 태 훈	세부 연구수행
	/ 연 구 원 백 진 현	세부 연구수행
	/ 연 구 원 김 기 익	세부 연구수행

■ 협동연구기관(동일고무벨트(주))

참 여 연 구 원	/ 수석연구원	안 태 상	구조설계분야 수행 총괄
	/ 책임연구원	박 진 삼	세부 연구수행
	/ 책임연구원	임 종 만	세부 연구수행
	/ 선임연구원	허 무 원	세부 연구수행
	/ 연 구 원	김 용 판	세부 연구수행
	/ 연 구 원	김 영 성	세부 연구수행

■ 위탁연구기관(부산대학교)

	/ 교 수	이 상 호	위탁 연구수행 총괄
	/ 교 수	오 상 훈	위탁 연구수행
	/ 대학원생	전 형 진	위탁 연구수행
	/ 대학원생	차 명 근	위탁 연구수행
	/ 대학원생	황 원 태	위탁 연구수행
	/ 대학원생	최 광 용	위탁 연구수행
	/ 대학원생	박 해 용	위탁 연구수행

보고서 요약서

<table>
<tr><td>과제고유번호</td><td>06건설핵심
D13</td><td>해 당 단 계
연 구 기 간</td><td>2008.06.17~
2009.12.16</td><td>단 계 구 분</td><td>3차년도/
(3차년도)</td></tr>
<tr><td>연 구 사 업 명</td><td colspan="5">건설핵심기술연구개발사업</td></tr>
<tr><td>연 구 과 제 명</td><td colspan="5">에너지흡수효율 극대화를 위한
면진장치 및 최적 면진구조 설계기술 개발</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연 구 책 임 자</td><td rowspan="2">김상범</td><td>해당단계
참 여
연구원수</td><td>총 : 22명
내부: 15명
외부: 7명</td><td>해당단계
연 구 비</td><td>정부: 526,000천원
기업: 226,761천원
계 : 752,761천원</td></tr>
<tr><td>총연구기간
참 여
연구원수</td><td>총 : 66명
내부: 45명
외부: 21명</td><td>총연구비</td><td>정부: 858,000천원
기업: 428,373천원
계 :1,286,373천원</td></tr>
<tr><td>연구기관명 및
소 속 부 서 명</td><td colspan="2">(재)포항산업과학연구원</td><td>참여기업명</td><td colspan="2">(주)동일고무벨트,
(주)우진, 전명기계</td></tr>
<tr><td>위 탁 연 구</td><td colspan="5">연구기관명 : 부산대학교 연구책임자 : 이상호</td></tr>
<tr><td colspan="4">요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)</td><td>보고서면수</td><td>504</td></tr>
<tr><td colspan="6">최근 전 세계적으로 지진발생 횟수가 증가하고 피해규모도 대형화되는 추세이며, 일본에서 발생한 지진(후쿠오카지진, 2004)과 같이 인접국에서 발생한 지진이 국내에 피해를 유발한 사례가 발생하였다. 최근 개정된 KBC2009에서는 내진설계기준이 크게 강화되었다. 국내외적으로 구조설계기준은 성능 설계법으로 전환되고 있고, 다양한 구조시스템의 도입이 활성화될 것으로 판단된다. 면진구조시스템은 규모가 큰 지진에도 구조물의 손상을 최소화하여, 지진발생 이후에도 기능유지가 가능하기 때문에 성능설계 개념에서 최근 주목을 받고 있다. 그러나 면진장치의 요구 성능 기준 및 그에 따른 면진구조시스템의 내진성능에 대한 규정이 제정되어 있지 않아, 면진구조시스템의 도입에 따른 지진하중의 저감효과를 설계에 반영하는 것이 불가능하여, 비경제적인 설계가 이루어지고 있고 면진구조시스템의 적용이 어려운 상태이다. 따라서, 본 연구에서는 지진응답해석을 통하여 면진구조시스템의 내진성능을 규명하고, 그에 따른 면진장치의 요구성능 기준을 제시하고, 면진구조시스템의 내진성능을 확보하기 위하여 요구되는 성능을 만족시킬 수 있는 면진장치를 개발하고자 한다. 그리고 면진구조시스템의 실용화를 위하여, 설계프로세스를 정립하고 그에 따른 설계지침 및 시공지침을 개발하여 면진구조의 활발한 현장적용을 위한 기반을 구축하고자 한다.</td></tr>
<tr><td rowspan="2">색 인 어
(각 5개 이상)</td><td>한 글</td><td colspan="4">면진구조, 적층고무, 에너지 흡수장치,
성능스펙트럼, 에너지법</td></tr>
<tr><td>영 어</td><td colspan="4">Base Isolation System, Rubber Bearing, Energy Absorption Device,
Capacity Spectrum, Seismic Design using Energy Method</td></tr>
</table>

요 약 문

Ⅰ. 제 목

에너지흡수효율 극대화를 위한 면진장치 및 최적 면진구조 설계기술 개발

Ⅱ. 연구개발의 목적 및 필요성

최근 전 세계적으로 지진발생 횟수가 증가하고 피해규모도 대형화되는 추세이며, 일본에서 발생한 지진(후쿠오카지진, 2004)과 같이 인접국에서 발생한 지진이 국내에 피해를 유발한 사례가 발생하였다. 또한 최근 개정된 KBC2005에서는 내진설계기준이 크게 강화되었으며 방재청에서 국가재난관리시스템을 구축하여, 홍수, 태풍, 지진 등 자연재해를 국가적으로 관리/예방하고 있다. 국내외적으로 구조설계기준은 성능 설계법으로 전환되고 있고, 다양한 구조시스템의 도입이 활성화될 것으로 판단된다. 면진구조시스템은 규모가 큰 지진에도 구조물의 손상을 최소화하여, 지진발생 이후에도 기능유지가 가능하기 때문에 성능설계 개념에서 최근 주목을 받고 있다. 면진장치의 요구성능기준 및 그에 따른 면진구조시스템의 내진성능에 대한 규정이 제정되어 있지 않아, 면진구조시스템의 도입에 따른 지진하중의 저감효과를 설계에 반영하는 것이 불가능하여, 비경제적인 설계가 이루어지고 있고 면진구조시스템의 적용이 어려운 상태이다.

본 연구에서는 지진응답해석을 통하여 면진구조시스템의 내진성능을 규명하고, 그에 따른 면진장치의 요구성능 기준을 제시하고, 면진구조시스템의 내진성능을 확보하기 위하여 요구되는 성능을 만족시킬 수 있는 면진장치를 개발하고자 한다. 그리고 면진구조시스템의 실용화를 위하여, 설계프로세스를 정립하고 그에 따른 설계지침 및 시공지침을 개발하여 면진구조의 활발한 현장적용을 위한 기반을 구축하고자 한다.

Ⅲ. 연구개발의 내용 및 범위

(1) 과제 최종목표 및 범위

본 과제는 다음과 같이 4가지 최종 연구목표를 포함한다.

○ **고인성 강재를 이용한 에너지흡수장치 시제품 개발**

- 적층고무 이상의 전단변형성능을 보유한 강재 에너지흡수장치 형상 개발

○ **적층고무와 강재에너지흡수장치를 병행한 복합 면진장치 개발**

- 복합 면진장치 형상 개발
- 복합 면진장치의 에너지흡수능력 및 복원력특성 규명

○ **효율적인 면진구조시스템 설계를 위한 에너지법에 의한 설계프로세스 정립.**

- 면진구조의 응답가속도 저감효과, 상부구조의 내력분담, 최대변위 제어효과 등 내진성능지표들을 미리 예측 가능한 에너지법에 의한 설계프로세스 개발

○ **실용화를 위한 설계지침, 시공지침, 품질관리지침 및 매뉴얼 작성**

(2) 당해연도 최종목표 및 범위

연 차	최종목표	주요 연구
3차년도 (당해연도)	▪면진 구조설계 및 시공성 평가	▪ 층고절감형 면진구조 시스템 제안 ▪ 면진구조의 구조시스템 선정및 개념설계 ▪ 면진구조의 구조설계 상세 설계 ▪ 면진구조의 경제성 평가 ▪ 면진구조의 시공성 평가
	▪면진구조 지침 및 매뉴얼 작성	▪ 면진구조 및 장치의 설계지침 및 매뉴얼 작성 ▪ 복합면진장치의 설계프로세스 및 면진구조의 시공지침 작성 ▪ 복합 면진장치 품질관리 지침 작성
	▪진동대실험에 의한 동적성능 평가	▪ 에너지 흡수장치의 진동성능 평가 실험 ▪ 복합 면진장치의 진동성능 평가 ▪ 복합면진장치의 에너지 흡수효율 및 복원력 특성 제시
	▪Mock-Up Test에 의한 연결부 성능검증	▪ 복합 면진장치와 구조체와의 연결부 상세 개발 ▪ 면진층의 연결부 Mock-up 시공 및 시공성 평가 ▪ 연결부의 구조성능 평가 실험

Ⅳ. 연구개발 결과

본 연구에서는 면진구조시스템 개발방향을 설정하여, 복합면진장치 성능목표를 설정하고 에너지흡수장치의 형상을 개발하였다. 본 연구의 주요 연구 결과는 아래와 같다.

○ 면진구조의 에너지법에 의한 성능설계 프로세스 제시

- 면진구조용 동적지진응답해석 알고리즘 및 프로그램 개발
- 상부구조의 고유주기 및 면진장치의 주기와 내력을 고려한 해석모델 제시
- 실지진파를 이용한 면진구조 지진응답해석 및 분석
- 면진장치의 요구성능 도출
- 면진구조에서의 지진입력에너지의 면진층 에너지분포율 평가
- 면진층에서의 에너지흡수장치 소성변형에너지(손상에너지) 분포예측식 제시
- 상부구조에서의 층별 에너지 분포예측식 제시
- 에너지흡수장치의 요구성능과 응답예측에 의한 성능 비교 평가
- 상부구조의 주기(높이 및 강성 변화)에 따른 에너지흡수장치의 성능 예측식 제시
- 에너지평형식에 근거한 면진구조에서의 탄성에너지(We), 감쇠에너지(Wh), 소성에너지(Wp)의 평가기법 제시
- 면진구조에서의 손상분포 예측식을 이용한 면진층의 소성변형에너지(Wpr) 및 상부구조의 소성변형에너지(Wps)의 평가기법 제시
- 면진층의 소성변형에너지 집중율 최대화를 위한 성능평가 곡선식 제시
- 면진장치의 에너지흡수성능에 따른 면진구조의 성능설계 프로세스 제시
- 성능설계 프로세스에 의한 해석모델 설계 및 지진응답해석
- 지진응답해석 결과를 이용한 성능설계 프로세스의 타당성 검증

○ 에너지흡수장치 형상 최적화 및 복합면진장치 형상개발

- 에너지흡수장치 형상비(높이, 폭, 강재두께 등)에 따른 FEM 해석변수

설정

- 에너지흡수장치 샘플에 대한 FEM 해석
- 에너지흡수장치 형상 결정 및 실헝변수(열처리 프로세스 포함) 설정
- 실험장치 설계 및 제작
- 에너지흡수장치 샘플에 대한 전단변형성능 평가 실험
- 에너지흡수장치의 전단변형성능 분석 및 복원력 특성 모델 제시
- 실험결과 및 해석결과의 비교 분석에 의한 최적형상 도출
- 적층고무와 에너지흡수장치의 접합부 상세 개발
- 복합면진장치 제작 프로세스 결정
- 시제품 제작
- 적층고무의 생산프로세스별 성능 신뢰성 평가
- 에너지흡수장치의 생산프로세스별 성능 신뢰성 평가
- 생산프로세스별 안정화 작업

Ⅴ. 연구개발결과의 활용 계획

고인성 강재를 이용한 에너지 흡수장치 및 적층고무와 함께 사용한 복합 면진장치는 제품화하여 (주)우진과 동일고무벨트(주)에서 사업화할 예정이다. 또한 고인성 강재에 대한 원천기술을 확보하고, 향후 토목 및 기계산업 분야 등에 적용하기 위한 후속 연구를 수행할 예정이다.

S U M M A R Y

Ⅰ. Subject

The Development of optimum Seismic Isolation Structural Design and Seismic Isolation Device for Idael Energy Absorption Efficiency

Ⅱ. Object and necessity of research

Recently earthquake increases in the whole world and its damage size becomes bigger. The earthquake which occurs from Japan (Fukuoka earthquake, 2004) with the earthquake which occurs together from the contiguity country damage mortar one instance occurred in domestic. Also from the KBC2005 which opened a court recently it constructs a national misfortune civil official system from prevention of disaster office the seismic isolation design standard to be a lot strengthened, the civil official it prevents a flood, the typhoon and an earthquake back natural calamity with National Anthem. Inside and outside of the country, the structure design standard being converted with the law of efficiency plan, with the fact that the introduction of the structure system which is various will be activated. The seismic isolation structure system minimizes the damage of the infrastructure even in the earthquake where the size is big, even in earthquake occurrence after the attention recently from efficiency plan concept because the function maintenance is possible it receives. If demand efficiency standard of seismic isolation system and it follows in him and the regulation against the earthquake-proof efficiency of position structure system is not established not to be, impossible to reflect reduction effect of the earthquake load which it follows in introduction of seismic isolation structure system to a plan distress removal from a register the plan is become accomplished and it is a condition where the application of seismic isolation structure system is difficult.

Earthquake answer back interpretation it leads from the research which it sees and it examines closely it follows presents to secure the earthquake-proof efficiency of seismic isolation structure system, if in him and the demand efficiency standard of position system. If it could be satisfied the efficiency which is demanded and it develops it does a position system. And for the utility anger of seismic isolation structure

system, plan process it takes a triangular position and the plan guide which it follows in him and the spatial-temporal guide and it develops the base for the site application which cotton position structure is actively.

III. Contents and scope of research and development

(1) The final object of research and scope the subject

The research includes 2 branch final research aim

○ Development of the Energy Absorption Device test production by high tenacity steel

- The steel energy absorption system form development which possesses shearing strain efficiency above the laminate rubber

○ Development of the laminate layer rubber and steel energy absorption system the composition which is in parallel if position system

- Compound seismic isolation device form development
- Energy absorption ability of compound seismic isolation device composition energy absorption ability and a strength of stability

○ For if a efficient, position structure system design the plan process triangular position due to the energy law.

- Historical shares and the maximum displacement control effect back earthquake-proof efficiency indices of answer back degree of acceleration reduction effect and superstructure of seismic isolation structure in advance prediction the plan process development due to the energy law which is possible.

○ The plan guide for a utility, spatial-temporal guide, and quality control guide and manual drawing

(2) The year final object and scope

Year	Final objective	The principal research
third	▪Efficiency plan process by energy of seismic structure system	▪Seismic structure system energy-absorbing by dynamic interpretation by the earthquake response ▪Seismic structure system of the earthquake response prediction present ▪Efficiency plan process of seismic structure system
	▪Energy absorption system form optimization and complex seismic structure system form development	▪Efficiency value test and FEM analysis for energy absorbing system sample ▪Optimization form correction of energy absorbing system ▪Complex seismic structure system prototype product ▪Complex seismic structure system produce process stabilization

IV. Research and development result

The position system efficiency aim and the form of energy absorption system it set seismic isolation structure system development direction from the research which it sees, if composition it set it developed. The principal research result of this research which it sees with lower part is same.

○ Efficiency plan process by energy of seismic structure system

- Structural interpretation algorithms and dynamic Seismic isolation system earthquake response program development
- The unique structure of the upper cycle and the cycle of the device seismic isolation system considering history and interpretation of the model presented
- Participate par with the structure of the earthquake response seismic isolation system field interpretation and analysis

- Seismic isolation system's performance requirements
- Seismic isolation system input in the earthquake evaluation Seismic isolation layer energy valuation
- Variations in the energy-absorbing plastic device floor Seismic isolation layer energy (energy damage) distribution prediction present
- Floors energy in the present structure of the upper distribution prediction present
- Energy-absorbing device performance and the demands of responding to predictions by comparing the performance evaluation
- The structure of the upper cycle (changes in height and stiffness) energy-absorbing devices based on the performance of prediction present
- Elasticity of energy seismic isolation structure based on the expression of energy(We), energy attenuation (Wh), plastic energy (Wp) presented the assessment techniques
- Corruption in the distribution structure, using an expression seismic isolation layer of plastic deformation energy forecasting (Wpr) and the plastic deformation of the upper structure of energy (Wps) presented the assessment techniques
- Plastic deformation of the floor to maximize energy seismic isolation concentration rate for performance evaluation presented curve formula
- The performance of the energy-absorbing devices seismic isolation present structure of the performance of the design process
- Performance model design and interpretation of the design process by interpreting the earthquake response
- Earthquake response to interpret the results of the feasibility of the design process using performance verification

○ Energy absorption system form optimization and complex seismic structure system form development

- The close of relationship of shearing force coefficient and the maximum displacement of seismic isolation layer
- The close of limit building height/the width rain relationship of building period it examines closely
- Presentation of compound seismic isolation device system efficiency aim
- Efficiency verification of seismic isolation rubber
- The close of relationship with limit horizontal variation ability of variation ability and the laminate layer rubber of energy absorption system
- The efficiency change which it follows in the historical rain of energy absorption system and the laminate layer rubber
- Presentation of the composition which it follows in the rain of leaflet malleability of leaflet malleability and energy absorption system of the laminate layer rubber performance curve presentation of position system
- Presentation of demand efficiency presentation of energy absorption system energy absorption system form development

○ The energy absorption system form development

- Shape ratio energy-absorbing devices (height, width, thickness, steel, etc.) based on interpretation of variable settings FEM
- Energy-absorbing devices for the sample interpretation FEM
- Energy-absorbing devices and the shape of an experiment determining variable (heat treatment process), set
- Experimental device designed and built
- Energy-absorbing device performance evaluation for the sample variation shear experiment
- The shearing device performance analysis and transform the energy absorption characteristics model suggests Resilience

- Comparing the results of the analysis and interpretation of test results by derive optimal shape
- Detailed energy-absorbing rubber and layer joint development of the device
- Complex seismic isolation device production process determines
- Prototype production
- Production process reliable assessment of the performance of rubber layer
- The energy-absorbing device performance, reliability evaluation production process
- Production process stabilization operations

V. The using plan of reserch development result

If the composition which it uses with the energy absorption system which uses the application plan high tenacity steel of research and development result and the laminate layer rubber together the position system does product anger and Woojin,Inc the identical rubber belt with a right position Dongil,Inc. from it is an enterprise anger percentage plan. Also it secures the source technique against the high tenacity steel, it applies it is a plan which will accomplish the succeeding research for in hereafter engineering works and the machine industry sector back.

【 목 차 】

제 출 문 ····· i

요 약 문 ····· iii

영 문 요 약 문 ····· vii

목 차 ····· xiii

영 문 목 차 ····· xv

제 1 장 서 론 ····· 1

1.1 연구개발 개요 ····· 1

1.1.1 연구개발의 필요성 ····· 1

제 2 장 국내외 기술개발 현황 ····· 9

2.1 국내 기술 및 산업 동향 ····· 9

2.1.1 국내기술 및 산업동향 ····· 9

2.1.2 국외 기술 및 산업 동향 ····· 12

2.1.3 특허 동향 ····· 16

2.1.4 종합 결론 ····· 20

2.2 연구개발과제 및 대상기술의 중복성 ····· 21

2.2.1 연구개발과제의 중복방지를 위한 조사 및 검토결과 ····· 21

2.2.2 연구개발과제의 차별화 방안 ····· 23

2.3 타 산업 및 국내외 연계·협력 가능성 ····· 23

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과 ····· 25

3.1 서론 및 연구개발결과 요약 ····· 25

3.2 연구개발 주요내용 ····· 26

3.2.1 면진구조시스템 개발 방향 설정 ····· 26

3.2.2 복합면진장치 성능목표 설정 ····· 86

3.2.3 에너지흡수장치 형상개발 ····· 105
3.2.4 면진구조의 에너지법에 의한 성능설계 프로세스 제시 ····· 144
3.2.5 에너지 흡수장치 형상 최적화 및 복합면진장치 형상개발 ····· 154
3.2.6 진동대 실험에 의한 동적성능평가 ····· 225
3.2.7 면진APT의 구조설계 및 경제성/시공성 평가 ····· 290
3.2.8 면진구조 지침 및 매뉴얼 작성 ····· 342

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 관련분야에의 기여도 ····· 403
4.1 연구개발 수행 진도율 ····· 403

4.2 연구개발 목표의 달성도 ····· 404

제 5 장 연구개발결과의 활용계획 ····· 407
5.1 연구성과의 활용방안 ····· 407

5.2 연구성과의 기대효과 ····· 408
5.2.1 기술적 측면 ····· 408
5.2.2 사회·경제적 측면 ····· 408
5.2.3 기업 활용 ····· 409

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보 ····· 411

제 7 장 참고 문헌 ····· 413

■ 부 록
A. 면진구조 설계지침 ····· 421
B. 복합면진장치 시공매뉴얼 ····· 441
C. 복합면진장치 품질관리매뉴얼 ····· 467
D. 고인성 강재 규격서 ····· 477
E. 고인성 강재룡 면진장치 제품검사 규격서 ····· 489

Table of Content

Submit letter ····· i
Summary ····· iii
Abstract ····· vii
Table of content ····· xiii
Table of Content(English) ····· xv

Chap. 1 Introduction ····· 1
Sec. 1 Research needs ····· 1

Chap. 2 Present Korean · abroad technology ····· 9
Sec. 1 Korean technology trend ····· 9
Sec. 2 Overseas technology trend ····· 21
Sec. 3 Korean and overseas's co-work ····· 23

Chap. 3 Research Results ····· 25

Chap. 4 Research Objective achieveness and contribution ····· 403
Sec. 1 Research objective achieveness ····· 403
Sec. 2 Results and relative effects ····· 404

Chap. 5 Research results application plan ····· 403
Sec. 1 Application plan ····· 403
Sec. 2 Future plan ····· 406

Chap. 6 Overseas advanced technology ····· 407
Chap. 7 Reference ····· 413

제 1 장 서 론

1.1 연구개발 개요

1.1.1 연구개발의 필요성

가. 연구개발 개요

- 최근 인도네시아를 비롯하여 전 세계적으로 지진발생 횟수가 증가하고 피해 규모도 대형화되는 추세이며, 일본에서 발생한 지진(후쿠오카지진, 2004)과 같이 인접국에서 발생한 지진이 국내에 피해를 유발한 사례가 발생하였음.
- KBC2005에서는 내진설계기준이 크게 강화되었음.
- 방재청에서 국가재난관리시스템을 구축하여, 홍수, 태풍, 지진 등 자연재해를 국가적으로 관리/예방하고 있음.
- 국내외적으로 구조설계기준은 성능 설계법으로 전환되고 있고, 다양한 구조시스템의 도입이 활성화될 것으로 판단됨.
- 기존 내진설계법은 주요 구조부재의 손상(소성변형)으로 지진 등에 저항하는 것을 기본으로 하나, 지진피해 이후에 막대한 보수비용 및 보수기간 중 사용중지에 따른 경제적 손실 등이 매우 큼.
- 면진구조시스템은 그림 1.1.1.1과 같이 지진 가속도를 주기가 긴 면진층을 두어 건물의 주기를 장주기화 함으로써 규모가 큰 지진에도 구조물의 손상을 최소화하여, 지진발생 이후에도 기능유지가 가능하기 때문에 성능설계 개념에서 최근 주목을 받고 있음.

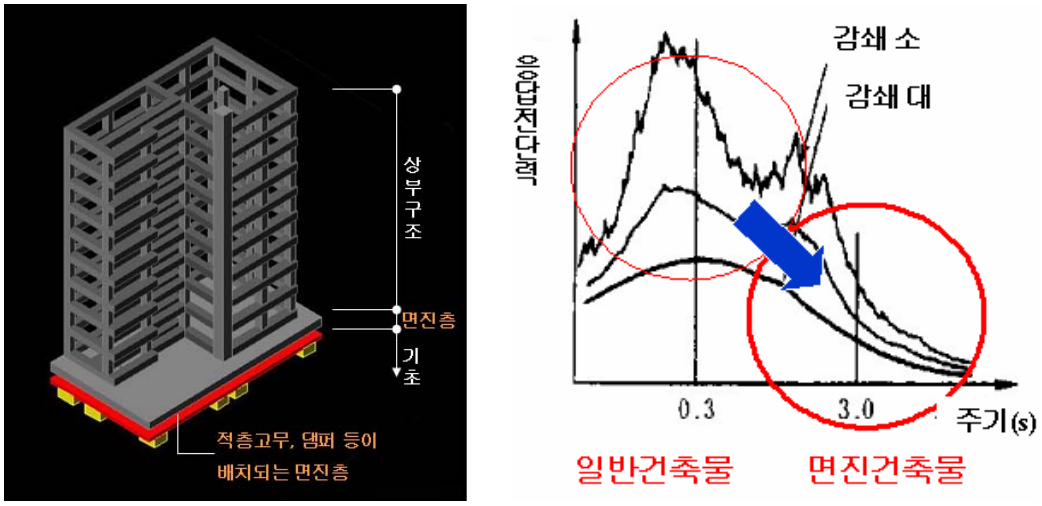


그림 1.1.1.1 면진구조 시스템 개념 및 응답가속도 저감 효과



그림 1.1.1.2 적층고무와 납댐퍼를 병용한 면진구조

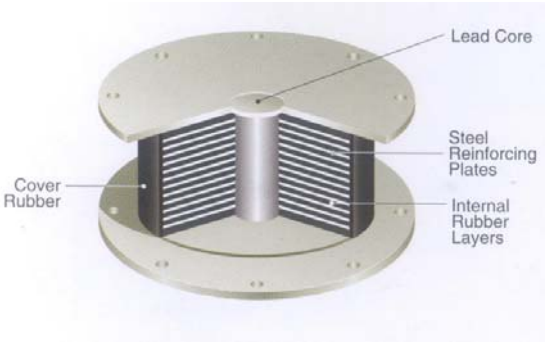


그림 1.1.1.3 납봉삽입 적층고무

■ 면진구조시스템은 그림 1.1.1.2와 같이 크게 지진하중 전달경로를 차단하여 구조물의 손상을 방지할 수 있는 isolator와 지진에너지를 흡수할 수 있는 에너지흡수장치(댐퍼)로 구분되고, 초기에는 이 두 요소를 병행하여 사용하였음.

■ Isolator와 에너지흡수장치의 분리사용에 의한 시공상의 번거로움과 설치면적의 증가를 방지하기 위해 그림 1.1.1.3과 같이 납봉삽입 적층고무(LRB, Lead Rubber Bearing)을 사용하고 있으나, 이는 일본의 면진장치 제작업체(오일레스사)의 특허 사항임.

■ 최근 일본에서는 납을 이용한 면진장치 제작에 따른 환경문제로 인하여, 납 사용을 억제하기 위한 제도적 장치마련을 위한 작업이 진행 중에 있음.

■ 일본에서는 최근에 들어 납 대신 그림 1.1.1.4와 같은 면진구조용 강재 에너지 흡수장치의 사용이 증가하고 있고, 관련 연구개발이 활발한 실정임.

■ 강개를 이용한 에너지 흡수장치의 경우, 강재의 변형 능력이 적층고무의 변형 능력에 비해 작기 때문에 적층고무의 큰 전단변형에 대응하기 위한 형상을 개발하여야 함.



그림 1.1.1.4 강재 에너지 흡수장치(일본 신일본제철)

■ 면진장치의 요구성능기준 및 그에 따른 면진구조시스템의 내진성능에 대한 규정이 제정되어 있지 않음.

■ 면진구조시스템의 도입에 따른 지진하중의 저감효과를 설계에 반영하는 것이 불가능하여, 비경제적인 설계가 됨에 따라 면진구조시스템의 적용이 어려운 상태임.

■ 이에 본 연구에서는 지진응답해석을 통하여 면진구조시스템의 내진성능을 규명하고, 그에 따른 면진장치의 요구 성능기준을 제시함.

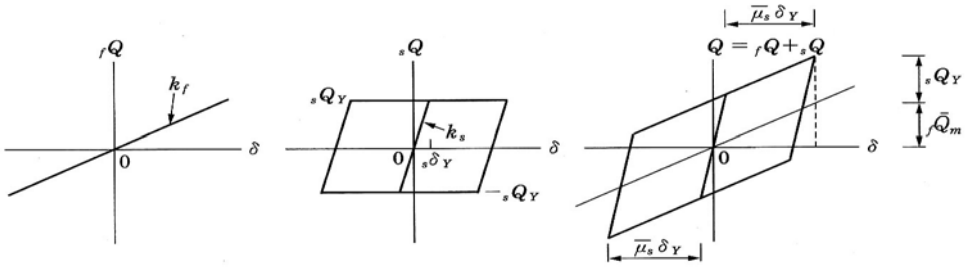
■ 면진구조시스템의 내진성능 확보하기 위하여 요구되는 성능을 만족시킬 수 있는 복합 면진장치를 개발하고자 한다.

■ 면진구조시스템의 실용화를 위하여, 설계프로세스를 정립하고 그에 따른 설계지침 및 매뉴얼을 개발하여 면진구조의 활발한 현장적용을 위한 기반을 구축하고자 함.

나. 연구개발의 중요성

(1) 기술적 측면

- 적층고무는 현재까지는 주로 토목분야의 교량에서 면진받침으로 사용되었으며, 이 경우에는 적층고무는 탄성설계를 적용하여 적층고무의 전단변형률이 150% ~ 200% 정도면 충분하였음.
- 반면, 적층고무를 소성변형을 허용하는 건축구조에 적용하기 위해서는 적층고무의 전단변형률은 300%이상이 요구되어, 대변형이 가능한 장치로 설계되어야 함.
- 면진구조에서는 적층고무는 큰 전단변형 성능을 가지며, 그림 1.1.1.5에서와 같이 탄성거동을 하기 때문에 지진에너지를 흡수하지는 못함. 따라서 지진에너지를 흡수할 수 있는 에너지 흡수장치를 함께 사용하여야 함.



(a) 적층고무 (b) 에너지 흡수장치 (c) 면진층

그림 1.1.1.5 면진층의 복원력 특성

- 그러므로 적층고무 및 적층고무와 함께 사용되는 에너지 흡수장치의 전단변형률도 300% 이상의 성능이 요구됨.
- 이러한 성능을 만족시키기 위해 기존에는 변형성능이 뛰어난 납을 사용하였으나, 향후 환경문제 및 경제성 측면에서 사용이 어려울 것으로 예상됨.
- 친환경성 및 경제성을 고려하면, 에너지 흡수장치로 납 대신 강재를 사용하는 것이 유리하나, 기존의 형상으로는 전단변형률 300% 이상을 확보하기 어려움.
- 국내에서는 고전단 변형성능을 가진 적층고무에 의한 면진장치 및 에너지 흡수장치 개발이 미흡한 실정임.
- 국내에서는 면진구조 설계경험이 적고, 내진설계기술의 정립이 미흡한 관

계로 면진구조시스템의 효율을 최대화하기 위한 구조설계 기술 및 프로세스, 그리고 구조시스템의 성능평가기법이 부족한 실정임.

■ 따라서 지진에 의한 에너지흡수효율을 극대화한 면진구조시스템을 실현시키기 위해서는, 고성능 적층고무 및 에너지 흡수장치를 갖춘 면진장치의 개발이 필요하고, 그에 따른 설계기술을 개발할 필요가 있음.

(2) 경제·산업적 측면

■ 면진구조시스템을 적용하면, 면진층을 설치해야 하며 그에 따른 전이보 설치 등에 의해 경제성이 저하된다는 선입견에 의해 면진구조의 적용이 매우 어려운 상황임.

■ 그러나 면진구조를 적용하면, 면진층에 설치된 면진장치가 지진에너지를 전부 흡수하기 때문에, 상부구조는 풍하중, 지진하중 등과 같은 수평력을 부담할 필요가 없어 기둥, 보 등과 같은 주요부재의 단면을 크게 줄일 수 있어, 경제성 측면에서 크게 불리하지는 않음.

■ 특히, 최근에 들어 국내 내진설계기준이 강화되는 추세이며, 내진설계기준이 강화될수록 상부구조의 단면저감효과가 크게 되므로, 기존의 내진구조시스템 대비 면진구조시스템의 경제성은 향상될 수 있음.

■ 본 연구에서 목표로 하는 적층고무 및 에너지흡수장치의 성능을 만족하는 경우, 일본 등과 같은 지진 다발지역 및 면진구조시스템 적용이 활발한 국가에서 요구하는 성능을 만족할 수 있기 때문에, 복합 면진장치의 수출이 가능하여 관련산업을 활성화시킬 수 있음.

(3) 사회·문화적 측면

■ 최근 태풍, 홍수, 지진발생횟수가 증가하는 추세이며, 그 규모도 증가하고 있음.

■ 자연재해에 대비한 국가적 차원의 방재시스템 구축이 필요함.

■ 건물의 피해를 축소시키기 위해서는 내풍, 내진 구조설계 및 시공기술의 향상이 절실히 요구됨.

■ 기존의 내진구조설계방식에 의한 내진구조시스템에서는 지진 등과 같은 자연재해에 대한 응답가속도가 증폭되어, 구조체의 손상 이전에 집기, 가구

등의 전도에 의해 피해가 발생할 수 있음.

- 반면 면진구조로 설계한 경우는 지진응답가속도 저감효과가 매우 크고 건물자체의 내진성능이 향상되므로, 국가적 차원의 건물방재시스템으로는 가장 적합함.
- 면진구조시스템은 기존 건물의 내진보강기법으로도 폭 넓게 사용할 수 있으므로, 리모델링과 같은 관련산업의 활성화와 더불어 건물 장수명화에 의한 환경개선문제 등 문화적 패러다임을 선진화시킬 수 있을 것으로 기대됨.

다. 연구개발하려는 기술의 세계적 수준이 다음의 기술발전주기(Technology Life Cycle) 중 현재 어느 단계에 해당되는가?

□ 개념정립단계 ■ 기업화단계 □ 기술의 안정화단계

라. 지금까지의 연구개발 실적

현재까지 국내에서 건축용 면진구조에 대한 연구는 그다지 활발하지는 않았으나, 몇 개의 연구가 진행되었다. 이러한 연구는 교량용 면진시스템 구축과 LRB 면진장치 개발에 집중되어 있고, 면진구조의 내진성능을 향상시키기 위한 에너지 흡수장치 개발에 대해서는 연구가 거의 진행되지 않았다. 그러나 제진구조에 사용하기 위한 강재 댐퍼에 대한 연구 및 특허가 출원되어 있다. 그러나 제진구조용 댐퍼는 면진구조에 비해 에너지 흡수장치의 변형능력을 크지 않으므로 사용강재가 일반 구조용 강재로 충분하였으며, 형상도 플레이트를 응력집중이 일어나지 않도록 단순화하면 되었다. 그러나 면진구조용 강재 에너지 흡수장치는 전단변형능력이 큰 적층고무의 특성을 충분히 활용하기 위해서는 사용강재도 고인성 강재를 사용하여야 하며, 형상도 기존의 플레이트가 아닌 보다 큰 변형이 가능하도록 개발되어야 한다. 본 연구와 어느 정도 관련된 연구개발 실적은 다음과 같다.

■ 전단패널을 이용한 횡력저항 제진구조시스템 개발 (2000.7 - 2001. 8), 포항산업과학연구원.

■ 강재를 이용한 공동주택의 평면확장 리모델링 기술 개발, 2002. 6 - 2003.

7, 포항산업과학연구원.

■ NT를 적용한 100년형 복합구조 아파트 개발, 포항산업과학연구원, 대한주택공사 주택도시연구원.

■ 건축구조물의 내진성능 평가 기법 및 내진성능 향상 기술 개발 (2000.12 - 2002.5), 포항산업과학연구원.

■ 환경친화적 100년 건축기술 개발 (2000.11 - 2004.3), 포항산업과학연구원.

또한 기존의 면진구조 시스템의 설계법은 지진응답 가속도에 기초하여 내진설계법을 적용하고 있으나, 본 연구에서는 국내의 지진크기를 고려하여 국내용 에너지 스펙트럼을 제시하고 에너지법에 근거하여 면진구조 시스템 설계 지침을 제시하고자 한다.

제 2 장 국내외 기술개발 현황

2.1 국내 기술 및 산업 동향

2.1.1 국내기술 및 산업동향

○ 건축 구조물에서의 면진효과에 대한 연구는 (주)대우의 기술연구소에서 수행한 건물하부에 면진베어링 장치를 설치하여 해석적으로 그 효율성을 분석한 연구가 있을 뿐이며, 이 연구도 단순 철골골조 건물에 국한된 것임.

○ 철근콘크리트건물, 특히 주거용 벽식 아파트건물을 대상으로 (주)에코닝이 일본의 구조설계사인 SDG의 지원을 받아 설계한 '트라움하우스'와 이 설계경험을 바탕으로 대한주택공사에서 시범 적용한'서산 주택복지관'이 있음.

○ '트라움하우스'의 경우는 면진설계의 경제성을 목적으로 구조설계 및 시공이 적용된 것은 아니며 국내 고급빌라에 면진장치 적용에의 시공기술 확보 및 심리적 보험차원에서 시도된 것으로 판단되며, 대한주택공사의 '서산 주택복지관'도 현장 적용성 평가에 주안점을 두고 있음.

○ 국내 적용사례에 적용된 면진장치는 국내에서 개발한 장치가 아닌 일본의 관련 업체가 보유한 특허 기술을 사용하고 있음.

○ 또한 국내의 적용 사례는 면진구조설계기법이 정립되지 않은 상태에서 일본의 면진구조설계기술을 그대로 이용하여 설계하였으며, 면진장치 및 에너지흡수장치의 성능을 반영하여 효율적인 설계가 수행되지 못하였음.

○ 최근 동적하중(풍하중, 지진, 교통진동, 설비기계진동 등)에 의한 건물파괴 및 피해가 크게 발생함에 따라 국내·외적으로 이 분야의 연구가 활발히 진행되고 있는 실정임.

○ 그러나, 국내에서는 주로 교량 등의 구조물을 중심으로 구조물의 면진에 따른 설계가 이루어지고 있는 실정이며, 건축구조물에의 적용연구는 전무한 상태임.

가. 국내 시장 현황 및 예측

○ (사) 한국면진제진협회 시장동향 예측(2009년)에 의하면 국내에서 면진구조 시스템은 현재는 교량을 중심으로 시장이 형성되어 있고, 그 규모가 약 100억 원에 이르고 있으며, 건축물에는 년간 1-2동 정도 설계되고 있으나, 면진구조의 설계기준 등이 정비되고, 면진구조 설계기술이 정립되고 리모델링에 의한 내진보강 공법으로 채용이 확대될 것으로 보이는 2010년 이후 급격히 성장하여 년간 50동 정도가 건설될 것으로 전망하고 있음.

○ 면진장치의 가격은 건물 중력에 의한 하중 톤당 50,000원 정도로 전망되어, 면진구조 시스템에 적용되는 건물의 평균 무게를 10,000톤으로 설정할 경우 건물 1동에 투입되는 면진장치의 가격은 평균 약 5억원 정도가 됨.

○ 이상의 예측치를 이용하면 국내 시장 규모는 다음과 같음.

구분	현재의 시장규모 (2009)	예상 시장규모(2015)
국내시장 규모	100억	400억

나. 국내 주요 관련 업체

업체명	업체별 능력	비 고
동일고무벨트(주)	면진장치 (NRB, LRB, EaSy damper) 생산 및 면진구조 적용	
(주)우진	댐퍼용 강재 개발	
현대건설(주)	현대 홈 타운 면진구조설계 및 시공	
유니슨	국내 최초 면진구조 적용	
에코닝	국내 최초 공동주택 면진구조설계	

(다) 국내 전문가 및 연구기관 현황

항목	전문가	소속기관	기술개발현황	수준 (국외대비)
면진 구조	황기태	(주)에코닝	면진구조 공동주택 국내 최초 설계 및 도입	80%
	천영수	대한주택공사	주택공사 서산복지관 면진구조 설계	60%
	박진삼	동일고무벨트(주)	주택공사 서산복지관 면진장치 적용	80%
	김두훈	(주)유니슨	면진구조 시범 건물 적용 경험	60%
	이현호	동양대학교	면진구조 적용에 따른 시공성 평가	60%
	장극관	서울산업대	면진구조 설계기준 작성	50%
제진 구조	오상훈	(재)포항산업 과학연구원	면진구조 설계기준 작성 및 강재댐퍼 개발 (특허 다수 확보)	90%
	민경원	단국대학교	MR댐퍼 적용기술 연구수행	70%
	백승한	(주)우진	강재댐퍼용 고인성 강재 개발	80%

(라) 국내연구 인프라 수준

기술 분야	인프라 항목	선진국 대비 인프라 수준				
		부족	다소부족	동등	우월	보다우월
면진 구조	- 연구시설 및 연구인력	○				
	- 면진구조설계 엔지니어		○			
	- 구조설계 프로그램 등	○				
	- 연구실적 및 참고문헌	○				
	- 국제기술협력기반		○			
	- 면진장치 제작 노하우	○				
	- 면진장치 표준화	○				
	- 면진구조 설계기준	○				

(마) 국내 기술개발 수준

세부기술 내용	국외 현황 (주요선진국명)	국내 개발 현황	수준 (국외대비)
면진구조 설계기술	일본, 미국, 중국	(주)에코닝, 동일고무벨트(주)	70%
제진구조 설계기술	일본, 미국, 대만	포항산업과학연구원	80%

2.1.2 국외 기술 및 산업 동향

○ 미국의 경우에는 1980년도부터 Los Angeles나 San Francisco 등 대도시의 공공건물이나 상업용 대형건물을 중심으로 기존의 내진 설계된 건물에 대하여 기존의 내진보강 방법이 아닌 면진설계로 이를 대처하는 방법이 사용되고 있으며, 이의 효율성 및 경제성이 입증되고 있음.

○ 미국에서는 기존 건축구조물의 내진보강 설계보다는 면진설계(retrofit)로 인한 구조적 리모델링이 일반화 되어 있으며, 주로 상업용 및 공공건축물에 적용되고 있음.

○ 일본에서의 면진구조는 1993년 창설된 일본면진구조협회에 의하여 시스템의 안정성, 적용성 평가 및 이의 보급이 활발히 이루어지고 있음.

○ 일본에서는 1995년 고베지진 이후에 일반 건축물, 특히 공동주택 건물에 대한 면진설계가 진행되고 있으며 이의 사용성 및 경제적인 효과도 검증되고 있음. 특히 안전성 및 사용성에 대한 효과가 탁월한 것으로 보고되고 있음(그림 2.1.2.1 참조).

○ 일본의 경우, 1983년 최초의 면진구조물이 건설된 이래, 현재 약 1,300동 정도 건설되었으며, 2009년 현재 연간 130동 정도 건설되고 있음.

○ 2000년 10월 17일에 “면진구조물의 구조 방법에 관한 안전상 필요한 기술적 기준을 정함 등의 건(2000년 건축고시 제 2009호)”이 발행되었으며, 이에 따라 면진건축물이 처음으로 법률로 규정되었음.

○ 동시에 “면진재료의 품질에 관한 기술적 기준(2000년 건축고시 제1446호)도 발행되어 면진재료는 장관 인정품으로 정의되었음.

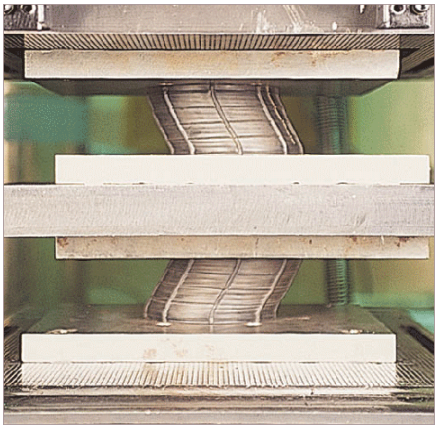


그림 2.1.2.1 면진고무의 적용 예

(가) 주요국가의 시장규모

구분	현재의 시장규모 (2009)	비 고
일 본	1,500억	년간 130동 정도 적용
미 국	500억	내진보강 중심
중 국	300억	년간 30동 정도 적용
기 타	200억	대만, 카자흐스탄 등

(나) 세계시장을 선도하는 주요 업체

업체명(국적)	업체별 능력	중점 분야
Dynamic Design(일본)	면진구조시스템 설계 능력	설계
Bridge stone(일본)	면진장치 개발 및 제작	제품 설계/제작
DIS (미국)	면진장치 개발 및 제작	제품 설계/제작
新日本製鐵(일본)	에너지흡수용 장치 개발 및 제작	제품 설계/제작
Fujita建設(일본)	면진구조시스템 시공	시공

(다) 해외 시장예측 및 발전전망

■ 그림 2.1.2.2는 일본의 면진구조 적용 건수를 나타냄. 1995년 고베지진 이후,

면진구조시스템을 적용한 건물이 급격히 증가하였고, 그 이후 다소 감소하는 추세였다. 그러나 2003년 이후 다시 증가 추세로 전환되어 매년 130동 정도의 면진건축물이 적용되고 있음. 또한 이러한 추세는 향후에도 계속될 것으로 전망되어 매년 130~150동 정도의 적용이 예상됨.

- 그림 2.1.2.3의 건물용도별 면진구조 적용 현황과 같이, 최초에는 전산센터, 반도체공장 등 특수용도의 건물에 주로 적용되었으나, 고베지진(1995) 이후 건물의 안정성 확보의 중요성에 대한 인식이 확산되어 공동주택, 사무소 및 병원에 대한 적용건수가 급격히 증가하고 있음.
- 미국은 면진구조를 내진보강 및 문화재 보존을 위한 구조시스템으로 주로 사용하고 있으며, 연간 약 50동 이상 적용되고 있음.
- 중국은 5년 전부터 면진구조 적용이 시작되었고, 현재 약 50동 정도의 면진구조 적용실적을 보유하고 있고, 향후 년 30동 이상 적용될 것으로 판단됨.
- 대만, 이탈리아, 카자흐스탄 등 면진구조시스템을 도입하는 국가가 전세계적으로 확산되고 있는 추세임.

이상의 내용을 바탕으로 추정하는 연간 세계시장 규모는 다음과 같음.

구분	현재의 시장규모 (2009)	예상되는 시장규모
세계시장 규모	2,000억	5,000억
국내시장 규모	100억	300억

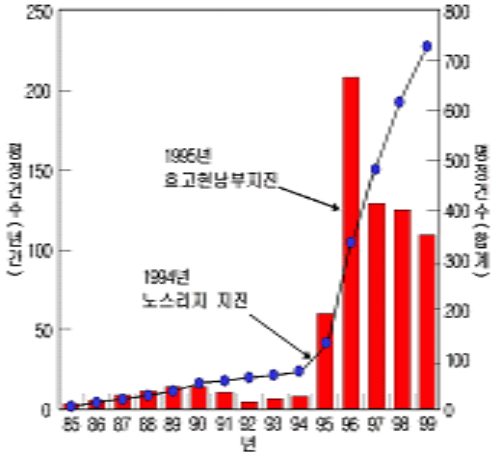


그림 2.1.2.2 일본의 면진구조 적용 건수(일본면진협회,2000)

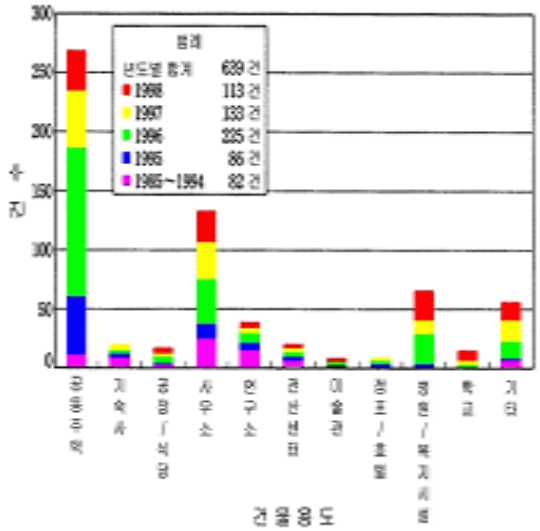


그림 2.1.2.3 건물용도별 면진구조 적용 현황(일본면진협회,2000)

(라) 해외 업체· 연구기관과의 공동연구 필요성 및 추진 방안

■ 면진구조시스템의 80%는 일본에서 적용되었으며, 면진구조 전반의 설계기술 및 장치개발에 관련된 일련의 연구개발 및 성능인증업무를 (사)일본면진구조협회가 담당하고 있음. 그리고 이와 관련된 전문가 및 연구자의 해외 연구협력업무도 총괄하고 있음. 따라서 연구개발에 관한 연구자문 및 제품의 일본성능인증을 취득하기 위해서는 (사)일본면진구조협회의 협력이

절실히 요구됨.

■ 주관연구기관은 (사)일본면진구조협회와의 정보교류를 위하여 협정을 체결하고, 년 1회 상호방문 및 국제기술세미나를 공동으로 개최할 예정임.

(마) 개발된 기술의 해외 시장 진출 방안

■ 해외진출을 위해서는 각국의 성능인증을 받아야만 설계에 적용이 가능하므로, 면진장치의 성능인증 담당기관과 연구개발 초기단계에서부터 긴밀한 협력관계를 구축할 예정임.

■ 면진장치의 성능인증은 1차년도 연구기간 중에 신청할 예정이며, 에너지 흡수장치의 성능인증은 면진장치의 성능인증과 연계하여 연구개발 종료시점에 신청할 예정임.

2.1.3 특허 동향

(가) 특허 상세 현황

① 면진, 제진구조 관련 특허 상황

출처 : 한국과학기술정보연구원 KUPA, JEPA

국가별 / 키워드	한국	유럽	미국	일본	합계
① 건축구조용 댐퍼	7	0	0	97	104
② 제진구조 시스템	2	0	0	8	10
③ 면진구조 시스템	22				

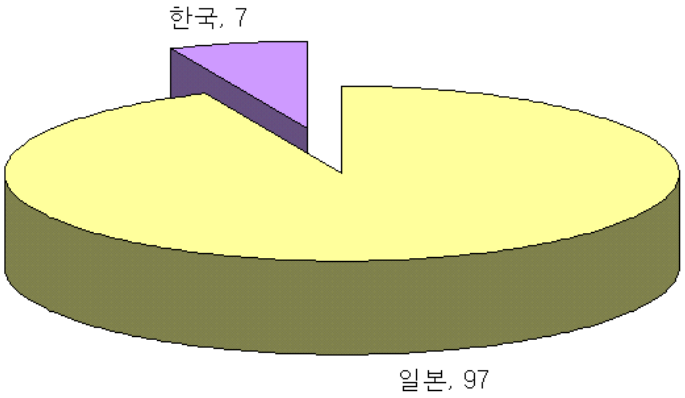


그림 2.1.3.1 건축구조용 댐퍼 관련 특허(총 104개)

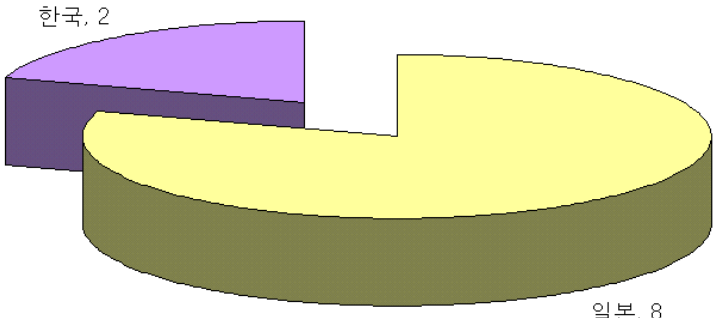


그림 2.1.3.2 제진구조 시스템 관련 특허(총 10개)

② 키워드에 따른 면제진구조 관련 국내특허 세부현황

□ 키워드 : 건축구조용 댐퍼 (7건)

	명 칭	공개번호	공개일	발명자	출원인
1	슬릿 플레이트를 구비한 건축구조용 댐퍼	2004-0106831	20041218	오상훈	(재)포항산업과학연구원
2	댐퍼 접합부를 구비한 철골구조	20040106829	20041218	오상훈	(재)포항산업과학연구원
3	인장가새용 댐퍼	2004-0091971	20041103	김원기	(주)영화엔지니어링
4	도심지역의 순차적 재개발을 위한 인공지반 구조물	2004-0057056	20040702	장인화	(재)포항산업과학연구원
5	건축 구조물용 내진장치	2003-0073692	20030919	박대원	박대원
6	슬릿댐퍼를 구비한 브레이싱형 철골구조	2003-0034316	20030509	오상훈	(재)포항산업과학연구원
7	댐퍼접합부를 구비한 철골구조	2000-0040240	20000705	오상훈	(재)포항산업과학연구원

□ 키워드 : 제진구조 시스템 (2건)

	명 칭	공개번호	공개일	발명자	출원인
1	리모델링을 위한 슬릿 내진강판을 이용한 벽구조	2003-0053639	20030702	장인화 외 1명	(재)포항산업과학연구원
2	스틸하우스의 바닥 슬라브 제진구조	1999-0053902	19990715	안태현 외 1명	(재)포항산업과학연구원

□ 키워드 : 면진구조 (7건)

	명 칭	특허번호	특허일	특허권자
1	면진 장치	2005-0121151	2005.12.26	원샤프트정공 주식회사
2	형상기억합금 와이어를 이용한 면진장치	2005-0082943	2005.8.24	안숙희
3	납 면진받침	2004-0096795	2004.11.17	김성원
4	핀이 구비된 면진베이링	2004-0084030	2004.10.06	동일고무벨트(주)
5	지하굴착잭킹공법을 이용한 주요시설물의 면진시공 방법	2003-0011022	2003.02.06	윤정배
6	면진 장치	2003-0009641	2003.02.05	김윤석 외 2
7	건물용 면진 장치	2003-0001849	2003.01.08	엠피기술산업
8	건축물의 면진장치	2002-0076219	2002.10.09	동아지질 외 2
9	면진받침 프리셋팅 장치	2004-0097488	2001.11.08	유니슨
10	면진 장치에 공명 현상을 방지하기 위하여 사용되는 수직하중지지부틸고무	2001-0085005	2001.09.07	화인
11	면진 베이링	2001-0083554	2001.09.01	동일고무벨트(주)
12	일체형 다방향 면진받침	2001-0074179	2001.08.04	박정근
13	트리거기구를 내포하는 일체형 구름방식 면진장치	2001-0050845	2001.06.25	와타나베 외 2
14	교량용 납 면진받침의 설치온도에 따른 교량 상부구조물의 신축량을 보정하기 위한 전단 변형량 조절장치	2000-0050435	2000.08.05	유니슨
15	면진 적층체용 고무 조성물	2000-0010869	2000.02.25	요코하마 고무
16	면진성능이 향상된 교좌장치	1999-0053001	1999.07.15	김기중
17	교량용 가동단 교좌의 면진장치	1998-0085021	1998.12.05	조재연
18	구조물의 적층고무받침과 지진에너지 소산형 포트받침을 조합한 고감쇠 면진 시스템	1998-0058105	1998.09.25	금호건설
19	일체형 수평, 수직 면진 베어링	1998-0010092	1998.04.30	한국원자력연구소
20	면진 장치	1997-7005712	1997.10.09	오이레스 고교
21	베어링과 현가장치를 이용한 면진구조	1997-0011241	1997.03.27	김춘호
22	주위구속형의 면진 장치	1988-7001809	1988.11.05	스미도모 고무

2.1.4 종합 결론

(가) SWOT분석

강점	- 면진고무 제작 노하우 확보. - 고인성 강재 개발 경험 많음. - 국내 최다 면진/제진구조 설계 경험. - 댐퍼 형상 개발 경험 많음. - 해외 영업조직 확보.	약점	- 면진층 설치에 의한 초기 건설비 증가우려 - 국내 설계기준의 미비 및 설계 경험 절대 부족 - 면진구조설계를 위한 내진분야 인프라 부족
기회 요인	- 내진설계의 강화 - 환경규제에 따른 친환경 소재 사용 - 장수명구조시스템 필요성 인식확산 - LCC/LCA 설계기법의 보급확산	위협 요인	- 초기 건설비 비교에 의한 설계 - 구조설계분야의 신기술 적용에 대한 소극적 대응 - 내화기준의 획일적 적용

(나) 시사점 및 결론

- 면진구조시스템으로 설계하면 초기 건설비 비용 상승 및 설계 경험 부족 등에 의해 적용에 어려움이 있으나, 초기 건설비를 줄일 수 있는 구법 및 설계기술의 개발, 기술 교육 등이 이루어지면 성장 가능성이 큰 구조시스템인 것으로 판단됨.

2.2 연구개발과제 및 대상기술의 중복성

2.2.1 연구개발과제의 중복방지를 위한 조사 및 검토결과

(단위 : 억원)

부처명	사업명	과제명	예산	비 고
건설교통부	건설핵심기술 연구개발사업	교량의 면진시스템을 이용한 내진성능 보강에 관한 연구	2.85	1
산업자원부	공통핵심기술 개발사업	고감쇠 면진고무, LRB, 면진시스템 구조설계	3.07	2
중소기업청	산학연 공동기술개발	LRB 유효 설계 기준치 결정	0.2	3
중소기업청	중소기업 기술혁신개발	S.T.U를 이용한 납 면진 교좌장치(STLRB)개발	1.43	4
중소기업청	산학연 공동기술개발	면진을 위한 충격 흡수장치 국산화 기술개발	0.3	
중소기업청	중소기업 기술혁신개발	토목건축용 진동 고감쇠 베어링의 개발	1.03	5

① 교량의 면진시스템을 이용한 내진성능 보강에 관한 연구

- 상기 연구는 대상구조물이 교량이고, 마찰고무베어링 및 포트받침의 동적특성을 파악하고 해석기법 및 설계식을 제안하는 것으로, 탄소성해석을 기본으로 하는 건축구조에 적용하는 면진구조시스템과는 형식이 다르고 장치의 종류도 다름.

② 고감쇠 면진고무, LRB, 면진시스템 구조설계

- 상기 연구는 면진고무 자체는 탄성적으로 거동함으로 지진에너지를 흡수할 수 있는 능력을 보유하고 있지 않으므로 고무자체에 감쇠성능을 부여하여 지진에너지를 흡수할 수 있는 고무의 개발 및 에너지흡수장치로서 납을 삽입한

적층고무를 개발하는 것으로 목표로 함. 본 연구에서는 납을 사용한 경우에 환경문제가 발생하므로 납을 대신할 수 있는 강재 개발 및 그를 이용한 면진장치를 개발하는 것으로 목표로 하였음.

③ LRB 유효 설계 기준치 결정

- 에너지흡수장치로 납을 삽입한 LRB 적층고무의 성능에 대한 신뢰성 평가를 위하여, 구조성능실험과 해석을 통하여 LRB의 이력곡선 및 해석모델을 개발하였음. 본 연구에서는 납을 사용한 경우에 환경문제가 발생하므로 납을 대신할 수 있는 강재 개발 및 그를 이용한 면진장치를 개발하는 것으로 목표로 하였음.

④ S.T.U를 이용한 납 면진 교좌장치(STLRB)개발

- 지진에 대비하여 LRB가 다경간 연속교(FCM,ILM, etc)에 사용될 경우 상시 신축을 고려한 설계에서 경제성을 확보하기 위하여, STU를 이용해 LRB를 SLIP화 하고자 함. 이 연구에서는 대상구조물이 다경간 연속교량이고 사용하는 면진장치도 납을 이용한 LRB로, 본 연구에서 개발하고자 하는 대상구조 및 장치와는 상이함.

⑤ 토목건축용 진동 고감쇠 베어링의 개발

- 상기 연구는 '고감쇠 면진고무, LRB, 면진시스템 구조설계'와 마찬가지로, 고무자체에 감쇠성능을 부여하여 지진에너지를 흡수할 수 있는 고무의 개발 및 고감쇠 고무를 이용한 면진장치를 개발하는 것으로 목표로 함. 그러나 고감쇠 고무의 내구성 및 효과 등을 고려하면 고무자체에 감쇠를 부여하여 에너지흡수능력을 향상시키기 보다는, 에너지흡수능력을 대체할 수 있는 강재 에너지흡수장치를 사용하는 것이 내구성 및 경제성에서 유리할 것으로 판단하여, 본 연구에서는 강재 에너지흡수장치를 면진고무와 병행한 경우의 성능을 검증하고 이 결과를 이용하여 면진구조시스템의 효율성을 극대화하기 위한 면진구조설계기법을 제안하는 것을 목표로 설정하였음.

2.2.2 연구개발과제의 차별화 방안

- 중복성 검토결과 중복되는 연구과제는 거의 없는 것으로 나타났으나, 국외 연구 및 특허 사항을 검토하여 에너지흡수장치 및 면진시스템의 형식 및 형상이 지적재산권(국제특허 등)에 저촉되지 않도록 하고, 기존 제품보다 우수한 성능을 보유하도록 차별화할 예정임.
- 기존 제품보다 성능을 보다 우수하게 하기 위해서 기존의 강재 대신 고인성 강재를 개발하고, 고인성 강재의 특성을 가장 효과적으로 반영할 수 있는 형상을 개발할 예정임.

2.3 타 산업 및 국내외 연계·협력 가능성

○ 본 연구의 실용화에 있어 핵심기술은 적층고무와 고인성 강재를 이용한 면진장치이며, 설계 요구사항과 부합하는 장치의 개발 또한 매우 중요시 되는 기술임. 동 기술에 대해서 상호 연계·협력이 가능한 기술분야와 업체들이 협력망을 구축하여 응용기술 개발에 노력한다면 대외 경쟁력 제고에 한층 큰 효과가 있으리라 사료됨. 개발기술의 보급차원에 있어서도 요소기술의 핵심부분을 담당하고 있는 동 업체들과의 연계·협력하는 것이 바람직하다고 사료됨.

○ 본 연구에서 개발코자 하는 기술에 있어서는 현재 인접국가인 일본이 가장 기술우위를 자랑하고 있으므로, 일본면진협회 등과 기술 도입 및 교류를 통하여 개발기술의 질적 향상 및 해외시장 진출의 가능성을 도모할 수 있으리라 사료됨.

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

3.1 서론 및 연구개발결과 요약

본 연구는 건축물의 안전성을 크게 향상시키면서, 경제성을 확보할 수 있는 최적 면진구조 시스템을 구축하는 것을 목표로 하며 3차년도에 걸쳐 그림 3.1.1.1에 나타낸 설계 프로세스에 의해 연구를 수행하고 있다.

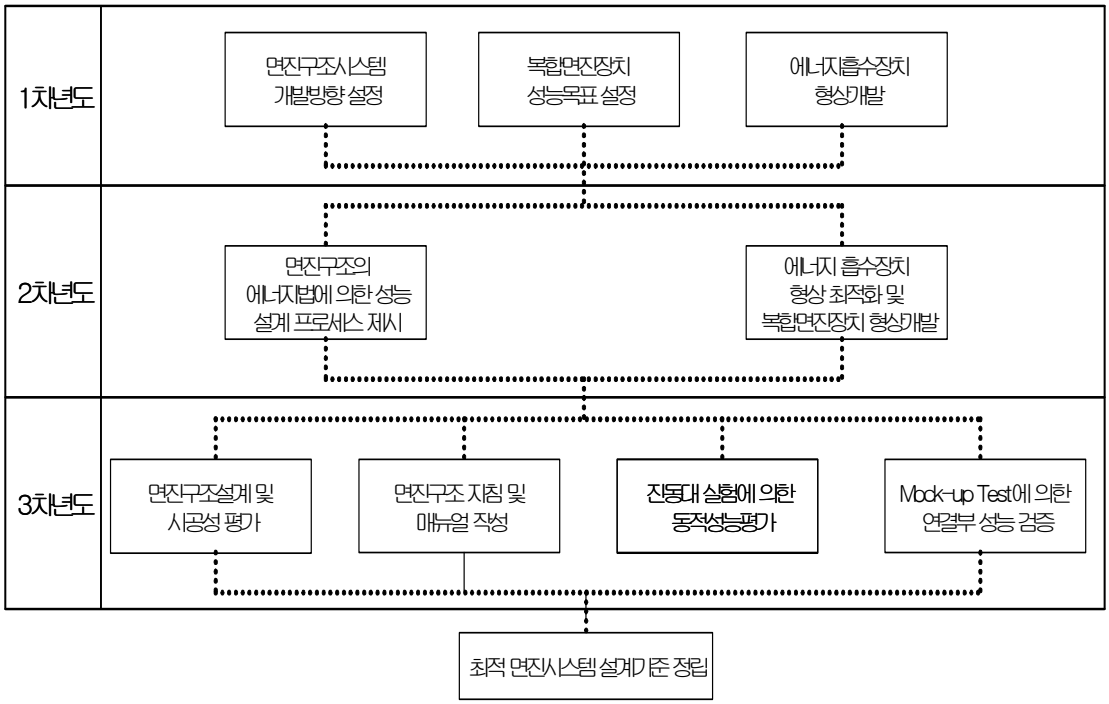


그림 3.1.1.1 연차별 연구내용

1 차년도의 연구내용은 최적 면진구조 시스템 개발을 위한 개발 방향 및 목표를 설정하고, 그에 따른 설계 스펙트럼 제시 및 장치 개발을 위한 재료 개발과 성능 평가를 주요 내용으로 하였다. 또한 에너지 흡수장치의 형상을 최종적으로 제시하기 위해 외국에서 가장 많이 사용되는 장치에 대한 성능을 평가하고 이에 비해 성능을 더욱 향상시킬 수 있는 형상을 제시하였다.

2 차년도 연구내용은 1 차년도의 연구결과를 바탕으로 면진구조의 에너지법에 의한 성능설계 프로세스를 제시하고 에너지 흡수장치 형상 최적화 및 복합면진장지 형상을 개발하고자 하였다. 이에 따라 수행된 연구내용은 다음과 같다.

3.2 연구개발 주요내용

3.2.1 면진구조시스템 개발 방향 설정

가. 면진구조시스템 적용사례 및 설계기법 분석

(1) 면진구조 장치분류 및 성능

(가) 면진구조의 원리 및 형식

면진장치는 구조물의 장주기화에 의한 가속도 응답의 저감과 동시에 면진층의 감쇠성능에 의한 지진입력 에너지를 흡수함으로써 구조물의 수평변형을 제어하여 응답전단력을 저감시키는 것이다.

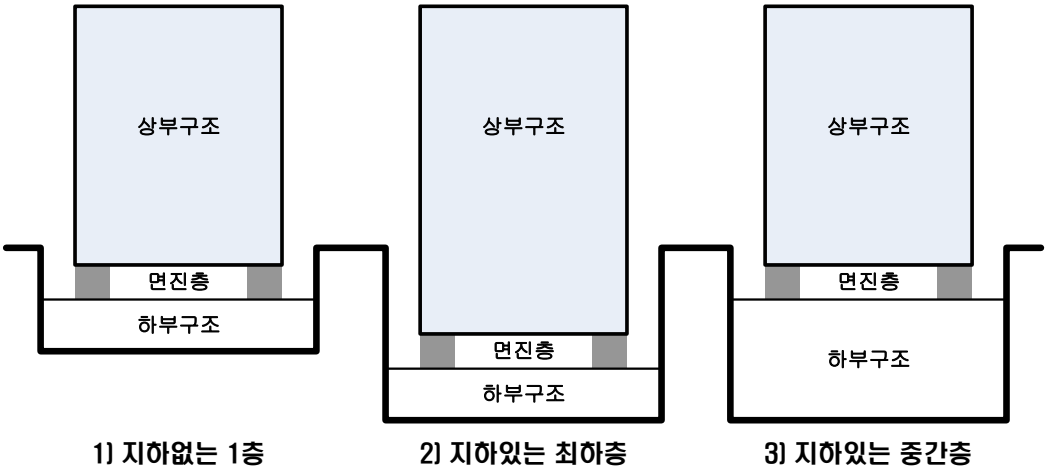
면진구조의 원리는 그림 3.2.1.1에 나타낸바와 같이 다음의 두 가지로 분류할 수 있다.

(a) 기초면진 (b) 중간층면진

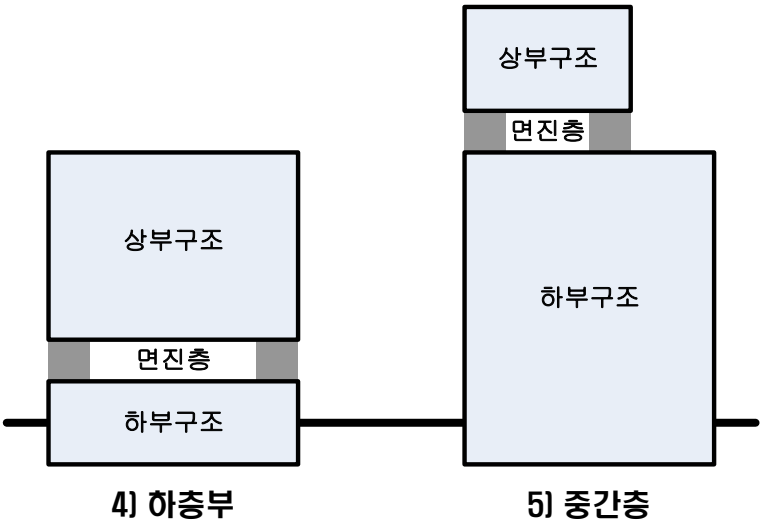
기초에서 면진층까지에 이르는 하부구조의 응답증폭이 작아서 그 영향을 무시할 수 있는 경우를 기초면진이라 하고, 응답증폭의 영향을 고려할 필요가 있는 것을 중간층 면진으로 분류하고 있다.

기초면진은 1)지하층이 없는 경우의 1층, 2)지하층의 최하층 3)지하층의 중간층에 설치하는 경우로 분류된다. 중간층 면진은 1층 바닥에서 상부의 바닥아래에 설치하는 경우로 4)하층부에 설치하는 경우와 5)중간층에 설치하는 경우로 분류된다. 면진층은 약한 수평강성을 가지는 분리장치(Isolator)와 지진입력에너지를 흡수하기 위한 에너지흡수장치(댐퍼)로 구성된다. 상부구조의 강성은 면진층에 비하여 충분히 강하므로 강체로 생각할 수 있으며 면진구조의 상부구조는 전체적으로 1질점계로 치환할 수 있다.

적층고무의 높은 연직지지력과 탄성변형능력은 면진구조물의 주기를 4초가 넘는 장주기를 가능하게 한다. 또 면진층은 탄성요소인 분리장치와 에너지흡수요소인 댐퍼의 조합에 의하여 에너지흡수효율을 향상시킬 수 있는 기능도 수행할 수 있다.



(a) 기초면진



(b) 중간층면진

그림 3.2.1.1 면진층의 위치

(나) 면진장치의 종류

면진구조에 사용되는 면진장치는 받침의 형식에 따라 다음과 같이 분류할 수 있다.

① 적층고무 방식

② 미끄러짐 방식

③ 롤러 방식

면진구조에 있어서 분리장치는 기둥과 같이 장기에 걸쳐 건물의 하중을 지지하여야 하며, 지진시에는 일반 기둥에 비하여 보다 큰 수평변형에 대해서 안정된 거동성능이 요구된다.

면진장치는 격리기능을 하는 분리장치와 에너지흡수기능을 하는 댐퍼를 총칭하여 지칭할 경우에 사용하며, 분리장치라고 할 경우에는 적층고무계 격리장치와 미끌림베어링(슬라이딩베어링), 구름베어링(롤베어링) 등의 분리장치를 지칭한다. 그리고 분리장치가 갖추어야 할 성능은 다음의 4가지이다.

- 수직지지 성능
- 수평변형 성능
- 복원 성능
- 감쇠 성능

이상의 분리장치의 종류와 갖추어야 할 성능에 대해서 표 3.2.1.1에 정리하여 나타내었다.

표 3.2.1.1 분리장치의 분류에 따른 요구성능

분리장치의 종류		수직지지 성능	수평변형 성능	복원 성능	감쇠 성능
적층고무 방식	천연고무 받침	○	○	○	×
	고감쇠고무 받침	○	○	○	○
	납봉삽입고무 받침	○	○	○	○
미끄러짐 방식	저마찰형 받침	○	○	×	×
	PTFE	○	○	×	○
	탄성강체와 저마찰형 지주의 직렬결합방식	○	○	○	×
	오목형 받침	○	○	○	×
롤러 방식	롤러형 받침	○	○	×	×
	볼 베어링 받침	○	○	×	×
	오목형 받침	○	○	○	×

○: 있음, ×: 거의없음

(다) 면진장치의 요구성능

분리장치는 상시하중에 대한 장기간의 안정된 지지능력이 요구되고 경년변화에 따라 성능열화가 발생하지 않아야 하는 요구조건을 만족해야 한다. 변형성능에서는 분리장치가 요구변형량 이상의 변형능력을 가짐과 동시에 연직하중을

지지할 수 있도록 요구된다. 이 때 수직하중은 상시하중의 2배정도까지 고려하고 있다. 분리장치가 큰 변형성능을 가지고 있어도 건물을 원래의 위치에 복원시키는 강성이 필요하다. 복원능력의 정도는 지진 후에 잔류변형의 크기에 영향을 미치며, 면진성능도 높여야 할 필요가 있으므로 가능한 한 유연한 수평강성을 가지도록 설계한다. 면진건물의 해석 및 설계의 신뢰성을 높이기 위하여 수평강성과 복원력특성이 축력의 변동에 따라 크게 영향을 받지 않도록 하는 것이 필요하다. 또한 미소한 변형에서 파단에 이르기까지의 이력특성, 면압 및 속도 등에 의한 의존성에 대한 검토 및 정량적 평가가 중요하다. 역학적 특성과 내구성뿐만 아니라 면진부재로서의 품질의 안전성은 매우 중요하다. 품질로서는 분리장치의 제작정밀도, 수평강성과 한계변형의 균일성이 요구된다.

분리장치의 설계에서는 면진건물에 상정한 응답변형량과 목표성능을 만족하도록 크기, 강성 및 변형능력 등을 결정한다. 이때 중요한 것은 축력의 변동에 대해서 영향을 적게 받는 시스템으로 설계하여야 한다.

① 적층고무의 구조와 특징

적층고무의 형상은 얇은 강판과 고무시트를 겹쳐서 적층한 구조를 이룬다. 고무층이 두꺼운 경우, 압축 시에 고무층은 크게 수축되어 고무가 옆으로 삐져나오게 되고 압축하중에 대한 지지능력이 적어질 것이다. 고무 1층의 두께를 작게 하면 옆으로 삐져나오는 현상을 줄일 수 있고, 압축하중에 대한 수축량도 줄일 수 있다. 전단변형 시에는 강판이 전단변형을 구속하지 않으므로 수평강성은 고무의 탄력이 좌우하게 된다.

그림 3.2.1.2는 적층고무의 단면을 나타낸다. 적층고무의 형상을 결정하는 파라미터는 고무 직경 D, 고무 1층 두께 t_R 및 고무층수 n이다. 이것은 1차형상계수 S_1과 2 차형상계수 S_2로 결정된다. 1차 형상계수 S_1은 다음 식으로 정의된다.

$$S_1 = \frac{\text{고무의 유효면적(수압면적)}}{\text{고무 1층의 자유표면적(측면적)}}$$

2차 형상계수 S_2는 다음과 같이 정의된다.

$$S_2 = \frac{\text{고무직경}}{\text{전고무층두께}}$$

S_1은 주로 수직·휨강성에, S2는 좌굴하중과 수평강성에 관계한다. 원형단면 적층고무의 경우, S_1과 S_2는 식 (3.2.1.1)에 의해 계산된다. 구속면적은 중간강판에 의해 고무층이 구속되어 있는 면적이다. 중심에 구정이 있는 경우는 구속면적과 자유표면적의 산출시 고려한다.

$$S_1 = \frac{\pi D^2/4}{\pi D t_R} = \frac{D}{4t_R}, \quad S_2 = \frac{D}{nt_R} \tag{3.2.1.1}$$

적층고무가 압축을 받으면 고무는 바깥쪽으로 변형하려 하지만 중간강판에 의해 구속되어 고무재질의 비압축성(포아송비 약 0.5)에 의해 고무중심부에 3축 압축응력 상태가 형성된다. 이것은 물이 고무 안에 갇혀 고무층이 "새지 않는 물"과 같이 되는 것과 같다. 따라서 압축에 의한 변형량은 매우 작고 같은 단면적을 가진 RC기둥 1개와 같은 정도의 높은 압축강성을 발휘할 수 있게 된다. 또한 적층고무의 압축파괴시험에서 중간강판의 인장파괴에 의해 고무의 구속이 약해지는 것으로 보아 압축한계내력은 중간강판의 강도에 지배되는 것으로 판단된다.

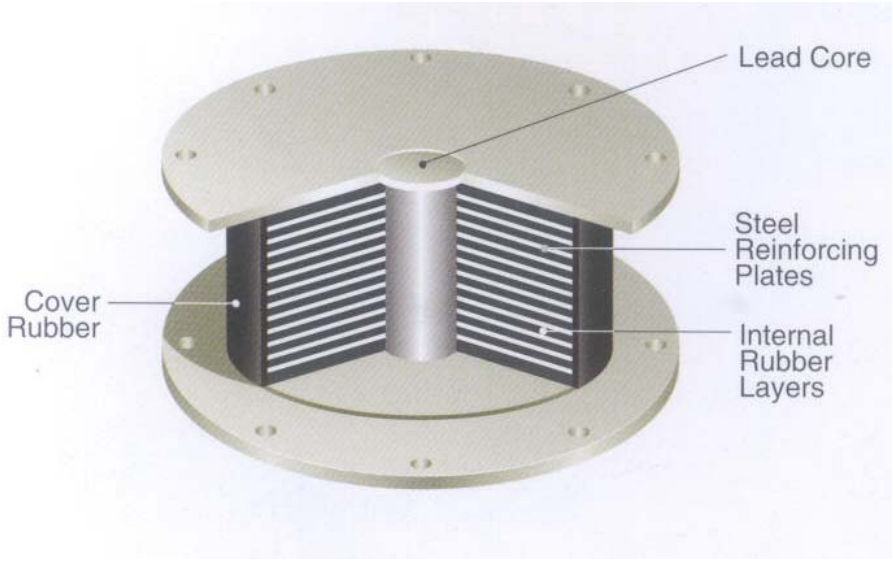


그림 3.2.1.2 적층고무의 단면

적층고무는 전단력이 작용할 때 중간강판은 고무층의 전단변형(체적변화 없음)을 구속하지 않으므로 고무시트만의 탄력으로 수평강성을 발휘한다. 적층고무가 크게 변형한 경우도 하중지지능력은 보유하고 있다. 이것은 그림 3.2.1.3에 나타낸바와 같이 적층고무의 최상하면의 중복부분(유효지지부라 칭함)에 대해서 지속적으로 3축 압축응력상태가 유지되기 때문이다. 이 유효지지부분에서 대부분의 압축하중이 지지되어 이 부분의 압축응력도(반력)는 매우 커지지만 반면 인장반력은 매우 작아진다. 또한 전단변형시에는 고무에 의한 “물”의 구속효과가 작아지므로 압축강성은 거의 유효지지부의 단면적에 비례해서 작아질 것으로 사료되지만 수직 축소량에 미치는 영향은 미비한 레벨이다. 이와 같이 적층고무는 큰 하중을 지지하면서 수평방향에 큰 변형을 하는 것이 가능하다.

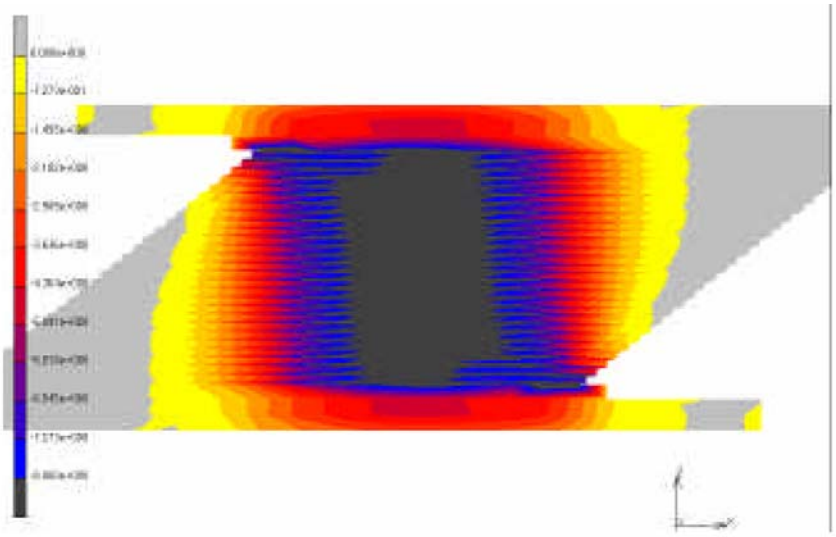


그림 3.2.1.3 적층고무의 수직방향 응력분포(σ=300kg/cm2, ɣ=300%)의 해석 예

(라) 면진장치의 성능

면진구조에 있어서 분리장치는 기둥과 같이 장기에 걸쳐 건물의 하중을 지지하는 연직성능과 지진 시에는 일반 기둥에 비하여 보다 큰 수평변형에 대해서 안정된 수평성능이 요구되며 이러한 성능은 제품의 편차를 고려한 경우에도 만족하여야 한다.

① 연직성능

i) 면진장치는 장기하중 시 축력과 수평변형을 동반하는 지진 시 축력 하에서도 건축물을 안전하게 지지할 수 있는 것으로 한다.

ii) 장기하중시의 면진장치 상호간의 연직 변형량에 큰 차이가 발생하지 않도록 장기면압을 적절히 설정한다.

적층고무의 압축강성 Kv는 종탄성계수 Ec를 이용해서 다음 식으로 계산한다.

$$Kv = \frac{E_{cb} A}{T_R} \tag{3.2.1.2}$$

여기서, $E_{cb} = \frac{E_c E_b}{E_c + E_b}$, $E_c = 3G(1 + 2\kappa S_1^2)$, TR: 전고무층 두께, A:단면적

전단변형이 커지면 유효지지면적이 감소하기 때문에 이 때 압축강성도 저하한다. 단 전단변형이 커지면 고무재료의 변형경화에 의해 비례적으로 저하되지 않는 경우도 확인된 바 있다. 따라서 식(3.2.1.3)과 같이 전단변형시의 압축강성의 하한값 Kve를 정의한다.

$$K_{ve} = \frac{A_e}{A} K_v \tag{3.2.1.3}$$

여기서, Ae: 유효지지면적

전단변형이 δ일 때 유효지지면적은 적층고무의 최상하면의 중복부분의 면적에 의해 다음 식으로 계산 가능하다.

$$\begin{aligned} A_e &= \left[1 - \frac{2}{\pi}\left\{\frac{\delta}{D}\sqrt{1-\left(\frac{\delta}{D}\right)^2} + \sin^{-1}\left(\frac{\delta}{D}\right)\right\}\right] A \\ &\cong \left[1 - 1.2\frac{\delta}{D}\right] A \quad \left(\frac{\delta}{D} \le 0.6\right) \end{aligned} \tag{3.2.1.4}$$

적층고무의 중심에 구멍이 있는 경우에는 구멍을 고려한 1차 변형계수를 이용하여 구하게 된다.

적층고무가 인장을 받을 경우 적층고무 내부는 부압상태가 되고 고무층 내부에 손상이 발생한다. 따라서 인장강성에 대한 이론식은 없으며, 인장강성에 대해서는 인장시험 등의 결과로부터 압축강성에 비해서 1/5 ~ 1/10정도를 보유하는 것으로 나타났다. 인장강성은 전단변형의 크기에는 영향을 받지 않으나 큰 인장을 경험한 경우 인장강성은 저하한다. 인장강성에 대해서는 적층고무의 부착방법과 플랜지의 치수 등에도 영향을 받기 때문에 실험결과를 적절히 평가할 필요가 있다.

② 수평성능

면진장치는 지진 시 축력 하에서도 복원력을 상실하지 않고 수평한계변형까지 안정되게 변형할 수 있는 것으로 한다.

적층고무의 수평강성 KH는 탄성체의 수평력과 압축력이 작용하는 경우 다음 식으로 구할 수 있다.

$$K_H = \frac{P^2}{2k_r q \tan\left(\frac{qH}{2}\right) - PH} \qquad q = \sqrt{\frac{P}{k_r}\left(1+\frac{P}{k_s}\right)} \tag{3.2.1.5}$$

여기서, P: 압축하중, H: 고무층과 중간강판의 총 두께(=TR+TS), TS: 중간강판전두께

유효전단강성 Ks와 유효휨강성 kr은 다음 식으로 구한다.

$$k_s = (GA)_{eff} = GA\frac{H}{T_R}, \qquad k_r = (EI)_{eff} = E_{rb} I \frac{H}{T_R} \tag{3.2.1.6}$$

여기서, $E_{rb} = \frac{E_r E_b}{E_r + E_b}$, $E_r = 3G\left(1+\frac{2}{3}xS_1^2\right)$, I: 단면 2차모멘트

식(3.2.1.6)의 우변에서 H/TR은 고무층과 중간강판을 고려한 유효강성이다. 즉, 고무층만의 전단강성과 휨강성인 GA/TR, ErbI/TR과 적층고무 전체의 유효

강성(GA)eff/H, (EI)eff/H를 등가시켜 구할 수 있다.

식(1.5)는 압축하중 P가 0에 근접할 때 tan(qH/2)≒qH/2가 되는 것을 고려하면 압축하중이 0일 때의 수평강성K_{H0}는 다음과 같이 구할 수 있다. 이것은 고무층의 전단강성만을 고려한 식과 동일하다.

$$K_{H0} = \frac{GA}{T_R} \tag{3.2.1.7}$$

식(3.2.1.7)은 적층고무의 수평강성을 평가하기 위해 매우 유효한 식이다. 단, 식의 적용에 대해서는 적층고무의 전단변형이 탁월하고 휨변형 성분에 대해서는 무시 가능한 형상이어야 한다. 압축하중의 변동에 대해서 수평강성의 변동이 작아지는 형상이어야 한다는 것이 식(3.2.1.7)의 적용조건이며 이것은 적층고무의 설계에서도 중요하다.

(마) 적층고무의 적용현황 분석

일본건축센터에서 발행한 1998년까지의 성능평가시트로부터 직경 및 동일제품에 대한 적층고무가 30개 이상 사용된 19개 건물을 선정하여 조사하였다. 적층고무의 내역은 천연고무계 적층고무(이하, NRB)가 10건, NRB와 납봉삽입형 적층고무(이하, LRB)의 혼용이 3건, LRB가 5건, 고감쇠고무계 적층고무(이하, HDR)가 1건이다. 조사한 적층고무의 총수는 1926개, NRB가 1304개(68%), LRB가 539개(28%), HDR이 83개(4%)이다.

HDR의 빈도가 적은 원인으로는 면압과 편심의 처리를 위해 작은 크기의 적층고무를 30개 이상 사용한 건물이 적었기 때문으로 판단된다. 실제 본조사에 의한 HDR의 결과에서는 83개의 적층고무에 대해서 7종류의 크기가 사용되었다.

적층고무의 직경에 대해서 NRB와 LRB의 편차를 표 3.2.1.2에 나타내었다. NRB에서는 직경 800ϕ가 가장 많았고, 700ϕ와 800ϕ 의 점유비가 전체 사용량의 약 70%를 차지하고 있다. 한편 LRB는 1000ϕ, 1100ϕ의 적층고무의 사용빈도가 NRB에 비해서 많았다. 이는 납봉 삽입 적층고무는 적층고무의 중간에 납봉 삽입용 구멍이 있어 단면적을 증가시킬 필요성이 있었던 것으로 판단된다.

표 3.2.1.2 적층고무의 직경분포

직경	NRB		LRB	
	개수	빈도(%)	개수	빈도(%)
600 ϕ	63	4.8	0	0.0
700 ϕ	368	28.2	75	13.9
800 ϕ (850 ϕ)	548	42.0	145	26.9
900 ϕ	111	8.5	78	14.5
1000 ϕ	123	9.4	132	24.5
1100 ϕ	76	5.8	96	17.8
1200 ϕ	15	1.2	4	0.7
1300 ϕ	0	0.0	9	1.7
합계	1304	100.0	539	100.0

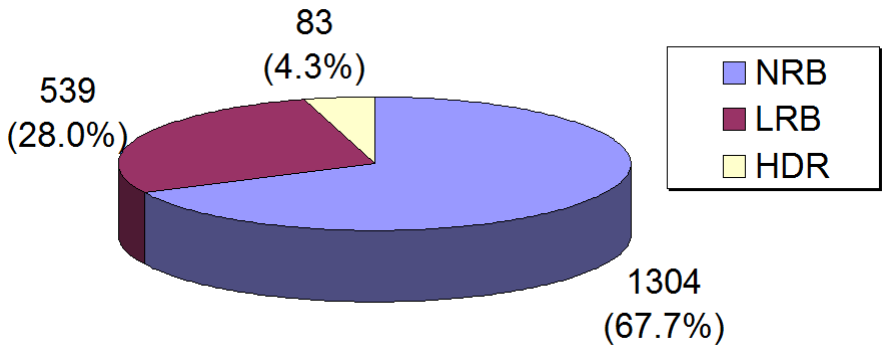


그림 3.2.1.4 적층고무의 적용현황

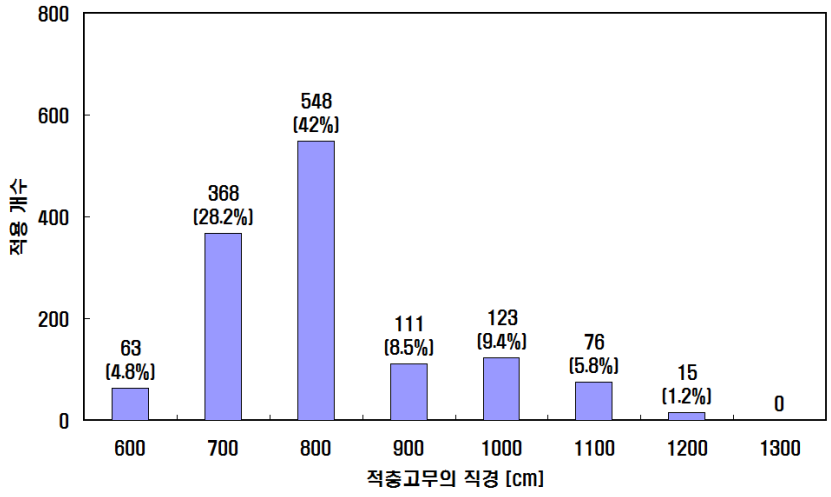


그림 3.2.1.5 적용된 천연고무계 적층고무의 직경

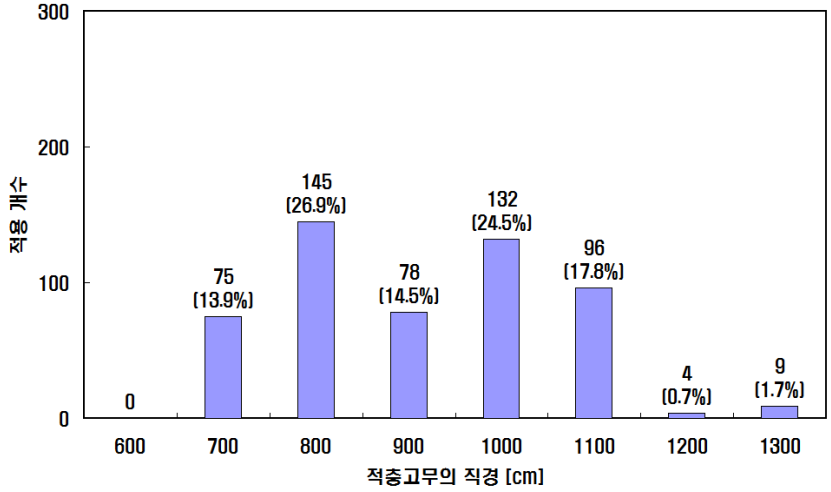


그림 3.2.1.6 적용된 납봉삽입형 적층고무의 직경

(바) 면진장치용 에너지 흡수장치의 종류 및 성능

면진장치용 댐퍼는 여러 가지 형태, 기구, 재질을 가진 것이 다양하게 개발되어 사용되고 있다. 면진구조의 초기에는 강재와 납을 사용한 댐퍼가 개발되었고, 그 후 마찰을 이용한 댐퍼와 점탄성체를 이용한 댐퍼 등도 개발되었다. 현재까지는 분리장치에 댐퍼기능을 복합시킨 분리장치도 이용되고 있다. 이러한 복합형 분리장치에는 하중지지능력도 요구되지만, 분리장치와 독립된 댐퍼에는 하중지지능력은 필요 없다. 분리장치와 조합해서 사용하는 댐퍼를 작동원리 면에서 분류하면 다음과 같다.

① 이력 감쇠형: 강봉 댐퍼, 납 댐퍼, 마찰 댐퍼 등과 같이 주로 변형이력에 의한 에너지 소비를 이용하는 것

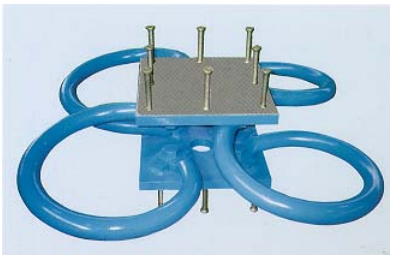
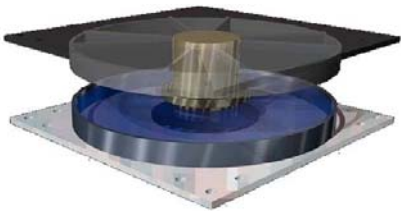
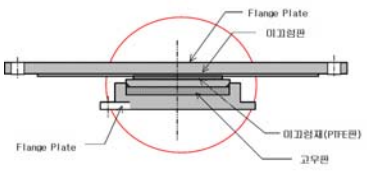
② 점성 감쇠형: 점탄성 댐퍼, 오일 댐퍼 등과 같은 주로 속도 의존형의 점성저항을 이용하는 것.

또한 댐퍼의 요구 성능으로는

- 감쇠 성능
- 변형 성능
- 방향성
- 내구성

면진장치에 사용되는 댐퍼의 종류를 분류하여 표 3.2.1.3에 나타내었다.

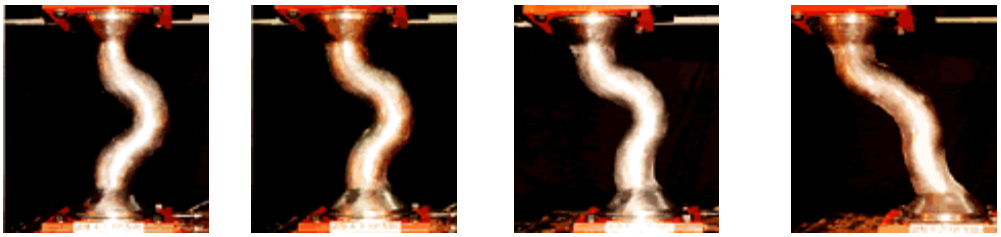
표 3.2.1.3 면진장치용 댐퍼의 분류

댐퍼의 종류			방향성
이력 감쇠형 댐퍼	납봉댐퍼		이방향
	강봉루프 강재댐퍼		이방향
	U형 강재댐퍼		이방향
점(탄)성 감쇠형 댐퍼	고분자계 점성체 댐퍼		이방향
	오일 댐퍼		일방향
마찰 감쇠형 댐퍼	미끄러짐 받침 마찰댐퍼		이방향

(사) 면진장치용 에너지흡수장치의 성능조사

① 납봉 댐퍼·

현재 사용되고 있는 납봉댐퍼의 전단변형성능 및 이력특성을 조사한 결과를 그림 3.2.1.7~3.2.1.8에 나타냈다. 납봉댐퍼의 경우, 보통 면진구조에서 사용하고 있는 이격거리 400 mm 이상의 변형능력을 확보하고 있으며, 400 mm 이상의 변형 후에도 안정된 이력특성을 나타내고 있음을 알 수 있다.



(a) 실험전 (b) 전단변형 100mm (c) 전단변형 200mm (d) 전단변형 400mm

그림 3.2.1.7 납봉댐퍼의 전단변형 실험

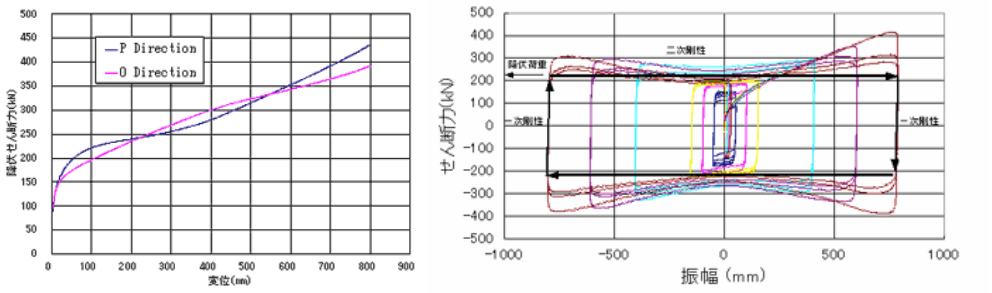


그림 3.2.1.8 납봉댐퍼의 하중-전단변형 관계

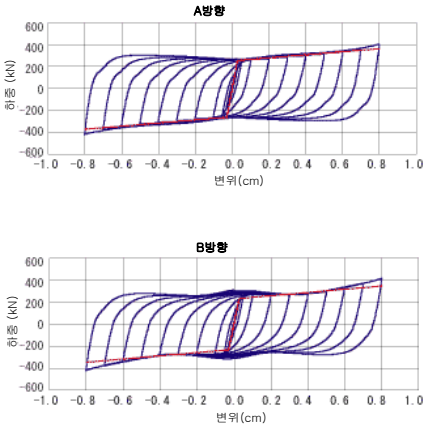
② U형 강재댐퍼

㉮ 면진U형댐퍼

면진U형댐퍼의 적용사례 및 복원력 특성을 그림 3.2.1.9에 나타내었다. 최대변형 800mm 정도까지 안정된 이력특성을 나타내고 있다. 면진U형댐퍼의 수평성능 및 한계성능에 대해 표 3.2.1.4에 나타냈다. 댐퍼를 안정적으로 사용할 수 있는 한계변형량은 최소 550 mm 이상을 확보하고 있으며, 면진구조용댐퍼로서 매우 적합한 성능을 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한 이 댐퍼에 사용된 강재의 화학성분을 표 3.2.1.5에 나타냈다. 사용강재는 SN490B(건축구조용 압연강재)를

사용하고 있으며, 강재의 감쇠성능은 거의 없는 것으로 나타났다. 그리고 SN490B 강재는 보통 연신율 30% 정도를 나타내고 있으므로 사용강재의 연신율을 더욱 높일 경우 한계변형량을 더 크게 할 수 있을 것으로 판단된다. 그리고 현재 시판되고 있는 면진U형댐퍼의 품질기준 일람표를 표 3.2.1.6에 정리하였다.





(a) 면진U형댐퍼의 형상 (b)면진U형댐퍼의 복원력 특성

그림 3.2.1.9 면진U형댐퍼의 형상 및 성능

표 3.2.1.4 면진U형댐퍼의 수평성능 및 한계성능

호칭(형식)	성능				
	댐퍼 본수	1차 강성 (kN/m)	2차 강성 (kN/m)	항복과중(kN)	한계변형(mm)
SSUD40×4	4	5,920	100	112	550
SSUD40×6	6	8,800	150	168	
SSUD40×8	8	11,800	200	224	
SSUD45×4	4	7,600	128	184	650
SSUD45×6	6	11,400	192	276	
SSUD45×8	8	15,200	256	368	
SSUD50×4	4	8,320	144	232	750
SSUD50×6	6	12,500	216	348	
SSUD50×8	8	16,600	288	464	
SSUD55×4	4	9,600	160	304	850
SSUD55×6	6	14,400	240	456	
SSUD55×8	8	19,200	320	608	

표 3.2.1.5 면진U형댐퍼강재의 화학성분

SN490B(건축구조용압연강재 : JIS G 3136)의 화학성분								
종류의 기호	두께(mm)	C	Si	Mn	P	S	Ceq	Pcm
SN490B	6이상 50이하	0.18이하	0.55이하	1.60이하	0.030 이하	0.015 이하	두께 40mm이하	0.29이하
	50초과 100이하	0.20이하					두께 40mm초과 0.46이하	

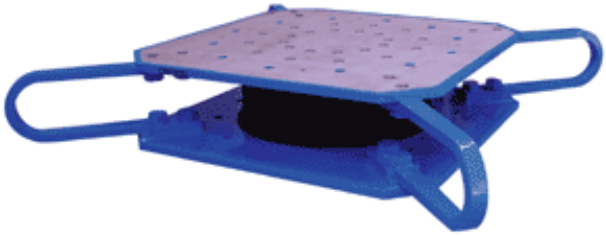
표 3.2.1.6 면진U형댐퍼의 품질기준 일람표

항목			SSUD 40×4	SSUD 40×6	SSUD 40×8	SSUD 45×4	SSUD 45×6	SSUD 45×8	SSUD 50×4	SSUD 50×6	SSUD 50×8	SSUD 55×4	SSUD 55×6	SSUD 55×8
재료의 구성	댐퍼부 댐퍼용 볼트 플랜지 플레이트		SN490B JIS G3136 F10T상당 JIS B1180 SM490A 와 SS400 와 SN490B JIS G3106와 JIS G3130와 JIS G3136											
형상촌법	댐퍼본수(본)		4	6	8	4	6	8	4	6	8	4	6	8
	베이스플레이트 두께	기준치(㎜)	28			36			40			45		
		교차(㎜)	-2.5~+1.3			-2.5~+1.3			-2.5~+1.6			-2.5~+1.6		
	댐퍼부길이	기준치 (㎜)	416			517			602			673		
		교차(㎜)	±8			±10			±12			±13		
	댐퍼부 높이	기준치 (㎜)	231			284			335			374		
		교차(㎜)	±10			±10			±12			±10		
한계성능	한계변형량(㎜)		550			6350			750			850		
수평성능	항복하중 Qy(kN)		112	168	224	184	276	368	232	348	464	304	456	608
	일차강성 K1(kN/m)		5,920	8,880	11,800	7,600	11,400	15,200	8,320	12,500	16,600	9,600	14,400	19,200
	이차강성 K2(kN/m)		100	150	200	128	192	256	144	216	288	160	240	320
	항복변위 Qy/K1(㎜)		18.9			24.2			27.9			31.7		
제조격차	Qy의 격차(%) K1의 격차(%) K2의 격차(%)		±10 ±10 0											
수평성능의 변화율	경년변화율(%)		감쇠재는 강재 때문에 기계적 제성질에 경년변화가 발생하는 것은 없다.											
	온도의 존성	Qy의 변화율(%)	(-10℃)/(20℃)	1.03										
			(40℃)/20℃)	0.97										
		3사이클째의 에너지 흡수량의 변화	(-10℃)/(20℃)	1.03										
			(40℃)/20℃)	0.97										
		K1의 변화율(%)	(-10℃)/(20℃)	1.00										
			(40℃)/20℃)	1.00										
		K2의 변화율(%)	(-10℃)/(20℃)	1.00										
			(40℃)/20℃)	1.00										
	주기의 존성	Qy의 변화율(%)	(2.8초)/(정적)	1.03										
			(1.7초)/(정적)	1.06										
			(1.1초)/(정적)	1.07										
		K1의 변화율(%)	(2.8초)/(정적)	1.00										
			(1.7초)/(정적)	1.00										
			(1.1초)/(정적)	1.00										
		K2의 변화율(%)	(2.8초)/(정적)	1.00										
			(1.7초)/(정적)	1.00										
			(1.1초)/(정적)	1.00										

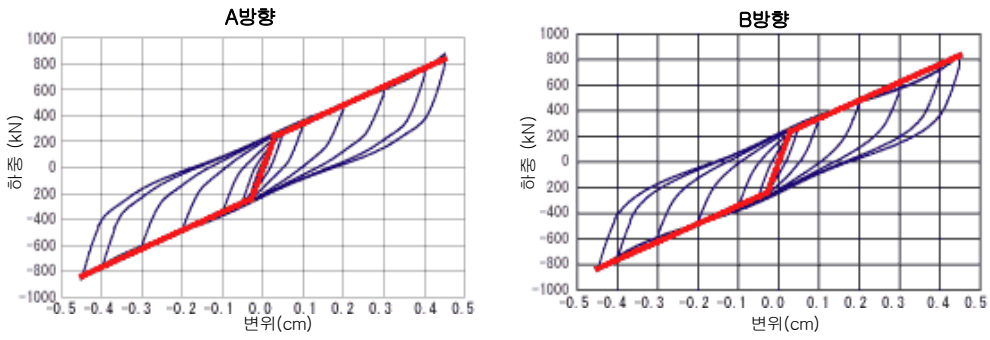
㈏ 적층고무일체형 면진U형댐퍼

면진U형댐퍼를 적층고무와 일체형으로 사용하는 적층고무일체형 면진U형댐퍼의 성능평가를 실험결과 및 형상을 그림 3.2.1.10에 나타냈다. 적층고무만을 사용한 경우에는 탄성변형을 함으로 에너지를 흡수할 수 없으나 댐퍼를 함께 사용함으로써 면진장치의 에너지흡수능력이 발생하고 있음을 알 수 있다. 또한, 면진구조설계에서 주로 사용하고 있는 이격거리 400mm 이상의 변형이 발생한 경우에도 안정된 거동을 나타내고 있음을 알 수 있다.

이러한 면진장치의 크기에 따른 수평성능 및 한계성능을 표 3.2.1.7에 나타내었다.



(a) 면진U형댐퍼의 형상



(b)면진U형댐퍼의 복원력 특성

그림 3.2.1.10 적층고무일체형 면진U형댐퍼의 형상 및 성능

표 3.2.1.7 적층고무일체형 면진U형댐퍼의 수평성능 및 한계성능

강재댐퍼					
호칭(형식)	1차강성	2차강성	한계변형	항복하중 Qy	탄성한도
	(kN/m)	(kN/m)	(mm)	(kN)	(mm)
SSUD40×4+R45-600-4.5×26	4	5,920	100	112	
SSUD45×4+R45-700-5.3×26	6	8,800	150	168	
SSUD45×4+R45-800-6.0×26	8	11,800	200	224	
SSUD50×4+R45-900-6.8×26	4	7,600	128	184	650
SSUD50×4+R45-1000-7.5×26	6	11,400	192	276	
SSUD55×4+R45-1100-8.3×26	8	15,200	256	368	
SSUD55×4+R45-1200-9.0×26	4	8,320	144	232	750

적층고무										
호칭(형식)	두께	계층	총 두께	1차 형상 계수	2차 형상 계수	용수철정수		한계 변형	면압	지승 하중
						연필방향	수평방향			
	(mm)		(mm)			(kN/m)	(kN/m)	(mm)	(N/㎟)	(kN)
SSUD40×4+R45-600-4.5×26	4.5	26	117.0	31.7	5.1	5,530,000	1,060	550	15.0	4230
SSUD45×4+R45-700-5.3×26	5.3	26	137.8	31.4	5.1	2,900,000	1,230	550	15.0	5760
SSUD45×4+R45-800-6.0×26	6.0	26	156.0	31.7	5.1	3,370,000	1,420	620	15.0	7520
SSUD50×4+R45-900-6.8×26	6.8	26	176.8	31.4	5.1	3,740,000	1,580	710	15.0	9520
SSUD50×4+R45-1000-7.5×26	7.5	26	195.0	31.7	5.1	4,220,000	1,770	780	15.0	11750
SSUD55×4+R45-1100-8.3×26	8.3	26	215.8	31.5	5.1	4,590,000	1,940	860	15.0	14220
SSUD55×4+R45-1200-9.0×26	9.0	26	234.0	31.7	5.1	5,060,000	2,130	940	15.0	16920

(2) 면진구조 설계기법 조사 및 분석

(가) 구조기술의 세계 표준화

세계 각 국의 내진설계 기준의 대부분은 미국 서부의 기준 UBC 또는 이와 관련한 지침에 따른 내용으로 구성되어 있다. 학문, 산업, 정치, 경제적인 면 등의 다양한 이유로 인해 구조기술에 관하여서는 미국의 영향력은 상당한 부분을 차지하였다. 또한 2000년부터는 내진, 내설, 내풍설계의 각각에 정통한 서부기준 UBC, 북동부기준 NBC, 남부기준 SBC를 통합한 적용범위가 넓어진 IBC가 미국 국내에서 이용되게 되었고 구조설계기준에서 상당한 영향력을 발휘하고 있다.

한편 국제표준화를 추진하고 있는 ISO는 미국보다는 오히려 유럽의 주도로 진행되고 있는 경우가 많다. 예를들어 강구조 및 알루미늄구조 위원회인 TC167의 간사국은 노르웨이이며 투표권을 가진 정식멤버 20개국 중, 11개국이 유럽의 국가이다. 강구조의 재료, 설계, 제작, 시공 분야를 담당하는 소위원회인 SC1, SC2에선 미국이 소극적인 자세로 일괄한 결과 전반적으로 유럽위주의 위원회 운영이 되고 말았다. 또한 콘크리트구조 위원회인 TC71의 경우도 유럽주도였으나 미국이 SC4 소위원회에서 각국 기준의 국제적 적용을 인정하는 포괄적인 규격을 제안하고 이를 인가 받음으로서 어느 정도 유럽 주도를 막을 수 있게 되었다. 1991년 빈협정에 따라 CEN이 제정한 규격을 ISO에서 우선적으로 고려하는 것이 가능하게 되었고, 유럽이 욕심을 낸다면 유럽 주도형이 될 가능성이 높다.

(나) 면진 및 제진기술의 세계 표준화

국제 표준화에서 유럽 및 미국이외의 국가가 주도적 입장을 얻기는 어렵다. 그러나 불리한 상황이 진행되면 될수록 이외의 국가들의 해외진출은 어렵게 되므로 일본을 비롯한 각국은 각국의 구조설계와 관련의 의견을 ISO에 반영시키기 위한 노력을 경주하고 있다. 그 결과 일본의 경우, TC98(구조물의 설계의 기본)의 SC2의 구조물의 신뢰성, SC3의 하중 및 외력과 그 외의 작용에 관한 표준화가 일본 주도로 진행되고 있으며, 또한 TC45(고무와 고무제품)의 SC4에서는 적층고무 면진받침의 검토가 이탈리아 주도로 시작되었으나 곧 일본의 주도

로 되었으며 미국과의 공조로 일본의 면진고무 기술의 국제표준화가 이루어졌다.

그런데 지금까지 면진 및 제진장치의 일반 면진 및 제진구조 위원회의 구성은 아직까지 만들어지진 않았으나, 일본 등의 국가는 미래에 대한 대비를 서두르고 있다. 국제적인 건축관계 연구자들의 기관인 CIB(International Council for Research and Innovation in Building and Construction)가 ISO의 준기준(Prestandard)제정 기관으로서 영향력을 가지고 있으며, 이에 일본은 일본면진구조협회(JSSI)가 CIB에 TG44(응답제어장치를 가진 건물의 성능평가)를 설치 요청을 하게 되고, 멤버로서는 미국, 이탈리아, 중국, 대만을 비롯하여 우리나라도 참가하고 있다. TG44의 제 1회 모임은 미국 NIST에서 열리게 되고 지금까지 진행되고 있다.

(다) 미국의 면진설계법의 현황

미국에서 처음으로 면진시스템이 도입된 건축물이 완공된 것은 1985년이었으며 그 당시에 미국뿐만 아니라 해외의 많은 엔지니어와 건축가들이 앞다투어 견학을 했을 정도였다. 그러나 두 번째의 면진구조물이 시작된 것은 그로부터 몇 년 후의 일이었다. 내진설계의 개념을 이용한 몇몇 구조물에 대한 면진의 도입은 관련규정의 부족으로 장애를 초래하였기 때문이다. 북캘리포니아구조공학자모임(SEAONC)은 면진구조물의 설계 가이드라인을 작성하기 위한 워킹그룹을 구성하였으며, 캘리포니아구조공학자모임(SEAOC)의 지진위원회는 구조물의 내진설계 조항을 담당하였다. 여기서 만들어진 규정이 Recomended Lateral Design Requirements and Commentary(SEAOC 1985)이며, 이것은 일반적으로 블루북(Blue Book)으로 알려졌으며, 추후의 UBC의 기술적 근거로서 사용되었다.

UBC는 International Conference of Building Officials(ICBO)가 출판하였으며 내진설계에서는 가장 널리 사용되어지는 규정이다. 그 후 1986년 SEAONC의 소위원회가 Tentative Seismic Isolation Design Requirements라는 일명 옐로우북(Yellow Book)을 블루북 제 4판의 부록으로 출판하게 되었다(SEAONC 1986).

옐로우북의 접근방법이나 레이아웃은 블루북과 거의 대등하게 작성되었다. 등

가수평력에 대한 절차가 강조되어 있으며 블루북과 마찬가지로 지진입력의 레벨은 베이스고정 건축물의 지진입력을 사용하였다. 이것은 50년 주기의 10%초과확률을 가진 지진하중이다. 구조물에 따라서는 동적해석이 허용되었으나, 간단한 등가정적 해석으로 설계의 최소수준을 결정하였다.

1988년 SEAOC의 지진위원회는 소위원회를 구성하여 General Requirem ents for the Design and Construction of Seismic-Isolated Structures를 출판하였다(SEAOC 1989). 그리고 1990년에 이 내용은 블루북 제 5판의 부록으로 추가되었다. 그 후 ICBO에 의해 1991년판 UBC의 내진조항에 추가되었다(ICBO 1991). 여기서는 정적해석방법을 포함하고 있었으며 그리고 정적해석 계수에 근거한 설계의 최소수준을 유지하였으나 동적해석 의무규정과 관련한 사항을 증가시켰었다.

면진구조물 설계와 관련한 또 다른 규정은 캘리포니아 소재 병원건물의 면진설계를 위한 규정으로서 Building Safety Board(BSB) of the Office of State Architect에 의해 채용되었다. 제목은 An Acceptable Method for Design and Review of Hospital Buildings Utilizing Base Isolation(OSHPD 1989)으로서 개발은 BSB의 SEAONC가 참여하였으며 내용은 SEAONC와 UBC코드와 거의 유사하다. 1989년에 BSB가 채택한 버전은 1992년에 새로운 버전이 출간되었으며 추가 요구사항이 포함되어 있다.

UBC코드는 SEAONC 가이드라인과는 달리 두단계의 지진입력에 대한 설계를 분명히 요구하고 있다는 점이 큰 차이이다. 먼저, Design Basis Earthquake에서는 50년주기 초과확률 10%의 지진동에 대한 레벨을 설정하고 있으며, 이것은 상부구조물이 탄성범위내에 머무르는 것을 규정하고 있다. 두 번째 레벨은 Maxium Capable Earthquake으로서 시공지반에서 지질학적으로 발생할 최대 지진동에 대한 설계레벨이며 이것은 100년주기의 초과확률 10%에 해당된다. 면진시스템은 반드시 이벨에 대한 디자인과 실험이 수반되어야 하며, 면진시스템을 통과하는 모든 구조물의 시설 및 설비는 이 레벨의 지진입력시 발생하는 힘과 변형을 수용할 수 있도록 설계 되어야 한다.

UBC 1994년판에 면진과 관련한 조항들이 많은 변화들이 있었으며 주로 초기의 조항보다 더욱 안전측에 가까운 규정들이다. 1994년 규정은 정적해석에 관한 규제조항이 있었으며, 프로토타입의 면진장치에 대한 디테일 및 실험이 시공전

에 이루어지도록 규정되었다. 또한 수직력이 분포도 유니폼분포에서 일반적으로 픽스드베이스에서 사용되어지는 삼각형분포로 바뀌었다. 또한 발생변위에는 감소계수가 도입되었다. 기존의 픽스드베이스시의 계수보다 약 1/2정도 줄어들었다.

UBC 1997년판에는 더욱 많은 변화가 있었다(ICBO 1997). 규정은 더욱 엄격해졌으며 복잡해졌다. 많은 숫자들과 새로운 용어들이 추가되었다. 예를들어 계산되는 6개의 서로 다른 변위량이 암반 3개 지반과 흙 3개 지반에 따라 계산되어야 한다. 또한 4개의 지진계수에 따라 지진출처와 근거리계수에 의해 산정되어 진다. 그 당시 미국에서 면진건물을 설계하기 위해서는 UBC 1997 또는 캘리포니아주 정부발간의 OSHPD 1996 시방서가 사용되었다. 그러나 OSHPD 1996은 UBC 1997과 유사한 방향으로 개정되었다. UBC 1997의 설계절차는 예비설계와 최종설계의 두 단계로 나누어져 있다.

그 후 UBC 1997은 IBC 2000코드로 체재로 전환되었으며 면진관련 규정은 몇몇 표기방법의 변화 이외에는 거의 같으며 설계변위 및 설계외력 산정은 마찬가지로 안전측으로 제시하고 있다. 삼각형분포 외력분포 또한 무분별하게 지속적으로 사용되었다. 면진설계된 상부구조의 감소계수는 종래의 구조물의 3/8으로 분류되었으며 최대치는 2를 넘지 못하도록 되어 있다. 즉 미국의 면진설계는 UBC 1997이 근간을 이루고 IBC 2000, IBC 2003 그 후 ASCE 7 -05로 변화되어 왔다.

(라) 일본의 면진설계법의 현황

일본의 건축구조 관련 규정은, 건축기준법, 건축기준법 시행령, 건설성고시 및 국토교통성고시(2001년 1월 6일 행정부서 개편)로 이루어져 있다.

일본에서는 1998년 건축기분법이 개정・공포되어, 2000년 6월부터 건축물에 대한 성능규정이 새로이 시행되었다. 성능규정은 건축물의 구조 안전성에 대한 검증은 설계자의 판단에 따라서 복수의 성능평가 방법 중, 설계자가 검증법을 선택할 수 있도록 변경되었다. 또한 2000년 12월에는 면진건축물(平12年建告第2009号) 및 면진재료(平12年建告第1446号, 平12年建告第2010号)와 관련한 2건의 고시에 의해 면진건축물의 건축 확인을 직접 받을 수 있게 되었다. 종래의 면진건축물은,

① 적층고무 등의 특수한 재료 및 구조방법을 사용할 것
② 구조안전성의 확인에 있어서는 시각력응답해석 등에 의한 동적인 검토를 필요로 할 것

으로부터 旧法 제 38조(성능을 명시하지 않고 포괄적인 예외를 인정하는 규칙)의 대상이었다. 그러나 2000년 12월의 건축기준법령의 개정으로 인하여, 상기 ①은 강재나 콘크리트 등과 마찬가지로, 法第37條의 구조내력상 주요한 부분에 사용되는 재료(지정 건축재료)로서 면진재료가 추가되었다. 또한 ②는 철골조, 철근콘크리트조 등의 통상의 건축물에 면진층이 설치된 면진건축물의 구조안전성의 확인은 平12年建告第2009号의 규정이 적용되게 되었다. 단, ①에 대해서는 면진재료에는 JIS 및 JAS 지정이 없으므로 국토교통성 대신의 인정이 필요하며 따라서 平12年建告第1446号에 면진재료에 대한 기준을 정하였다. 또한 건축재료로서 지정되었으므로 고시의 기준을 벗어나는 면진재료는 사용할 수 없게 되었다.

또한 주의해야 할 것은, 상기의 고시에서는, 면진건축물의 구조방법으로서 독립한 면진층을 반드시 설치해야하며, 주두나 죽각부분에 면진부재를 직접 설치하는 것은 대상에서 벗어난다. 그리고 면진층의 위치에 관해서도 지상부분 바로 밑 및 지하부분 바로 위로 한정되어져 중간층 면진도 대상에서 벗어난다. 더욱이 면진층 이외의 부분(상부구조 혹은 하부구조)은 대지진에 대해서 허용응력도 설계를 수행하도록 되어 있는 등 반드시 모든 면진건축물을 대상으로 하고 있지는 않다. 상기의 규정에 적합하지 않는 경우에는, 시행령제81조의 2의 규정에 근거한 구조계산(시각력응답해석 등, 平12建告第1461号)을 실시하고 국토교통성 대신의 인정을 받는 것이 필수이다.

개정 건축기준법의 면진건축물과 관계된 고시에서는, 면진건축물의 구조안전성의 확인은 아래의 그림 3.2.11과 같다. 면진건축물과 관련한 구조계산 루트는 아래의 3가지에 해당한다.

① 내구성 관계규정 + 사양규정 → 구조계산 불필요 루트
② 내구성 관계규정 + 구조계산(한계내력계산법) → 구조계산 필요 루트
③ 내구성 관계규정 + 시각력응답해석 등 → 대신인정의 루트

아래 그림의 구조계산 루트의 내구성 관계규정은, 구조계산에서 안전성의 확인이 되지 않은 부분을 규정하고 있다. 면진건축물의 내구성 관계 규정은 다음과 같다.

① 기초의 지반을 1종지반 또는 2종지반이어야 한다
② 면진층의 높이는 면진재료 등의 점검에 지장이 없어야 한다
③ 면진재료만을 사용해서 힘의 전달이 이루어 질 것
④ 면진재료를 검사 및 점검이 용이한 위치에 설치할 것
⑤ 면진재료의 상하를 각각 상부 및 하부구조에 긴결할 것
⑥ 지하층을 설치하는 경우에는 편토압이 작용하지 않을 것
⑦ 잘 보이는 곳에 면진건축물이라는 것을 표시할 것
⑧ 필요한 경우 적설시에 면진층의 변위가 방해를 받지 않을 것
⑨ 필요에 따라 면진재료의 교환이 가능한 구조로 할 것
⑩ 면진층의 침수로 인해 면진부재가 물에 잠기는 것을 방지할 것

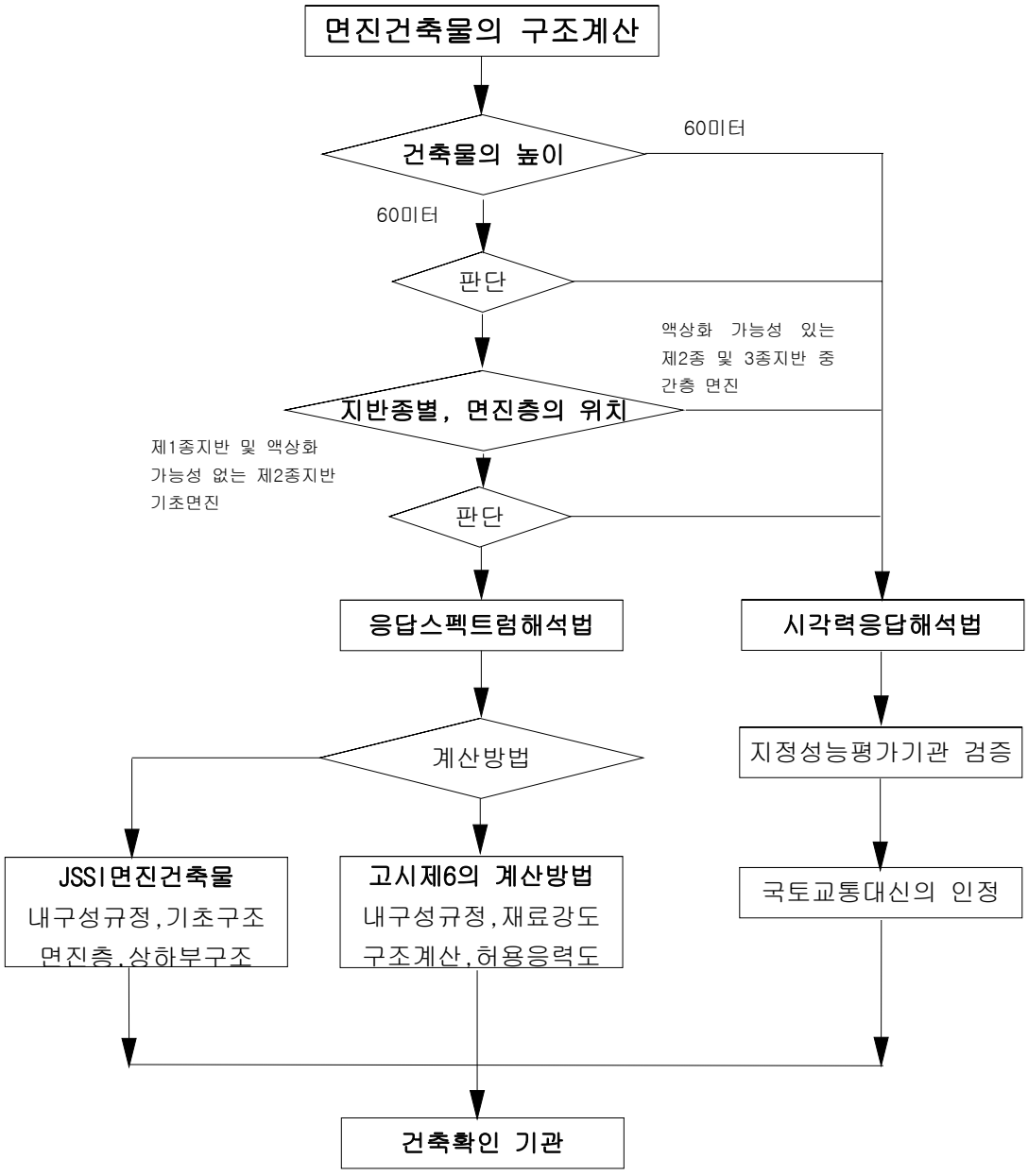


그림 3.2.1.11 일본의 면진구조물 구조설계순서

면진건축물의 지진응답평가법의 대표적인 방법은 다음과 같다.

① 시각력응답해석에 의한 방법 : 시각력응답해석에 의한 방법은 이전부터 사용되어지는 방법이며, 시각력응답해석의 모델화는, 상부구조가 면진층에 비해 충분한 강성을 가지는 경우에는 1질점계 전단형 모델이 많이 사용된다. 또한 상부구조의 설계진도를 대폭적으로 저감한 경우나, 철골조와 같이 유연성이 있는 상부구조의 경우는 면진장치와 상부구조의 주기가 인접

한 경우가 있으므로 지진시의 거동을 정확히 파악하기 위해서는 다층 전단형 또는 다층 프레임모델을 이용한 응답해석을 수행한다. 면진구조의 특징은 표준설계진도인 0.2보다 작게하여 보와 기둥의 사이즈를 줄일 수 있는 설계이므로 보와 기둥 단면의 축소률이 커지면 커질수록 정밀한 다층 프레임형 모델을 이용하여 응답해석을 수행한다.

② 에너지평형법에 기초한 방법: 일본건축학회의 면진구조설계지침에 따르는 방법으로서, 지진동의 입력에너지와 면진층의 에너지흡수능력의 평형으로부터 면진층의 최대응답을 구하는 방법이다.

③ 등가선형화해석 수법에 의한 응답스펙트럼 해석을 이용하는 방법: 면진건축물의 상부구조를 강체로 한 1질점계로 치환하고, 입력지진동의 응답스펙트럼을 이용하여 면진층의 소성화에 따른 등가선형강성과 등가감쇠로부터 최대응답을 구하는 방법이다.

④ 응답평가의 흐름(상기 ③의 수법에 의함)

- 일반 건축물: 각 층의 한계치(안전한계내력) → 안전한계고유주기 → 대표응답가속도 Bi 분포 계산 → 각 부분별 층전단력 계산

- 면진건축물: 각 층의 한계치(설계한계변위) → 설계한계고유주기 → 대표 지진력 → 상당하는 C0, Ai 분포계산(층전단력 계산), 응답변위(면진층), 지하부분의 지진력 계산 →성능(응답≤한계)의 확인

* 면진층 : 응답변위: 설계한계변위, 편심율: 0.03, 응답시전단력분담율: 0.03
  접선주기: 2.5초(소규모인 경우 2.0초), 클리어런스
* 면진재료 : 응답속도: 한계속도(감쇠재), 압축력: 재료강도, 인장력: 0
* 상부구조 : 발생응력: 단기허용응력도, 층간변형각: 1/300
  (소규모인 경우 1/200)
* 하부구조 : 발생응력: 단기허용응력도

(마) 일본과 미국의 면진설계법의 절차 비교

① 일본

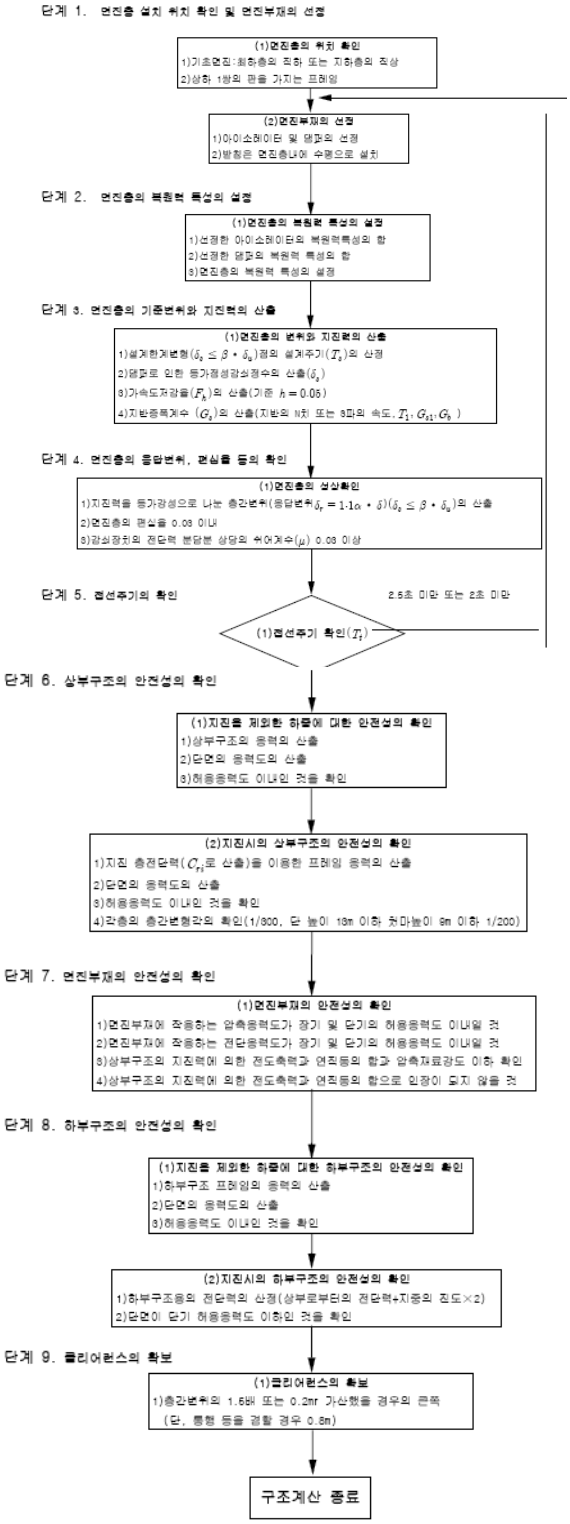
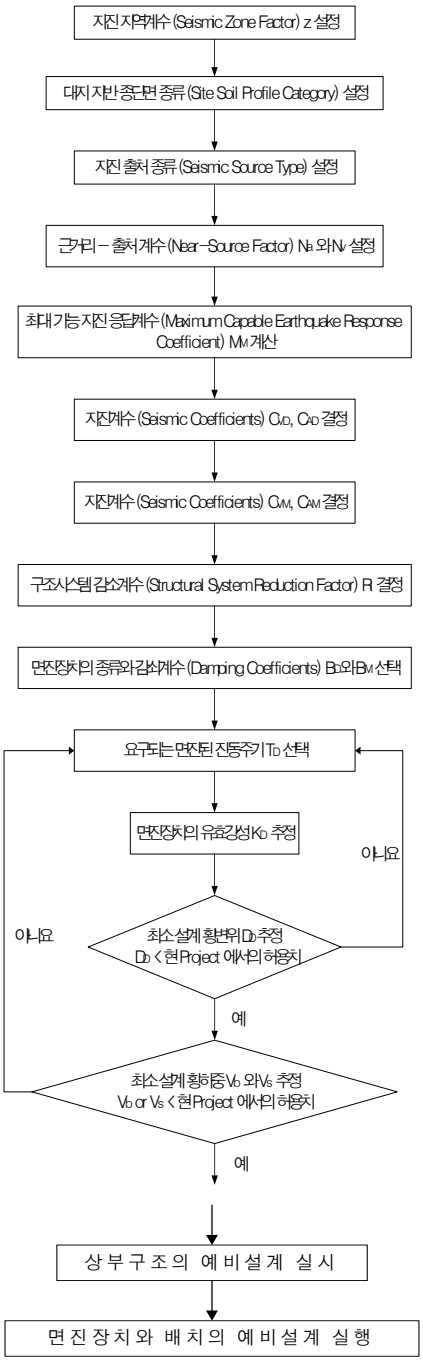


그림 3.2.1.12 일본의 면진구조 설계절차

② 미국



(a) 예비설계단계 (b) 최종설계단계

그림 3.2.1.13 미국의 면진구조 설계절차

나. 면진구조 설계용 성능스펙트럼 제시

(1) 에너지법에 의한 설계기법 개념

(가) 개요

현재 전 세계에서 주로 쓰이는 내진 설계 기법은 크게 정적 진도법, 수정 진도법, 동적 해석법으로 나눌 수 있으며, 이들은 모두 가속도를 하중효과로 평가하고 있다. 그러나 지진을 가속도에 의한 하중효과만으로 평가한 경우 지진 가속도의 불확정성이 매우 크며, 구조부재 또는 구조체의 소성변형 능력의 차이에 의한 영향을 직접적으로 비교하기에는 어려운 점이 있다.

현행의 내진 설계규준은 지반가속도를 하중효과로 취급하여 계산한 탄성 설계응답을 반응수정계수 R로 나누어서 골조의 소성 변형 능력에 따라 설계 지진하중을 낮출 수 있도록 설정되어 있다. 하지만 현행 내진 설계규준에서 사용하고 있는 반응수정계수 R의 값의 산정방법에는 다음과 같은 문제점이 있다.

① 건물의 높이, 평면형태, 구조의 배치와는 무관하고 주어진 구조형식이 동일하면 같은 값을 사용한다는 것은 부적합하다.
② 특정한 변위연성비를 사용하여 탄성 설계강도 스펙트럼을 비탄성 설계강도 스펙트럼으로 균등하게 감소시킬 수 없으므로 반응수정계수는 주기에 종속적인 값으로 표현되어야 한다.
③ 구조물의 실제 보유내력이 반응수정계수를 구성하는 핵심요소이므로 반응수정계수는 지진구역에 종속적이며, 연직하중에 대한 지진하중의 비율에 따라 상당한 영향을 받게 된다.
④ 반응수정계수는 감쇠비, 초과 강도의 영향, 구조물의 주기, 지반조건, 에너지 흡수능력을 고려해야 한다.
⑤ 각각의 구조시스템에 따라 보유하고 있는 연성능력이 다르므로 반응수정계수는 시스템의 연성능력을 고려할 수 있도록 조정되어야 한다.
⑥ 현재의 기준에서처럼 모든 구조형식에 대하여 동일한 수준의 안전성을 보장하기 힘들다.

그리고 구조물의 지진에 대한 안전성(내진성)을 향상시키기 위해서는 구조물의 보유내력을 증가시키는 방법과 함께 구조물의 연성능력을 증가시키는 방법, 즉 구조물의 에너지 흡수능력을 향상시키는 방법을 사용하고 있다. 즉 지진에 대한 안전성은 에너지로써 평가하고 있으며, 현재 우리나라에서 구조물의 안전성 평가를 위한 연구는 진행되고 있으나 아직 지진에 의한 입력에너지의 명확한 판단기준은 없다. 따라서 구조물의 요구소성변형 능력을 정량적으로 평가하기 위해서는 지진력을 에너지로 평가할 수 있는 스펙트럼을 제시할 필요가 있다.

한편 지진을 하중과 변형의 곱이라 할 수 있는 에너지로 평가한 경우, 秋山은 많은 탄소성 응답해석 결과에 의해 지진에 의한 입력에너지는 건물의 총 질량과 1차 고유주기에만 지배되며 구조물의 강도나 질량분포, 복원력 특성, 그리고 구조물의 강도분포 및 강성분포에는 거의 영향을 받지 않는 매우 안정된 양임을 명확히 했다. 또한 다자유도계에 입력되는 에너지는 총 질량과 1차 고유주기가 같은 단자유도계에 입력되는 에너지와 같음을 증명했다. 그리고 총 에너지 입력은 에너지 등가 속도(V_E)로 나타내는 것이 가능하며, 에너지 등가 속도의 주기특성은 단주기 영역에서는 주기에 비례해 확대되고, 장주기 영역에서는 주기에 관계없이 거의 일정한 bi-linear형으로 표현됨을 알아냈다. 따라서 최근에는 지진에 의한 영향을 단순한 하중효과만이 아닌, 하중과 그에 의한 변형의 곱인 에너지를 비교하는 방법에 의한 내진 설계법이 적용되기 시작하였다.

내진 설계용 스펙트럼은 내진 설계 자체의 복잡성을 고려할 때, 그리고 지진의 불확정성을 고려한다면 약간의 과대평가가 되더라도 가능한 한 간단한 형태를 갖도록 정하는 것이 바람직하다. 따라서 불확정성이 매우 큰 지진입력을 평가하는데 있어 가속도보다 에너지로써 평가하는 것이 구조물의 강도분포, 강성분포, 질량분포, 복원력 특성 등에 영향을 거의 받지 않는다는 것이 이미 증명되었기 때문에 에너지를 이용한 지진입력의 평가가 필요하다. 일본의 경우, 秋山은 강진기록을 이용하여 그림 3.2.1.14와 같이 지반 종별에 따라 에너지로 평가할 수 있는 스펙트럼을 제시하였다.

그림 3.2.1.14에서 가로축은 고유주기이고, 세로축은 손상에 기여하는 에너지 V_D(탄성 진동에너지+누적 소성 휨에너지)로 에너지 등가 속도(V_E)에서 감쇠에 의해 흡수되는 에너지를 뺀 값이다. V_E와 V_D의 관계는 식(3.2.1.8)과 같다.

$$V_D = \frac{V_E}{1+3h+1.2\sqrt{h}} \quad (3.2.1.8)$$

여기서, h : 감쇠비

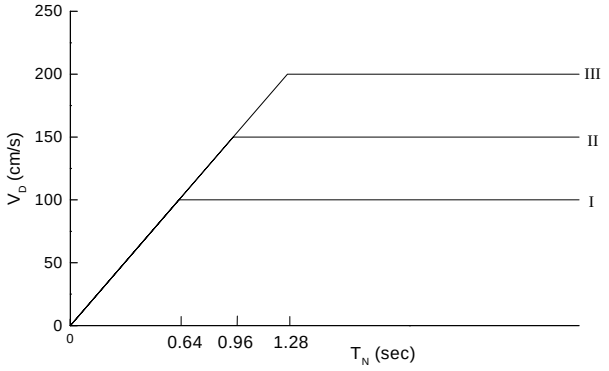


그림 3.2.1.14 일본 기준법의 에너지 스펙트럼

이 스펙트럼은 우리나라와 같이 강진보다는 중진, 약진의 발생 가능성이 높은 경우에는 과대평가 되어 비경제적인 설계가 될 가능성이 높기 때문에 우리나라의 실정에 맞는 설계용 에너지 등가 속도 스펙트럼을 제시할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 많은 지진 데이터를 비교·분석함으로써 주로 중진, 약진의 지진에 대해 지진에 의한 구조물에의 입력에너지의 특성을 평가하고, 에너지론에 근거한 내진 설계에 이용할 수 있는 설계용 에너지 등가 속도 스펙트럼을 제안하고자 한다.

(2) 에너지 입력의 개념

에너지론에 기초를 둔 내진 설계에서는 식(3.2.1.9)와 같이 지진 등의 외부활동에 의해 입력된 에너지보다 골조의 각 부재의 에너지 흡수능력이 상회하도록 설계하여 골조의 내진성을 확보할 수 있다. 그러기 위해서는 지진동에 의한 입력에너지의 특성과 구조물의 에너지 흡수능력을 정량적으로 평가할 필요성이 있다.

$$E_P \rangle E_T \quad (3.2.1.9)$$

E_P : 구조물 전체가 흡수할 수 있는 에너지

E_T : 지진에 의한 총 입력에너지

지반가속도를 하중효과로 취급하는 경우 지반가속도가 커지게 되면 구조물에 작용하는 하중이 커지게 된다. 그러나 지진에 의해 구조물에 입력되는 에너지량도 지진의 지반가속도에만 의존하는 양인지에 대해서는 검증이 필요하다.

본 연구에서는 지진에 의해 구조물에 입력되는 누적에너지의 평가를 위해 먼저 최대지반가속도와 지진동 특성이 다른 많은 지진데이터의 가속도 응답스펙트럼, 속도 응답스펙트럼, 변이 응답스펙트럼과 에너지 등가 속도 스펙트럼(V_E 스펙트럼)을 비교・분석하였다. 그리고 주로 중진, 약진의 지진에 대해 지진에 의한 구조물에의 입력에너지의 특성을 평가하여, 에너지론에 근거한 우리나라의 내진 설계에 이용할 수 있는 설계용 에너지 등가 속도(V_E) 스펙트럼을 제안하였다.

단자유도계에서의 진동방정식은 다음과 같다.

$$M\ddot{y} + C\dot{y} + F(y) = F_e \qquad (3.2.1.10)$$

M : 질량

$C\dot{y}$: 감쇠력

$F(y)$: 복원력(= ky)

F_e : 지진력(= $-M\ddot{y}_o$, $\ddot{y}_o$: 지진가속도)

식(3.2.1.10)의 양변에 $dy = \dot{y}dt$를 곱하여 지진 지속시간(t_o)에 대하여 적분하면 식(3.2.1.11)이 얻어진다.

$$M\int_0^{t_o}\ddot{y}\,\dot{y}\,dt + C\int_0^{t_o}\dot{y}^2dt + \int_0^{t_o}F(y)\,\dot{y}dt = \int_0^{t_o}F_e\dot{y}dt \qquad (3.2.1.11)$$

식(3.2.1.11)의 우변은 지진력(F_e)×변위로 지진동에 의한 총 입력 에너지가 된다. 또한 에너지 E는 물리적으로 다음 식에 의해서도 구할 수 있다.

$$E = \frac{1}{2}M\,V_E^2 \qquad (3.2.1.12)$$

여기서 V_E는 속도의 차원을 갖는 양으로 에너지 등가 속도이며 식(3.2.1.12)에 의해 다음 식으로 표현된다.

$$V_E = \sqrt{\frac{2E}{M}} \tag{3.2.1.13}$$

식(3.2.1.13)은 에너지 등가속도 V_E가 구조물의 규모에 의존하지 않는 형태로서 총 에너지 입력 E와 총 질량 M으로만 표현된다는 것을 의미하고 있다. 따라서 여러 가지 지진들의 V_E를 분석함으로써 지진에 의해 구조물에 입력되는 총 에너지량에 대한 평가가 가능하다.

(2) 설계용 에너지스펙트럼 제시

(가) 해석방법

① 지진기록의 선택

누적에너지 E(T)의 크기는 지진동의 기록길이에 의존하므로 충분한 기록길이를 갖는 지진기록이 아니면 지진에너지 입력을 정확히 평가하기 어렵다. 따라서 식(3.2.1.10)과 같이 지진가속도 기록을 직접 적분하여 사용하는 시간 이력 해석법이 신뢰를 가지기 위해서는 적절한 지진기록이 필요하다. 또한 우리나라에 맞는 에너지 스펙트럼을 제안하기 위해서는 우리나라의 지진기록을 사용하는 것이 원칙이나 현재 우리나라는 적절한 지반운동의 기록사항이 없기 때문에, 본 연구에서 사용된 실제의 지진기록은 대부분 USDC(United State Department of Commerce)의 CD-ROM으로부터 얻은 데이터로 p파 초기부터 s파, 표면파까지의 충분한 기록길이를 가진 것이며 지진기록은 보정된 것만을 사용하였다.

② 지진기록의 범위와 분류

에너지 등가 속도 스펙트럼(이하, V_E 스펙트럼이라고 한다.)의 특성을 검토하기 위해 지진기록을 지반 조건과 최대지반가속도로 분류하였다.

지진기록을 지반 조건별로 분류하여 찾기 위하여 SMCAT (Strong Motion

Data Catalog)라는 프로그램을 이용하였으며, 지진기록을 얻은 USDC CD-ROM에서 분류하고 있는 지반종별은 표 3.2.1.8과 같다. 이 분류는 KBC 2005 및 IBC 2000에서 분류한 지반종별을 사용하였다.

그리고 사용된 지진파를 각각의 지반에 대해 지진의 크기에 따른 특성을 알아보기 위해 최대지반가속도를 일본 기상청 기준(JMA)에 따라 분류하였다. 본 연구에서 사용한 규모 3.8~8.1 사이에 있는 101개의 지진파의 분류는 표 3.2.1.9와 같다. 단, SE지반에 대해서는 신뢰성이 높은 지진데이터 기록이 거의 없었기 때문에 SA~SD지반에 대한 지진기록을 주로 사용하였다.

지진이 많은 나라에서는 주로 강진 이상의 지진기록을 사용하는데 우리나라의 경우는 현재까지의 상황으로 보아 매우 강한 지진보다는 중진 및 약진이 적용이 더욱 신뢰성과 경제성을 갖는다. 중진 및 약진의 지진특성은 강진의 지진 특성과 다른 경우가 많으므로 본 연구에서는 약진에서 격진까지의 지진기록에 대해 분석하였다.

표 3.2.1.8 지반의 분류

지반 종류	지반종류의 호칭	상부 30m에 대한 평균지반특성		
		전단파속도 (m/s)	표준관입시험 $\overline{N}$(타격횟수/300mm)	비배수전단강도 $\overline{s_u}(\times 10^{-3} N/mm^2)$
S_A	경암지반	1500초과	-	-
S_B	보통암지반	760에서 1500	-	-
S_C	매우조밀한 지반 또는 연암지반	360에서 760	>50	>100
S_D	단단한 토사지반	180에서 360	15에서 50	50에서 100
S_E	연약한 토사지반	180미만	<15	<50

표 3.2.1.9 해석에 이용된 지진파의 분류

지반종별	최대지반가속도(gal)	데이터의 개수	계
S_A	1.약진(8.0~25) 2.중진(25~80) 3.강진(80~250) 4.열진(250~400) 5.격진(400이상)	 3 5 2	10
S_B	1.약진(8.0~25) 2.중진(25~80) 3.강진(80~250) 4.열진(250~400) 5.격진(400이상)	4 5 15 3 6	33
S_C	1.약진(8.0~25) 2.중진(25~80) 3.강진(80~250) 4.열진(250~400) 5.격진(400이상)	2 6 22 6 8	44
S_D	1.약진(8.0~25) 2.중진(25~80) 3.강진(80~250) 4.열진(250~400) 5.격진(400이상)	 2 4 2 8	14
S_E	1.약진(8.0~25) 2.중진(25~80) 3.강진(80~250) 4.열진(250~400) 5.격진(400이상)		

③ 해석 방법

본 연구에서 사용한 응답 스펙트럼은 Newmark의 선형 가속도법(linear acceleration method)을 이용하여 해석한 결과이며, 지진가속도에 의한 총 입력에너지의 양 E(T)는 지진 지속시간에 대해서 식(3.2.1.11)의 우변 $\int_0^{t_o} -M\ddot{y}_0\dot{y}dt$ 에 의해 구하였다. V_E 값은 각각의 고유주기에 대해 식(3.2.1.13)을 사용하여 계산한 값이다. 여기서 질량 $M = 1$로 하였으며 적분시간 간격은 주어진 지진데이터의 입력시간 간격을 그대로 사용하였다.

또한 101개의 지진데이터들 원래의 지진파에 가속도 배율을 곱하여 PGA가

0.143g가 되게 한 후 각각의 지진파에 대해서도 가속도 스펙트럼, 속도 스펙트럼, 변위 스펙트럼과 V_E 스펙트럼을 지반 조건별로 비교·분석하였다.

(나) 응답스펙트럼

① PGA와 지진 입력 에너지

PGA와 지진에 의한 입력 에너지의 양을 비교해 보기 위해 같은 지반종별(S1)에서 PGA와 지진파의 형태가 다른 두 지진파의 V_E 스펙트럼을 비교하여 그림 3.2.1.15에 나타냈다.

가로축은 고유주기를 나타내며 세로축은 각각의 고유주기에서의 V_E값이다. 두 지진파 모두 중진으로 굵은 실선은 규모 6.0, PGA 95.3Gal의 Solomon Island(1981년) 지진파이고, 가는 실선은 규모 6.1, PGA가 66.1Gal인 Mammoth Lakes(1980년) 지진파이다.

그림 3.2.1.15에서 보면 Mammoth Lakes지진파는 Solomon Island 지진파보다 PGA는 작지만, 구조물에 입력되는 에너지는 대부분의 고유주기에 대하여 크게 나타나고 있다. 예를 들면 고유주기가 1.0초인 경우 Mammoth Lakes 지진파에 의한 V_E는 14.8cm/s 인 반면 Solomon Island 지진파에 의한 V_E는 2.4cm/s이다. 따라서 지진동의 PGA와 에너지 입력양은 반드시 비례하는 관계라고는 할 수 없다.

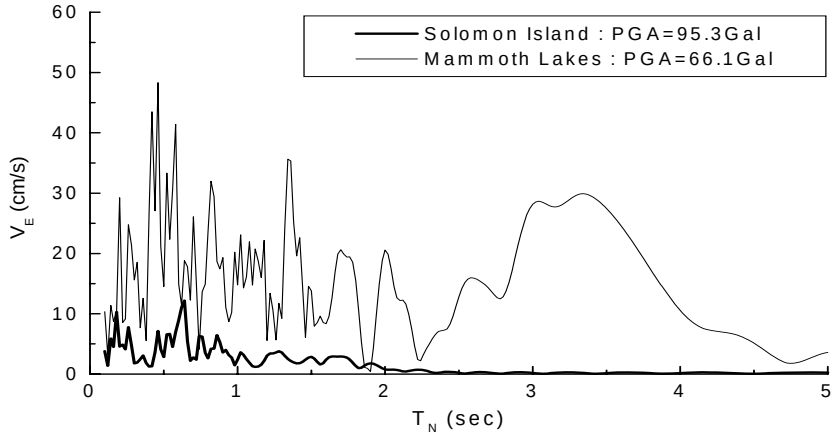


그림 3.2.1.15 PGA가 다른 지진파의 입력 에너지 비교

② 효고현 남부지진과 대만 集集지진의 응답 스펙트럼의 비교

그림 3.2.1.16~그림 3.2.1.19는 효고현 남부지진(1995년)과 대만 集集지진(1999년)의 비교를 위한 응답 스펙트럼이다. 효고현 남부 지진의 경우는 海洋氣象臺에서 측정한 NS파를 사용하였으며 集集지진의 경우 대만 중앙 기상국 지진보고에서 공개된 기록파(TCU129) EW파를 사용하였다. 두 지진 모두 가속도가 매우 큰 격진으로 지진에 의한 피해가 컸다. 대만 集集지진의 PGA는 981Gal로 효고현 남부지진의 PGA 818Gal보다 크다. 그러나 集集지진에 의한 건축물의 피해는 효고현 남부지진에 비하여 훨씬 적었다. 따라서 두 지진의 가속도 스펙트럼, 속도 스펙트럼, 변위 스펙트럼 그리고 V_E 스펙트럼을 비교해 보았다.

그림에서 가로축은 건물의 고유주기를 나타내며 세로축은 각각의 고유주기에 대한 변위 응답의 최대치, 속도 응답의 최대치, 가속도 응답의 최대치 그리고 총 에너지 등가 속도의 값이다. 각각의 경우에 감쇠비를 0, 10%, 20%로 주었다.

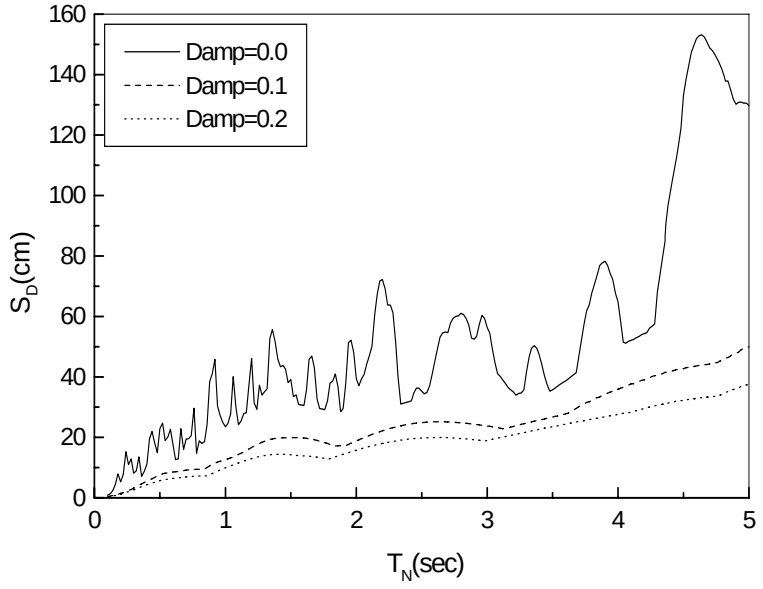
그림 3.2.1.16의 변위 응답스펙트럼은 주기 2초 이하에서는 효고현 남부지진에 의한 응답량이 더 크게 나타나고, 주기 4초 이상에서는 集集지진에 의한 응답량이 더 크게 나타난다.

그림 3.2.1.17의 속도 응답스펙트럼을 보면 변위 응답스펙트럼과 마찬가지로 주기 2초 이하에서는 효고현 남부지진에 의한 속도응답이 더 크지만 주기 2초 이상에서는 集集지진에 의한 속도응답이 효고현 남부지진의 속도응답과 비슷하거나 약간 크게 나타난다.

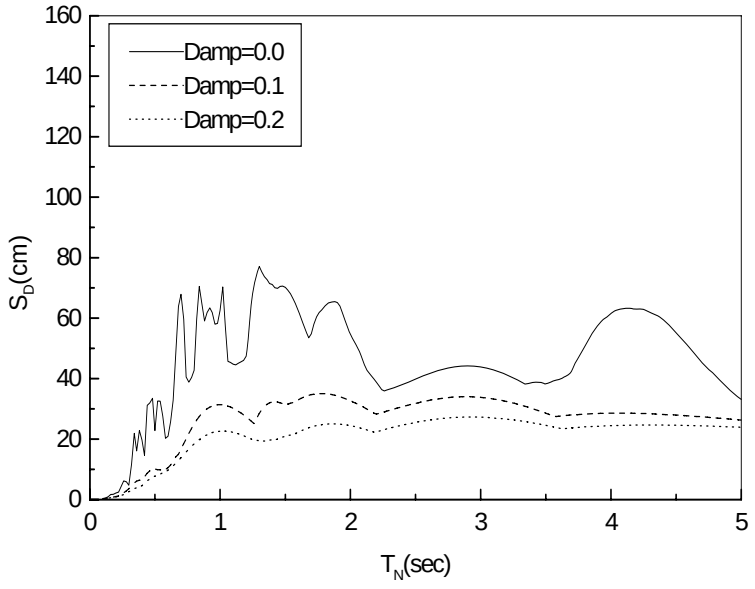
그림 3.2.1.18의 가속도 응답스펙트럼을 비교해 보면 전반적으로 集集지진에 의한 응답량이 더 크게 나타난다. 그러나 지진동에 의한 입력에너지의 판단인 그림 3.2.1.19의 V_E 스펙트럼을 보면 가속도응답스펙트럼과 달리 전반적으로 효고현 남부지진에 의한 에너지 입력이 더 크게 나타난다. 즉 지진의 PGA와 그 응답가속도가 커진다고 해서 반드시 지진에 의한 에너지 입력이 커진다고는 할 수 없다. 이점이 集集지진의 지반가속도는 효고현 남부지진에 비해 더 컸지만 集集지진에 의한 피해가 효고현 남부지진에 비해 적었던 이유 중에 하나라고 생각할 수 있다. 따라서 지진하중을 가속도로 보는 현행의 설계법을 재검토해 볼 필요성이 있다고 할 수 있다.

그리고 감쇠계수에 대해서는 변위, 속도, 가속도 응답은 감쇠비가 커지면 응답

량이 감소하였으나, V_E 값은 감쇠비가 커질수록 다른 응답치처럼 감소하는 것이 아니라 주기에 따라 평활화하는 경향을 보이고 있다.

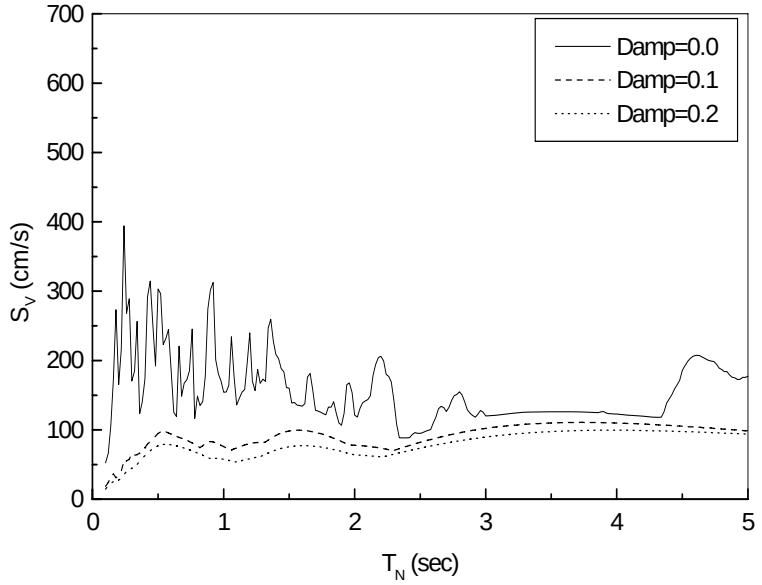


(a) 대만集集지진(1999년,EW)

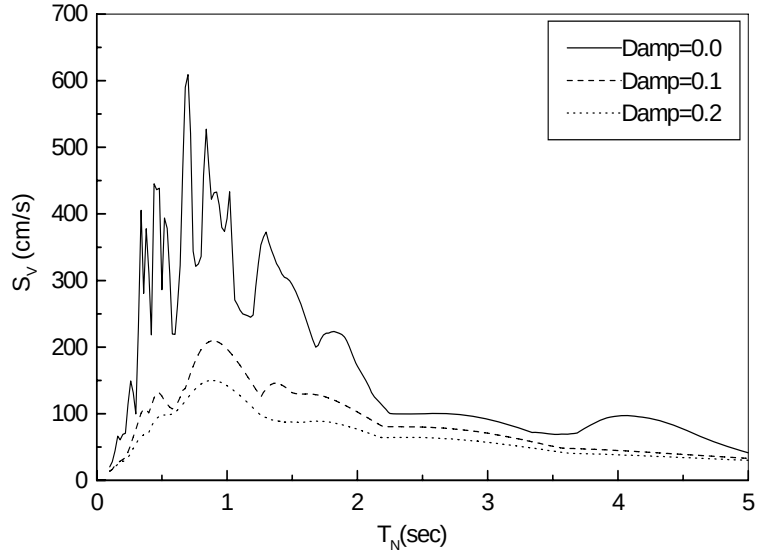


(b) 일본 효고현 남부지진(1995년, NS)

그림 3.2.1.16 변위 응답스펙트럼의 비교

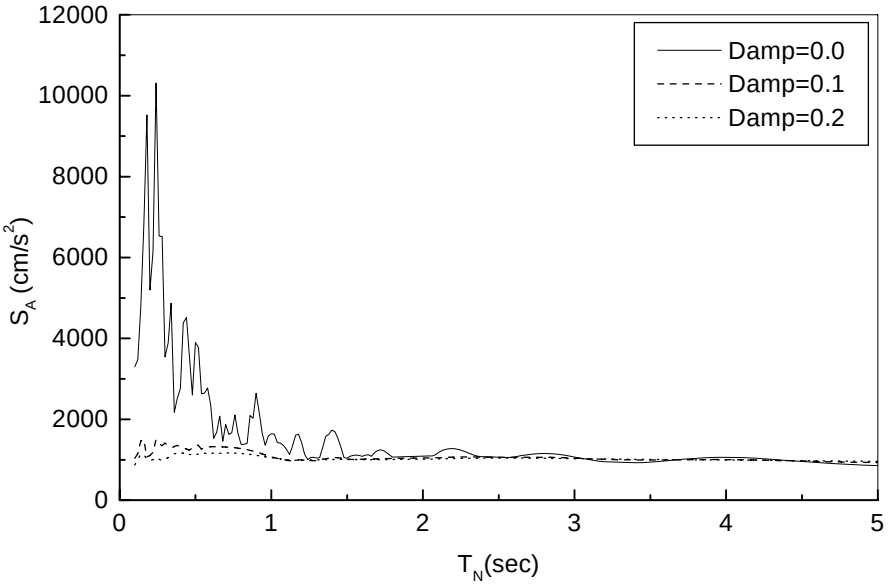


(a) 대만 集集지진(1999년, EW)

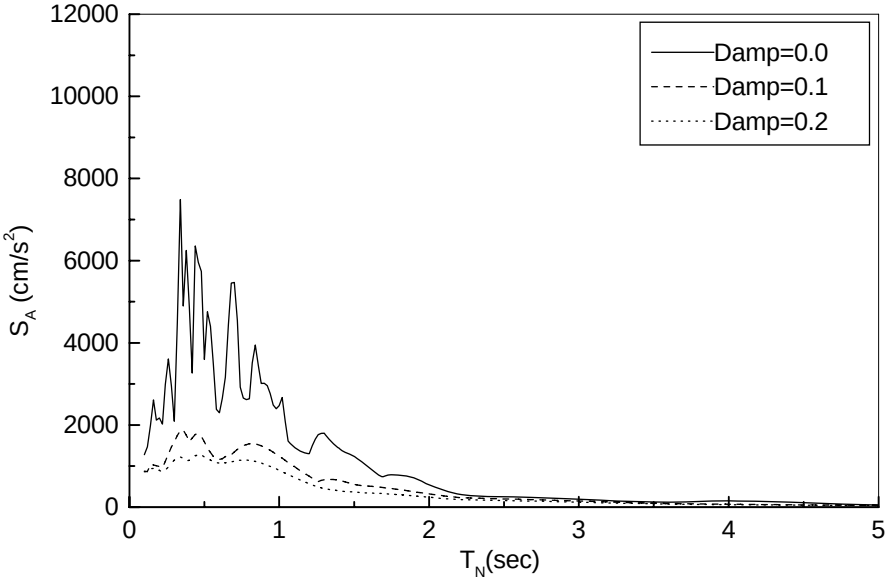


(b) 일본 효고현 남부지진(1995년, NS)

그림 3.2.1.17 속도 응답스펙트럼의 비교

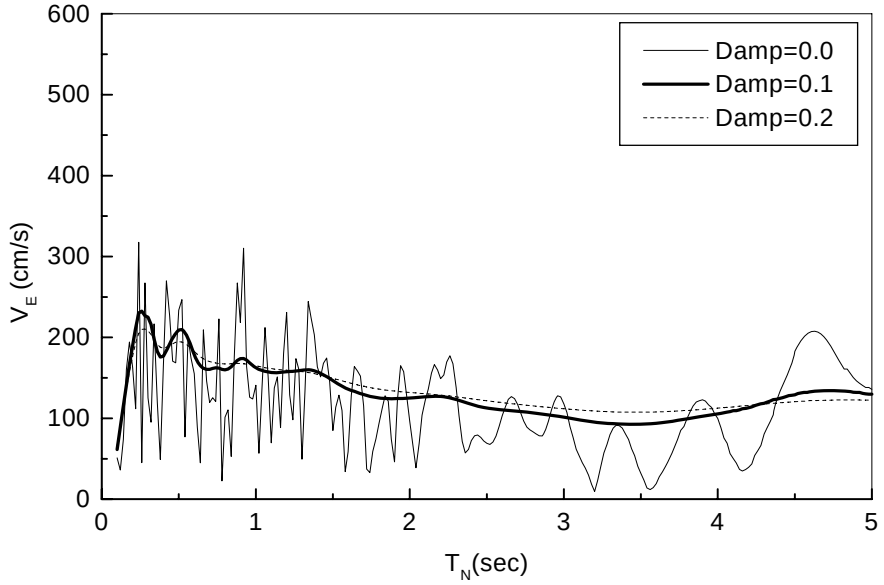


(a) 대만 集集지진(1999년, EW)

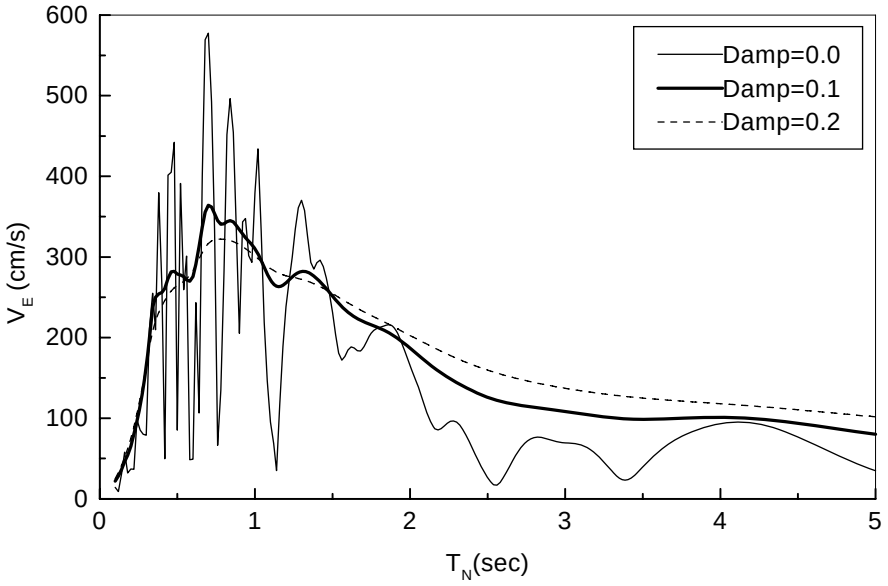


(b) 일본 효고현 남부지진(1995년, NS)

그림 3.2.1.18 가속도 응답스펙트럼의 비교



(a) 대만 集集지진(1999년, EW)



(b) 일본 효고현 남부지진(1995년, NS)

그림 3.2.1.19 에너지 등가 속도 스펙트럼의 비교

(다) 지반별 V_E 스펙트럼의 제안

각각의 지반 종별에 대해 각 주기별로 지진에 의해 입력되는 에너지의 양이 어느 정도인지를 정량적으로 평가하고, 우리나라의 내진 설계에 적용될 수 있는 에너지 등가 속도 스펙트럼을 정식화하기 위해, PGA를 0.143g로 조정한 지진 데이터에 대해 감쇠비 10%를 갖도록 탄성 해석한 V_E 스펙트럼을 지반 종별로 분류하였다. 그림 3.2.1.20 ~ 그림 3.2.1.23에서는 각 지반종별로 15~20개의 지진데이터를 선별하여 각 주기에 따른 에너지 등가속도 스펙트럼을 나타내었다.

최대지반가속도에 따른 V_E 스펙트럼의 경향을 파악하기 위해 약진은 이점쇄선으로 중진은 점선으로 강진, 격진은 실선으로 나타내었다. S_A, S_B, S_D의 경우를 잘 보면, 장주기 영역에서 강진의 경우에는 V_E가 전반적으로 낮은 값을 가지지만, 약진이나 중진인 경우에는 장주기 영역에서 오히려 높게 나타나는 경향이 있으므로 우리나라와 같이 강진보다 중진이나 약진의 가능성이 큰 경우에는 제시한 bi-linear 형태의 V_E 스펙트럼이 타당하다는 것을 알 수 있다. 그리고 지반 S_D의 경우는 매우 연약지반이므로 다른 지반에 비해 V_O를 크게 설정하였다.

그림 3.2.1.20 ~ 그림 3.2.1.23에서의 지반 종별에 따른 설계용 V_E 스펙트럼은 어느 정도 해석결과를 포락하고 있으므로 이를 최종적인 내진 설계용 스펙트럼으로 확정하였다.

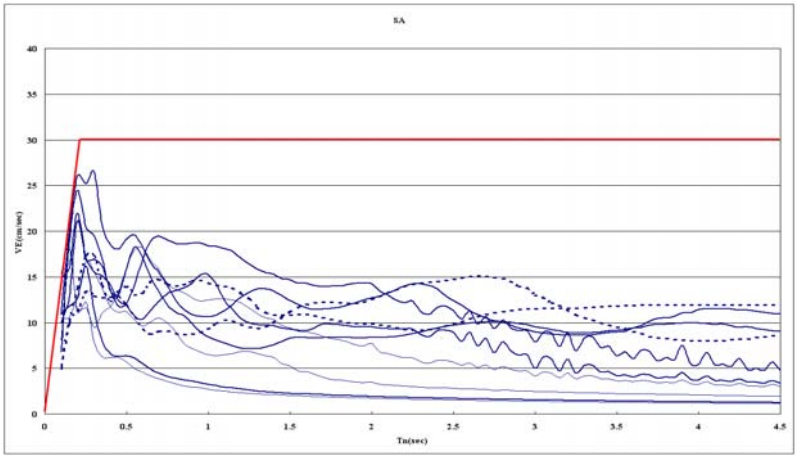


그림 3.2.1.20 내진 설계용V_E 스펙트럼(S_A지반)

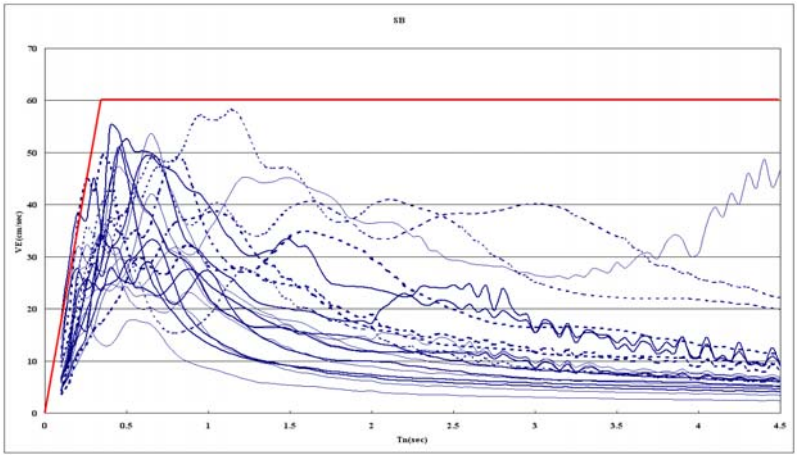


그림 3.2.1.21 내진 설계용 V_E 스펙트럼(S_B지반)

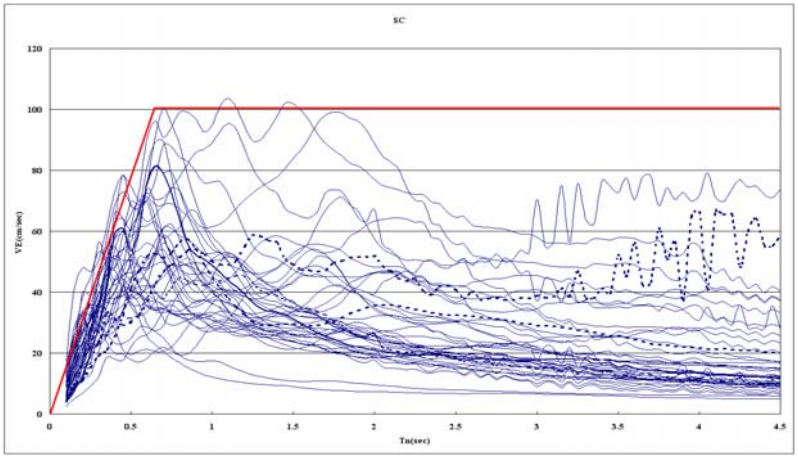


그림 3.2.1.22 내진 설계용 V_E 스펙트럼(S_C지반)

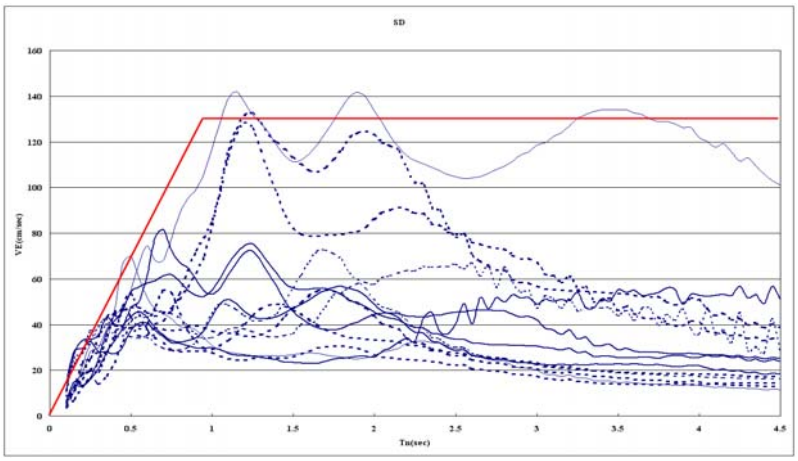


그림 3.2.1.23 내진 설계용 V_E 스펙트럼(S_D지반)

(라) 설계용 V_E 스펙트럼의 제안

본 연구에서 제안하는 V_E 스펙트럼을 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$T < T_G \qquad V_E = \frac{V_O}{T_G} T$$

$$T \geq T_G \qquad V_E = V_O \qquad (3.2.1.14)$$

본 연구에서 사용된 지진데이터를 사용하여 구한 T_G와 V_O의 값은 표 3.2.1.10과 같다.

표 3.2.1.10 지반 종별에 따른 내진 설계용 T_G 와 V_O

지반 종별	T_G(sec)	V_O(cm/s)
S_A	0.192	30
S_B	0.321	50
S_C	0.513	80
S_D	0.641	100
S_E	0.833	130

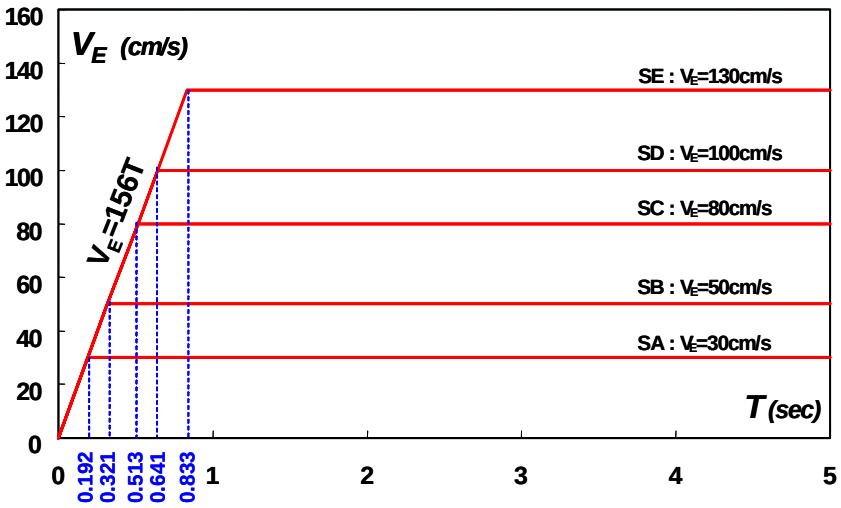


그림 3.2.1.24 지반종별 내진 설계용 V_E 스펙트럼

그림 3.2.1.24는 지반 종별에 따라 표 3.2.1.10을 기초로 그린 내진 설계용 스펙트럼으로 일반적으로 내진 설계용 V_E 스펙트럼은 건물의 중요도에 따라서 여기서 제안한 값보다 높이거나 낮출 수 있다.

(3) 면진구조시스템의 목표성능

면진구조는 강진 시에 건축물에 발생하는 수평변형과 지진에너지 흡수장치를 상부구조와 하부구조 사이에 설치된 면진층으로 집중시키는 것이 가능한 구조형식이다. 따라서 강진 시에는 면진층에 큰 수평변형이 발생하므로 면진이격거리가 필요하게 된다. 본 연구에서는 면진구조의 특징을 고려하여 강진 시에 있어서도 다음과 같이 설계목표성능을 설정하였다.

① 상부구조와 하부구조 및 기초, 말뚝은 탄성영역에 머물도록 한다.

② 면진장치는 안정된 거동을 하도록 선택한다.

③ 면진층에서는 상부구조와 하부구조와의 충돌 등이 발생하지 않도록 한다.

④ 면진층 주변의 설비와 비구조재는 원칙적으로 손상이 발생하지 않도록 한다.

⑤ 면진건축물이 소정의 목표 설계성능을 발휘할 수 있는 상태를 유지하기 위한 설계이격거리를 정하여 시공과 유지관리에도 적절한 배려를 한 설계를 하도록 한다.

(4) 에너지 흡수장치 성능에 따른 성능스펙트럼

면진층의 특성을 가정한 다음 예비응답해석과 포락해석법으로 댐퍼에 필요한 항복강도를 추정한다. 예비응답해석은 입력지진파의 진동특성에 의존한 결과가 얻어지므로 지진파의 진동특성에 의존하지 않는 포락해석법을 이용하는 것이 유효하다. 포락해석법은 그림 3.2.1.25와 같이 면진건물의 주기 T_f, 면진층의 전단력계수 α_1, 면진층최대변위 δ_{max}, 댐퍼의 항복전단력계수 α_s의 관계를 나타내

고 있다. 이 그래프에서 면진건물의 주기 T_f와 면진층의 최대변위 δ_{max}를 설정하면 면진층의 전단력계수 α_1을 최소로 하는 댐퍼의 항복전단력 α_s를 구할 수 있다.

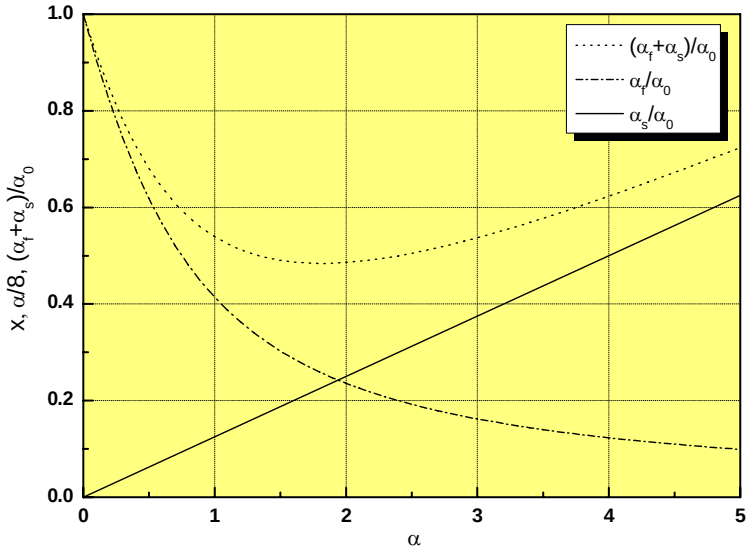


그림 3.2.1.25 댐퍼량과 응답저감율

S_D지반을 대상으로 한 등가속도 V_E=100cm/sec 정도에서 면진건물의 주기 T_f = 6.0 sec, 면진층 최대변위 200-300mm로 하면 댐퍼의 항복전단력계수는 α_s =0.02-0.03 정도의 값이 된다.

지진입력에너지와 흡수에너지의 평형을 생각하는 방법으로 면진층의 응답변위와 응답전단력계수분포를 예측하는 방법을 포락해석법이라고 한다. 포락해석법은 건물 기초에 면진장치와 댐퍼를 배치한 면진층으로 구성된 면진건물을 대상으로 한다. 면진구조 건물의 고유주기는 2초 이상에서 면진구조 전체에 흡수되는 에너지는 일정한 값을 나타내는 것으로 가정하고 지반 종류별로 설계용 에너지 속도 환산치 V_E를 이용하여 지진흡수에너지양을 설정한다.

설계용 에너지 속도환산치 V_E의 설정은 해당건축물의 대지에 과거 발생한 지진동 가운데 가장 강한 것으로 생각되는 것과 미래에 발생할 가능성이 있는 가

장강한 지진동을 예상하여 설정한다. V_E값의 설정은 설계의 목표와 건물의 중요도를 고려하여 적절히 설정할 필요가 있다. 포락해석법은 면진장치와 댐퍼만이 지진에너지를 흡수하고 상부구조는 지진에너지를 흡수하지 않는 것으로 가정하면, 이 경우의 에너지의 평형방정식은 다음과 같다.

$$W_e(t) + W_p(t) = E(t) \tag{3.2.1.15}$$

여기서, $W_e(t)$: 시각 t 까지의 면진장치의 탄성변형에너지

$W_p(t)$: 시각 t 까지의 댐퍼의 소비에너지

$E(t)$: 지진에 의한 입력에너지

식(1.15)는 면진층이 최대변형에 도달하는 시각 $t = tm$일 때도 성립한다. 일반적으로 소성화가 진행하게 되면 에너지입력은 증가하는 경향을 나타내고 지진종료시($t = t_0$)의 에너지입력량 $E(t0)$는 $E(tm) \leq E(t0)$가 된다.

따라서 식(3.2.1.15)에서 $t = tm$ 으로하여 면진층의 최대변형을 예측할 때 우변을 $E(t0)$으로 치환하면 안전한 측면에서 예측을 할 수 있다. 적층고무분리장치가 탄성, 댐퍼가 완전탄소성형의 복원력특성을 지니고 있는 경우 최대변형이 발생할때의 흡수에너지의 량은 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$W_e = \frac{1}{2} K_f \delta_{\max}^2 \tag{3.2.1.16}$$

$$W_p(tm) = {}_sQ_y \cdot {}_s\delta_p \tag{3.2.1.17}$$

여기서, K_f : 분리장치의 수평강성

$\delta_{\max}$: 면진층의 최대변위

${}_sQ_y$: 댐퍼의 항복전단력

${}_s\delta_p$: 댐퍼의누적소성변형량

누적소성변형량과 최대변형량의 관계는 다음식으로 정의 할 수 있다.

$$ {}_s\delta_p = \kappa (\delta_{ave} - {}_s\delta_y) \tag{3.2.1.18} $$

δ_{ave} : 정(+), 부(-)측 최대변형의 평균값

${}_s\delta_y$: 댐퍼의 항복변위

κ : 누적소성변형과 최대변형의 비율

정(+), 부(-)측 최대변형의 평균값 δ_{ave}에 비해 댐퍼의 항복변위 ${}_s\delta_y$가 아주 작고, 정(+), 부(-)측 최대변형의 평균값 δ_{ave}와 면진층의 최대변위 δ_{max}에 큰 차이가 없으면 식(3.2.1.18)는 ${}_s\delta_p = \kappa \delta_{max}$로 근사할 수 있다. 이 근사식과 식(3.2.1.16), 식(3.2.1.17)식을 식(3.2.1.15)에 대입하여 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$ K_f \delta^2_{max} + 2\kappa \, {}_sQ_y \delta_{max} - M V^2_E = 0 \tag{3.2.1.19} $$

식 (3.2.1.19)에서 ${}_sQ_y = \alpha_s Mg$를 고려하면 댐퍼의 항복전단력계수 α_s는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$ \alpha_s = \frac{{}_sQ_y}{Mg} + \frac{1}{2\kappa g}\left(\frac{V^2_E}{\delta_{max}} - \frac{4\pi^2 \delta_{max}}{T^2_f} \right) \tag{3.2.1.20} $$

또 적층고무 분리장치의 전단력계수 α_s가 $K_f = \frac{4\pi^2 M}{T^2_f}$인 것을 고려하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$ \alpha_f = \frac{K_f \delta_{max}}{Mg} = \frac{4\pi^2 \delta_{max}}{g T^2_f} \tag{3.21.21} $$

따라서 면진층의 전단력계수는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\alpha_1 = \alpha_f + \alpha_s = \frac{4\pi^2 \delta_{max}}{g T_f^2}\left(1 - \frac{1}{2\kappa}\right) + \frac{V_E^2}{2\kappa g \delta_{max}} = \frac{V_E^2}{g\delta_{max}} - (2\kappa - 1)\cdot\alpha_s \quad (3.2.1.22)$$

여기서, V_E : 지진에 의한 총에너지입력의 속도환산치

T_f : 적층고무분리장치만의 수평강성에 의한 고유주기

M : 상부구조의 총질량

g : 중력가속도

식(3.2.1.19)에서 면진층의 최대변형량 δ_{max}는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$\delta_{max} = \frac{\kappa g \alpha_s T_f^2}{4\pi^2}\left[-1 + \sqrt{\left(2\pi \frac{V_E}{\kappa g \alpha_s T_f}\right)^2 + 1}\right] \quad (3.2.1.23)$$

식(3.2.1.23)에 $\frac{4\pi^2}{g T_f^2}$를 곱하면 α_f가 되고, 여기에 α_s를 더하면 다음 식을 구할 수 있다.

$$\alpha_1 = \alpha_f + \alpha_s = \left(-\frac{7a}{8} + \sqrt{a^2 + 1}\right)\cdot\alpha_0 \quad (3.2.1.24)$$

여기서, $a = 8\left(\frac{\alpha_s}{\alpha_0}\right)$

$\alpha_0 = \frac{2\pi V_E}{T_f \cdot g}$

$\alpha_s = \frac{{}_sQ_y}{Mg}$: 댐퍼의 항복전단력계수

$\alpha_f = \frac{{}_sQ_{max}}{Mg}$: 분리장치의 최대전단력계수

${}_sQ_y$: 댐퍼의 항복전단력

${}_sQ_{max}$: 분리장치의 최대전단력

g : 중력가속도

T_f : 댐퍼가 없는 경우의 면진구조의 고유주기
(분리장치만의 고유주기)

이상과 같이 면진층의 응답은 T_f , α_s , V_E에 의해 파악할 수 있다는 것을 알 수 있다. 또 포락해석법의 예측정밀도는 계수 κ와 면진층이 최대변형이 될 때의 때의 에너지 입력량과 층에너지 입력량의 비에 의존한다.

우리나라의 설계지진력을 고려하여 설계용 에너지스펙트럼은 그림 1.24에 나타나 있다. 이 그림에서 지반종류별로 V_E=30, 50, 80, 100, 130cm/sec로 하고 있다. 그림 3.2.1.26~그림 3.2.1.30에 V_E=30, 50, 80, 100, 130cm/sec일 때의 α_1, δ_{max}의 관계를 식(3.2.1.22)으로 나타내었다. 또 계수 κ는 8을 이용하였다. 이것은 최대변형이 발생할 때까지 댐퍼가 최대변형에서 이력루프로 환산하여 2사이클에 해당하는 에너지흡수 한 것에 대응한다, 이 그래프에서 면진층의 전단력계수는 면진층에 대한 극소값을 가지는 함수가 된다.

면진층의 전단력계수의 최소값 α_{1min}은 다음 식과 같다.

$$\alpha_{1min} = \frac{\sqrt{(15)}\pi}{4g}\frac{V_E}{T_f} \tag{3.2.1.25}$$

$$\alpha_s^{opt} = \frac{7\pi}{4\sqrt{(15)}g}\frac{V_E}{T_f} \tag{3.2.1.26}$$

$$\alpha_f^{opt} = \frac{8\pi}{4\sqrt{(15)}g}\frac{V_E}{T_f} \tag{3.2.1.27}$$

$$\delta_{max}^{opt} = \frac{1}{2\sqrt{(15)}g}V_E T_f \tag{3.2.1.28}$$

면진층의 전단력계수가 최소가 될 때 댐퍼의 전단력계수와 분리장치의 전단력계수 및 최대변형량도 최적의 상태가 되며 다음식과 같이 구할 수 있다.

식(3.2.1.26)와 식(3.2.1.27)의 분리장치와 댐퍼의 비율 α_f/α_s가 약 8/7로 거의 동등하게 전단력을 부담하고 있을 때가 최적의 상태라는 것을 알 수 있다. 일반적으로 면진층의 변위는 T_f, V_E가 커질수록 커지게 된다.

이와 같이 포락해석법은 면진건축물의 입력과 응답의 관계를 쉽게 파악할 수 있다. 따라서 이것을 이용하면 면진건축물을 어느 정도의 레벨에 대하여 설계하고 있는가? 또는 설계되어 있는 면진건축물의 성능을 다음식과 같은 지표로 개

략적으로 파악할 수 있다.

$$V_E = \sqrt{g(2\kappa\alpha_s + \alpha_f)\delta_{max}} \qquad (3.2.1.29)$$

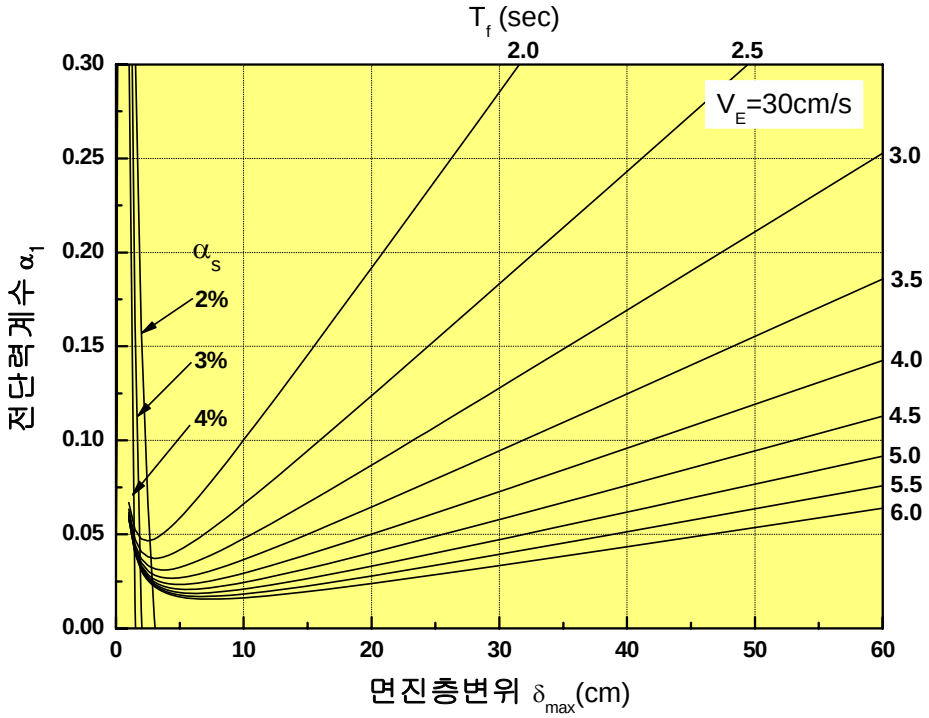


그림 3.2.1.26 전단력계수와 면진층 변위의 관계(V_E=30cm/sec)

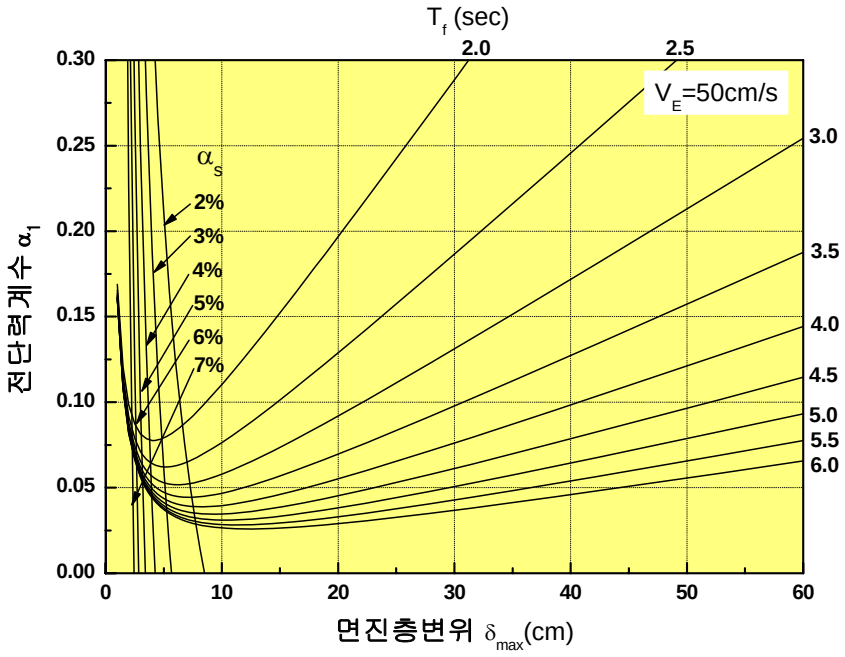


그림 3.2.1.27 전단력계수와 면진층 변위의 관계(V_E=50cm/sec)

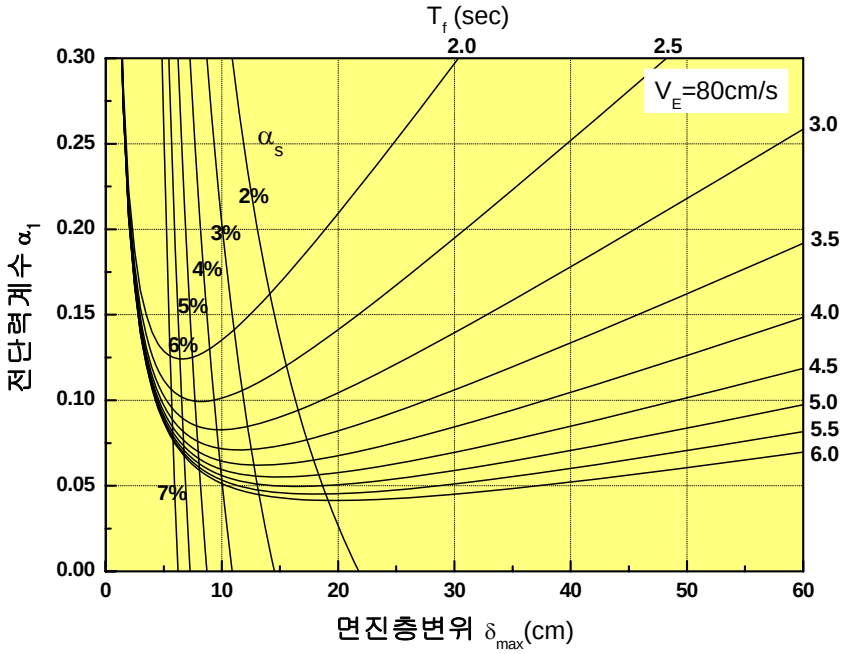


그림 3.2.1.28 전단력계수와 면진층 변위의 관계(V_E=80cm/sec)

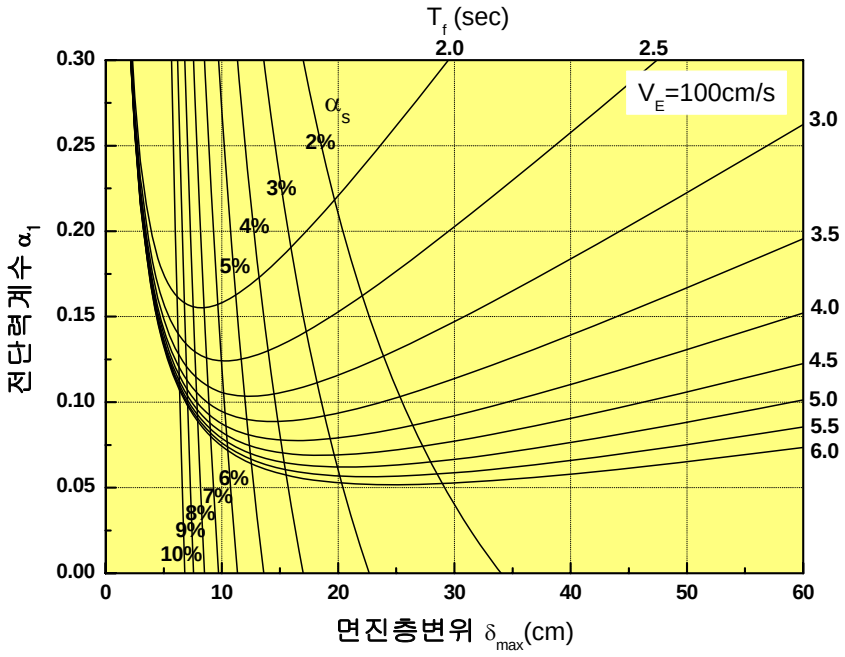


그림 3.2.1.29 전단력계수와 면진층 변위의 관계(V_E=100cm/sec)

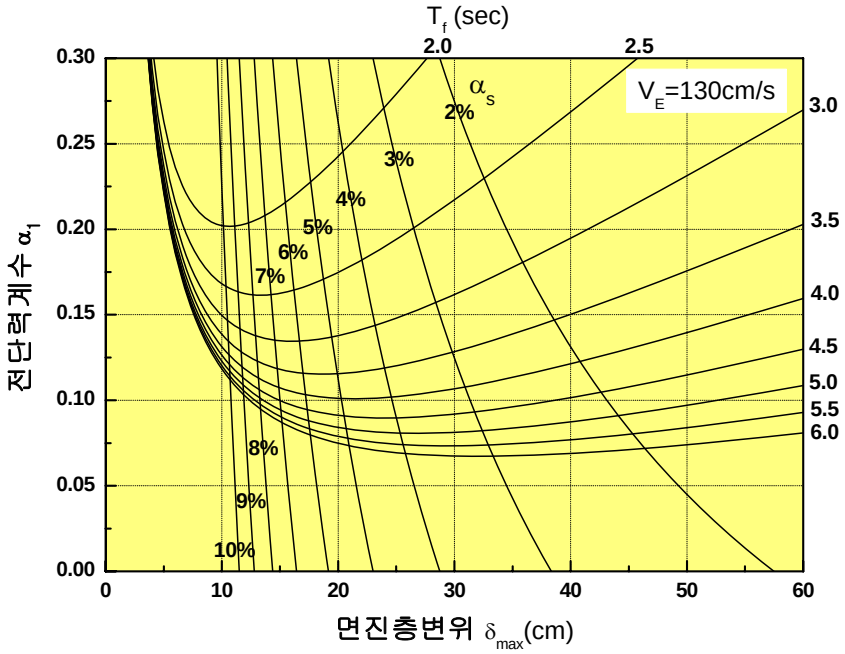


그림 3.2.1.30 전단력계수와 면진층 변위의 관계(V_E=130cm/sec)

다. 면진 구조시스템 개발방향 설정

(1) 면진구조의 적용을 위한 건물용도 분석

외국에서 건설된 면진구조시스템을 적용한 609건의 건물을 대상으로 하여 건물용도별로 분류하여 그림 3.2.1.31에 나타내었다. 공동주택의 적용이 가장 두드러지며 사무소 및 병원의 적용건수가 많은 것으로 파악되었다. 그러나 최근에는 연구소 및 전산센터 등에 대한 면진구조시스템의 적용실적이 꾸준히 증가하는 추세를 나타내고 있다.

그리고 그림 3.2.1.31의 결과를 이용하여 면진구조를 적용하기에 가장 적합한 용도를 선별하기 위하여 시장성과 내진성능을 향상시켜야 하는 중요도의 상관관계를 그림 3.2.1.32에 나타내었다. 여기서 시장성은 그림 3.2.1.31에서 나타낸 면진건축물의 적용건수를 바탕으로 상대점수를 부여하였고, 중요도는 크게 다음의 기준에 따라 설정하였다.

① 정밀기계가 많고 지진피해 시 사회적으로 영향을 크게 미치는 곳
② 공공건물 및 다중이용시설

그림 3.2.1.32에서 보는바와 같이 공동주택의 경우는 시장성 및 중요도가 매우 높게 나타났으며, 병원건축물은 중요도가 가장 높고 시장성도 어느 정도 확보된 것으로 판단된다. 반면에 전산센터 및 학교의 경우는 중요도는 높게 나타나나 시장성은 다소 낮게 나타났다. 사무실의 경우는 공동주택 다음으로 시장성은 높은 것으로 나타났으나 중요도가 낮게 평가되었다. 따라서 중약진 지역인 국내에서는 사무실은 공공성이 낮고 지진위험성이 크지 않은 점을 고려하면 면진구조를 채택해야 되는 필요성이 다소 낮은 것으로 나타났다.

이상의 결과를 종합하면, 공동주택은 병원 및 전산센터 등에 비해 중요도는 다소 떨어지나 시장성이 매우 높은 것으로 나타나 향후 면진구조설계기술을 적용해야 될 1차 목표시장(Target market)으로 설정하는 것이 타당하다고 판단된다. 또한 전산센터 및 병원건축물은 현재 공동주택보다는 다소 시장성은 떨어지나 향후 시장규모의 확장가능성이 가장 크고 중요도가 매우 높은 것으로 판단되

어 2차 목표시장(Target market)으로 설정하였다.

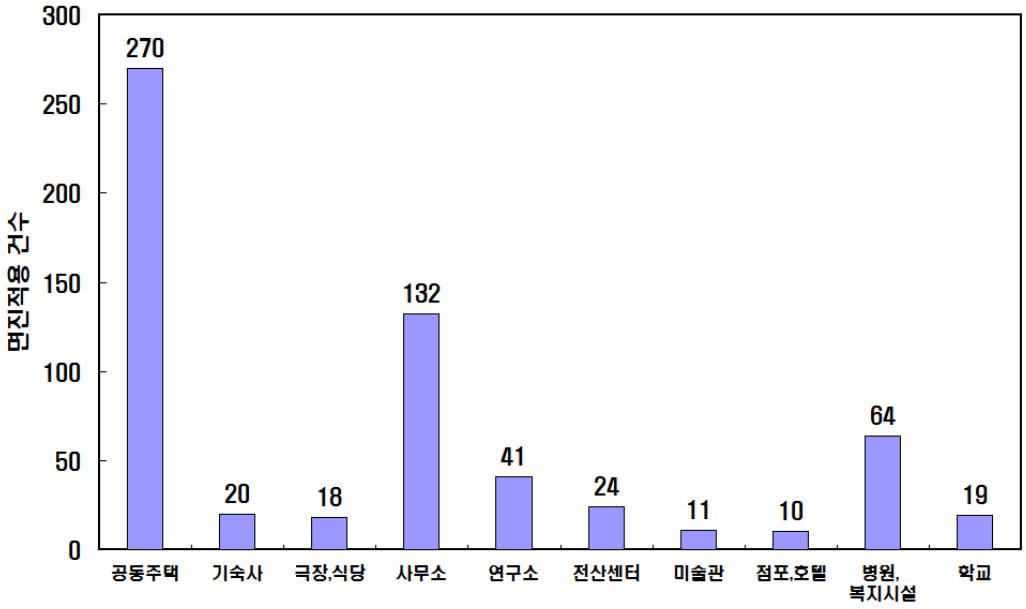


그림 3.2.1.31 건물용도별 면진장치 적용 건수

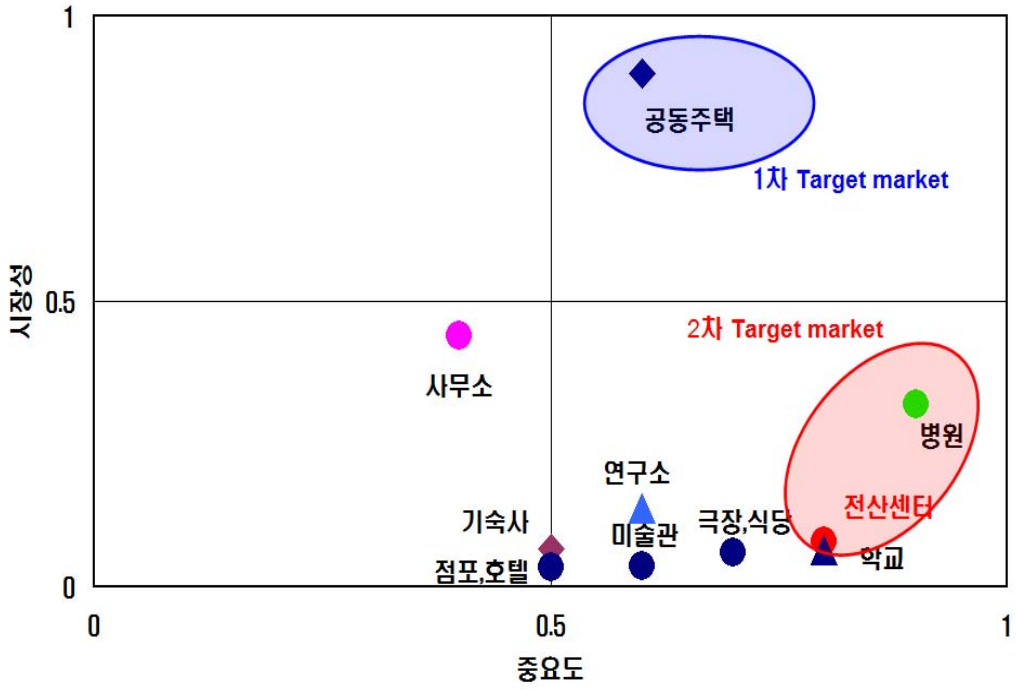


그림 3.2.1.32 면진구조의 시장성과 중요도의 상관성

(2) 면진층 및 상부구조설계 방향설정

적층고무면진장치의 압축력에 의한 축방향 강성에 비하여 인장력에 의한 축방향 강성은 아주 작다. 따라서 면진장치에 발생하는 인장반력은 작고 압축반력에 비하여 무시할 수 있다.

여기에서는 상부구조의 질량이 균등 분포로 면진장치가 균등배치 되어 있는 경우를 가정하면 상부구조는 강체로 생각할 수 있으므로 휨응력 분포는 수평력 Q 의 크기에 따라 그림 3.2.1.33에 나타낸 것과 같이 된다. 그림에서 σ_p 는 연직하중에 의한 응력이고, σ_v 는 상하지진동에 의한 응역이다. 면진장치에 인장력이 발생하는 한계 전도모멘트에 의한 응력은 $(\sigma_p \pm \sigma_v)$가 된다. 이 상태의 면진층의 전단력계수는 다음 값이 된다.

$$\alpha_p = \frac{1}{3}\left(1 \pm \frac{\sigma_v}{\sigma_p}\right)\left(\frac{B}{H}\right) \qquad (3.2.1.30)$$

여기서 B :상부구조의 폭

H :상부구조의 높이

δp :면진층의 최대수평변위

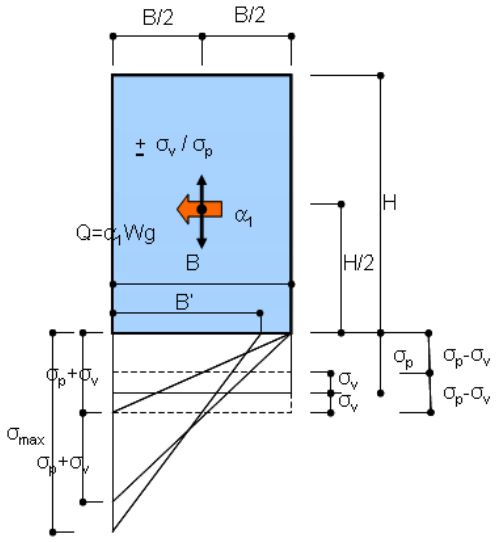


그림 3.2.1.33 휨응력 분포

또 이 판정식은 면진장치가 균등하게 배치된 경우이고, 양단부에 집중 배치한 경우에는 3배, 양단과 중앙의 3열에 배치한 경우에는 2배, 5열에 배치한 경우에

는 1.5배의 여유도를 얻을 수 있지만, 전도모멘트를 상부구조에서 증폭이 없는 것으로 하여 면진층의 전단력을 건물의 1/2의 높이에 걸쳐서 구하고 있는 것을 고려하여 (3.2.1.30)식은 약간안전측이지만 적절하게 평가할 수 있다고 판단된다.

위식의 α_p 는 다음 식으로 구할 수 있으며, 이를 이용하여 면진장치에 인장력이 발생하는 한계의 건물높이/폭비(H/B)와 건물주기 Tf, 최대변위 δ_p 의 관계를 알 수 있다.

$$\frac{\alpha_p}{\alpha_0} = \frac{1}{16}\left\{\left(\frac{\delta_0}{\delta_{max}}\right) + 15\left(\frac{\delta_{max}}{\delta_0}\right)\right\} \qquad (3.2.1.31)$$

다만, 연직진도에 관해서는 일본건축학회. 면진구조설계지침(1989)에서 추정하는 값 $K_V \geq 0.33$ 을 채용하여 $\sigma_v/\sigma_p = 1/3$, $(\sigma_p \pm \sigma_v) = 2/3\sigma_p$ 로 한다.

$$\frac{2B}{9H} = \frac{15\pi^2}{4g} \cdot \frac{\delta_p}{T_f^2} + \frac{V_E^2}{16g\delta_p}$$

$$\frac{H}{B} = \frac{32g}{9} \cdot \frac{T_f^2 \delta_p}{60\pi^2 \delta_p^2 + T_f^2 V_E^2} \qquad (3.2.1.32)$$

국내의 지진하중 크기를 고려하여 나타낸 그림 3.2.1.24의 에너지 등가속도(V_E =30cm/s, 50cm/s, 80cm/s, 100cm/s, 120cm/s)와 (3.2.1.31)식을 이용하여 나타낼 수 있는 한계건물높이/폭비(H/B)와 최대변위 δ_p 의관계를 건물주기 Tf를 변화시켜 그림 3.2.1.34~그림 3.2.1.38에 나타내었다.

또 위식의 α_p 는 (1.33)을 이용하여 구하고, 이를 이용하여 한계건물높이/폭비(H/B)와 평균면압 $\bar{\sigma}$,최대변위 δ_p 의 관계를 알 수 있다.

$$\alpha_p = \frac{V_E^2}{16g\delta_{max}} + \frac{15G \cdot S_2}{16\bar{\sigma}} \cdot \frac{\delta_{max}}{D} = \frac{V_E^2}{16g\delta_{max}} + \frac{75}{4\bar{\sigma}} \cdot \frac{\delta_{max}}{D} \qquad (3.2.1.33)$$

$$\frac{2B}{9H} = \frac{V_E^2}{16g\delta_p} + \frac{75}{4} \cdot \frac{\delta_p}{\bar{\sigma}D}$$

$$\frac{H}{B} = \frac{32g}{9} \cdot \frac{\bar{\sigma}D\delta_p}{300g\delta_p^2 + \bar{\sigma}DV_E^2} \qquad (3.2.1.34)$$

최외단의 면진장치의 압축 응력도를 σ_{max} 로 하면 σ_{max}/σ_p 와 α_1/α_p 와의 관계는 다음식과 같이 구할 수 있다.

$\alpha_1/\alpha_p < 1.0$

$$\frac{\alpha_1}{\alpha_p} = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_p \pm \sigma_v} - 1, \quad \frac{\sigma_{max}}{\sigma_p \pm \sigma_v} = \frac{\alpha_1}{\alpha_p} + 1 \tag{3.2.1.35}$$

$\alpha_1/\alpha_p \geq 1.0$

$$\frac{\alpha_1}{\alpha_p} = 3 - 4\frac{\sigma_p \pm \sigma_v}{\sigma_{max}}, \quad \frac{\sigma_{max}}{\sigma_p \pm \sigma_v} = \frac{4}{3 - (\alpha_1/\alpha_p)} \tag{3.2.1.36}$$

그림 3.2.1.33에 나타낸 압축반력이 발생하는 영역의 폭B는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{B'}{B} = \frac{2(\sigma_p \pm \sigma_v)}{\sigma_{max}} \tag{3.2.1.37}$$

그림 3.2.1.34~그림 3.2.1.38에서 보는바와 같이 V_E가 30cm/sec 및 50cm/sec 에서는 한계건물세장비가 주기 4초일 경우에 각각 약 10, 6을 나타내어 면진구조를 적용함에 있어서 큰 제약이 없음을 알 수 있다. 그러나 이 경우에는 입력에너지의 크기가 작기 때문에 면진구조적용의 필요성이 작은 것으로 판단된다. 따라서 S_A 지반 및 S_B지반에서는 면진구조를 적용할 필요성은 크게 대두되지 않고, 다만 미세한 진동까지 제어해야할 필요성이 있는 건물에 한해 그 필요성이 제기될 수 있다고 할 수 있다.

V_E가 80cm/sec 이상의 지반에서는 주기가 4초인 경우에 면진구조를 적용할 수 있는 한계건물세장비의 크기는 2~3.5를 나타내어 면진구조를 적용하기 위해서는 상당한 건물의 높이제한이 수반됨을 알 수 있다. 그러나 건물의 주기를 크게 하면 한계건물 세장비를 크게 할 수 있음을 알 수 있다. 따라서 층수가 높은 건물에 적용하기 위해서는 면진건축물의 주기를 크게 할 필요가 있고, 면진건물의 주기를 높이기 위해서는 면진장치가 받는 면압을 크게 할 필요성이 있다.

따라서 층수가 높은 건물에 대해 면진구조를 적용하기 위해서는 면진건축물의 주기를 크게 해야 하고 면진장치가 받는 면압을 크게 할 필요가 있기 때문에 중량이 작은 철골구조보다는 철근콘크리트구조를 사용하는 것이 그 효과가 더 클 것으로 판단된다.

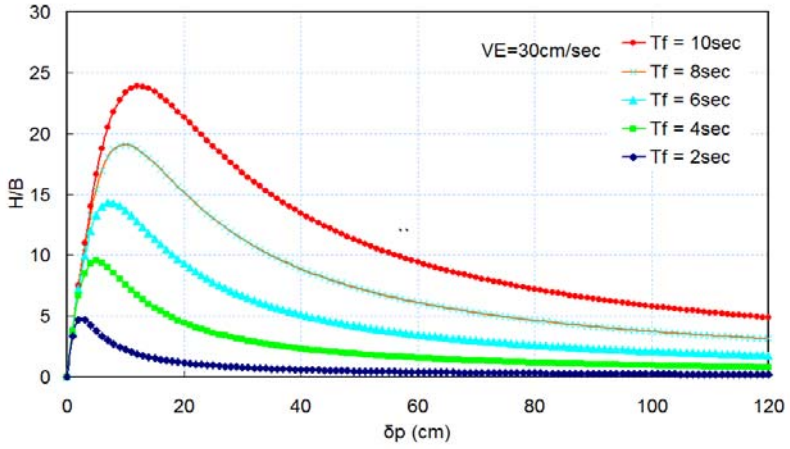


그림 3.2.1.34 한계건물높이/폭비(H/B)와 건물주기의 관계(V_E=30cm/sec)

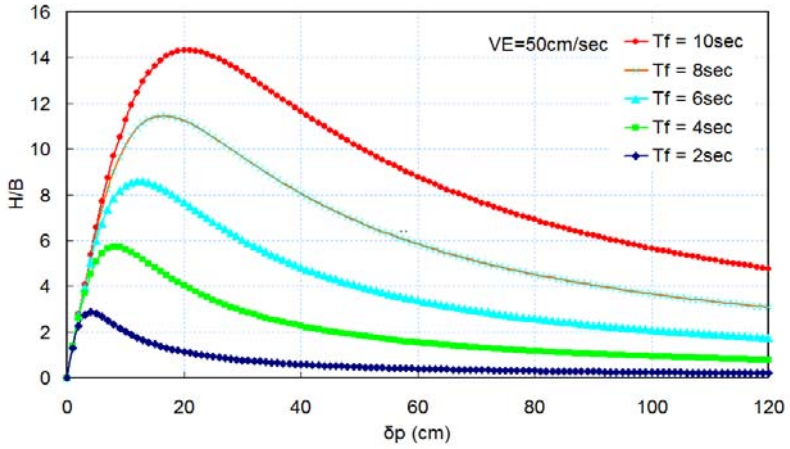


그림 3.2.1.35 한계건물높이/폭비(H/B)와 건물주기의 관계(V_E=50cm/sec)

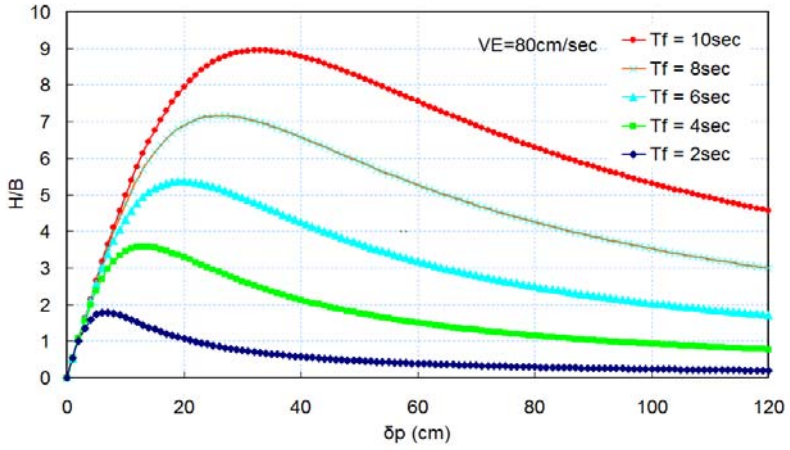


그림 3.2.1.36 한계건물높이/폭비(H/B)와 건물주기의 관계(V_E=80cm/sec)

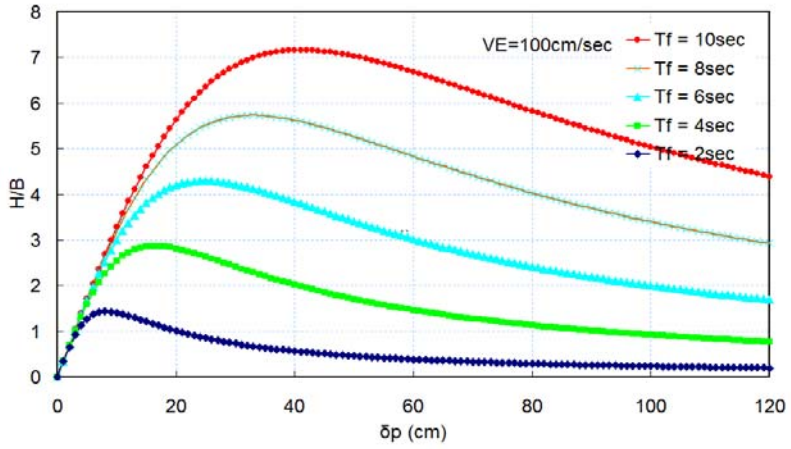


그림 3.2.1.37 한계건물높이/폭비(H/B)와 건물주기의 관계(V_E=100cm/sec)

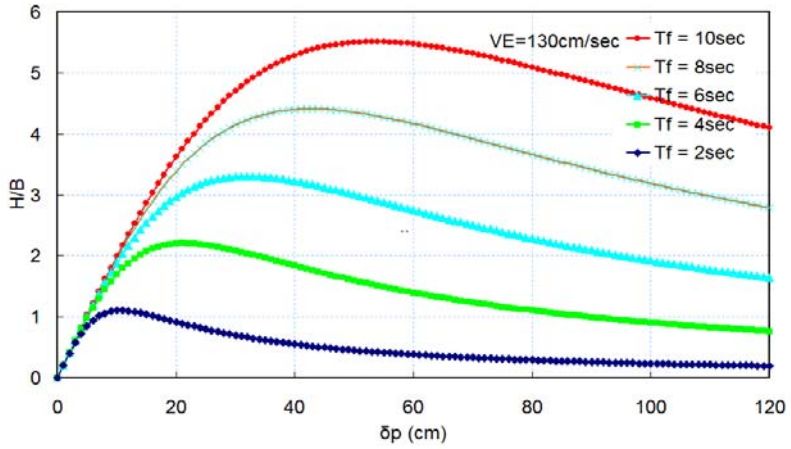


그림 3.2.1.38 한계건물높이/폭비(H/B)와 건물주기의 관계(V_E=130cm/sec)

3.2.2 복합면진장치 성능목표 설정

가. 설계용 성능스펙트럼을 만족하기 위한 복합면진장치의 목표성능 제시

그림 3.2.2.1~3.2.2.2에 나타낸 것처럼 면진구조물의 (α_1/α_0)는 개략 $0.5(\sqrt{15}/8=0.48)$ 이상이다. 이것은 댐퍼의 조정으로 응답(α_1/α_0)저감효과는 최대 1/2 정도이고, 면진구조의 최대장점인 전단력응답의 저감효과는 α_0의 저감으로 귀결된다는 것을 나타내고 있다.

V_E=150cm/s 일때 면진층의 최소전단력계수는 α_1=0.484, α_0=0.47/Tf 이고, 1차고유주기 T의 초고층건물의 허용응력도 설계를 할 때 채택하고 있는 제1층의 전단력계수의 1.3배~1.6배에 이르고 있다.

또 면진구조의 성립에 큰 영향을 주는 면진층의 최대변형 δ_{max}는 δ_0를 상한으로 하고, 댐퍼의 항복내력 (α_s/α_0)에 반비례하여 작아지게 되는 것을 나타내고 있다.

예측식으로 이용하는 에너지스펙트럼은 설계용 에너지스펙트럼이고, 지반특성 등을 포함한 각 지진동의 에너지스펙트럼을 개략 포락하는 것으로 bi-linear형으로 설정하고 있다.

α_{1min}와 $\delta_{max}(\alpha_{1min})$ 의 관계를 그림 3.2.2.3에 나타내었다.

그림 3.2.2.3을 참조하면, 예를 들어 설계용 에너지스펙트럼 V_E=100cm/s 일때 건물주기 Tf를 4-8sec로 하면 최대변위 $\delta_{max}(\alpha_{1min})$는 16-33cm의 범위가 되고, 상부구조의 층 전단력계수를 0.04-0.08로 할 수 있다는 것을 나타내고 있다.

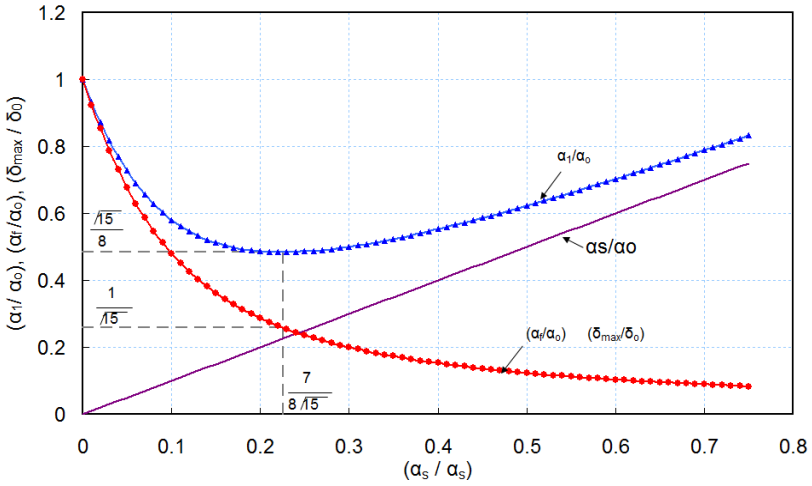


그림 3.2.2.1 면진층의 전단력계수와 댐퍼의 항복내력의 관계

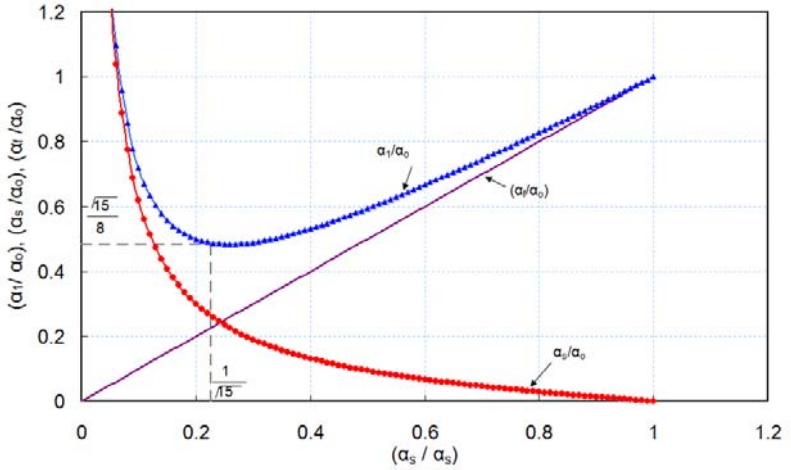


그림 3.2.2.2 면진층의 전단력계수와 댐퍼의 항복내력의 관계

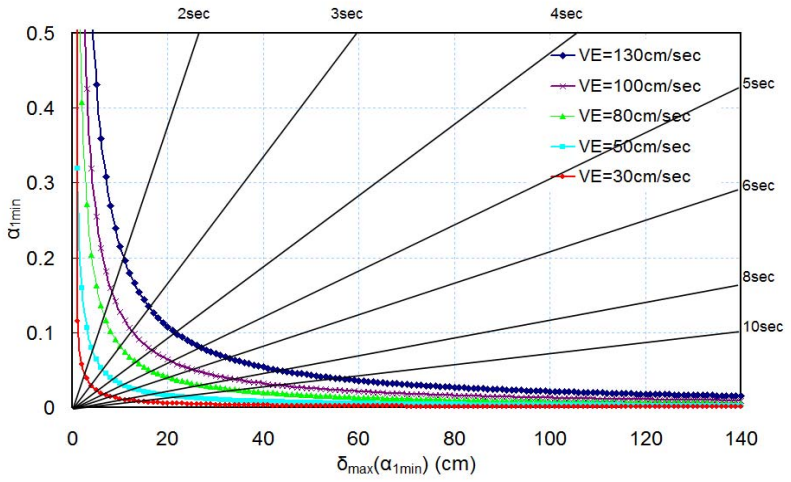


그림 3.2.2.3 면진층의 전단력계수와 최대변위의 관계

나. 적층고무의 전단성능 및 압축전단성능 평가

(1) 서 론

최근에는 재해를 인재라고 말하기도 한다. 이것은 현재의 기술로 충분히 피해를 경감할 수 있는 기술과 능력이 있음에도 천재지변이니 어쩔 수 없지 않은가이다. 그러나 현재의 기술을 고려하면 충분히 지진피해를 경감시킬 수 있고 방지할 수 도 있다. 이 기술은 현재 가장 경제적이고 현실적인 방법이 면진구조일 것이다. 지진에서 자유로울 수 있는 궁극적인 방법은 지진동의 전달을 지반에서 완전히 차단하는 방법일 것이다. 그러나 기술적으로 여러 가지 문제점이 있으며, 현실적으로 가능한 방법은 면진구조일 것이다.

면진구조에서 사용하는 적층고무는 큰 압축하중을 지지해가면서 지진시의 수평변형에 대응하여 전단방향으로 복원력을 발휘하는 특성을 지니고 있다.

따라서 천연고무 면진장치에 요구되어야 할 필수적인 성능과 적정한 평가항목을 제시하여 설계자가 보다 안심하고 사용하기 위하여 실험적으로 역학적 특성을 파악하고자 한다. 본 실험에서는 고면압, 대변형 시의 좌굴특성과 이력성상 및 복원력특성을 고무재료의 전단탄성계수(G)와 1차형상계수(S1), 2차형상계수(S2)의 변화가 적층고무의 한계성능, 변형의존, 면압의존 등에 미치는 영향에 대해서 파악하고자 실물사이즈(̣500- ̣800) 적층고무로 실험을 하였다.

(2) 적층고무 면진장치의 요구성능 및 평가목적

면진구조에 사용되는 적층고무를 설계하기 위해서는 사용하는 고무재료의 설계용 재료정수를 파악할 필요가 있지만, 적층고무 제작에 사용하는 재료는 각 제조업체가 적층고무에 요구되는 특성과 내구성을 고려하여 개발되었기 때문에 구조설계자 마음대로 재료정수를 결정해서는 안 될 것이다. 따라서 각 제조업체가 제시하고 있는 설계용 재료정수는 제조코스트와 납품기간 등을 고려하여 각 제조업체가 효율적으로 결정하고 있다고 할 수 있다. 또, 적층고무 면진장치는 고 축하중에 건축물의 내구기간동안 안정적으로 지지하여야 함은 물론, 극한하중인 지진하중(단기하중)시에도 안전성이 절대적으로 확보되어야 지진이후에도 인명보호는 물론 면진건축물의 최대 장점인 기능유지와 재산보호에 필요한 장치

가 될 것이다.

따라서, 면진구조 설계자에게도 적층고무의 설계상 사용조건과 설계이론을 최소한 이해할 필요가 있으며, 적층고무 면진장치의 역학적 특성에 대해서 실험을 통하여 제시하고자 한다.

면진구조 시스템을 설계하는 구조설계자가 보다 효율적으로 적층고무 면진장치를 선정하기 위해서는 적층고무 제조업체가 적층고무의 재료와 형상에 따라 적층고무의 성능을 평가하여 역학적 특성을 명확히 할 필요가 있다.

면진구조에서 가능한 한 장주기 영역으로 설계를 하면 지진에너지 흡수능력과 면진성능이 향상된다. 또, 우리나라와 같이 설계용 지진하중이 낮은 경우에는 절대적으로 적층고무 면진장치를 안심하고 사용할 수 있는 사용조건의 제시가 필요하다. 면진구조를 장주기화하기 위한 방법에는 여러 가지 방법이 있지만, 여기서는 적층고무를 사용하는 경우에 대해서 기술하기로 한다. 면진장치의 직경이 동일한 적층고무로 장주기 영역으로 설계하는 방법에는 면압(σ)을 높이거나, 적층고무 재료의 전단 탄성계수(G)를 작게 하거나, 면압이 있는 경우에는 2 차 형상계수(S2=D/n.tr)가 작을수록 대변형 영역에서 수평강성이 작아지게 된다. 2차 형상계수를 작게 하는 것은 고무층의 높이가 높아지므로 좌굴안전성에 영향을 미치는 불안정 형상이 된다. 이것은 적층고무를 사용하는 방법과 하중지지 성능적인 면에서도 가혹한 환경이 된다. 따라서, 적층고무 역학적 특성을 결정하는 중요한 것은 고무 재료 전단 탄성율 (G), 1차 형상계수 (S1)와 2차 형상계수 (S2)이다. 그림1은 적층고무의 성능 결정요인을 나타낸 그림이다. 표 3.2.2.1은 적층고무의 성능결정요인과 각 파라메터의 상관관계를 나타내었다.

표 3.2.2.1 적층고무 성능 결정요인과 상관관계

재료적 요인	형상적 요인	
전단탄성율 : G	1차형상계수 $S_1=(D_0-Di)/4tr$	2차형상계수 $S_2=D_0/(n.tr$
G=Kh · n.tr/A n.tr:고무총두께	적층고무의 자유면적과 구속면적의 비	고무총두께와 적층고무단면적의 비
수평강성(Kh)을 결정	연직강성(Kv)、압축한계강도에 영향	수평강성 결정, 좌굴에 영향 $(Kh=G"ES_2"ED_0"E\pi/4)$

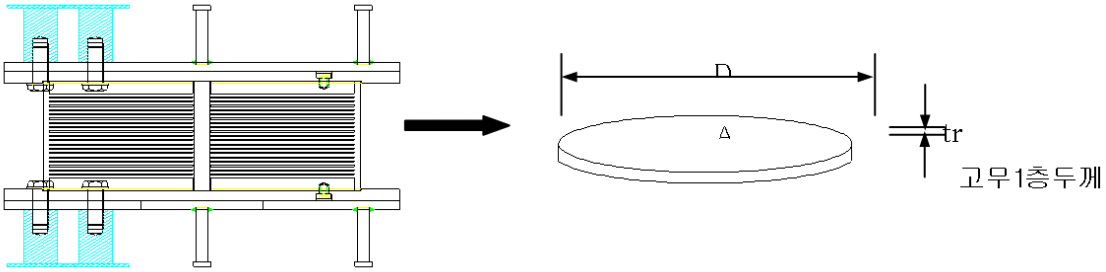


그림 3.2.2.4 적층고무의 성능결정 요인

(3) 시험프로그램

(가) 시험체

① 고무재료물성

적층고무 압축전단 시험기준조건(면압: $10N/mm^2$,전단변위: 100%) 시험에서 구한 수평강성(Kh)으로부터 역산한 G(× 10)가, 3.0, 3.5, 4.0에 상당하는 고무재료의 기준물성표를 표 3.2.2.2에 나타냈다.

$$G = Kh \cdot n \cdot tr / A \qquad (3.2.2.1)$$

(n · tr : 고무총두께, A: 적층고무의 단면적)

표 3.2.2.2 고무재료물성

구분		단위	G=3.0	G=3.5	G=4.0
고무인장 시험편 (3호)	HD(JIS A)	-	29	31	35
	TS	N/mm^2	15.9	17.3	18.8
	EL	%	776	737	705
	100% M	N/mm^2	0.60	0.63	0.68
전단시험편	파단응력	N/mm^2	15.0	20.5	28.7
	파단 EL	%	700	670	630

② 시험체

㉮ 전단시험편

압축하중의 영향이 없는 고무재료의 전단변위의존성을 평가하기 위해 그림 3.2.2.5의 전단시험편을 사용하였다.

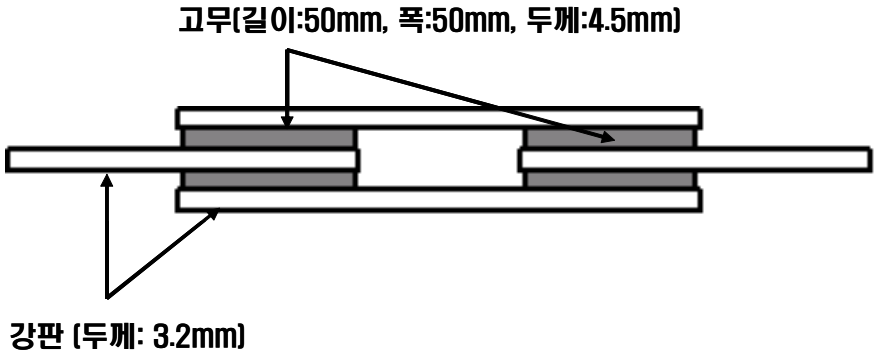


그림 3.2.2.5 전단시험편 형상

㉯ 적층고무

표 3.2.2.2에 표시한 적층고무에 대해서 한계까지의 압축전단시험을 실시하였다. ϕ500의 적층고무에서 3종의 고무재료(G)와 1차형상계수(S1)의 영향을 평가하고, ϕ500과 ϕ600에서 2차형상계수(S2)의 영향을 평가하였다. 나아가 동일한 고무재료 및 형상의 ϕ800을 평가하였다.

표 3.2.2.3 시험체 일람표

적층고무 직경	S1	S2	고무 두께 (mm)	고무 층수	강판 두께 (mm)	G		
						3.0	3.5	4.0
ϕ500	31	5.1	3.8	26	3.2	○		
							○	
								○
	36	5.1	3.3	30	3.2			○
ϕ600	31	3.7	4.6	35	3.2			○
ϕ800	31	5.0	6.2	26	4.5			○

한편, 어떤 적층고무도 이하의 재료・형상은 동일하다.

- 외피고무: 10mm 두께이며 내부고무와 같은 재료
- 중심홀 직경: 30mm
- 플랜지: 28mm 두께

(나) 시험장치

① 전단시험기

최대하중 50kN, 최대변위 ±250mm의 시험기를 사용해서, 11mm/sec의 속도로 전단시험을 실시하였다. 그림 3.2.2.6에 시험상황을 나타내었다.



(a) 시험체 셋팅 (b) 시험체 상세

그림 3.2.2.6 전단시험상황

② 압축전단시험기

표 3.2.2.4에 사용한 압축전단시험기의 사양을, 그림 3.2.2.7에 시험체 셋팅상황을 나타내었다. 시험기는 압축최대하중 30MN, 최대수평변위 ± 600mm까지 가능하며, 그 범위에서 각 적층고무에 각종면압과 전단변위를 조합한 압축전단시험을 실시하였다. 시험속도는 전단변위에 따라 4~11mm/sec로 실시하였다.

표 3.2.2.4 압축전단시험기 사양

구분	항목	성능
수직성능	압축최대하중	30MN
수평성능	수평하중	±6MN
	수평변위	±600mm
	최대속도	20mm/sec
	마찰계수(μ)	0.005
시험최대사이즈	최대폭	2000mm
	최대높이	1200mm

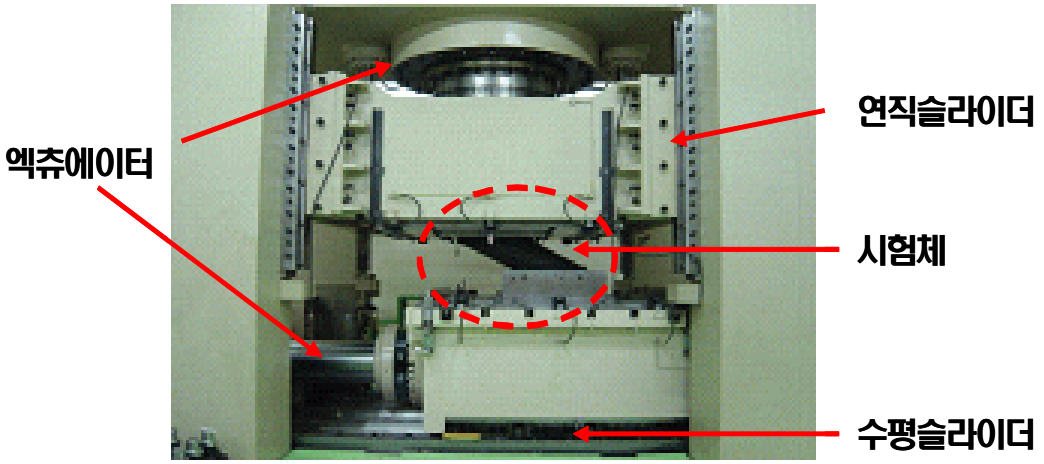


그림 3.2.2.7 압축전단시험 셋팅상황

(다) 시험방법

① 전단시험편에 의한 평가

γ=0.5(50%) 간격으로 γ=5.0(500%) 까지 ±γ을 각 3사이클을 재하하고, 3사이클 째의 이력곡선으로부터 Kh를 구한다.

② 적층고무의 한계까지의 압축전단시험

그림 3.2.2.8에 표준시험체(ϕ500, G=4.0, S1=31, S2=5.1)의 시험조건을 나타냈다. 시험순서는 아래와 같이 크게 두가지로 구분된다.

○ 면압(σ): 5N/mm2 간격으로 50N/mm2 까지

○ 전단변위(γ):50% 간격으로 400%까지

이상의 조건을 조합해서, 각 조건 당 ± 3 사이클을 재하하고 여기에서 얻어진 이력곡선에서 수평강성을 구한다. 작은 변위로부터 시험을 실시하고, 일정변위에 대해서 작은 면압으로부터 큰 면압의 순서로 시험을 행하였다. 최고면압까지의 시험을 행하고 다음변위에 있어서 같은 시험을 실시하였다. 한편 각 전단변위에 있어서의 최고면압은 작은 변위영역에서는 이력곡선의 중심부분에 역구배 발생을 목표로, 큰 변위영역에서는 좌굴의 발생을 목표로 하였다. 또 각 전단변위시험을 종료한 후, 그때마다 기준조건 (면압 10 및 15 N/mm^2, 변위 100%)에서의 수평강성을 측정, 시험이력의 수평강성에의 영향을 확인하였다. 다른 시험체에 관해서도 동일한 방법으로 시험을 실시하였다.

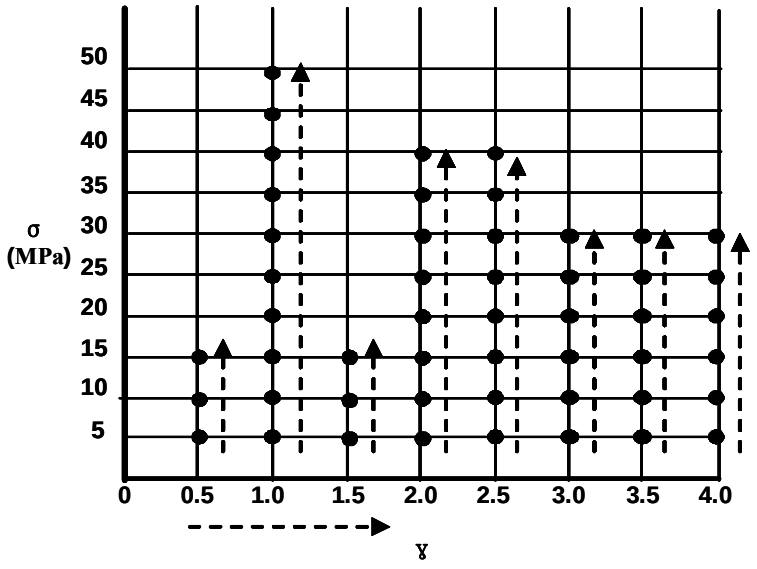


그림 3.2.2.8 시험조건

(4) 실험결과

(가) 이력곡선과 Kh 평가

① 이력곡선의 면압 및 전단변위 의존성

그림 3.2.2.9에 G가 3.0, 3.5, 4.0 인 3종의 전단시험편에 대해서, γ=0.5 간격으로 γ=5까지 ±γ을 각 3시이클을 재하한 이력곡선을 나타내었다. 전단시험편의 경우, G에 의하여 약간의 차이가 있고, γ=0.5의 대변형까지 거의 선형의 이력을 나타낸다.

한편, 수직하중이 재하된 적층고무의 경우, 그림 3.2.2.10에 나타낸 것처럼 기준조건(σ=10N/mm2, γ＝1.0)에서는 선형의 이력곡선이 면압 및 전단변위의 증가와 함께 비선형인 이력곡선으로 변화한다. 전단시험편의 결과는 고무재료의 전단특성을 나타내 주며, 한편 적층고무의 결과는 형상과 수직하중의 영향도 포함한 것으로 생각된다.

② Kh 평가

적층고무의 압축전단시험 하에서 100%를 넘는 전단변위에 관해서는 그림 3.2.2.11과 같이 할선강성과 접선강성으로 평가한다. 그러나 전단시험편에 대해서는 할선강성으로 평가하고 있다. 기준조건(σ= 10N/mm^2, γ=1.0)의 Kh를 1.0로 해서 면압 및 변위의존성을 나타내었다.

① 전단시험편에서의 평가

그림 3.2.2.12에 전단시험편의 Kh의 전단변위의존성을 나타냈다. 3종의 고무재료 모두 300% 변위까지는 같은 저하경향을 보인다. 그 후 재료의 변형경화에 의해서 의존성이 증가하는 경향을 나타내었고, 500% 변위에서는 G=4.0의 증가가 크고 이것은 그림 3.2.2.9의 이력형상으로부터도 알 수 있다.

② 전단시험편과 적층고무의 비교

그림 3.2.2.13에 G가 다른 적층고무의 σ=10N/mm2에서의 할선강성과 접선강

성의 전단변위의존성을 나타낸다. 변위레벨을 같이 한 전단시험편의 결과를 같이 나타냈다.

중심부분의 ± 1.0 변위로부터 평가하는 접선강성이 변위에 따라 저하현상이 할선강선보다 크게 나타나고 있으며, 그 차이는 γ=2.0 정도부터 현저하게 된다. 전단시험편과 적층고무 할선강성은 γ=3.0 정도까지는 같은 저하경향을 보이지만, 그 이상의 변위에서는 전단시험편은 증가경향인데 비해, 적층고무할선강성은 저하경향으로 바뀐다. 이 영역에서의 양자의 이력형상을 비교해보면, 고무의 변형경화효과를 보이는 전단시험편에 비해 적층고무에서는 이력형상에서 보면 아래로 볼록한 형상이 되고 있으며, 이 경향은 고면압이 될 수록 현저하다는 사실을 그림 3.2.2.10을 통해서도 알 수 있다. 이 현상은, 중간 강판단부에 생기는 휨 응력의 영향으로 판단되어진다.

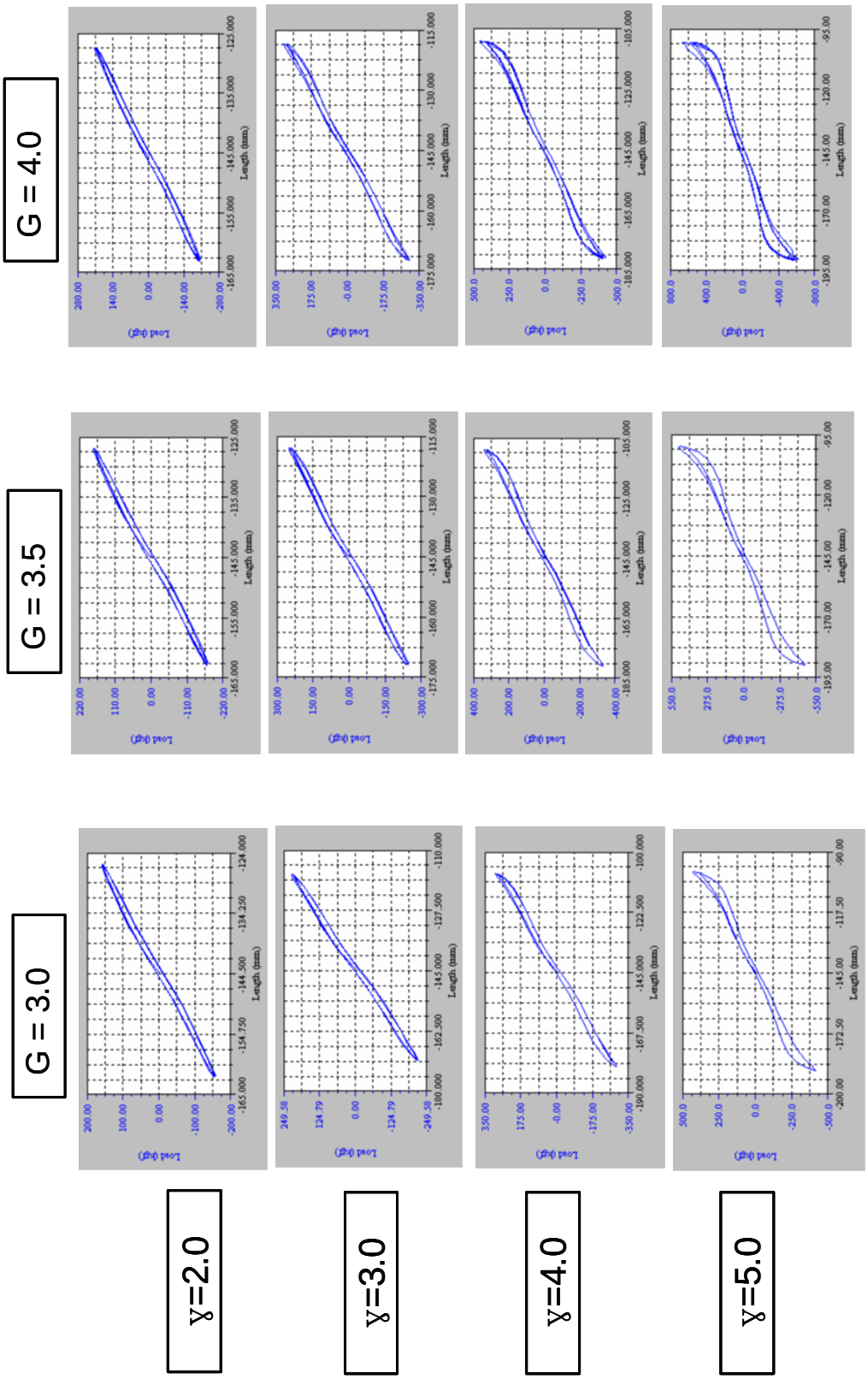


그림 3.2.2.9 전단시험편의 이력곡선

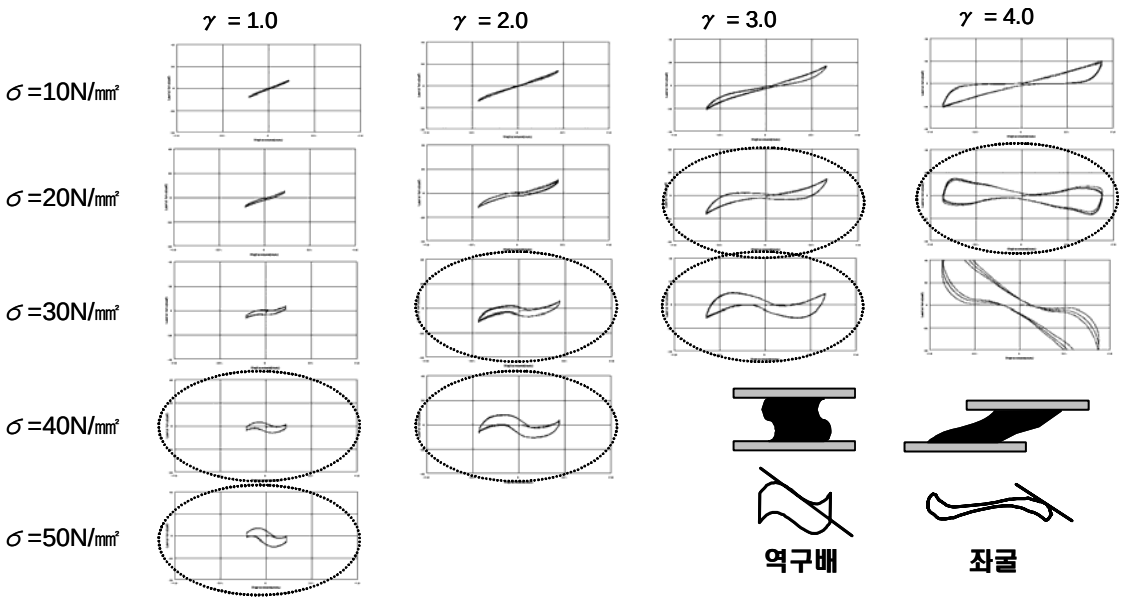


그림 3.2.2.10 전단압축시험의 이력곡선(적층고무)

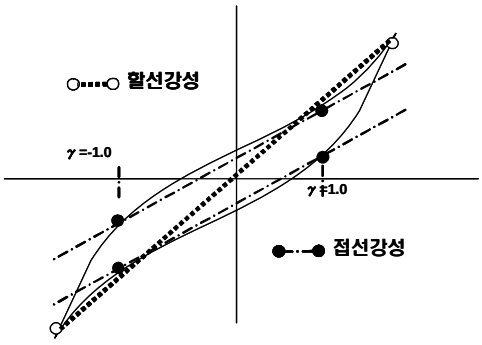


그림 3.2.2.11 할선강성과 접선강성의 평가

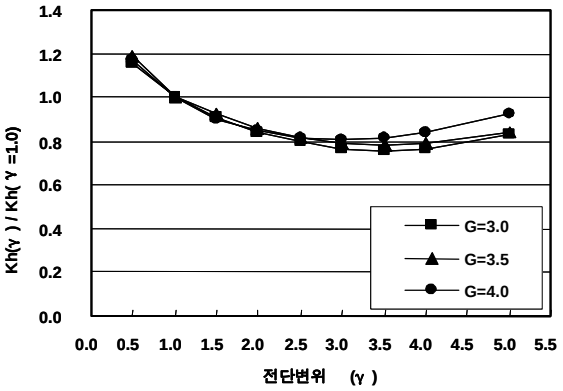


그림 3.2.2.12 전단탄성률(G)의 영향

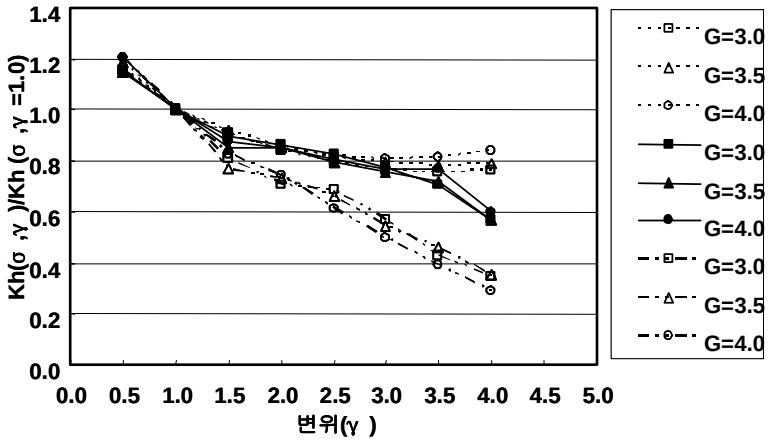


그림 3.2.2.13 할선강성과 접선강성의 비교

③ Kh의 면압의존성에 대한 적층고무의 영향

γ=1.0에 있어 Kh의 면압의존성에 관해서, 그림 3.2.2.14(a)에 1차형상계수의 영향(S1=31, 36), 그림 3.2.2.14(b)에 적층고무사이즈의 영향(φ500, φ800), 그림 3.2.2.14(c)에 2차형상계수의 영향(S2=5.1, 3.7)을 나타내었다.

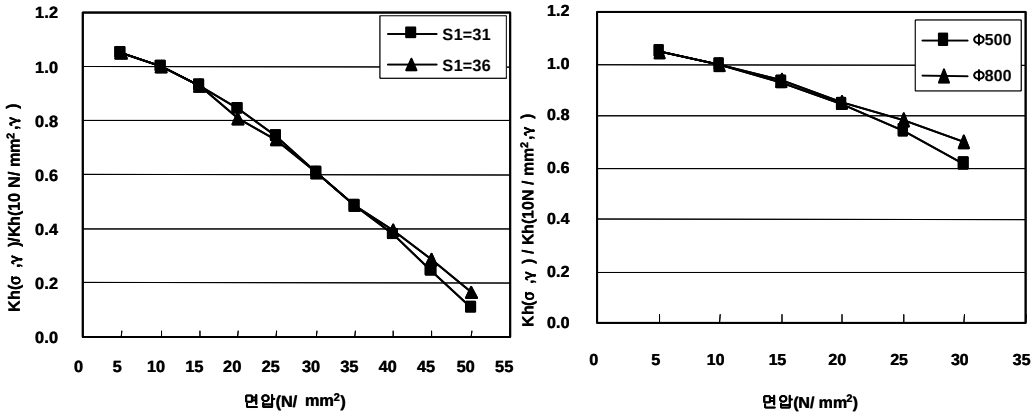
실험결과를 살펴보면 면압증가에 따라 Kh의 저하경향이 보이지만 그 원인은 그림 3.2.2.6의 이력형상으로부터 알 수 있는 것처럼 면압증가에 따라 이력중심부의 역구배의 발생에 의한 것으로 판단된다.

γ=1.0 정도의 작은 변위에서도 면압이 매우 클 경우에는 중간강판에 상당한 굽힘응력이 발생하고 있는 것을 알 수 있다.

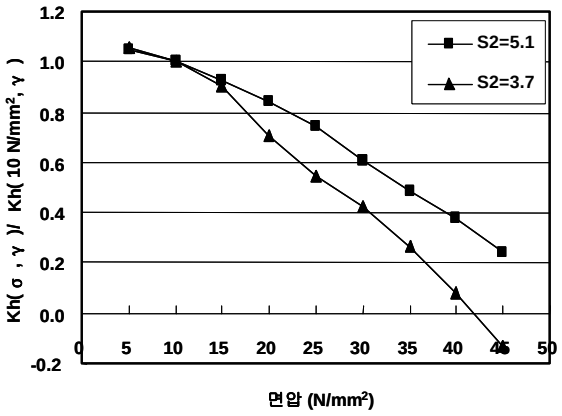
㉮ 1차형상계수의 영향(S_1=31, 36) : 같은 저하경향을 보이지만 S_1의 영향이 강성저하에 미치는 영향은 미미하게 나타났다.

㉯ 적층고무사이즈의 영향(φ500, φ800) : 면압이 작을 경우는 거의 같은 강성값을 가지고, 면압이 20 N/mm^2 이상일 경우 일부 차이가 나타나는 것으로 보인다.

㉰ 2차형상계수의 영향(S_2=5.1, 3.7): 면압이 20 N/mm^2 이상일 경우, S_1계수 및 사이즈 효과와 다르게 2차형상계수의 영향이 매우 큰 것으로 나타났다. 즉, S_2가 작은 경우는 강성저하가 매우 현저하다는 것을 보여준다.



(a) S_1효과 (b) 사이즈 효과



(c) S_2 효과

그림 3.2.2.14 Kh의 면압의존성에 대한 영향

(5) 고찰

한계까지의 압축전단시험에 있어, 면압, 단변위의 증가에 따라 선형인 이력형상에서 비선형인 이력형상 나아가 역구배발생, 좌굴 그리고 파단에 이르는 한계까지의 이력변화로부터, 압축한계강도(σ_{cr})와 좌굴로부터 얻어진 한계곡선과 역구배발생에 근거한 한계곡선을 구하고 비교한고자 한다. 나아가 한계곡선에 대한 고무재료, 적층고무형상 등의 영향을 평가하였다.

(가) 한계곡선을 구하는 방법

① 역구배 발생으로부터 구한 한계곡선

그림 3.2.2.10의 적층고무이력곡선을 참조하면, 기준조건(σ=10N/mm^2, γ=1.0)

에서는 선형의 이력곡선이, 면압 및 전단변위의 증가와 함께 비선형의 이력곡선으로 변화한다. 1.0 정도의 변위에서는, 면압의 증가에 따라 수평강성(이력곡선의 기울기)가 저하하기 시작하고, 그 후 이력의 중심부분에 역구배가 발생한다. 나아가 변위가 커짐에 따라 역구배가 발생하는 면압이 저하하는 경향이 보인다. 이 역구배 발생점으로부터 그림 3.2.2.15에 나타낸 한계곡선을 구하였다. 그림 3.2.2.15의 ●은 그림 3.2.2.16의 역구배발생점이다. 한편, 한계변위 4.0에서 면압은 10 N/mm^{2}로 통일하여 표시하였다.

② 압축한계강도(σ_{cr})와 좌굴로부터 구한 한계곡선

각 전단변위에 있어 시험최고면압, 또는 좌굴발생면압 중 하나를 나타내고, 한계변위 4.0에서 면압 10 N/mm^{2}의 점과 연결한다. 다음에 압축한계강도(σ_{cr})를 계산으로 구한다.

$\sigma_{cr} = \zeta \cdot G \cdot S1 \cdot S2$ (ζ : 보정계수)

γ=1.0의 최고면압 또는 σ_{cr}중에 작은 면압으로, 0과 1.0을 연결하여 그림 3.2.2.16에 그 한계곡선을 표시하였다.

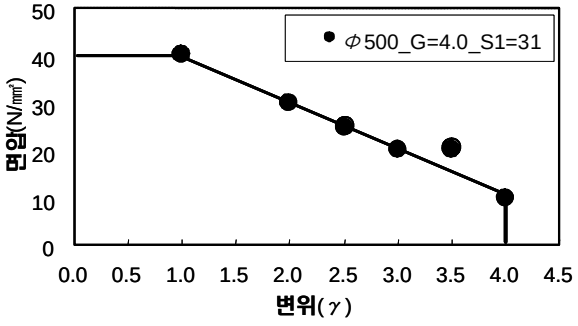


그림 3.2.2.15 역구배발생에 근거한 한계곡선

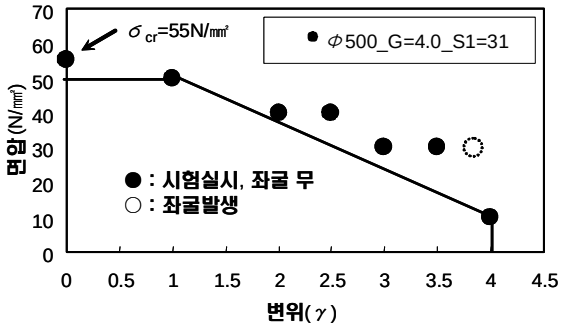


그림 3.2.2.16 압축한계강도(σ_{cr})과 좌굴로에서 구한 한계곡선

(나) 평가결과

앞에서 구한 한계곡선을 비교하고, 그것에 대한 고무재료, 적층고무의 형상의 영향을 그림 3.2.2.17(a)~(d)에 나타냈다. 결과로부터 본 연구에서 제안한 역구배 발생에 근거한 한계곡선은 압축한계강도(σ_{cr})와 좌굴로부터 구해진 한계곡선보다 면압으로 볼 때 상당히 아래의 영역이 되고 있다.

이하에 고무재료, 적층고무의 형상의 영향을 정리하였다.

① 전단탄성률(G)의 영향(그림 3.2.2.17(a))

계산상으로는 압축한계강도(σ_{cr})은 G에 비례한 것과 마찬가지로, 역구배발생에 근거한 한계곡선에서도 거의 G에 비례해서 저하하고 있는 것으로 나타났다. G에 관해서는 한계곡선이 좋은 상관성을 나타냈다.

② 1차형상계수(S1)의 영향(그림 3.2.2.17(b))

비교한 적층고무의 S1의 차이는 작기 때문에 역구배 발생에 근거한 한계곡선은 동등하다.

③ 2차형상계수(S2)의 영향(그림 3.2.2.17(c))

계산상으로는 압축한계강도(σ_{cr})는 S2에 비례하는 것과 마찬가지로 역구배 발생에 근거한 한계곡선도 거의 S2에 비례해서 저하하고 있다. S2에 관해서 한계곡선은 좋은 상관성을 나타낸다.

④ 적층고무사이즈의 영향(그림 3.2.2.17(d))

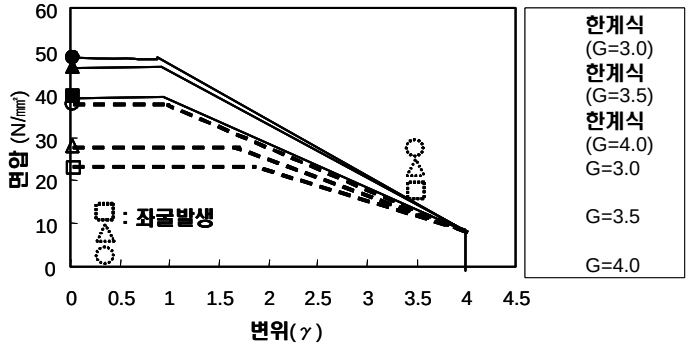
φ800은 시험기용량 때문에 30 N/mm^2까지만 실험을 실시하였고, 이 범위내에서는 사이즈에 의한 차이는 보이지 않는다.

(6) 결 론

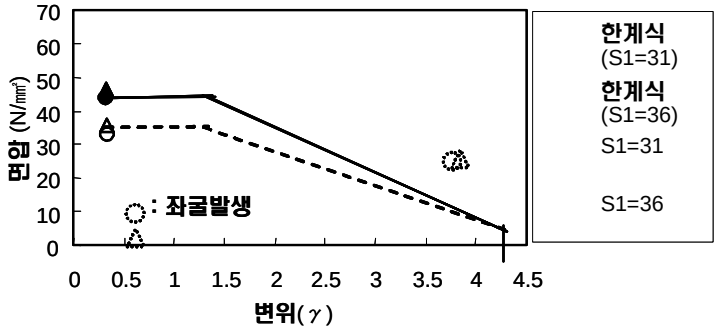
본 연구에서는 적층고무의 수평강성, 면압의존성, 1차형상계수, 2차형상계수 및 사이즈효과에 따른 역학적특성을 적층고무의 압축전단시험을 통하여 비교 검토하였다. 적층고무에서 수평강성의 면압의존성은 1차형상계수의 영향와 적층고무사이즈의 영향은 미미하고, 2차형상계수의 영향은 면압의 증가에 따라 2차형상계수과 작으면 강성저하가 현저하다는 것을 알 수 있었다.

또한 이력곡선의 불안정형상(역구배)에 근거한 한계곡선은 종래의 압축한계강

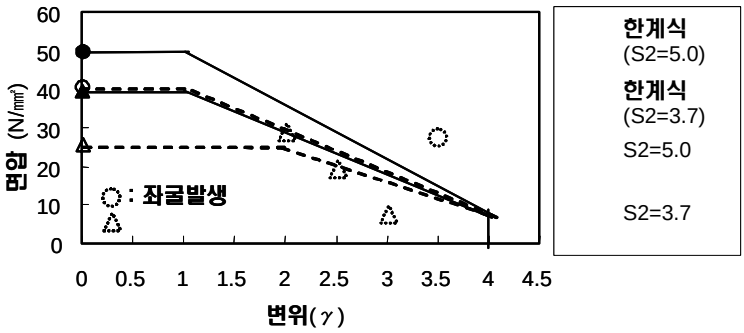
도(σ_{cr})와 좌굴로부터 구한 한계곡선보다 낮은 면압영역에 있음을 실험을 통해 알 수 있어서다.



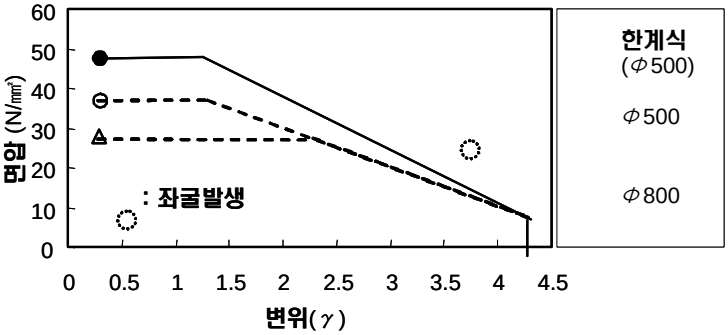
(a) 한계곡선에 대한 G의 영향



(b) 한계곡선에 대한 S1의 영향



(c) 한계곡선에 대한 S2의 영향



(d) 한계곡선에 대한 적층고무사이즈의 영향

그림 3.2.2.17 한계곡선에 대한 변수별 영향

다. 에너지흡수장치의 요구성능 설정

에너지흡수장치의 성능평가 결과를 그림 3.2.2.17에 나타내었고, 면진장치와 함께 설치한 경우의 복원력특성을 그림 3.2.2.18에 나타내었다. 그림 3.2.2.17에서 보는 바와 같이 에너지흡수장치는 항복이후에 안정된 이력거동을 나타내고 있으며 큰 변형이 발생한 경우 내력이 다소 상승하는 경향을 나타내고 있다. 내력상승의 원인은 재료의 변형경화에 의한 것으로 변형경화가 발생하면 재료의 피로성능저하 및 파단의 위험성이 커지기 때문에 변형경화가 발생하기 직전의 변형량을 한계변형량이라고 하며, 한계변형량이 에너지흡수장치의 성능을 결정하기 위해 가장 중요한 지표라고 할 수 있다.

또한 그림 3.2.2.18와 같이 면진장치와 함께 설치한 경우는 보통 적층고무의 복원력특성과 에너지흡수장치의 복원력특성이 조합된 형태의 복원력특성을 나타내고 있다. 이 경우는 그림 3.2.2.17에서 보는바와 같이 에너지흡수장치의 한계변형량이 400mm 이상을 확보하고 있고, 면진장치의 변형량의 한계량을 넘어서고 있으므로 면진장치의 한계변형량에서도 안정된 이력성상을 나타내고 있다.

보통 면진구조에서는 면진장치의 안정된 전단변형률을 250% 정도 요구하고 있으며, 최대변형량을 보통 300~400mm 정도로 설정하여 적층고무를 설계하고 있는 점을 감안하면 복합면진장치의 전단변형률은 250~300% 이상을 확보해야 하며, 이에 따라 에너지흡수장치의 한계변형량은 400mm 이상을 확보해야 될 것으로 판단된다.

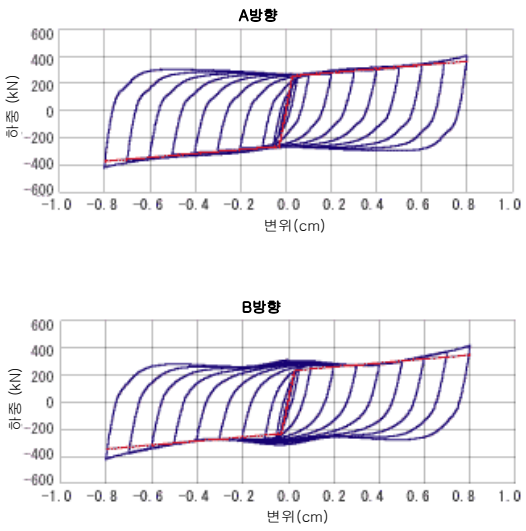


그림 3.2.2.17 에너지흡수장치의 성능평가 결과

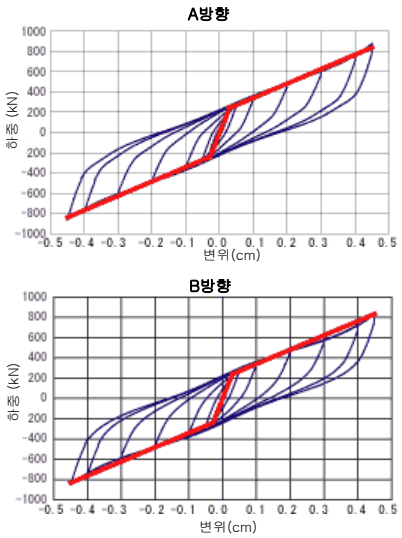


그림 3.2.2.18 복원력 특성

3.2.3 에너지흡수장치 형상개발

가. 면진구조용 에너지흡수장치를 위한 강재개발 및 소재특성 평가

(1) 고인성강재 개발 및 시험생산

(가)합금설계(탄화물형성원소 Ti 첨가)통한 연신율 향상

Fe-17%, Mn-0.2%C 합금에 Ti를 1.31%까지 각량 첨가한 경우, Ti량이 증가할수록 연신율이 증가하여 연신율 45%를 만족하는 제진합금을 개발하였다. 이는 Ti 첨가량에 의해 Carbon의 locking 현상을 제거하여 연신율이 크게 증가했다고 생각된다.

이 경우 Ti 첨가로 인해 고용된 탄소를 탄화물로서 석출시킴으로서 감쇠원의 계면을 고착시키는 고용탄소의 양이 감소하게 되어 Carbon에 의한 고용강화를 억제하게 되어 인장강도 62.5kgf/㎟, 항복강도 25.0kgf/㎟의 기계적 특성을 나타내게 된다. 탄화물 형성원소를 첨가하게 되면 연신율이 증가되는 반면 인장강도와 항복강도가 낮아지는 경향을 보인다.

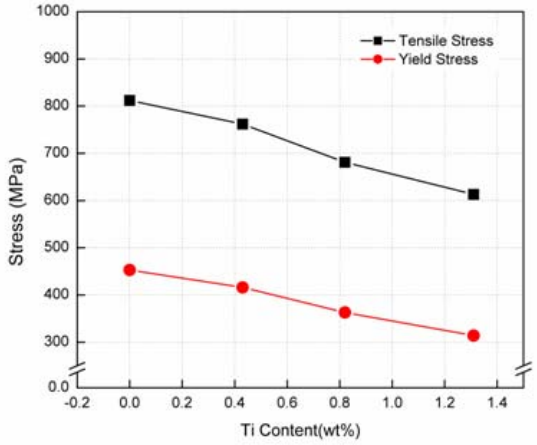


그림 3.2.3.1 Ti첨가량과 응력 관계

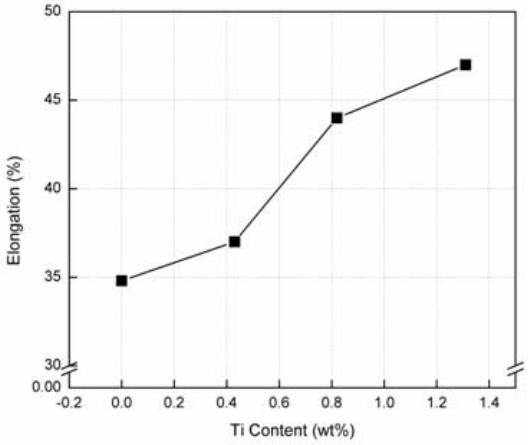


그림 3.2.3.2 Ti첨가량과 연신율의 관계

(나) 열처리 시간의 변화를 통한 연신율 향상

탄화물형성원소를 첨가하지 않은 Fe-17%Mn-0.02%C합금을 열처리 시간의 변화를 통하여 기계적 특성을 분석하였다. 합금을 열간압연을 통해 판재로 제작하고 시편 가공시에 가공경화가 발생하여 재료 내에는 잔류응력이 발생하게 된다. 이러한 잔류응력을 열처리로 풀어주면 연신율이 증가하게 되는데, 6시간까지의 열처리 시간의 변화를 주어 실험한 결과 그림 3.2.3.6에서처럼 열처리 시간이 2시간이상에서는 연신율이 증가하지 않고, 오히려 열처리 시간이 증가함에 따라 연신율리 서서히 저하하는 현상을 나타내고 있다. 따라서 잔류응력을 제거할 수 있는 최적의 열처리 시간은 2시간임을 확인하였다.

이는 아래의 조직사진(SEM, X600)에서 보이는 바와 같이 장시간 열처리시 ε 마르텐사이트로 변태하지 않은 γ 오스테나이트가 많이 남아 있어, 응력을 γ→ε 변태에 소모하기 때문에 파단시까지 더욱 연신이 되는 현상을 보인다. 열처리 시간이 증가될수록 ε 마르텐사이트 핵생성처인 결정립 계면이 적어져 ε 마르텐사이트가 상대적으로 적게 생성되어 오히려 연신율이 감소하는 경향을 보인다.

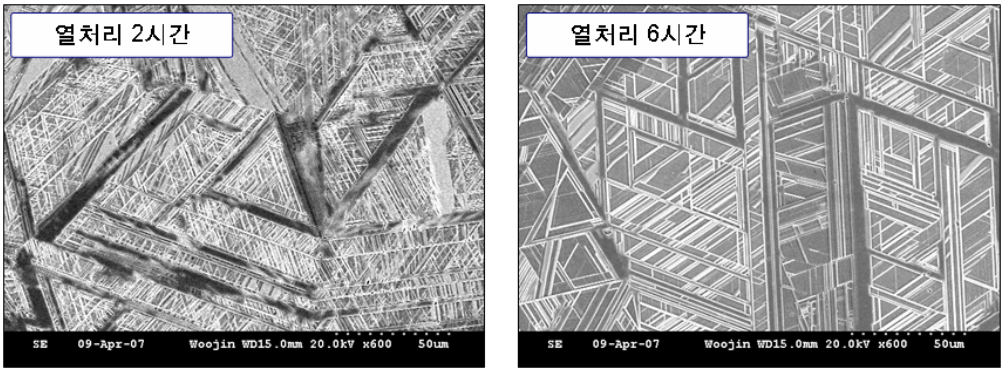
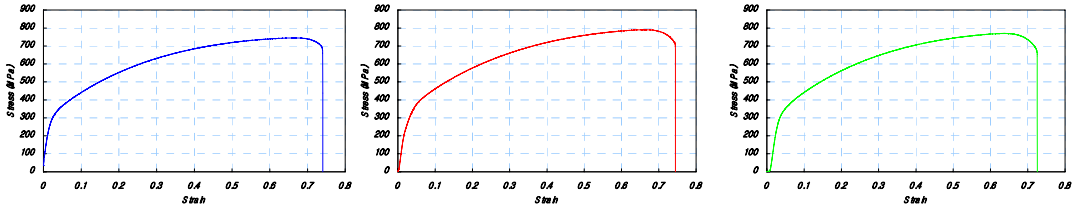


그림 3.2.3.3 열처리 시간에 따른 조직사진



(a) 2시간 열처리 (b) 4시간 열처리 (c) 6시간 열처리

그림 3.2.3.4 열처리 시간에 따른 응력-변형도 곡선

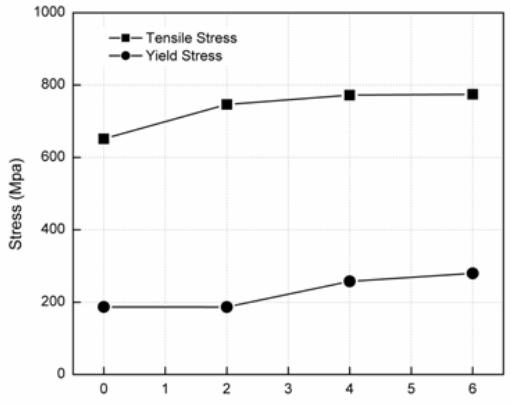


그림 3.2.3.5 열처리시간과 응력관계

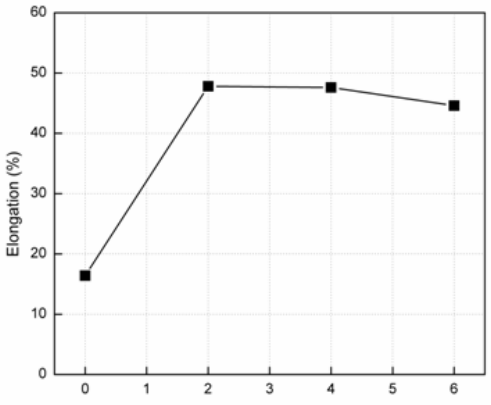


그림 3.2.3.6 열처리시간과 연신율 관계

(다) 합금설계(Cu 원소 첨가)를 통한 내후성 향상

댐퍼용 재료로서 내후성을 평가하기 위하여, Fe-17%Mn 이원계 합금에 Cu를 첨가하여 실험하였다. 10% NaCl 용액에서 시편을 침지 후 단위면적당 무게를 측정하여 감량을 측정하는 부식시험을 수행한 결과, 기존 Fe-17%Mn 이원계 합금에 비해 Cu를 첨가할수록 감량의 정도가 줄어들어 내후성이 향상됨(을 보여준다. 96시간 침지실험을 기준으로 보았을 때 Cu를 1.1wt% 첨가한 합금이 0.1wt%첨가한 합금보다 1.4배 우수한 내후성을 지님을 확인하였다.

또한 일반구조용 압연강재와 고내후성 압연강재와 같은 조건에서 10% NaCl 용액에 침지시험을 시행한 결과 96시간 침지실험을 기준으로 일반구조용 압연강재에 비해서는 2.5배, 고내후성 압연강재에 비해서는 1.5배 우수한 내후성능을 나타내고 있음을 알 수 있다.

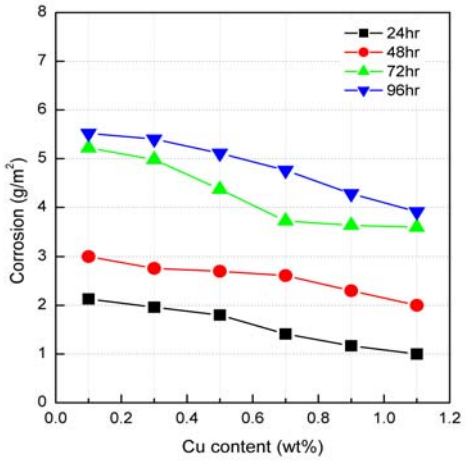


그림 3.2.3.7 Cu원소량과 부식률

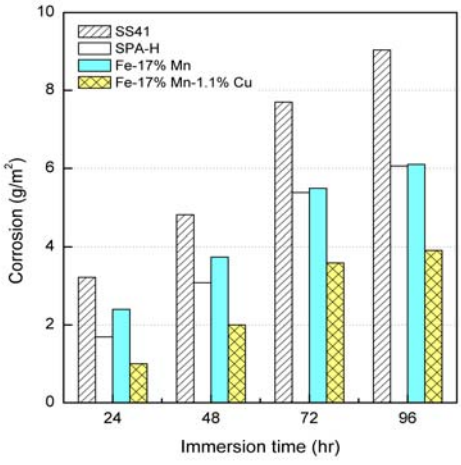


그림 3.2.3.8 침지시간과 부식률

(라) 합금설계(Cr 원소 첨가)를 통한 내후성 향상

Fe-17%Mn-2.7%Cr 합금과 비교재에 대한 상대적인 내식성을 평가하고자 침지시험 및 대기노출시험을 수행하였다. 개발재와 비교재의 침지시험은 5%-H2SO4용액에 168시간동안 침지하여 시편 무게의 감량을 측정하는 방법으로 진행하였고, 대기노출시험은 침지시험이 완료된 시편을 사용하여 일반 대기중에 90일간 노출시킨 후 무게의 감량을 측정하는 방법으로 진행하였다. Cr 첨가에 의해 Fe-Mn 이원계 합금의 내식성을 크게 개선시킬 수 있었으며, 비교재인 FC20, 이형철근, SS400, SPC 등의 일반강에 비해 매우 안정된 균일한 형태의 부식거동을 나타내는 것을 알 수 있었으며, 이는 건축용 강재댐퍼로서의 적용가능성을 보여주고 있다.

A	Fe-17%Mn-2.7%Cr alloy
B	Fe-17%Mn alloy
C	SDR24 (Rolled Steel Bars)
D	SS41 (Rolled Steel for General Structure)
E	SC46 (Carbon Steel Castings)
F	FC20 (Gray Iron Castings)

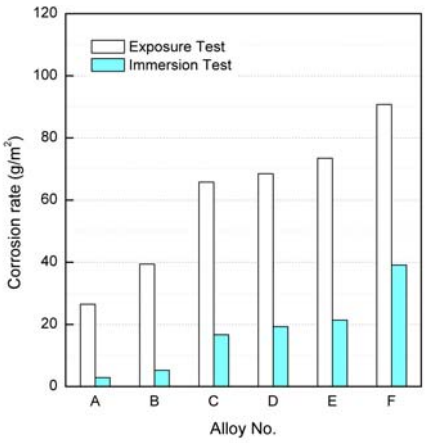


그림 3.2.3.9 침지시험 및 대기노출시험에 따른 내식성 평가

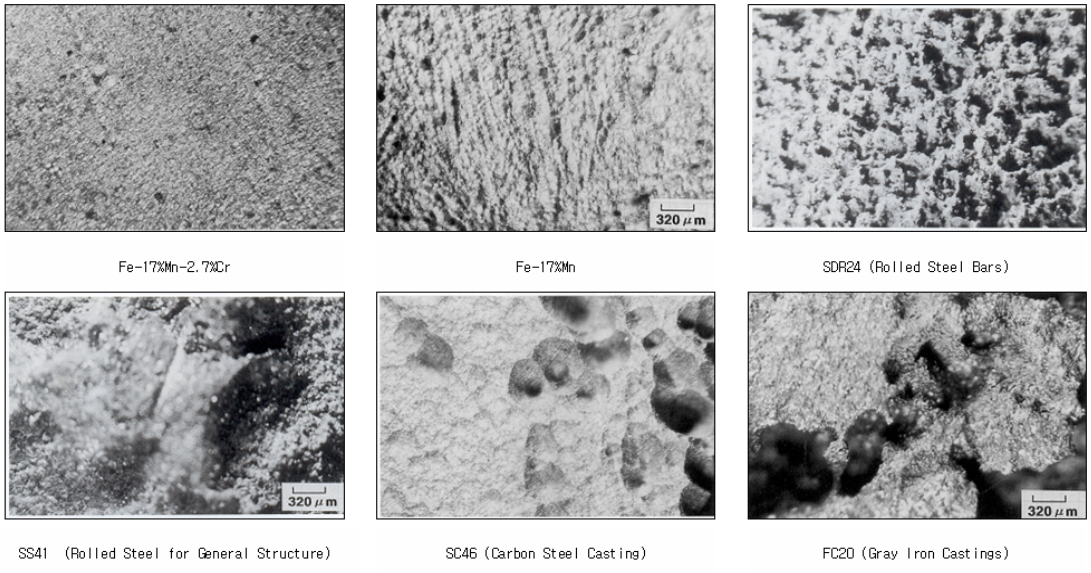


그림 3.2.3.10 여러 합금재의 부식 표면사진

(마) 댐퍼 형상에 맞는 강재 성형을 위해 성형온도, 성형속도 등 조건 파악

댐퍼 형상에 맞는 강재 성형을 위해 재료의 가공 전 풀림처리를 통해 압연공정에 따른 응력을 풀어줌으로서 가공성을 향상시켰다. 또한 Fe-17%Mn 이원계 합금의 성형조건을 스핀들회전수 800~1,000rpm, 이송속도 270~340mm/min로 하여 가공 작업의 효율성을 향상시켰다.

(바) 기존 건축용 강재댐퍼 시험품 제작

Fe-17%Mn 이원계합금을 주조하여 열간압연을 통하여 기존 형태의 강재댐퍼 시험품 제작을 진행하였다.



그림 3.2.3.11 건축용 강재댐퍼 시험품 제작 절차

(2) 고인성 강재의 재료특성

(가) 기존강재와의 재료특성 비교

시험생산된 고인성강재의 재료특성을 기존에 댐퍼용으로 사용되던 강재의 재료특성과 비교하여 다음의 표 3.2.3.1에 나타냈다.

표 3.2.3.1 재료의 특성비교

항목	고인성 강재	SS400	LYP100 (일본)
화학조성(wt%)	C:0.02 Si:0.5 Mn:17~18	C : 0.2 Si : 0.2 Mn : 1.2	C : 0.02 Si : 0.02 Mn : 0.2
연신율(%)	40~45	20~22	45
항복강도(MPa)	300~350	235	80~120
인장강도(MPa)	700~800	410~520	200~300
가격(SS400 기준)	2.0	1	2.0

(나) 고인성 강재 재료특성 시험

① 인장시험

㉮ 인장시험편 및 가력장치

인장시험은 KS B 0801의 제4호 시험편(환봉시험편)을 제작하여 시험을 실시하였다(그림 3.2.3.12 참조).

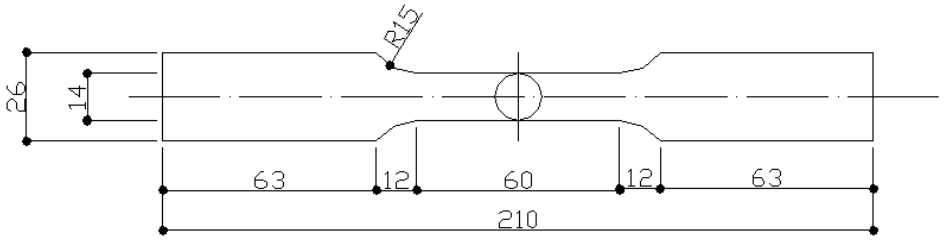


그림 3.2.3.12 인장시험편

일반적인 재료특성에 대해서는 기존연구를 통하여 표 3.2.3.1과 같이 밝혀졌기 때문에, 본 시험에서는 가력속도를 변수로 하여 실시하였다. 최저가력속도 0.05mm/s에서 최고 1.00 mm/s를 변화시키면서 속도에 따른 재료의 특성상태를 파악하고자 하였다.

㉯ 인장시험 결과

표 3.2.3.2과 그림 3.2.3.13은 각각 인장시험결과와 하중-변형곡선 및 넥킹현상, 파단의 전형적인 형태를 나타낸 것이다. 또한, 그림 3.2.3.14는 재료의 특성값들을 알기 쉽게 정리한 그래프이다. 인장시험결과 항복강도는 310~338MPa의 범위를 나타내었고, 인장강도는 719~840MPa의 범위를 나타냈다. 따라서, 항복비는 40~45%의 분포를 나타낸다. 이는 기존강재의 항복비에 비해서 매우 낮은 값을 갖고 있음을 알 수 있다. 이는 항복이후에도 강도상승이 매우 상승할 수 있기 때문에 안전적인 측면에서 효과적이라고 할 수 있다. 또한, 연신율은 표 3.2.3.2에 나타난 것과는 다르게 45%이상을 나타내는 것을 알 수 있다. 이는 기존의 저항복점강과 거의 비슷한 값이다. 따라서, 고감쇠 강재의 경우 강도가 크면서 연신율도 크기 때문에 지진하중이나 바람하중 등에 저항하는 에너지 흡수능력이 매우 클 것으로 기대된다.

표 3.2.3.2 인장시험결과

시험편	가력속도 (mm/s)	항복강도 (MPa)	인장강도 (MPa)	항복비 (%)	연신율 (%)
No.1	0.05	330	775	43	49
No.2	0.10	327	719	45	47
No.3	0.25	310	730	42	50
No.4	0.50	323	729	44	45
No.5	0.75	338	840	40	44
No.6	1.00	319	765	42	47

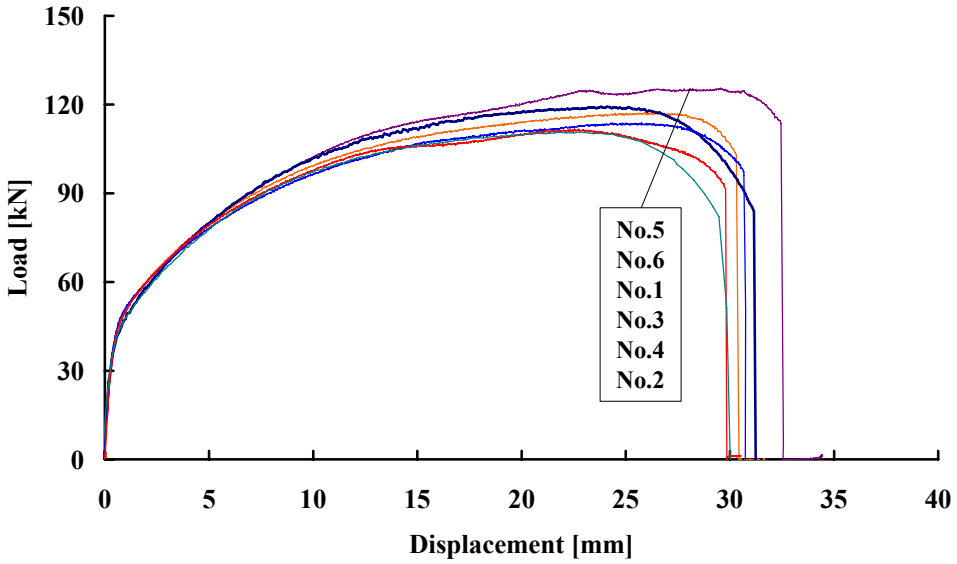
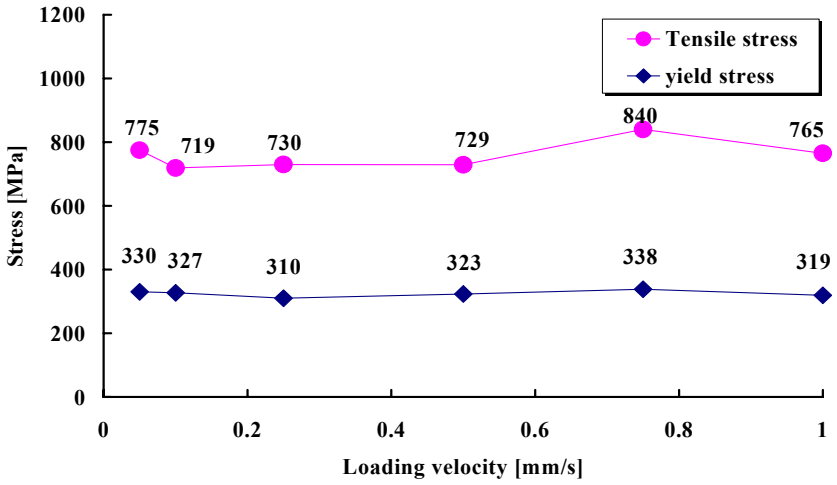
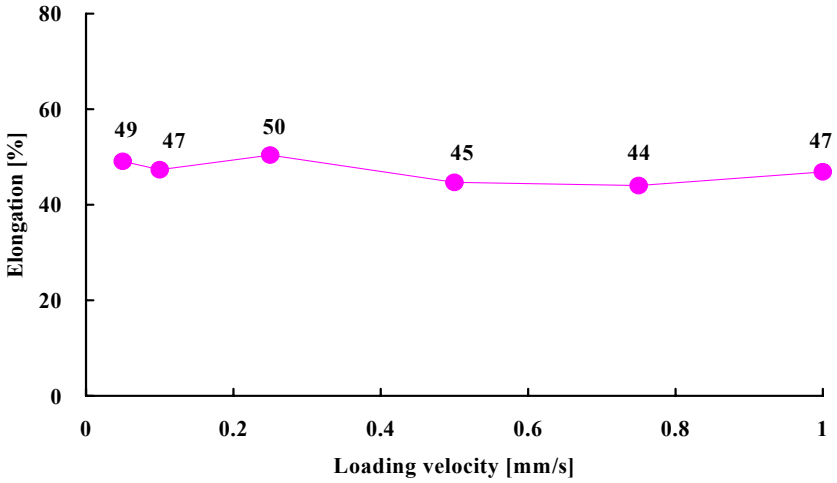




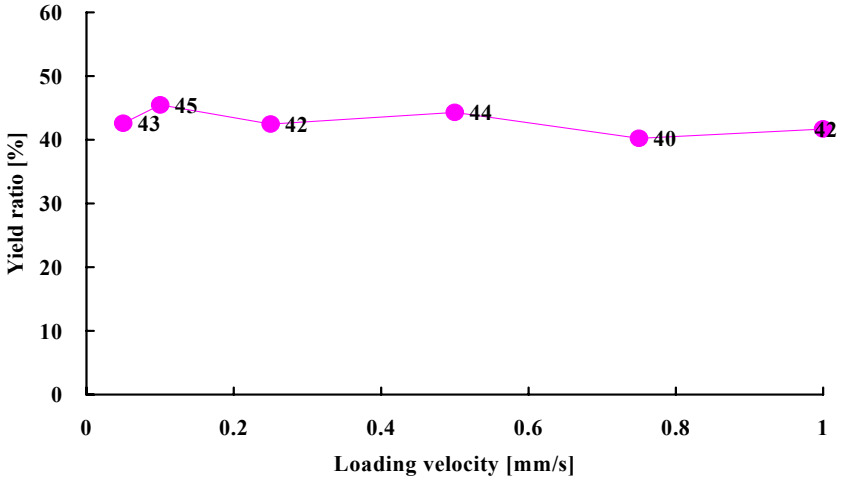
그림 3.2.3.13 인장시험 결과; 하중-변위 관계 및 파단사진



(a) 인장 및 항복강도



(b) 연신율



(c) 항복비

그림 3.2.3.14 인장시험결과

② 정진폭/점증진폭 반복가력 실험

인장시험편과 같은 형태와 사이즈를 갖는 시험편을 사용하여 정진폭 및 점증진폭 반복가력시험을 수행하였다. 표 3.2.3.3은 시험체 일람 및 에너지 흡수량을 정리해 놓은 것이다. 정진폭 시험체의 경우 모두 4개의 시험체로 진폭은 1.0~10%의 변형율을 목표로 가력하였고, 점증진폭의 경우는 6개의 다른 진폭방법으로 가력하였다. 그림 3.2.3.15는 각 시험편의 응력도-변형도 관계를 나타낸 것이고, 그림 3.2.3.16은 에너지 흡수량을 비교한 것이다. 마찬가지로 그림 3.2.3.17은 점증진폭 가력을 실시한 시험체의 응력-변형도 곡선이고, 그림 3.2.3.18은 각 에너지 흡수량을 막대 그래프로 나타낸 것이다. 가력방법과 상관없이 시험결과 진폭이 작을수록 많은 에너지를 흡수하고 있음을 알 수 있다. 이는 골격곡선에서 큰 에너지를 갖는 시험체는 전체적인 에너지 흡수능력이 떨어짐을 의미한다고 할 수 있다.

표 3.2.3.3 반복가력시험 요약

시험편	진폭(%)	에너지 흡수량 (kN*mm)
No.1C	1.0	78.26
No.2C	2.5	23.36
No.3C	5.0	16.24
No.4C	10.0	5.50
No.5C	점증진폭1	11.25
No.6C	점증진폭2	7.47
No.7C	점증진폭3	3.33
No.8C	점증진폭4	14.06
No.9C	점증진폭5	11.95
No.10C	점증진폭6	7.97

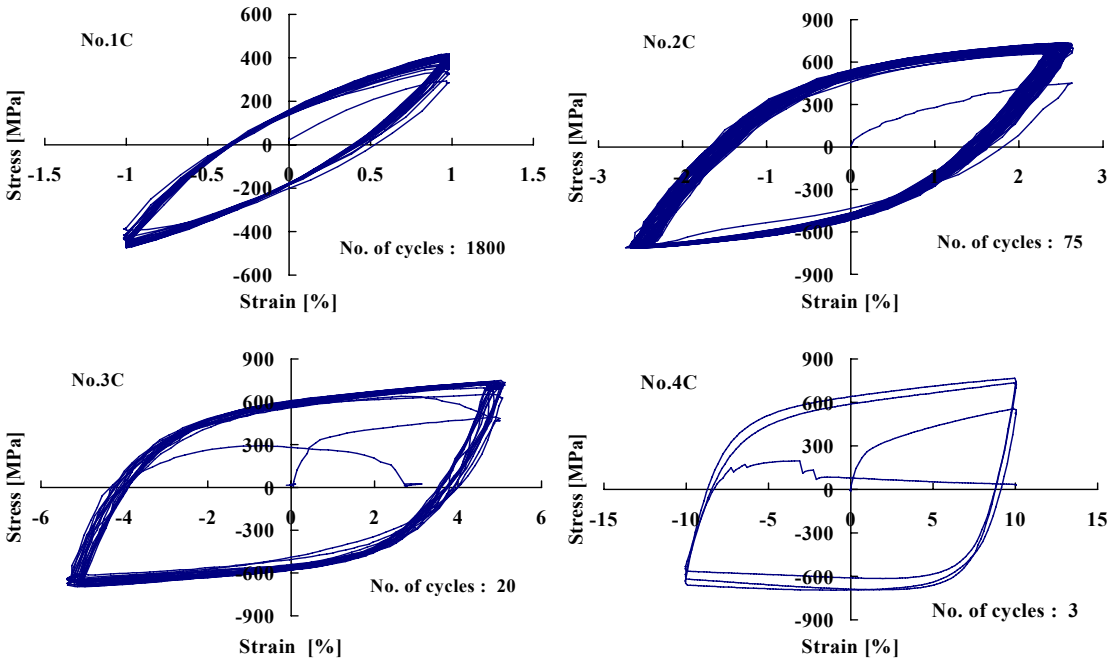


그림 3.2.3.15 응력-변형도 관계(정진폭 시험)

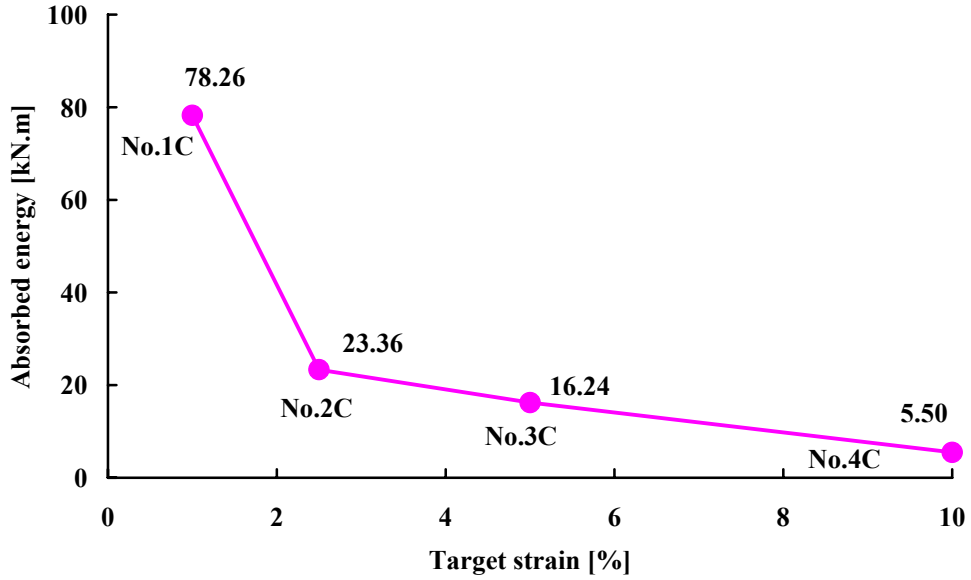


그림 3.2.3.16 에너지 흡수량(정진폭 시험)

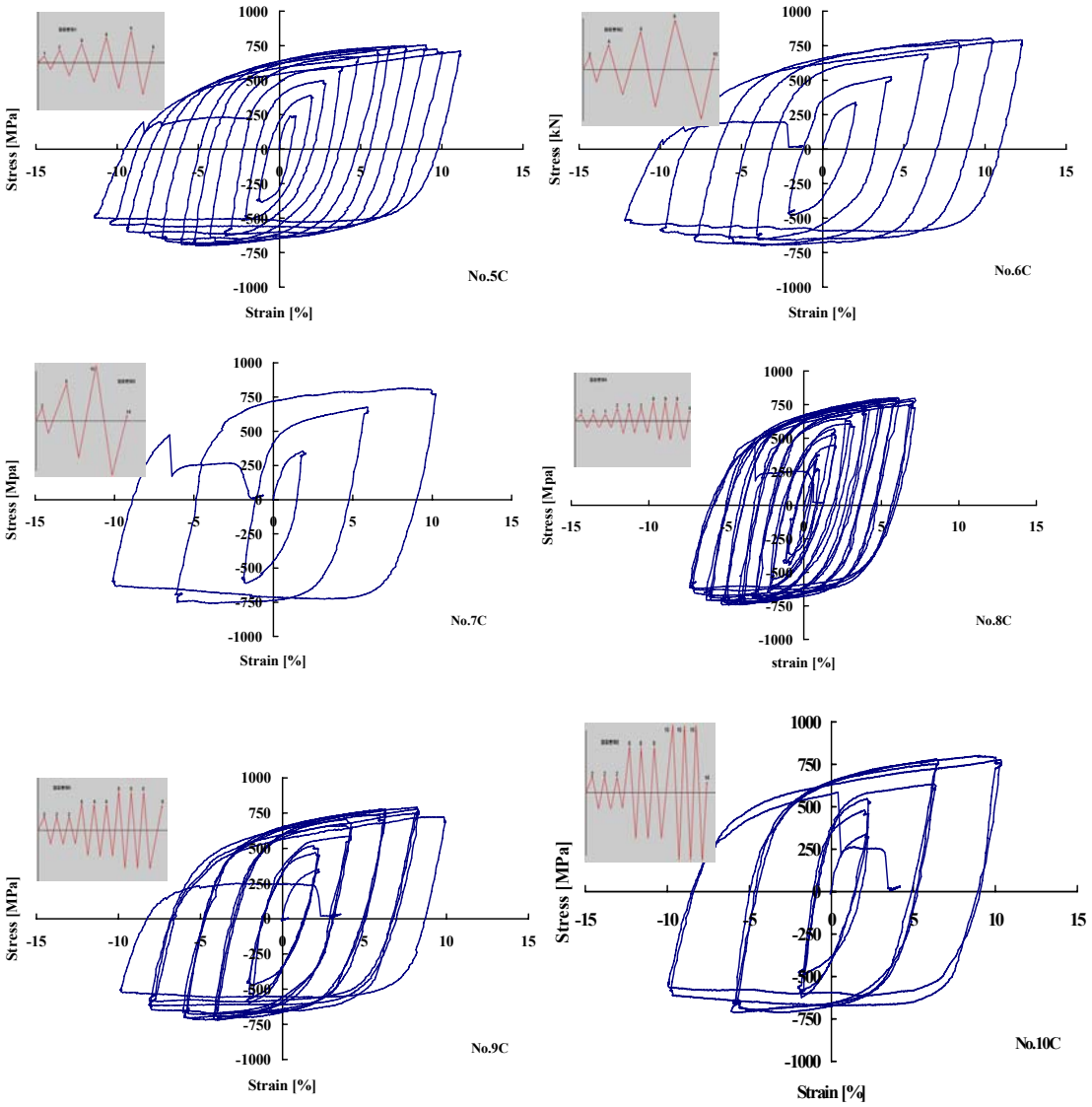


그림 3.2.3.17 응력-변형도 관계(점증진폭 시험)

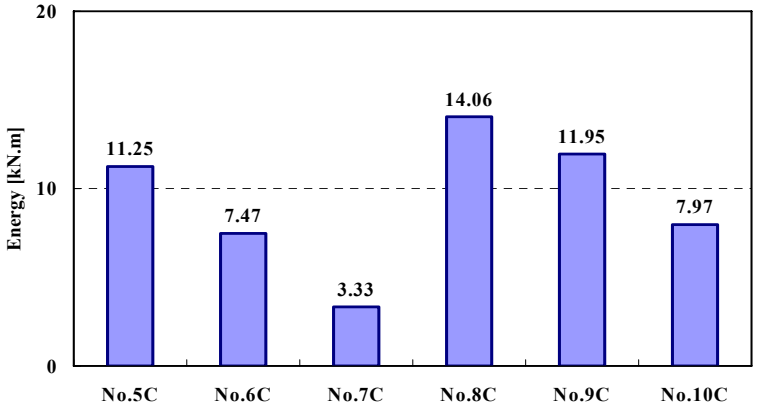


그림 3.2.3.18 에너지 흡수량(점증진폭 시험)

(다) 고인성 강재 판재의 재료특성 시험

① 인장시험

㉮ 인장시험편 및 가력장치

인장시험은 KS B 0801의 제1호 시험편(판재시험편)을 제작하여 시험을 실시하였다(그림 3.2.3.19 참조).]

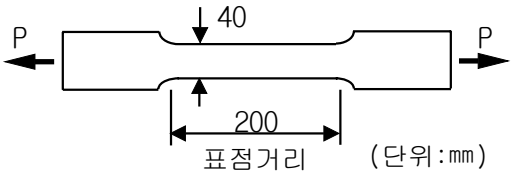


그림 3.2.3.19 1호 인장시험편



그림 3.2.3.20 1호 시험편 가력상황

본 시험에서는 가력속도를 변수로 하여 실시하였다. 최저가력속도 0.01mm/s에서 최고 20.0mm/s를 변화시키면서 속도에 따른 재료의 특성상태를 파악하고자 하였다. 또한 건축구조에서 일반적으로 사용되는 SS400강종을 비교 평가하였다.

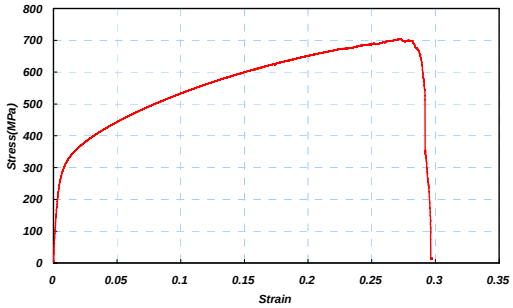
㉯ 인장시험 결과

표 3.2.3.4와 그림 3.2.3.21~3.2.3.22은 각각 인장시험결과와 하중-변형곡선 및 넥킹현상, 파단의 전형적인 형태를 나타낸 것이다. 또한, 그림 3.2.3.23은 재료의 특성값들을 알기 쉽게 정리한 그래프이다. 인장시험결과 고인성 강재의 항복강도는 348~352MPa의 범위를 나타내었고, 인장강도는 706~801MPa의 범위를 나타냈다. SS400의 경우 항복강도는 335MPa, 인장강도는 451MPa를 나타내었다. 고인성강재의 항복비는 44~50%의 분포를 나타낸다. 이는 SS400강재의 항복비인 0.74에 비해서 매우 낮은 값을 갖고 있음을 알 수 있다. 이는 항복이후에도 강도상승이 매우 상승할 수 있기 때문에 안정적인 측면에서 효과적이라고 할 수 있다. 또한, 연신율은 가력속도의 영향에 민감하게 반응하였다. 가력속도가 0.1mm/s일 경우 연신율은 0.31로 SS400강재와 거의 동일한 값을 나타낸 반면 가력속도가 10.0mm/s와 20.0mm/s로 증가할 경우 연신율이 0.47과 0.48로서 향

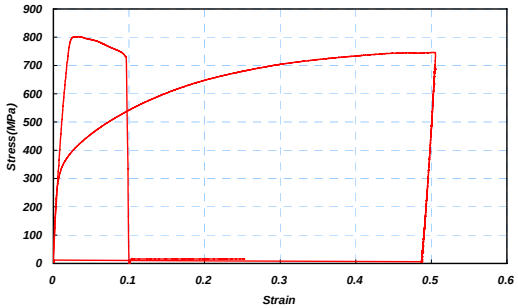
상되었다. 따라서, 고인성 강재(판재)의 경우 강도가 크면서 연신율도 크기 때문에 지진하중이나 바람하중 등에 저항하는 에너지 흡수능력이 매우 클 것으로 기대된다.

표 3.2.3.4 인장시험결과

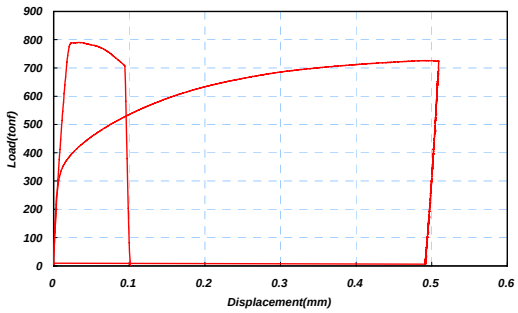
No	Specimen	Loading V (mm/s)	k (MPa)	σy (MPa)	σu (MPa)	Y.R.	elongation (%)
1	DA-0.1	0.1	52504	348	706	0.50	0.31
2	DA-10.0	10.0	63005	351	801	0.44	0.47
3	DA-20.0	20.0	62616	352	790	0.44	0.48
4	SS400	20.0	74449	335	451	0.74	0.29



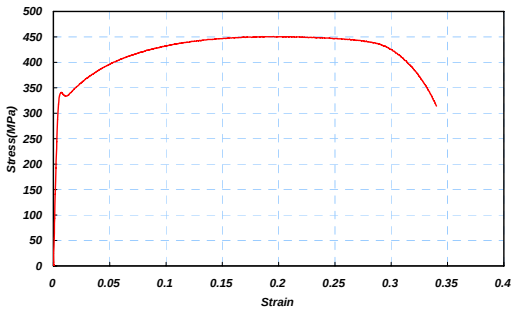
(a) DA-0.1



(b) DA-10.0



(c) DA-20.0

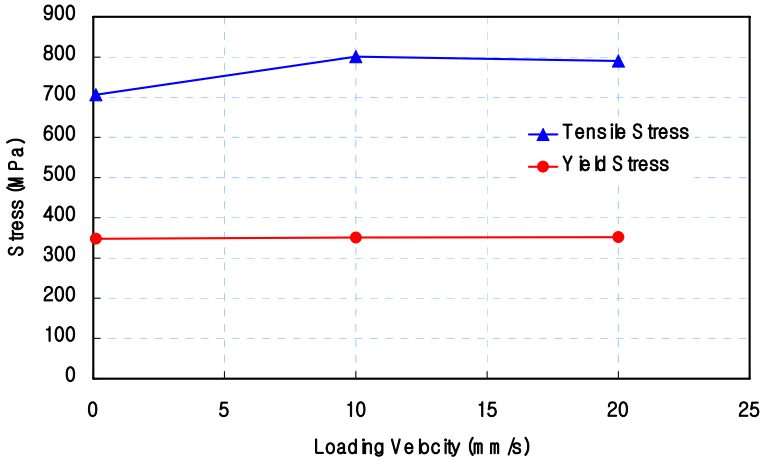


(d) SS400

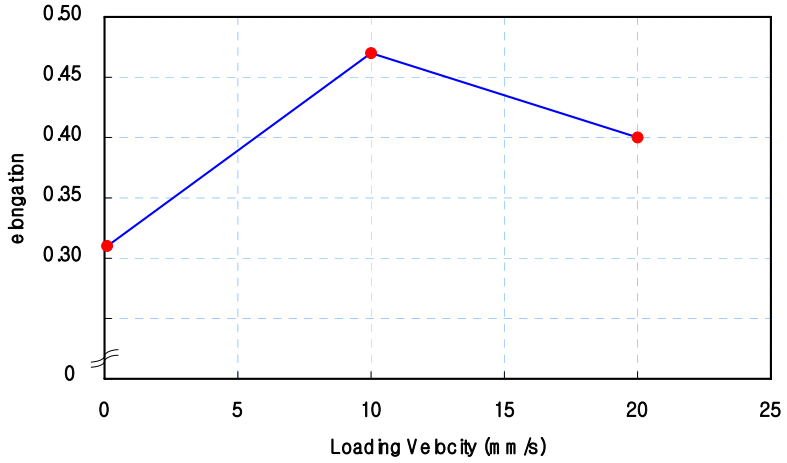
그림 3.2.3.21 가력속도에 따른 응력-변형도 곡선



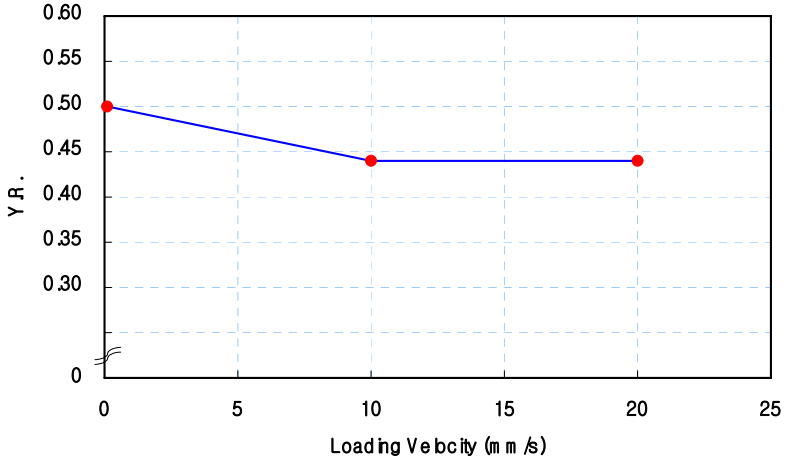
그림 3.2.3.22 파단사진



(a) 인장 및 항복강도



(b) 연신율



(c) 항복비

그림 3.2.3.23 인장시험결과

(라) 고인성 강재의 충격성능 시험

강재는 정적인 외력을 받는 경우에는 충분한 연성이 발휘되어 소성변형이 진행된 후 연성 파괴되는 양상을 보인다. 그러나 이러한 연성파괴의 특성을 가지는 강재에서도 저온상태에서 순간적으로 큰 응력이 작용하면서 다른 여러 가지 요인들이 중복되면 부재에 작용하는 평균응력이 항복강도 이하에서도 파괴된다. 이러한 파괴현상을 취성파괴라 하며 거의 소성변형을 동반하지 않고 순간적으로 파괴되는 특징을 보인다.

취성파괴는 다음의 3가지 조건이 동시에 만족되는 경우에 한해서 발생하게 된다.

① 인장응력의 존재 :
지진 등에 의한 충격적인 큰 인장외력 작용

② 응력집중 :
노취부 등과 같은 결함부위 혹은 형상적인 불연속 부위에서의 응력집중

③ 강재의 저 인성 :
파괴에 대한 성능(저항력)이 약한 재료(강재와 접합부)

3가지 조건 가운데 하나의 조건이라도 만족하지 않으면 취성파괴는 발생하지 않는다. 예를 들어 지진이 발생하지 않는다거나, 응력집중 부위가 없다거나, 재료가 파괴성능이 뛰어난 경우에는 취성파괴가 발생하지 않는다. 이상과 같은 강재의 파괴에 대한 저항성을 나타내는 지표로서 샬피 흡수에너지(노치인성)가 이용된다. 이 값은 샬피충격시험에 의해 얻어지는 값이며 시험에는 그림 3.2.3.24와 같은 시험편을 사용하였다. 이 시험편은 중앙에 V자형의 노치를 두게 되며 그림 3.2.3.25와 같은 햄머로 시험편에 충격을 가해 시험편을 파괴시킨다.

본 연구에서는 고인성 강재에 대하여 30개의 시험편을 제작하여 -50～40℃사이의 온도에서 충격성능 시험을 실시하였다. 시험편의 종류 및 결과값은 표 3.2.3.5에 나타내었으며 흡수에너지 V_E와 온도의 관계는 그림 3.2.3.26과 같이 된다. 고인성 강재의 0℃에서의 충격치 V_{E0}는 66.6J을 나타내었다. 또한 파면 천이

온도는 17℃를 나타내었다.

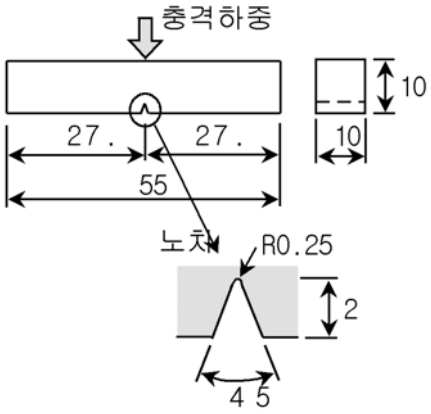


그림 3.2.3.24 v노치 샤르피 충격시험편

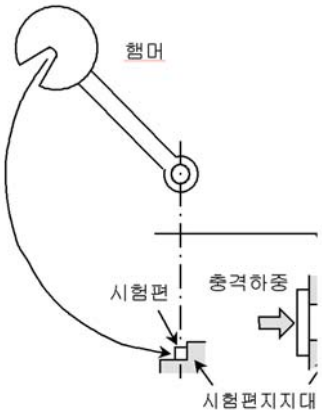


그림 3.2.3.25 충격시험

표 3.2.3.5 충격성능 시험 결과

No	Edge	Temp.	N	E-Unit	Notch	Size	Imp Min	Angle	Energy
1	2R	40	3'L	J	2V	10		74.6	287.64
								83.6	243.29
								64.3	336.02
								Average	288.98
2	2R	30	3'L	J	2V	10		75.9	281.32
								81.1	255.74
								76.9	276.44
								Average	271.17
3	2R	20	3'L	J	2V	10		100.4	159.26
								97.8	172.16
								90.2	210.21
								Average	180.54
4	2R	10	3'L	J	2V	10		107.1	79.66
								111.2	56.15
								100.5	63.84
								Average	130.83
5	2R	0	3'L	J	2V	10		117.2	79.66
								122.6	56.15
								120.8	63.84
								Average	66.55
6	2R	-10	3'L	J	2V	10		125.1	45.72
								125.7	43.26
								125.2	45.31
								Average	44.76
7	2R	-20	3'L	J	2V	10		128.3	32.83
								129.7	27.36
								128.5	32.04
								Average	30.74
8	2R	-30	3'L	J	2V	10		130.9	22.76
								131.3	21.25
								130.5	24.29
								Average	22.77
9	2R	-40	3'L	J	2V	10		131.5	20.5
								131.9	19
								131.8	19.37
								Average	19.62
10	2R	-50	3'L	J	2V	10		132.7	16.02
								132.5	16.76
								132.3	17.51
								Average	16.76

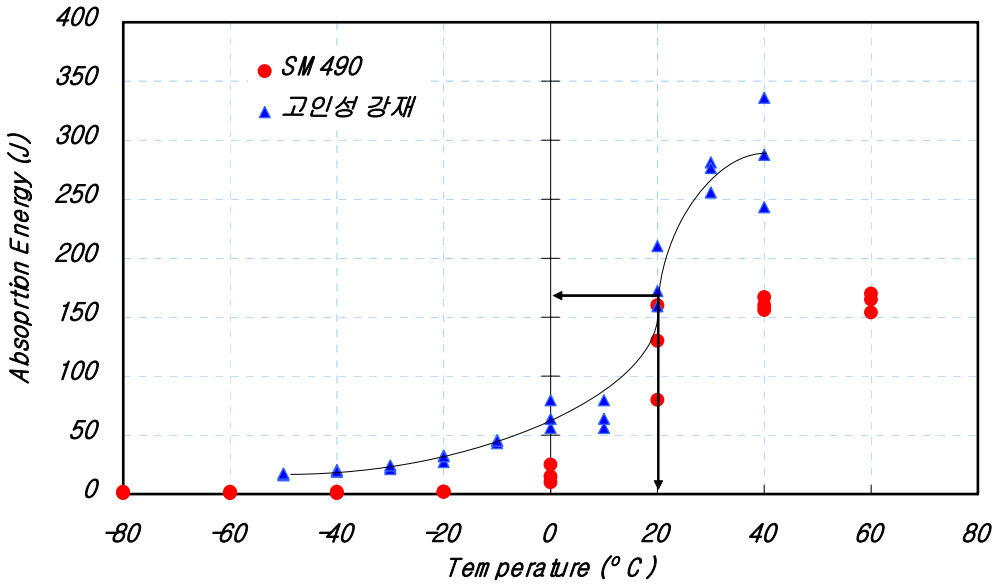


그림 3.2.3.26 샤르피 충격특성시험에 의한 천이온도 곡선

본 연구에서 고감쇠 강재의 재료특성을 살펴본 결과 기존의 연탄소강이나 용접구조용 압연강재에 비해서, 강도, 연신율 및 항복비 등의 기계적인 성질뿐만 아니라 감쇠성능, 충격특성도 탁월하게 우수한 것을 알 수 있었다. 본 재료를 건축물의 제진구조에 사용할 경우 매우 효과적인 결과를 발휘할 것으로 판단된다.

(3) 고인성 강재의 에너지 흡수능력 평가

본 연구에서 목표로 하는 면진구조용 강재댐퍼에서는 축방향력은 거의 작용하지 않고 주로 전단력과 휨력에 대해 저항할 것으로 판단된다. 또한 면진구조에서는 적층 고무와 면진구조용 댐퍼가 설치되는 면진층에서 변형 및 에너지가 집중되므로 면진구조용 강재댐퍼는 일반 내진구조에서 요구되는 변형능력보다 훨씬 큰 소성변형능력 및 에너지 흡수능력이 요구된다. 따라서 면진구조용 강재댐퍼의 성능을 향상시키기 위해서는 기존의 강재보다 변형능력 뿐만 아니라 에너지 흡수능력이 높은 고인성 강재가 요구된다.

따라서 본 연구에서는 개발된 고인성 강재의 에너지 흡수능력을 평가하기위하여 주로 전단력을 받는 실험체를 계획하여 그 성능을 평가하였다. 그리고 기존에 주로 사용되었던 연강(mild steel)중에 에너지 흡수능력이 비교적 높은

SS400강재의 에너지 흡수능력과 비교·분석 하고자 한다.

(가) 실험체 계획

전단실험체의 형상은 그림 3.2.3.27에 나타나 있다. 실험에 사용된 강재는 봉재를 이용한 것으로서 판재에 용접하여 전단을 받도록 하였다. 실험에 사용된 봉재의 재료는 고인성강재와 SS400 이고, 표 3.2.3.6에 강재 인장시험결과를 나타냈다.

표 3.2.3.7에 실험체 일람을 나타냈다. 모든 실험체의 형태와 사이즈는 동일하나, 단, 가력패턴을 다르게 계획하였다. 모든 가력패턴은 고인성강재와 SS400이 일대일로 대응되게 하여 직접적인 비교가 가능하게 하였다.

이는 다양한 가력패턴에 따른 댐퍼의 에너지 흡수능력을 비교·평가 하고자 함에 따른 것이다.

이력댐퍼는 시험기(FTM)에 물릴 수 있는 지그와 양쪽의 엔드플레이트를 통하여 볼트접합에 의해 연결되도록 하였다. 가력은 표 3.2.3.7과 그림 3.2.3.28에 나타낸 것과 같이 단조가력을 제외하면 6가지 방법의 가력패턴에 따라서 실시하였다. 그림 3.2.3.28에 나타낸 가력패턴은 단조가력실험을 실시한 후 실험에 의해서 구한 항복변위를 기준으로 한 것이다.

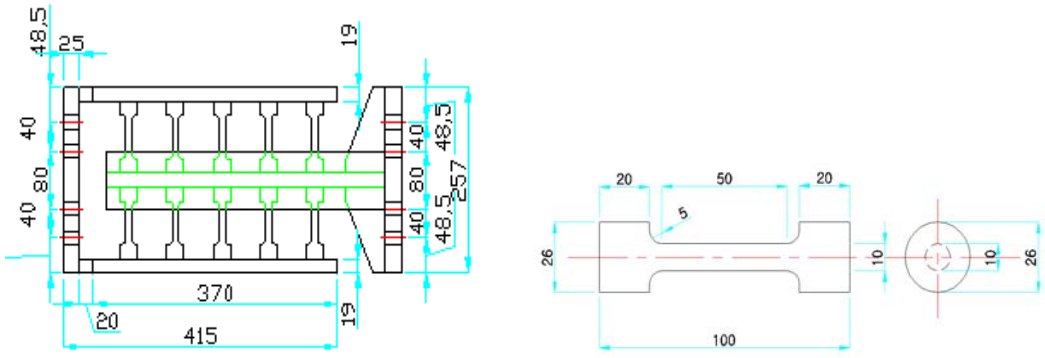


그림 3.2.3.27 전단실험체 상세

표 3.2.3.6 재료의 특성비교

시험편	항복강도 (MPa)	인장강도 (MPa)	항복비 (%)	연신율 (%)
고인성강재	330	775	43	49
SS400	348	518	74	23

표 3.2.3.7 실험체 일람

실험체	가력패턴	재료	봉지름 (mm)	봉길이 (mm)
No.1고인성강재	단조가력	고인성강재	10	60
No.2고인성강재	점증진폭1	고인성강재	10	60
No.3고인성강재	점증진폭2	고인성강재	10	60
No.4고인성강재	점증진폭3	고인성강재	10	60
No.5고인성강재	점증진폭4	고인성강재	10	60
No.6고인성강재	점증진폭5	고인성강재	10	60
No.7고인성강재	점증진폭6	고인성강재	10	60
No.1SS	단조가력	SS400	10	60
No.2SS	점증진폭1	SS400	10	60
No.3SS	점증진폭2	SS400	10	60
No.4SS	점증진폭3	SS400	10	60
No.5SS	점증진폭4	SS400	10	60
No.6SS	점증진폭5	SS400	10	60
No.7SS	점증진폭6	SS400	10	60

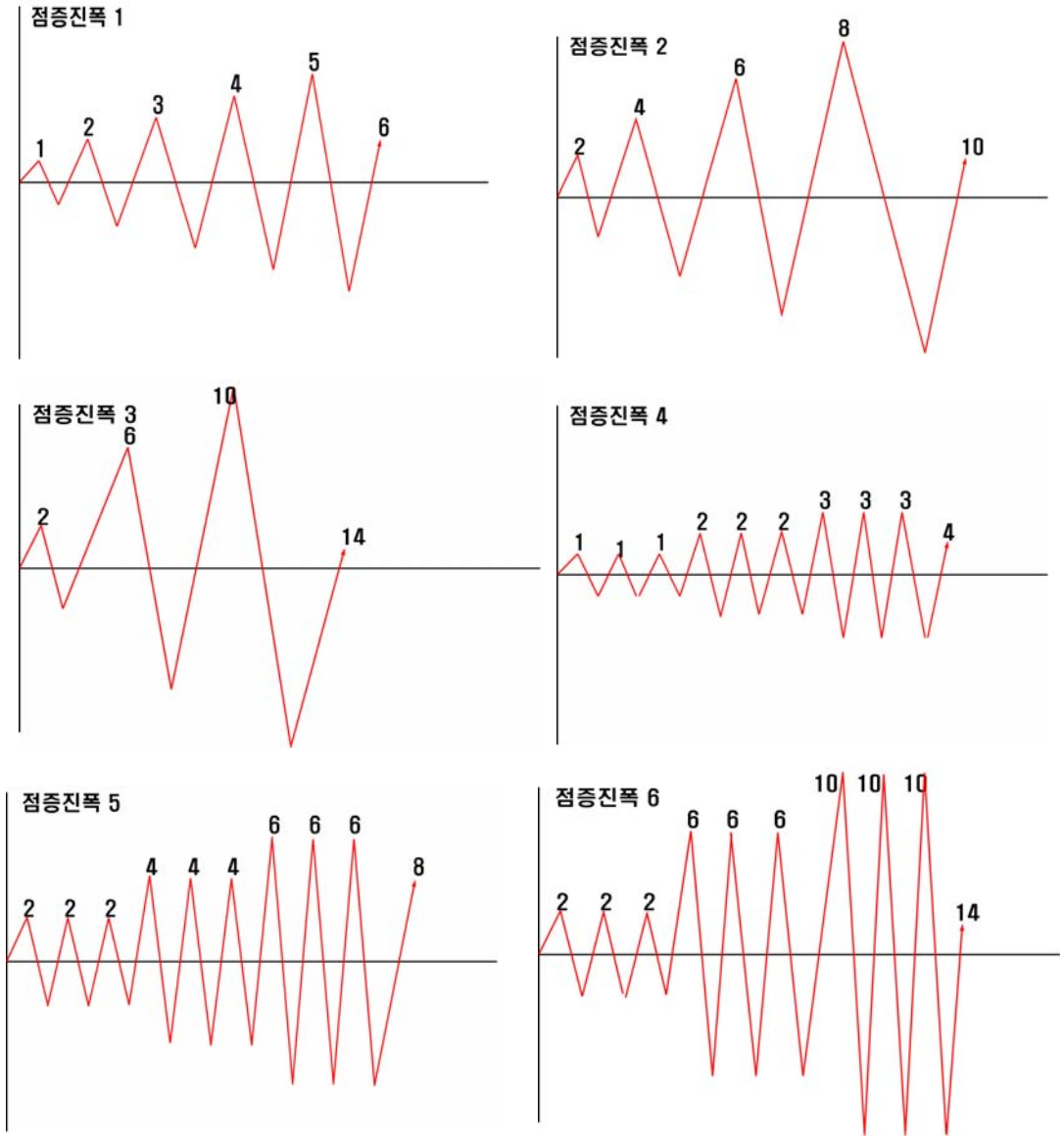
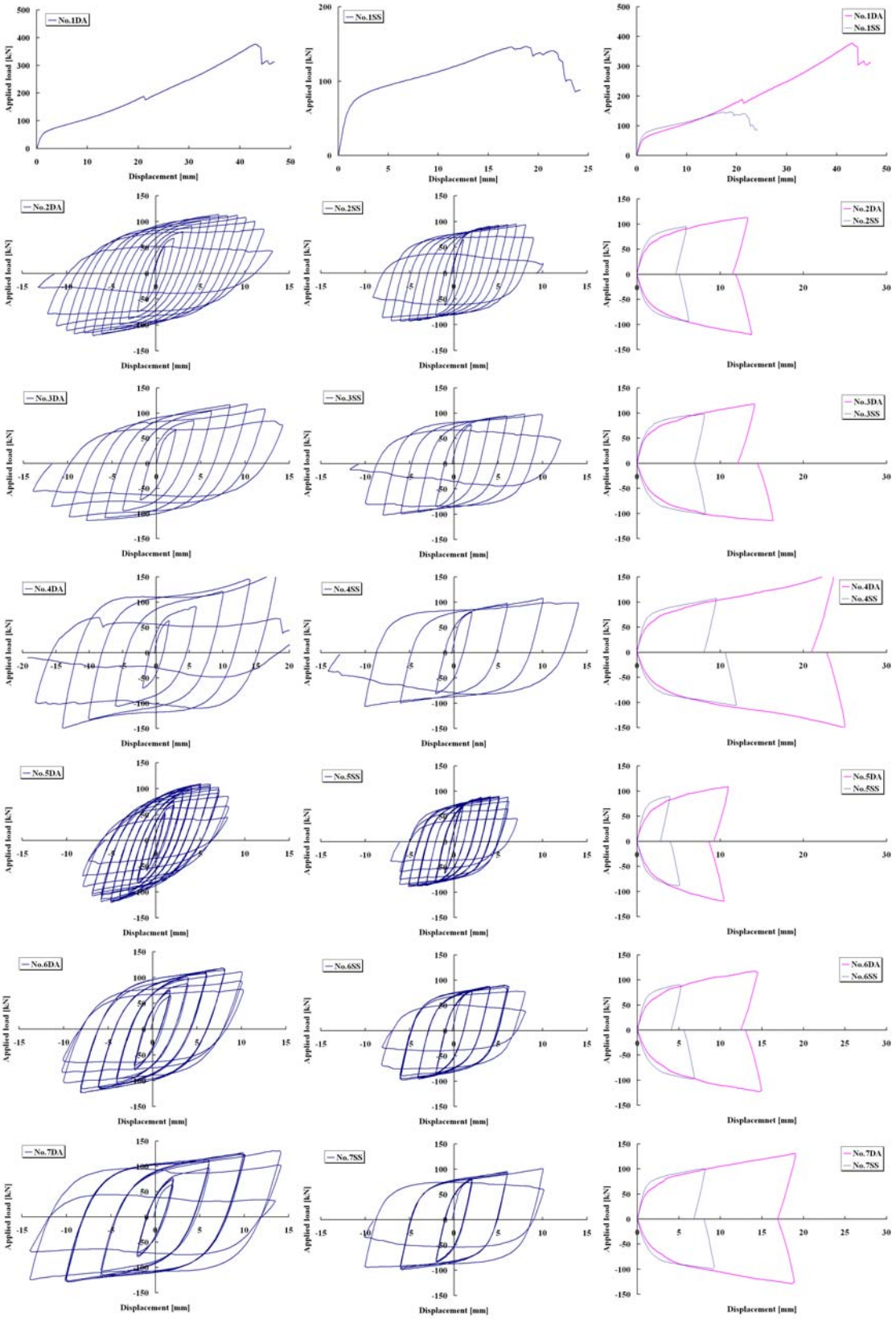


그림 3.2.3.28 가력패턴

(나) 실험결과

① 전체거동

실험체의 하중-변위관계의 일부를 그림 3.2.3.29에 나타냈다. 댐퍼의 이력거동은 고인성강재(그림 3.2.3.29(a))나 SS400재(그림 3.2.3.29(b)) 모두 방추형의 안정된 형상을 나타냈다. 그러나, 내력 및 변형능력이 SS400에 비해 고감쇠 강재가 매우 우수한 것으로 보인다. 그림 3.2.3.29(c)는 각 하중-변위 이력루프의 골격곡선을 나타낸 것이다. 골격곡선은 구조물의 변형능력을 비교하는 지수로 사



(a) 고인성강재의 하중-변위관계 (b) SS400의 하중-변위관계 (c) 골격곡선의 비교

그림 3.2.3.29 하중-변위 관계

용된다. 골격곡선을 비교한 결과 SS400재에 비해서 고인성강재의 경우 2배 이상의 변형능력을 나타냄을 알 수 있다. 이는 재료의 특성상 표 3.2.3.7과 같이 SS400에 비해서 고인성강재의 연신율이 2배 이상인 결과를 반영한 것이라고 할 수 있다. 그림 3.2.3.30은 전체의 골격곡선의 무차원화 결과를 나타낸 것이다. 실선은 고인성강재의 골격곡선을, 점선은 SS400의 골격곡선을 나타낸 것이다. 두 재료 모두 초기강성은 비슷하지만, 항복후의 강성은 고인성강재가 약간 큰 것으로 나타났다. 항복내력을 구한결과, 고인성강재에 비해 SS400에 비해 약간 큰 값을 나타냈지만 이는 재료값에서 기인한 것이다. 또한, 항복내력은 기존연구(A. B. Climent, 1997)에서 구한 이론값에 비해서 고인성강재는 약 18~25%, SS400재는 17~21% 크게 나타났으나 대체적으로 이론값에 잘 대응된다고 할 수 있다.

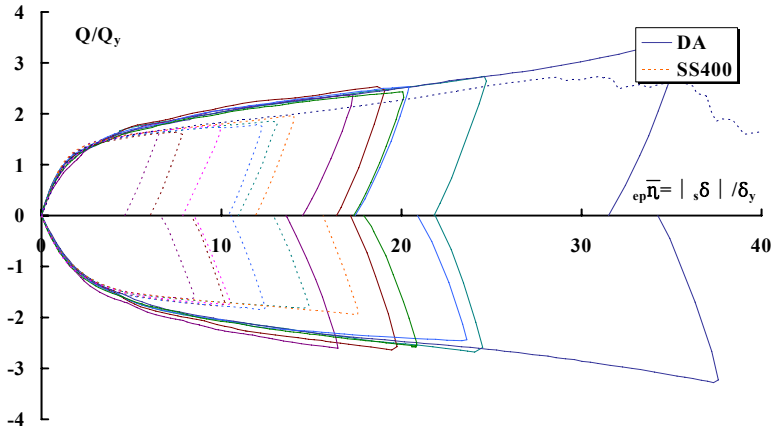


그림 3.2.3.30 골격곡선 비교

② 에너지 흡수능력

표 3.2.3.8은 댐퍼의 에너지흡수능력을 정리하여 나타낸 것이고, 그림 3.2.3.31은 에너지흡수능력(epη에 - Sη, Bη, η 관계)을 그래프로 나타낸 것이다. 종국누적소성변형배율은 고인성강재가 SS400에 비해서 44~78% 정도 우수한 것으로 나타났고, 최대 골격부 회전각을 항복변위로 나눈 외견상 종국누적변형배율은 고인성강재는 SS400의 1.76~2.25배를 나타냈다. 그림 3.2.3.31는 SS400에 비해서 고인성 강재재가 변형능력이나 에너지 흡수능력이 매우 우수함을 나타내 준다. 두 재료 모두 에너지 흡수능력에 관한 일정한 관계가 있는 것을 발견하였다. 즉, epη가 증가할수록 Sη는 증가하였지만, Bη나 η 는 감소하는 경

향을 나타냈다. 이러한 관계를 이후의 분석을 통해 정식화 한다면 고인성강재 전단실험체의 종국에너지 흡수능력을 알 수 있을 것으로 판단된다.

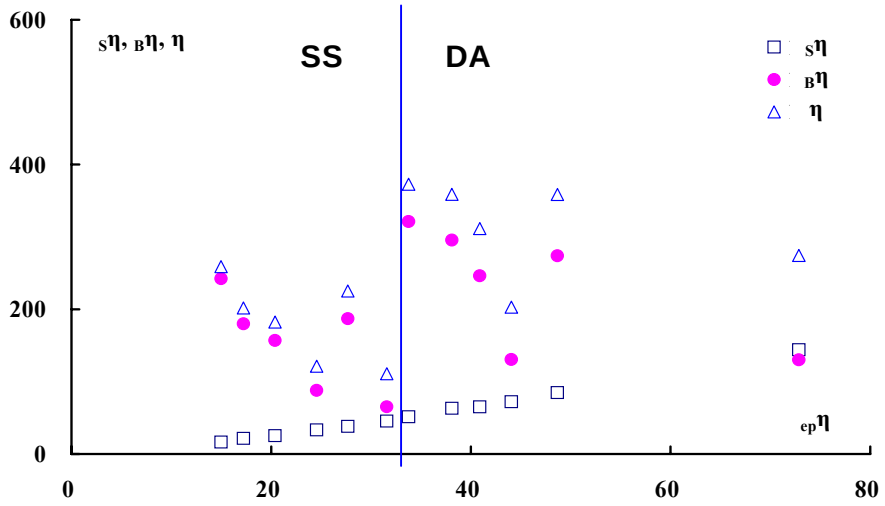


그림 3.2.3.31 SS재와 고인성 강재 비교

표 3.2.3.8 실험결과 정리

Specimen	epη	sη	Bη	η	Bη/sη
No.1고인성강재	56				
No.2고인성강재	41	65	246	311	3.8
No.3고인성강재	44	72	131	203	1.8
No.4고인성강재	73	144	130	274	0.9
No.5고인성강재	34	51	321	373	6.2
No.6고인성강재	38	63	296	359	4.7
No.7고인성강재	49	85	274	359	3.2
No.1SS	29				
No.2SS	20	25	157	182	6.2
No.3SS	25	33	88	121	2.6
No.4SS	32	46	65	111	1.4
No.5SS	15	17	242	259	14.6
No.6SS	17	22	180	202	8.3
No.7SS	28	38	187	225	4.9

◦ epη : 골격부의 외견상 종국누적변형배율(=(Isδp+ I+Isδp- I)/δy

◦ Sη : 골격부의 종국누적소성변형배율(=uWS/Qyδy)

◦ Bη : 바우싱거부의 종국누적소성변형배율(=uWB/Qyδy)

◦ η : 종국누적소성변형배율 (= Sη+Bη)

(4) 고인성강재의 감쇠성능평가

면진구조에서는 대지진이 발생하였을 때 내진성능이 향상되는 것은 이미 많은 연구를 통하여 증명되었다. 그러나 중소지진 및 풍하중에 대한 설계는 면진층에서도 주로 탄성에 머물도록 설계를 하기 때문에 이러한 하중이 작용하는 경우에는 거주성을 향상시키기 위하여 진동을 제어할 필요가 있다. 거주성을 향상시키기 위해서는 구조물의 감쇠성능이 주요한 영향인자로 작용하기 때문에 만약 에너지 흡수장치가 탄성범위내에서 감쇠성능이 있다면 면진구조의 성능을 향상시키기 위해 좋은 영향을 미칠 수 있다.

따라서 본 연구에서는 에너지 흡수장치용 강재를 고인성으로 하는 것 뿐만 아니라 감쇠성능을 가질 수 있도록 하는 것을 목표로 하였다. 본 절에서는 고인성강재의 감쇠성능을 평가하기 위하여 진동실험을 실시하였다.

(가) 실험체 계획

① 진동실험체 및 개념

그림 3.2.3.32은 고감쇠 강재의 감쇠특성 및 구조적 거동을 파악하기 위해 실시하는 진동대 실험체 및 개념도를 나타낸 것이다. 하부 고정판은 진동대 shaking table에 고정하고, 고감쇠 강재 기둥을 맞댐용접 하였다. 기둥부재는 약축방향으로 변위가 발생하도록 하였으며, 모두 6개의 기둥을 설치하여 비틀림이 발생하지 않도록 계획하였다.

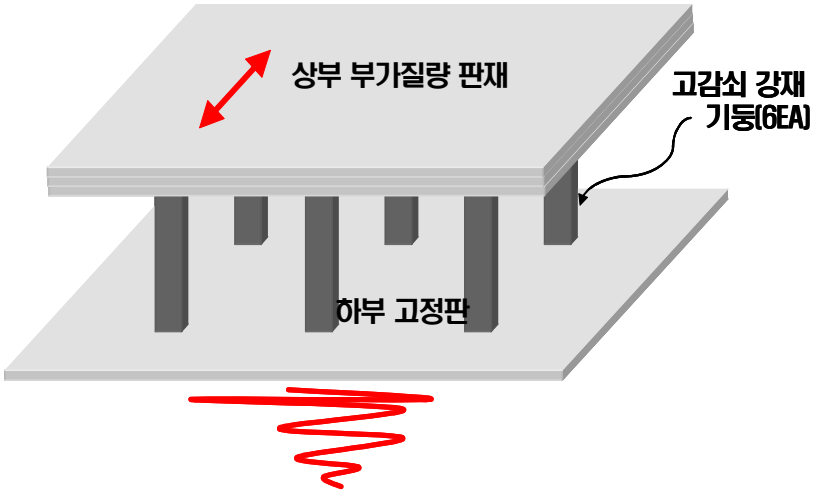


그림 3.2.3.32 진동대 실험체 및 개념도

② 고감쇠 강재 진동대 실험체 설계

본 실험의 설계에 반영된 고감쇠 강재 기둥의 단면은 20X40 mm를 사용하였다. 기둥의 하단부에 상단부까지, 즉, 기둥의 높이는 600 mm로 계획하였다. 본 연구에서 계획한 골조가 가지는 주기는 0.2 초를 목표로 설계하였다. 이를 바탕으로 구조물의 역학특성 및 가해야 할 부가질량 등을 아래와 같이 산정하였다.

· 목표주기 : $T = 0.2\sec$

$$T = 0.2 = 2\pi\sqrt{\frac{M}{K}}, \qquad \frac{M}{K} = \frac{0.04}{4\pi^2} = 0.001014$$

$$K = \frac{M}{0.001014} = 986.19M$$

· 고감쇠 강재 단면 : 20 x 40 mm X 6EA, $I = 16cm^4$

$$K = \frac{12EI}{60^3} = 1.806\ t/cm$$

$$M = \frac{1.806}{986.19} = 0.00189$$

· 상부부가 총 무게

$$W = 1.85tf$$

③ 실험방법

실험은 다음과 같이 3단계로 나누어 실시한다.

a. 자유진동 실험

b. 진동대 실험 - 탄성가진

c. 진동대 실험 - 소성가진

자유진동 실험은 변위 및 가속도의 감쇠상태를 바탕으로 탄성감쇠 특성을 파악하기 위해서 실시한다. 진동대 실험은 처음에는 탄성가진을 실시하여 고감쇠 강재 기둥의 탄성거동을 파악하고, 골조의 주기, 감쇠, 및 이력특성 등을 파악하고자 하였다. 탄성가진은 건축구조물에 풍하중이 가해졌을 때의 경우와 같이 탄성역에서 재료가 가지고 있는 감쇠성능을 잘 발휘하는가를 조사하기 위해 실시한다. 이후에 소성가진을 실시하여 고감쇠 강재가 가지고 있는 연성능력을 통해 발휘되는 에너지 흡수능력을 평가하고자 하였다.

그림 3.2.3.33은 진동대 실험체 상세 도면을 나타낸 것이다. 하부고정판은 진동대 바닥에 있는 볼트간격 300 mm를 M22볼트로 체결한 후, 계산된 부가무게, 1.85tf를 가력한다. 진동대 실험 중에 기둥붕괴로 인한 인명피해 및 기자재 손실을 줄이기 위해서 L 형강으로 받침대를 그림 3.2.3.33과 같이 제작하여 안전성을 고려하였다.

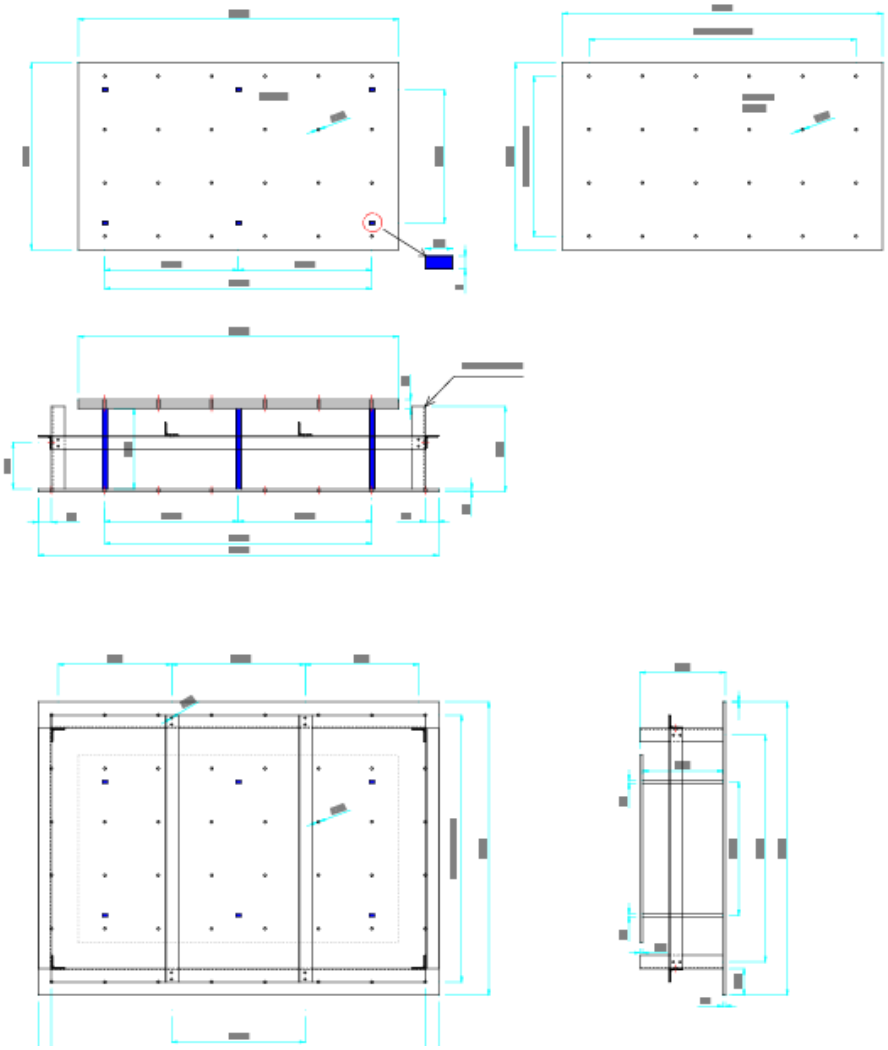


그림 3.2.3.33 진동대 실험체 상세

(나) 실험결과

진동대 실험을 위한 실험체셋팅 상황을 그림 3.2.3.34에 나타내었다. 아직 실지진파를 이용한 실험은 수행되지 않았으나 강제외력을 발생시켜 측정한 응답가속도 및 응답변위를 기존 강재를 이용한 경우와 비교하여 그림 3.2.3.35~36에 나타내었다.

그림 3.2.3.35에서 보는 바와 같이 실험체에 가해진 가속도는 기존강재와 고인성강재에서 거의 비슷하게 작용되었음을 알 수 있다. 그러나 그림 3.2.3.36에 나타낸 응답변위에서는 두 강재에 가해진 작용력이 거의 비슷함에도 불구하고 고인성강재의 초기변위가 크게 저하되었음을 알 수 있다.

또한 사인파에 의한 조화하중을 작용시킨 경우, 하중의 진동수의 변화에 따른 고인성강재의 응답변위저하율을 그림 3.2.3.37에 나타내었다. 여기서 알 수 있듯이 응답변위의 저하율은 약 40%에 이르고 있으며, 이를 등가감쇠의 크기로 환산하면 그림 3.2.3.38에서 보듯이 약 11.5%의 등가감쇠를 가지는 것으로 판단된다. 일반강재의 감쇠가 약 2%이고 철근콘크리트구조가 약 5%의 감쇠를 가지는 점을 고려할 때, 고인성강재를 사용한 경우에는 종래의 구조에 비해 진동성능제어능력이 크게 향상되어 거주성능을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.



그림 3.2.3.34 진동대 실험 세팅 상황

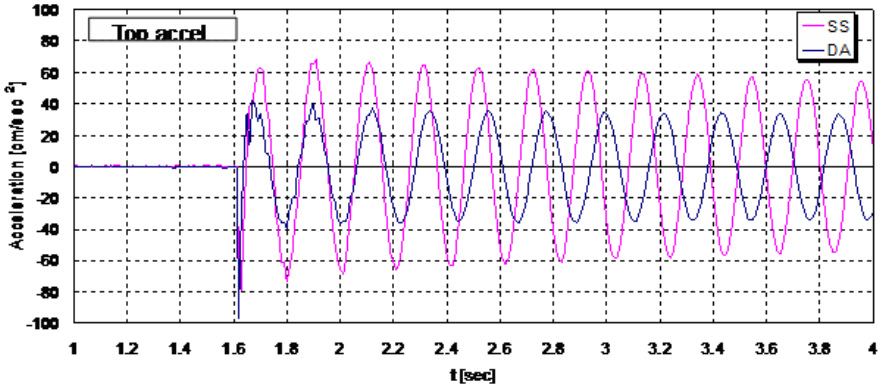


그림 3.2.3.35 고인성강재와 SS400의 응답가속도

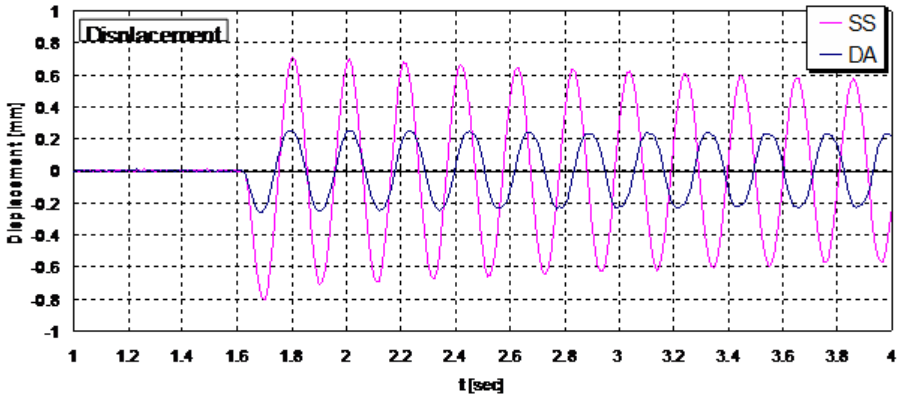


그림 3.2.3.36 고인성강재와 SS400의 응답변위

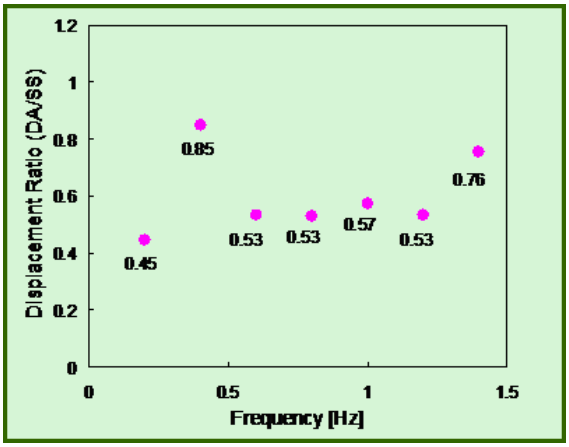


그림 3.2.3.37 진동수의 변화에 따른 고인성강재의 응답변위저하율

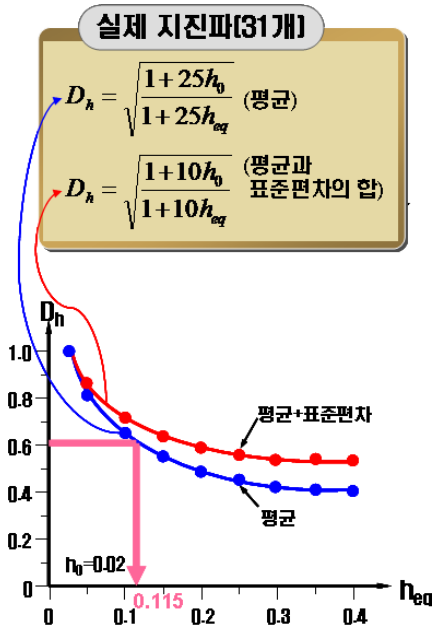


그림 3.2.3.38 등가감쇠

나. 고인성강재 이용한 에너지흡수장치의 형상개발

(1) 기존 에너지흡수장치의 유한요소해석

(가) 모델링

복합면진장치의 일부인 에너지흡수장치의 형상을 개발하기 위하여, 고인성 강재의 응력도-변형도 관계를 정식화하고, 변수해석을 통하여 에너지흡수장치의 최적 형상을 결정한다. 비선형 유한요소해석을 위하여 ANSYS 9.0 Multi-physics 프로그램을 사용하였다.

실제 응력상태를 고려하고 해석시간을 단축시키기 위하여, 평면응력요소(PLANE82 with 8 nodes)를 사용하였다. 또한 평면응력요소 적용의 타당성을 검증하기 위하여, 입체요소(SOLID45 with 8 nodes)를 적용한 해석결과와 비교하였다.

재료의 항복조건으로는 von Mises의 항복조건을 사용하고 hardening rule은 그림 3.2.3.39와 같은 isotopic hardening rule을 적용하였다. 재료 및 기하학적 비선형을 고려하여, 강재의 응력도-변형도 관계는 true stress - strain로 파단시까지 10개 구간으로 단순화하였다. 실제 하중조건과의 동일 및 수렴성의 향상을 위하여, 댐퍼 끝단부의 상의 node를 coupling하고 master node를 통한 변위제어 방식으로 작용하중을 모델링 하였다.

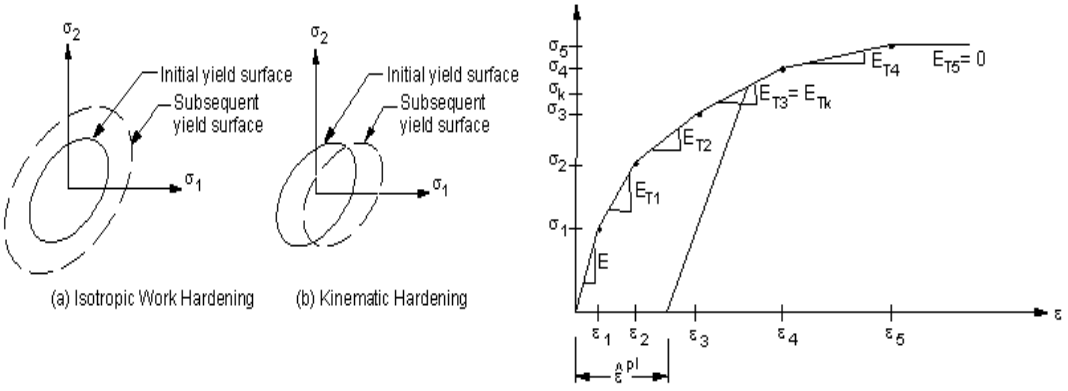


그림 3.2.3.39 Hardening Rules

(나) 고인성 강재의 응력도-변형도 관계의 정식화

고인성 강재의 응력도-변형도 관계는 일반 구조용 강재와 달리, 항복붕이 존재하지 않고 항복점이 명확히 정의되지 않는 특성이 있다. 본 연구에서는 고인성 강재의 이러한 특성을 고려하여, EC3에서 제안하고 있는 Ramberg-Osgood 함수로서 고인성 강재의 응력도-변형도 관계를 식 (3.2.3.1)과 같이 제안한다. 제안식은 고인성 강재의 소재인장 시험결과로부터 얻은 engineering stress-strain 관계를 식 (3.2.3.2)의 관계를 이용하여 true stress -strain 관계로 변환한 후, 제 정수들을 결정하였으며 실험결과와 비교하여 그림 3.2.3.40에 나타내었다.

$$\frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_0} = a\left(\frac{\sigma_t}{\sigma_0}\right)^b \tag{3.2.3.1}$$

여기서,

$$a = 1.1,\ b = 3.2$$

$$\sigma_0 = 215\ (\mathrm{MPa}),\ \varepsilon_0 = 0.001043$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_t &= \ln(1+\varepsilon_e) \\ \sigma_t &= \sigma_e(1+\varepsilon_e) \end{aligned} \tag{3.2.3.2}$$

여기서,

ϵ_e: engineering strain, ϵ_t: true strain
σ_e: engineering stress, σ_t: true stress

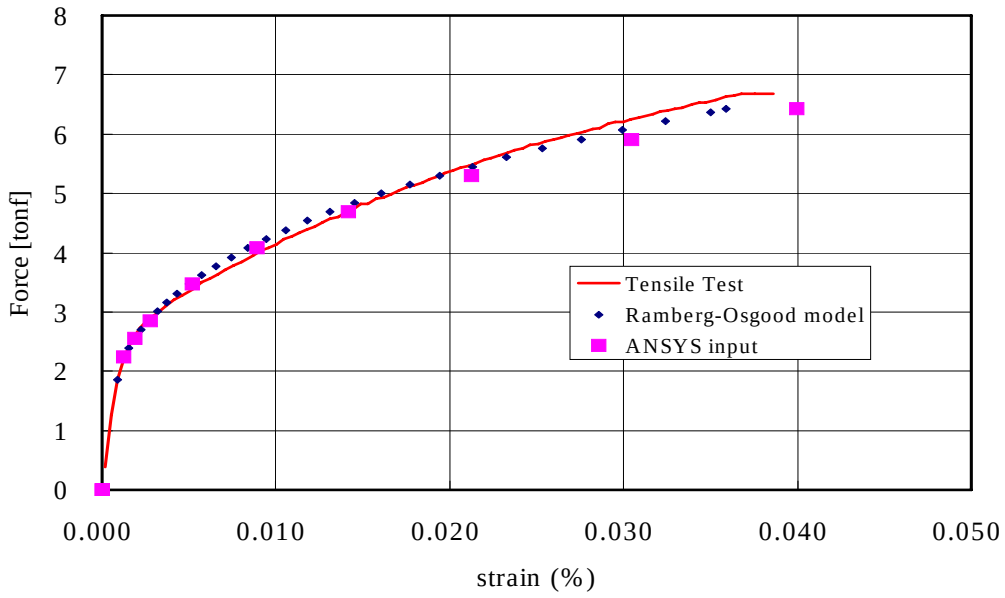


그림 3.2.3.40 인장시험결과와 제안식과의 비교

(다) 변수해석

해석에 사용된 주요변수는 에너지흡수장치의 높이에 대한 평판부의 길이로 설정하였다. 그림 3.2.3.41에서와 같이, 에너지흡수장치의 높이를 나타내는 정의하는 R과 평판부 길이 L의 비(L/R)로서, 1.0, 1.4, 1.8, 2.2, 2.6의 5종류로 설정하였다.

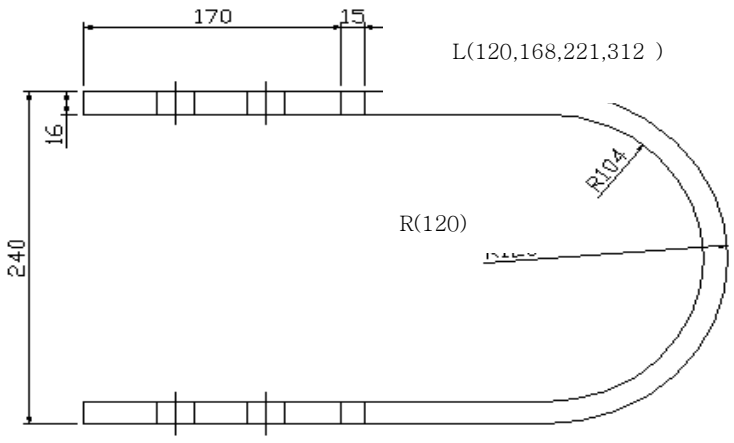


그림 3.2.3.41 해석에 사용된 주요변수

(라) 해석 결과

일반적으로 면진장치와 함께 설치되는 에너지흡수장치에 요구되는 최대 전단변형각 300% rad. 수준이다. 따라서 본 해석에서는 각 모델별 하중증분 구간을 동일하게 설정하고 해석을 수행하였다. 대표적인 유한요소해석 모델 및 종국변형상태는 그림 3.2.3.42와 같다.

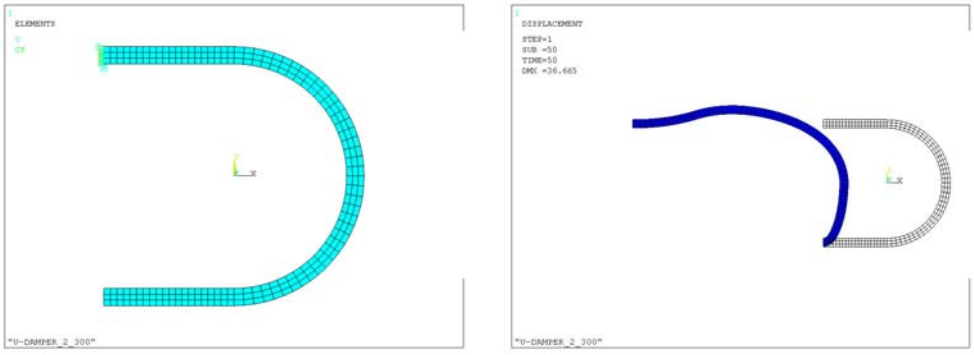
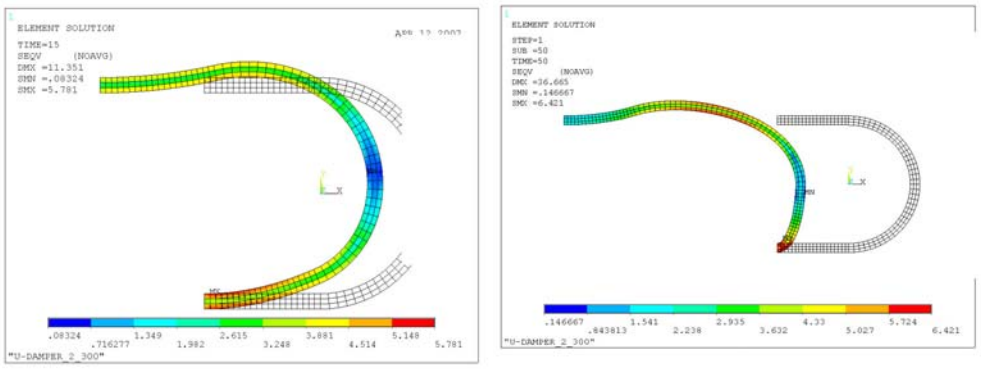


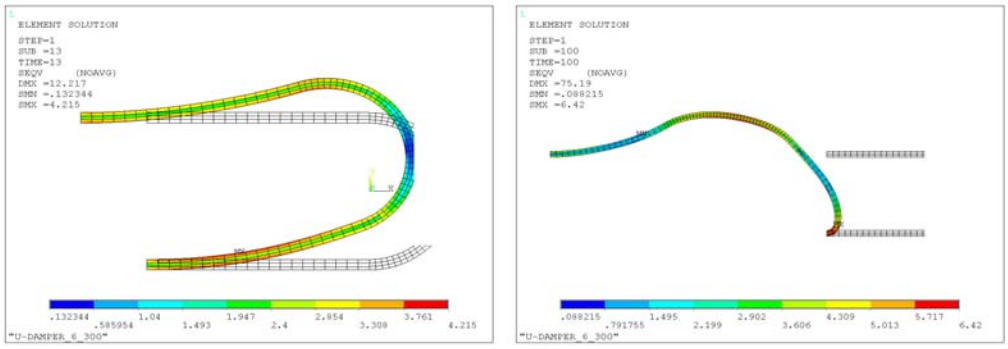
그림 3.2.3.42 유한요소모델 및 변형상태

가력은 에너지흡수요소 단부의 노드를 커플링 하여 마스터 노도를 전단변형각 300% rad.까지 x-축으로 수평이동시키는, 변위제어 방식을 선택하였다. 이를 통해 거기에 따른 응력집중분포와 최대응력위치를 확인하고자 하였다. L/R=1.0인 해석모델의 해석결과를 그림 3.43에 그리고 L/R=2.6인 해석모델의 해석결과를 그림 3.44에 나타내었다.



(a) 전단변형각 100% rad. (b) 전단변형각 170% rad.(종국상태)

그림 3.2.3.43 Von-Mises stress contour(L/R=1.0)



(a) 전단변형각 100% rad. (b) 전단변형각 300% rad.(종국상태)

그림 3.2.3.44 Von-Mises stress contour(L/R=2.6)

L/R=1.0인 해석모델은 전단변형각 170% rad. 수준에서 하부 고정단의 과도한 변형으로 해석이 중단되었으나, L/R=2.6인 경우 전단변형각 300% rad.까지 해석이 완료되었다. 전단변형각 100% rad. 수준에서 , 하부 고정단에 발생하는 조합응력은 L/R=1.0인 경우가 L/R=2.6인 경우보다 약 38%크게 나타나고 있다. 따라서 평판부의 길이를 증가시키는 것이 응력집중 완화에 효과적임을 알 수 있다.

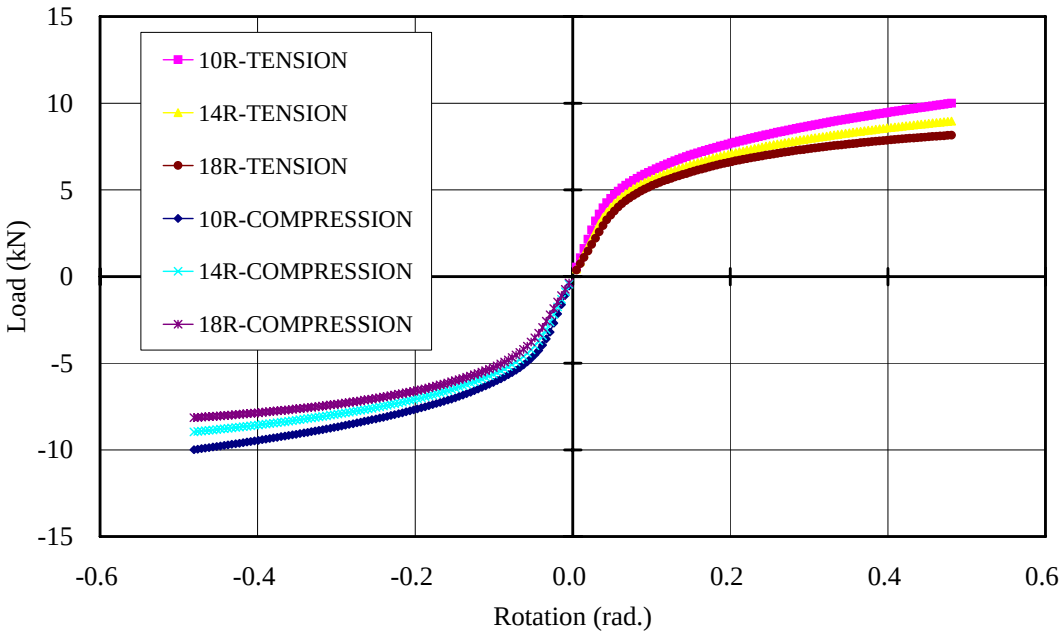


그림 3.2.3.45 인장-압축 거동 분석

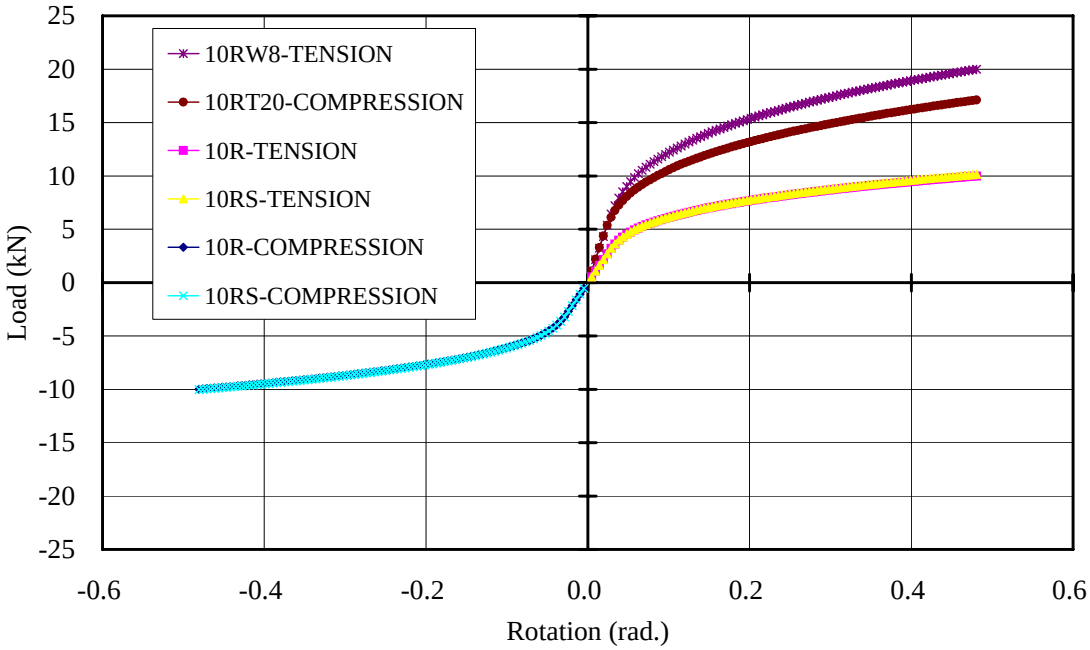


그림 3.2.3.46 변수해석 결과

에너지흡수장치에 발생하는 반복가력하에서 대칭적인 거동을 나타내고 있다 (그림 3.2.3.45 참조).

에너지흡수장치의 두께 및 폭의 변화에 따른 거동의 차이를 그림 3.2.3.47에 나타내었다. 에너지흡수장치에 발생하는 응력상태는 평면응력상태로서, 폭의 증가에 따라 내력이 비례적으로 증가함을 알 수 있다.

16mm 판재로 폭 40mm로 제작된 에너지 흡수장치와 비교하여, 판재의 두께를 20mm로 증가시키거나 판의 폭을 80mm로 증가시키면 내력면에 2배의 증가를 나타내었다. 따라서 폭의 증가보다는 두께의 증가가 보다 효과적임을 알 수 있다.

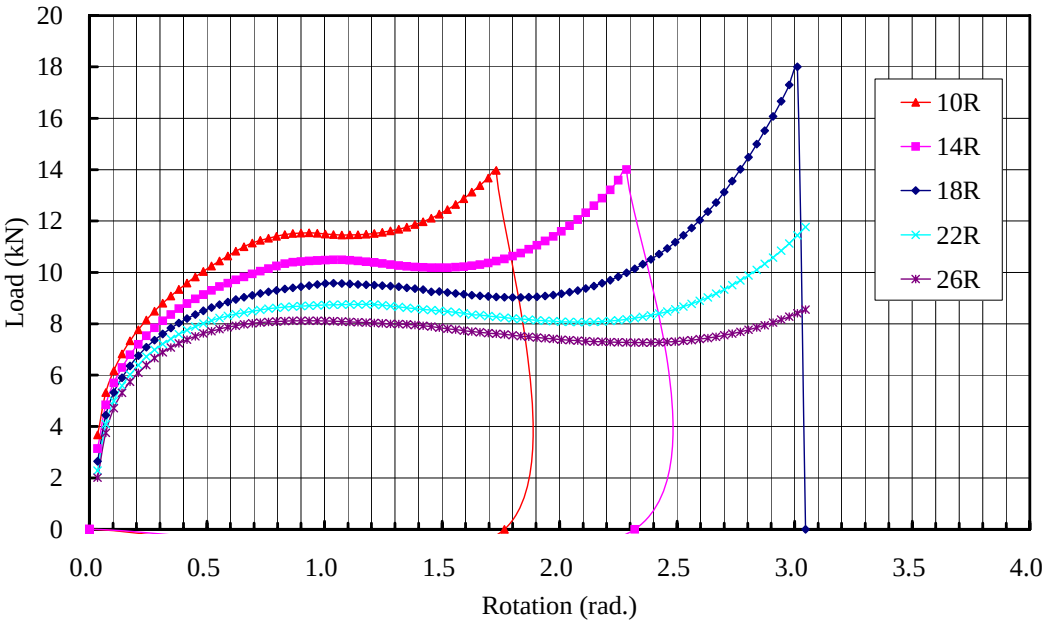


그림 3.2.3.47 H/R에 따른 하중-변형 관계(종국상태)

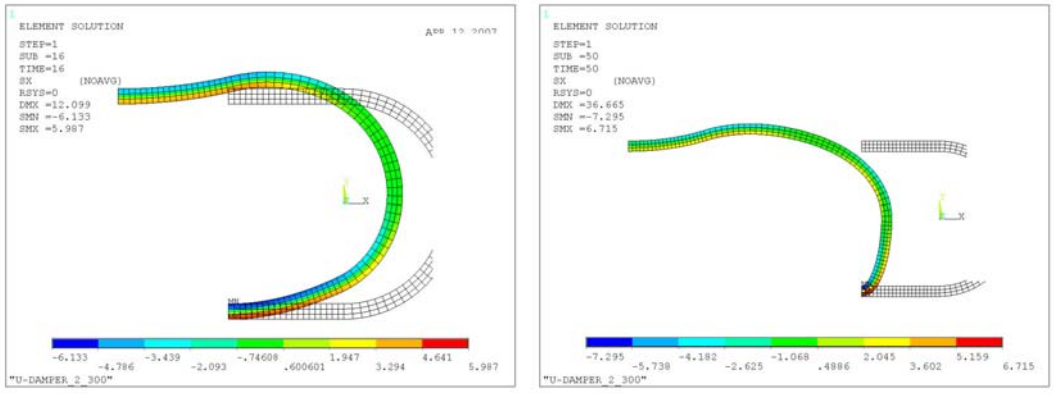
폭 40mm와 두께 16mm의 에너지흡수장치에서 평판부의 길이만을 변화시키며, 종국변형을 전단변형각 300% rad.로 설정하여 해석을 수행한 결과를 그림 3.2.3.47에 나타내었다.

그림에서, 높이(R)에 대한 평판부 길이(L)의 비(L/R)가 1.0인 모델은 170% rad. 수준에서, L/R=1.4인 모델은 230% rad. 수준에서 해석이 종료되었다 (파단 발생이 예상됨). 그리고 L/R=1.8이상인 시험체는 목표수준인 전단변형각 300% rad. 수준까지 해석이 수행되었다.

상기 하중-변형관계 곡선으로부터, 에너지흡수장치는 전단변형각 100% rad. 수준에서 1차 최대내력을 나타내고, 이후 내력이 약간 감소한 후 다시 증가하는 양상을 나타내고 있다.

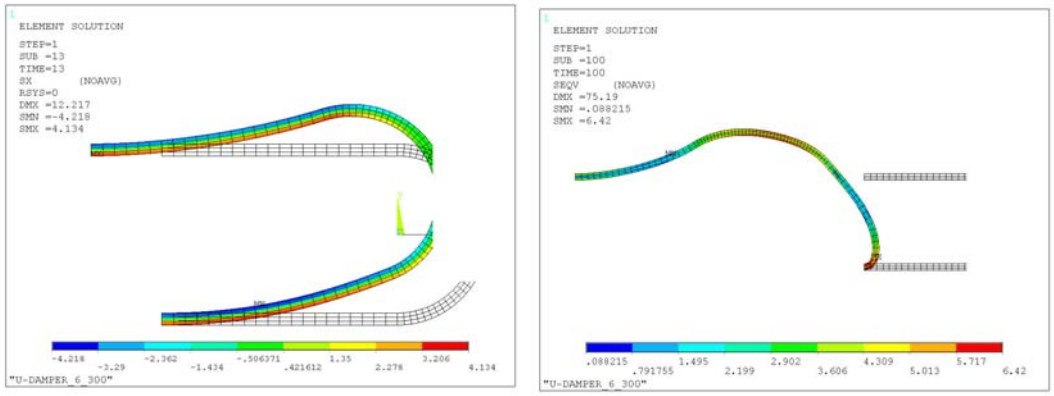
L/R=1.0인 모델과 L/R=2.6인 모델의 해석결과 중 x-방향으로의 응력분포를 비교하여 그림 3.2.3.48과 그림 3.2.3.49에 나타내었다.

그림에서와 같이, L/R=1.0인 모델과 L/R=2.6인 모델 모두 휨 지배적인 거동을 나타내고 있으며, 평판부의 구간 전체에 걸쳐 동일한 응력이 발생함을 알 수 있다.



(a) 전단변형각 100% rad. (b) 전단변형각 170% rad.(종국상태)

그림 3.48 x-direction stress (L/R=1.0)



(a) 전단변형각 100% rad. (b) 전단변형각 300% rad.(종국상태)

그림 3.2.3.49 x-direction stress (L/R=2.6)

(마) 소결

고인성 강재로 제작된 에너지흡수장치의 비선형 유한요소해석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

① 고인성 강재의 true stress-strain 관계는 Ramberg-Osgood 모델로서 표현이 가능하고, 인장시험결과에 기초하여 true stress-strain 모델을 제안하였다.

② 에너지흡수장치는 휨 지배적인 거동을 나타내고, 평판부 전구간에 걸쳐 유사한 응력을 분포를 나타내고 있다.

③ 내력면에서는 폭의 증가보다 두께의 증가가 보다 효율적이고, 평판부의 길이를 증가시키면 응력집중이 완화되고 변형능력면에서 유리할 것으로 판단된다.

④ 실험결과와 비교를 통한 해석모델의 수정이 요구된다.

(2) 에너지흡수장치의 형상 제시

기존의 강재댐퍼에 대한 성능평가결과 에너지흡수장치의 탄성강성을 확보하기 위해서는 강재의 폭보다는 두께를 크게 하는 것이 보다 효과적인 것으로 나타났다. 그러나 강재의 두께를 너무 크게 하면 굽힘제조과정이 어렵게 되고 그에 따라 변형능력도 저하될 가능성이 크다. 또한 한계변형능력을 400mm 이상 확보하기 위해서는 그림 3.2.3.50에서 굽힘가공부의 직경에 비해 평판부의 길이를 최소 두배이상 확보해야 되는 것으로 나타났다. 이러한 경우 에너지흡수장치의 크기가 커지게 되며 설치면적이 커지는 현상이 발생할 수 있다. 그 뿐만아니라 유한요소해석결과에서 알 수 있듯이 대변형이 발생하였을 때 볼트접합부와 평판부의 경계면 부근에서 응력집중이 크게 발생하고 있음을 알 수 있었다.

따라서 본 연구에서는 평판부의 소성변형능력을 향상시키기 위하여 그림 3.2.3.51에서와 같이 평판부의 중간에 타원형의 개구부를 둔 형태로 형상을 개발하였다. 이 경우 타원형 개구부에 의해 평판부의 강성 및 내력이 저하될 수 있으나 평판부의 면을 타원형 개구부의 양쪽으로 두어 그 폭을 더 크게 확보함으로써 강성 및 내력저하를 방지하도록 하였다. 또한 타원형 개구부를 둔 평판부의 자유로운 변형이 가능하도록 함으로써 한계소성변형능력을 향상시킬 수 있도록 하였다.

그림 3.2.3.51의 새로운 에너지흡수장치의 형상을 이용할 경우 평판부의 한계소성변형능력 향상에 의해 그 길이를 작게 할 수 있으며, 이에 따라 에너지흡수장치 설치면적을 저감시킬 수 있을 것으로 기대된다. 이 형상에 대한 최적화는 2차년도에 실험 및 유한요소해석 등을 통하여 검증할 예정이다.

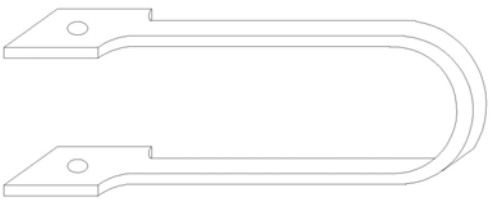


그림 3.2.3.50 기존의 강재댐퍼 형상

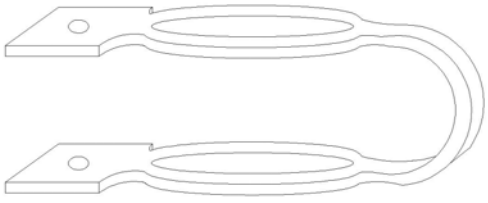


그림 3.2.3.51 개발된 강재댐퍼 형상

3.2.4 면진구조의 에너지법에 의한 성능설계 프로세스 제시

가. 동적지진응답해석에 의한 면진구조의 에너지 흡수효율 분석 및 지진응답 예측식 제시

내진구조는 지진으로 구조물에 투입되는 지진에너지의 대부분을 구조물이 손상을 입지 않고 흡수할 수 있도록 하는 것일 것이다. 그러나 면진구조는 다음과 같은 특징을 지니고 있다. 면진구조는 지진입력에너지를 격리하는 면진장치와 댐퍼로 구성되는 면진층과 건축물부분인 상부구조로 구성되고 상부구조는 기본적으로 탄성거동하고 면진층이 지진에너지의 대부분을 흡수하여야 한다.

면진장치는 건축물의 하중을 지지하는 지지력과 작은 전단강성을 지니고 있어 탄성거동을 하는 유연한 요소로 구성한다. 댐퍼는 탄성영역일때에는 전단강성이 높아 지진입력에너지의 대부분을 흡수할 수 있는 에너지흡수능력을 지니고 있어 소성화하는 강요소로 구성한다. 따라서 면진구조는 에너지집중형 유강혼합구조라고 간주할 수 있다.

분리장치의 유연한 성질은 건축물을 장주기화 시켜서 상부구조의 가속도응답을 저감할 수 있다. 댐퍼의 소성화에 따른 가속도의 저감효과는 약50%정도이다.

지진에 의한 에너지입력은 에너지스펙트럼으로 표현할 수 있다. 그림 3.2.4.1에 에너지스펙트럼의 예를 나타내었다. 에너지스펙트럼은 일종의 응답스펙트럼이지만, 일반적인 응답스펙트럼은 감쇠가 커짐에 따라 응답치는 감소하는 반면 에너지스펙트럼에서는 어느 일정한 값으로 수렴된다. 즉 감쇠가 0인 진동계에서는 입력에너지의 변동이 상당히 크고, 점성감쇠가 증가하거나 소성화가 커지는 시스템이되면 입력에너지는 평활화 된다는 것을 알 수 있다.

총에너지의 속도환산치는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$W_e(t) + W_p(t) = E(t)$$

여기서, $W_e(t)$: 시각 t 까지의 면진장치의 탄성변형에너지

$W_p(t)$: 시각 t 까지의 댐퍼의 소비에너지

$E(t)$: 지진에 의한 입력에너지

그림 3.2.4.2와 같이 1질점계에 지진가속도가 작용할 경우 지진입력에너지는 다음식과 같이 각 시각의 관성력($M\ddot{z}$)에 응답의 변위성분(dx)를 곱하여 적분하면 계산할 수 있다.

$$E = -\int -M\ddot{z}\,dx$$

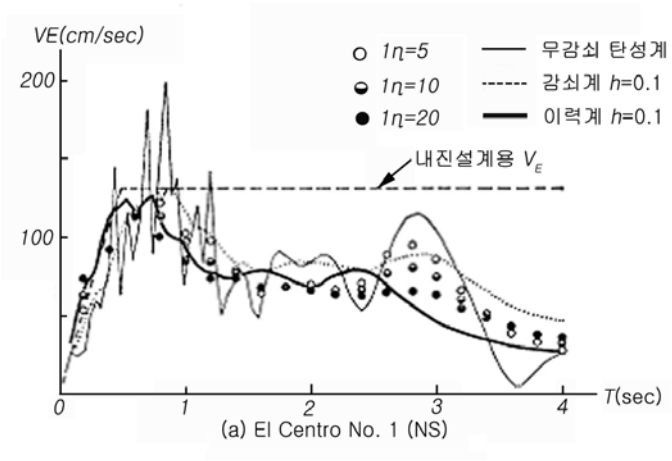


그림 3.2.4.1 에너지스펙트럼의 예

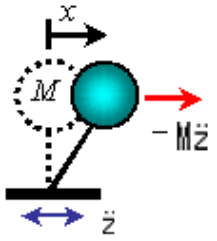


그림 3.2.4.2 1질점계의 진동모델

$$\text{면진장치} : \alpha_f = \frac{Q_f}{mg} \quad \text{탄소성댐퍼} : \alpha_d = \frac{Q_{dy}}{mg}$$

라고 하면, 탄성진동에너지는 최대변형시의 탄성에너지와 일치하기 때문에 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$W_e = \frac{Q_f u_m}{2} = \frac{Q_f^2}{2k_f} = \frac{\alpha_f^2 (mg)^2}{2k_f}$$

따라서, 댐퍼가 없는 순 탄성시스템일 경우의 전단력계수는 다음과 같이된다.

$$E = \frac{m V_E^2}{2} = \frac{\alpha_o^2 (mg)^2}{2k_f}$$

에너지평형식으로부터 다음과 같이 된다.

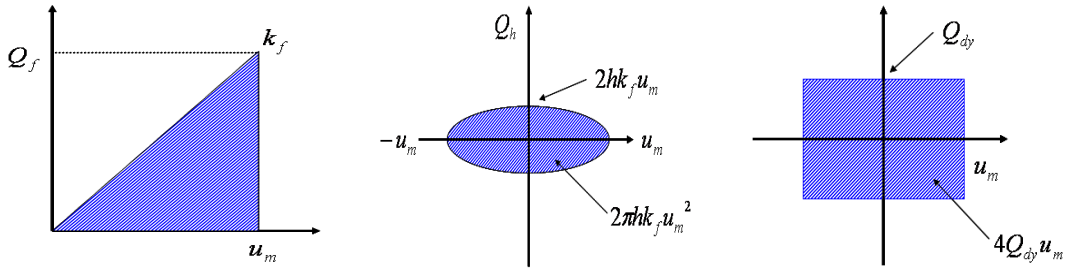
$$\alpha_o^2 = \frac{k_f}{mg^2} V_E^2 = \frac{4\pi^2}{T_f^2 g^2} V_E^2$$

$$\therefore \ \alpha_o = \frac{2\pi V_E}{T_f g}$$

따라서, 탄성진동에너지는 그림 3.2.4.3과 같이 최대변형시의 탄성에너지를 평

가하여 다음식과 같이 된다.

$$W_e = \frac{Q_f u_m}{2} = \frac{Q_f^2}{2k_f} = \frac{\alpha_f^2 (mg)^2}{2k_f}$$



(1) 탄성에너지 (2) 감쇠에너지 (3) 탄소성에너지

그림 3.2.4.3 각 요소의 복원력특성

$$V_E = \sqrt{\frac{2E}{M}} \qquad (3.2.4.1)$$

여기서, E: 총에너지입력

M: 구조물의 총질량

그림의 h는 감쇠정수이다. 무감쇠일때 V_E의 T에 의존도는 매우크지만, h가 커지면 V_E-T관계는 평활해지게 된다.

완전탄소성형의 복원력특성을 지닌 댐퍼와 순탄성의 분리장치로 구성된 면진구조의 면진층의 전단력계수 α_1은 지진입력에너지와 면진층의 흡수량과의 평형방정식으로 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\alpha_1 = \alpha_f + \alpha_s = \left(-\frac{7a}{8} + \sqrt{a^2 + 1} \right) \cdot \alpha_0 \qquad (3.2.4.2)$$

여기서, $a = 8\left(\frac{\alpha_s}{\alpha_0}\right)$

$$\alpha_0 = \frac{2\pi V_E}{T_f \cdot g} \qquad (3.2.4.2\text{-}1)$$

$$\alpha_s = \frac{{}_sQ_y}{Mg} \quad : \text{ 댐퍼의 항복전단력계수} \qquad (3.2.4.2\text{-}2)$$

$$\alpha_f = \frac{{}_sQ_{\max}}{Mg} \quad : \text{분리장치의 최대전단력계수} \qquad (3.2.4.2\text{-}3)$$

$${}_sQ_y \quad : \text{ 댐퍼의 항복전단력}$$

$_sQ_{\max}$: 분리장치의 최대전단력

g : 중력가속도

T_f : 댐퍼가 없는 경우의 면진구조의 고유주기
(분리장치만의 고유주기)

식(3.2.4.2-1)으로 나타낼 수 있는 α_0는 댐퍼가 존재하지 않을 때 면진구조의 전단력계수이고 $\frac{(\alpha_f+\alpha_s)}{\alpha_0}$의 값이 면진구조의 성능계수를 나타낸다고 할 수 있다.

에너지스펙트럼에서 T_f가 커지게 되면 α_0가 감소하게 되므로 면진구조의 우수성을 나타내는 지표라고 할 수 있다. 식 (3.2.4.2)으로 면진구조의 성능을 나타낸 것이 그림 3.2.4.4이다. 댐퍼의 항복전단력을 증가시키면 분리장치의 최대전단력과 변형은 감소하지만 면진층에 발생하는 전단력은 분리장치의 최대전단력과 댐퍼의 항복전단력의 합이되므로 α_1에는 극소치가 존재하게 된다.

$$T_f = 2\pi\sqrt{\frac{\overline{\sigma}\ \bullet\ T_R}{g\ \bullet\ G}}$$

$\overline{\sigma}$: 분리장치의 평균면압

G : 고무의 전단탄성계수

T_R : 적층고무의 전체고무층의 두께

T_f를 길게할 수 있는 요인은 천연고무의 경우 $G \le 4kg/cm^2$이거나 적층고무의 면압 $\overline{\sigma}$을 크게하면 달성가능하게 된다.

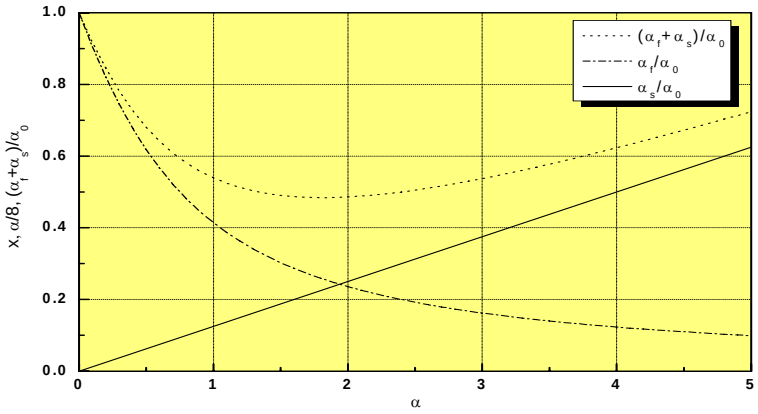


그림 3.2.4.4 댐퍼량과 응답저감율

나. 면진구조의 성능설계 프로세스 제시

(1) 에너지 평형에 근거한 면진구조설계법

건축물의 내진안전성의 검증은 지진에 의한 입력에너지를 건축물이 흡수할 수 있는가에 의해 판단할 수 있다. 허용응력도 계산과 한계내력계산은 건축물의 에너지흡수능력을 반드시 직접적 그리고 정량적으로 표현한 구조계산으로는 되어 있다고는 할 수 없으나, 한계상태설계법에서는 반응수정계수의 형태로 에너지 흡수능력의 크기에 대한 고려가 내진설계속에 포함되어 있다. 지금까지의 내진설계법에서는 내력과 변형이라고 하는 직감적으로 이해하기 쉬운 물리량을 안전성 검증의 척도로 사용하고 있으나, 에너지 평형에 근거한 내진설계(이후 「에너지법」이라고 함)에서는 보다 보편성이 높은 물리량인 에너지양을 그 척도로 하고 있다.

현재 전 세계에서 주로 쓰이는 내진 설계 기법은 크게 정적 진도법, 수정 진도법, 동적 해석법으로 나눌 수 있으며, 이들은 모두 가속도를 하중효과로 평가하고 있다. 그러나 지진을 가속도에 의한 하중효과만으로 평가한 경우 지진 가속도의 불확정성이 매우 크며, 구조부재 또는 구조체의 소성변형 능력의 차이에 의한 영향을 직접적으로 비교하기에는 어려운 점이 있다. 현행의 내진 설계규준은 지진 가속도를 하중효과로 취급하여 계산한 탄성 설계응답을 반응수정계수 R로 나누어서 골조의 소성 변형 능력에 따라 설계 지진하중을 낮출 수 있게 설정되어 있다. 하지만 반응수정계수 R값은 주어진 골조 시스템에 획일된 하나의 값을 적용시키는 등 타당성이 결여되고 명확하지 않은 부분이 많다.

한편 지진을 하중과 변형의 곱이라 할 수 있는 에너지로 평가한 경우, 그 입력에너지는 건축물의 총질량과 1차 고유주기에 지배되며 구조물의 강도, 구조물 내부의 강도분포 및 강성분포에는 거의 영향을 받지 않는 매우 안정된 양임이 밝혀져 있다.

따라서 최근에는 지진에 의한 영향을 단순한 하중효과만이 아닌, 하중과 그에 의한 변형의 곱인 에너지를 비교하는 방법에 의한 내진 설계법이 많이 연구되고 있고, 또한 주목받고 있다. 에너지론에 기초를 둔 내진 설계에서는 지진과 같은 외력에 의해 입력된 에너지보다 골조의 에너지 흡수능력을 더 크도록 설계하여

골조의 내진성을 확보할 수 있도록 한다. 그러므로 지진에 의한 입력에너지의 특성과 구조물의 에너지 흡수능력을 정량적으로 평가할 필요성이 있다.

현재의 내진 설계법에서는 지진가속도를 하중효과로 취급하기 때문에, 지진가속도가 커지게 되면 구조물에 작용하는 하중이 커지게 된다. 그러나 지진에 의해 구조물에 입력되는 에너지양이 반드시 지진의 최대가속도에만 의존하는 양인지에 대해서는 검증이 필요하며, 구조물의 요구소성변형 능력을 정량적으로 평가하기 위해서는 지진력을 에너지로 평가할 수 있는 스펙트럼을 제시할 필요가 있다.

지진이 구조물에 미치는 파괴력의 지표로써 우선 가장 널리 쓰이는 가속도를 생각할 수 있다. 그러나 일본 효고현 남부지진과 대만의 集集(chi-chi) 지진의 비교에서 보면 대만 集集(chi-chi) 지진의 가속도가 효고현 남부지진의 가속도보다 컸지만 구조물의 피해는 효고현 남부지진에 비해 적었음을 알 수 있다. 이는 지진 발생 지역이 도심지가 아닌 점, 강구조의 경우 건축물규모에 비해 설계하중이 컸다는 점 이외에도 대만 集集지진에서는 최대지반가속도에 의한 힘의 작용이 pulse적인 성격을 가짐으로써 큰 에너지를 발생시키지 못하고 효고현 남부지진보다 작았다는 점을 고려해야 한다는 것을 의미한다. 따라서 가속도가 구조물의 파괴력의 지표로써 반드시 유효하다고는 할 수 없다. 또한 Fourier 진폭스펙트럼이 같은 지진이라도 직하형 지진과 같이 단시간에 큰 에너지가 투입되는 경우에는 구조물이 붕괴하기 쉽다는 것이 이미 밝혀져 있다. 이는 에너지 입력의 누적 총량만으로는 구조물의 붕괴예측이 불충분하다는 것을 의미한다.

에너지법에 관련된 역사를 되짚어보면, 미국 버클리에서 개최된 제1회 세계지진공학회의(1956년)에 Tanabashi와 Housner는 각각 지진동에 의한 파괴력이 지진동 속도를 지표로 하는 에너지 입력으로서 취급할 수 있음을 나타내었다. 이 단계에서는 지진입력을 에너지로서 생각할 수 있다는 이론을 제시했다. 그 후 약 20년 정도 경과하여 컴퓨터의 진보 등에 의해 수치해석에 의한 검증데이터를 근거로 Akiyama가 Housner 가설의 검증에 의해 입력에너지의 정량화를 수행함과 동시에 다층 건축물에서의 각층으로의 에너지 배분(손상분포측)의 제안을 하기에 이르러 지진에 의한 에너지입력과 건축물이 가지는 에너지흡수능력을 대비함으로써 내진설계를 실현할 수 있는 길을 열었다. 이 방법에 근거하여 그동안의 연구결과를 바탕으로 본 설계법을 제시하게 되었다.

에너지법은 에너지양을 정량(수치적)으로 표현한 내진설계이므로 설계실무자가 건축물의 각층·각 부위에서 흡수하는 지진에너지의 분포를 즉각적으로 파악할 수 있고 보다 균형있는 지진에너지 분포가 되도록 함으로써 내진적으로 균형있는 건축물의 설계를 가능하게 한다. 또한, 지진에너지를 적극적으로 흡수하는 장치(에너지법에서는 「에너지흡수부재」라고 부름)의 적절한 이용을 가능하게 한다. 면진구조에서는 면진층에 설치하는 면진장치가 대부분의 지진에너지를 흡수하는 에너지흡수부재가 된다고 할 수 있다.

지진에 의해 건축물에 작용하는 에너지양을 다음 식에 따라서 계산한다.

$$E_D = \frac{1}{2} M \cdot V_D^2$$

이식에서, E_D, M 및 V_D는, 각각 다음 값을 나타낸다.

E_D: 지진에 의한 건축물에 작용하는 에너지양 (단위 kN·m)

M: 건축물의 지상부분의 전 질량 (고정하중 및 적재하중과의 합)을 중력가속도로 나눈 것) (단위 : ton)

V_D: 에너지의 속도치환치 (건축물의 감쇠 등을 고려해서 지진에 의한 건축물에 작용하는 에너지양의 속도치환치를 별도로 계산하는 것이 가능할 경우에는, 당해속도치환치로 사용 가능하다.)

건축물에 작용하는 에너지에 대해서 한계내력계산과 같이 계산의 대상으로는 지상부분만이다. 그러나 여기서 상부구조를 검토할 때, 예에 따르면 기초고정 등의 계산상의 제안조건을 가정하는 경우에는, 기초 (지하부분)의 검토에 의한 조건을 만족하는 구조방법을 채용하는 등, 상부구조이외의 성능과의 연속성을 배려할 필요가 있다.

지진에 의한 에너지양을, 건축물 가운데 지상부분의 전 질량 M 및 입력에너지양의 속도 치환치 V_D로부터 계산한다. V_D는 건축물의 주기에 대한 에너지양의 속도치환치의 스펙트럼이다.

아래는 1차년도에서 제안한 설계용 에너지스펙트럼이다. 설계용 에너지스펙트럼은 다음과 같이 규정한다.

S_A 지반	$V_E = 156T$ cm/s $V_E = 30\,[cm/s]$	$T \le 0.192\,s$ $T > 0.192\,s$
S_B 지반	$V_E = 156T$ cm/s $V_E = 50\,[cm/s]$	$T \le 0.321s$ $T > 0.321\,s$
S_C 지반	$V_E = 156T$ cm/s $V_E = 80\,[cm/s]$	$T \le 0.513s$ $T > 0.513\,s$
S_D 지반	$V_E = 156T$ cm/s $V_E = 100\,[cm/s]$	$T \le 0.641s$ $T > 0.641\,s$
S_E 지반	$V_E = 156T$ cm/s $V_E = 130\,[cm/s]$	$T \le 0.833s$ $T > 0.833\,s$

지금까지의 내진설계법에서는 내력과 변형이라고 하는 직감적으로 이해하기 쉬운 물리량을 안전성 검증의 척도로 사용하고 있으나, 에너지 평형에 근거한 내진설계(이후「에너지법」이라고 함)에서는 보다 보편성이 높은 물리량인 에너지양을 그 척도로 하고 있다.

1질점계에서의 진동방정식은 다음 식과 같다.

$$M\ddot{y} + C\dot{y} + F(y) = F_e \qquad (3.2.4.3)$$

여기서, M : 질점의 질량

$C\dot{y}$: 질점의 감쇠력

$F(y)$: 복원력($=ky$)

F_e : 지진력($=-M\ddot{y}_o$, $\ddot{y}_o$: 지진가속도)

위 식의 양변에 $dy = \dot{y}dt$를 곱하여 지진계속시간(t_o)에 대하여 적분하면 다음과 같은 식이 얻어진다.

$$M\int_0^{t_o} \ddot{y}\dot{y}dt + C\int_0^{t_o} \dot{y}^2 dt + \int_0^{t_o} F(y)\dot{y}dt = \int_0^{t_o} F_e\dot{y}dt \qquad (3.2.4.4)$$

식(3.2.4.4)의 우변은 지진력(Fe)×변위로 지진에 의한 총입력에너지가 된다. 또한 지진에 의해 구조물에 입력되는 총에너지 E는 다음의 식에 의해서도 구해질 수 있다.

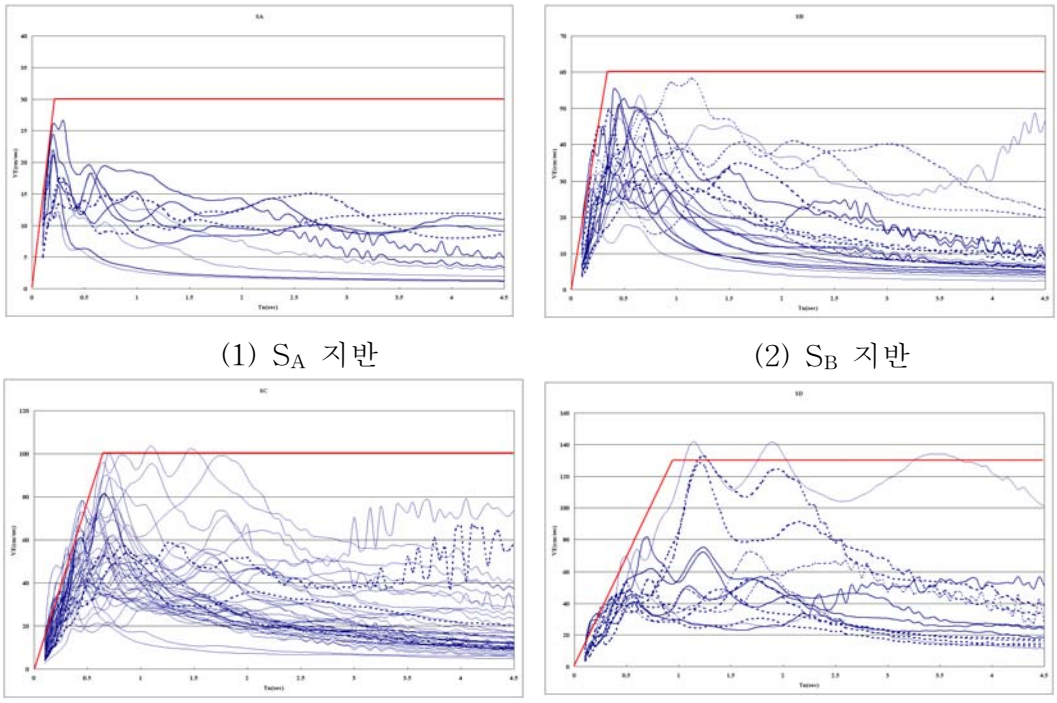
$$E = \frac{1}{2}MV_E^2 \qquad (3.2.4.5)$$

여기서 V_E는 속도의 차원을 갖는 양으로 에너지 등가 속도이며 다음 식으로 표현된다.

$$V_E = \sqrt{\frac{2E}{M}} \tag{3.2.4.6}$$

식(3.2.4.6)와 같이 V_E는 지진에 의한 총에너지 입력으로 표현되는 식이므로 여러 가지 지진들의 V_E를 분석함으로써 지진에 의해 구조물에 입력되는 총 에너지양에 대한 평가가 가능하다.

다음 그림 3.2.4.5는 국내실정에 맞는 각 지반종별 지진 데이터에 의한 설계용 에너지 등가 속도(V_E) 스펙트럼을 정리하여 나타낸 것이다.



(1) S_A 지반　　(2) S_B 지반

(3) S_C 지반　　(4) S_D 지반

그림 3.2.4.6 지반 종별 설계용 에너지 스펙트럼

실 설계에서는 감쇠에 의한 에너지를 제외한 손상에너지를 사용하여 구조물을 설계하는데, 이 건축물에 발생하는 손상을 유발하는 에너지의 속도환산치 V_D는 골조전체의 총에너지 입력의 속도환산치 V_E와 골조의 감쇠정수 h 로부터 다음 식으로 산정한다.

$$V_D = \frac{1}{1+3h+1.2\sqrt{h}} V_E$$

여기서, h: 구조물의 감쇠비이다.

건축물에 발생하는 전 손상에너지 E_D는 전 손상에너지(누적소성변형에너지) W_p와 탄성변형에너지 W_e의 합에 의해 다음과 같이 구한다.

$$E_D = W_p + W_e \tag{3.2.4.7}$$

또한 E_D는 속도환산치 V_D에 의해 다음과 같이 나타태어진다.

$$E_D = \frac{1}{2} M V_D^2 \tag{3.2.4.8}$$

이 건축물에 발생하는 손상을 유발하는 에너지의 속도환산치 V_D는 골조전체의 총에너지 입력의 속도환산치 V_E와 골조의 감쇠정수 h로부터 다음 식으로 산정한다.

$$V_D = \frac{1}{1+3h+1.2\sqrt{h}} V_E \tag{3.2.4.9}$$

3.2.5 에너지 흡수장치 형상 최적화 및 복합면진장치 형상개발

가. 기존 면진구조의 분석

(1) 면진시스템의 종류

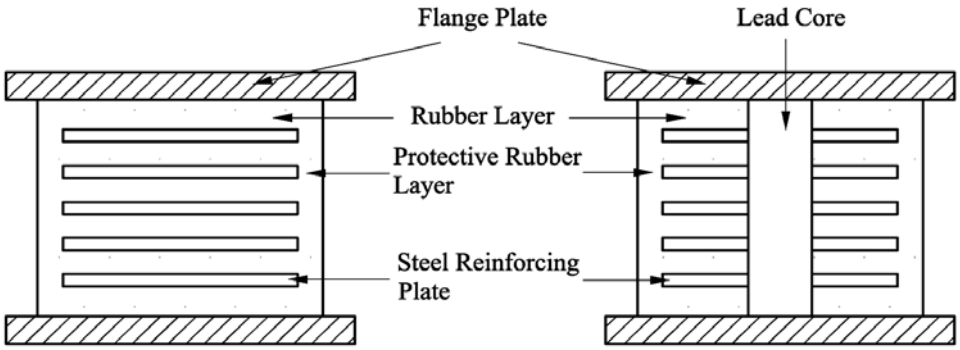
전 세계적으로 매년 새롭고 다른 형태의 면진시스템이 제안되고 특허등록이 되고 있다. 이러한 새로운 시스템은 비실용적이고 또 일부는 치명적일 수도 있지만, 해마다 그 수는 증가하고 있다. 오늘날 사용되는 대부분의 면진시스템은 탄성받침이나 미끄럼받침을 포함하고 있고 때로는 탄성받침과 미끄럼받침을 조합한 시스템도 적용되고 있다.

(가) 탄성받침 시스템(Elastomeric-Based Systems)

천연고무받침은 1969년에 마케도니아 Skopje시의 Pestalozzi 학교21)에 최초로 적용된 이후 횡부풀림을 줄이고 수직강성을 키우기 위하여 강판을 삽입하여 지금까지 사용하고 있다.

① 저감쇠 천연고무베어링 (Low-Damping Natural Rubber Bearings)

저감쇠 적층탄성받침은 제조하기가 간단하고 모델링하기가 쉬우며 역학적인 특성이 하중속도, 온도, 이력 혹은 노화의 영향을 받지 않는 등 장점을 가지고 있다. 하지만 추가적인 감쇠장치가 필요하여 일본에서는 점성감쇠기, 강봉, 납봉, 마찰장치 등과 같은 감쇠장치를 널리 사용해 왔다. 수직강성을 증가시키기 위하여 많은 수의 얇은 강판을 삽입한 저감쇠 천연고무 베어링은 그림 3.2.5.1(a)에 나타내었다.



(a) 저감쇠 천연고무베어링 (b) 납-고무 베어링

그림 3.2.5.1 탄성받침 시스템

② 납-고무 베어링 (Lead-Plug Bearings)

납-고무 베어링은 1975년에 뉴질랜드에서 발명되었고22) 현재 뉴질랜드, 미국, 일본 등 나라에서 광범위하게 사용되었다. 이 시스템은 저감쇠 천연고무받침과 유사한 적층고무받침이지만, 그림 3.2.5.1(b)에 나타낸 것과 같이 하나 혹은 두개의 중공부분에 납봉이 삽입되어 있다. 받침에서 강판은 납봉이 전단변형을 일으키게 된다.

③ 고감쇠 천연고무베어링 (High-Damping Natural Rubber Bearings)

면진장치의 가황, 접착, 제조방법에서 기존의 탄성받침과 동일하나, 추가적인 감쇠장치의 필요성을 없애기 위하여 충분한 고유감쇠를 갖는 천연고무 합성체를 사용하였다. 이러한 천연고무는 20%이하의 전단변형율에서는 재료가 비선형이고 보다 높은 강성과 감쇠를 갖고 있어 풍하중과 낮은 수준의 지진하중에 의한 응답을 최소로 하는 경향이 있다. 20%~120%의 전단변형율에서는 재료의 전단계수가 작고 일정하다. 이보다 더 큰 전단변형율에서는 고무의 변형경화과정으로 인하여 전단계수가 커지며 에너지흡수능력도 따라서 증가한다. 즉 이 시스템은 작은 하중에 대해서는 강성이 크고 설계수준의 입력에서는 상당히 선형적이고 유연하며 설계수준을 초과하는 예기치 못한 입력수준에 대해서는 변위를 제한할 수 있다.

(나) 미끄럼형 시스템 (Sliding-Based Systems)

미끄럼형 시스템은 지진의 진동수와 변위폭에 관계없이 일정한 응답을 나타내며 공진진동수를 갖지 않는 것이 그 특징이다. 하지만 지진이 발생할 경우, 미끄럼 마찰력에 해당하는 크기의 지진력만이 상부구조물에 전달되는 이 시스템은 변위를 제한하고 구조물이 미끄러지거나 베어링면을 벗어나지 않게 하기 위하여 복원력이 주어져야 한다.

① 순수 미끄럼형 베어링 (Pure FrictionBearings)

순수 미끄럼형 시스템은 지금까지 제안된 면진시스템 중에서 가장 초기의 그리고 가장 간단한 면진시스템이다. 이 면진시스템은 비용이 적게 들고 융기가 거의 발생하지 않으며 효율적으로 지진응답가속도를 감소시키지만 건물과 기초 사이에 큰 상대변위를 일으키기 때문에 부재의 연결부 설계가 매우 중요시 되어야 한다. 따라서 점성감쇠기나 스프링 작용을 하는 요소가 추가로 설치되면 훌륭한 면진작용을 할 수 있는 것으로 판명되었다.

② Electricité-de-France 시스템

1970년대 초반에 원자력발전소의 설비에 적용하기 위하여 개발된 이 시스템은 적층합성고무받침(고품질로 제조된 일반 교량받침)을 사용하였고 스테인리스강과의 접촉면은 납-청동 합금으로 되어 있으며 미끄럼 면은 탄성받침의 상단에 올려지게 설계되어 약진에 대해서는 네오프린 패드의 수평연성이 진동을 방지하는 역할을 하며, 강진의 경우는 네오프린 패드의 작용이외에 미끄럼작용이 진동을 저감시킨다. 하지만 복원장치가 설치되어 있지 않아 변위가 일정한 값을 초과할 경우에는 영구 변위가 발생하게 된다. 그림 3.2.5.2에 나타낸 이 시스템은 남아프리카 Koeberg시에 위치한 대형 원자력발전소에 적용되었다.[23)]

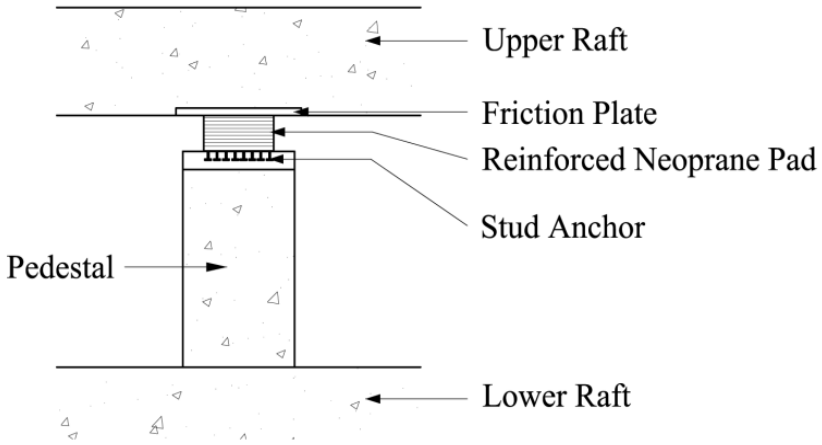


그림 3.2.5.2 Electricité-de-France 시스템

③ EERC조합 시스템 (EERC Combined System)

EERC에서 개발한 이 시스템은 탄성받침과 미끄럼받침의 조합으로서, 구조물의 내부 기둥은 스테인리스강 미끄럼 부재 위의 Teflon에 의해 지지되고, 외곽 기둥은 저감쇠 천연고무베어링으로 지지된다. 여기서 탄성받침은 복원성능을 제공하여 구조물의 비틀림을 방지하는 작용을 하고 미끄럼받침은 감쇠성능을 제공한다.

④ R-FBI 시스템 (Resilient-Friction Base Isolation System)

R-FBI 시스템은 속도가 클 때 스테인리스강 위에 놓인 테플론의 마찰계수가 커지는 문제를 극복하기 위하여 하나의 받침에서 많은 마찰면을 사용한다. 그림 3.2.5.3에 나타낸 것과 같이 받침의 상부와 하부사이를 많은 층으로 나누어 각 층에서의 속도와 마찰계수를 작아지게 한다. 또한 수직하중을 받지 않지만 복원력을 제공하는 고무심도 포함하고 있어 영구변위가 발생하는 것을 방지할 수 있다.

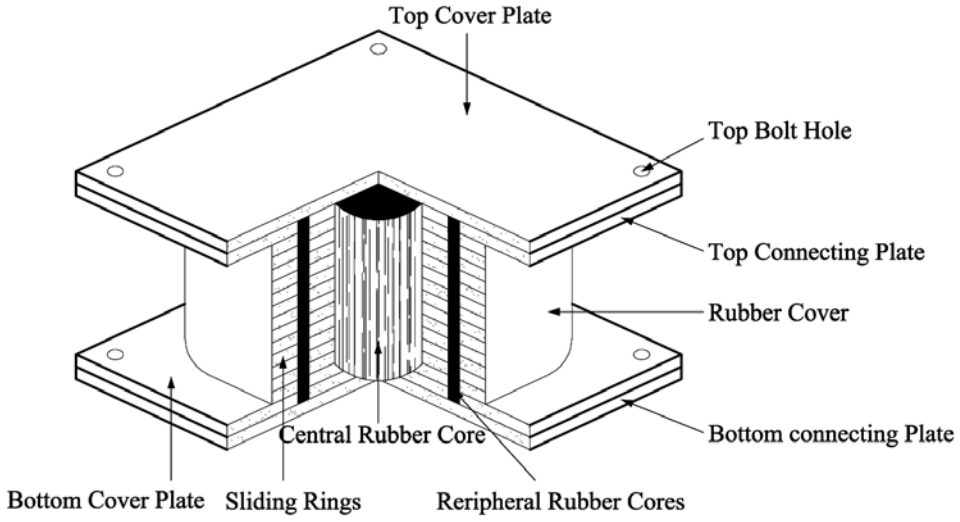


그림 3.2.5.3 R-FBI 시스템

⑤ TASS 시스템 (Taisei Shake Suppression System)

일본의 TAISEI회사가 개발한 이 시스템은 적층고무받침은 수직하중을 받지 않고 복원력만 제공하며 건물의 전체 수직하중은 테플론-스테인리스강 부재가 부담하게 설계되어 있다. 그림 3.2.5.4에 나타낸 것과 같이 이 시스템은 미끄럼베어링과 베어링판 및 수평방향 스프링으로 구성되어 있으며 미끄럼베어링은 상부구조의 기둥하부에 부착되고 수평방향 스프링은 상부구조와 하부구조의 사이를 연결하도록 설치된다. 여기서 미끄럼베어링은 강체형의 미끄럼베어링과 탄성 미끄럼베어링으로 구분되고 수평방향 스프링은 고무 블록으로 제작된다.

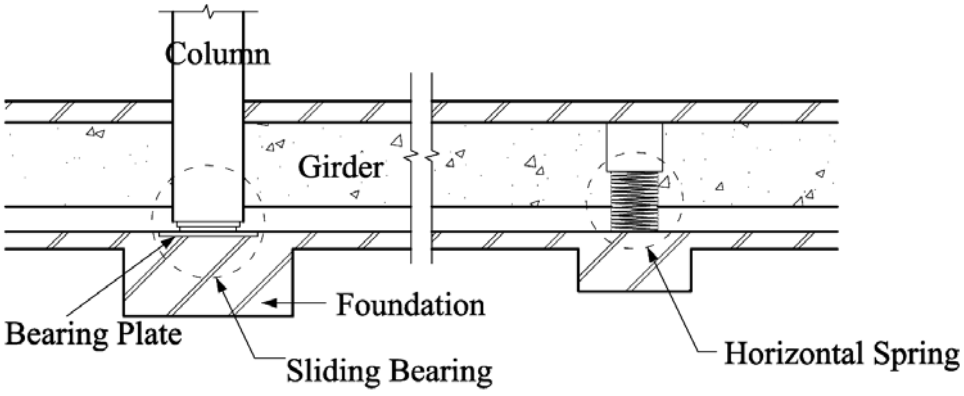


그림 3.2.5.4 TASS 시스템

⑥ 마찰진자 시스템 (Friction Pendulum System)

미끄럼작용과 형상에 의한 복원력을 조합한 이 시스템은 구형인 스테인리스강 표면에 접합하여 움직이는 접합 미끄럼기구를 갖고 있다. FPS는 면진구조물의 주기를 증가시키기 위하여 진지의 특성을 이용하여 지진이 작용하면 미끄럼기구가 오목면을 따라 움직이고 이때 지지되는 구조물은 부드러운 진자운동을 하게 된다. 이때 미끄럼기구의 움직임은 마찰력을 발생시키고 시스템에 감쇠성능을 제공하여 지진에너지를 흡수하게 되며 위로 올라간 구조물은 자체의 질량에 의하여 복원력을 갖게 된다. 면진장치의 유효감쇠와 구조물의 면진주기는 오목면의 곡률반경을 사용하여 제어한다.

⑦ SRF시스템 (Sliding Resilient Friction System)

Electricité-de-France 시스템과 R-FBI 시스템의 장점을 혼합한 이 시스템은 R-FBI 시스템 상부의 표면을 마찰판으로 대체하여 Electricité-de-France 시스템과 유사한 구조적 거동을 하게 유도하였다. 그 결과 약진에 대해서는 R-FBI 시스템과 같이 거동하며 강진에 대해서는 상부마찰판이 미끄럼작용을 일으킨다.

(다) 혼합형 시스템 (Hybrid Systems)

일반적으로 탄성받침과 미끄럼받침은 수평방향 면진만을 제공한다. 하지만 3차원 면진장치가 필요한 경우에는 스프링 시스템(Spring-Type System)의 일종인 GERB 시스템을 많이 사용한다. 수직방향과 수평방향으로 강성이 작은, 커다란 나선형 강 스프링(Helical Steel Spring)을 사용하는 이 시스템은 수직방향 주파수가 수평방향 주파수의 약 3~5배 정도이다. 또한 강 스프링은 감쇠성능이 전혀 없기 때문에 항상 점성감쇠기를 추가하여 사용된다.

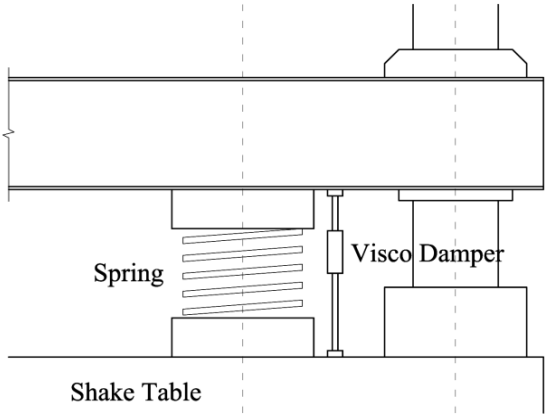


그림 3.2.5.5 GERB 시스템

(2) 면진장치의 구성요소

면진장치는 그 역할에 따라 주기를 연장시키는 작용을 하는 유연지지부(Flexible Support)와 지진에너지를 흡수하여 구조물의 응답변위를 줄이는 감쇠장치(Damping Device)로 나눌 수 있다.

(가) 유연지지부 (Flexible Support)

건축물의 주기를 연장시키는 역할을 하는 유연지지부는 수직방향으로는 구조물 자체의 중량을 부담하여야 하고 수평방향으로는 큰 변형을 일으킬 수 있어야 하며 경년변화에 따라 성능열화가 발생하지 말아야 한다. 또한 건축물을 원래의 위치에 복원시키는 강성이 필요하며 복원능력의 크기는 지진이 발생한 후에 잔류변형의 크기에 영향을 미친다.

면진구조의 발전에 큰 공헌을 한 적층고무베어링은 일정한 두께의 고무시트와 철판을 번갈아 쌓으면서 접착하여 만들어진 구조이다. 적층고무베어링은 내부의 철판으로 하여 수직방향에서의 강성이 크게 향상되어 수직하중에 의한 횡부풀림이 줄어들고 안정된 변형형상을 유지할 수 있다. 전단력이 작용할 때 적층고무베어링의 중간강판은 고무층의 전단변형(체적변화가 없음)을 구속하지 않으므로 고무시트만의 탄력으로 수평강성을 발휘한다. 적층고무베어링이 크게 변형하는 경우에도 유효지지부가 지속적으로 3축 압축응력상태가 유지되기 때문에 하중지지능력을 보유할 수 있다. 즉 전단변형이 수직 축소량에 미치는 영향이 매우 작아 유효단면적에 비례하는 압축강성은 거의 원래 수준을 유지하게 되므로 적층

고무베어링은 큰 수직하중을 지지하면서수평방향으로는 큰 변형을 일으킬 수 있다.

(나) 감쇠장치 (Damping Device or Damper)

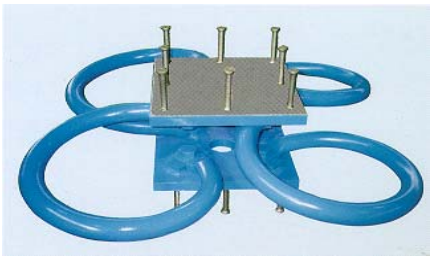
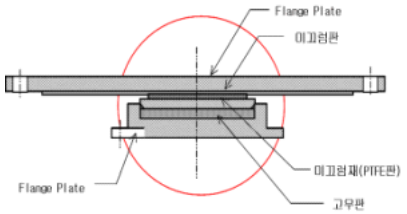
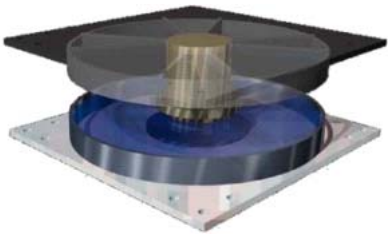
면진장치의 감쇠를 증가시키는 방법으로는 다음과 같은 세가지가 있다. 첫째, 이미 사용중인 고감쇠 천연고무와 같이 고무 자체의 감쇠성능을 향상시킨다. 둘째, 납-고무 베어링과 같이 분리장치에 댐퍼기능을 복합시켜 사용한다. 셋째, 분리장치와는 독립된 댐퍼를 설치한다.

감쇠장치는 면진구조에 감쇠성능을 부여하여 지진시에 발생하는 상부구조와 지반과의 과대한 상대변위를 감소시키고 지진이 끝난 후에는 신속하게 진동을 정지시키는 역할을 한다.

지금까지 여러 가지 형태, 기구, 재질을 가진 면진장치용 댐퍼가 개발되어 사용되고 있다. 초기에는 강재와 납을 사용한 댐퍼가 많이 개발되었고 그 이후에는 마찰을 이용한 댐퍼와 점탄성체를 이용한 댐퍼도 개발되었으며 현재까지는 분리장치에 댐퍼기능을 복합시킨 분리장치도 이용되고 있다. 이러한 복합형 분리장치에는 댐퍼에도 하중지지능력이 요구되지만 분리장치와 독립된 댐퍼에는 하중지지능력이 필요하지 않다.

댐퍼의 작동원리에 근거하여 이력감쇠형 댐퍼와 점탄성감쇠형 댐퍼로 구분할 수 있다. 표 3.2.5.1에 나타낸 것과 같이 이력감쇠형 댐퍼는 납봉, 강봉 마찰댐퍼 등과 같이 주로 변형능력에 의하여 에너지를 소산시키는 반면에 점탄성감쇠형 댐퍼는 오일댐퍼와 같이 주로 속도에 의존하는 점성저항을 이용하여 에너지를 흡수한다. 또한 모든 유형의 댐퍼는 감쇠성능을 만족하는 동시에 분리장치의 비교적 큰 변형상태에서도 안정적으로 사용할 수 있는 변형능력과 방향성 및 환경의 영향에 대한 내구성을 모두 갖추도록 설계되어야 한다.

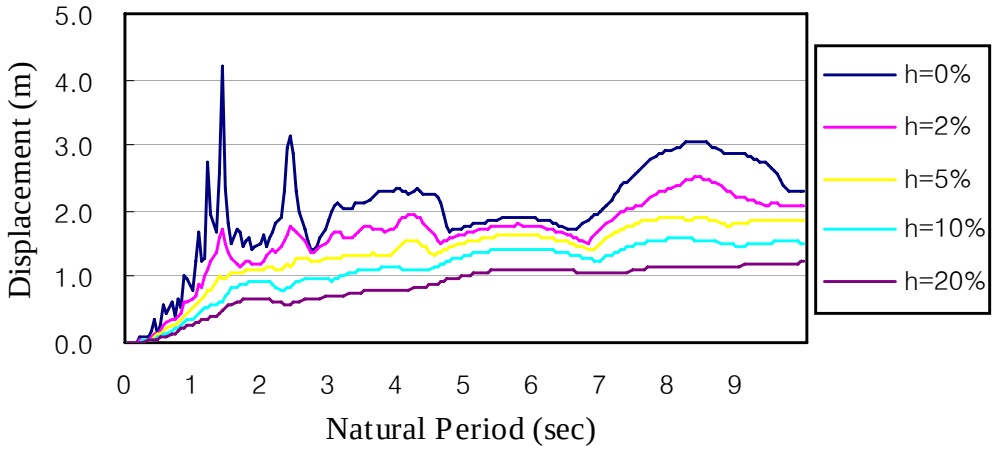
표 3.2.5.1 면진장치용 댐퍼의 분류

댐퍼의 종류			방향성
이력감쇠형 댐퍼	납봉댐퍼		이방향
	루프형 강봉댐퍼		이방향
	U형 강재댐퍼		이방향
	마찰댐퍼		이방향
점탄성감쇠형 댐퍼	고분자계 점성체 댐퍼		이방향
	오일댐퍼		일방향

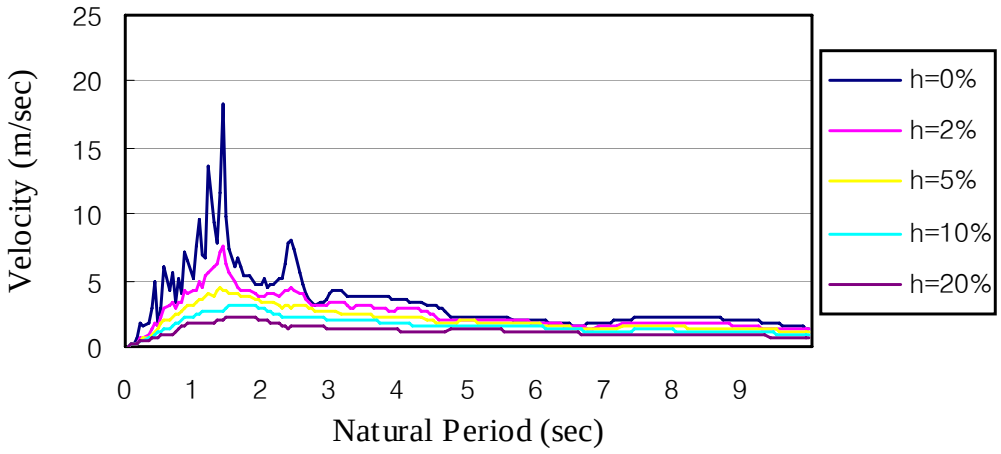
(다) 면진구조의 원리

지진이 발생할 경우에 급격한 지반운동으로 인하여 건축물에 지진하중이 가해지면서 피해를 입게 된다. 멕시코 지진과 같이 특별히 연약한 지반을 제외하면 일반적인 경우에 지진에너지는 고유진동주기가 작은 영역에 집중되기 때문에 중·저층 건축물의 피해가 고층건물의 피해보다 더 크게 발생할 위험이있다. 이러한 중·저층 건축물은 지반운동이 증폭됨에 따라 각 층에서의 가속도는 상부층으로 올라갈수록 더 커지게 된다. 따라서 증가된 가속도는 골조의 응력을 증가시켜 건물내의 시설물이거나 사람에 피해를 입히게 되며더욱 심한 경우에는 구조적인 파괴에 이르게 된다.

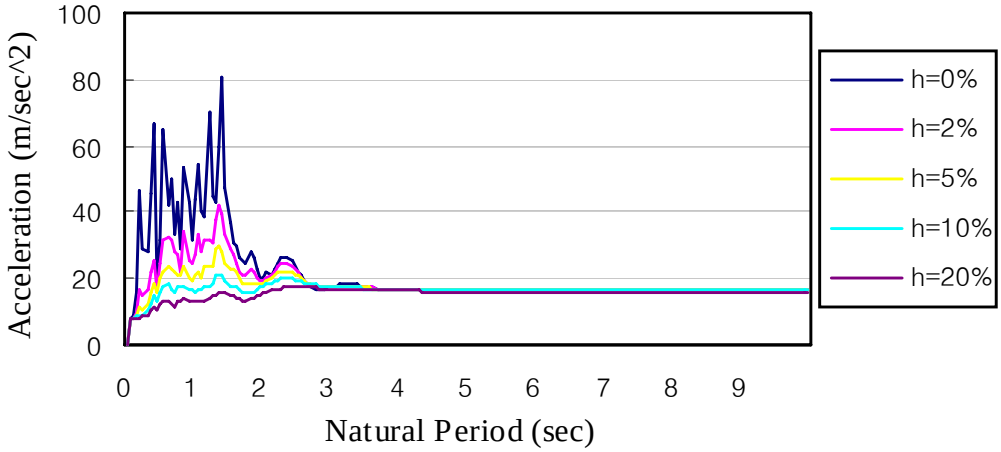
그림 3.2.5.6은 Newmark β법을 이용하여 일본 고베지진에 대한 변위, 속도, 가속도 응답스펙트럼부록 A를 참조을 나타내었다. 그림 3.2.5.6(c)에 나타낸 것과 같이 건축물의 고유주기가 길어지면 지진에 대한 가속도응답의 크기는 작아지며 따라서 건축물에 전단되는 지진하중은 작아진다. 하지만 그림 3.2.5.6(a)를 보면 건축물의 고유주기가 길어지면 변위응답은 커지게 되므로 과도한 층간변위로 인하여 비구조물이 큰 피해를 입게 된다. 또한 감쇠비가 커지면 변위, 속도, 가속도응답의 크기는 작아지나, 속도응답량은 감쇠비가 커질수록 변위 또는 가속도응답량처럼 계속 감소하는 것이 아니라 주기에 따라 평활화하는 경향을 나타내고 있다. 이는 지진동에 의한 입력에너지의 판단기준인 속도응답의 크기는 지진의 응답가속도가 커진다고 해서 반드시 커진다고 할 수 없기 때문이다. 대만 지지지진의 지반가속도는 일본 고베지진에 비해 더 컸지만 지지지진에 의한 피해는 고베지진에 비해 작았던 이유 중의 하나가 바로 이 점이라고 생각할 수 있다.



(a) 변위 응답스펙트럼



(b) 속도 응답스펙트럼

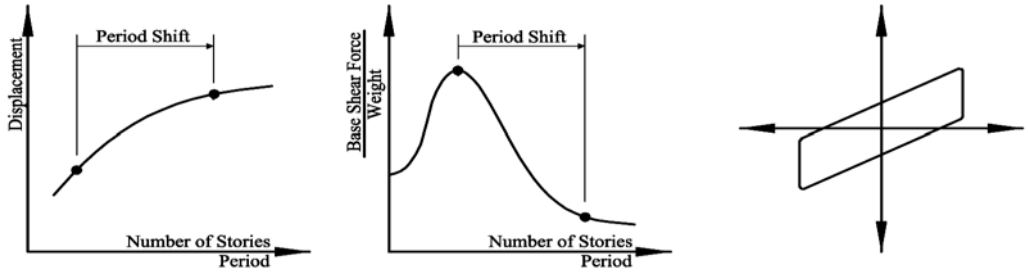


(c) 가속도 응답스펙트럼

그림 3.2.5.6 일본 고베지진에 대한 변위, 속도, 가속도 응답스펙트럼

면진장치의 기본적인 요구성능을 일반적으로 다음과 같이 세가지로 개괄할 수 있다. 첫째, 응답전단력을 감소시키기 위하여 전체 면진구조물의 주기를 늘이고 유연성을 가지도록 한다. 둘째, 상부구조와 지반과의 상대변위를 조절하기 위하여 에너지흡수를 위한 감쇠성능을 부여하여야 한다. 셋째, 풍하중, 상시진동 또는 미소한 지진에 대해서는 충분한 강성을 가지도록 설계되어야 한다.

면진구조에서 유연지지부는 구조물의 고유주기를 증가시키기 때문에 그림 3.2.5.7(a)에 나타낸 것과 같이 변위응답량이 커지게 된다. 과도한 응답변위를 방지하기 위하여 감쇠성능을 부여하여 에너지를 흡수함으로써 그림 3.2.5.7(c)에 나타낸 것과 같이 구조물의 이력감쇠거동을 실현한다. 또한 구조물의 장주기화에 의하여 가속도응답량이 감소하는 동시에 그림 3.2.5.7(b)에 나타낸 것과 같이 구조물의 수평전단력을 저감시킨다. 이런한 전단력의 감소는 지반가속도와 구조물의 고유주기에 따라 다르게 나타난다.



(a) 변위응답 (b) 수평전단력응답 (c) 이력감쇠거동

그림 3.2.5.7 면진의 기본적인 원리 및 특성

지반운동을 구조물의 기초 밑에서 허용하면서 상부구조물의 하중을 지지할 수 있는 면진장치는 거주성이나 내부시설물의 안전성을 크게 향상시켰다. 또한 면진구조의 가속도응답량이 작기 때문에 기둥, 보 및 벽체의 단면을 감소할 수 있을 뿐만 아니라 장스팬 등 구조가 가능함으로써 시대의 발전에 부합되는 넓은 공간을 확보할 수 있다.

나. FEM해석에 의한 기존 강재댐퍼의 성능분석

(1) 개요

면진장치에서 유연지지부의 변형량이 매우 크기 때문에 강재 자체의 변형능력에만 기대하는 설계가 어려우므로, 최근 일본에서는 댐퍼의 형상을 그림 3-1에 나타낸 것과 같이 U형으로 설계하여 유연지지부의 대변형에서도 파단이 발생하지 않고 지진이 결속될 때까지 유연지지부와 같이 작동할 수 있게 한다.



그림 3.2.5.8 기존 면진구조용 강재댐퍼의 형상
(일본, 신일본제철)

면진구조에서 에너지흡수장치인 댐퍼는 제진구조보다 더욱 큰 변형능력을 요구하므로 강재는 될수록 연신율이 큰 연강(Mild Steel)을 사용하는 것이 좋다. 따라서 일본의 U형 댐퍼는 연강인 SS400과 강도가 비슷하나 연신율은 약 20~30% 향상시킨 SN490B 강재를 사용하고 있다. SS400의 경우 연신율이 약 30%이나 SN490B는 연신율이 약 40%에 가까운 값을 나타내고 있다. 본 연구에서는 댐퍼용 강재로 사용하기 위하여 강도가 연신율이 70%를 초과하는 고인성강재(High Toughness Steel: HTS)를 개발하였다.

댐퍼 사용강재의 연신율을 더 크게 할 경우, 댐퍼를 안정적으로 사용할 수 있는 한계변형량을 더 증가시킬 수 있을 것으로 판단되어 본 장에서는 SS400과 HTS를 사용한 댐퍼에 대한 비선형 유한요소 해석결과를 비교하여 사용강재의

특성 차이가 댐퍼의 변형능력과 복원력특성에 미치는 영향을 파악하고 HTS를 사용한 댐퍼의 형상비에 따른 해석결과에 근거하여 형상비에 따른 댐퍼의 구조적 특성을 파악하고자 한다.

(2) 해석방법

본 연구에서는 범용 유한요소 프로그램인 ANSYS[24](Release 9.0)를 사용하였고 철골구조의 3차원 모델링에 사용되는 SOLID45 요소를 적용하여 실제 크기로 모델링을 실현하였다.

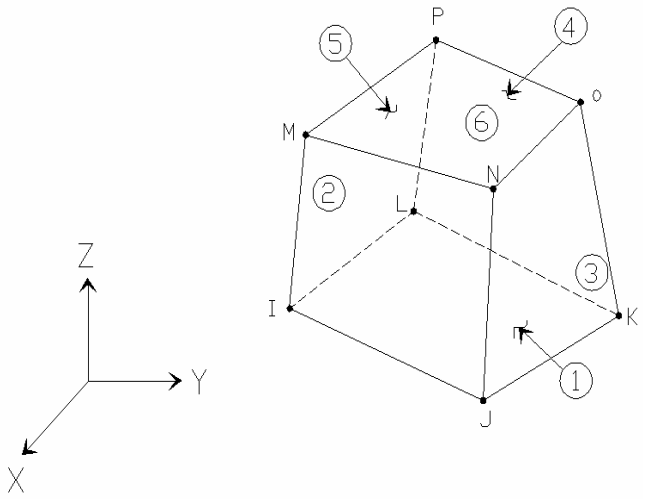


그림 3.2.5.9 모델링에 사용된 SOLID45 요소

그림 3.2.5.9와 같이 8개의 절점으로 구성된 SOLID45 요소는 각 절점당 UX, UY, UZ 3방향의 자유도를 가지고 3축 방향의 균열를 표현할 수 있어 철골 부재의 휨변형과 전단변형 효과를 동시에 고려할 수 있다.

구조물의 비선형 거동은 여러 가지 원인에 의해 발생하지만, 주요 원인은 기하비선형과 재료비선형으로 구분할 수 있다. 기하비선형에서는 대변형의 기준을 적용하며, 재료 비선형을 고려하기 위해 그림 3.2.5.10에 나타낸 것과 같이 소성 관련 옵션에서 등방성 가공경화(Isotropic Hardening) 법칙을 포함한 MISO (Multilinear Isotropic Hardening)를 사용하였으며 재료의 항복조건으로는 von mises 항복조건을 사용한다.

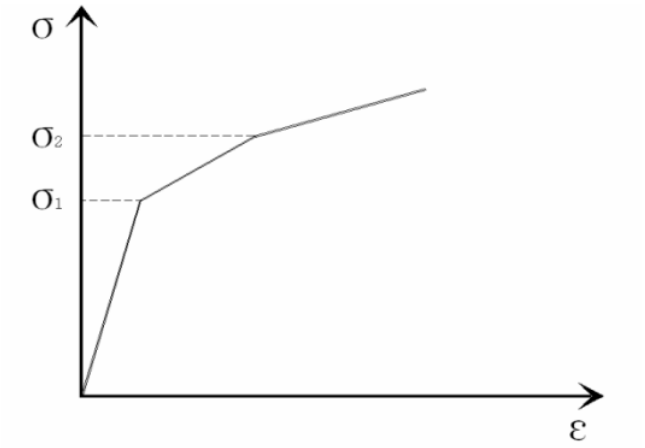


그림 3.2.5.10 MISO의 응력-변형률 관계

실제 하중조건과의 동일성과 수렴성을 향상시키기 위하여, 그림 3.2.5.11와 같이 댐퍼의 단부 평면에 위치한 node를 coupling하고 master node를 통한 변위 제어방식으로 한쪽 단부에서 평판부의 길이방향 또는 수직방향에 하중을 작용시켰으며 다른 한 단부의 경계조건을 fix로 두었다.

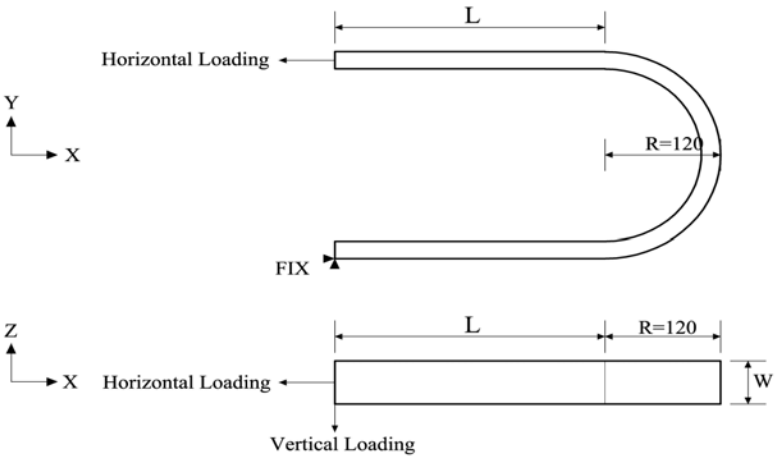


그림 3.2.5.11 해석변수, 경계조건 및 하중의 작용방향

표 3.2.5.2 해석에 입력되는 재료의 물성치

Step	High Toughness Steel		SS400	
	Strain	Stress (MPa)	Strain	Stress (MPa)
1	0	0	0	0
2	0.000079	150	0.00077	150
3	0.002774	527	0.002256	440
4	0.017552	544	0.031676	452
5	0.032202	560	0.059725	458
6	0.074842	600	0.064671	462
7	0.145482	650	0.071738	468
8	0.249412	700	0.079623	475
9	0.457522	750	0.085106	479
10	0.658862	775	0.1105	481
Young's Modulus (MPa)	190,000		195,000	
Poisson's Ratio	0.3		0.3	

해석변수로는 댐퍼의 평판부 길이와 curve부분 반지름의비 L/R, 폭 W, 두께 T로 두로 해석을 수행하였으나, 면진장치의 크기를 고려하여 R의 값은 120mm로 고정하였다. 또한 지진하중은 불규칙적이므로 하중의 작용방향도 고려할 필요가 있다.

재료의 항복조건으로는 von mises 항복조건을 사용하였고 해석에 입력되는 재료의 물성치는 그림 3.2.5.10에 나타낸 인장시험 결과를 이용하였으나, U형 댐퍼의 제작과정에서 curve부분에 생기는 소성변형이 자체의 강성과 에너지 흡수능력에 미치는 영향을 고려하여 표 3.2.5.2에 나타낸 것과 같이 응력-변형율 곡선을 파단 시까지 9개 구간으로 단순화하였다.

(3) 재료특성이 댐퍼의 구조특성에 미치는 영향

U형 댐퍼에서 curve의 반지름에 대한 평판부 길이의 비 L/R가 댐퍼의 변형능력에 가장 큰 영향을 미친다. 따라서 본 절에서는 댐퍼의 폭을 50mm, 두께를 20mm로 고정하고 L/R의 값만 변화시키면서 해석을 수행하였고 해석결과에 기초하여 SS400과 HTS를 사용한 댐퍼의 변형능력을 비교하여 재료의 특성이 댐퍼의 구조특성에 미치는 영향을 파악하고자 한다.

(가) 재료의 인장시험

댐퍼를 제작하는데 사용되는 강재의 연신율을 높이기 위하여 표 3-2에 나타낸 것과 같이 HTS는 탄소의 함량을 줄이고 망간과 규소의 함량을 증가시켰다. 또한 티탄, 동, 크롬 등 원소를 첨가하여 HTS의 내구성과 기계적 가공성능을 향상시켰다. 하지만 아직까지 실험적 생산단계에 있고 제작기술이 성숙되지 못한 등 여러 가지 원인으로 하여 시장가격은 SS400의 2배 정도이다. 향후 제품의 안정성이 보장하고 제작기술이 더욱 성숙된다면 대량적인 생산이 가능할 것이고 시장가격도 얼마간 줄어들 것으로 판단된다.

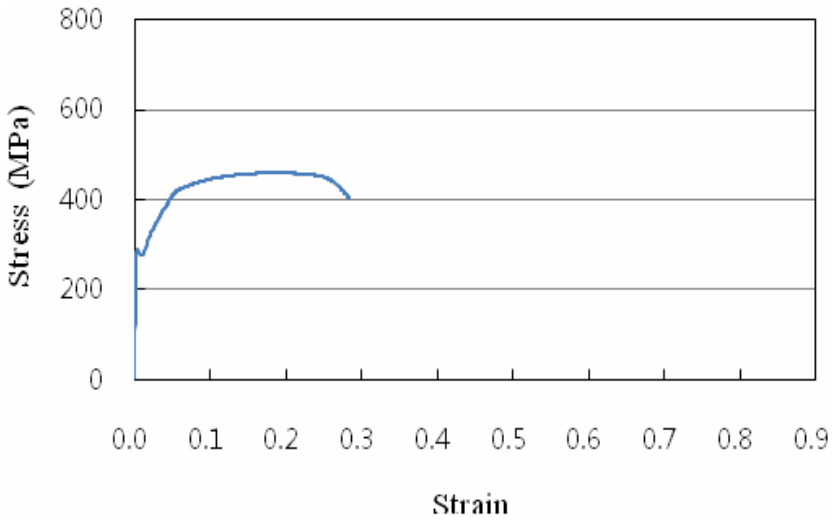
표 3.2.5.4 재료의 화학성분 및 시장가격 비교

Item	HTS	SS400
Chemical Components(wt%)	C : 0.02Si : 0.5Mn : 17~18	C : 0.2Si : 0.2Mn : 1.2
Market Price (compared with SS400)	2.0	1.0

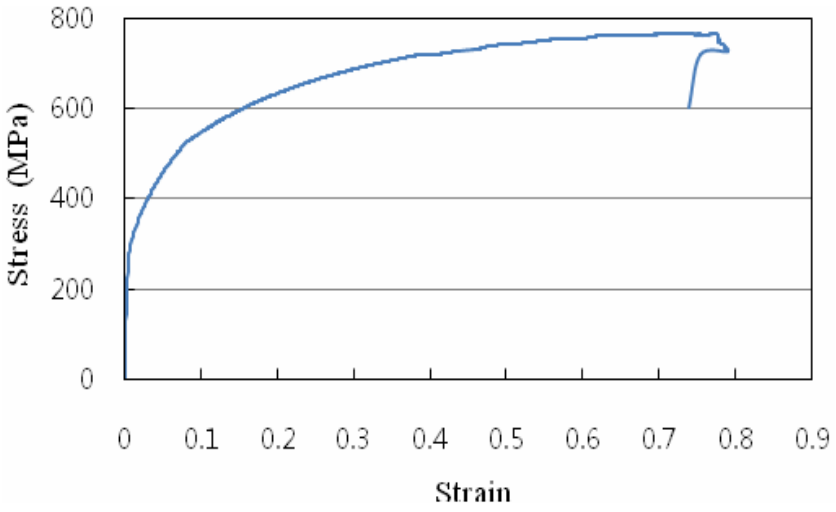
해석에 입력되는 물성치를 확정하기 위하여 재료의 인장시험을 진행하였고 그 역학적 특성을 파악하였으며 시험결과를 각각 표 3.2.5.4과 그림 3.2.5.12에 나타내었다. 인장시험은 KS B 080125)의 제4호 시험편(환봉시험편)을 기준으로 하였고 HTS의 연신율이 가력속도에 민감하게 반응하는 것을 고려하여 가력속도는 0.05mm/sec를 유지하였다. 표 3-3에서 나타낸 것과 같이 HTS의 탄성계수와 항복응력은 SS400에 비하여 약간 떨어지지만 인장응력과 연신율은 훨씬 크게 나타났다. 또한 HTS의 항복비가 SS400에 비하여 매우 낮은 값을 가지며 항복이후에는 강도가 천천히 상승하기 때문에 안전적인 측면에서 효과적이라고 할 수 있다. 그림 3.2.5.12를 보면 SS400은 항복점이 매우 뚜렷하지만 HTS는 명확한 항복점이 관찰되지 않았다. 이는 대부분의 고인성강재가 갖고 있는 특징이다.

표 3.2.5.4 재료의 역학적특성 비교

specimen	Young's Modulus(MPa)	Yield Stress (MPa)	Ultimate Stress(MPa)	Elongation (%)
SS400	195,000	282	481	26.8
High Toughness Steel	190,000	264	775	72.9



(a) SS400



(b) HTS

그림 3.2.5.12 SS400과 HTS의 응력-변형률 관계

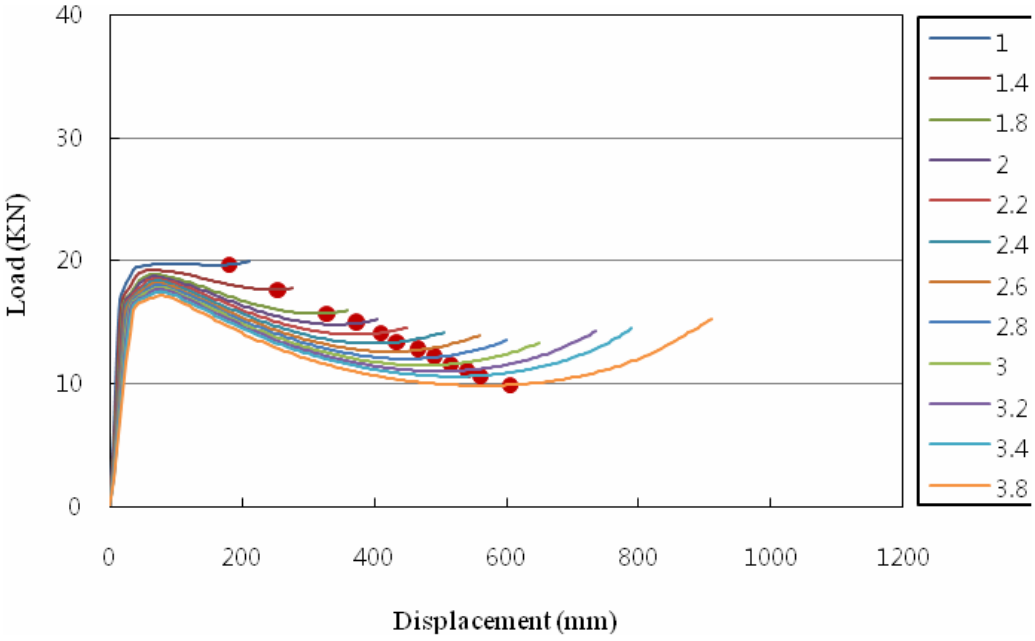
(나) 하중의 작용방향에 따른 하중-변위 관계

댐퍼 평판부의 길이방향에 따라 하중을 작용하였을 경우의 하중-변위 관계는 그림 3.2.5.13에 나타내었고 수직방향에 따라 하중을 작용하였을 경우의 하중-변위 관계는 그림 3.2.5.14에 나타내었다.

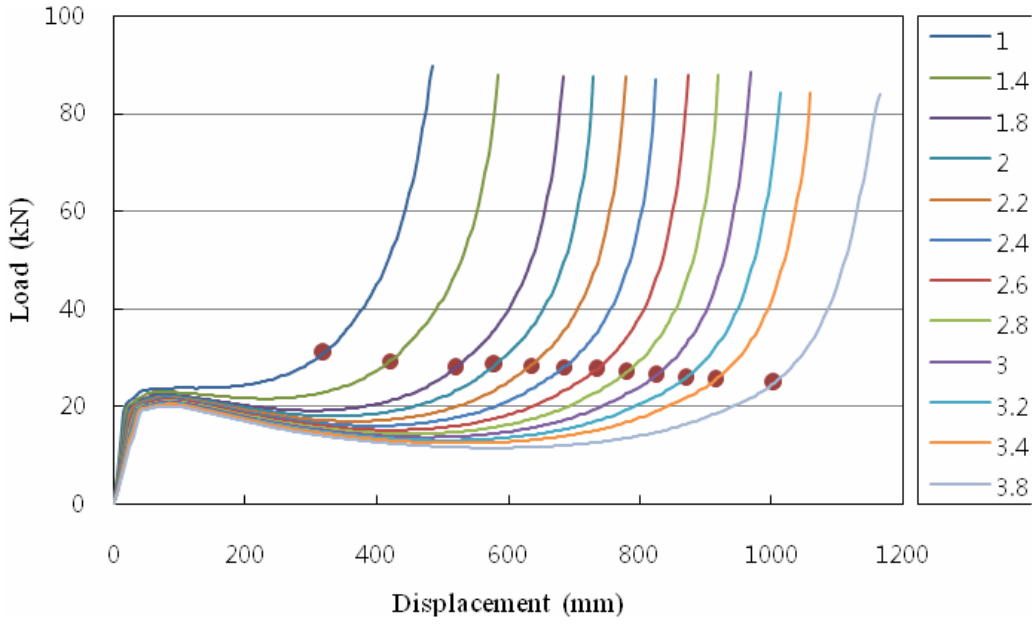
재료의 경화가 발생하면 지진과 같이 반복적이고 불규칙하게 작용하는 하중에 의하여 댐퍼의 변형능력이 급격히 저하되면서 파단이 발생할 수 있기 때문에, 본 연구에서는 변경경화가 크게 발생하기 전의 변위를 설계에 필요한 변형량으로 규정하였으며 "한계변형량"이라고 정의하였다. 한계변형량은 그림에서 ●로 표시하였다.

그림 3.2.5.13에 나타내 것과 같이 댐퍼 평판부의 길이방향에 따라 하중이 작용할 경우, HTS를 사용한 댐퍼의 소성변형 구간은 비교적 길며 긴 응력경화 구간을 걸친 후에 파단이 발생하지만 SS400을 사용한 댐퍼는 변곡점 이후 짧은 구간에서 파단이 발생된다.

그림 3.2.5.14을 보면 댐퍼가 평판부의 길이방향에 수직되는 하중을 받는 경우에도 HTS를 사용한 댐퍼의 소성변형 구간이 SS400을 사용한 댐퍼보다 길지만 평판부의 길이방향에 따라 하중이 작용할 경우와는 달리 탄성변형 이후 선명한 내력저하가 없다. 또한 SS400을 사용한 댐퍼는 변곡점이 없이 응력경화를 일으키고 파단이 발생하기 때문에 본 연구에서는 그것의 최대변형량을 한계변형량으로 두었다.

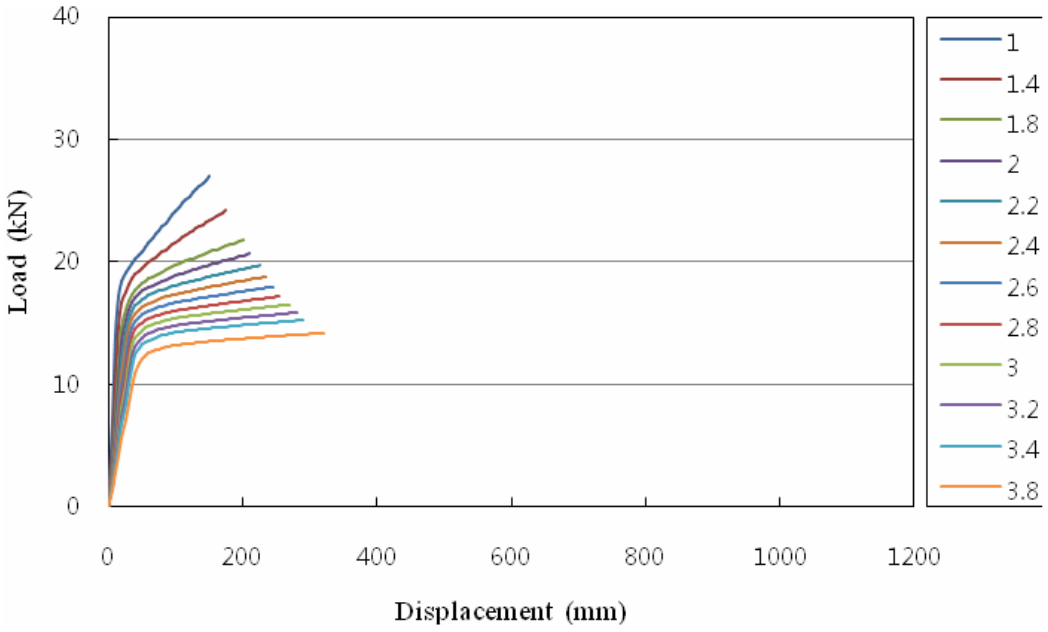


(a) SS400

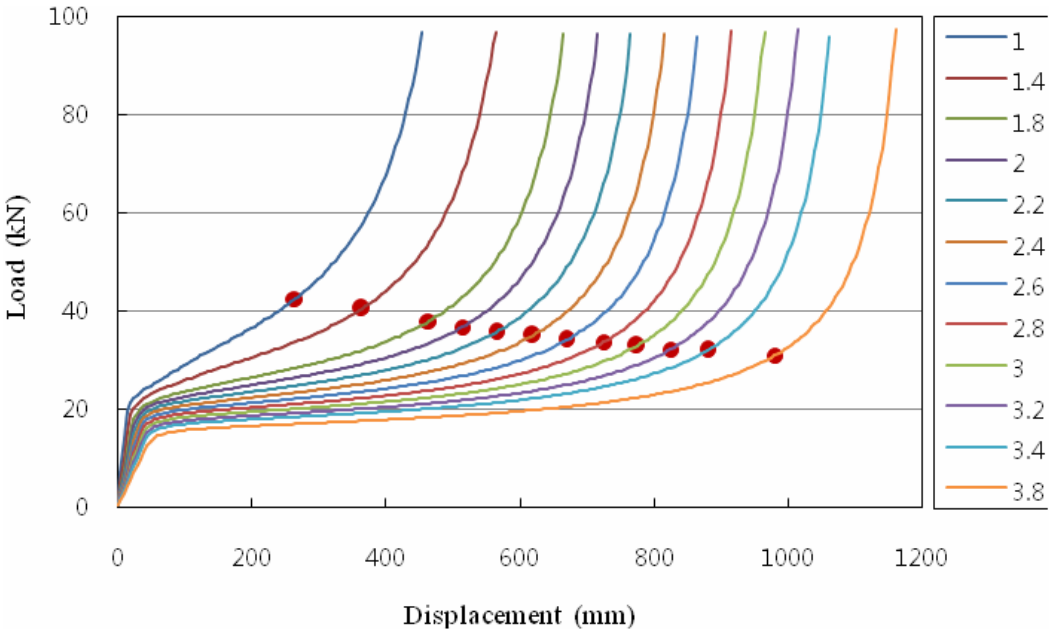


(b) HTS

그림 3.2.5.13 길이방향 하중이 작용할 경우, 하중-변위 관계



(a) SS400

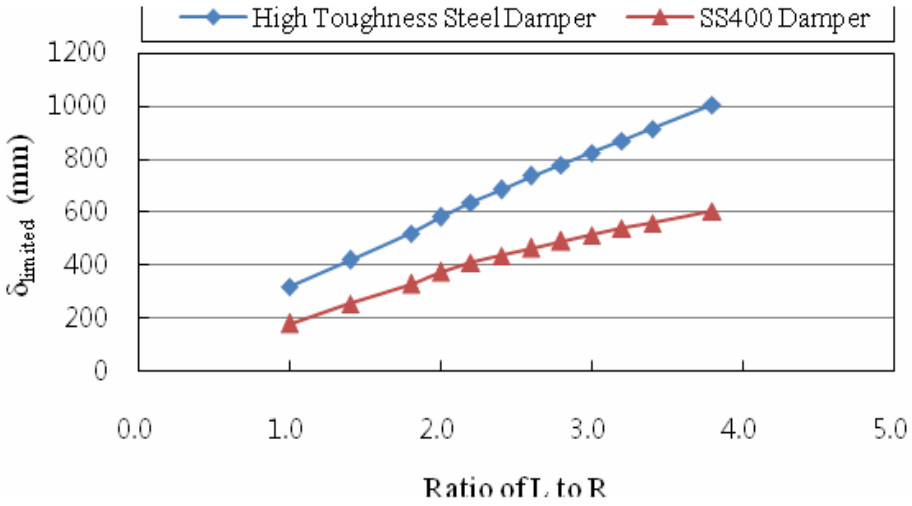


(b) HTS

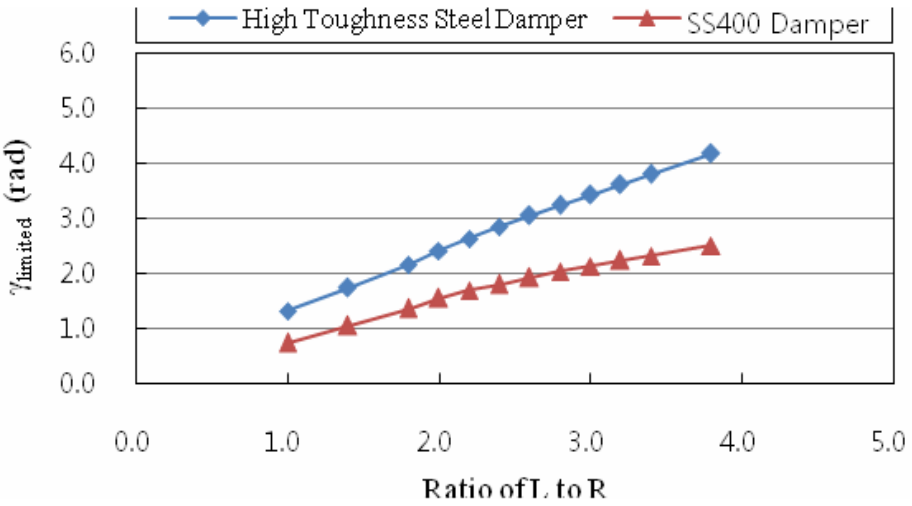
그림 3.2.5.14 수직방향 하중이 작용할 경우, 하중-변위 관계

(다) 사용재료에 따른 댐퍼의 변형능력

댐퍼 평판부의 길이방향에 따라 하중이 작용할 경우의 한계변형량과 한계전단변형각(댐퍼의 높이에 대한 한계변형량의 비)을 그림 3.2.5.15에 나타내었다. 그림에서 나타낸 것과 같이 L/R의 값이 같을 경우에 HTS를 사용한 댐퍼의 한계변형량과 한계전단변형이 SS400을 사용한 댐퍼보다 훨씬 크게 나타났다. 이것은 HTS의 연신율이 크고 또 항복이후에도 강도가 천천히 상승하기 때문인 것으로 판단된다.



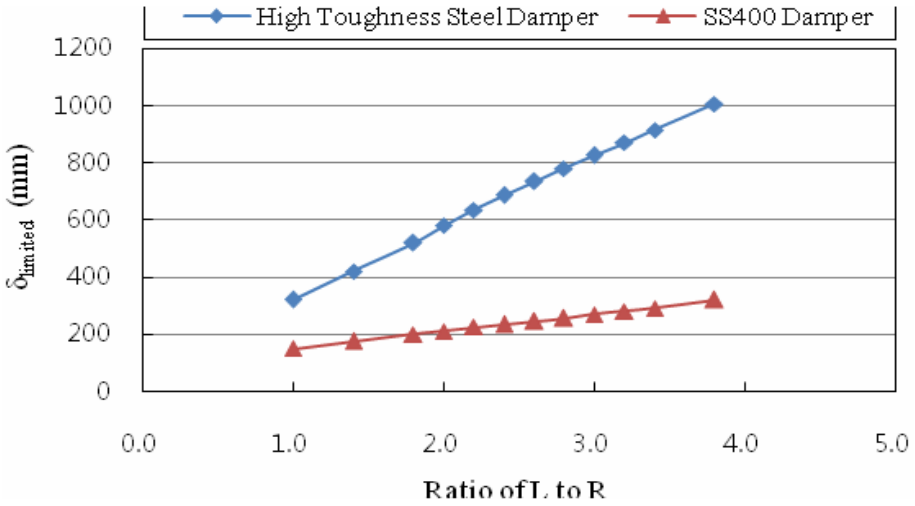
(a) 한계변형량



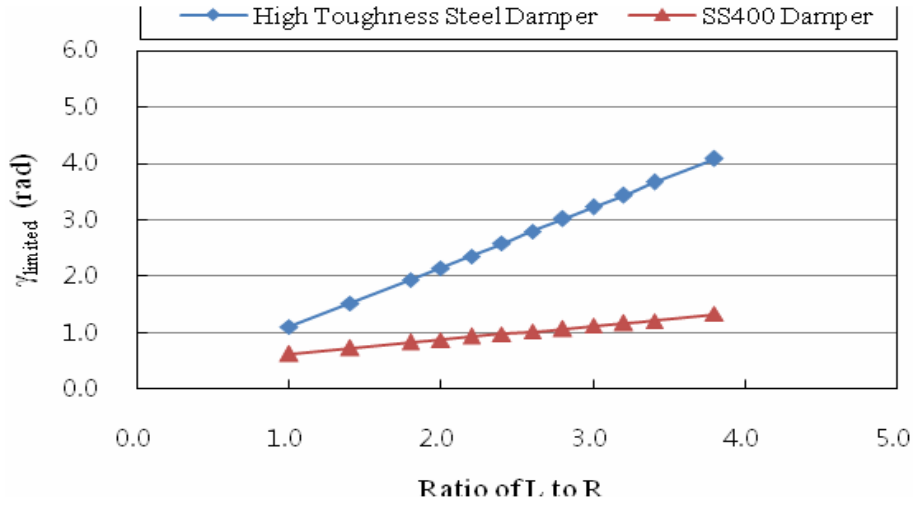
(b) 한계전단변형량

그림 3.2.5.15 길이방향 하중이 작용할 경우, 한계변형량과 한계전단변형각

댐퍼의 평판부에 수직되는 하중이 작용할 경우, 한계변형량과 한계전단변형각을 그림 3.2.5.16에 나타내었다. 그림을 보면 길이방향 하중을 받는 경우와 마찬가지로 L/R의 값이 같은 조건에서 HTS로 제작된 댐퍼의 변형능력이 훨씬 우수하게 나타났다. 즉 하중의 작용방향에 관계없이 연신율이 큰 HTS를 사용한 댐퍼의 변형능력이 우수한 것으로 나타났다.



(a) 한계변형량



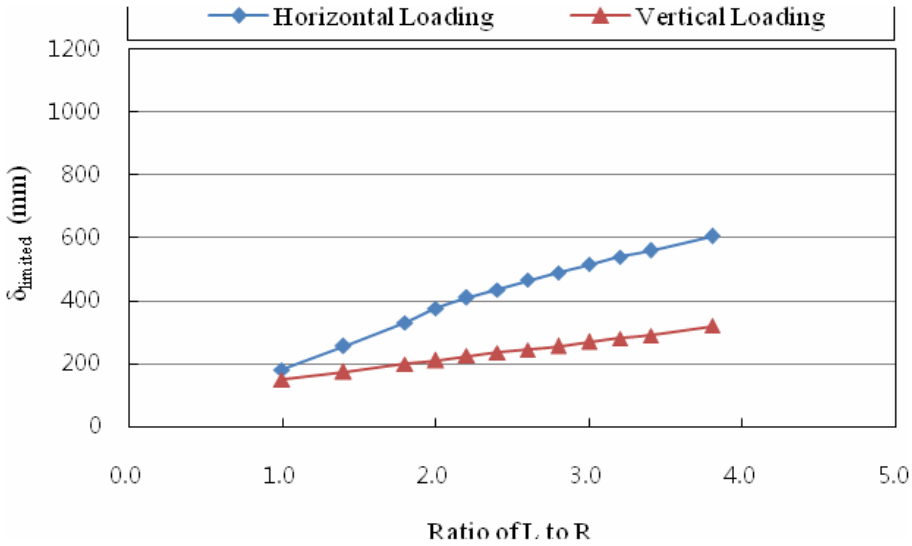
(b) 한계전단변형각

그림 3.2.5.16 수직방향 하중이 작용할 경우, 한계변형량과 한계전단변형각

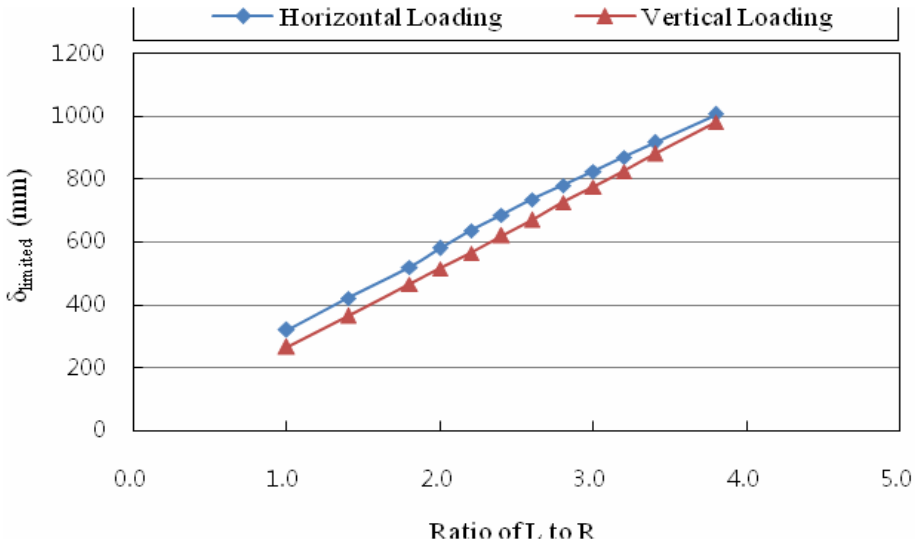
(라) 하중의 작용방향에 따른 댐퍼의 변형능력

같은 하중조건에서는 HTS를 사용한 댐퍼의 변형능력이 SS400을 사용한 댐퍼의 변형능력보다 우수함을 앞에서 이미 증명하였다. 하지만 면진구조에서는 대부분의 경우에 서로 수직되는 방향에 각각 2개씩 모두 4개의 댐퍼가 설치되어 지진 발생 시에는 항상 동시에 작동하게 된다. 불규칙하고 반복적인 지진하중을 받는 과정에서 만약 임의의 한 방향의 댐퍼에서 먼저 파단이 발생한다면 면진시스템 전체의 에너지 흡수능력은 크게 저하하게 된다. 때문에 면진장치에 사용되는 댐퍼는 설치방향에 관계없이 그 변형능력이 비슷해야 하는 것을 원칙으로 하고 있다.

서로 다른 하중조건에서 댐퍼의 변형능력을 비교하기 위하여 L/R에 따른 한계변형량과 한계전단변형각을 각각 그림 3.2.5.17과 그림 3.2.5.18에 나타내었다. 그림을 보면 HTS를 사용한 댐퍼는 하중의 작용방향에 관계없이 거의 비슷한 변형능력을 나타내고 L/R에 따른 변화경향 역시 거의 같게 나타나지만 SS400을 사용한 댐퍼는 길이방향 하중을 받는 경우에 수직방향 하중을 받는 경우보다 훨씬 우수한 변형능력을 나타내며 L/R가 커짐에 따라 그 차이도 더욱 커진다. 이것은 길이방향 하중이 작용할 경우에는 응력이 주로 단순인장과 휨모멘트에 의하여 발생하는 것과 달리 수직방향 하중이 작용할 경우에는 비틀림의 영향을 많이 받기 때문인 것으로 판단된다. 또한 연신율이 향상된 HTS의 뚜렷한 항복점이 없고 항복이후 비교적 긴 구간에서 강도가 천천히 상승하는 재료적 특성이 수직방향 하중조건에서 더욱 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.

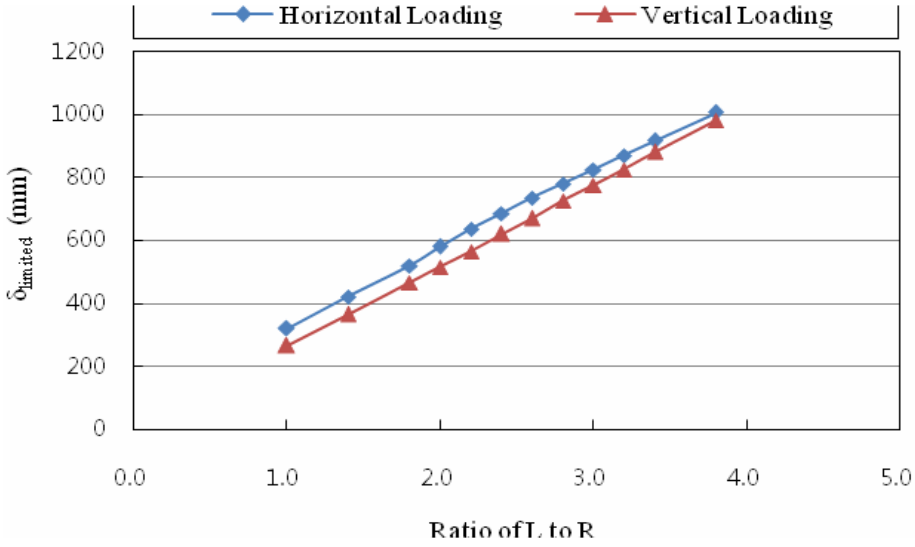


(a) SS400

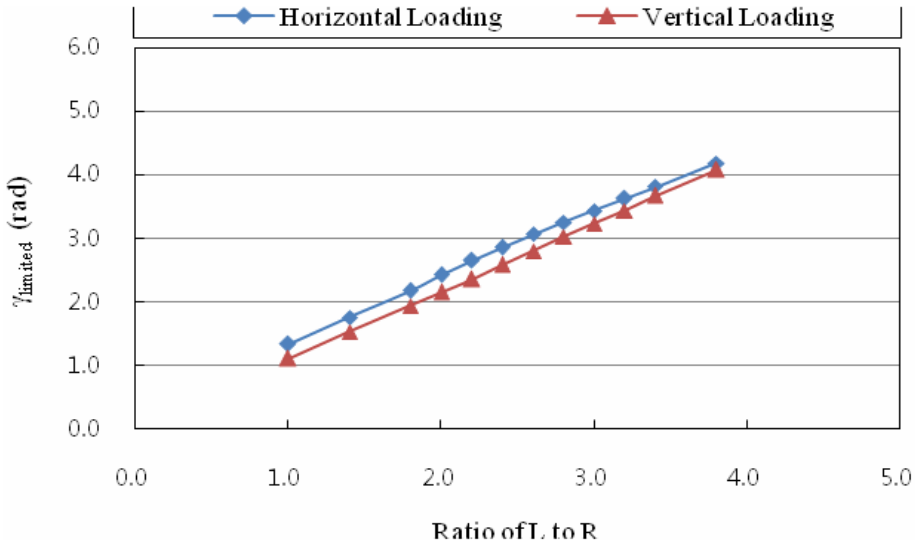


(b) HTS

그림 3.2.5.17 하중의 작용방향에 따른 한계변형량



(a) SS400



(b) HTS

그림 3.2.5.18 하중의 작용방향에 따른 한계변형각

(4) 형상비에 따른 고인성강재 댐퍼의 구조특성

HTS를 사용한 댐퍼의 형상을 제안하기 전에 형상비에 따른 댐퍼의 구조적 특성을 파악하는 것은 매우 중요하다. 본 절에서는 댐퍼의 L/R, 두께 및 폭을 변수로 하여 앞에서와 같은 방법으로 해석을 수행하여 각 변수가 댐퍼의 초기강성, 항복강도, 변형능력에 미치는 영향을 분석한다. 또한 그 결과에 근거하여 변형능력과 에너지흡수능력을 모두 고려한 최적의 형상비를 결정하고 최종적으로 응력분포를 고려한 개구부를 둔 형상을 제안하는데 기초를 마련하고자 한다.

(가) L/R에 따른 댐퍼의 구조적 특성

3.3절에서 재료의 특성이 댐퍼의 구조적 특성에 미치는 영향을 파악하기 위하여 이미 두께는 20mm, 폭은 50mm로 고정하고 L/R의 값을 변수로 해석을 실행하였으며 하중-변위 관계를 그림 3.2.5.13(b)와 3.2.5.14(b)에 나타내었다. 따라서 여기서 해석을 별도로 다시 수행하지 않고 위의 결과에 근거하여 L/R에 따른 댐퍼의 초기강성, 항복강도를 파악하고자 한다. L/R에 따른 댐퍼의 초기강성, 항복강도, 한계변형량 및 한계전단변형각을 하중의 작용방향 별로 표 3.2.5.7에 나타내었다.

표 3.2.5.7 L/R에 따른 댐퍼의 구조적 특성

L/R	Horizontal Loading				Vertical Loading			
	Elastic Stiffness (kN/mm)	Yield Strength (kN)	Limited deformation (mm)	Limited Shear Strain(rad)	Elastic Stiffness (kN/mm)	Yield Strength (kN)	Limited deformation (mm)	Limited Shear Strain(rad)
1.0	1.25	18.1	320	1.33	1.42	18.6	265	1.10
1.4	1.01	17.9	420	1.75	1.02	18.1	365	1.52
1.8	0.85	17.7	520	2.17	0.77	17.6	465	1.94
2.0	0.79	17.6	580	2.42	0.68	17.3	515	2.15
2.2	0.73	17.5	635	2.65	0.61	17.0	565	2.35
2.4	0.69	17.5	685	2.85	0.54	16.6	620	2.58
2.6	0.65	17.4	735	3.06	0.49	16.1	670	2.79
2.8	0.61	17.4	780	3.25	0.44	15.6	725	3.02
3.0	0.58	17.3	825	3.44	0.40	15.0	775	3.23
3.2	0.55	17.3	870	3.63	0.37	14.4	825	3.44
3.4	0.52	17.2	915	3.81	0.34	13.7	880	3.67
3.8	0.47	17.0	1005	4.19	0.28	12.9	980	4.08

① 초기강성

표 3.2.5.7에서 나타낸 초기강성에 근거하여 L/R에 따른 초기강성의 변화를 그림 3.2.5.19에 나타내었다. 그림을 보면 하중의 작용방향에 관계없이 L/R가 커짐에 따라 초기강성은 점차 작아지지만, 수직방향 하중이 작용할 경우에 그 감소가 더 빠르게 진행된다. 또한 L/R의 값이 약 1.5보다 작을 때에는 수직방향 하중을 받는 경우에 초기강성이 크게 나타났지만 1.5보다 클 때에는 오히려 작게 나타났다.

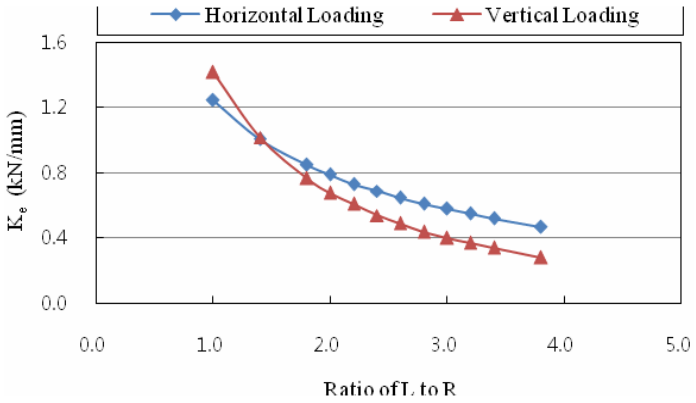


그림 3.2.5.19 L/R에 따른 초기강성

② 항복강도

그림 3.2.5.20에 나타낸 것과 같이 댐퍼의 항복강도 역시 L/R가 커짐에 따라 감소한다. 하지만 길이방향 하중이 작용할 경우에는 항복강도의 감소가 천천히 진행되는 반면에 수직방향 하중이 작용할 경우에는 그 감소율이 크게 나타났다. 이것은 길이방향 하중을 받을 때에는 단순인장과 휨모멘트의 영향이 큰 반면에 수직방향 하중을 받을 때에는 비틀림의 영향이 크기 때문인 것으로 판단된다.

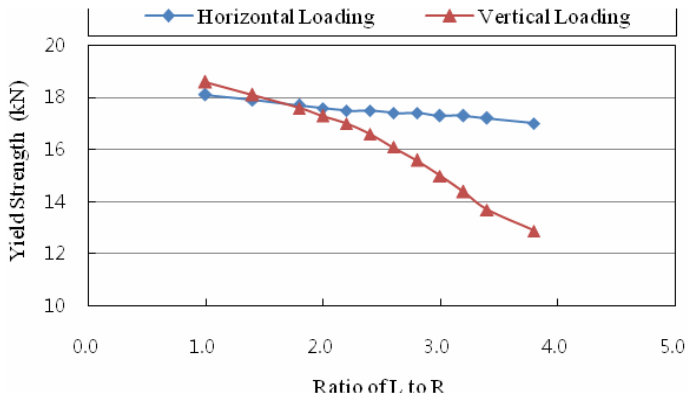


그림 3.2.5.20 L/R에 따른 항복강도

③ 변형능력

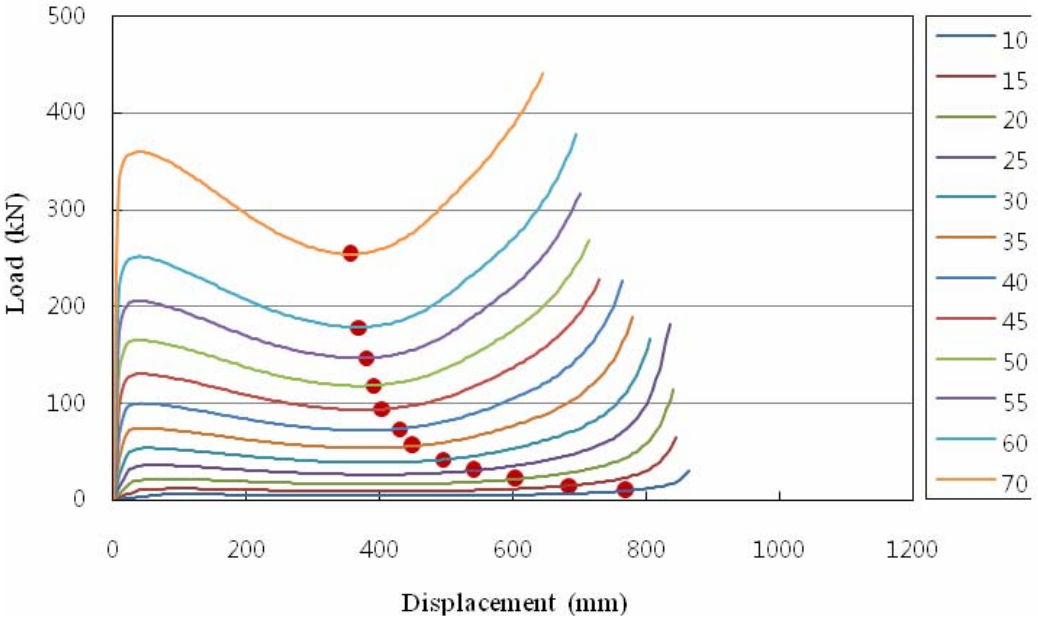
L/R에 따른 댐퍼의 변형능력은 그림 3.2.5.17(b)와 3.2.5.18(b)에 이미 나타내었다. 앞에서 설명한 것과 같이 L/R가 커짐에 따라 댐퍼의 변형능력은 커지며 작용하중의 방향에 관계없이 거의 비슷한 값을 가지며 그 차이는 미미하다. 따라서 면진구조용 댐퍼가 지진과 같이 불규칙적인 하중을 받는 경우에 어느 한 방향에서 먼저 파단이 발생하여 전체 면진시스템의 에너지흡수능력이 저하되는 현상을 피면할 수 있다.

(나) 두께에 따른 댐퍼의 구조적 특성

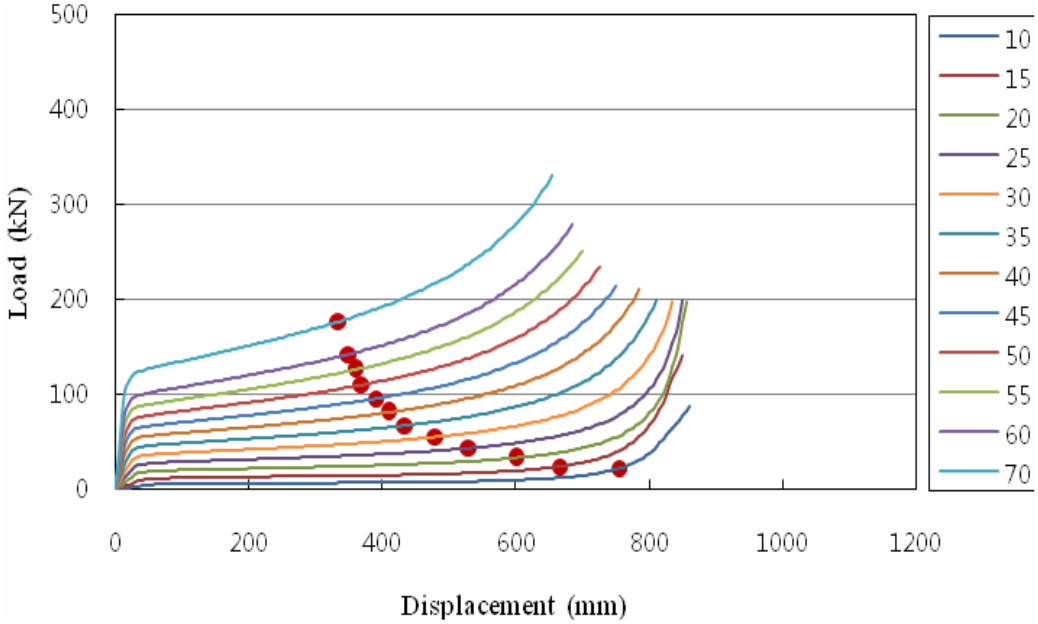
댐퍼의 L/R의 값은 2.4, 폭은 50mm로 고정하고 두께를 변수로 두고 해석을 수행하였으며 결과에 근거하여 하중-변위 관계를 그림 3.2.5.21에 나타내었고 초기강성, 항복강도, 한계변형량 및 한계전단변형각을 하중의 작용방향 별로 표 3.2.5.8에 나타내었다.

표 3.2.5.8 두께에 따른 댐퍼의 구조적 특성

Thickness (mm)	Horizontal Loading				Vertical Loading			
	Elastic Stiffness (kN/mm)	Yield Strength (kN)	Limited deformation(mm)	Limited Shear Strain(rad)	Elastic Stiffness (kN/mm)	Yield Strength (kN)	Limited deformation (mm)	Limited Shear Strain(rad)
10	0.08	5.4	770	3.20	0.11	5.6	755	3.15
15	0.28	9.6	685	2.85	0.28	10.2	665	2.77
20	0.69	17.7	605	2.52	0.54	17.3	600	2.50
25	1.41	28.5	540	2.25	0.89	25.1	530	2.21
30	2.56	44.8	495	2.06	1.36	32.8	480	2.00
35	4.27	65.0	450	1.88	1.89	42.2	435	1.81
40	6.71	88.2	430	1.79	2.52	51.5	410	1.71
45	10.05	119.4	405	1.69	3.21	61.3	390	1.63
50	14.52	154.1	390	1.63	3.99	71.6	370	1.54
55	20.36	191.1	380	1.58	4.84	84.8	360	1.50
60	27.87	235.3	370	1.54	5.77	96.5	350	1.46
70	48.27	340.7	355	1.48	7.89	121.4	335	1.40



(a) 길이방향 하중이 작용할 경우



(b) 수직방향 하중이 작용할 경우

그림 3.2.5.21 두께에 따른하중-변위 관계

① 초기강성

그림 3.2.5.22에 나타낸 것과 같이 댐퍼의 초기 강성은 두께가증가함에 따라 점차 커지는 경향을 나타낸다. 또한 길이방향 하중이 작용하는 경우에 비하여 수직방향 하중이 작용하는 경우에 댐퍼의 초기강성은 더 크고 그 증가율도 더욱 크게 나타나는데 그 원인은 댐퍼의 두께가 증가할 때, curve부분에 미치는 인장 및 휨의 영향이 비틀림의 영향보다 더 크기 때문인 것으로 판단된다.

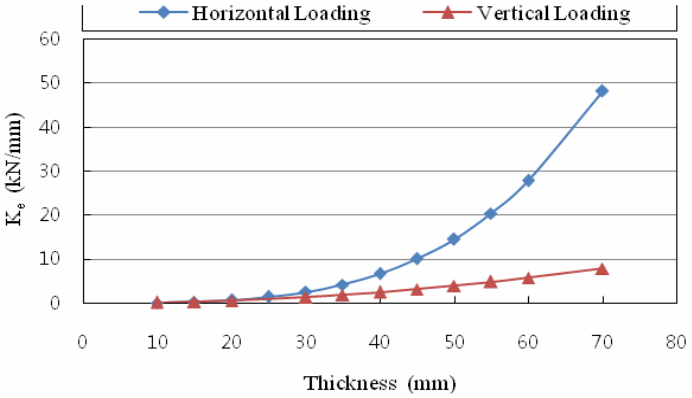


그림 3.2.5.22 두께에 따른 초기강성

② 항복강도

댐퍼의 두께에 따른 항복강도의 변화를 그림 3.2.5.23에 나타내었다. 그림을 보면 두께의 변화가 항복강도에 미치는 영향은 초기강성에 미치는 영향과 비슷한 경향을 나타낸다. 즉 길이방향 하중을 받는 경우에 두께에 따른 항복강도는 수직방향 하중을 받는 경우보다 더욱 크며 두께가 증가함에 따라 항복강도의 증가율도 더 크게 나타난다. 그 원인 역시 curve부분에 미치는 비틀림 영향이 더 크기 때문인 것으로 판단된다.

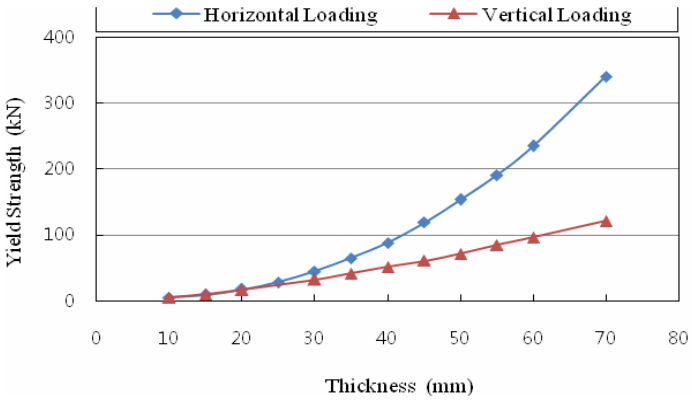
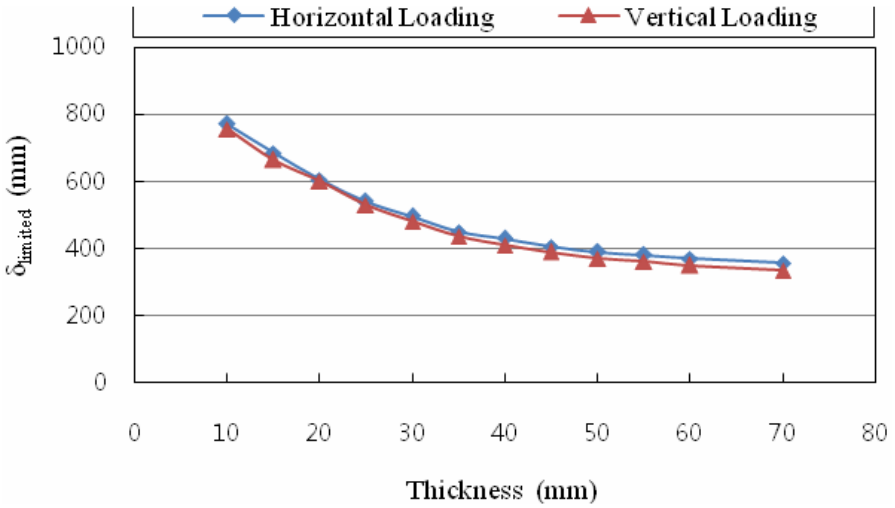


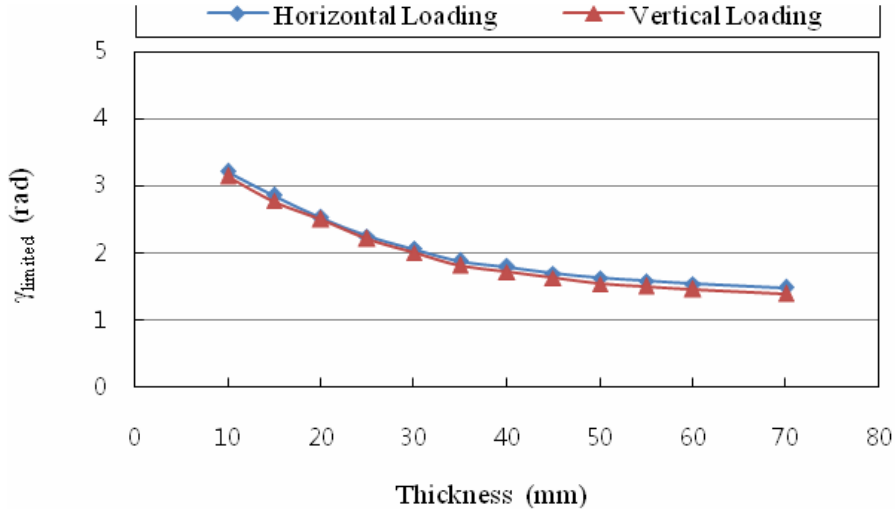
그림 3.2.5.23 두께에 따른 항복강도

③ 변형능력

그림 3.2.5.24에 나타낸 것과 같이 댐퍼의 변형능력은 두께가 증가함에 따라 오히려 작아지며 그 변화는 두께가 40mm보다 작을 경우에는 미미하지만 40mm 보다 클 경우에는 비교적 크게 나타난다. 하지만 L/R를 변수로 할 경우와 마찬가지로 그 변형능력은 댐퍼에 작용하는 하중의 방향에 관계없이 거의 비슷하게 나타난다. 이는 HTS의 재료적 특성이 댐퍼에미치는 영향으로서 면진장치용 댐퍼의 동시 작업성을 확보할 수 있다. 따라서 두께가 증가할 경우에도 지진 발생시 어느 한 방향에서의 댐퍼가 먼저 파단되는 우려가 없다.



(a) 한계변형량

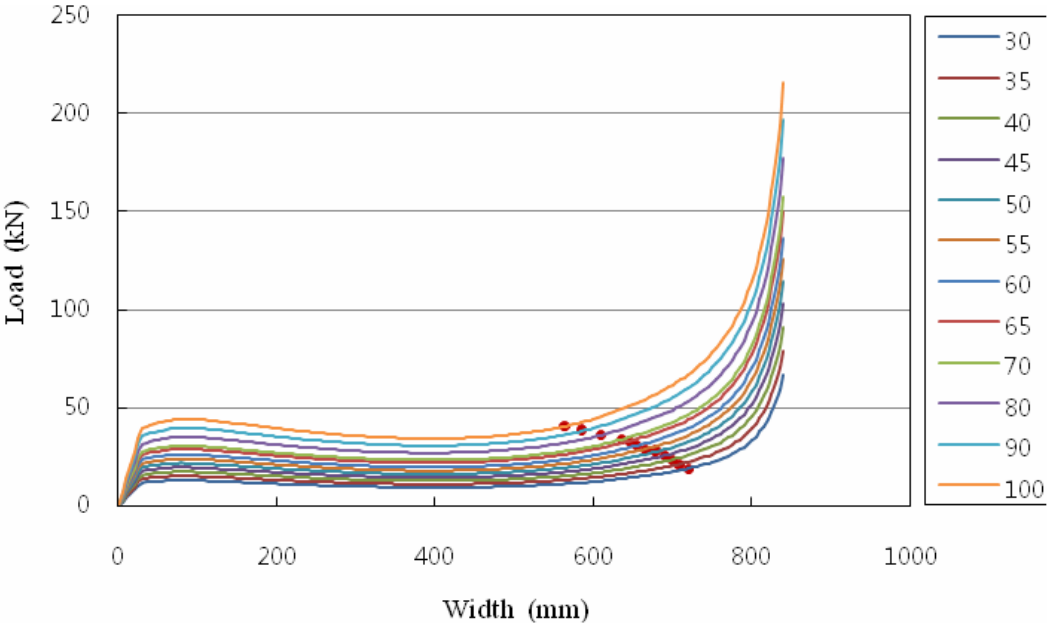


(b) 한계전단변형각

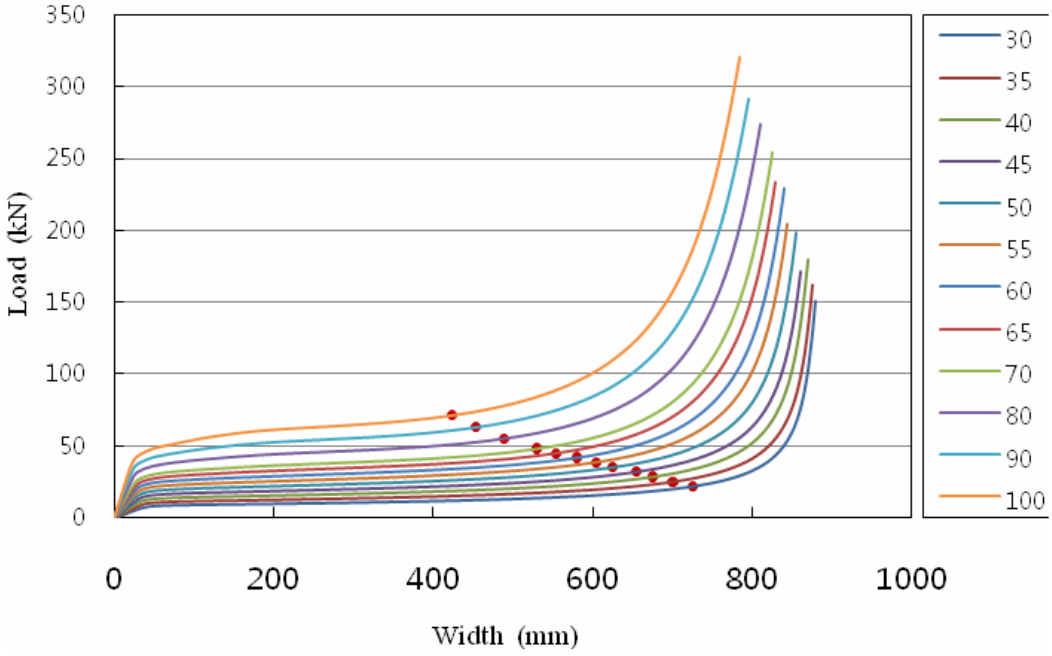
그림 3.2.5.24 두께에 따른 한계변형량과 한계전단변형각

(다) 폭에 따른 댐퍼의 구조적 특성

댐퍼의 L/R의 값은 2.4, 두께는 20mm로 고정하고 폭을 변수로 두고 해석을 수행하였으며 하중-변위 관계를 그림 3.2.5.25에 나타내었고 초기강성, 항복강도, 한계변형량 및 한계전단변형각을 표 3.2.5.9에 나타내었다.



(a) 길이방향 하중이 작용할 경우



(b) 수직방향 하중이 작용할 경우

그림 3.2.5.25 폭에 따른 하중-변위 관계

표 3.2.5.9 폭에 따른 댐퍼의 구조적 특성

Width	Horizontal Loading				Vertical Loading			
(mm)	Elastic Stiffness (kN/mm)	Yield Strength (kN)	Limited deformation(mm)	Limited Shear Strain(rad)	Elastic Stiffness (kN/mm)	Yield Strength (kN)	Limited deformation(mm)	Limited Shear Strain(rad)
30	0.41	10.9	720	3.00	0.21	7.5	725	3.02
35	0.48	12.1	710	2.96	0.28	9.2	700	2.92
40	0.55	13.4	700	2.92	0.36	11.3	675	2.81
45	0.62	15.6	690	2.875	0.45	13.8	655	2.73
50	0.69	17.1	680	2.83	0.54	16.4	625	2.60
55	0.76	19.4	665	2.77	0.64	18.9	605	2.52
60	0.83	21.5	655	2.73	0.75	21.4	580	2.42
65	0.91	23.6	645	2.69	0.86	24.1	555	2.31
70	0.96	25.7	635	2.65	0.98	27.1	530	2.21
80	1.11	29.9	610	2.54	1.22	33.4	490	2.04
90	1.24	34.3	585	2.44	1.48	39.2	455	1.90
100	1.39	38.9	565	2.35	1.76	45.2	425	1.77

① 초기강성

그림 3.2.5.26에 나타낸 것과 같이 댐퍼의 폭이 증가함에 따라 초기강성은 커진다. 또한 댐퍼의 폭이 70mm보다 작을 경우에는 길이방향 하중을 받을 때 초기강성이 더 크게 나타나지만 70mm보다 큰 경우에는 수직방향 하중을 받을 때 초기강성이 더 크게 나타난다.

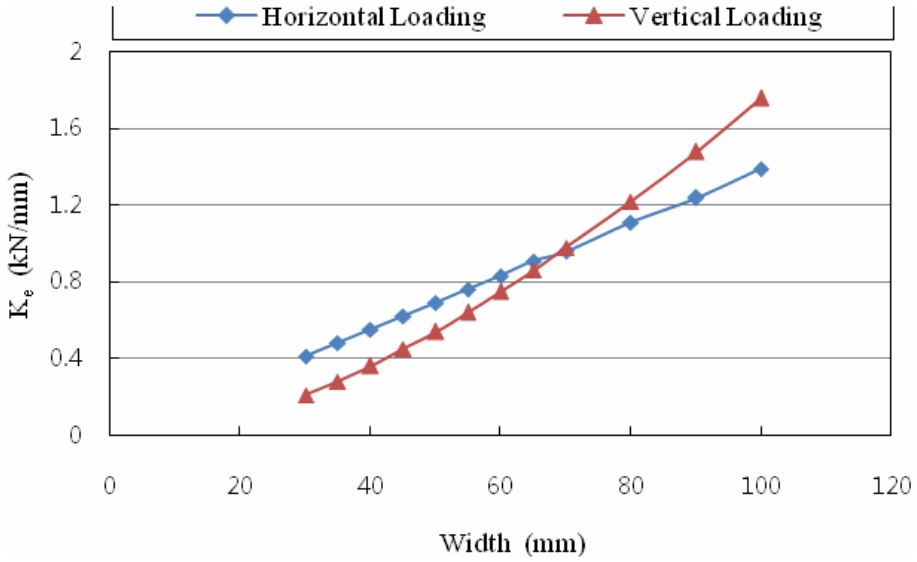


그림 3.2.5.26 폭에 따른 초기강성

② 항복강도

그림 3.2.5.27에 나타낸 댐퍼의 항복강도와 폭의 관계를 보면 항복강도의 변화는 초기강성이 폭에 따른 변화와 거의 같은 경향을 나타내고 있다. 즉 댐퍼의 항복강도는 70mm보다 작은 폭에서는 길이방향 하중을 받는 경우에 더 크게 나타났지만 70mm보다 큰 폭에서는 수직방향 하중을 받는 경우에 더 크게 나타났다.

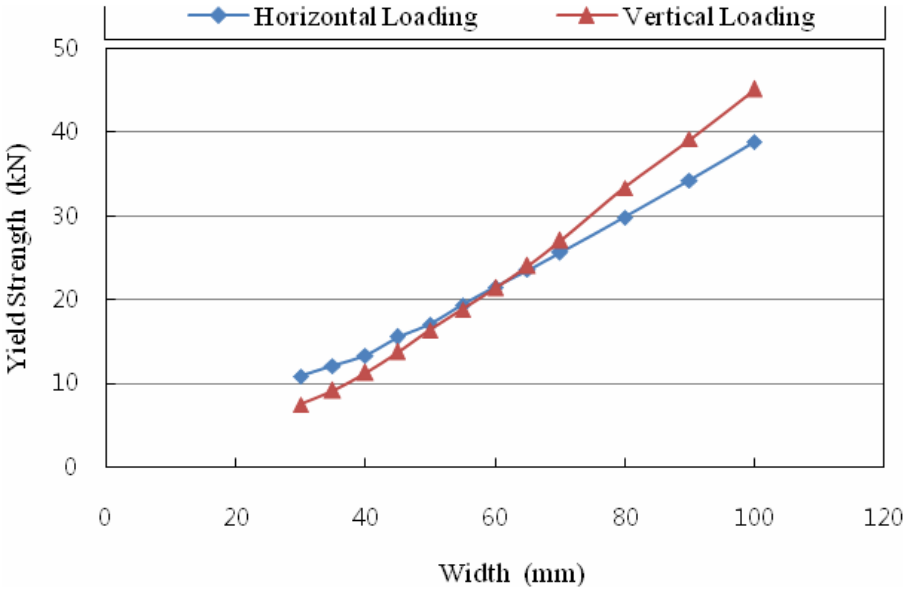
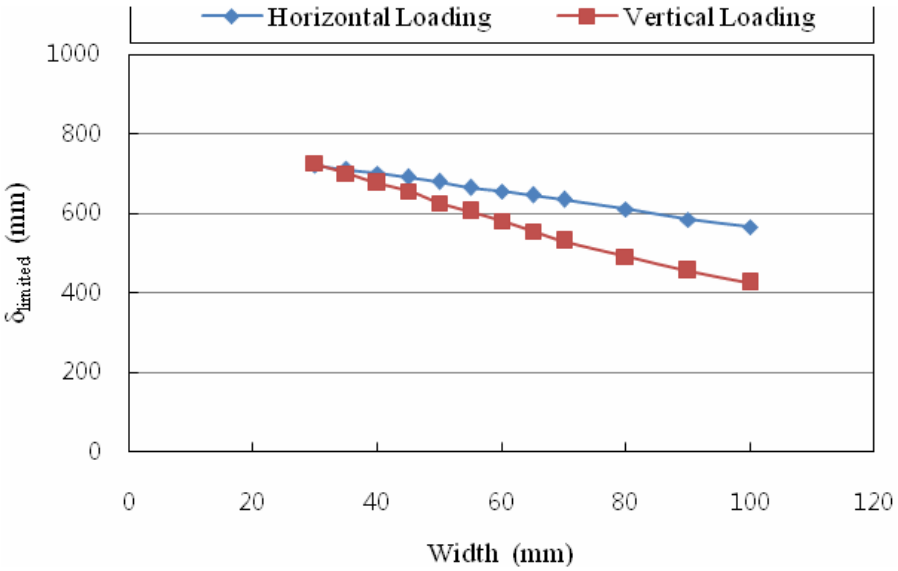


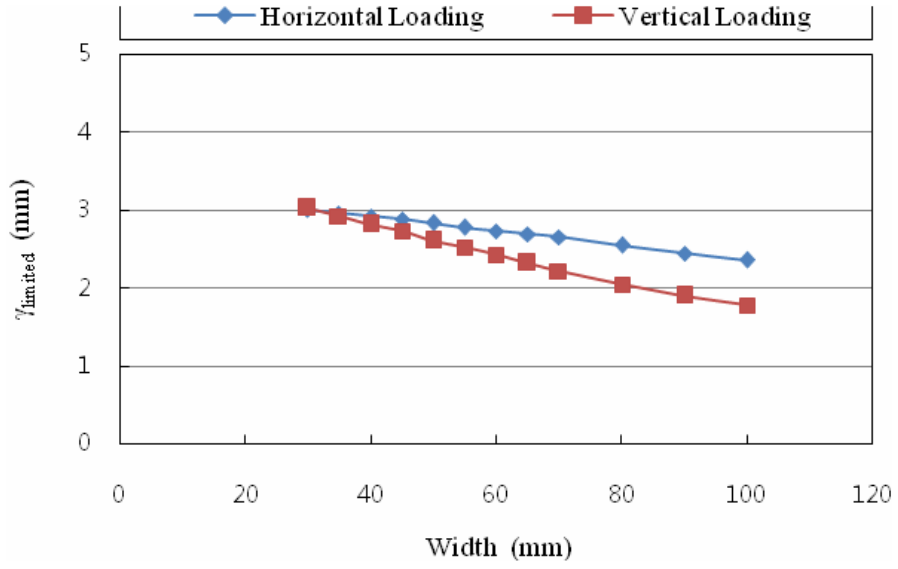
그림 3.2.5.27 폭에 따른 항복강도

③ 변형능력

댐퍼의 폭에 따른 변형능력을 파악하기 위하여 한계변형량과 한계전단변형각을 그림 3.2.5.28에 나타내었다. 그림을 보면 폭이 증가하면 그 변형능력은 감소하지만 L/R 또는 두께가 댐퍼의 변형능력에 미치는 영향과 마찬가지로 하중의 작용방향에 관계없이 거의 비슷한 값을 나타낸다. 따라서 댐퍼의 폭을 증가시켜도 지진 발생시 여러 방향으로 설치된 댐퍼의 안전성을 확보할 수 있다.



(a) 한계전단변형량



(b) 한계전단변형각

그림 3.2.5.28 폭에 따른 한계변형량과 한계전단변형각

나. 댐퍼 형상의 제안

(1) 개 요

기존의 강재댐퍼에 대한 성능평가 결과 에너지흡수장치의 탄성강성을 확보하기 위해서는 강재의 폭보다는 두께를 크게 하는 것이 보다 효과적인 것으로 나타났다. 그러나 강재의 두께를 너무 크게 하며 굽힘제조과정이 어렵게 되고 그에 따라 변형능력도 저하될 가능성이 크다. 또한 한계변형능력을 면진설계에서 요구하는 400mm 이상을 확보하기 위해서는 굽힘가공부의 반지름에 비해 평판부의 길이를 최소 두배이상 확보해야 하는 것으로 나타났다. 따라서 본 장에서는 초기강성, 항복강도, 내력 및 제작시의 굽힘가공과 열처리과정을 종합적으로 고려하여 댐퍼의 L/R는 2.4, 두께는 20mm, 폭은 50mm인 경우를 선택하였다. 해석에 사용되는 HTS의 소재특성은 앞에서 이미 수행한 재료시험 결과와 같으며 그림 3.2.5.30에 나타내었다.

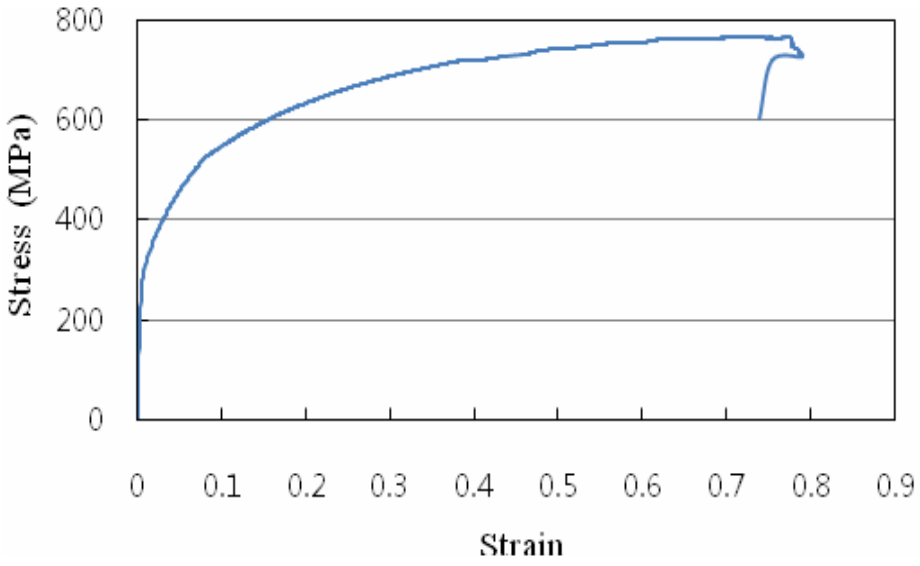


그림 3.2.5.30 고인성강재의 응력-변형률 관계

(2) 응력분포에 따른 댐퍼 형상의 제안

앞 장에서 이미 연신율이 향상된 고인성강재를 사용함으로써 댐퍼의 변형능력을 크게 증가시킬 수 있다는 것을 증명하였다. 하지만 그림 3.2.5.31에 표시한 것과 같이 댐퍼의 바깥 표면에서 한 개의 U형 요소를 선택하여 응력분포를 관찰한 결과, 그림 3.2.5.32와 같이 댐퍼의 전체 구간에 걸쳐 변위에 관계없이 매우 불규칙적으로 분포되어 있다. 큰 규모의 지진에 대비하여 변위가 200mm인 경우의 응력분포를 댐퍼의 전체 구간에 걸쳐 고르게 하기 위해서는 그 단면적을 조절하여야 한다. 즉 응력이 큰 부분에 대해서는 단면적을 증가시켜야 한다. 하지만 응력이 크게 나타나는 부분에 대하여 단면적을 증가시키는 방법을 사용한다면 제작과정이 복잡하고 설계식을 도출하기가 어렵게 된다.

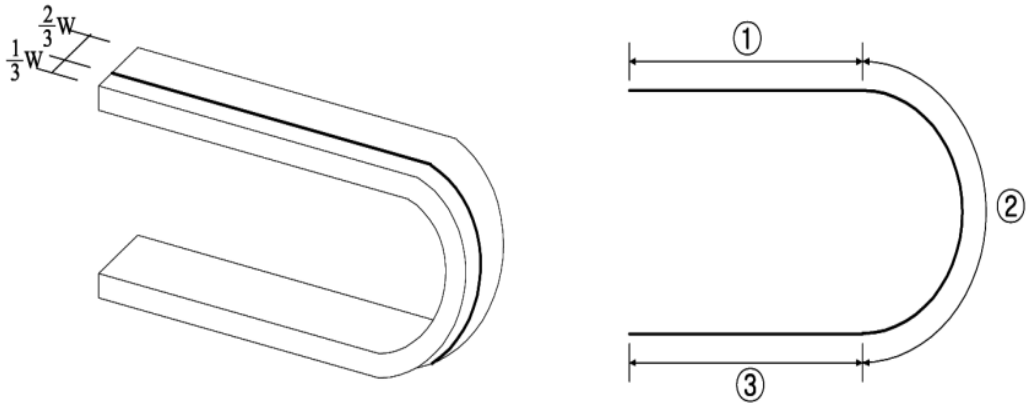
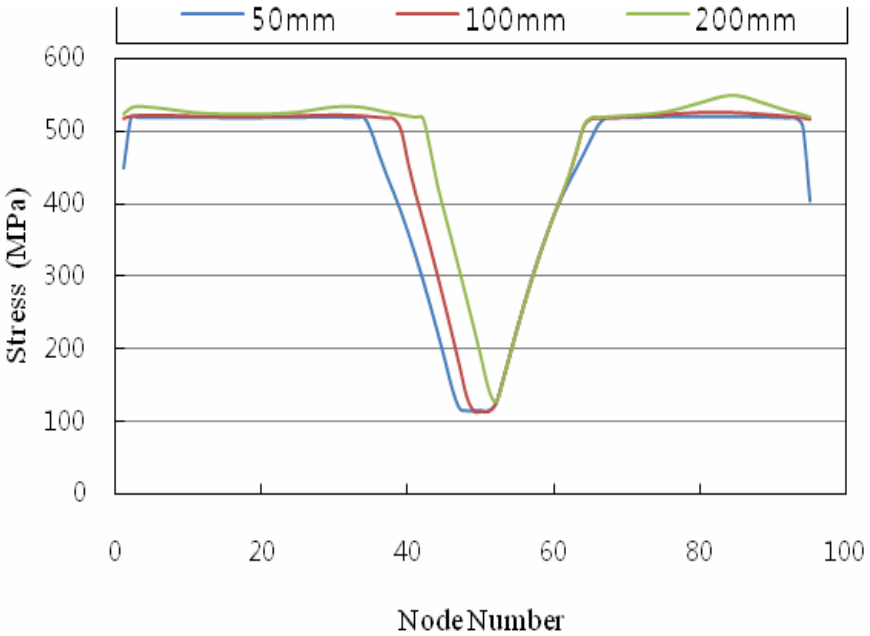
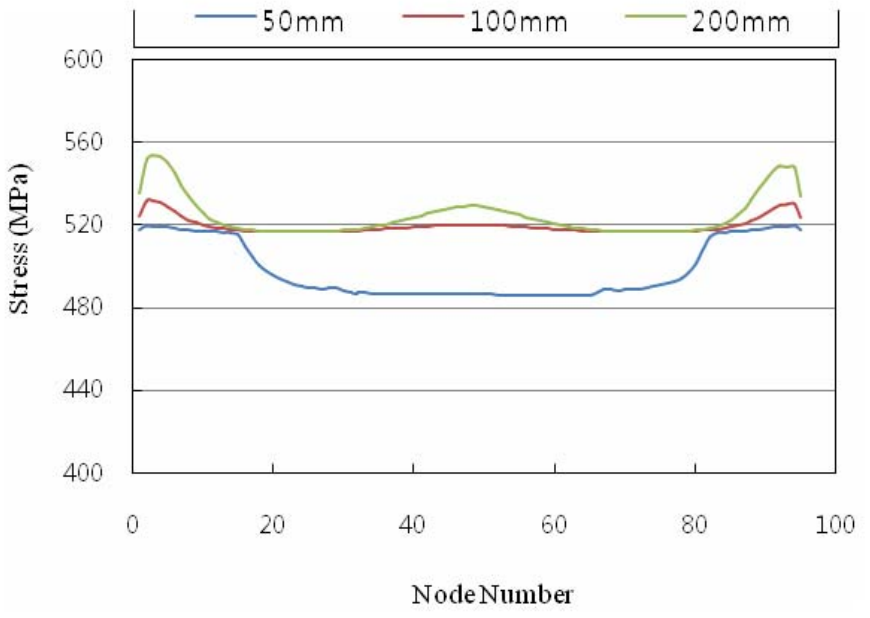


그림 3.2.5.31 응력분포를 파악하기 위하여 선택된 U형 요소

제작과정을 간단히 하고 설계식을 간편하게 도출하기 위하여 응력이 작은 부분에 개구부를 두어 단면적을 감소시키는 방법이 오히려 더 효과적이다. 따라서 그림 3.2.5.32를 보면 평판부의 끝부분과 커브가 시작되는 위치에서 응력이 비교적 크게 일어나기 때문에 그림 3.2.5.33과 같이 3가지 유형의 개구부를 둔 댐퍼의 형상을 제안한다.



(a) 길이방향 하중이 작용할 경우



(b) 수직방향 하중이 작용할 경우

그림 3.2.5.32 수직방향 하중이 작용할 경우의 응력분포

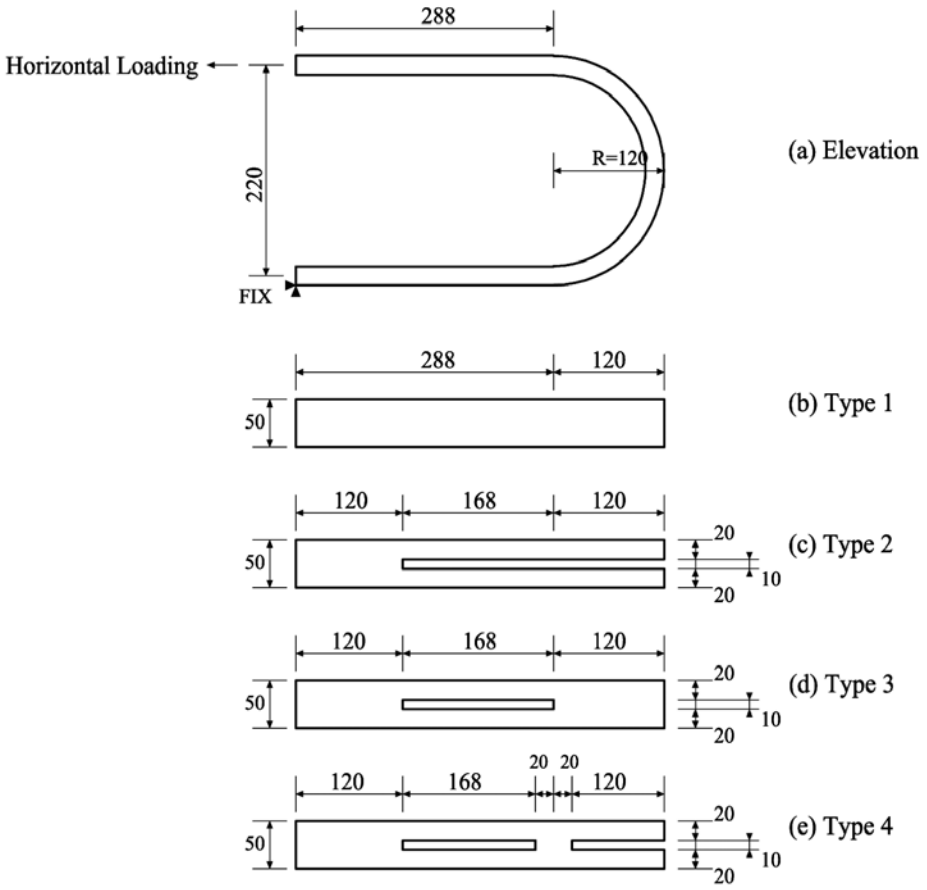


그림 3.2.5.33 기존 댐퍼와 제안된 댐퍼의 형상

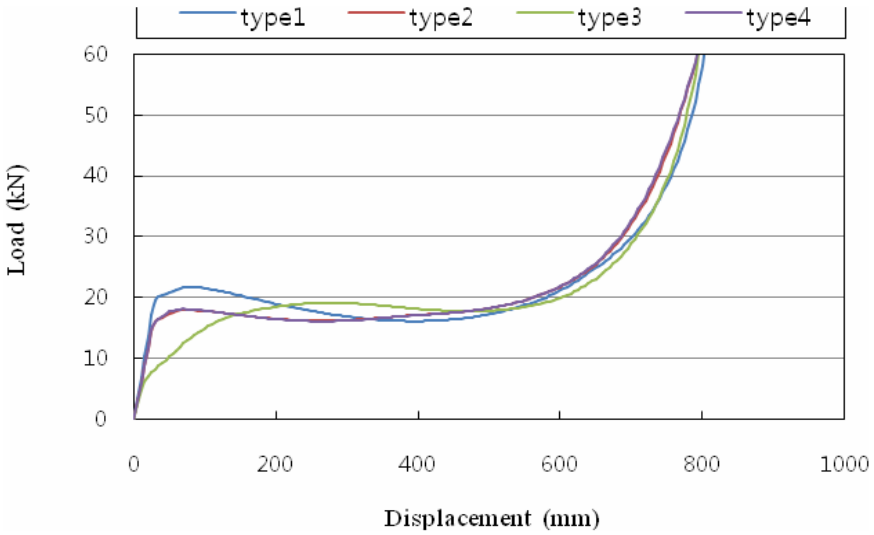
(다) 댐퍼 형상에 따른 구조적 특성

개구부를 둠으로써 댐퍼의 초기강성, 항복강도 및 응력분포는 기존의 댐퍼에 비하여 변하게 되며 그 변화를 파악하기 위하여 앞 장에서와 같은 방법으로 해석을 수행하였다. 그림 3.2.5.34는 유형에 따른 하중-변위 관계를 나타냈고 그림 3.2.5.35은 초기강성, 그림 3.2.5.36은 항복강도를 나타냈으며 그림 3.2.5.37은 길이 방향 하중을 받을 경우, 변위별 응력분포를 나타내었다.

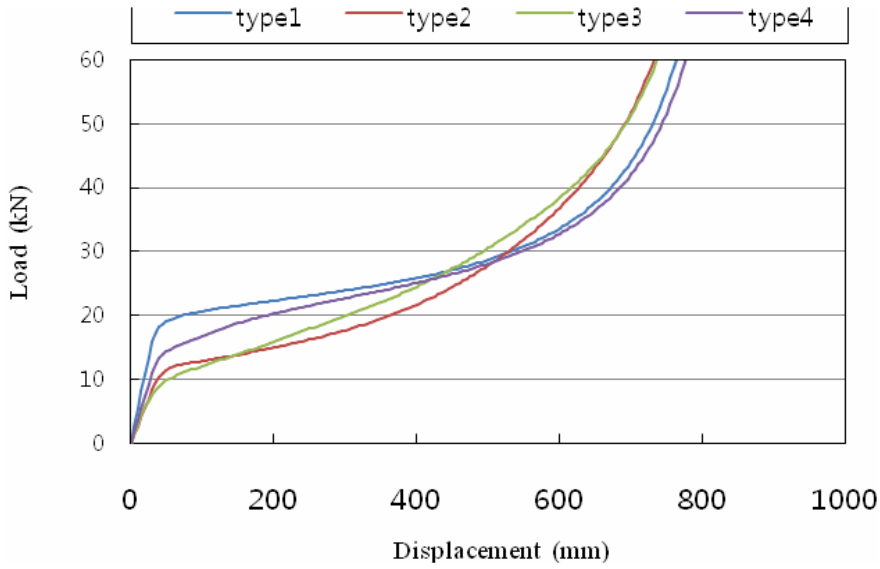
그림 3.2.5.34를 보면 하증의 작용방향에 관계없이 개구부를 둘 경우에 단면적의 감소로 인하여 초기강성과 내력의 저하가 발생한다는 것을 알 수 있다. 길이 방향 하중을 받을 경우, 변위가 150mm보다 작은 구간에서는 type 2와 type 4의 내력 저하가 type 3에 비하여 적게 나타나지만 수직방향 하중을 받을 경우에는 type 4의 내력이 type 2와 type 3에 비하여 더 크게 나타난다. 따라서 개구부를

두었을 경우, 하중의 작용방향에 관계없이 typt 4의 내력 저하가 가장 작다.

하중-변위 관계에 근거하여 계산되어 그림 3.2.5.35와 그림 3.2.5.36에 각각 나타낸 초기강성과 항복강도를 보면 개구부를 두었을 경우, 하중의 작용방향에 관계없이 모두 작아진다. 하지만 길이방향 하중을 받을 경우에 type4의 초기강성은 13% 감소하고 항복강도는 11% 감소하여 가장 작은 감소를 나타내었으며, 수직방향 하중을 받을 경우에도 type 4의 초기강성은 32% 감소하고 항복강도는 29% 감소하여 역시 가장 작은 감소를 나타내었다.



(a) 길이방향 하중이 작용할 경우



(b) 수직방향 하중을 받을 경우

그림 3.2.5.34 하중의 작용방향에 따른 type별 하중-변위 관계

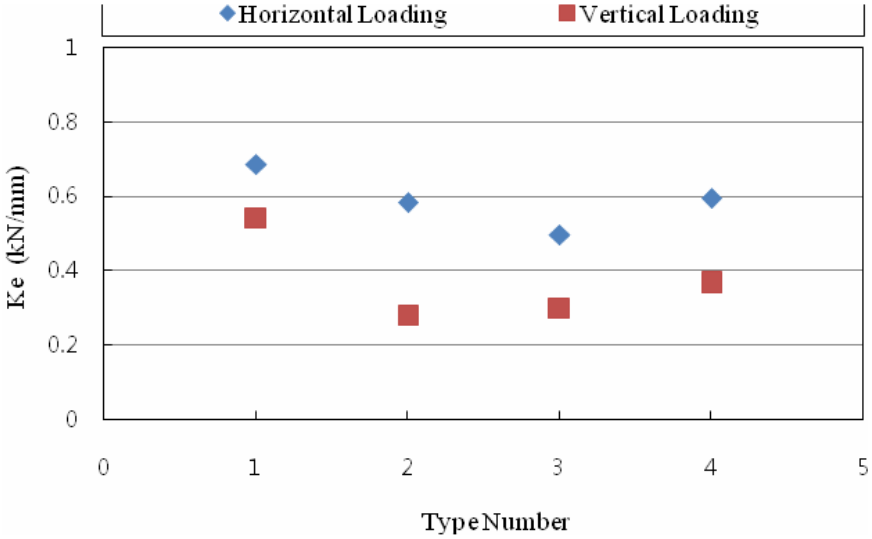


그림 3.2.5.35 type에 따른 초기강성 비교

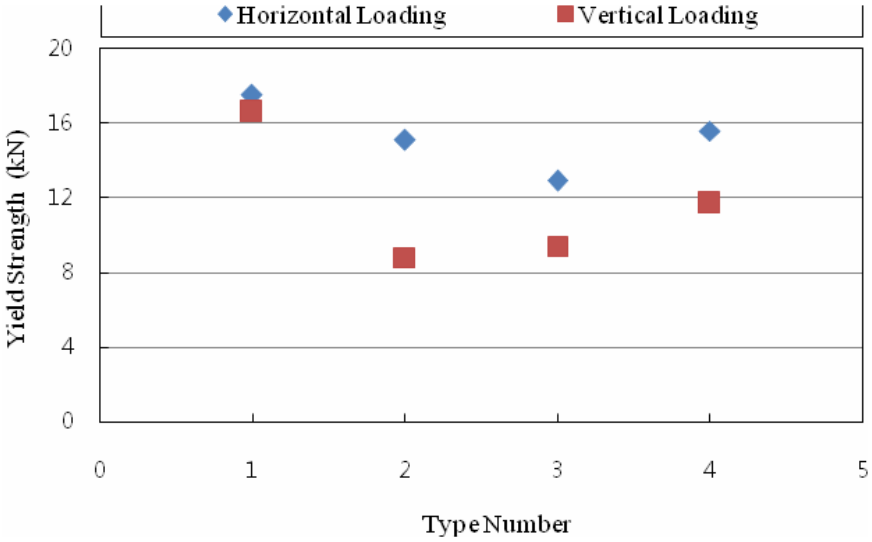
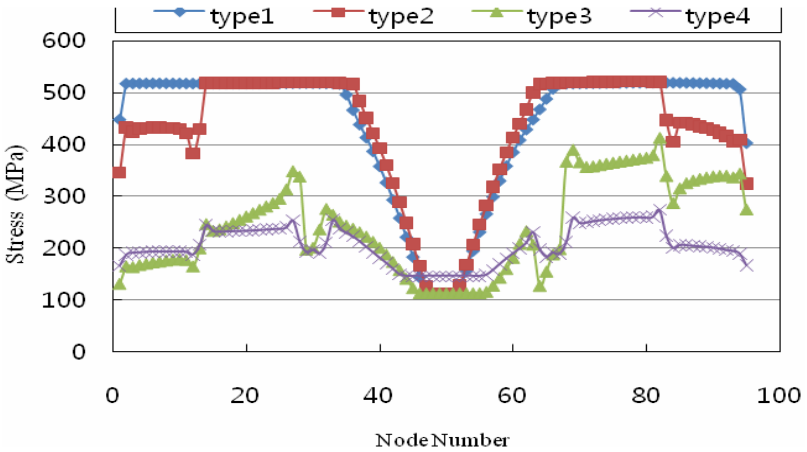
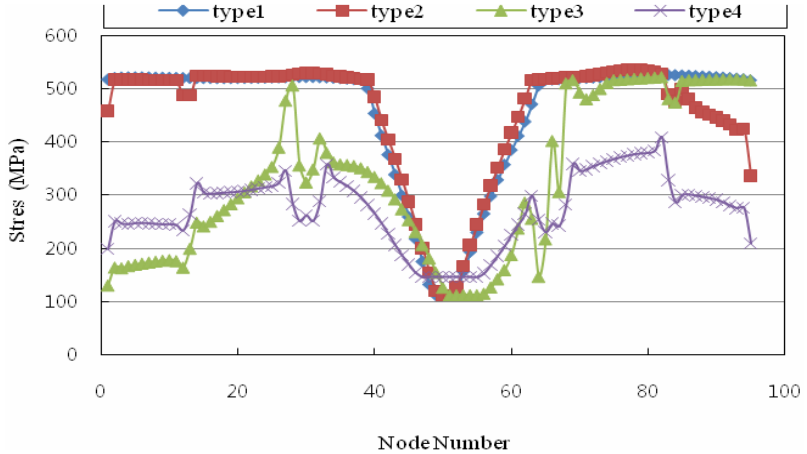


그림 3.2.5.36 type에 따른 항복강도 비교

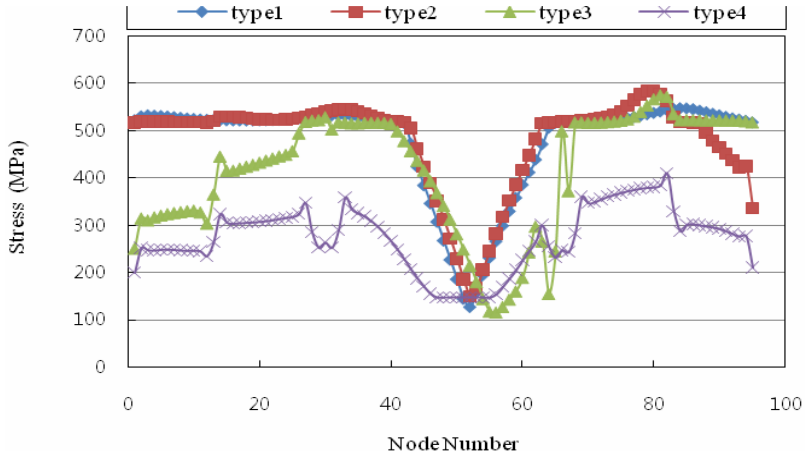
그림 3.2.5.37(a)부터 3.2.5.37(c)까지 나타낸 응력분포를 보면 길이방향 하중을 받을 경우, type2의 응력은 변위와 관계없이 기존의 댐퍼인 type1과 비슷한 분포를 나타낸다. Type3와 type4의 응력은 type1에 비하여 크기가 훨씬 작아졌으며 그 분포도 평준화를 이룬다. 그 중에서도 type4의 응력분포가 더 고르고 응력의 크기도 더 작다. 변위가 같은 조건에서 응력의 크기가 작고 응력집중이 발생하지 않는다면 댐퍼의 변형능력은 크게 증가할 것이고 큰 지진이 발생할 경우에도 파단이 발생하지 않고 오랫동안 작동할 수 있다.



(a) 변위가 50mm일 경우



(b) 변위가 100mm일 경우



(c) 변위가 200mm일 경우

그림 3.2.5.37 길이방향 하중을 받는 경우, 변위에 따른 하중분포

라. 에너지흡수장치의 성능평가 실험

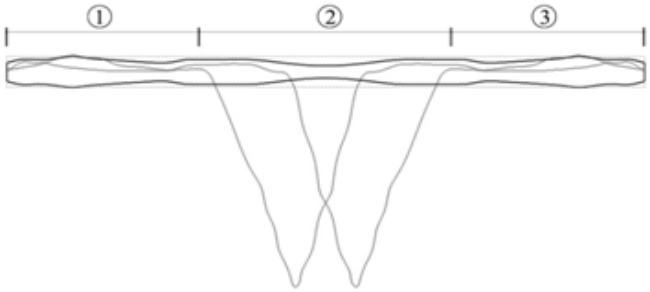
(1) 에너지흡수장치의 성능평가 실험

(가) 실험 개요

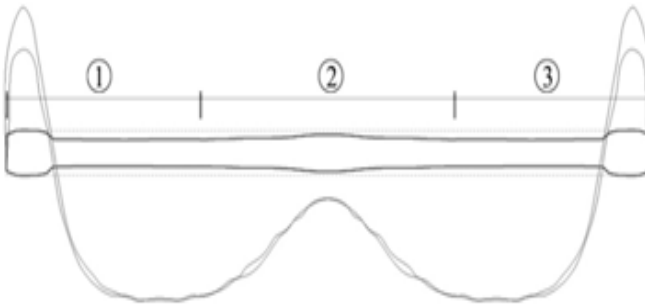
본 연구에서는 선행연구에서 비선형 유한요석을 수행하여 제안된 에너지흡수장치의 형상을 대상으로 반복가력실험을 수행하고, 실험결과에 근거하여 SS400 강재를 사용한 에너지흡수장치의 변형능력과 에너지흡수능력을 파악하며, 하중-변위 곡선과 응력분포에 대한 해석결과와 실험결과를 비교하여 해석결과의 신뢰성을 검토하고자 한다. 단, 여기서 하중-변위 곡선에 대한 비교는 SS400 강재를 사용한 에너지흡수장치일 경우에 한하고 응력분포에 대한 비교는 HTS를 사용한 에너지흡수장치일 경우에 한한다.

(나) 응력분포에 따른 고인성강재 에너지흡수장치의 형상

기존의 'U'형 댐퍼 에너지흡수장치는 앞서 비선형유한요소해석을 통해 평판부와 곡선부에서의 응력분포가 매우 불규칙적으로 나타나 지진과 같이 불규칙적이고 반복적인 하중을 받는 에너지흡수장치의 예상하지 못한 파단을 방지하기 위해서는 전체구간에 걸친 응력분포를 고르게 하고 응력의 크기도 작게 할 필요가 있다. 지진 하중에 대한 응력분포가 에너지흡수장치의 전체 구간에 걸쳐 고르게 하기 위해서는 단면적을 조절하여야 한다. 즉 응력이 큰 부분에 대해서는 단면적을 증가시키거나 응력이 작은 부분에 대해서는 단면적을 감소시키는 것이 효율적이다. 근거하여 단면조절에 대한 예를 그림 3.2.5.38에 나타낸다. 그림에 나타낸 것과 같이 응력이 크게 나타나는 부분에 대하여 단면적을 증가시키거나 응력이 작은 부분에 대하여 단면적을 감소시키는 방법은 에너지흡수장치의 제작과정을 복잡하게 하고 설계식을 제안하는데 큰 어려움을 가져다 줄 가능성이 있다. 제작과정을 간단히 하고 간편한 설계식을 도출하기 위해서는 응력이 작은 부분에 개구부를 두어 단면적을 감소시키는 방법이 보다 효과적인 것으로 판단되어 그림 3.2.5.39와 같이 3가지 유형의 개구부를 둔 댐퍼의 형상을 제안하고자 한다.



(a) 길이방향 하중을 받을 경우



(b) 수직방향 하중을 받을 경우

그림 3.2.5.38 응력분포에 의한 기존 댐퍼의 단면조절 예

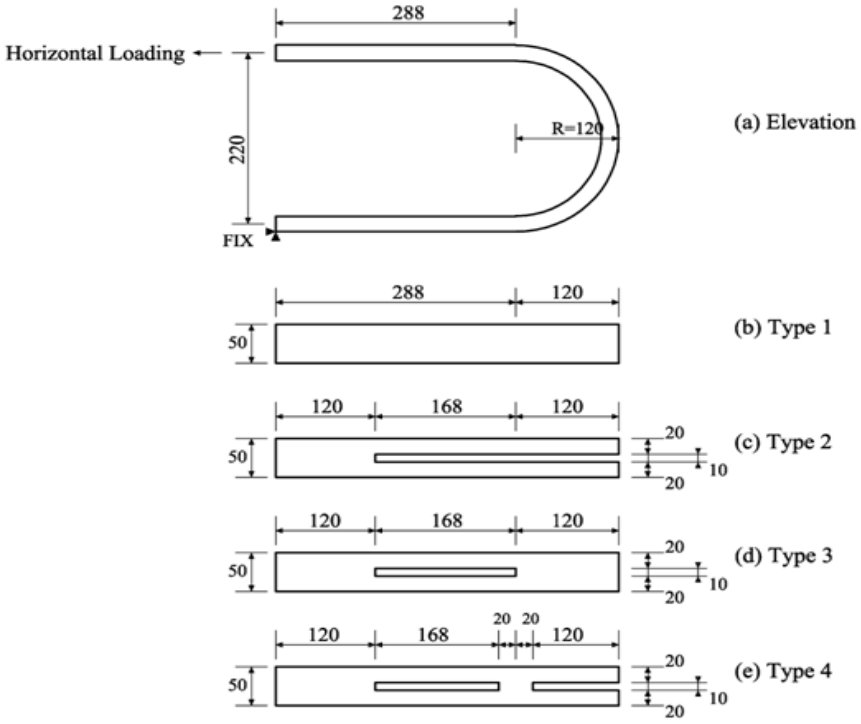


그림 3.2.5.39 기존 댐퍼와 제안된 댐퍼의 형상

(다) 가력 및 측정방법

본 실험에서 사용된 가력장치는 그림 3.2.5.40에, 그 사양은 표 3.2.5.10에 나타낸다. 본 연구에서는 에너지흡수장치에 대하여서만 구조적 성능을 평가하기 때문에 실험시 적층고무 대신에 마찰계수가 0.005인 슬라이더의 상, 하판에 에너지흡수장치를 고정하여 수평방향으로 가력을 수행한다. 가력장치의 최대수평변위는 ±600mm까지 가능하지만 실험시 안전을 고려하여 수평변위를 최대로 ±550mm까지 제한하고 그 범위내에서 시험체에 대하여 수평방향으로 반복가력을 수행한다. 수직방향에서는 수평방향에서의 마찰력을 고려하여 1kN 정도의 압축력을 재하하여 슬라이더를 고정시킨다.



그림 3.2.5.40 가력장치

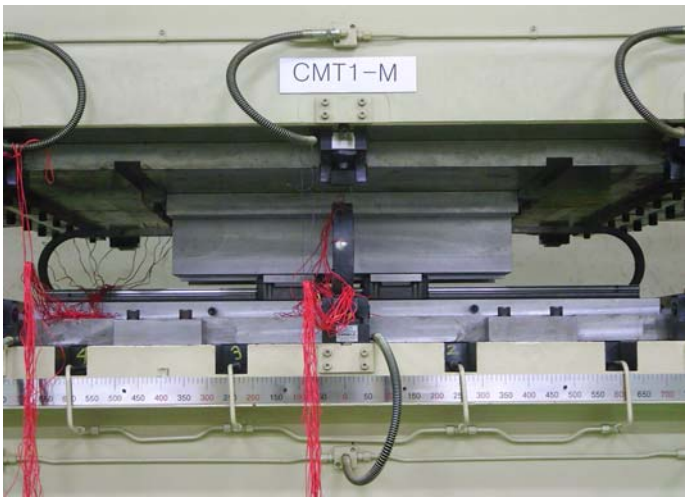
표 3.2.5.10 가력장치의 사양

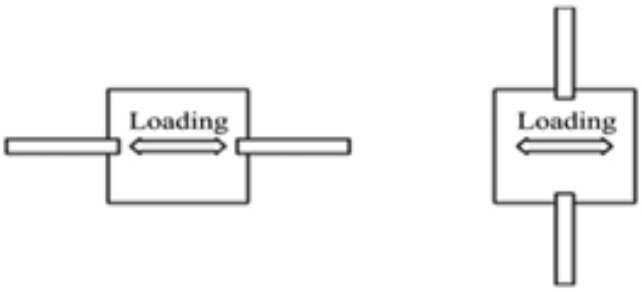
Inclusion of Performance	Item	Explanation
Vertical Direction	Maximum Compressive Load	30,000kN
Horizontal Direction	Maximum Load	±6,000kN
	Maximum Displacement	±600mm
	Maximum Loading Velocity	20mm/sec
	Coefficient of Friction	0.005
Maximum Size of specimen	Maximum Width	2000mm
	Maximum Height	1200mm

가력실험에서 시험체의 설치상황과 수평변위의 제어조건을 그림 3.2.5.41에, 변수에 따른 시험체의 일람을 표 3.2.5.11에 나타내었다. 그림 3.2.5.41에 나타낸

것과 같이 시험체는 서로 대칭되게 설치하고 수평방향으로 가력하면서 시험체의 설치방향에 근거하여 에너지흡수장치의 하중조건을 조절하였다. 또한 에너지흡수능력을 평가하기 위하여 수평전단변위는 50mm부터 시작하여 50mm의 간격으로 시험체가 파단될 때까지 증가시키며 동일한 수평전단변위에서 3사이클씩 재하한다. 단, 최대수평변위 ±550mm에서까지 3사이클을 재하하여도 파단되지 않을 경우에는 같은 변위에서 파단이 발생할 때까지 반복적으로 가력을 실행하였다.

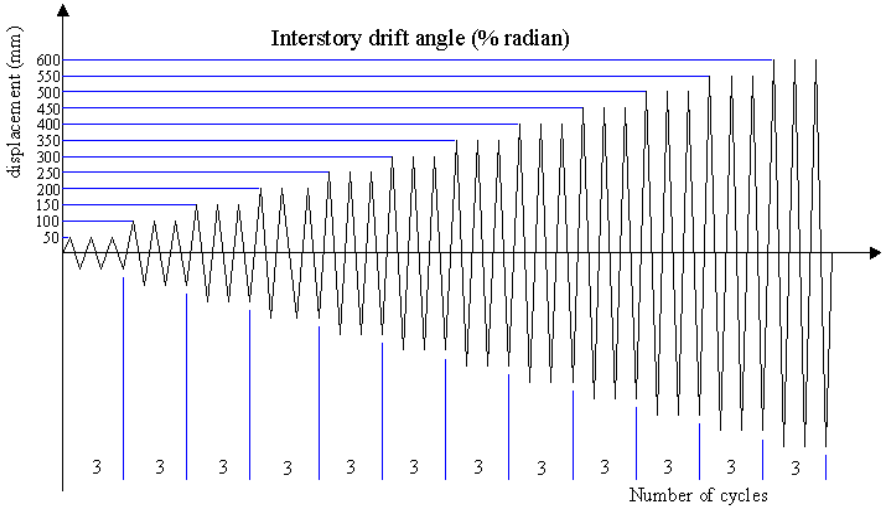
액츄에이터(Actuator)를 사용하여 가력실험을 수행하는 과정에서 변위제어 방식으로 5mm/sec의 속도로 재하하며, 변위에 따른 응력분포를 파악하기 위하여 그림 3.2.5.41(a)와 같이 에너지흡수장치의 바깥표면에 강재용 스트레인 게이지(Steel Strain Gauge)를 부착하고 데이터 로거(TDS 303 Data Logger)를 사용하여 1초 단위로 그 값을 기록한다.





(a) 가력에 따른 시험체의 설치

그림 3.2.5.41 시험체의 설치 및 가력 사이클(계속)



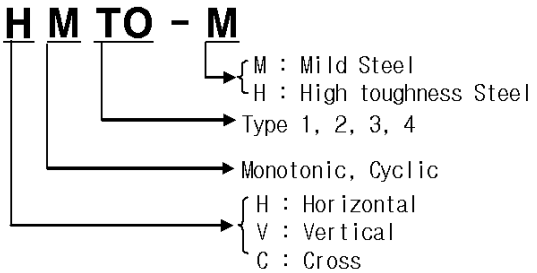
(b) 가력 사이클

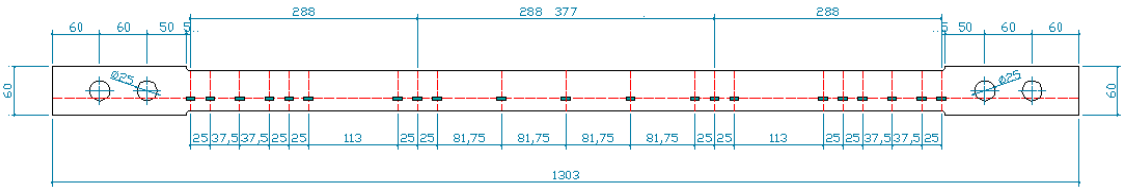
그림 3.2.5.41 시험체의 설치 및 가력 사이클

표 3.2.5.11 실험변수에 따른 시험체 일람

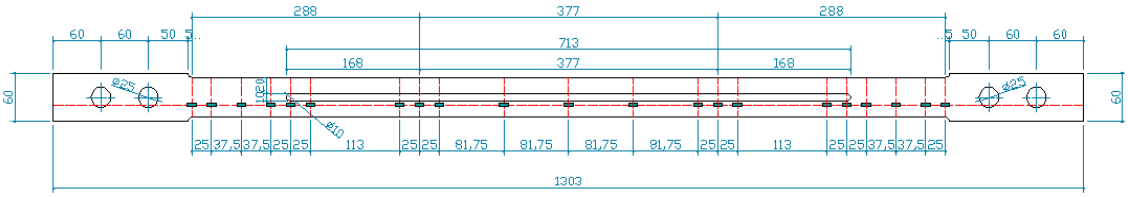
Loading Direction	Types of Damper	Name of Specimen	Number of Specimen
Horizontal Loading	type1	HMT1-M	2
		HMT1-H	2
	type2	HMT2-M	2
		HMT2-H	2
	type3	HMT3-M	2
		HMT3-H	2
	type4	HMT4-M	2
		HMT4-H	2
Vertical Loading	type1	HMT1-M	2
		HMT1-H	2
	type2	HMT2-M	2
		HMT2-H	2
	type3	HMT3-M	2
		HMT3-H	2
	type4	HMT4-M	2
		HMT4-H	2

* 실험체 표기 :

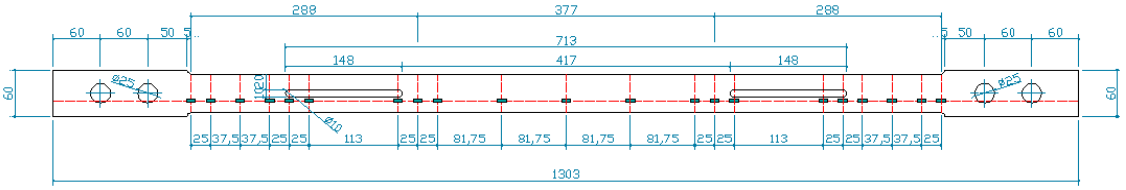




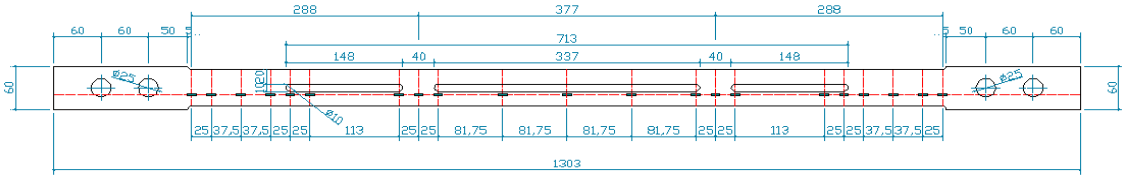
(a) type1



(b) type2



(c) type3



(d) type4

그림 3.2.5.42 강재용 스트레인 게이지의 부착상황

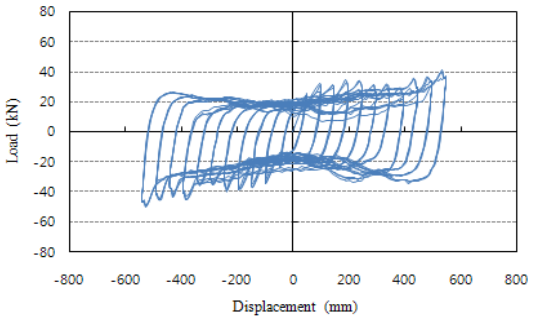
(라) 실험 결과 및 분석

본 항에서는 표 3.2.5.12에 나타낸 각 시험체의 실험결과에 근거하여 하중-변위 이력곡선, 최종적인 파괴형태 및 단면형상, 변형률분포에 대하여 서술하고, 선행연구에서 수행된 재료의 인장시험 결과를 사용하여 HTS를 사용한 시험체의 응력분포를 파악하고자 한다.

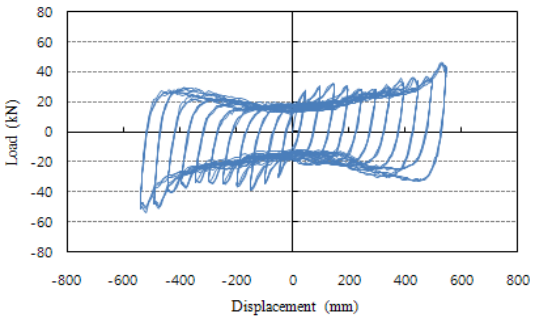
① 하중-변위 이력곡선

SS400 강재를 사용한 시험체의 하중-변위 이력곡선을 그림 3.2.5.43에 나타내었다. 그림에서 나타낸 것과 같이 길이방향 하중을 받는 시험체에 비하여 수직방향 하중을 받는 시험체의 변형능력이 작게 나타났고, 항복 후에는 변형경화에 의한 내력상승이 조기에 나타났다. 또한 길이방향 하중을 받는 경우에는 200 ~ 300mm 사이에서 시험체의 내력이 현저하게 저하되다가 다시 상승하지만, 수직방향 하중을 받는 경우에는 내력의 저하가 거의 발생하지 않았으며 각 시험체의 이력곡선은 가운데가 홀쭉한 실패 모양을 나타내었다.

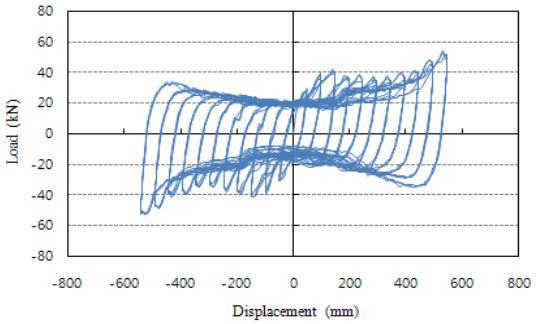
길이방향 하중을 받는 HMT1-M, HMT2-M, HMT3-M 및 HMT4-M 시험체는 각각 수평전단변위 ±550mm의 17번째, 12번째, 14번째, 14번째 사이클에서 파단이 발생하였지만 수직방향 하중을 받는 경우인 VMT1-M 시험체는 ±400mm의 첫 번째 사이클에서, VMT2-M 시험체는 ±450mm의 첫 번째 사이클에서 파단이 발생하였으며, VMT3-M 시험체와 VMT4-M 시험체는 각각 ±500mm의 두 번째와 첫 번째 사이클에서 파단이 발생하였다.



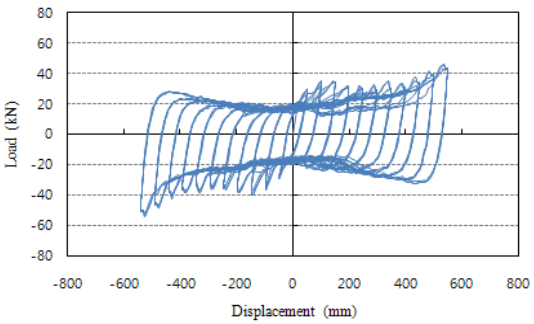
(a) HMT1-M 실험체



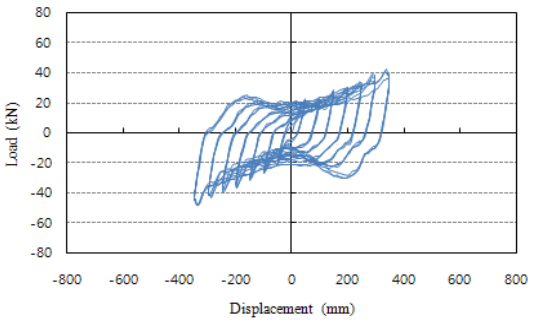
(b) HMT2-M 실험체



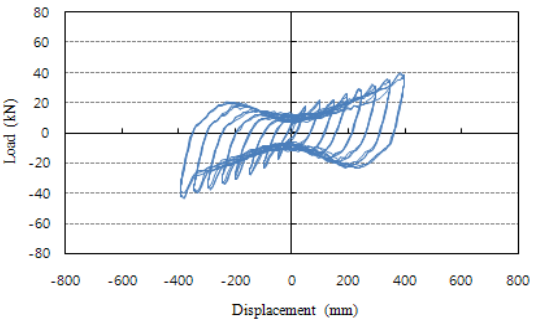
(c) HMT3-M 실험체



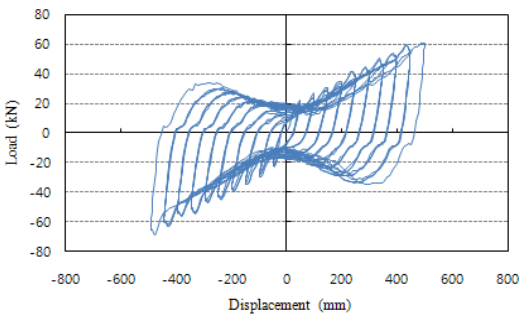
(d) HMT4-M 실험체



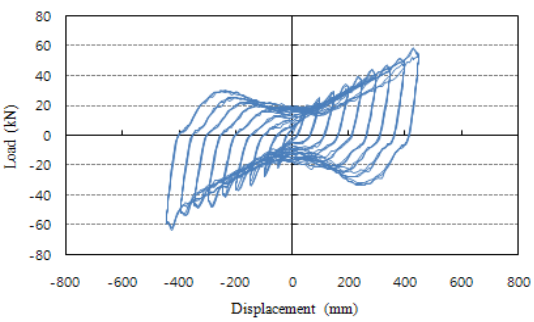
(e) VMT1-M 실험체



(f) VMT2-M 실험체



(g) VMT3-M 실험체



(h) VMT4-M 실험체

그림 3.2.5.43 시험체의 하중-변위 이력곡선

② 최종 파괴형태 및 단면형상

각 시험체의 최종적인 파괴위치, 파괴형상 및 파괴단면을 표 3.2.5.12에 나타내었다. 표에서 보면 길이방향 하중을 받을 경우의 HMT1-H, HMT2-H, HMT3-H, HMT4-H 등 HTS를 사용한 시험체는 평판부와 곡선부가 접하는 부분에서 파단이 발생하였지만 HMT1-M, HMT2-M, HMT3-M 및 HMT4-M과 같이 SS400 강재를 사용한 시험체는 모두 평판부의 가운데 부분에서 파단이 발생하였다. 수직방향 하중을 받을 경우에는 사용한 재료에 관계없이 대부분 볼트 고정판과 평판부가 접하는 위치에서 파단이 발생하였지만, VMT2-H 시험체 및 VMT3-H 시험체와 같이 평판부에서 파단이 발생하는 경우도 있었다.

파괴단면을 보면 에너지흡수장치에 사용되는 재료에 따라 그 형상은 선명한 차이를 나타내었으며, HTS를 사용하였을 경우에는 단면에서 관찰할 수 있는 결정체의 크기가 SS400 강재를 사용하였을 경우에 비하여 약간 크게 관찰되었다. 또한 같은 재료를 사용한 시험체에서 길이방향 하중을 받는 경우의 취성파단율이 수직방향 하중을 받는 경우보다 작게 나타났다. 따라서 에너지흡수장치가 수직방향 하중에 대하여 견딜 수 있는 능력이 길이방향 하중에서보다 적다는 것으로 판단할 수 있다.

표 3.2.5.12 시험체의 파괴위치, 형상 및 단면(계속)

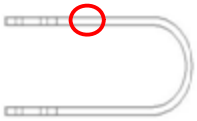
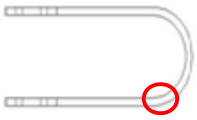
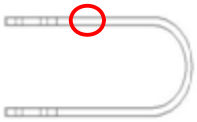
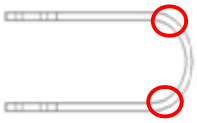
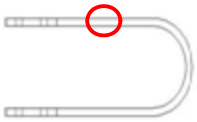
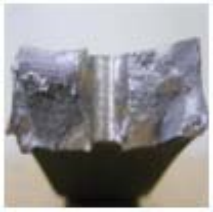
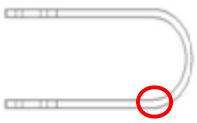
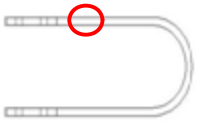
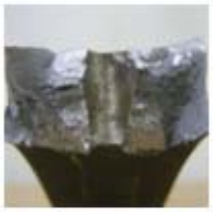
Specimen	Position of Fracture	Final Shape	Section of Fracture
HMT1-M			
HMT1-H			
HMT2-M			
HMT2-H			
HMT3-M			
HMT3-H			
HMT4-M			

표 3.2.5.12 시험체의 파괴위치, 형상 및 단면(계속)

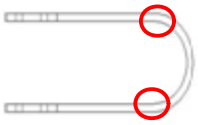
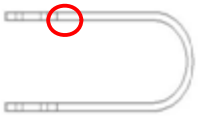
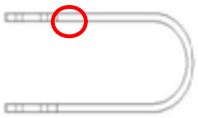
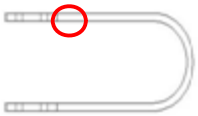
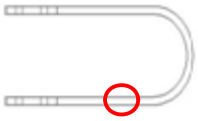
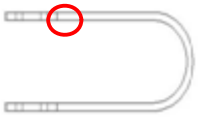
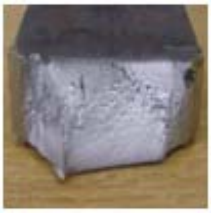
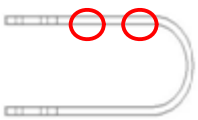
Specimen	Position of Fracture	Final Shape	Section of Fracture
HMT4-H			
VMT1-M			
VMT1-H			
VMT2-M			
VMT2-H			
VMT3-M			
VMT3-H			

표 3.2.5.12 시험체의 파괴위치, 형상 및 단면(계속)

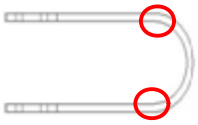
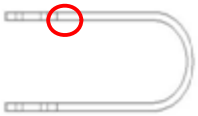
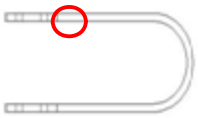
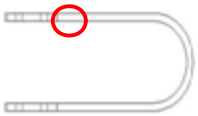
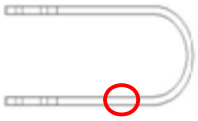
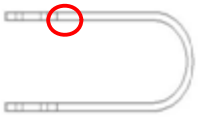
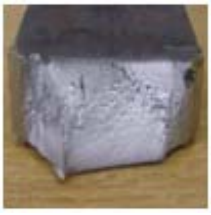
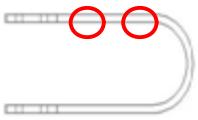
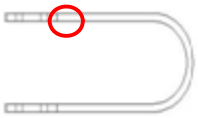
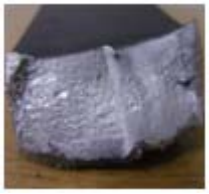
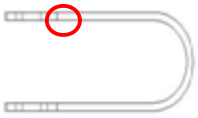
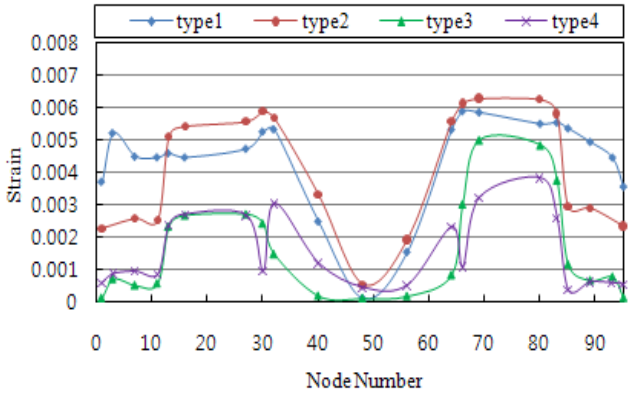
Specimen	Position of Fracture	Final Shape	Section of Fracture
HMT4-H			
VMT1-M			
VMT1-H			
VMT2-M			
VMT2-H			
VMT3-M			
VMT3-H			

표 3.2.5.12 시험체의 파괴위치, 형상 및 단면

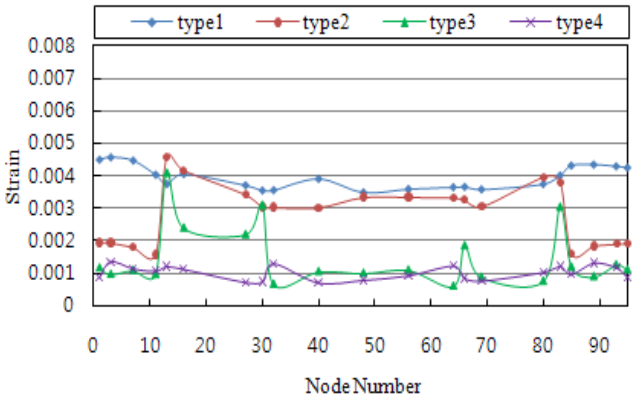
Specimen	Position of Fracture	Final Shape	Section of Fracture
VMT4-M			
VMT4-H			

③ 변형률분포

HTS를 사용한 시험체의 변형률 분포상황을 그림 3.2.5.44에 나타내었다. 가력실험을 수행하는 과정에서 사이클(Cycle)로 재하하기 때문에 스트레인 게이지를 통하여 얻은 데이터의 신뢰성을 확보하기 위하여 변위가 처음으로 50mm에 도달할 때의 변형률에 대해서만 그 분포를 나타낸다. 그림을 보면 길이방향 하중을 받을 경우, type2의 변형률은 type1과 비슷한 분포를 나타내었고 type3와 type4는 개구부가 시작되거나 끝나는 위치에서 변형률의 변화가 크지만 type1에 비하여 크기가 훨씬 작아졌으며, 그 분포도 평준화 되었다. 수직방향 하중을 받을 경우의 type2는 평판부의 개구부를 두지 않은 부분에서 변형률이 작게 나타났고 나머지 구간에서는 type1과 거의 같은 분포를 나타내었다. type3의 변형률은 개구부가 시작되거나 끝나는 위치를 제외하고 에너지흡수장치의 전체 구간에 걸쳐 type1의 변형률보다 훨씬 작게 나타났으며, type4의 변형률분포는 가장 평균적이고 그 크기도 가장 작게 나타났다.



(a) 길이방향 하중일 경우



(b) 수직방향 하중일 경우

그림 3.2.5.44 HTS를 사용한 시험체의 변형률분포

④ 응력분포

그림 3.2.5.45에 나타낸 HTS의 응력-변형률 관계에 근거하여 그림 3.2.5.44의 변형률분포에 대응하는 응력분포를 그림 3.2.5.46에 나타내었다. 여기서 횡축은 해석에서의 노드(Node)에 해당하는 스트레인 게이지의 부착위치를 의미한다. 변형률분포와 마찬가지로 하중의 작용방향에 관계없이 개구부가 시작되거나 끝나는 위치에서 응력의 크기가 급격하게 변하는데, 그 원인은 단면의 변화로 인하여 응력집중이 발생하였기 때문인 것으로 판단된다.

길이방향 하중을 받을 경우에 type2의 응력분포는 평판부에서 개구부를 두지 않은 부분을 제외하고 type1과 비슷한 경향을 나타내었다. type3와 type4는 개구부가 시작되거나 끝나는 위치에서 약간의 응력집중이 발생하였지만 type1에 비하여 응력의 크기가 훨씬 작아졌고 그 분포도 더욱 평균적으로 나타났으며, 그 중에서도 type4의 응력분포가 더 고르고 응력의 크기도 더 작았다. 수직방향

하중을 받을 경우에 type2는 평판부에서 개구부를 두지 않은 부분에서 응력이 작게 나타났고 다른 구간에서는 type1과 거의 같은 분포를 나타내었다. type3와 type4의 응력은 댐퍼의 전체 구간에 걸쳐 type1의 응력보다 작게 나타났으며, 그 가운데서도 type4의 응력이 가장 작게 나타났다.

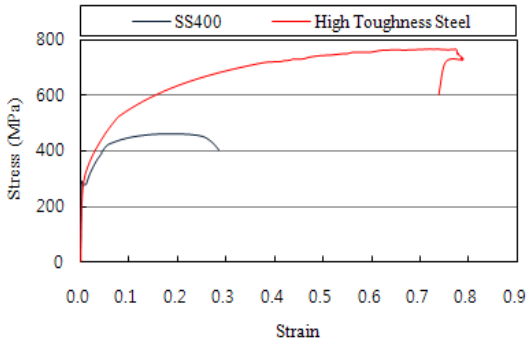
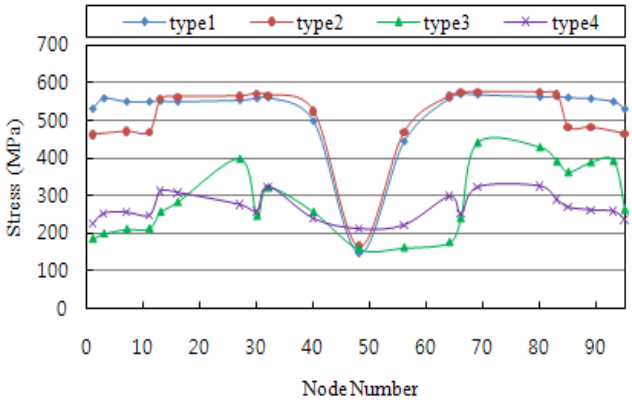
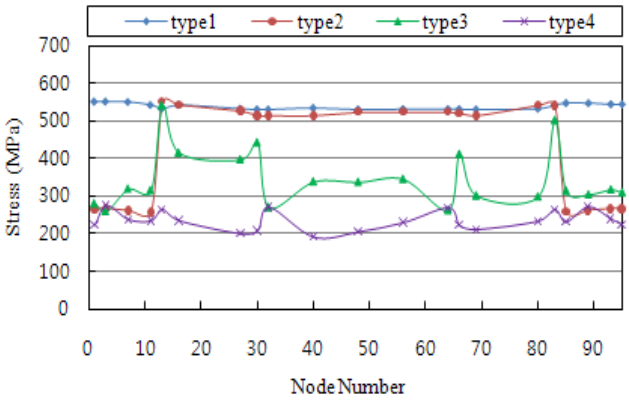


그림 3.2.5.45 재료의 응력-변형률 관계



(a) 길이방향 하중



(b) 수직방향 하중

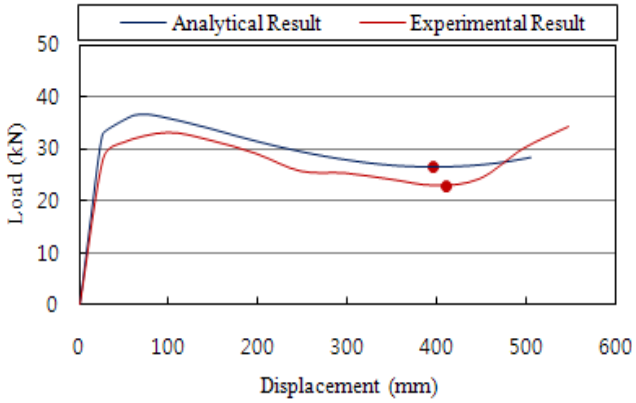
그림 3.2.5.46 HTS를 사용한 시험체의 응력분포

⑤ 실험결과와 해석결과의 비교

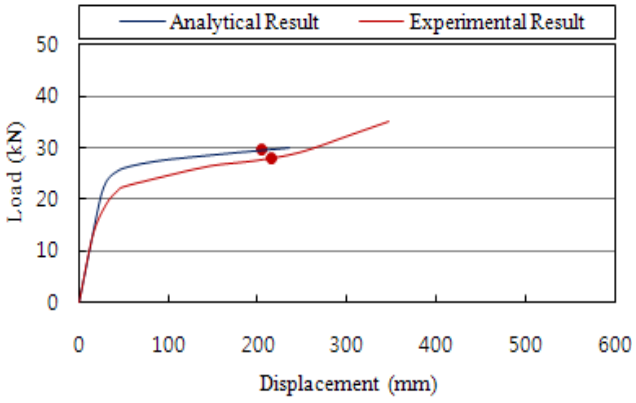
선행연구에서 수행되었던 시험체 해석결과의 신뢰성을 검토하기 위하여 이력곡선에 근거한 골격곡선과 해석결과에서 나타난 하중-변위 관계곡선을 비교하고 스트레인 게이지를 통하여 측정한 응력분포와 해석에서의 노드에 따른 응력분포를 비교하였다.

㉮ 하중-변위 관계

HMT1-M 시험체와 VMT1-M 시험체의 해석결과와 실험결과에서 하중-변위 관계를 비교하여 그림 3.2.5.47에 나타내었다. 그림에 나타낸 것과 같이 HMT1-M 시험체와 VMT1-M 시험체의 해석결과가 실험결과에 비하여 크게 나타났다. 이것은 U형 댐퍼를 제작하는 과정에서 곡선부분에 잔여변형률이 생기기 때문에 일어나는 현상으로 판단된다. 이러한 잔여변형률은 굽힘가공 과정에서 열처리시간과 굽힘속도에 관계되기 때문에 성형온도, 성형속도 등 조건을 파악하여야 한다. 따라서 댐퍼의 형상에 맞는 강재성형을 위하여 재료의 가공 전 풀림처리를 통해 압연공정에 따른 응력을 풀어줌으로써 가공성을 향상시킬 필요가 있을 것으로 판단된다.



(a) HMT1-M 시험체



(b) VMT1-M 시험체

그림 3.2.5.47 해석결과와 실험결과의 하중-변위 관계 비교

표 3.2.5.13. 해석결과와 실험결과의 정량적 비교

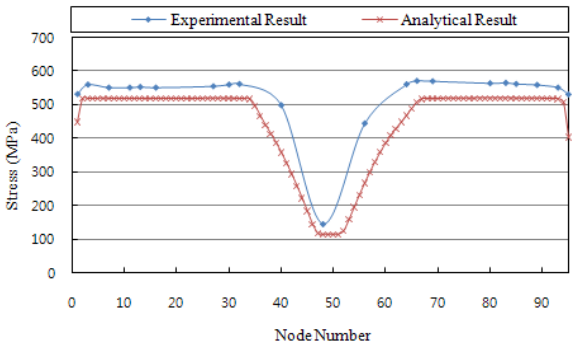
Specimen	Item	K_e (kN/mm)	P_y (kN)	δ_{lim} (mm)
HMT1-M	Analytical	1.37	31.9	395
	Experimental Result	1.32	29.1	410
	Ana/Exp	1.04	1.09	0.96
VMT1-M	Analytical	1.09	23.6	205
	Experimental Result	1.00	21.8	215
	Ana/Exp	1.09	1.08	0.95

해석결과와 실험결과를 정량적으로 비교하기 위하여 HMT1-M 시험체와 VMT1-M 시험체의 초기강성, 항복강도 및 한계변형량을 표 3.2.5.13에 나타내었다.. 표에 나타낸 것과 같이 HMT1-M 시험체일 경우의 초기강성은 해석결과가

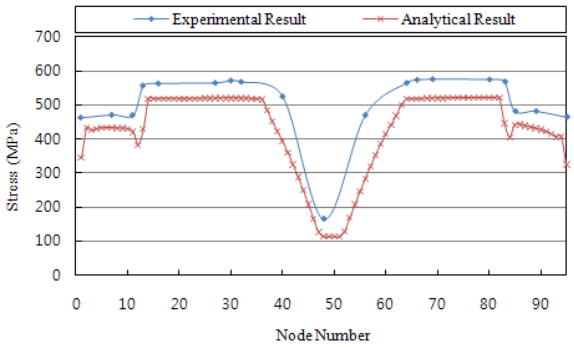
실험결과에 비하여 4%정도 크게 나타났고 항복강도는 해석결과가 실험결과에 비하여 9%정도 크게 나타났으며, 변형능력을 평가하는 기준인 한계변형량은 해석결과가 실험결과보다 4%정도 작게 나타났다. VMT1-M 시험체일 경우, 초기강성은 해석결과가 실험결과에 비하여 9%정도 크게 나타났고 항복강도는 해석결과가 실험결과에 비하여 8%정도 크게 나타났으며, 한계변형량은 해석결과가 실험결과보다 5%정도 작게 나타났다.

㈏ 응력분포

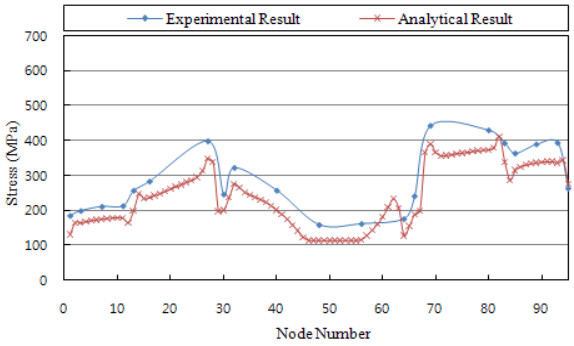
HTS를 사용한 댐퍼의 변위가 50mm일 경우의 전체 구간에 걸친 응력분포를 하중의 작용방향에 따라 형상별로 그림 3.2.5.48와 그림 3.2.5.49에 나타내어 해석결과와 실험결과를 비교하였다. 그림에 나타낸 것과 같이 해석결과와 실험결과에서 나타난 시험체의 응력분포는 하중의 작용방향에 관계없이 거의 같은 경향을 나타내었으며 응력의 크기는 실험결과가 해석결과에 비하여 약 5~15% 정도 크게 나타났는데 이는 실험시 스트레인 게이지가 온도의 영향 및 게이지와 데이터 로거의 접착저항의 영향을 받았기 때문에 나타나는 현상인 것으로 판단된다.



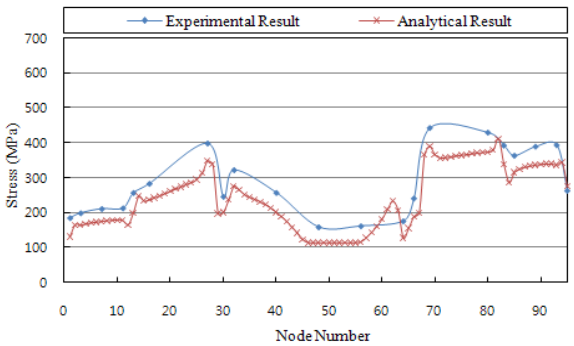
(a) HMT1-H 시험체



(b) HMT2-H 시험체

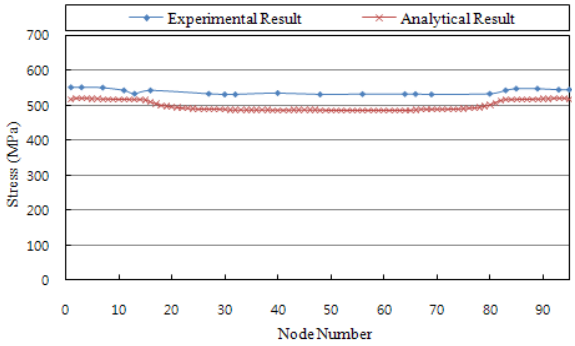


(c) HMT3-H 시험체

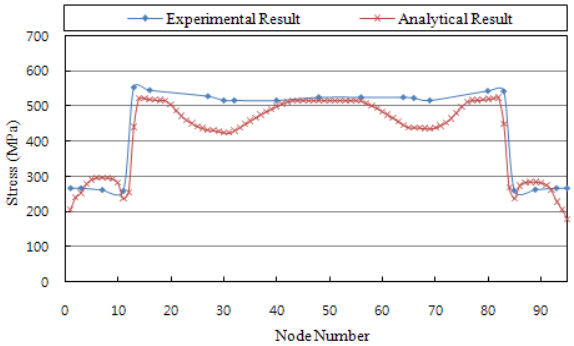


(d) HMT4-H 시험체

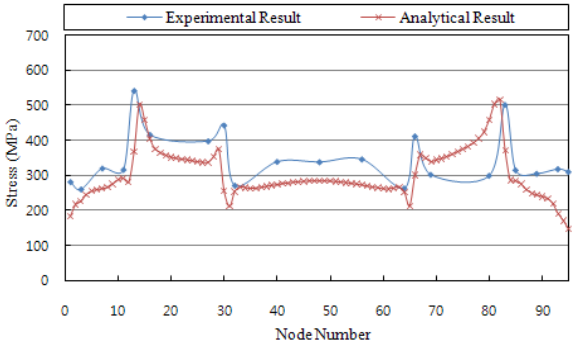
그림 3.2.5.48 길이방향 하중일 경우의 응력분포



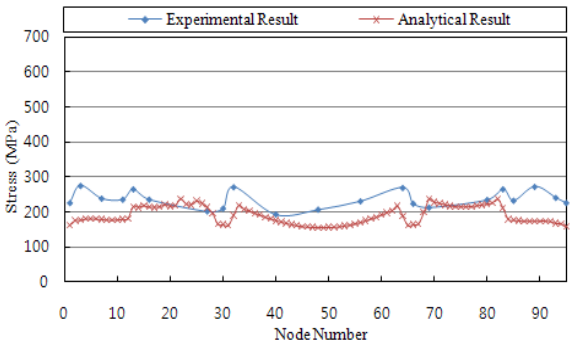
(a) VMT1-H 시험체



(b) VMT2-H 시험체



(c) VMT3-H 시험체

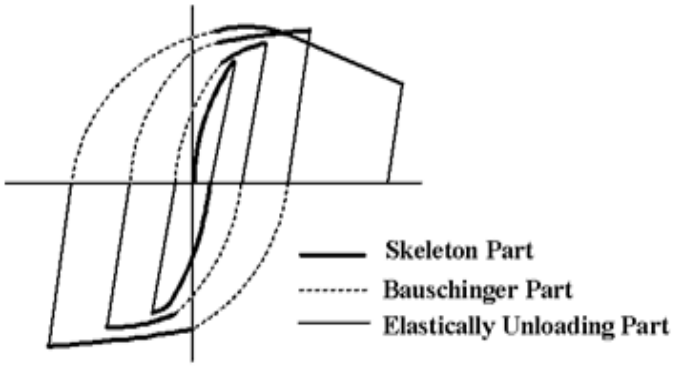


(d) VMT4-H 시험체

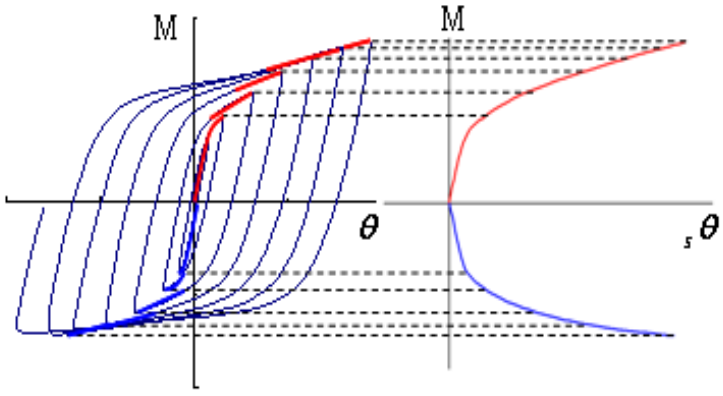
그림 3.2.5.49 수직방향 하중일 경우의 응력분포

(2) 에너지흡수장치의 변형능력 및 에너지 흡수능력 평가

에너지흡수장치의 변형능력과 에너지 흡수능력을 분석하기 위해서는 하중-변위 이력곡선의 구성을 파악하여야 한다. 그림 3.2.5.50(a)에 나타낸 것과 같이 이력곡선은 골격곡선 구간(Skeleton Part), 바우싱거 구간(Bauschinger Part), 탄성 제하 구간(Elastically Unliading Part)으로 구분할 수 있다. 여기서 골격곡선은 에너지흡수장치의 변형능력을 평가하는데 사용되고, 바우싱거 곡선은 골격곡선과 함께 에너지흡수장치의 에너지흡수능력을 평가하는데 사용되는데, 골격곡선을 작성하는 방법은 그림 3.2.5.50(b)에 나타내었다



(a) 이력곡선의 구성

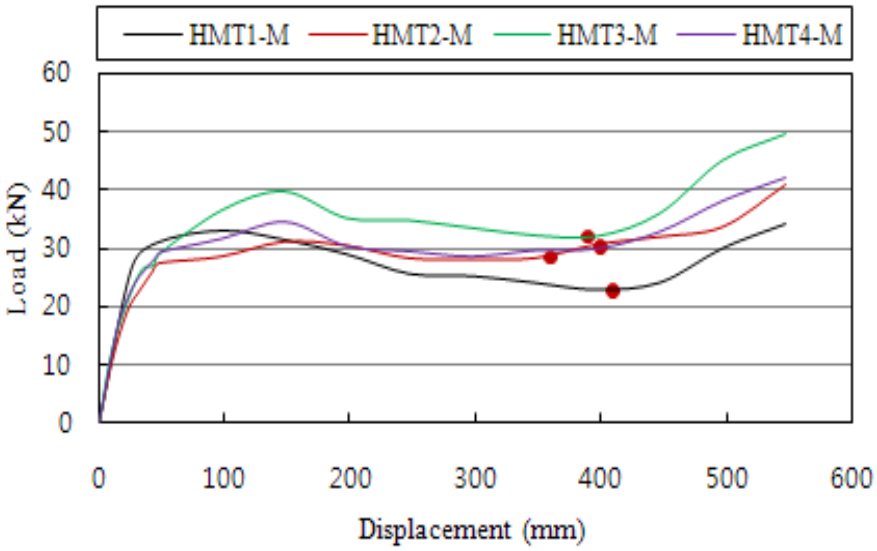


(b) 골격곡선의 작성방법

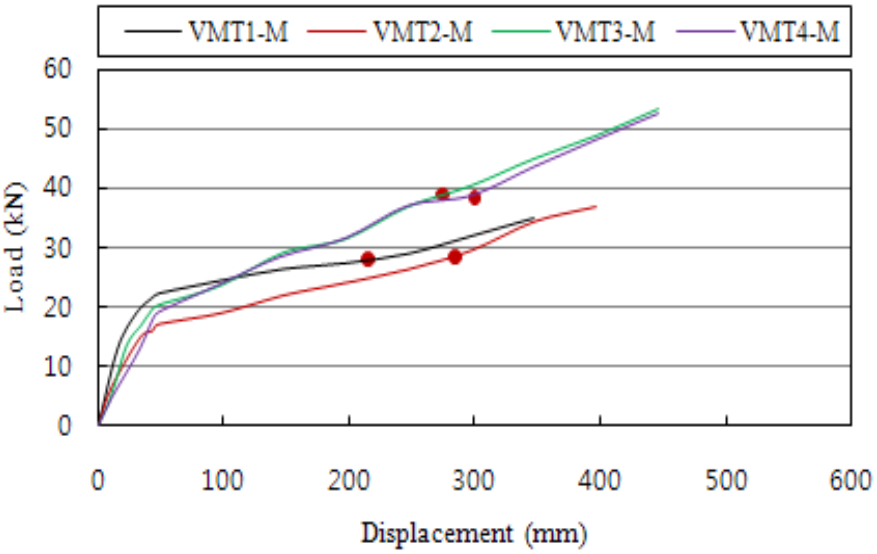
그림 3.2.5.50 이력곡선의 구성 및 골격곡선의 작성방법

시험체의 골격곡선에 기초하여 구한 하중-변위 관계를 그림 3.2.5.51에 나타내고 VMT1-M 시험체와 VMT4-M 시험체의 바우싱거 곡선을 그림 3.2.5.52에 나타내었다. 그림 3.2.5.51에서의 ●은 변곡점을 기준으로 한 한계변형량(δ_{lim})을

나타낸다.

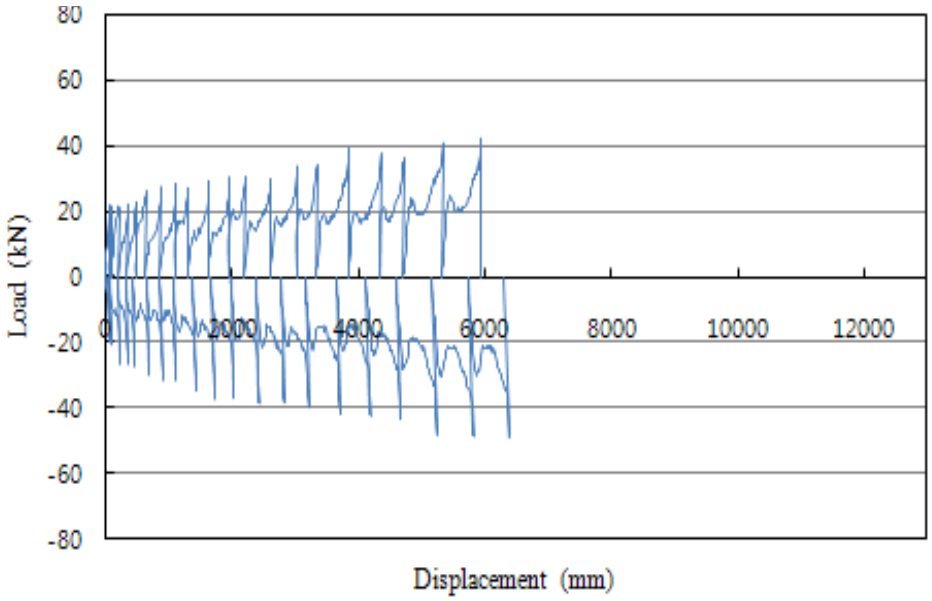


(a) 길이방향 하중일 경우

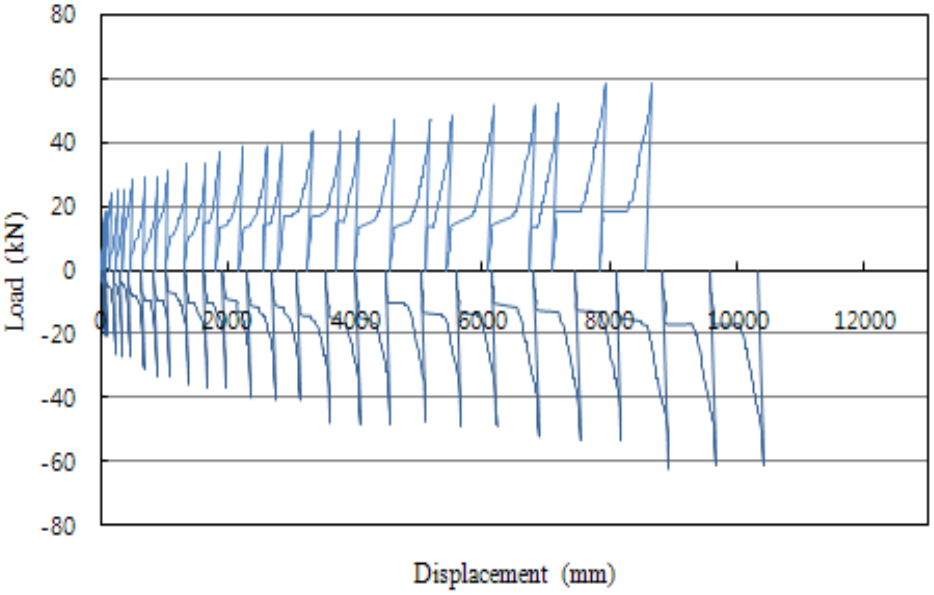


(b) 수직방향 하중일 경우

그림 3.2.5.51 시험체의 하중-변위 관계



(a) VMT1-M 시험체



(b) VMT4-M 시험체

그림 3.2.5.52 시험체의 바우싱거 곡선

(가) 변형 능력

에너지흡수장치에 개구부를 두면 단면적이 감소하여 초기강성과 항복강도의 저하가 발생하게 된다. 따라서 단순하게 하중-변위 관계에 근거하여 에너지흡수장치의 변형능력을 비교·분석하기에는 합리적이지 못하다고 판단되어 한계변형

량($\delta_{\lim}$)을 항복변위(δ_y)로 나누어 얻은 한계소성율(δ_{ly})을 통하여 에너지흡수장치의 변형능력을 평가하고 그 결과를 표 3.2.5.14에 나타내고, 여기에 나타낸 형상별 한계소성율을 하중의 작용방향에 따라 그림 3.2.5.53에 나타내었다. 지진과 같이 불규칙적인 하중에 대하여 에너지흡수장치를 설계할 경우에는 작은 값의 한계소성율을 기준으로 하기 때문에 그림 3.2.53을 보면 수직방향 하중을 받는 경우의 한계소성율로 에너지흡수장치의 변형능력을 평가하여야 한다. 또한 type4의 변형능력이 가장 우수하며 type1의 한계소성율보다 25%이상 크게 나타났다.

표 3.2.5.14 SS400 강재를 사용한 시험체의 변형능력 비교

Loading Direction	Type of Damper	Specimen	δ_y (mm)	$\delta_{\lim}$ (mm)	δ_{ly}	(δ_{ly}/type1)x100 (%)
Horizontal Loading	type1	HMT1-M	26.9	410	15.2	100.0
	type2	HMT2-M	24.2	360	14.8	97.4
	type3	HMT3-M	29.5	390	13.2	86.8
	type4	HMT4-M	23.1	400	17.3	113.8
Vertical Loading	type1	VMT1-M	22.2	215	9.7	100.0
	type2	VMT2-M	32.8	285	8.7	89.7
	type3	VMT3-M	25.6	275	10.7	110.3
	type4	VMT4-M	24.5	300	12.2	125.8

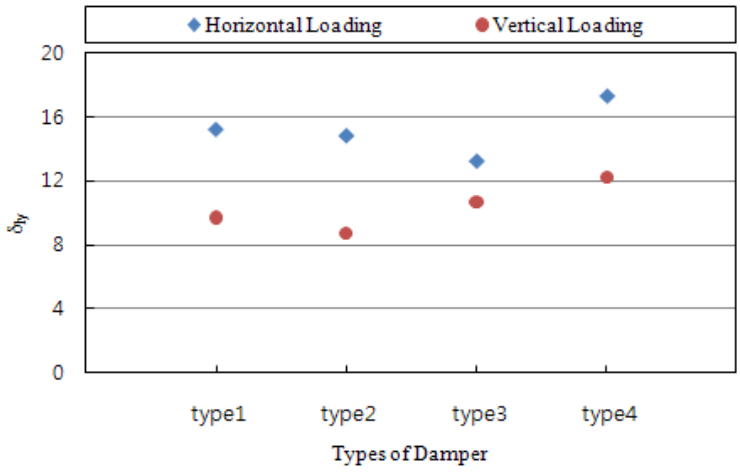


그림 3.2.5.53 형상별 한계소성율

(나) 에너지흡수능력

에너지흡수장치에 개구부를 설치하면 변형능력은 증가되지만 단면의 감소로 인하여 초기강성, 항복강도 및 내력이 저하되기 때문에, 본 연구에서는 식 (3.2.5.1)에 나타낸 누적소성변형배율(η)로써 실험체의 에너지흡수능력을 평가한다.

$$\eta = \frac{{}_uW_S + {}_uW_B}{P_y \cdot \delta_y} \tag{3.2.5.1}$$

여기서, η : 누적소성변형배율

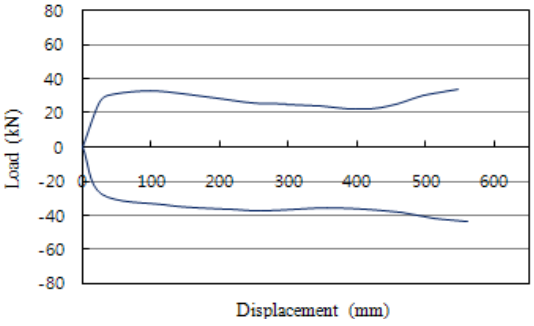
${}_uW_S$: 골격곡선부에서의 에너지흡수량($kN \cdot mm$)

${}_uW_B$: 바우싱거 곡선부에서의 에너지흡수량($kN \cdot mm$)

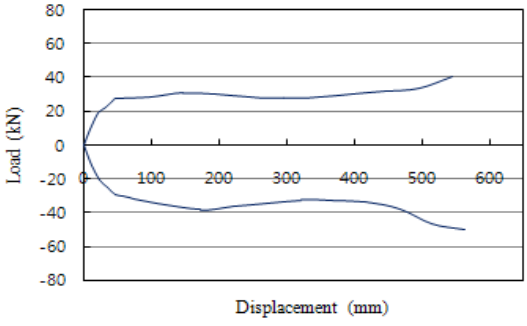
P_y : 항복강도(kN)

δ_y : 항복변위(mm)

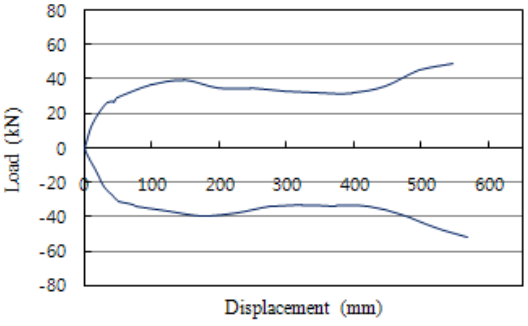
그림 3.2.5.54와 그림 3.2.5.55 및 그림 3.2.5.56에서 나타낸 골격곡선 및 바우싱거 곡선과 횡축이 이루는 닫긴 곡선의 면적으로 에너지흡수량을 구하고 General Yield Point Method에 근거하여 항복강도 및 한복변위를 구한 후, 식 (3.2.5.1)에 대입하여 결과를 표 3.2.5.15에 나타내며, 형상별 누적소성변형배율을 하붕의 작용방향에 따라 그림 3.2.5.56에 나타낸다. 에너지흡수장치의 변형능력을 평가하는 한계소성율과 마찬가지로 에너지 흡수능력도 작은 값을 기준으로 하여야 하기 때문에 그림 3.2.5.56에서 나타낸 것과 같이 수직방향 하중을 받는 경우의 누적소성변형배율로 에너지흡수장치의 에너지흡수능력을 평가하여야 한다. 이 때 누적소성변형배율이 가장 크게 나타난 type4의 에너지 흡수능력이 다른 형상에 비하여 우수하다고 판단된다.



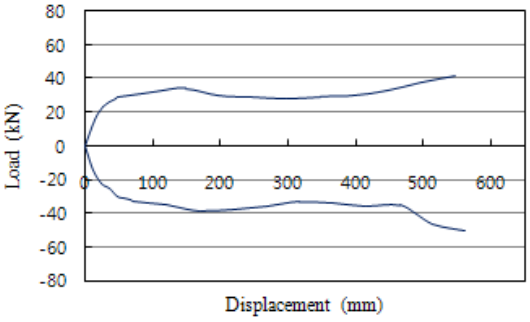
(a) HMT1-M 시험체



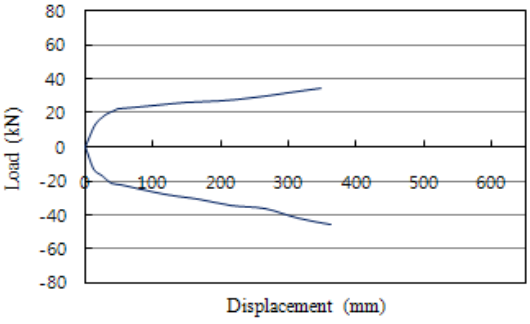
(b) HMT2-M 시험체



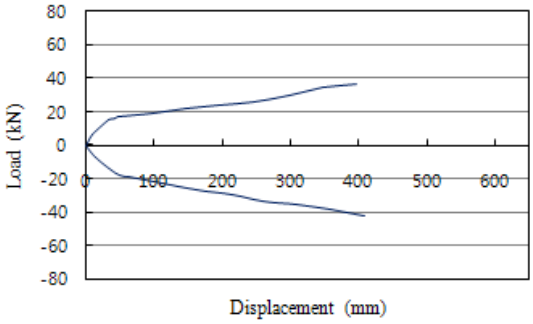
(c) HMT3-M 시험체



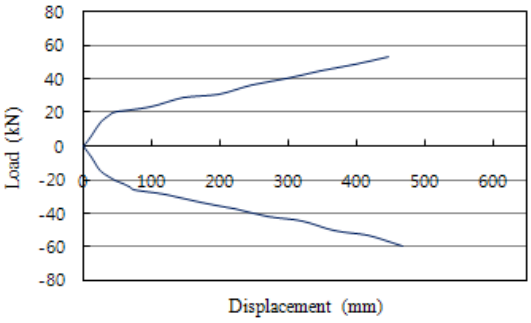
(d) HMT4-M 시험체



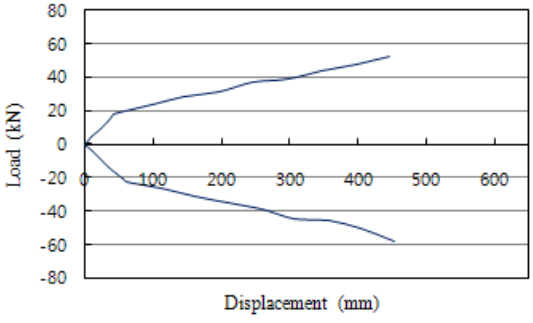
(e) VMT1-M 시험체



(f) VMT2-M 시험체

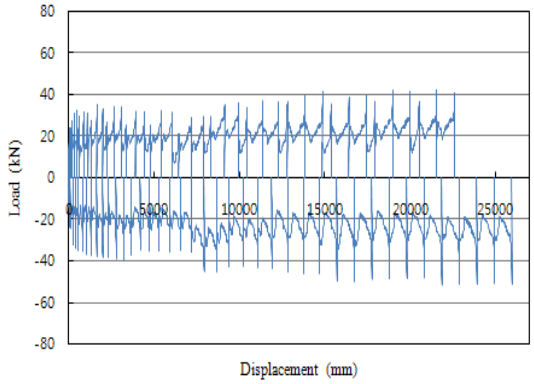


(g) VMT3-M 시험체

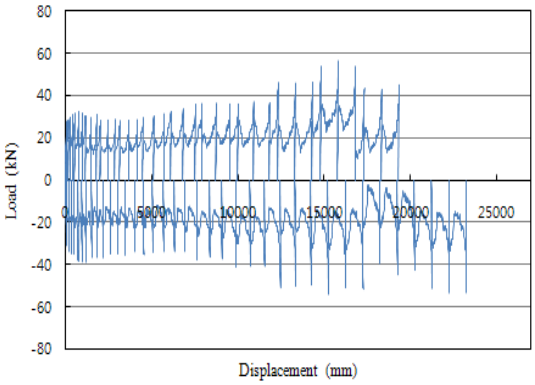


(h) VMT4-M 시험체

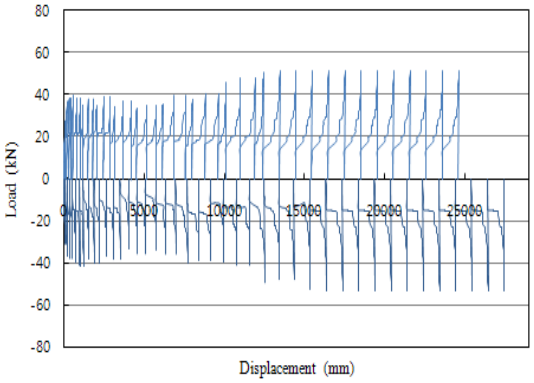
그림 3.2.5.54 골격 곡선(Skeleton Curve)



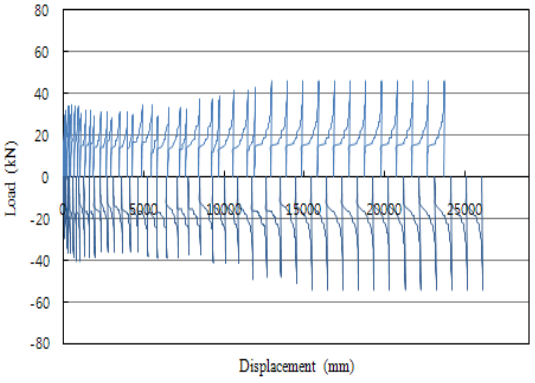
(a) HMT1-M 시험체



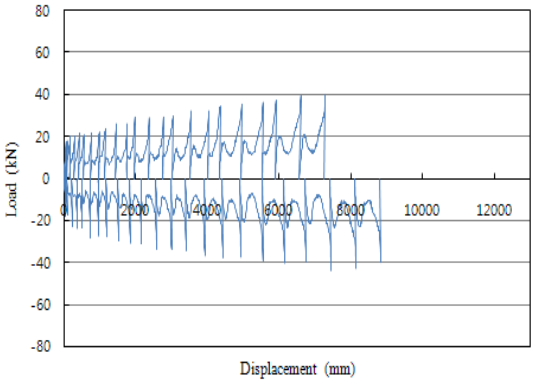
(b) HMT2-M 시험체



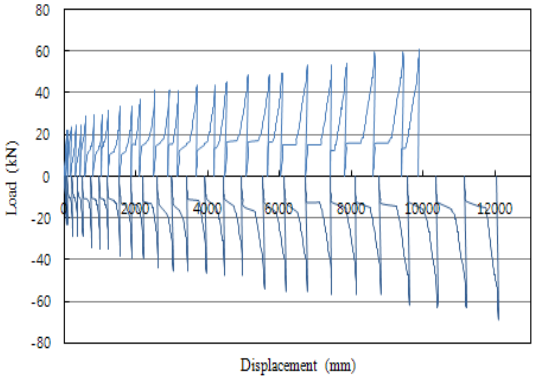
(c) HMT3-M 시험체



(d) HMT4-M 시험체



(e) VMT2-M 시험체



(f) VMT3-M 시험체

그림 3.2.5.55 바우싱거 곡선(Bauschinger Curve)

표 3.2.5.15 SS400 강재를 사용한 시험체의 에너지흡수능력 비교

Loading Direction	Type of Damper	Specimen	P_y (kN)	δ_y (mm)	${}_uW_S$	${}_uW_B$	η	(η/type1)x100 (%)
Horizontal Loading	type1	HMT1-M	29.1	26.9	34446	1077705	1420	100.0
	type2	HMT2-M	26.2	24.2	35676	868843	1426	100.4
	type3	HMT3-M	32.9	29.5	39194	1019216	1091	76.8
	type4	HMT4-M	24.1	23.1	36655	938662	1751	123.3
Vertical Loading	type1	VMT1-M	21.8	22.2	20351	229146	516	100.0
	type2	VMT2-M	14.1	32.8	20973	230547	543	105.2
	type3	VMT3-M	18.1	25.6	32589	325687	773	149.8
	type4	VMT4-M	17.5	24.5	30752	344596	875	169.6

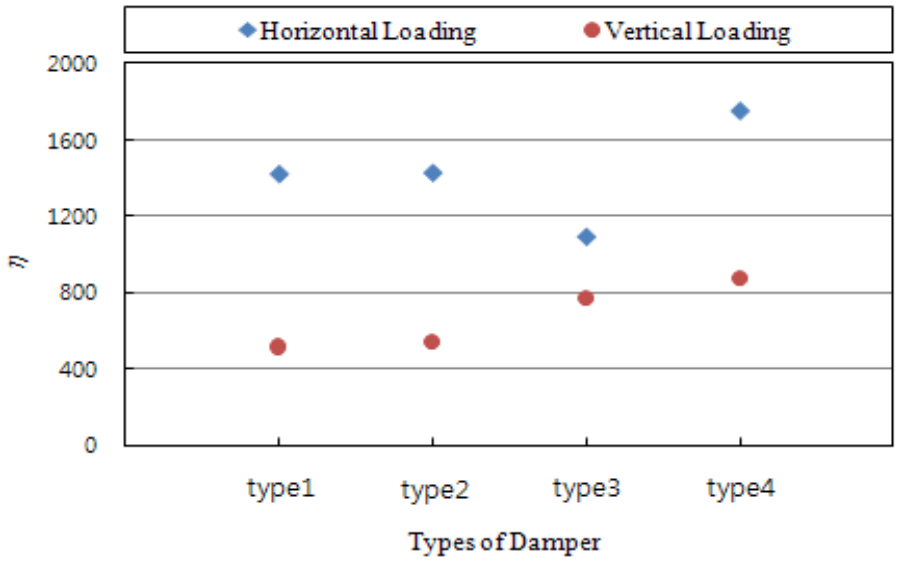


그림 3.2.4.56 형상별 누적손상변형배율

3.2.6 진동대 실험에 의한 동적성능평가

가. 실대형 골조 진동 실험에 의한 면진구조성능 평가

(1) 개요

본 실험에서는 지진발생시 지진에너지가 집중되는 중·저층 구조물을 대상으로 진동대 실험장치의 규모, 성능 및 실험동의 여건을 감안하여 진동대 실험용 골조실험체를 계획하고 계획된 골조실험체에 사용되어질 면진장치를 앞서 제시한 포락설계용 에너지 등가 속도 스펙트럼을 이용하여 설계하고자 한다. 그리고 면진장치의 부재의 구조적 특성을 성능시험을 수행하여 검증한 다음, 복합면진장치의 복원력 특성을 제시하고 진동대 실험결과를 분석하여 면진시스템의 동적성능 및 내진성능을 확인하고자 한다.

(2) 골조실험체의 계획

지진발생시의 지진에너지는 고유진동주기가 1.0초 이하의 작은 영역에 집중되기 때문에 중·저층 건축물에 피해가 집중된다. 본 연구에서는 식 (3.2.6.1)과 같이 건물의 층수에 대한 약산식을 기준으로 고유주기 0.5~1.0초를 가지는 5층에서 10층 사이의 중·저층 구조물을 대상으로 그림 3.2.6.20에 나타낸 흐름에 의하여 골조실험체를 계획하고자 한다.

$$T_n = 0.1N \qquad (3.2.6.1)$$

여기서, T_n : 구조물의 고유주기(sec)

N : 건물의 층수

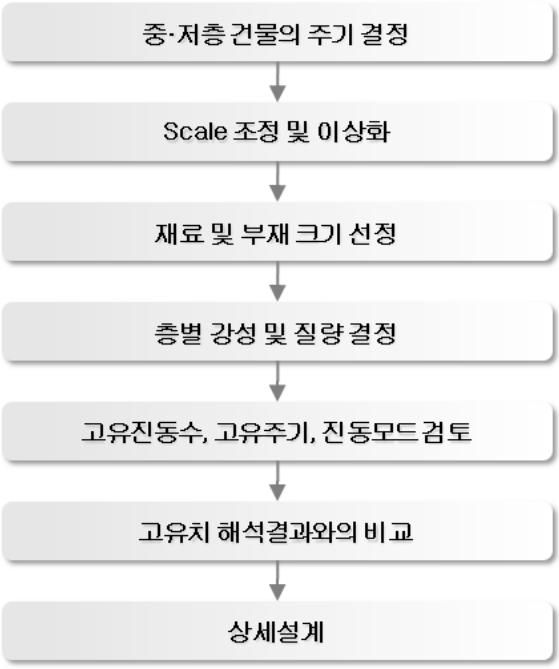


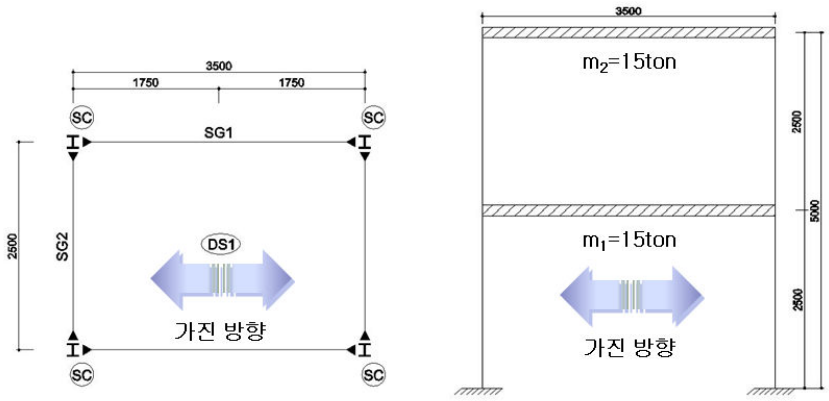
그림 3.2.6.1 골조실험체의 계획 흐름도

(가) 실험체의 모델화 및 고유주기 결정

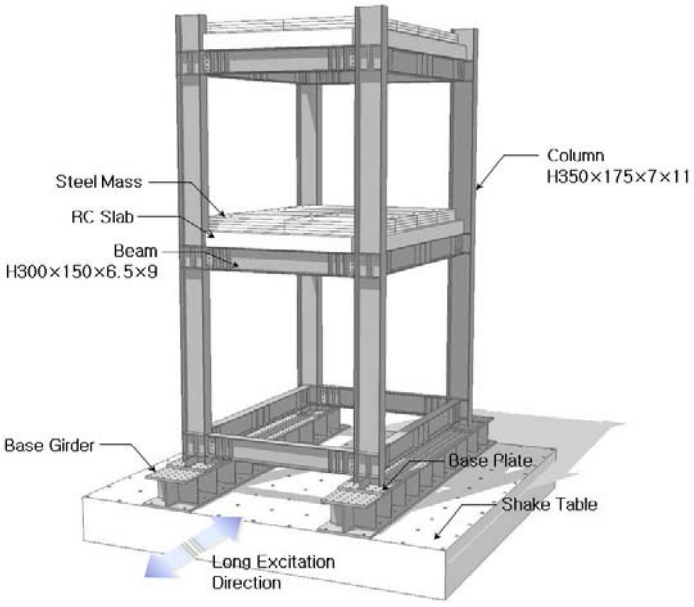
본 실험에서는 진동대 실험장치의 규모, 성능 및 실험동의 여건을 감안하여 다질점계의 동적특성을 최소한으로 표현할 수 있도록 2질점계(2DOF)로 이상화하여 계획하며, 실험체의 기본형상 및 치수는 그림 3.2.6.2와 같다. 골조 실험체의 고유주기는 진동대 실험시 사용되어질 El_Centro NS파의 탁월주기를 감안하여 0.5~0.6초대로 결정하였다. 실험체에 사용된 강재는 SS400 일반구조용 강재이며, 강재의 비중은 $0.0785N/cm^3$, 철근콘크리트의 비중은 $0.024N/cm^3$이다. 주요부재의 나머지 주요제원은 표 3.2.6.1에 나타낸다.

표 3.2.6.1 골조실험체 부재의 주요제원

부 재	표준단면치수 H×B×t_1×t_2(mm)	단면적 A(cm^2)	단위 중량 W(N/cm)	단면2차 모멘트	
				강축 I_x(cm^4)	약축 I_y(cm^4)
기둥(SC)	350×175×7×11	63.14	4.96	13,600	984
보(SG1, SG2)	300×150×6.5×9	46.78	3.67	7,210	508



(a) 평면도 (b) 입면도



(c) 투시도

그림 3.2.6.2 골조실험체의 기본형상 및 치수 (unit : mm)

(나) 강성 및 질량 산정과 고유진동수 확인

실험체는 슬래브와 거더가 함께 거동하는 완전합성보로 지진전단력과 같은 횡방향 하중에 대한 강성은 기둥에 비해 상당히 크므로 각 층 높이에서의 수평단면은 회전이 없는 전단건물로 정의할 수 있다. 따라서 횡방향 하중에 대한 한 층의 강성은 식 (3.2.6.2)와 같이 기둥의 강성만으로 표현할 수 있으며, 계산결과를 표 3.2.6.2에 나타내었다.

$$k_i = \sum k_c = \sum \frac{12 E_c I_c}{h^3} \qquad (3.2.6.2)$$

여기서, k_i : 한 층의 횡강성

k_c : 기둥의 횡강성

E_c : 강재의 탄성계수

I_c : 기둥의 단면2차 모멘트

h : 층높이

표 3.2.6.2 강성 계산결과

탄성계수 E_c(GPa)	단면 2차모멘트 I_c(cm^4)	층높이 h(cm)	기둥의 횡강성 k_c(N/cm)	한 층의 횡강성 k_i(N/cm)
200	984	250	15,114	60,456

골조 실험체는 그림 3.2.6.3과 같이 2질점계의 전단건물로 이상화하여 식 (3.2.6.3)과 운동미분방적식으로 표현할 수 있다. 이 운동방정식에 의해 질량을 산정하고 고유치 계산값과 범용 구조해석 및 최적설계용 프로그램인 MIDAS Gen(Ver.741)을 이용하여 구한 고유치 해석값을 비교하여 표 3.2.6.3에 나타내었다.

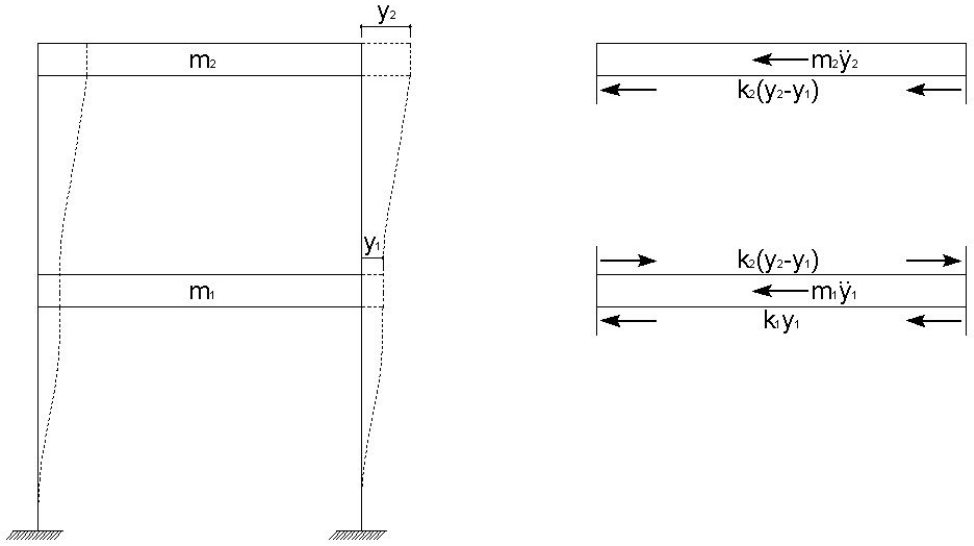


그림 3.2.6.3 2질점계 전단건물 해석모델

$$[M]\{\ddot{y}\}+[K]\{y\}=0 \tag{3.2.6.3}$$

여기서, $[M]=\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix}$: 질량 행렬

$[K]=\begin{bmatrix} k_1+k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix}$: 강성 행렬

표 3.2.6.3 고유치해석 결과

구 분	질 량 (ton)		고유원진동수 (rad/s)		고유진동수 (Hz)		고유주기 (s)	
	m_1	m_2	1차	2차	1차	2차	1차	2차
계산값	15	15	12.284	32.164	1.955	5.119	0.512	0.195
해석값			11.622	30.790	1.850	4.900	0.541	0.204

(다) 전소성모멘트, 수평전단력, 항복변위

골조 실험체에 사용된 부재의 인장시험 결과를 표 3.2.6.4에 나타내었다. 기둥플랜지의 평균 탄성계수 및 항복강도와 식 (3.2.6.4)~식 (3.2.6.6)을 이용하여 구한 소성힌지발생시의 전소성모멘트, 수평전단력, 항복변위를 표 3.2.6.10에 나타낸다.

$$M_p=F_y\frac{A}{2}a=F_y \cdot Z \tag{3.2.6.4}$$

여기서, M_p : 소성힌지발생시 전소성모멘트, F_y : 부재의 항복강도

A : 단면적, a : 인장력과 압축력 사이의 거리, Z : 소성단면계수

$$P \cdot \delta = 8M_p \cdot \theta \tag{3.2.6.5}$$

여기서, P : 소성힌지발생시 수평전단력

δ : 수평 층간변위, θ : 기둥부재 회전각

$$\delta_Y=\frac{P}{k} \tag{3.2.6.6}$$

여기서, δ_Y : 소성힌지발생시 항복변위

k : 한층의 횡강성

표 3.2.6.4 철골부재의 인장시험 결과

구 분		재 질	시편수 (EA)	탄성계수 (GPa)	항복강도 (MPa)
Column (SS400)	Web	SS400	3	190	350
	Flange		3	195	340
Beam (SS400)	Web		3	187	365
	Flange		3	192	325

표 3.2.6.5 소성힌지발생시 전소성모멘트, 수평전단력, 항복변위

한층의 횡강성 k(N/cm)	소성단면계수 $Z(cm^3)$	전소성모멘트 M_P(N·m)	수평전단력 P(N)	항복변위 δ_Y(cm)
58,945	174	59,160	189,312	3.21

(3) 에너지법에 근거한 면진장치의 설계

본 실험에서는 부록의 면진구조 설계지침 및 매뉴얼에 제시된 면진구조의 에너지평형법에 근거한 면진구조 설계 지침에 따라 면진장치를 설계하고 그 성능을 구조 해석 및 실험을 통하여 검증한다.

(가) 적층고무의 형상 및 크기

적층고무(Isolator)의 역학적 특성을 결정하는 중요한 것은 고무재료의 전단탄성율(G)과 1차 형상계수(s_1) 및 2차 형상계수(s_2)이다. 적층고무의 일반적 형상을 그림 3.2.6.4에 나타내며, 1차 형상계수(s_1) 및 2차 형상계수(s_2)는 식 (3.2.6.7) 및 식 (3.2.6.8)에 나타낸다.

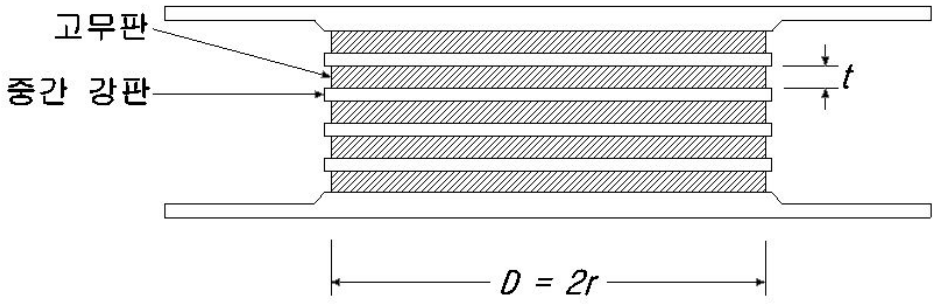


그림 3.2.6.4 적층고무의 형상

$$s_1 = \frac{\text{고무의 구속면적}}{\text{고무1층의 자유표면적(표면적)}} = \frac{\pi r^2}{2\pi rt} = \frac{r}{2t} \quad (3.2.6.7)$$

$$s_2 = \frac{\text{고무 직경}}{\text{전고무층 두께}} = \frac{D}{n_l t} = \frac{2r}{n_l t} \quad (3.2.6.8)$$

여기서, r : 고무판의 반경

t : 고무판의 두께

n_l : 고무층수

V_E 스펙트럼의 최대치 V_{EM}에 대응하는 1질점 탄성계의 응답전단력계수(α_o)는 식 (3.2.6.10)와 같이 면진주기 T_f에 반비례하므로, 주기가 길수록 응답전단력계수는 작아진다. 따라서 어느 정도 장주기화가 가능한지가 면진구조의 성능을 결정짓는 중요한 설계요소이다.

$$\alpha_o = \frac{2\pi V_{EM}}{T_f g} \quad (3.2.6.9)$$

여기서, V_{EM} : 에너지스펙트럼의 최대치

T_f : 면진구조물의 고유주기

g : 중력가속도

적층고무가 횡방향 하중을 받을 경우의 전단강성 Kf와 적층고무의 강성에 의해 결정되는 주기 T_f는 식 (3.2.6.10) 및 식 (3.2.6.11)과 같다.

$$K_f = \frac{Q}{\delta} = \frac{G\gamma\pi r^2}{n_l t\gamma} = \frac{G\pi r^2}{n_l t} \quad (3.2.6.10)$$

$$T_f = 2\pi\sqrt{\frac{M}{K_f}} = 2\pi\sqrt{\frac{W_o}{gK_f}} = 2\pi\sqrt{\frac{\overline{\sigma} n_l t}{gG}} = 2\pi\sqrt{\frac{\overline{\sigma} D}{gGs_2}} \quad (3.2.6.11)$$

여기서, δ : 상하강판 사이의 상대수평 변위

W_O : 한 개의 적층고무가 지지하는 중량

G : 고무의 전단탄성계수

본 연구에서는 국내 제조업체에서 제시하고 있는 적층고무의 설계용 재료정수 및 제작가능여부를 감안하여 목표 면진주기를 3.0초로 설정하고, 이에 따른 적층고무 1개의 전단강성과 크기를 표 3.2.6.6에 나타낸다.

표 3.2.6.6 적층고무 1개의의 전단강성과 크기

T_f (s)	지지하중 (kN)	K_f (N/cm)	G (N/cm^2)	외경 (cm)	내경 (cm)	유효면적 (cm^2)
3.0	150	672	26.5	20	10	235.6

적층고무판(cm)			중간강판(cm)		단부강판(cm)		제품 총높이 (cm)	S_2
두께	층수	총높이	두께	층수	두께	층수		
0.42	25	10.5	0.23	24	2.2	2	20.42	1.90

(나) 에너지흡수장치의 형상 및 크기

본 연구에서는 선행연구에서 제안한 일반강재(SS400)와 고인성강재(High Toughness Steel, 이하: HTS)를 이용한 이력감쇠형 U형 강재댐퍼를 사용하고자 한다. 강재댐퍼의 항복전단력계수(α_s), 적층고무의 최대전단력계수(α_f)에 따른 면진층 전단력계수(α_1)를 구하는 방법 및 포락설계용 도표를 식 (3.2.6.12)와 그림 3.2.6.5에 나타내었다. 면진층의 최대 수평변위는 식 (3.2.6.13)과 같다.

$$\alpha_1 = \alpha_f + \alpha_s = (-\frac{7}{8}a + \sqrt{a^2+1}) \cdot \alpha_0 \qquad (3.2.6.12)$$

여기서, $\alpha_0 = \frac{2\pi V_E}{T_f g}$: 무감쇠 무댐퍼시 탄성응답전단력계수

$\alpha_f = \frac{{}_f Q_m}{Mg} = (-a + \sqrt{a^2+1}) \cdot \alpha_0$: 유요소의 최대전단력계수

$\alpha_s = \frac{{}_s Q_Y}{Mg} = \frac{a}{8} \cdot \alpha_0$: 강요소의 항복전단력계수

$a = 8(\frac{\alpha_s}{\alpha_0})$

$$\delta_m = \frac{T_f V_E}{2\pi}\left(\frac{\alpha_f}{\alpha_0}\right) \qquad (3.2.6.13)$$

여기서, δ_m : 면진층의 최대 수평변위

그림 3.2.6.5의 포락설계용 도표 및 식 (3.2.6.12)와 식 (3.2.6.13)을 참고하여 V_E=150cm/s, T_f=3.0s, a=1.0, 1.5, 1.8, 2.0, 2.5에 따른 α_0, α_f, α_s, α_1, ${}_fQ_m$, ${}_sQ_Y$ 및 δ_m을 정리하여 표 3.2.6.12에 나타낸다. a값이 1.8 내외일 때 그림 3.2.6.24의 도표와 같이 전단력계수 α_1값이 최저값을 나타낸다.

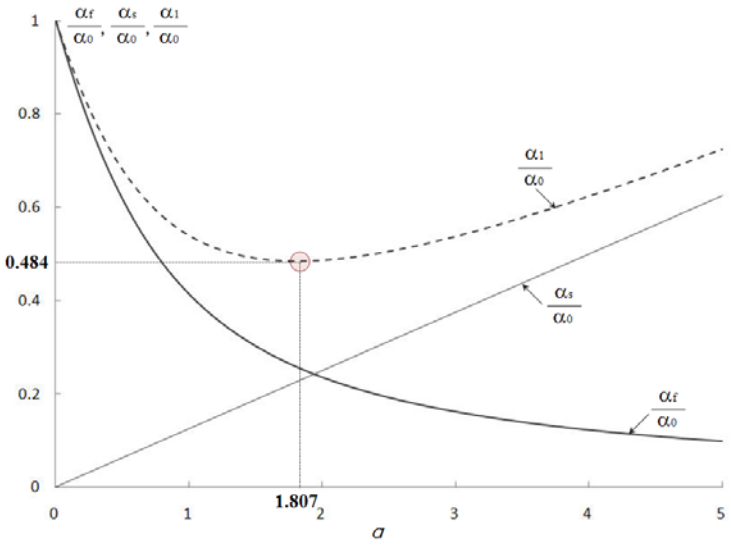


그림 3.2.6.5 면진구조의 포락해석용 도표

표 3.2.6.7 a값에 따른 면진구조의 포락설계값

a	α_0	α_f	α_s	α_1	α_1/α_0	${}_fQ_m$ (N)	${}_sQ_Y$ (N)	δ_m (cm)
1.0		0.133	0.040	0.173	0.539	39,790	12,000	29.67
1.5		0.097	0.060	0.157	0.490	29,090	18,000	21.68
1.8	0.320	0.083	0.072	0.155	0.484	24,900	21,600	18.56
2.0		0.076	0.080	0.156	0.486	22,680	24,000	16.91
2.5		0.062	0.100	0.162	0.505	18,500	30,000	13.79

표 3.2.6.7에서 a=1.8 내외일 때의 포락설계값을 만족하는 강재댐퍼의 형상과 크기는 선행연구에서 수행한 연구결과를 바탕으로 그림 3.2.6.25의 형상을 가지는 강재댐퍼를 사용한다. 선행연구에서 그림 3.2.6.6의 강재댐퍼는 평판부길이(L) 288mm, 형상비(L/R) 2.4, 폭(W) 50mm, 두께(T) 10mm, 개구부(t) 10mm일 때 구조성능이 a=1.8에 가장 근사적인 값을 가진다. 선행연구결과와 표 3.2.6.13에

나타낸 일반강재와 고인성강재의 물성을 감안하여 설계한 강재댐퍼의 치수를 표 3.2.6.9에 나타내었다.

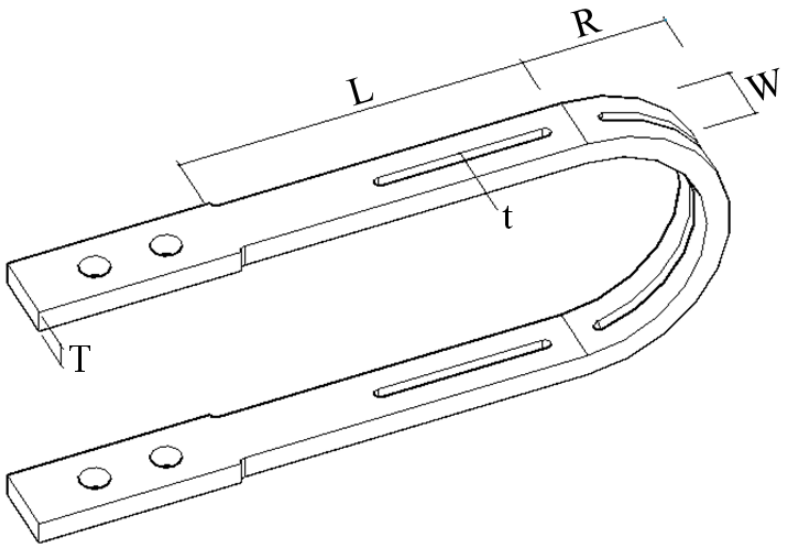


그림 3.2.6.6강재댐퍼의 형상

표 3.2.6.8 강재댐퍼 사용재료의 물성

사용재료	주요 화학성분(%)		탄성계수 (MPa)	항복강도 (MPa)	인장강도 (MPa)
	C	Mn			
SS400	0.2	1.2	200,000	282	481
HTS	0.6	17	190,000	264	775

표 3.2.6.9 강재댐퍼의 치수

재 질	곡선부분 외경 반지름 R(mm)	평판부 길이 L(mm)	형상비 L/R	폭 W(mm)	두께 T(mm)	개구부 t(mm)
SS400	110	304	2.76	50	10	10
HTS	120	288	2.40	50	10	10

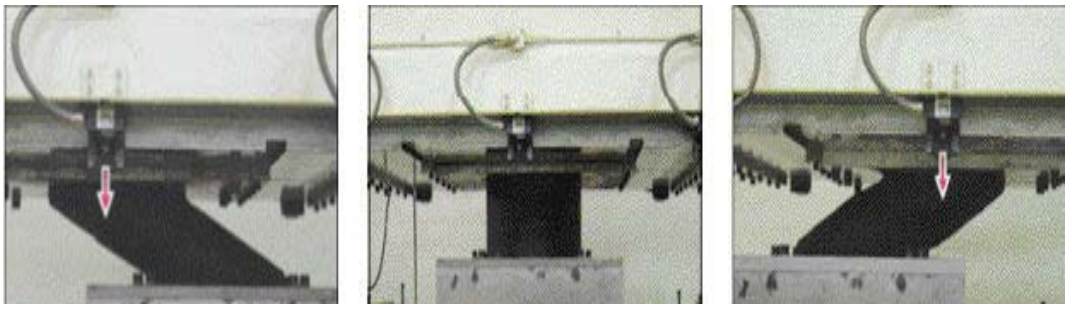
① 면진장치의 성능시험

면진장치의 정확한 정적성능을 확인하고, 지진응답해석에 사용될 해석 변수값을 설정하기 위하여 표 3.2.6.6 및 표 3.2.6.7에 설계된 치수로 적층고무와 강재댐퍼를 제작한 후, 그림 3.2.6.7 및 그림 3.2.6.8과 같이 정적반복가력 전단시험을

수행하였다.

㉮ 적층고무의 전단시험

적층고무의 수평전단강성은 표 3.2.6.10에 나타낸 것과 같이 전단변형각(γ)이 커짐에 따라 약간의 강성저하가 나타나면서 580±40N/cm 범위 안에 있다. 이는 목표 전단강성 672 N/cm보다 약간 작은 값으로서 구조물의 장주기에 더 유리할 것으로 판단된다.



(a) 좌가력시 (b) 원점시 (c) 우가력시

그림 3.2.6.7 적층고무의 전단시험

표 3.2.6.10 적층고무의 전단시험 결과

Number	고무층 총높이 $n_t t$(cm)	전단탄성계수 G(N/cm^2)	전단변형각 γ에 따른 전단강성 K_f(N/cm)		
			γ=1.0(δ=10cm)	γ=1.5(δ=15cm)	γ=1.7(δ=17cm)
No.1	10.5	26.5	620	580	540
No.2			620	580	560
No.3			620	580	560
No.4			620	570	550

㉯ 강재댐퍼의 전단시험

강재댐퍼의 전단시험결과를 표 3.2.6.11에 나타내었고, 그림 3.2.6.8에 나타낸 것과 같이, 일반강재댐퍼(이하: SS400댐퍼)와 고인성강재댐퍼(이하: HTS댐퍼)의 전단시험에 의한 힘-변위 곡선의 변위 200mm까지 댐퍼가 흡수한 에너지와 동일하게 에너지 흡수가 되도록 해석용 이선형 곡선의 항복강도와 2차 강성을 설정하여 그림 3.2.6.9에 나타내었다. 강재의 물성과 형상의 차이로 인해 SS400댐퍼의 초기강성이 HTS댐퍼보다 1.2배 정도의 큰 강성을 가지고 있어 평상시 진

동제어에는 SS400이 더 효과적일 것으로 판단된다. 그러나 지진 시 면진구조의 동적성능을 결정짓는 댐퍼의 항복강도는 각각 2,960N과 2,990N으로서 큰 차이가 없으며, 이 때 해당하는 포락설계변수 a값은 대략 2.0으로서 목표값 1.8에 근사하다.



(a) 좌가력시 (b) 원점시 (c) 우가력시

그림 3.2.6.8 강재댐퍼의 전단시험

표 3.2.6.11 강재댐퍼의 전단시험 결과

종 류	탄성계수 (MPa)	초기강성 (N/cm)	2차 강성 (N/cm)	항복강도 (N)	댐퍼 8개의 항복강도 (N)	a
SS400댐퍼	200,000	870	68	2,960	23,680	1.97
HTS댐퍼	190,000	695	91	2,990	23,920	1.99

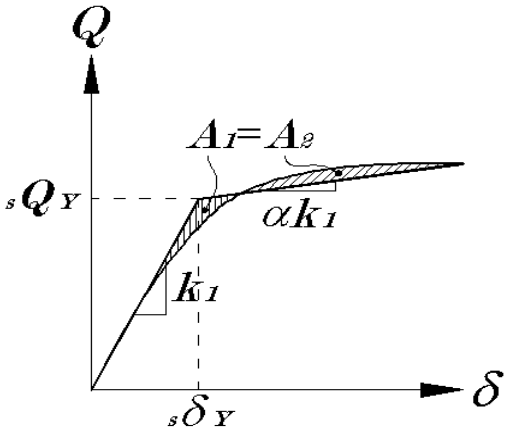
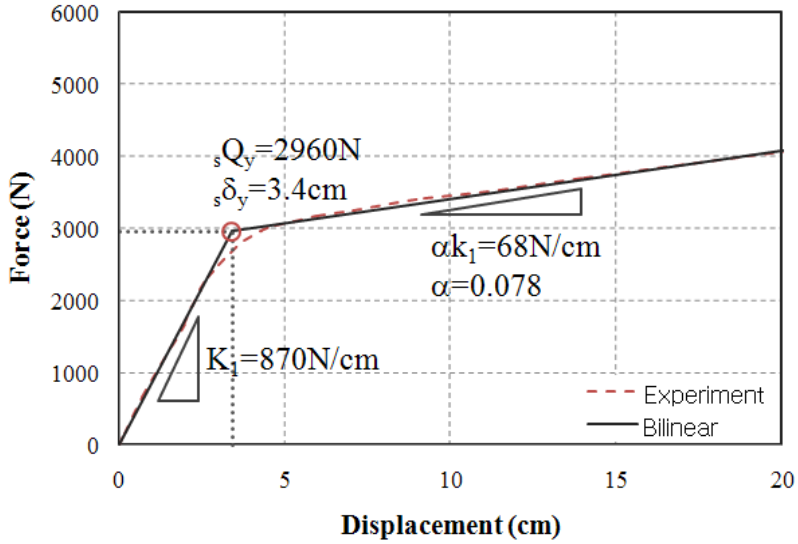
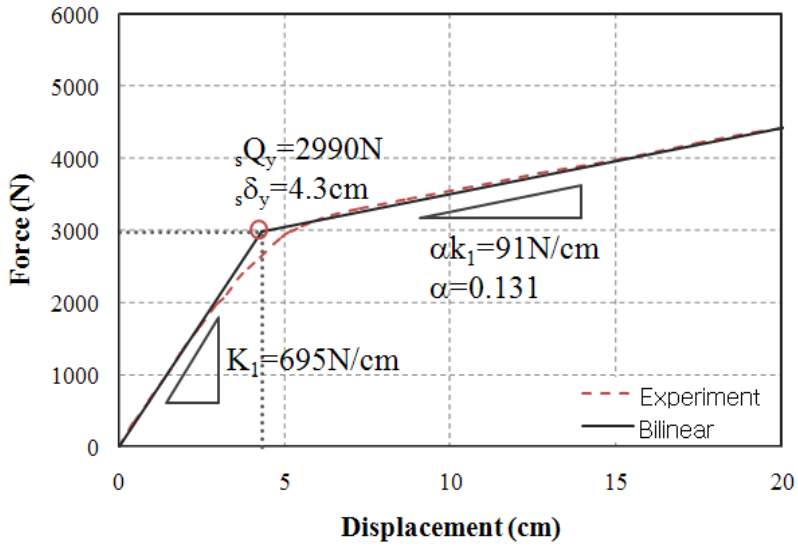


그림 3.2.6.9 항복강도 및 강성 산정법



(a) SS400



(b) HTS

그림 3.2.6.10 전단시험에 의한 강재댐퍼의 힘-변위 관계

(4) 지진응답해석

면진장치를 설계·적용함에 있어서 면진장치가 갖는 재료적 비선형성으로 인하여 설계된 면진장치의 성능을 분석하기 위해서 비선형 해석이 요구된다.

시간이력해석은 구조물에 동적하중이 작용할 경우, 식 (3.2.6.14)에 나타낸 동적 평형방정식의 해를 구하는 것으로, 구조물의 동적특성과 가해지는 하중을 사용하여 임의의 시간에 대한 구조물의 응답을 계산하게 된다.

$$[M]\ddot{u}(t)+[C]\dot{u}(t)+[K]u(t)=p(t) \qquad (3.2.6.14)$$

여기서, $[M]$: 질량행렬(Mass Matrix)

$[C]$: 감쇠행렬(Damping Matrix)

$[K]$: 강성행렬(Stiffness Matrix)

$p(t)$: 동적하중 or 지진하중

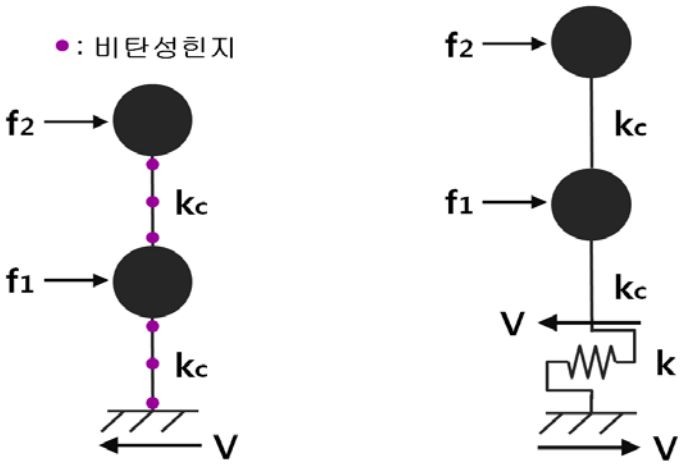
$u(t)$, $\dot{u}(t)$, $\ddot{u}(t)$: 변위, 속도, 가속도

본 연구에서는 면진장치의 성능시험결과에 근거하여 비면진실험체와 면진실험체(적층고무) 및 복합면진실험체(적층고무+SS400댐퍼 또는 적층고무+HTS댐퍼))에 대한 해석 변수값을 설정하고 범용 구조해석 및 최적설계용 프로그램인 MIDAS Gen(Ver.741)22)을 사용하여 비선형 시간이력해석을 수행하고자 한다.

(가) 해석 모델 및 절차

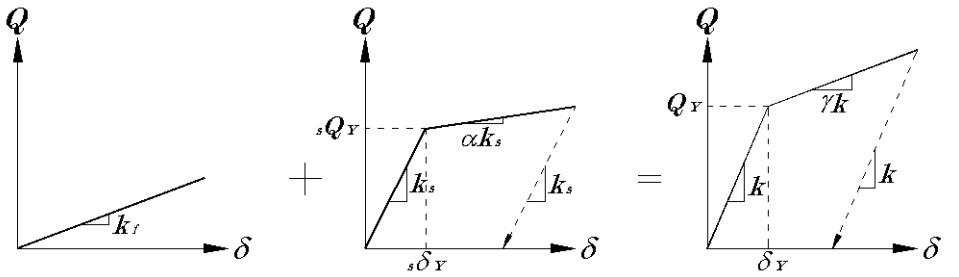
① 해석 모델

비면진구조의 3D 모델링은 그림 3.2.6.10(a)와 같이, 재료비선형이 고려될 수 있도록 부재단면에 파이버모델(Fiber Model)을 사용한 비탄성 힌지를 부재 전체에 3개의 적분점으로 정의되도록 설정하여 기둥요소에 부여하고, 직접적분법(Direct Integration)으로 해석을 수행한다. 면진구조는 그림 3.2.6.10(b)와 같이, 전체 구조물 중 일부분에 비선형성이 국한된 경우에 적용할 수 있는 경계 비선형 시간이력해석기능(Boundary Nonlinear Time History Analysis)을 이용한다. 면진장치의 모델링에는 Force Type 비선형 연결요소 중 이력거동시스템(Hysteretic System)을 사용하고, 상부구조물은 탄성으로 모델링하여 비선형 모드중첩법에 의하여 해석을 수행한다. 이력거동시스템의 복원력 모델과 해석변수는 그림 3.2.6.11 및 표 3.2.6.12에 나타내었다.



(a) 비면진구조 (b) 면진구조

그림 3.2.6.10 비면진구조 및 면진구조의 해석 모델



(a) 유요소(적층고무) (b) 강요소(댐퍼) (c) 유강혼합구조(면진시스템)

그림 3.2.6.11 이력거동시스템의 복원력 모델

표 3.2.6.12 이력거동시스템의 해석변수값

Damper	k_f (N/cm)	k_s (N/cm)	k (N/cm)	δ_Y (cm)	$_sQ_Y$ (N)	Q_Y (N)	γ
SS400	290	1740	2030	3.4	5916	6902	0.210
HTS	290	1390	1680	4.3	5977	7224	0.281

② 해석 방법

해석은 비면진구조 기둥부재의 예상 항복강도 및 소성화 정도를 고려하여 표 3.2.6.13에 나타낸 것과 같이 El_Centro NS파의 최대가속도 357cm/s^{2}을 기준으로 스케일이 조정된 지진파를 사용하여 탄성에서 소성역으로 단계적으로 해석을 수행한다.

표 3.2.6.13 해석 단계별 지진파의 크기 및 규모

Scale(%)		PGA (cm/s2)	지진의 규모	부재의 예상 탄소성 상태
El_Centro	Kobe			
40	17	143	5.3~5.8	탄성한계 → 소 성 → 파괴 및 대변형
100	43	357	6.0~6.6	
130	56	464	6.2~6.9	
200	86	714	6.5~7.3	

③ 해석 결과

㉮ 고유주기

실험체별 고유치 해석값을 표 3.2.6.14에 나타내었다. 표 3.2.6.14의 질량 참여율을 통하여, 동적거동시 비면진 및 면진구조 모두 1차 모드의 거동이 지배적이나 비면진구조가 면진구조에 비하여 2차 모드 영향이 다소 크게 나타날 것으로 판단된다. 면진주기는 3.26초로 목표로 하는 3.0초 이상을 만족한다. HTS댐퍼의 초기강성이 SS400댐퍼보다 작으므로 HTS를 사용한 복합면진구조의 1차 고유주기가 더 길게 나온다.

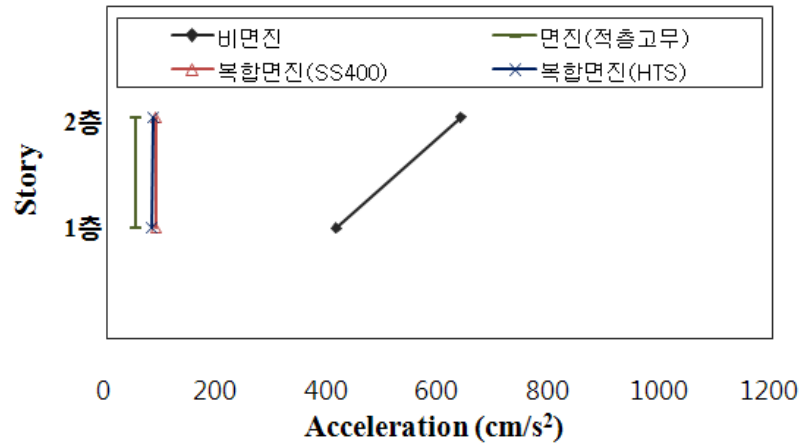
표 3.2.6.14 고유치해석 결과

면진 유무	고유원진동수 (rad/s)		고유진동수 (Hz)		고유주기 (s)		질량 참여율 (%)	
	1차	2차	1차	2차	1차	2차	1차	2차
비면진	11.62	30.79	1.85	4.90	0.541	0.204	93.22	4.7
면진(적층고무)	1.93	27.98	0.31	4.45	3.26	0.22	100	0.0
복합면진(SS400)	4.73	28.41	0.75	4.52	1.33	0.22	99.86	0.11
복합면진(HTS)	4.35	28.33	0.69	4.51	1.44	0.22	99.90	0.07

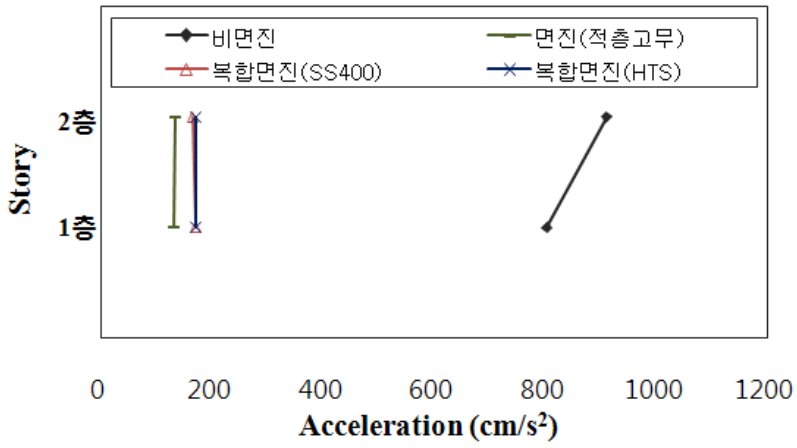
㉯ 가속도 응답

층별 최대 절대가속도를 그림 3.2.6.12에 나타내었다. 비면진구조의 2층 응답가속도는 1층 기둥부재의 소성화 정도에 따라 그 증폭비가 줄어들다가 1층 기둥부재가 완전소성힌지 상태가 되면 1층 기둥부재 윗부분은 강체로 거동하게 되어 1층 응답가속도와 거의 같아지게 된다. 면진구조는 상대적으로 낮은 댐퍼의 항

복강도에 의해 소성화가 일찍 진행되어 지진의 크기에 큰 관계없이 면진층에서 대변형이 발생하고 상부구조는 평행이동 하듯 강체로 진동하게 된다. 따라서 1층과 2층의 응답가속도는 모든 Scale에서 비슷한 크기를 가진다. 이러한 동적특성은 비면진구조에 대한 면진구조의 가속도응답비를 나타낸 그림 3.2.6.13을 통해서도 알 수 있다. 비면진구조가 Scale 40% 정도의 탄성역에서는 2층 응답가속도비가 1층 응답가속도비보다 더 작은 값을 가지나 지진크기가 커짐에 따라 응답비 차가 줄어들다 Scale 200% 정도에서는 1층과 2층의 응답가속도비가 거의 같아지게 된다. 댐퍼의 종류에 따른 응답차는 그리 크지 않다. 이는 비슷한 복원력 특성을 가진 두 강재댐퍼에서 재료의 감쇠 등의 재료적 특성은 고려하지 않고 댐퍼의 복원력 특성만을 해석에 반영한 결과로 판단된다.

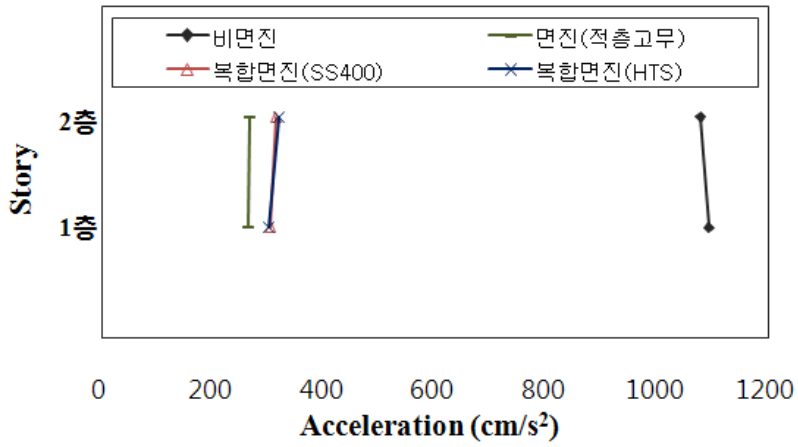


(a) Scale 40%



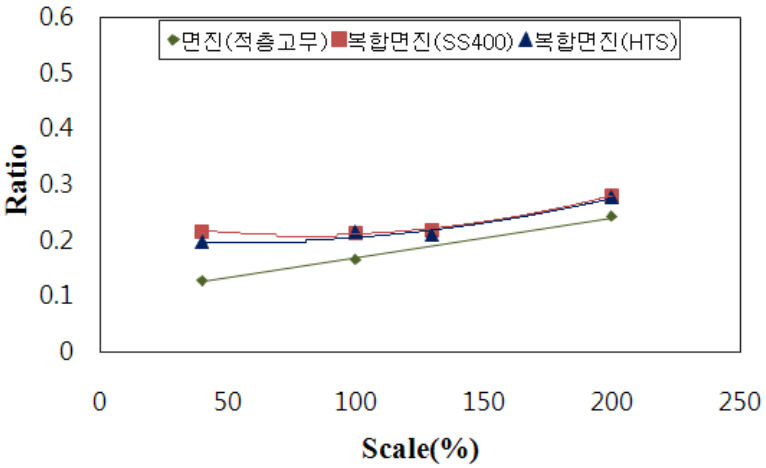
(b) Scale 100%

그림 3.2.6.12 층별 최대 절대가속도(계속)

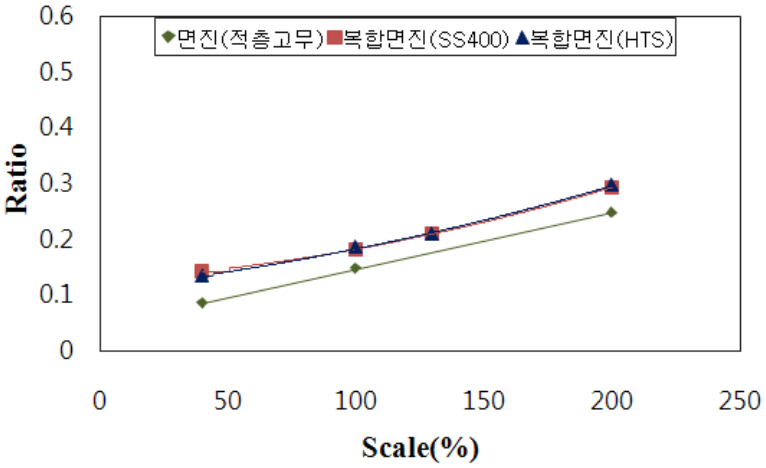


(c) Scale 200%

그림 3.2.6.12 층별 최대 절대가속도



(a) 1층



(b) 2층

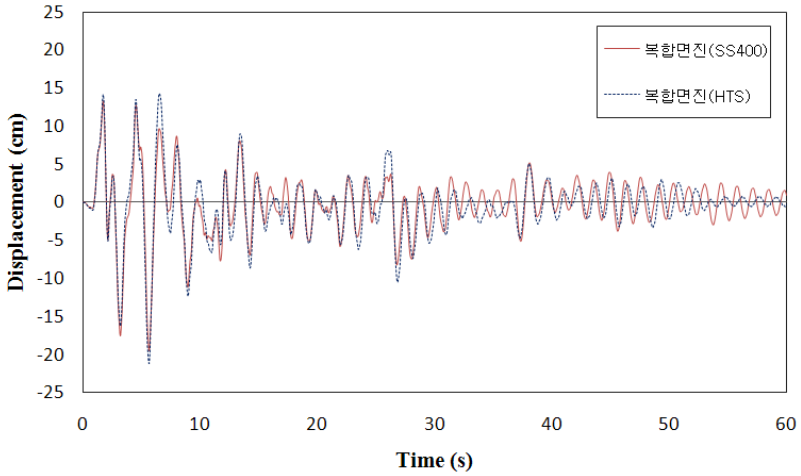
그림 3.2.6.13 면진 유무에 따른 최대 가속도비(면진/비면진)

㈐ 변위 응답

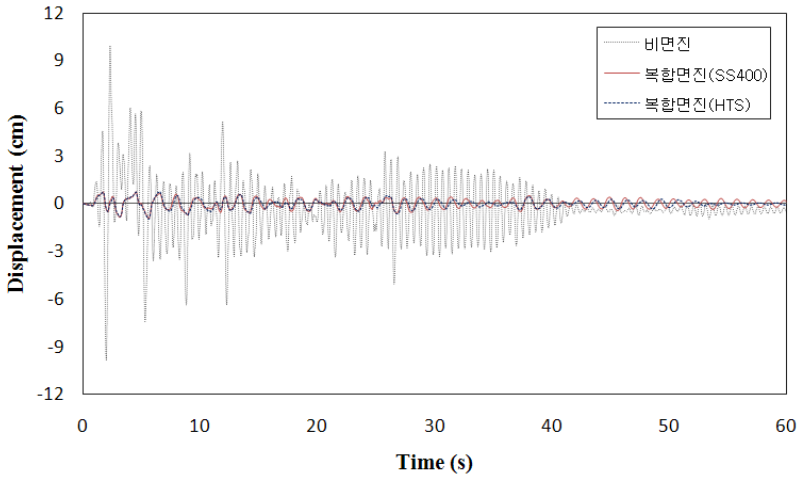
상부구조물의 층간변위와 면진층의 전단변형을 표 3.2.6.15에 나타내고 Scale 200%일 때의 층간변위 시간이력을 그림 3.2.6.14에 나타내었다. 비면진구조는 강한 지진력에 의해 구조물에 소성화와 대변형이 일어나고 가진 이후에도 잔류변형이 남게 된다. 그러나 면진구조에서는 면진층에만 대변형이 발생되고 상부구조물은 작은 변형 안에서 탄성거동을 한다. 그림 3.2.6.15의 최대 층간변위에서 댐퍼를 병용한 면진구조가 적층고무만 있는 면진구조보다 면진층의 최대변형이 크게 감소되며, 댐퍼의 병용효과는 그림 3.2.6.16에 나타낸 것과 같이 가진 크기가 클수록 소성화가 집중되는 1층에서 층간변위 저감효과가 크게 나타난다. 이는, 댐퍼의 감쇠이력거동에 의해 지진에너지가 댐퍼에 집중적으로 흡수된 결과라 할 수 있다.

표 3.2.6.15 층간변위응답 결과

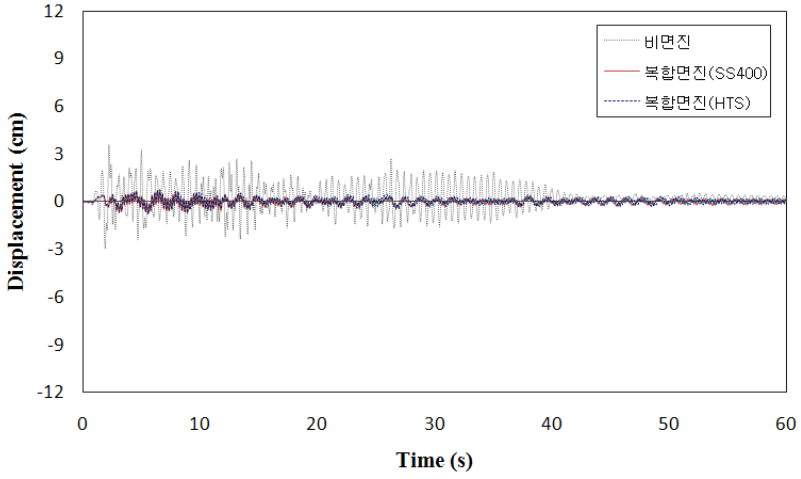
Scale	면진 유무	층간변위 (cm)					
		Base		1F		2F	
		최대변형	잔류변형	최대변형	잔류변형	최대변형	잔류변형
40	비면진	-	-	3.33	0.045	1.80	-
	면진(적층고무)	13.16	-	0.25	-	0.14	-
	복합면진(SS400)	3.40	0.037	0.36	-	0.23	-
	복합면진(HTS)	3.65	0.031	0.36	-	0.21	-
100	비면진	-	-	6.98	0.060	2.63	0.036
	면진(적층고무)	32.91	-	0.62	-	0.34	-
	복합면진(SS400)	7.80	0.062	0.56	-	0.41	-
	복합면진(HTS)	8.79	0.002	0.59	-	0.42	-
130	비면진	-	-	7.93	0.133	3.03	0.147
	면진(적층고무)	42.78	-	0.81	-	0.44	-
	복합면진(SS400)	10.28	0.010	0.63	-	0.52	-
	복합면진(HTS)	10.86	0.013	0.68	-	0.52	-
200	비면진	-	-	9.93	0.414	3.58	0.259
	면진(적층고무)	65.83	-	1.25	-	0.67	-
	복합면진(SS400)	19.57	0.013	0.88	-	0.79	-
	복합면진(HTS)	21.15	0.100	0.99	-	0.80	-



(a) 면진층

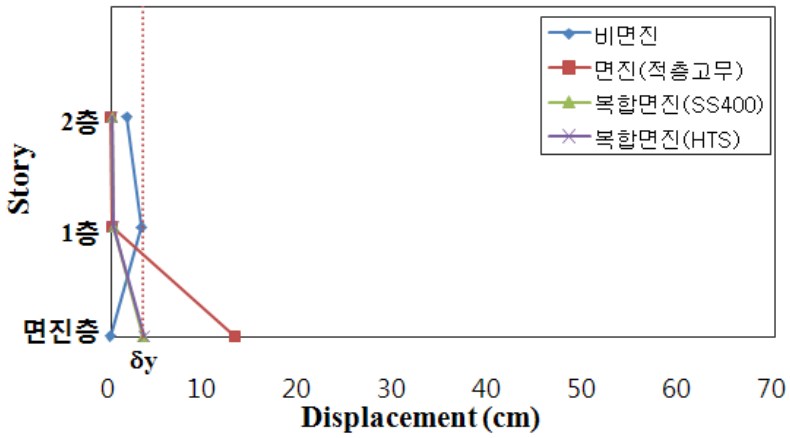


(b) 1층

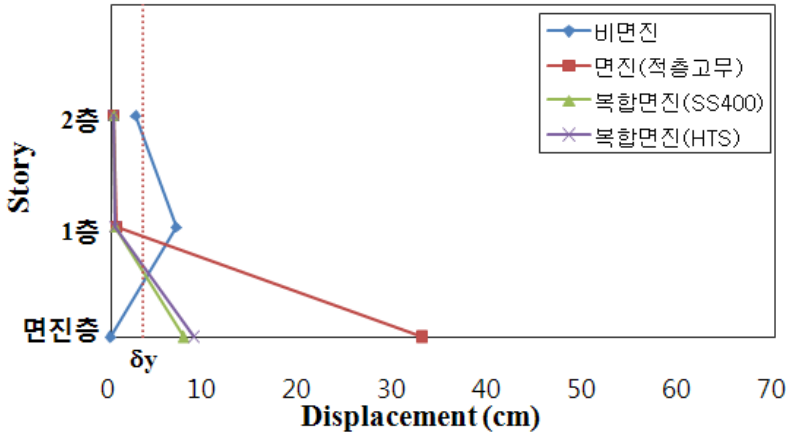


(c) 2층

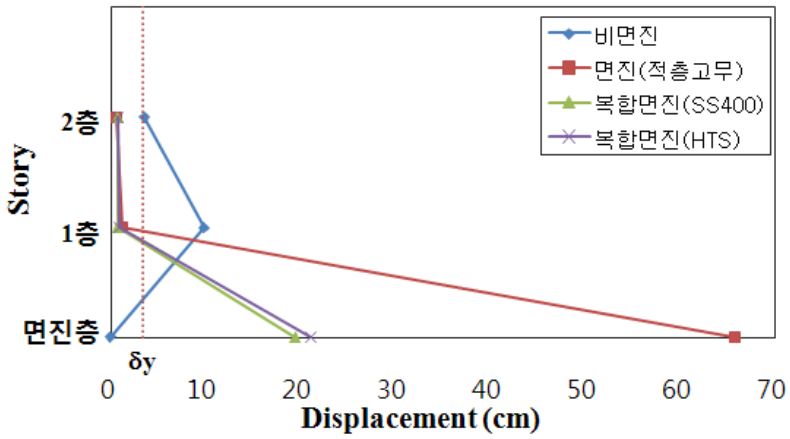
그림 3.2.6.14 층간변위 시간이력(Scale 200%)



(a) Scale 40%

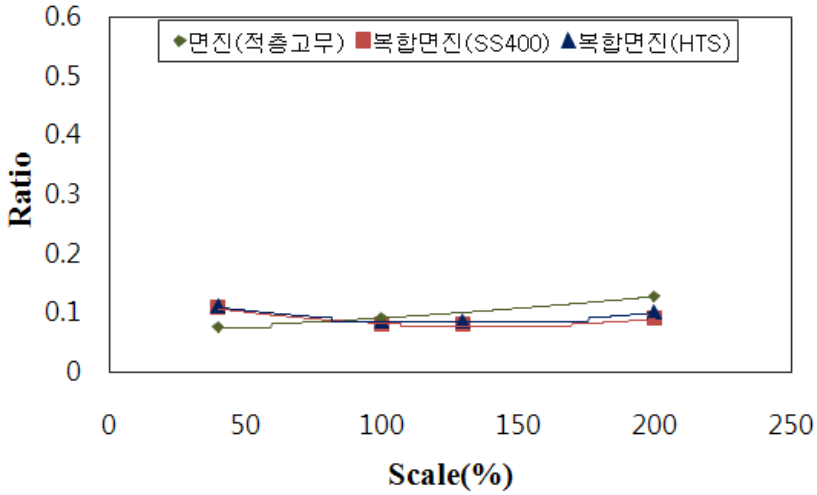


(b) Scale 100%

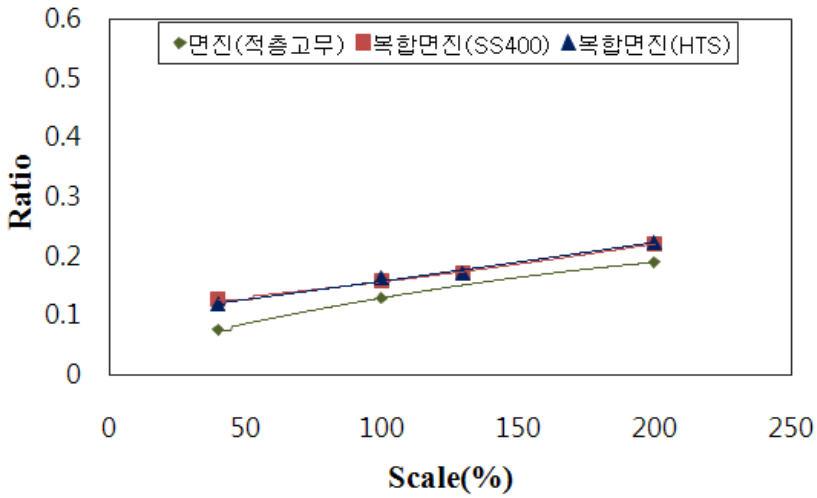


(c) Scale 200%

그림 3.2.6.15 최대 층간변위



(a) 1층



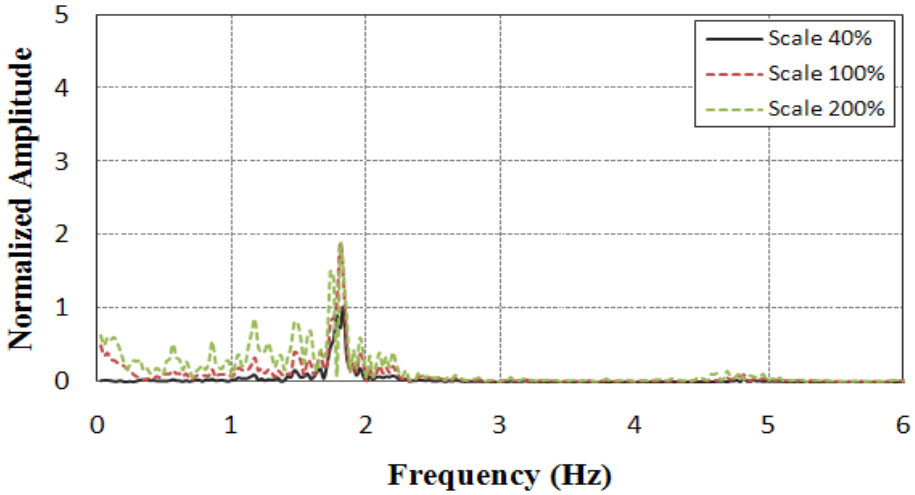
(b) 2층

그림 3.2.6.16 면진 유무에 따른 최대 층간변위비(면진/비면진)

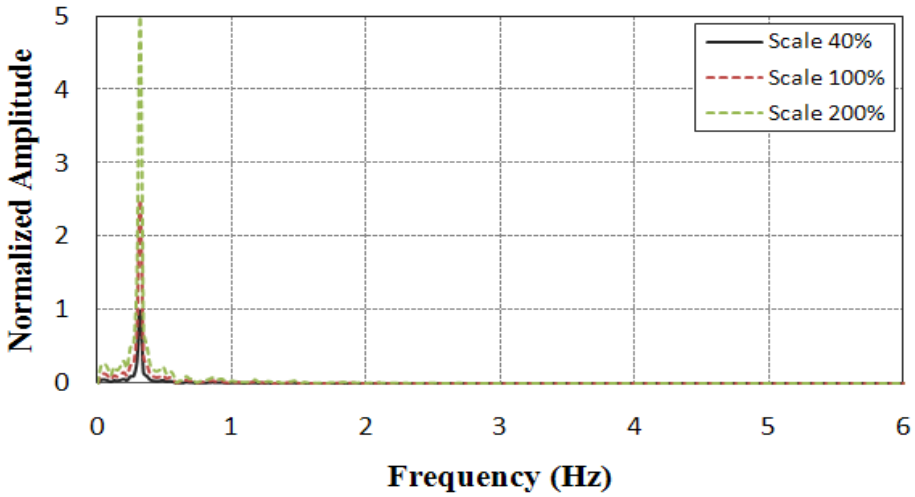
㉱ 주파수 성분

1층 층간변위(비면진구조)와 면진층의 상대변위(면진구조)의 시간이력을 FFT(Fast Fourier Transform) 알고리즘을 사용하여 주파수 성분으로 변환하고, Scale 40%(PGA 145cm/s^2)일 때의 주파수 성분 중 최대 진폭에 대하여 일반화 시킨 주파수 스펙트럼을 그림 3.2.6.17에 나타내었다. 주파수 성분의 분석결과, 적층고무만 있는 면진구조는 탁월진동수가 일정하고 각 주파수 성분의 진폭이 선형적으로 증가하면서 1차 모드의 거동이 지배적이다. 비면진구조와 댐퍼가 있는 면진구조에서는 4.5~4.8Hz대의 상부구조물의 2차 모드의 거동이 다소 나타

나고 가진크기가 커질수록 비면진구조의 기둥부재 및 면진구조의 댐퍼의 항복에 의한 강성저하로 인하여 구조물의 고유진동특성이 변하고 주기가 길어지면서 저주파 성분의 진폭의 크기와 비중이 상대적으로 증가한다. 특히, 댐퍼가 있는 면진구조에서 이러한 성향이 더 뚜렷이 나타난다.

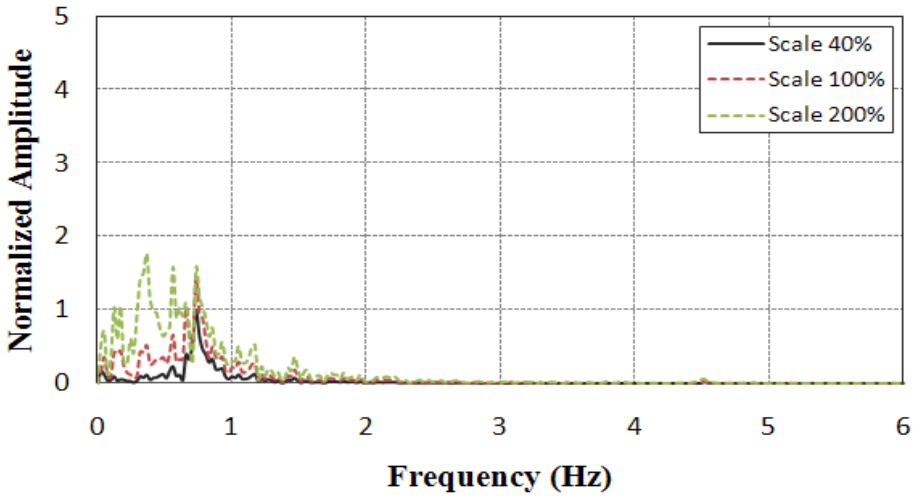


(a) 비면진구조

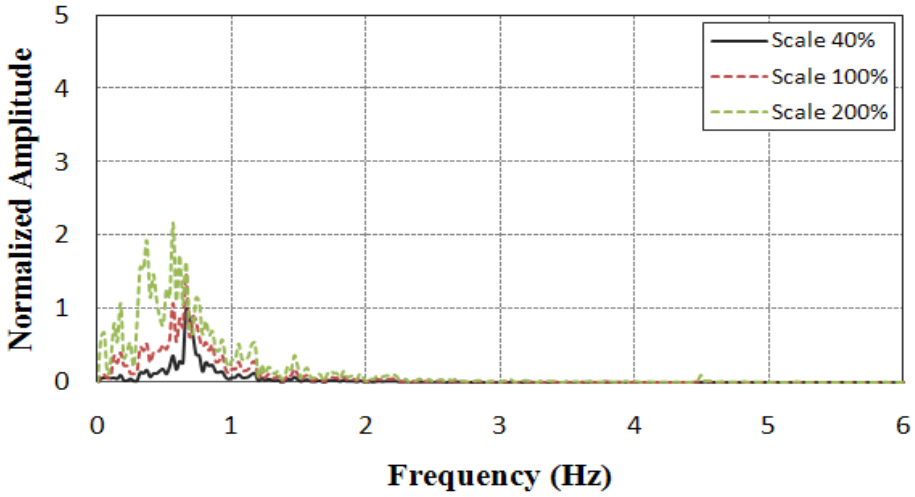


(b) 면진구조(적층고무)

그림 3.2.6.17 가진크기에 따른 주파수 성분(계속)



(c) 복합면진구조(SS400)



(d) 복합면진구조(HTS)

그림 3.2.6.17 가진크기에 따른 주파수 성분

㈐ 하중-변위 관계

Scale 100%일 때의 비면진구조의 1층의 층간변위에 대한 하중-변위 관계와 면진구조의 면진층의 상대변위에 대한 힘-변위 관계를 그림 3.2.6.18에 함께 나타내었다. 댐퍼를 병용한 면진구조는 비면진구조보다 밑면전단력을 82%이상, 적층고무만 이용한 면진구조보다 면진층의 최대변형을 72%이상 감소시킨다. 이러한 면진구조에서 댐퍼의 병용에 의한 응답저감효과는 그림 3.2.6.19에 나타낸 것과 같이 가진크기가 커질수록 크게 나타난다. 이는, 면진구조는 설계지진 이상의 큰 강진시에도 충분한 내진성능을 확보하는 것으로 판단된다.

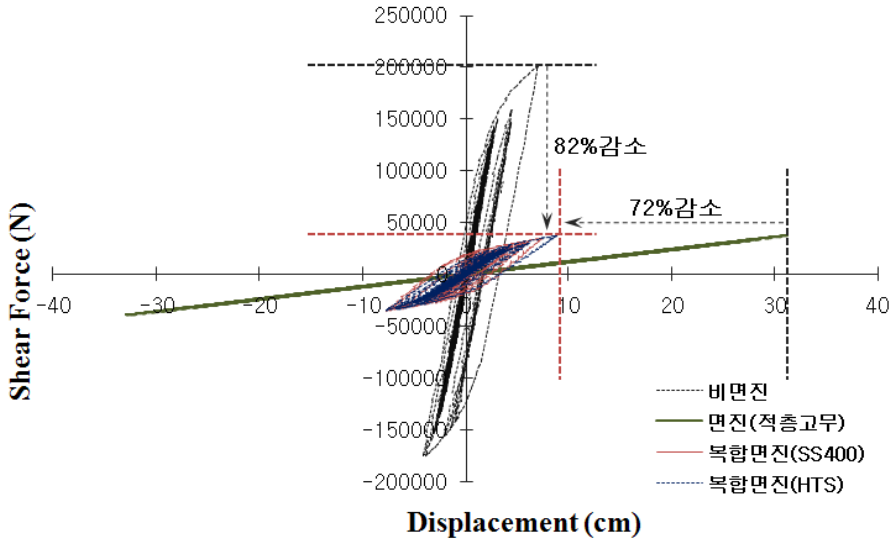


그림 3.2.6.18 하중-변위 관계(Scale 100%)

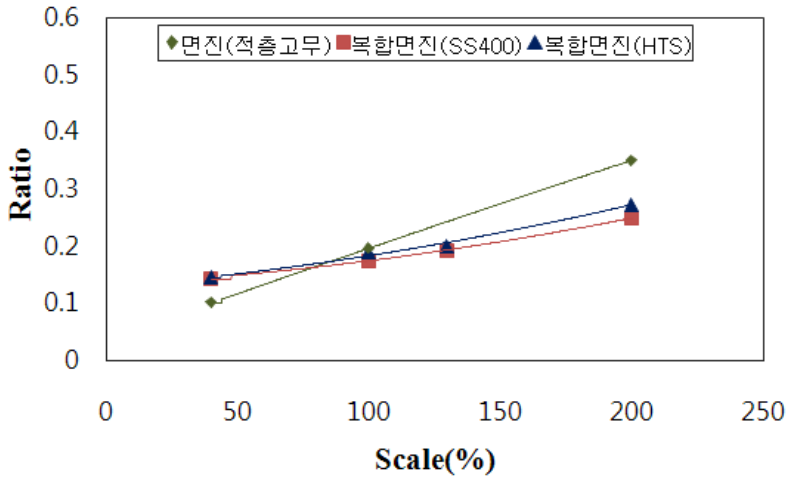


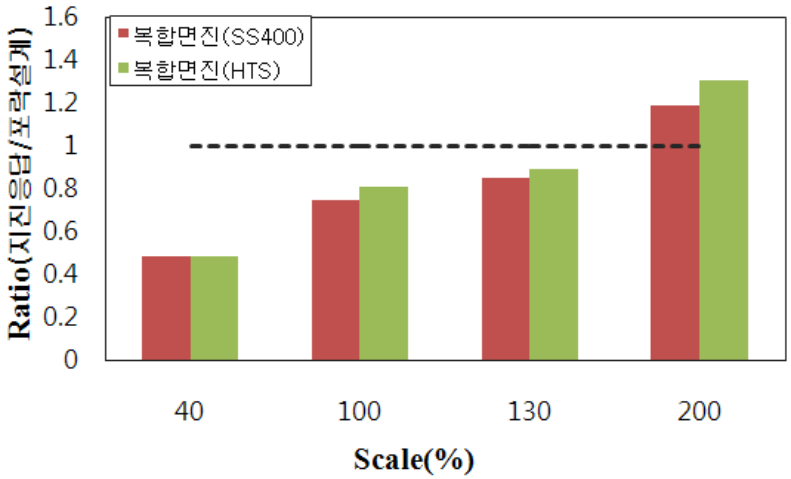
그림 3.2.6.19 면진 유무에 따른 밑면전단력비(면진/비면진)

㉮ 포락설계값과의 비교

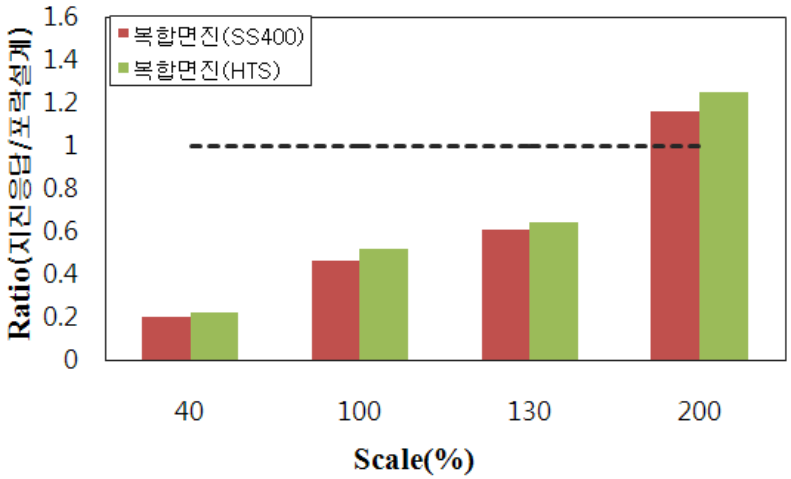
포락설계에 의한 면진층의 최대수평전단력(Q_m) 및 최대수평변위(δ_m)의 설계값과 지진크기별 지진응답해석결과를 표 3.2.6.16에 나타내고, 포락설계값에 대한 지진응답비를 그림 3.2.6.20에 나타내었다. 지진파의 불확정성에도 불구하고 지진응답에 의한 수평전단력은 포락설계값의 48~130% 정도이다. 이는 상부구조물 항복강도의 12~32%의 값으로 우수한 내진 안전성을 확보하고 있다.

표 3.2.6.16 포락설계값과 해석결과 비교

설계값								해석값				
VE (cm/s)	α_o	α_s	α_f	a	α_1	Q_m (N)	δ_m (cm)	PGA (cm/s^2)	SS400		HTS	
									Q_m (N)	δ_m (cm)	Q_m (N)	δ_m (cm)
150	0.321	0.08	0.076	2.00	0.157	47100	16.96	145	22593	3.40	22737	3.65
								357	35119	7.80	37850	8.79
								464	39842	10.28	41900	10.86
								714	55861	19.57	61422	21.15



(a) 면진층의 최대 수평전단력비



(b) 면진층의 최대 수평변위비

그림 3.2.6.20 포락설계값에 대한 지진응답비

(5) 진동대 실험

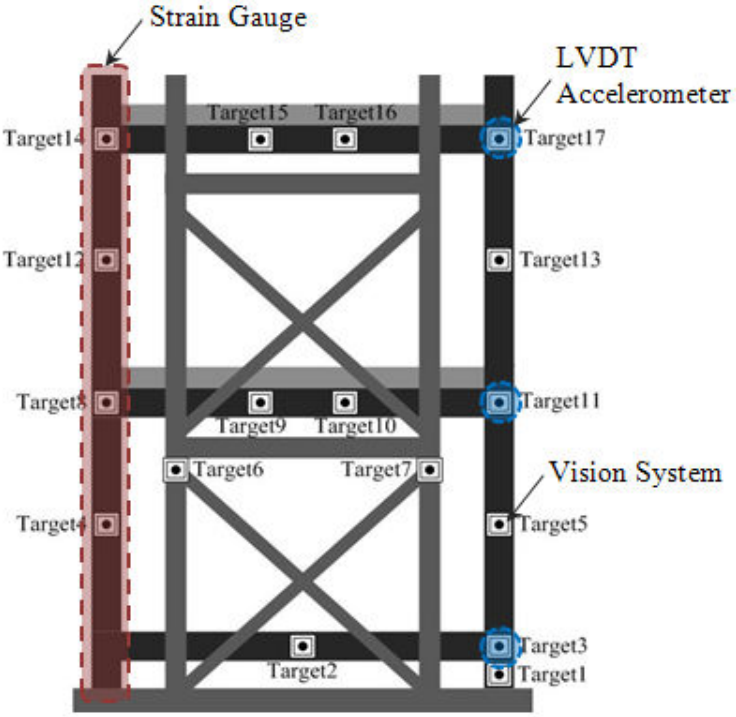
본 실험에서는 그림 3.2.6.21에 나타낸 것과 같이, 면진장치를 사용하지 않은 골조 실험체(이하: 비면진실험체), 적층고무받침만 사용한 골조실험체(이하:면진실험체(적층고무)), 복합면진장치(적층고무+SS400댐퍼 또는 적층고무+HTS댐퍼)를 사용한 골조 실험체(이하: 복합면진실험체(SS400 또는 HTS))와 안전철물을 진동대 테이블 위에 설치하고 진동대 실험을 수행하여 구조물의 동적특성을 비교·분석함으로써 면진구조의 에너지법에 의한 성능설계 프로세스에 따라 설계한 면진장치의 성능을 실험적으로 검증한다.



그림 3.2.6.21 진동대 실험의 세팅 상황

(가) 측정 계획 및 실험 방법

본 실험에서는 각 층의 절대가속도, 상대변위, 부재의 변형 등을 계측하기 위하여 그림 3.2.6.22에 나타낸 것과 같이 센서를 부착하였으며, 센서 종류 및 수량 등을 표 3.2.6.17에 나타내었다.



(a) 센서 부착 위치도



(b) 실험체 정면사진



(c) 실험체 측면사진

그림 3.2.6.22 센서 부착 위치도 및 실험체 세팅 상황

표 3.2.6.17 센서 종류 및 주요제원

센 서 종 류		수 량	주 요 제 원
Displacement	Dynamic LVDT	6EA (층별 2EA)	±20cm
	Vision System	17EA	프레임수 : 60Hz
Accelerometer		6EA (층별 2EA)	±10g
Strain Gauge		1축 : 118EA, 3축 : 7EA	Plastic Type

진동대 실험방법은 구조물의 내진설계 및 연구에 주로 사용되어지는 El_Centro NS파(PGA 350cm/s^2, 1940년)에 대하여 지진응답해석결과를 참고하여 최대 지반가속도를 기준으로 Scale 조정하여 총 7단계(30/40/70/100/130/160/200%)로 나누어 실시한다. 실험 단계별 지잔파의 크기 및 규모를 표 3.2.6.18에 나타내었다.

표 3.2.6.18 실험 단계별 지진파의 크기 및 규모

Scale(%)		PGA (cm/s^2)	지진의 규모	비면진 실험체	면진 실험체	복합면진 실험체	
						SS400	HTS
30	Elastic	107	5.1~5.5	○	○	○	○
40		143	5.3~5.8	○	○	○	○
70		250	5.7~6.3	○	×	○	○
100		357	6.0~6.6	○	×	○	○
130		464	6.2~6.9	○	×	○	○
160		571	6.3~7.1	○	×	○	○
200	Plastic	714	6.5~7.3	○	×	○	○

참고로, 진동대 실험을 위한 진동대 테이블의 성능은 그림 3.2.6.23과 표 3.2.6.19에 나타내었다.

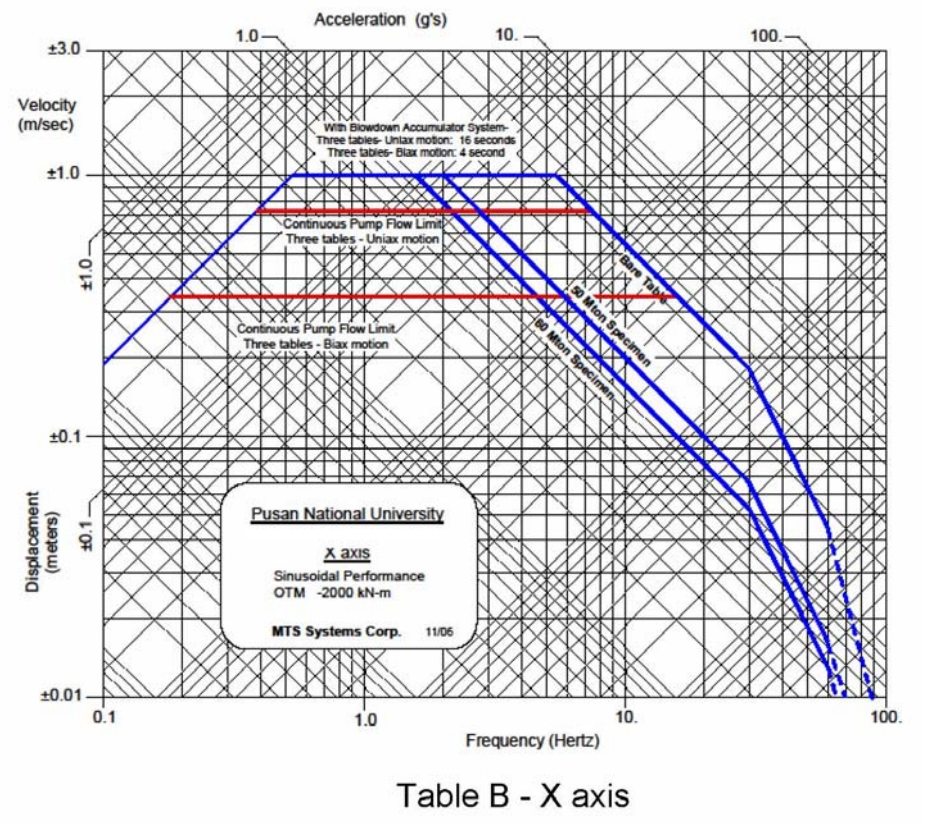


그림 3.2.6.23 진동대의 성능곡선

표 3.2.6.19 진동대의 성능

ITEMS	X-Axis	Y-Axis
- Table Size(m)	5×5	
- Degrees of Freedom	3	
- Full Payload(tons)	60	
- Nominal Payload(tons)	50	
- Desired Overturning Moment(kN-m)	2,000	
- Operating Frequency Range(Hz)	0.1 ~ 60	
- Acceleration at Full Payload(g)	1.0	1.0
- Acceleration at Nominal Payload(g)	1.25	1.25
- Maximum Velocity(cm)	100	100
- Maximum Stroke(cm)	±30	±20

(나) 실험 결과 및 분석

본 절에서는 진동대 실험을 수행한 결과를 바탕으로 구조물의 고유주기 및 감쇠, 가속도응답, 층간변위, 하중-변형 관계, 주파수 성분, 부재의 응력분포 및 파괴상태에 대한 구조물의 동적응답을 비교·분석한다. 또한, 지진 입력에너지의 분포, 에너지에 근거한 댐퍼의 변형능력을 평가하여 면진장치의 성능을 평가하고 포락설계값과 지진응답결과의 비교를 통하여 포락설계법의 타당성을 검증한다.

① 골조실험체의 고유주기 및 감쇠

고유주기 및 감쇠비를 파악하기 위한 실험적 방법으로 널리 사용되어지는 자유진동 실험과 강제진동 실험을 실시하고, 그 결과를 분석하였다. 자유진동시 최상층부의 변위시간이력을 그림 3.2.6.24에 나타내고, 식 (3.2.6.15)로 표현되는 로그감소(Logarithmic Decrement)에 의한 감쇠비와 그림 3.2.6.25에 나타낸 것과 같이 강제진동시 공진상태 부근에서의 1진동주기 동안의 소산되는 에너지를 이용하여 식 (3.2.6.16)에 의해 표현되는 등가점성감쇠비를 표 3.2.6.25에 나타내었다.

$$\zeta = \frac{1}{2\pi j} \cdot \ln \frac{u_i}{u_{i+j}} \tag{3.2.6.15}$$

여기서, $\delta = \ln \frac{u_i}{u_{i+j}}$: 로그감소

j : 사이클 수 또는 진동수

u_i : 극대진폭(Peak Amplitude)

$$\zeta_{eq} = \frac{E^*}{2\pi r k Y^2} \quad \text{or} \quad \zeta_{eq} = \frac{1}{4\pi r}\frac{E^*}{E_s} \tag{3.2.6.16}$$

여기서, $E^* = 2\pi\zeta_{eq} r k Y^2$: 1진동주기 동안 소산되는 에너지

$E_s = \frac{1}{2} k Y^2$: 최대변위시 저장된 변형에너지

ζ_{eq} : 등가점성감쇠비,

r : 진동수비, k : 구조물의 강성

Y : 최대변위의 진폭

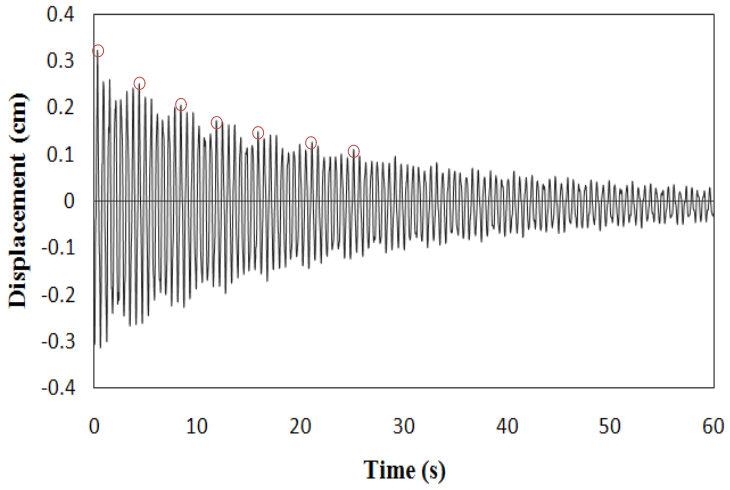


그림 3.2.6.24 자유진동시 최상층부의 변위시간이력

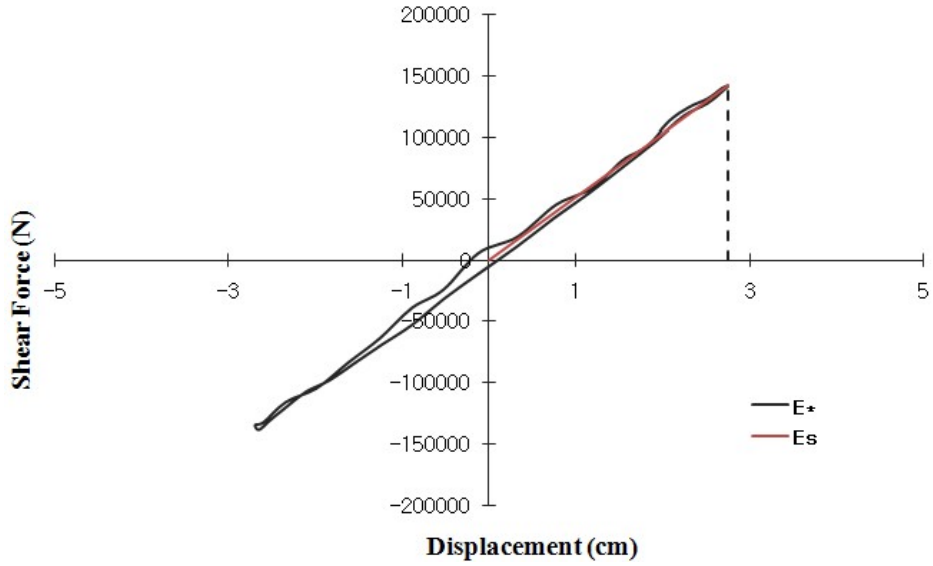


그림 3.2.6.25 1진동 주기 동안의 이력곡선

표 3.2.6.20 진동실험에 의한 감쇠비

Time	Cycle j	Natural Period T (sec)	Displacement u_i (cm)	δ $\ln(y_1/y_2)$	Damping Ratio (%)	
					ζ	ζ_{eq}
0.344	-	-	0.3231	-	-	
4.375	7	0.576	0.2518	0.2493	0.57	
8.406	7	0.576	0.2059	0.2012	0.46	
11.844	6	0.573	0.1728	0.1753	0.46	1.39
15.891	7	0.578	0.1490	0.1482	0.34	
21.109	9	0.580	0.1265	0.1637	0.29	
25.141	7	0.576	0.1108	0.1325	0.30	
Average		0.577	-	-	0.37	1.39

② 가속도 응답

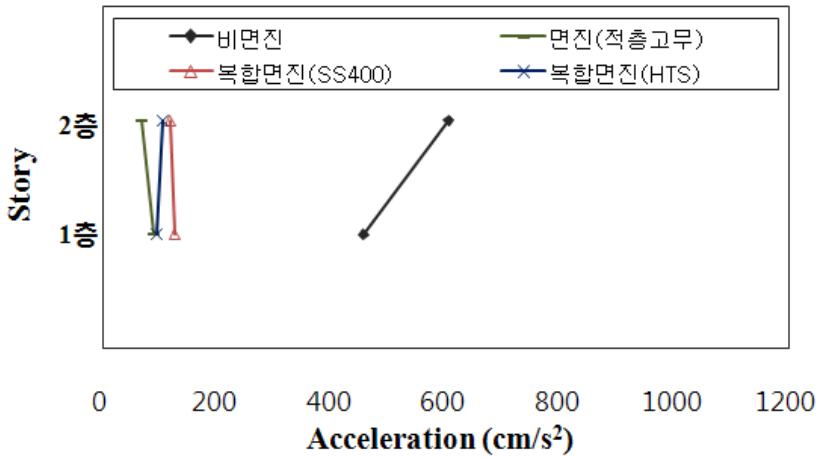
가속도의 크기를 나타내는 진폭의 최대값(Peak Acceleration Value, 이하: PA)과 RMS값(Root Mean Square Value, 이하:RMS)을 정리하여 표 3.2.6.21 및 그림 3.2.6.26~그림 3.2.6.29에 나타내었다. PA값은 가속도의 순간 최대값으로 짧은시간의 충격 등의 크기를 나타낼 때는 유용하나, 전체 지동시간동안의 지진의 크기와 입력된 총 에너지 정보 및 응답의 시간에 대한 변화량을 나타내지는 않는다. 그러나 RMS값은 관심있는 시간동안의 응답의 제곱평균에 제곱근을 씌운 값으로 진동을 측정할 때 많이 사용한다. RMS값은 응답의 시간에 대한 변화량을 고려하고 진동의 파괴적 능력을 나타내는 에너지량과 직접 관련된 진폭을 표시하므로, 진동크기의 표현에 가장 널리 사용되는 방법이다.

PA값에 의한 가속도응답에서 가진가속도의 레벨이 커질수록 PA값은 순간의 떨림이나 노이즈에 대한 부정확하고 불필요한 정보를 포함하고 있어 측정이 불가능한 응답이 나타나 정확한 가속도응답을 측정하기 곤란하여 몇몇 데이는 본 논문에서 제외한다.

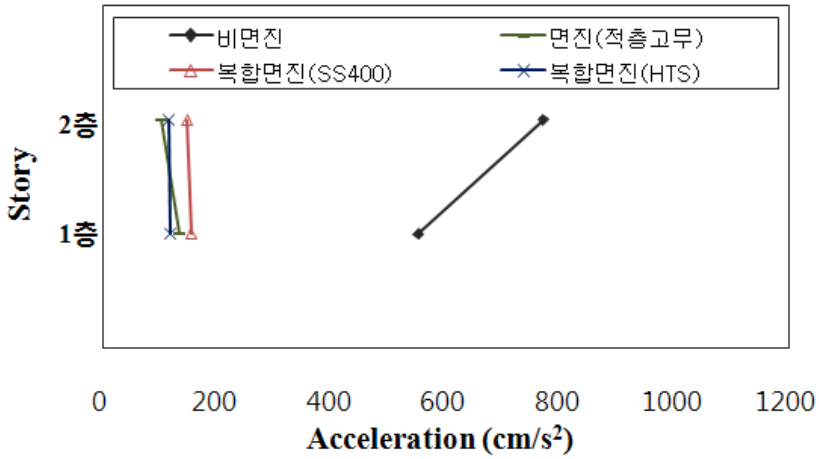
표 3.2.6.21과 그림 3.2.6.26 및 그림 3.2.6.27에 나타낸 것과 같이 층별 절대가속도를 비교한 결과, 지진응답해석에서와 같이 비면진실험체는 지진 입력에너지를 각 층 구조부재에 의해 흡수하기 때문에 2층의 변형이 1층의 변형에 비해 증대되어 상부층일수록 응답가속도가 증폭되나, 1층과 2층의 응답가속도차는 1층 기둥부재의 소성화 정도에 따라 약간씩 줄어든다. 면진실험체에서는 면진층이 상대적으로 긴 주기와 진폭으로 흔들리고, 상부구조물은 전체가 평행이동 하듯 강체로 진동을 하기 때문에 1층과 2층의 응답가속도가 거의 같다. 이것은 면진구조에서는 상부구조물의 진동특성영향이 크게 줄어들기 때문에 면진구조설계시 상부구조물을 1질점으로 하는 1질점 진동계로 가정하여 설계할 수 있음을 설명하는 것이다. 그림 3.2.6.28과 그림 3.2.6.29의 가속도응답비 비교결과, HTS댐퍼를 이용한 복합면진실험체(HTS)의 응답저감효과가 SS400댐퍼를 이용한 복합면진실험체(SS400)보다 약간 더 크게 나온다. 이것은 일반강재보다 감쇠성능이 뛰어난 고인성강재의 감쇠의 영향으로 판단된다.

표 3.2.6.21 절대가속도 응답결과

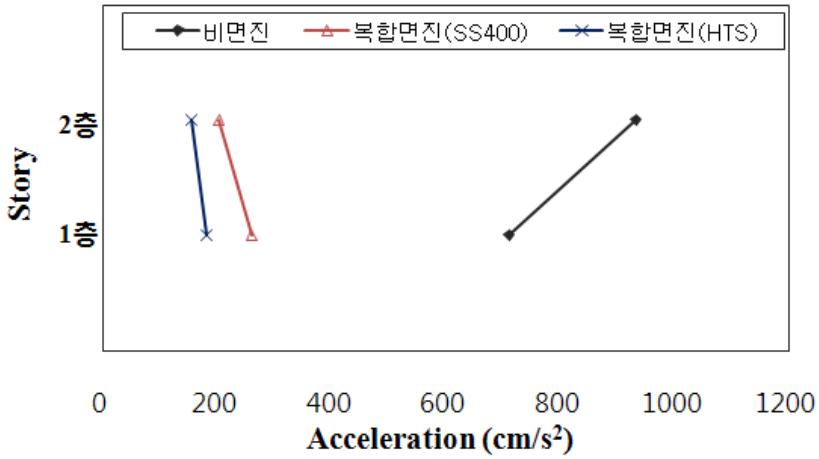
Scale (%)	면진 유무	가진가속도		절대가속도			
				1층		2층	
		PGA (cm/s^2)	RMS (cm/s^2)	PA (cm/s^2)	RMS (cm/s^2)	PA (cm/s^2)	RMS (cm/s^2)
30	비면진	132 (1.0)	34 (1.0)	456 (1.0)	194 (1.0)	604 (1.0)	307 (1.0)
	면진(적층고무)	162 (1.227)	37 (1.088)	90 (0.197)	22 (0.113)	67 (0.111)	20 (0.065)
	복합면진(SS400)	128 (0.970)	34 (1.0)	127 (0.279)	41 (0.211)	118 (0.195)	41 (0.134)
	복합면진(HTS)	167 (1.265)	36 (1.059)	95 (0.208)	33 (0.170)	105 (0.174)	35 (0.114)
40	비면진	166 (1.0)	45 (1.0)	551 (1.0)	235 (1.0)	771 (1.0)	365 (1.0)
	면진(적층고무)	209 (1.259)	49 (1.089)	134 (0.243)	31 (0.132)	102 (0.132)	31 (0.085)
	복합면진(SS400)	172 (1.036)	44 (0.978)	155 (0.281)	49 (0.209)	147 (0.191)	49 (0.134)
	복합면진(HTS)	201 (1.211)	45 (1.0)	119 (0.216)	41 (0.174)	116 (0.150)	41 (0.112)
70	비면진	318 (1.0)	74 (1.0)	710 (1.0)	291 (1.0)	932 (1.0)	427 (1.0)
	복합면진(SS400)	395 (1.242)	79 (1.068)	261 (0.368)	63 (0.216)	204 (0.219)	64 (0.150)
	복합면진(HTS)	396 (1.245)	81 (1.095)	183 (0.258)	56 (0.192)	156 (0.167)	56 (0.131)
100	비면진	497 (1.0)	97 (1.0)	822 (1.0)	311 (1.0)	1102 (1.0)	444 (1.0)
	복합면진(SS400)	676 (1.360)	114 (1.175)	287 (0.349)	68 (0.219)	215 (0.195)	68 (0.153)
	복합면진(HTS)	665 (1.338)	117 (1.206)	229 (0.279)	69 (0.222)	195 (0.177)	69 (0.155)
130	비면진	555 (1.0)	101 (1.0)	854 (1.0)	319 (1.0)	1111 (1.0)	448 (1.0)
	복합면진(SS400)	909 (1.638)	151 (1.50)	332 (0.389)	80 (0.251)	-	81 (0.181)
	복합면진(HTS)	879 (1.584)	152 (1.50)	322 (0.377)	83 (0.260)	-	81 (0.181)
160	비면진	889 (1.0)	179 (1.0)	1171 (1.0)	383 (1.0)	1341 (1.0)	512 (1.0)
	복합면진(SS400)	1135 (1.277)	184 (1.028)	316 (0.270)	86 (0.225)	-	100 (0.195)
	복합면진(HTS)	1123 (1.263)	188 (1.050)	362 (0.309)	86 (0.225)	-	89 (0.174)
200	비면진	1561 (1.0)	255 (1.0)	1298 (1.0)	423 (1.0)	-	-
	복합면진(SS400)	1422 (0.911)	231 (0.906)	-	115 (0.272)	-	114
	복합면진(HTS)	1367 (0.876)	233 (0.914)	-	134 (0.317)	-	109



(a) Scale 30%

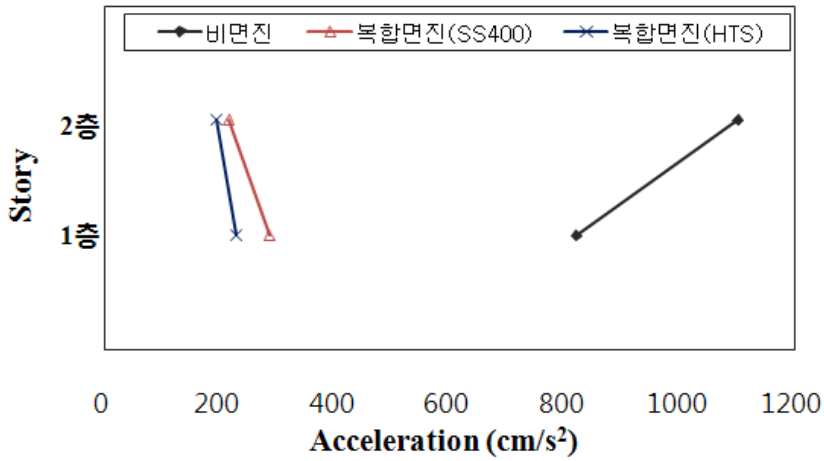


(b) Scale 40%



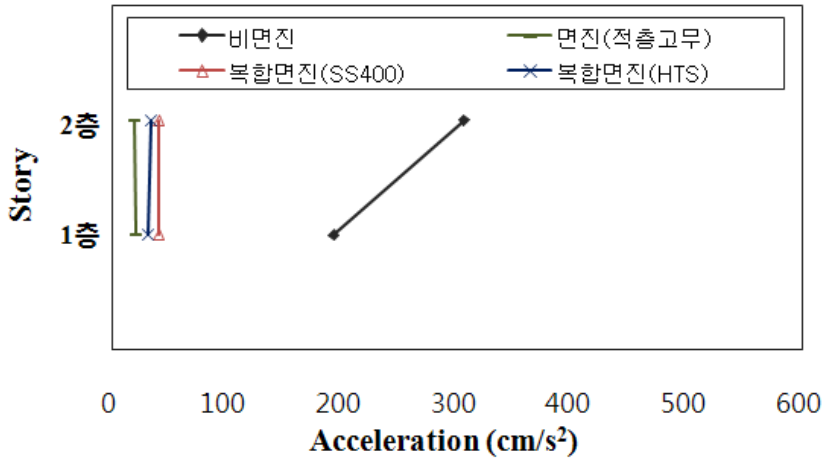
(c) Scale 70%

그림 3.2.6.26 층별 절대가속도(PA값, 계속)

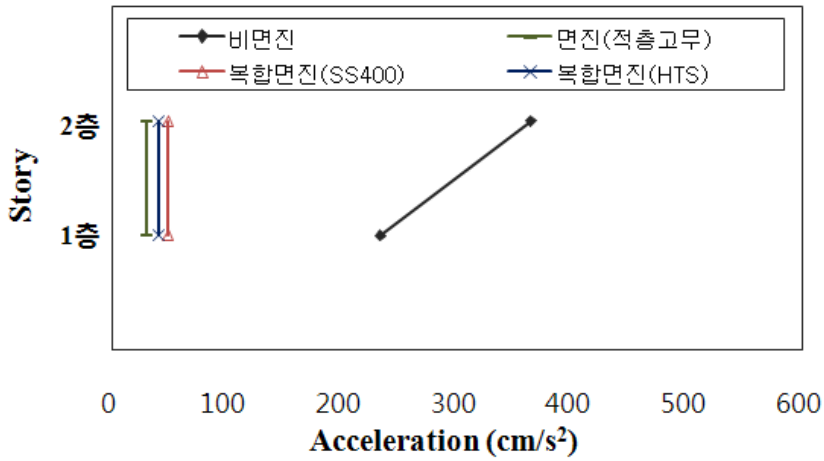


(d) Scale 100%

그림 3.2.6.26 층별 절대가속도(PA값)

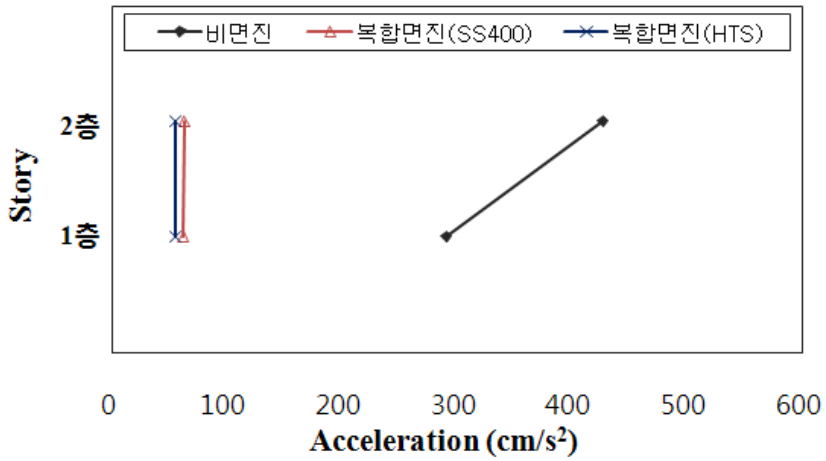


(a) Scale 30%

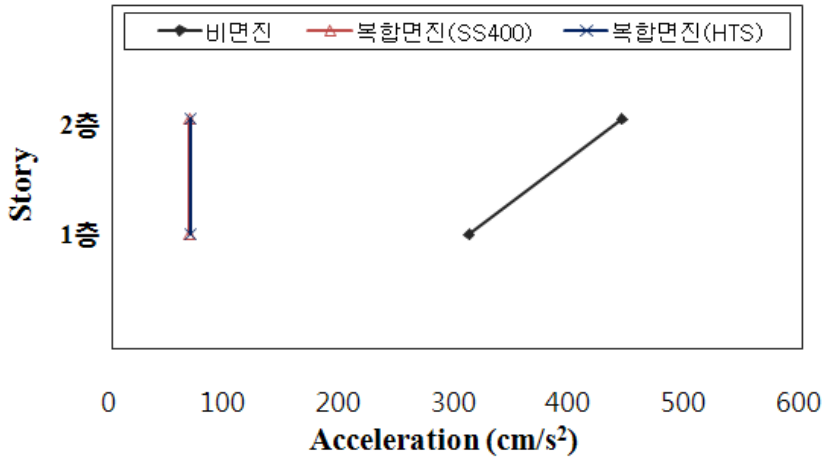


(b) Scale 40%

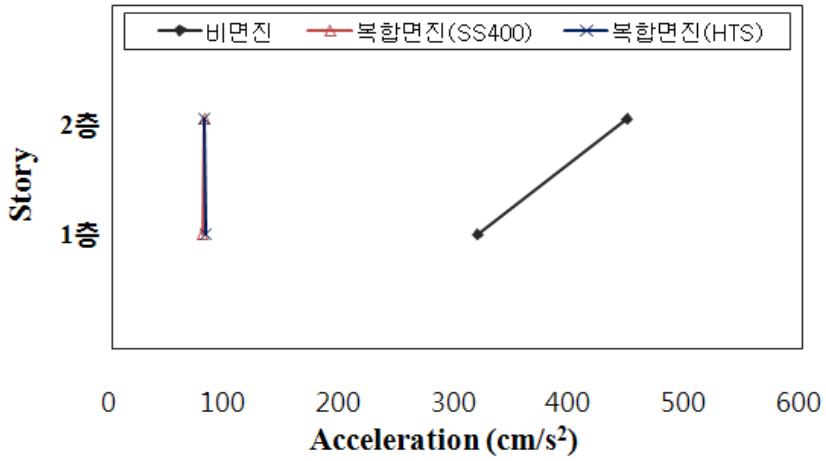
그림 3.2.6.27 층별 절대가속도(RMS값, 계속)



(c) Scale 70%

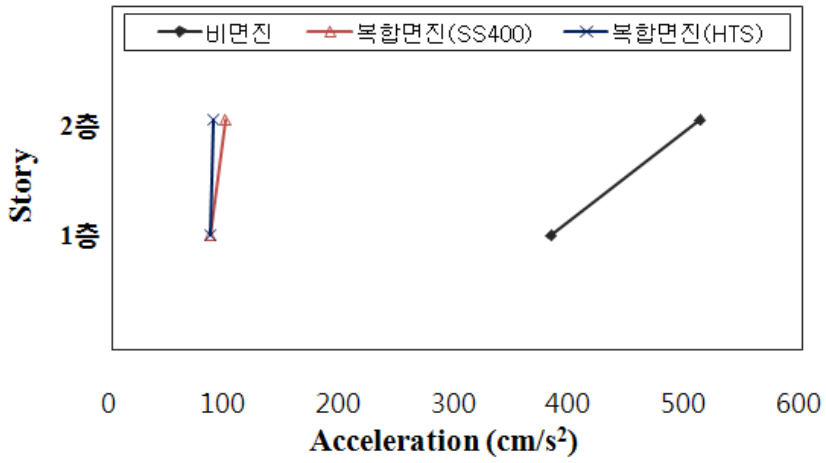


(d) Scale 100%



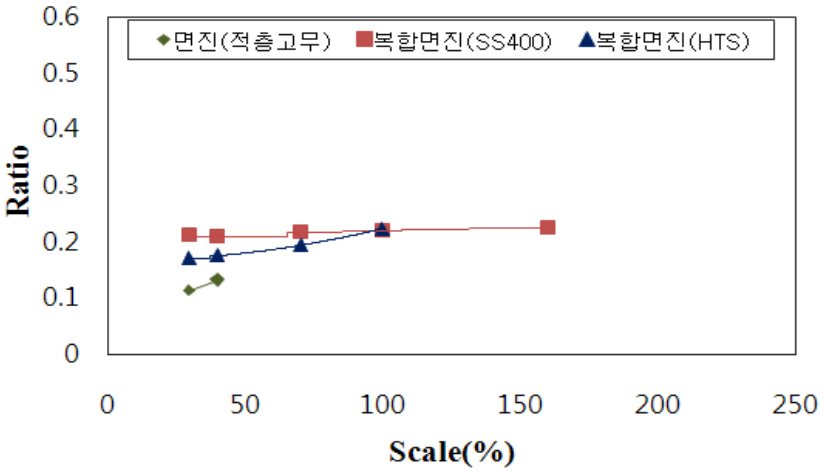
(e) Scale 130%

그림 3.2.6.27 층별 절대가속도(RMS값, 계속)

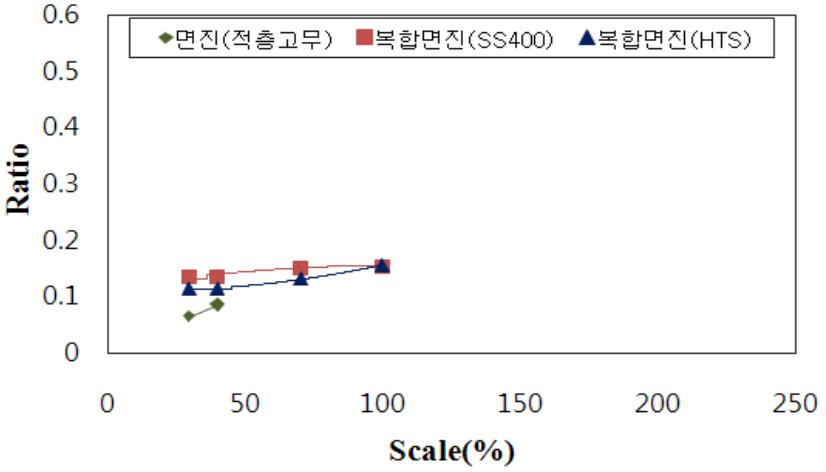


(f) Scale 160%

그림 3.2.6.28 층별 절대가속도(RMS값)

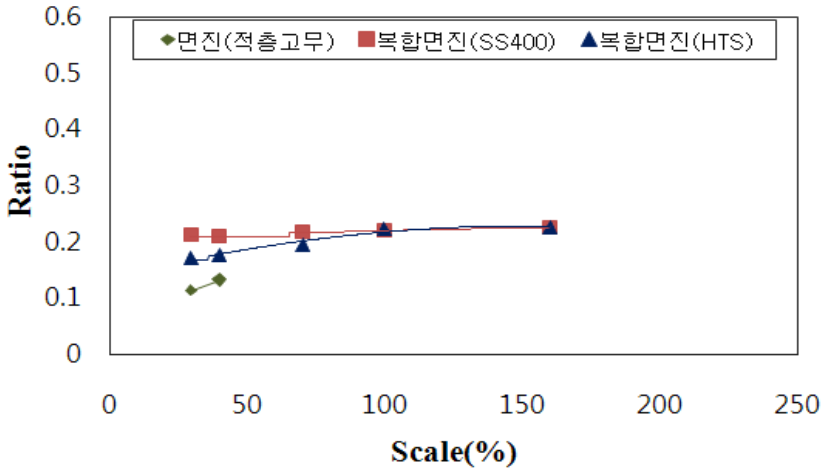


(a) 1층

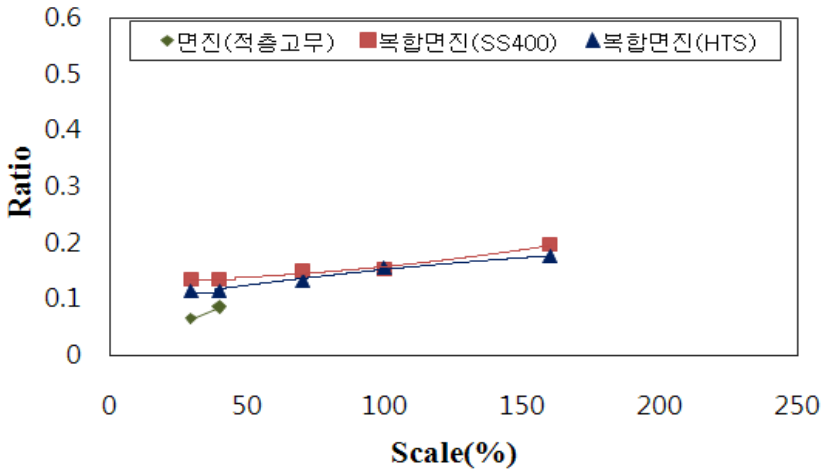


(b) 2층

그림 3.2.6.29 면진 유무에 따른 절대가속도비(면진/비면진, PA값)



(a) 1층



(b) 2층

그림 3.2.6.29 면진 유무에 따른 절대가속도비(면진/비면진, RMS값)

③ 변위 응답

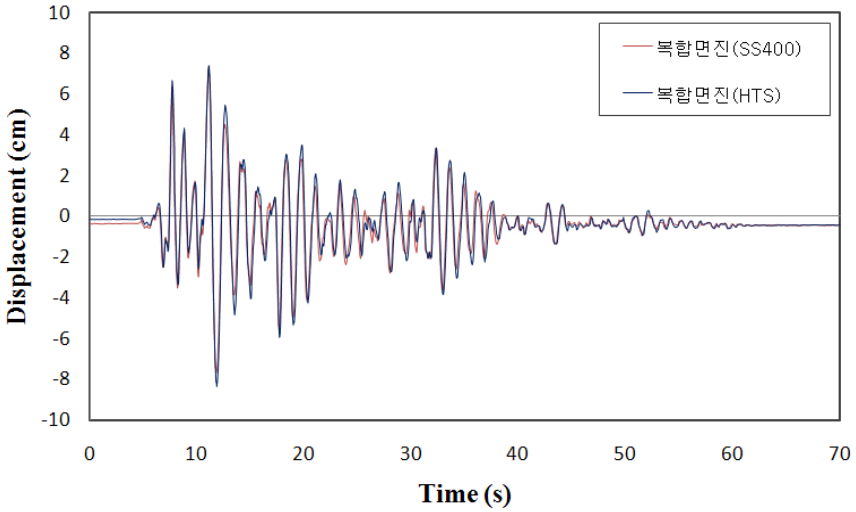
상부구조물의 층간변위와 면진층의 전단변형의 실험결과를 표 3.2.6.27과 그림 3.2.6.30~그림 3.2.6.32에 나타내었다. 그림 3.2.6.30의 Scale 100%일 때의 층간변위 시간이력과 그림 3.2.6.31의 층별 최대 층간변위를 분석한 결과, 비면진실험체에서는 지진 입력에너지가 구조물의 소성변형과 영구적인 잔류변형을 유발시키나 면진실험체에서는 대부분의 지진 입력에너지가 면진층의 면진장치에 의해 집중적으로 흡수되어 강재댐퍼의 변형만을 유발하고 상부구조물은 탄성영역에서 거동을 한다. 이는, 면진구조는 에너지 집중형 또는 손상 집중형 유강혼합구조로 내진설계시 지진 에너지가 면진층에 집중되도록 설계하고 상부구조물은

자중이나 약한 지진에만 견딜 수 있도록 설계할 수 있음을 보여주는 것이다.

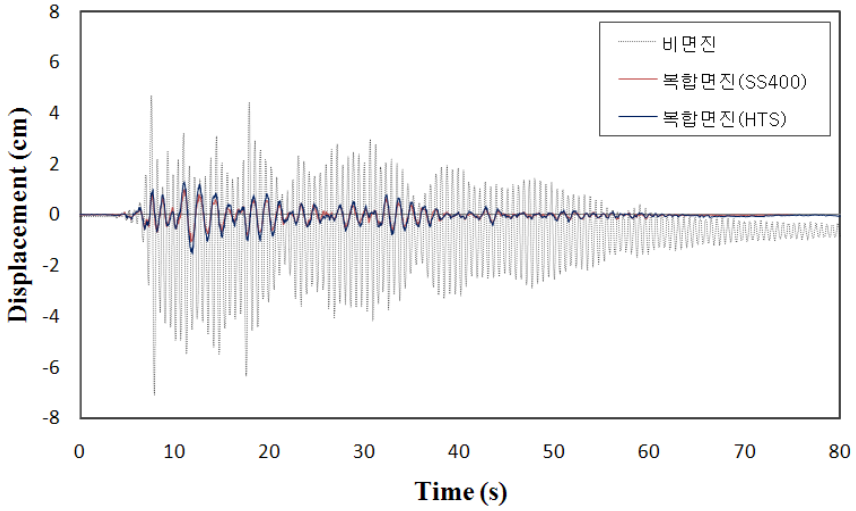
그림 3.2.6.32의 나타낸 것과 같이, 면진 유무에 따른 최대 층간변위비 결과는 응답해석과 비슷하게 가진크기가 클수록 1층에서의 층간변위 저감효과가 크게 나타난다. 이는 댐퍼를 사용한 면진구조에서는 가진시 댐퍼의 감쇠이력거동에 의해 지진에너지가 집중적으로 흡수된 결과로 상부구조물은 강진시에도 적은 에너지만을 받는다는 것을 확인할 수 있다.

표 3.2.6.27 층간변위 응답결과

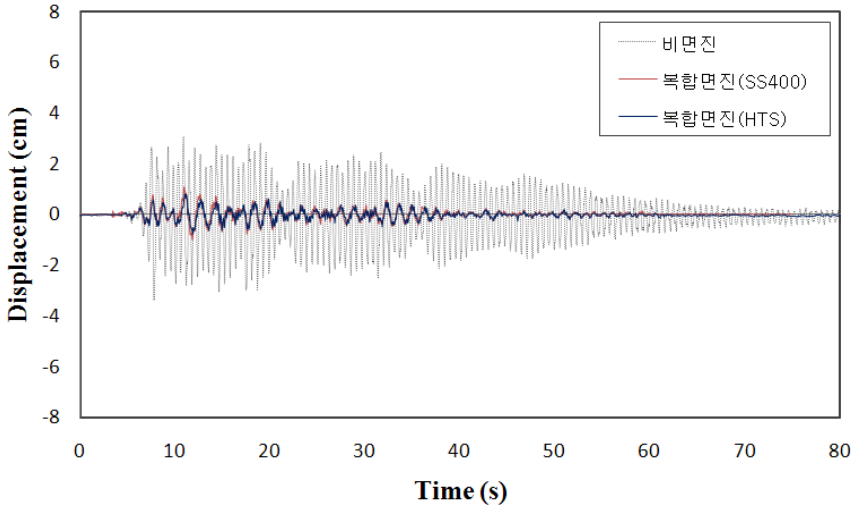
Scale (%)	면진 유무	탁월 주기 (sec)	층간변위 (cm)					
			면진층		1F		2F	
			최대변형	잔류변형	최대변형	잔류변형	최대변형	잔류변형
30	비면진	0.579	-		2.747 (1.0)	-	1.940 (1.0)	-
	면진(적층고무)	1.757	2.333	-	0.450 (0.164)	-	0.482 (0.248)	-
	복합면진(SS400)	1.231	2.619	-	0.696 (0.253)	-	0.408 (0.210)	-
	복합면진(HTS)	1.735	2.176	0.071	0.690 (0.251)	-	0.338 (0.174)	-
40	비면진	0.579	-		3.316 (1.0)	-	2.412 (1.0)	-
	면진(적층고무)	1.773	3.381	-	0.587 (0.177)	-	0.651 (0.270)	-
	복합면진(SS400)	1.238	3.369	-0.017	0.590 (0.178)	-	0.522 (0.216)	-
	복합면진(HTS)	1.735	3.079	0.067	0.890 (0.268)	-	0.418 (0.173)	-
70	비면진	0.579	-		6.352 (1.0)	-0.058	3.168 (1.0)	-0.041
	복합면진(SS400)	1.250	6.094	-0.342	0.796 (0.125)	-	0.762 (0.241)	-
	복합면진(HTS)	1.750	6.134	-0.120	1.346 (0.212)	-	0.629 (0.199)	-
100	비면진	0.579	-		7.091 (1.0)	-0.698	3.394 (1.0)	-0.054
	복합면진(SS400)	1.312	7.674	-0.437	1.040 (0.147)	-	1.074 (0.316)	-
	복합면진(HTS)	1.782	8.342	-0.410	1.526 (0.215)	-	0.801 (0.236)	-
130	비면진	0.579	-		7.758 (1.0)	-1.085	3.558 (1.0)	-0.130
	복합면진(SS400)	1.778	10.244	-0.112	0.964 (0.124)	-	0.944 (0.265)	-
	복합면진(HTS)	1.823	10.654	-0.392	1.864 (0.240)	-	0.897 (0.252)	-
160	비면진	0.579	-		9.965 (1.0)	-1.249	4.360 (1.0)	-0.264
	복합면진(SS400)	1.778	13.316	0.167	0.980 (0.098)	-	1.144 (0.262)	-
	복합면진(HTS)	1.823	14.345	0.114	1.520 (0.153)	-	1.642 (0.377)	-
200	비면진	0.579	-		12.179 (1.0)	-1.390	5.380 (1.0)	-0.613
	복합면진(SS400)	1.778	17.055	0.687	1.341 (0.110)	-	1.589 (0.295)	-
	복합면진(HTS)	1.823	18.363	0.507	1.762 (0.145)	-	1.876 (0.349)	-



(a) 면진층 상대변위

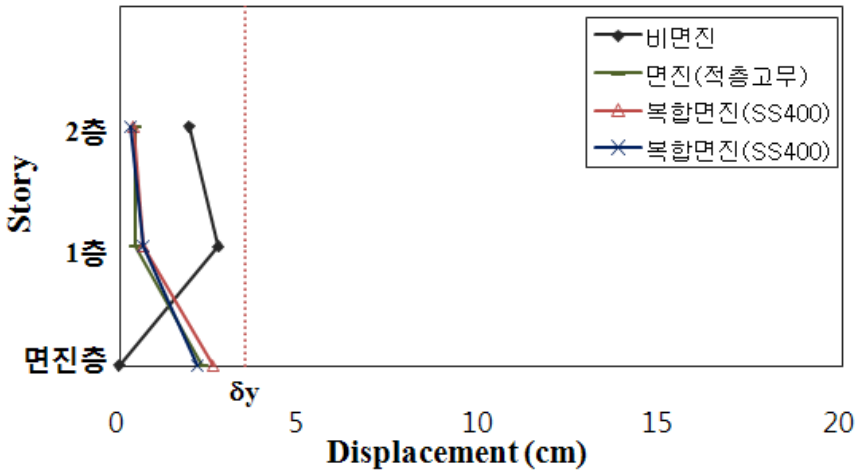


(b) 1층 층간변위

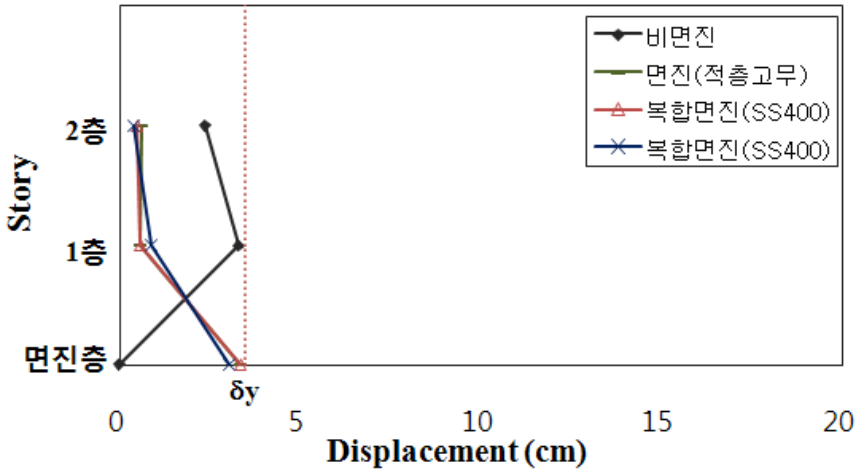


(c) 2층 층간변위

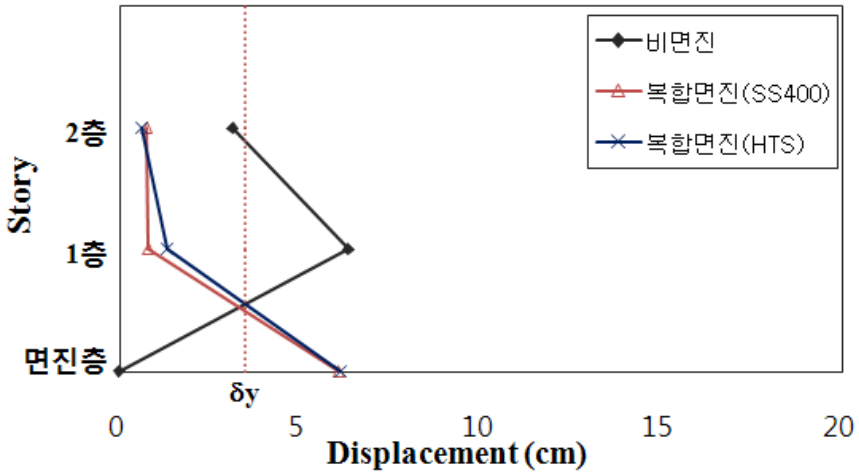
그림 3.2.6.30 층간변위 시간이력(Scale 100%)



(a) Scale 30%

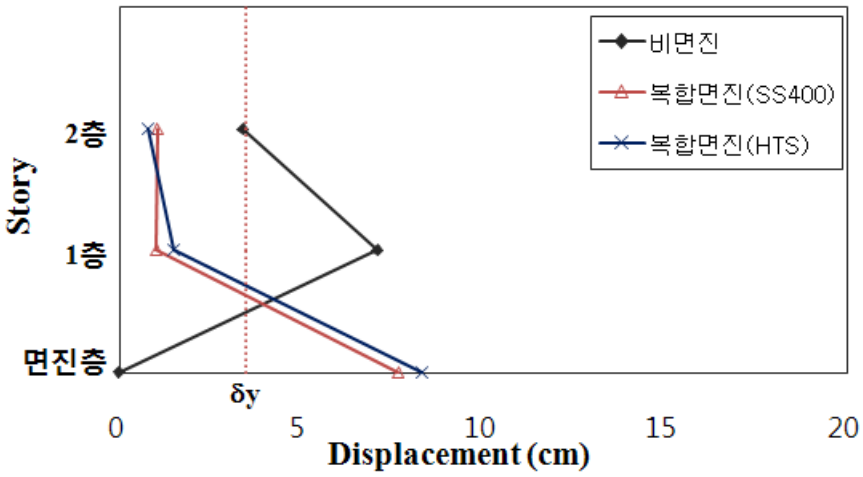


(b) Scale 40%

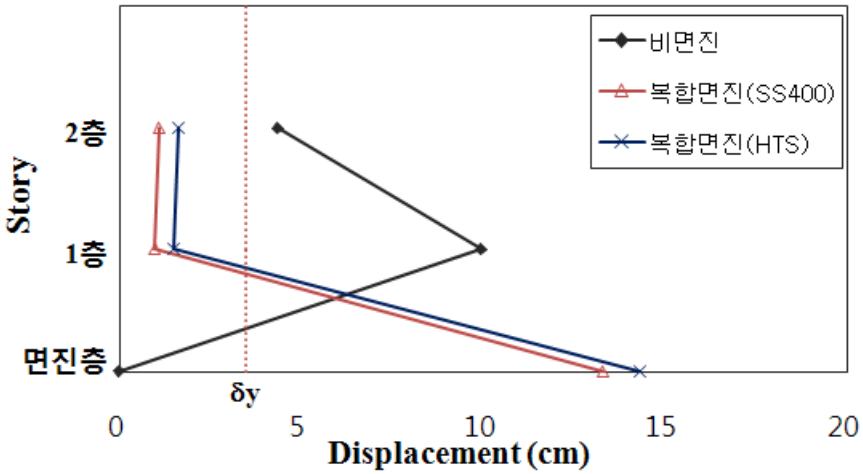


(c) Scale 70%

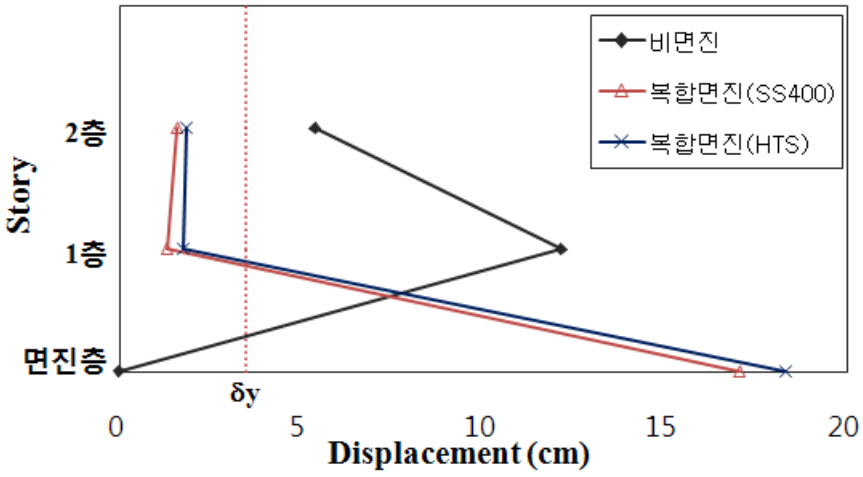
그림 3.2.6.31 층별 최대 층간변위(계속)



(d) Scale 100%

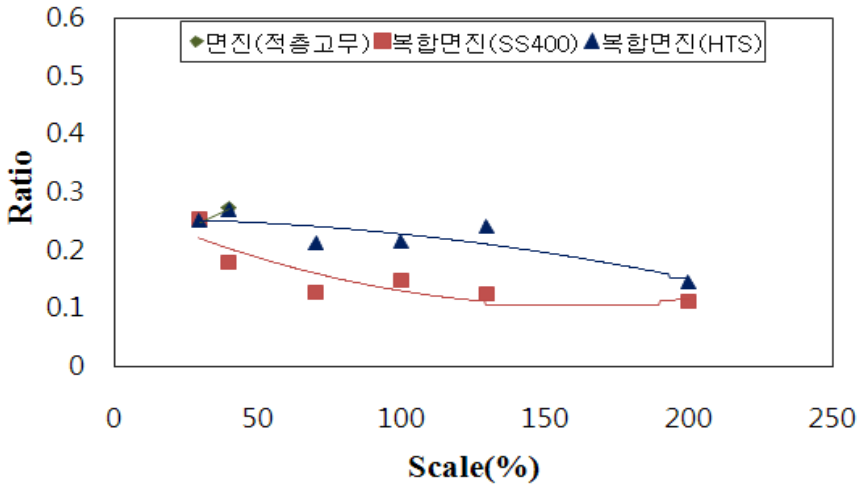


(e) Scale 160%

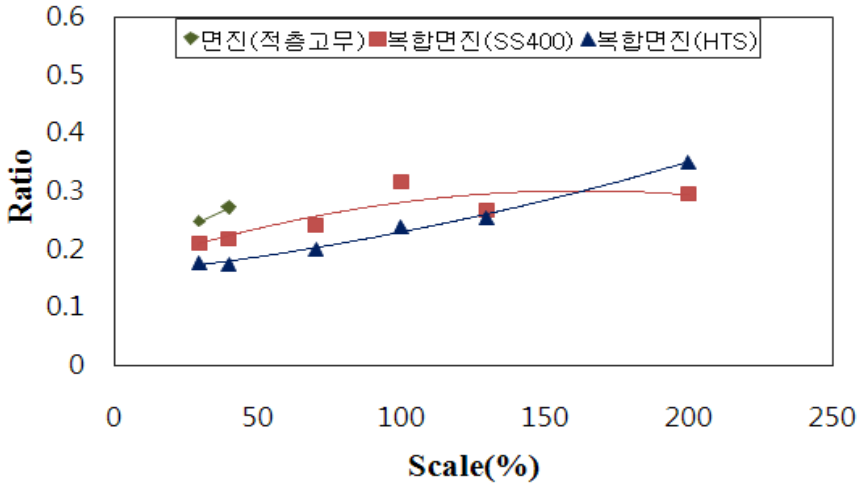


(f) Scale 200%

그림 3.2.6.31 층별 최대 층간변위



(a) 1층



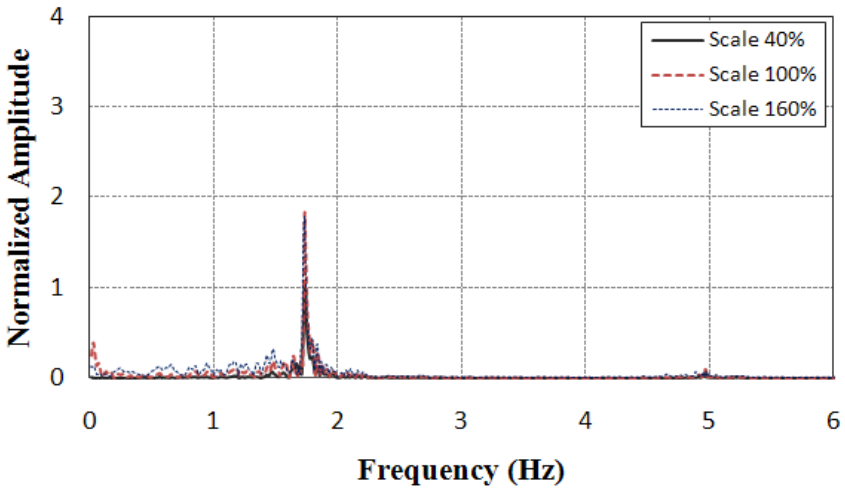
(b) 2층

그림 3.2.6.32 면진 유무에 따른 최대 층간변위비(면진/비면진)

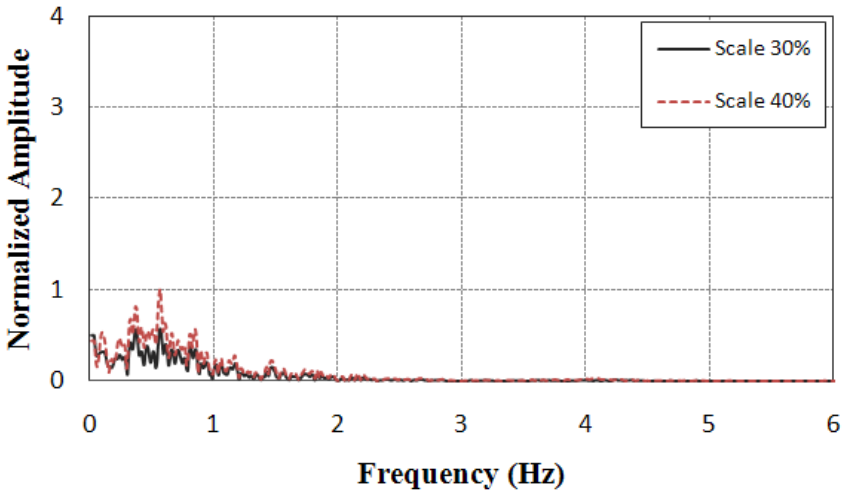
④ 주파수 성분

1층 층간변위(비면진구조)와 면진층의 상대변위(면진구조)의 시간이력을 FFT(Fast Fourier Transform) 알고리즘을 사용하여 주파수 성분으로 변환하고, 실험시 실제로 가진된 지진파의 Scale 40%(PGA $166cm/\sec^2$)일 때의 주파수 성분 중 최대 진폭에 대하여 일반화시킨 주파수 스펙트럼을 그림 3.2.6.33에 나타내었다. 주파수 성분의 분석결과, 가진 크기가 커지면서 비면진구조의 기둥부재와 면진구조의 댐퍼가 항복하여 구조물의 비탄성거동이 강해지고, 탁월진동수 범위의 주파수 성분의 진폭의 크기와 비중은 상대적으로 줄어들고 장주기, 즉 저주파수 성분의 진폭의 크기와 비중이 상대적으로 커진다. 특히, 댐퍼가 있는

복합면진구조에서 이러한 성향이 더 뚜렷이 나타난다. 적층고무만 있는 면진구조는 면진주기 3.0초에 해당하는 0.3~0.35Hz의 탁월진동수 성분 외에 기둥 밑면에 설치된 슬라이딩 베어링(Sliding Bearing)의 마찰력 등에 의한 영향으로 노이즈(Noise) 성분이 상대적으로 크게 나타나나, 전체적으로 주파수 성분의 크기가 가진 크기에 비례하여 선형적으로 증가한다. 모드의 영향은 골조실험체가 2층의 저층 구조물이므로 면진유무에 관계없이 1차 모드의 거동이 지배적이며, 비면진구조가 면진구조에 비하여 4.8~4.9Hz대의 2차 모드의 영향이 약간 크게 나타난다. 이상의 결과는 약한 지진에서는 선형적으로 거동하다가 강한 지진에서는 강재댐퍼의 항복에 의해 구조물이 장주기화되는 면진구조의 거동원리를 적절하게 설명하는 것이다.

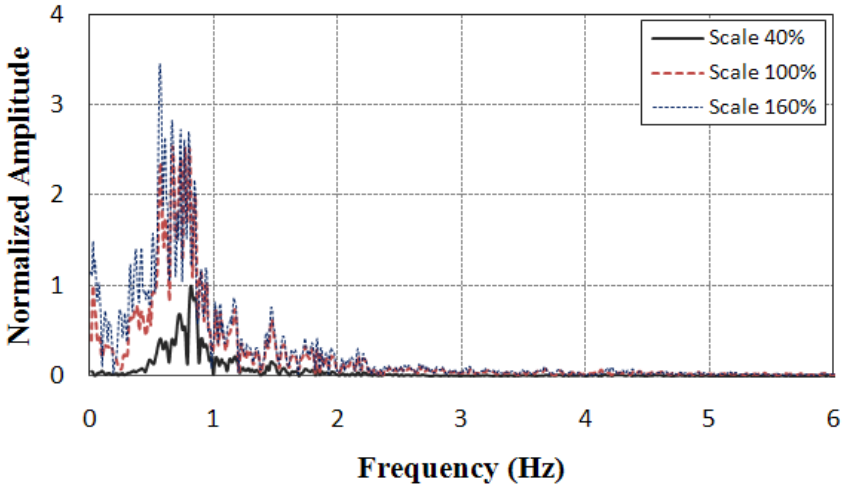


(a) 비면진 실험체

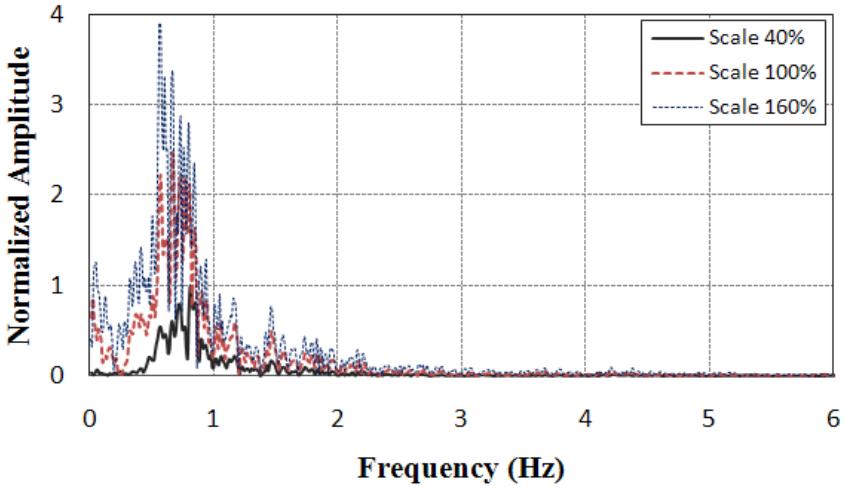


(b) 면진 실험체(적층고무)

그림 3.2.6.33 면진 유무에 따른 주파수 성분(계속)



(c) 복합면진 실험체(SS400)



(d) 복합면진 실험체(HTS)

그림 3.2.6.23 면진 유무에 따른 주파수 성분

⑤ 힘-변위 관계

밑면전단력을 측정하기 위하여 본 실험에서는 두 가지 방법을 사용한다. 첫 번째 방법은 측정된 층별 절대가속도를 이용하여 식 (3.2.6.17)의 동적 힘의평형 방정식을 이용하여 구하는 것이고, 두 번재 방법은 측정된 기둥의 변형률을 이용하여 식 (3.2.6.18)의 휨공식을 이용하여 구하는 것이다. 첫 번째 방법과 두 번째 방법에 의해 계산된 결과를 표 3.2.6.23에 나타내었다.

$$V = \sum v_i = c\dot{u}_i + F(u_i) = -M\ddot{y}_i \qquad (3.2.6.17)$$

여기서, V : 밑면전단력, v_i : 층별 전단력

u_i, $\dot{u}_i$: 층별 상대변위, 상대속도

y_i, $\ddot{y}_i$: 층별 절대변위, 절대가속도

$$V = \frac{8M}{l} \tag{3.2.6.18}$$

여기서, $M = \frac{\sigma_b I_c}{y_c}$: 휨응력에 의해 구하여지는 휨모멘트

σ_b : 휨응력, I_c : 기둥의 단면 2차모멘트

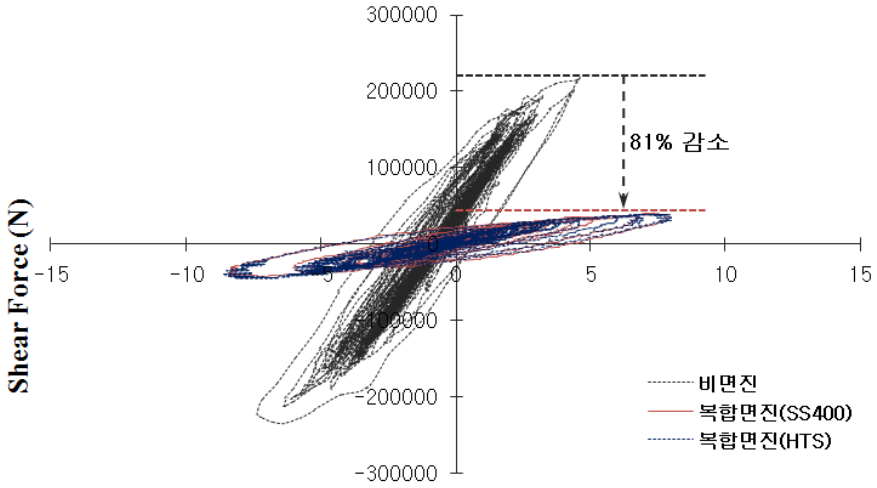
l : 측정한 위치의 기둥의 길이방향에서 떨어진 거리

y_c : 측정한 위치의 기둥의 단면방향의 중립축에서 떨어진 거리

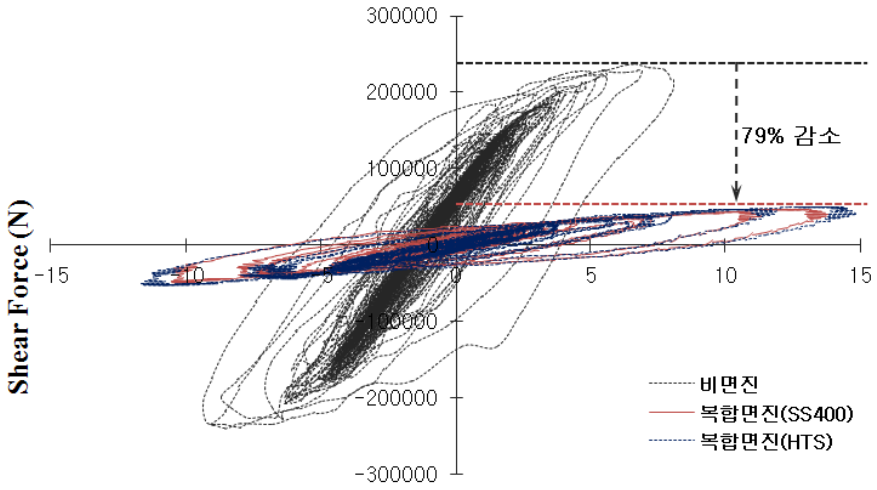
그림 3.2.6.34와 그림 3.2.6.35에 나타낸 것과 같이 복합면진실험체는 지진의 크기가 커지더라도 비면진실험체보다 밑면전단력을 80%정도 감소시킨다. SS400 댐퍼와 HTS댐퍼의 힘-변위 관계는 거의 유사한 성능을 나타내었다. 이는 SS400댐퍼와 HTS댐퍼의 강재의 재료적 특성에 의한 영향보다는 비슷한 복원력 특성을 가지고 지진 입력에너지에 대하여 비슷한 댐퍼의 이력거동을 통해 에너지를 집중적으로 흡수한 결과로 판단된다. 따라서, 면진구조설계시 면진장치의 복원력 특성을 정확하게 결정하는 것이 중요하다.

표 3.2.6.23 밑면전단력 결과

Scale (%)	면진 유무	가진가속도		밑면전단력	
		PGA (cm/s^2)	RMS (cm/s^2)	Method-1 (N)	Method-2 (N)
30	비면진	132 (1.0)	17 (1.0)	144,300 (1.0)	
	면진(적층고무)	162 (1.227)	28 (1.647)	5,900 (0.041)	
	복합면진(SS400)	128 (0.970)	26 (1.529)	23,800 (0.165)	24,400 (0.169)
	복합면진(HTS)	167 (1.265)	28 (1.647)	23,100 (0.160)	
40	비면진	166 (1.0)	24 (1.0)	172,600 (1.0)	
	면진(적층고무)	209 (1.259)	38 (1.583)	8,100 (0.047)	
	복합면진(SS400)	172 (1.036)	24 (1.0)	31,600 (0.183)	29,800 (0.173)
	복합면진(HTS)	201 (1.211)	35 (1.458)	29,000 (0.168)	
70	비면진	318 (1.0)	42 (1.0)	221,000 (1.0)	
	복합면진(SS400)	395 (1.242)	67 (1.595)	38,200 (0.173)	41,300 (0.187)
	복합면진(HTS)	396 (1.245)	67 (1.595)	39,900 (0.181)	
100	비면진	497 (1.0)	55 (1.0)	233,700 (1.0)	
	복합면진(SS400)	676 (1.360)	99 (1.800)	39,200 (0.168)	41,800 (0.179)
	복합면진(HTS)	665 (1.338)	101 (1.836)	44,300 (0.190)	
130	비면진	555 (1.0)	56 (1.0)	232,000 (1.0)	
	복합면진(SS400)	909 (1.638)	133 (2.375)	43,800 (0.189)	46,900 (0.202)
	복합면진(HTS)	879 (1.584)	137 (2.446)	48,400 (0.209)	
160	비면진	889 (1.0)	103 (1.0)	239,000 (1.0)	
	복합면진(SS400)	1135 (1.277)	168 (1.631)	69,500 (0.291)	48,300 (0.202)
	복합면진(HTS)	1123 (1.263)	173 (1.680)	52,100 (0.218)	
200	비면진	1561 (1.0)	157 (1.0)	251,700 (1.0)	
	복합면진(SS400)	1422 (0.911)	215 (1.369)	70,000 (0.278)	50,700 (0.201)
	복합면진(HTS)	1367 (0.876)	219 (1.395)	56,200 (0.223)	



(a) Scale 100%



(b) Scale 160%

그림 3.2.6.34 힘-변위 관계

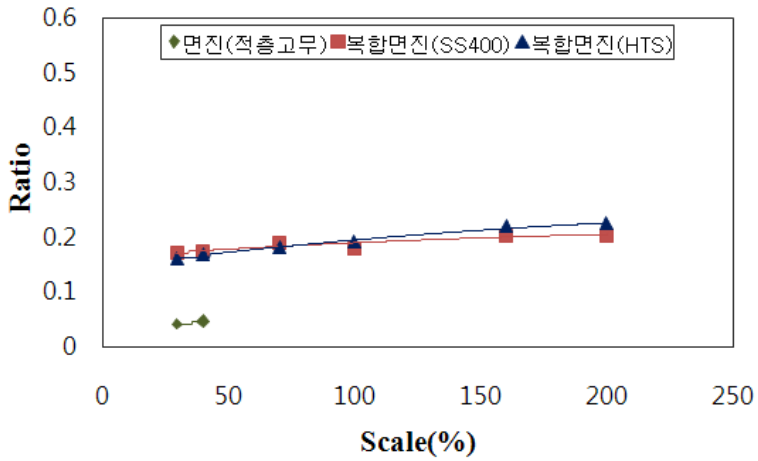
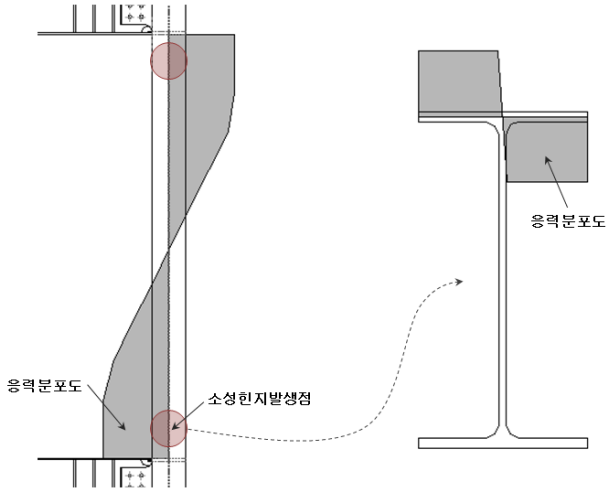


그림 3.2.6.35 면진 유무에 따른 밑면전단력비(면진/비면진)

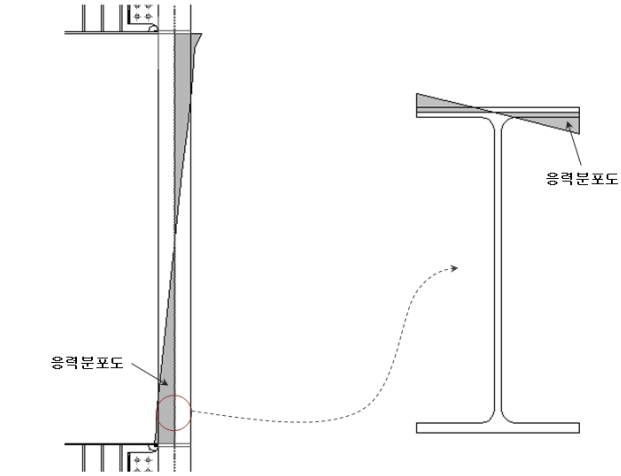
⑥ 부재의 응력분포 및 최종 파괴상태

면진 유무에 따른 응력분포와 실험 후 부재의 손상상태 및 잔류변형상태를 그림 3.2.6.36~그림 3.2.6.37에 나타내었다. 그림 3.2.6.36의 Scale 100%일 때의 응력분포를 보면 비면진실험체에서는 기둥단부에 소성화가 크게 진행되어 소성힌지가 발생하나, 면진실험체는 작은 응력범위 안에서 탄성적으로 거동한다. 그림 3.2.6.38~ 3.2.6.40에 나타낸 것과 같이 비면진실험체는 가진 후 보-기둥 접합부 용접부의 균열과 주각부에 국부좌굴이 발생하고 잔류변형이 크게 발생하나, 면진실험체는 그림 3.2.6.38에 나타낸 것과 같이, 면진층의 대변형만이 발생되고 상부구조물은 탄성범위 내에서 거동하여 가진 후에도 어떤 손상이나 잔류변형이 발생되지 않는다.



(a) 1층 기둥 입면 (b) 1층 기둥 단면

그림 3.2.6.36 비면진실험체의 응력분포도(Scale 100%)

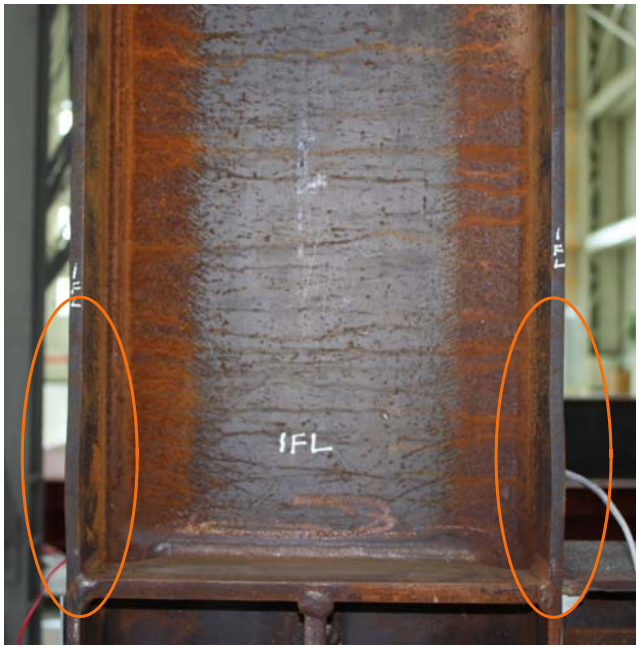


(a) 1층 기둥 입면 (b) 1층 기둥 단면

그림 3.2.6.37 면진실험체의 응력분포도(Scale 100%)

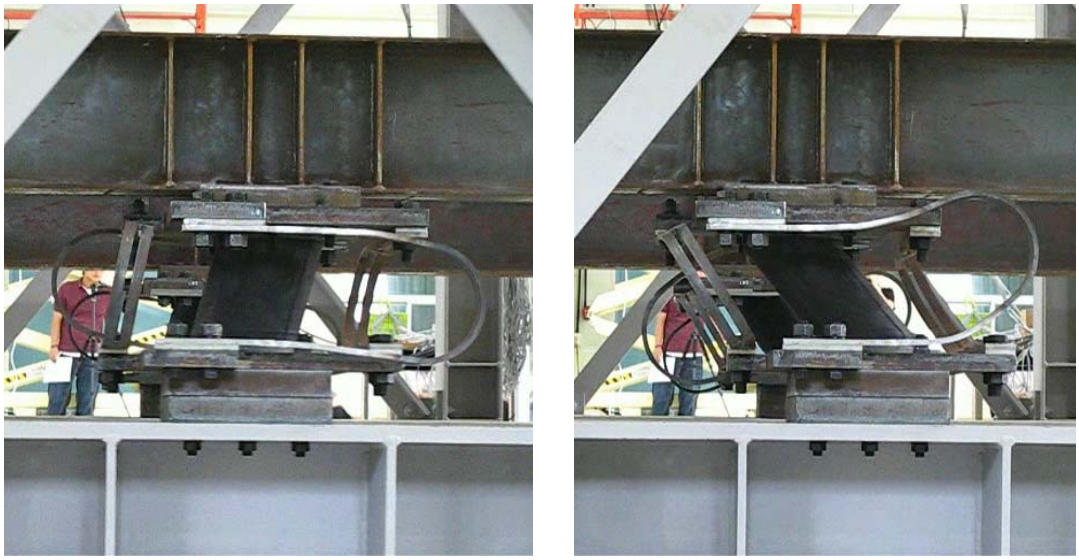


(a) 보-기둥 용접접합부 균열



(b) 1층 주각부 좌굴

그림 3.2.6.38 면진실험체의 실험 후 주요 손상상태



(a) 좌거동 (b) 우거동

그림 3.2.6.39 진실험체의 실험 중 면진장치의 변형



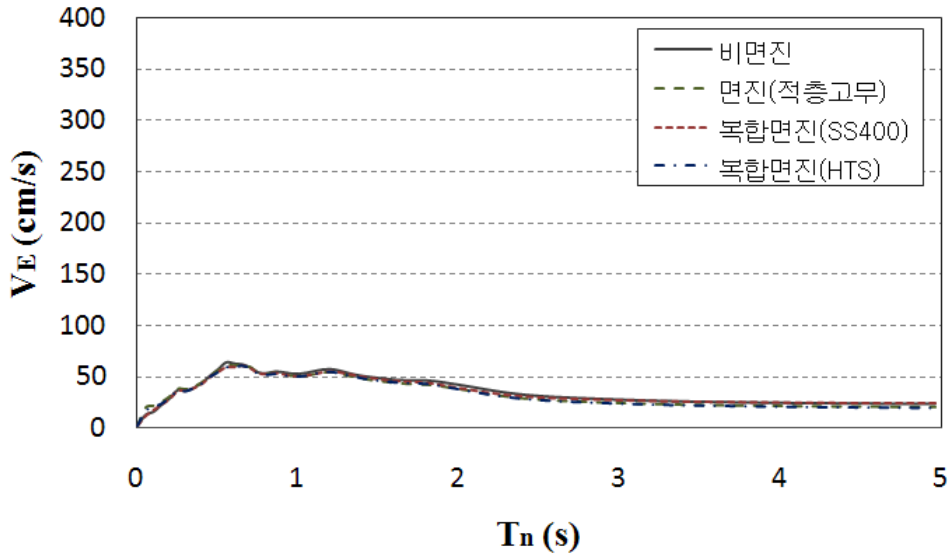
(a) 비면진실험체 (b) 면진실험체

그림 3.2.6.40 면진 유무에 따른 잔류변형상태

⑥ 지진 입력에너지

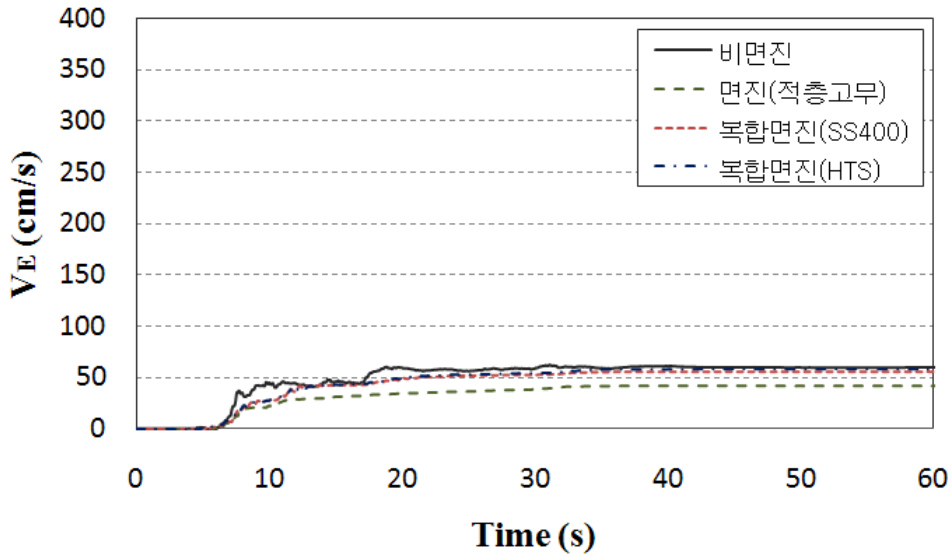
실험에서 실제로 가진된 지반가속도를 사용하여 감쇠비 10%(h=0.1)에 대한 1질점계의 V_E 스펙트럼과 진동대 실험시의 가진 시간동안 실험체에 입력된 총

에너지 등가 속도를 그림 3.2.6.41에 나타내었다. V_E 스펙트럼에서 각 실험체의 1차 고유주기에 해당하는 등가 속도와 실험체에 입력된 등가 속도는 대체적으로 잘 일치한다. 그러나 진동대의 가진 크기가 커질수록 각 실험체의 1차 고유주기에 해당하는 V_E 스펙트럼의 V_E값보다 실험체에 입력된 총 에너지의 V_E가 낮게 나타난다. 이는 비면진실험체에서는 기둥부재가 복합면진실험체에서는 강재댐퍼의 항복 후 강성저하로 인해 유효주기가 길어짐에 따라 변동된 유효주기에 해당하는 에너지가 입력되어 가진 시간동안 입력된 총 에너지는 평균 하향된 결과로 판단된다. 이렇게 유효주기의 변동에 따라 입력에너지가 평균 하향되는 것은 면진구조에서 댐퍼를 병용하여 평상시에는 바람이나 생활 진동 등의 상시 하중과 약한 지진에는 댐퍼의 강한 강성으로 제어하고, 강한 지진시에는 댐퍼의 항복에 의하여 구조물의 주기를 면진주기까지 길어지게 함으로써, 구조물에 입력되는 에너지를 낮출 수 있다는 의미로 해석될 수 있다. 또한, V_E 스펙트럼과 실제로 실험체에 입력된 에너지 등가 속도의 대응은 지진에 의해 구조물에 입력되는 총 에너지는 구조물의 총 질량 및 1차 고유주기에 의존하고, 구조물의 강도, 질량분포, 강성분포에 의존하지 않는 안정된 양이라는 Housner의 증명과 일치한다.

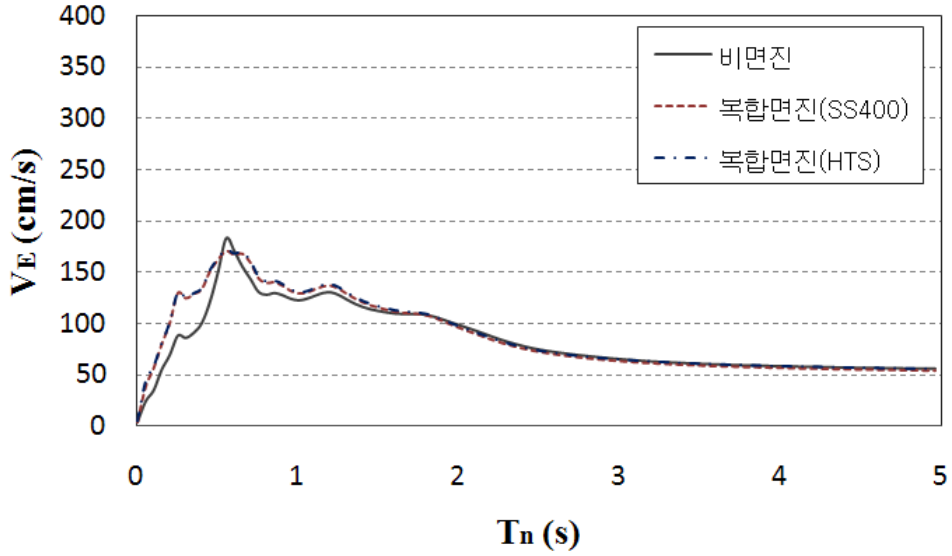


(a) V_E 스펙트럼(scale 40%)

그림 3.2.6.41 V_E 스펙트럼과 입력된 에너지의 등가 속도(계속)

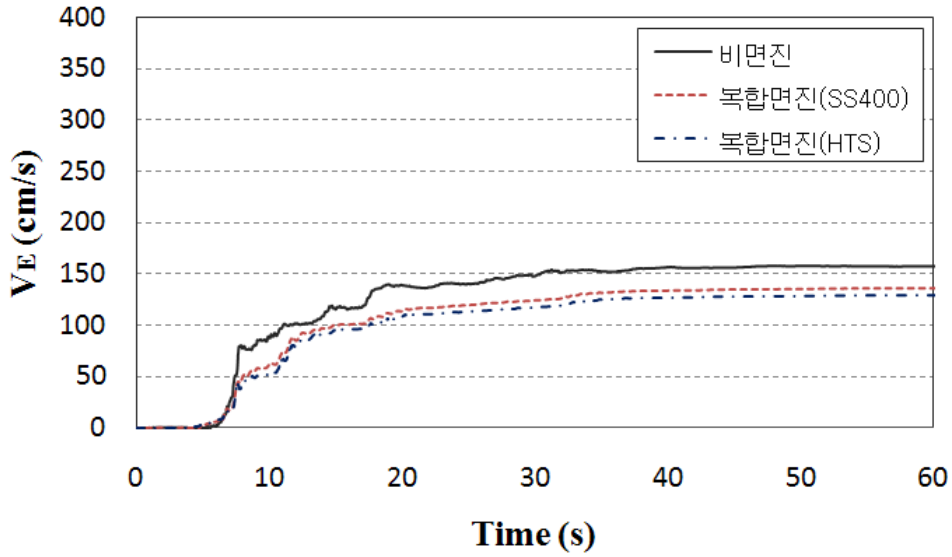


(b) 가진시간동안 입력된 총에너지의 등가 속도(Scale 40%)

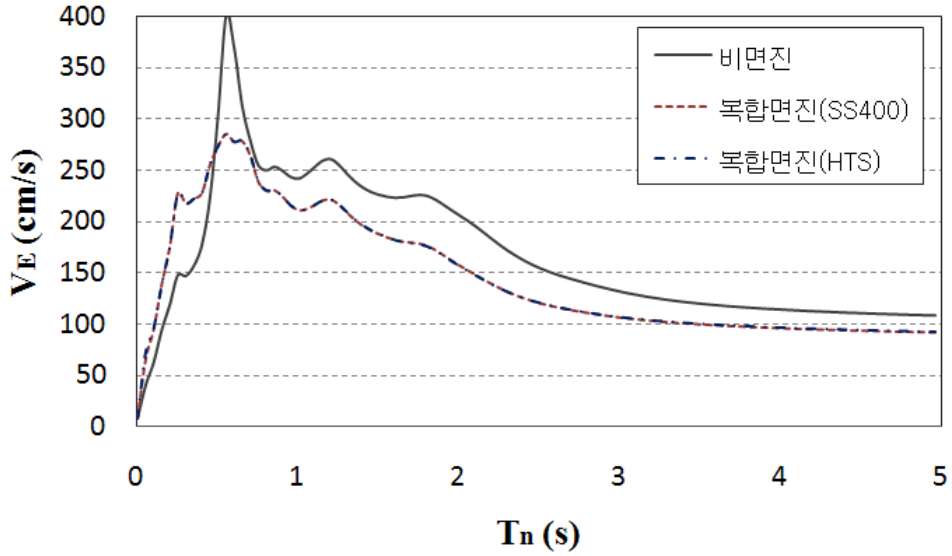


(c) V_E 스펙트럼(scale 100%)

그림 3.2.6.41 V_E 스펙트럼과 입력된 에너지의 등가 속도(계속)

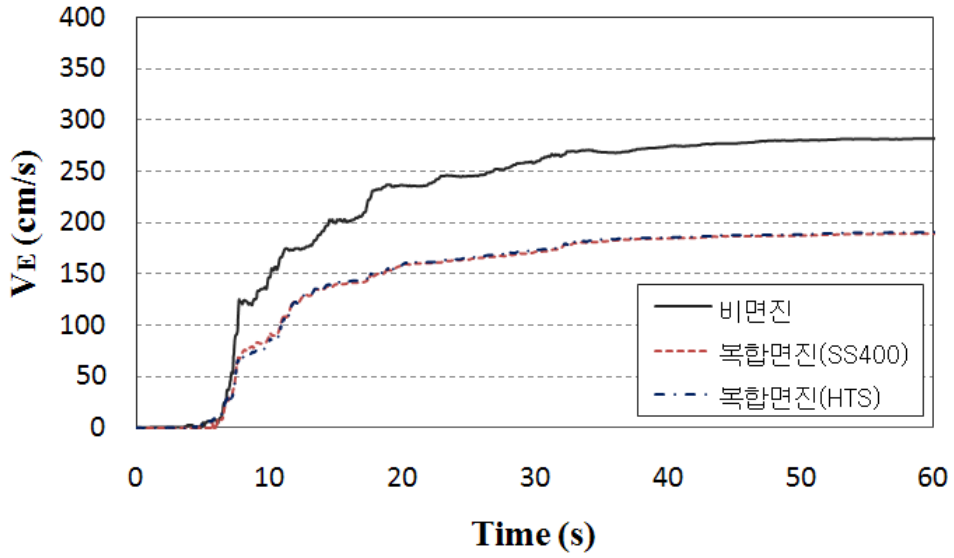


(d) 가진시간동안 입력된 총에너지의 등가 속도(Scale 100%)



(e) V_E 스펙트럼(scale 160%)

그림 3.2.6.41 V_E 스펙트럼과 입력된 에너지의 등가 속도(계속)



(f) 가진시간동안 입력된 총에너지의 등가 속도(Scale 160%)

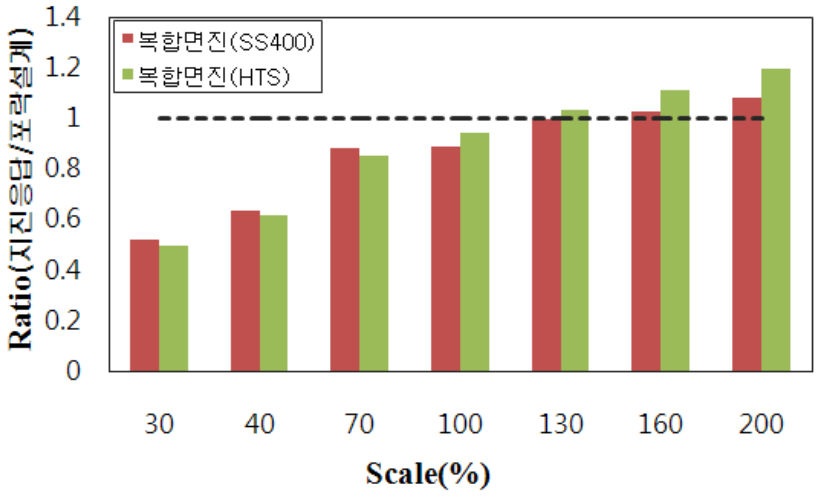
그림 3.2.6.41 V_E 스펙트럼과 입력된 에너지의 등가 속도

⑥ 포락설계값과의 비교

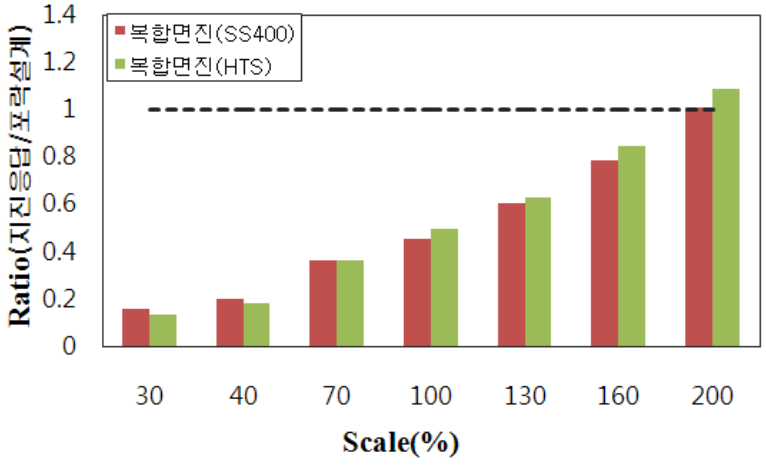
포락설계에 의한 면진층의 최대 수평전단력(Q_m) 및 최대 수평변위(δ_m)의 설계값과 가진크기별 진동대 실험결과를 표 3.2.6.24에 나타내고, 이 중에서 포락설계값에 대한 지진응답비를 그림 3.2.6.42에 나타내었다. 본 연구의 면진장치의 설계과정에서 면진장치의 감쇠능력은 고려되지 않았다는 것과 실제로 가진된 에너지 또한 설계 지진파의 에너지보다 큰 에너지가 입력되었다는 내진설계의 불리한 조건에도 불구하고 에너지평형에 근거한 포락설계값은 충분한 안전성과 내진성을 확보하고 있다. 이는 포락설계값이 내진설계시 안전측의 값을 제공하며 설계지진 이상의 강진시에도 면진구조물은 면진장치에 의해 충분한 내진성능을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

표 3.2.6.24 포락설계값과 실험결과 비교

설 계 값								실 험 값				
V_E (cm/s)	α_o	α_s	α_f	a	α_1	Q_m (N)	δ_m (cm)	Scale	SS400		HTS	
									Q_m (N)	δ_m (cm)	Q_m (N)	δ_m (cm)
150	0.321	0.08	0.076	2.00	0.157	47100	16.96	30	24,400	2.62	23,100	2.18
								40	29,800	3.37	29,000	3.08
								70	41,300	6.09	39,900	6.13
								100	41,800	7.67	44,300	8.34
								130	46,900	10.24	48,400	10.65
								160	48,300	13.32	52,100	14.35
								200	50,700	17.06	56,200	18.36



(a) 면진층의 최대 수평전단력비



(b) 면진층의 최대 수평변위비

그림 3.2.6.42 포락설계값에 대한 지진응답비

나. 플랫플레이트 구조에 대한 진동성능 평가

(1) 개요

최근 공사비 및 층고 절감, 그리고 시공의 편의성 등으로 플랫플레이트 구조에 대한 관심이 증가하면서 우리나라에서도 주거용 고층건축물에 플랫플레이트 구조의 사용이 증가하는 추세이다. 일반적으로 플랫플레이트 구조는 보가 없는 기둥과 슬래브가 직접 접하고 있는 구조로 중력하중에 대해서만 저항하도록 설계되며 지진등의 수평하중에 대한 저항은 전단벽등의 별도의 수평하중 저항 시스템이 저항하도록 설계된다. 하지만 일체식으로 타설되는 콘크리트 구조물이 수평하중을 받게되면 수평하중 저항 시스템에 뿐만 아니라 플랫플레이트에도 수평변위를 발생시키며, 이때 기둥-슬래브 접합부의 위험단면에서 발생하는 불균형모멘트와 플랫플레이트 구조가 부담하던 중력하중으로 인해 위험단면주변에서의 뚫림전단파괴가 발생한다.

이에 플랫플레이트 구조는 내진설계시 위험단면에 대한 보강이 필요한 구조이나 면진장치를 이용하여 구조물에 층간변위가 부재의 탄성범위내에서만 발생하게 조절할 수 있다면 위험단면에 대한 특별한 보강은 필요없을 것으로 생각되며 이에 선행 연구에서 개발된 복합면진장치를 유무에 따른 진동대 실험을 계획 및 실시하고 실험결과를 바탕으로 복합면진장치의 성능 및 구조물의 거동을 분석한다.

(2) 플랫플레이트 실험체 계획

(가) 실험체 계획

본 실험에서는 복합면진장치의 적용 유무를 변수로 하여 그림 3.2.6.51형상을 가진 2개의 동일한 플랫플레이트 실험체를 제작하였다. 실험체는 KBC2006의 규준에 준하여 설계하였으며, 슬래브의 크기는 $3000mm \times 3000mm$, 슬래브 두께 $135mm$, 기둥 단면의 크기는 $300mm \times 300mm$로 하였으며, 슬래브 철근은 D13과 D10을 사용하여 배근하였다. 실험체 기둥의 상부에는 진동대 실험시 필요한 철물 Mass를 설치하기기 위해 크기 $1500mm \times 900mm$, 두께 $300mm$의 콘크리트 Mass를 실험체와 일체로 타설하였다. 횡하중에 의한 연속슬래브의 변곡점이 슬래브 중앙부에서 발생하는 것으로 가정하여 슬래브의 모서리를 4개의 힌지로 지지할 수 있도록 제작하였다. 또한 실험체는 진동대 실험의 특성상 실험체의 기

둥주변 위험단면의 갑작스런 뚫림전단파괴로 인한 실험중 안전사고에 대한 위험을 줄이기 위하여, 실험체의 파괴모드를 슬래브가 휨항복을 한 이후에 전단파괴를 유도하도록 설계 하였으며, 이를 위해 최근 플랫플레이트 구조의 위험단면 슬래브에 전단강도를 높여줄 목적으로 많이 사용되어지고 있는 전단보강밴드를 슬래브 위험단면 내부에 설치하여 실험체 슬래브의 전단강도를 증가시켰다. 또한 실험체의 진동대 실험시 기둥이 슬래브보다 먼저 파괴되는 것을 방지할 목적으로 D19철근 및 H형강을 사용하여 충분히 강하게 설계하였다. 실험체와 전단보강밴드의 상세는 그림 3.2.6.43과 그림 3.2.6.44에 실험체의 일람은 표 3.2.6.25에 나타내었다.

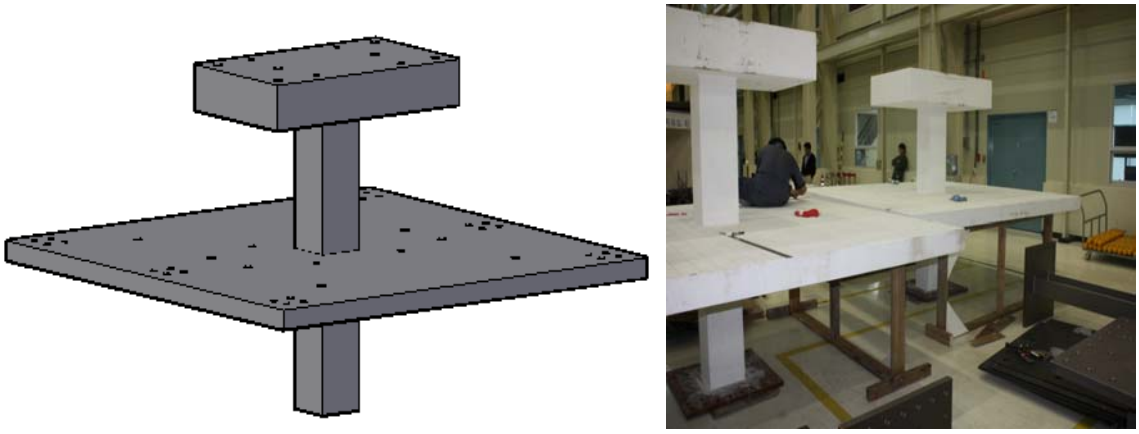
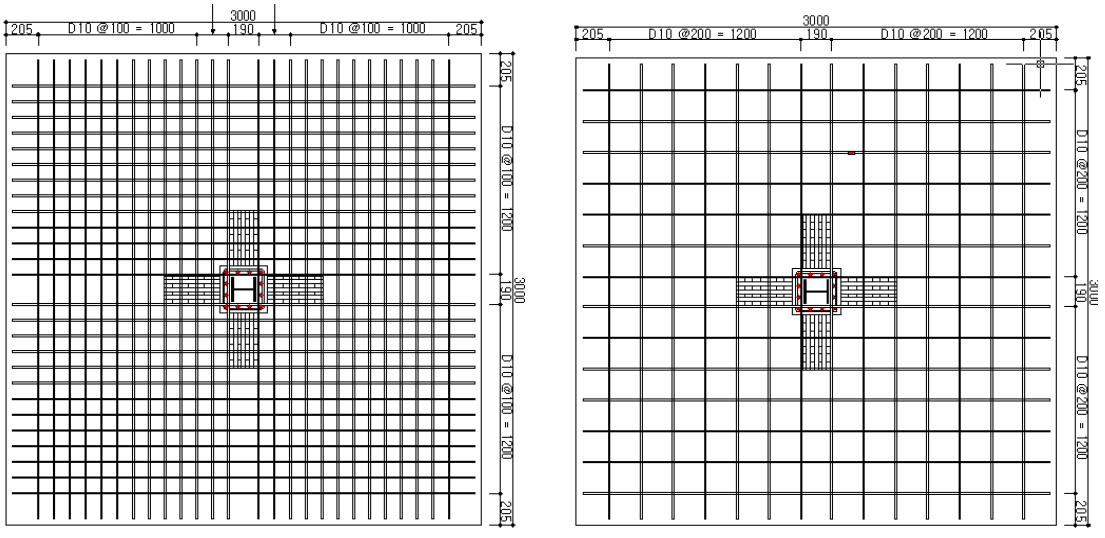


그림 3.2.6.43 실험체의 형상



(a) 슬래브 상부 배근도 (b) 슬래브 하부 배근도

그림 3.2.6.44 실험체 상세

표 3.2.6.25 실험체의 일람표

	기둥	슬래브		
단면치수(㎜)	300×300	3000×3000		
주근	12-D19	상부근		하부근
		D13	D10	
		12-@100	40-@100	28-@200
띠근	D10@150	-		
H형강	150×150×7×10	-		

(3) 에너지법에 근거한 면진장치의 설계

본 실험에서도 선행 실험에서와 동일하게 포락설계법에 근거하여 진동대 실험용 프랫플레이트 실험체에 사용되어질 적층고무받침과 강재댐퍼를 계획하였다.

본 실험에서 사용되어질 적층고무와 강재댐퍼의 형상 및 크기는 앞서 제시하고 진동대 골조 실험체에 면진장치 설계시 사용하였던 에너지법에 의한 면진장치 설계 프로세스를 이용하여 설계하였으며, 적층고무의 목표 면진주기는 3.5초로 설정하여 제작한 적층고무의 형상 및 크기는 그림 3.2.6.45과 표 3.2.6.46에 나타내었으며, 그림 3.2.6.47의 강재댐퍼 계획시 사용된 포락해석용 도표, 포락설계값, 형상 및 치수는 그림 3.2.6.48, 표 3.2.6.26 및 표 3.2.6.27에 나타내었다.

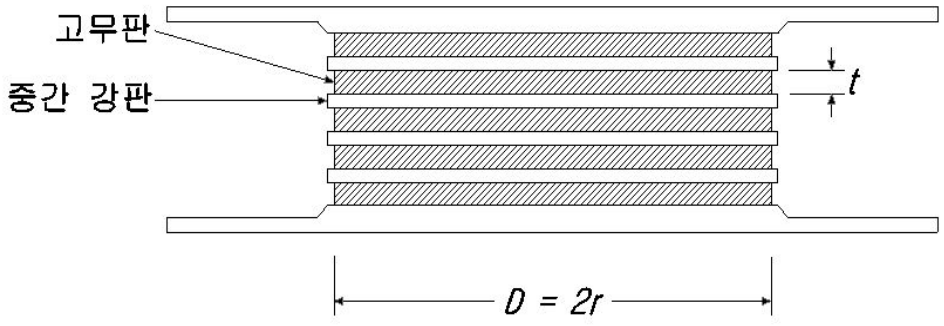


그림 3.2.6.45 적층고무의 형상

표 3.2.6.26 적층고무 전단강성과 크기

Tf (s)	지지하중 (kN)	Kf (N/cm)	G (N/cm2)	외경 (cm)	내경 (cm)	유효면적 (cm2)
3.5	180	591	26.5	20	10	235.6

적층고무판(cm)			중간강판(cm)		단부강판(cm)		제품 총높이 (cm)	S2
두께	층수	총높이	두께	층수	두께	층수		
0.42	25	10.5	0.23	24	2.2	2	20.42	1.90

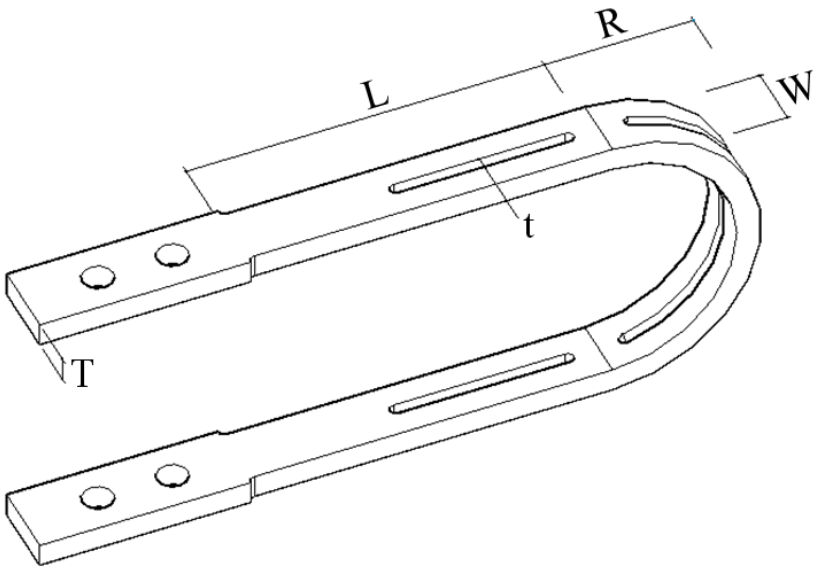


그림 3.2.6.46 강재댐퍼의 형상

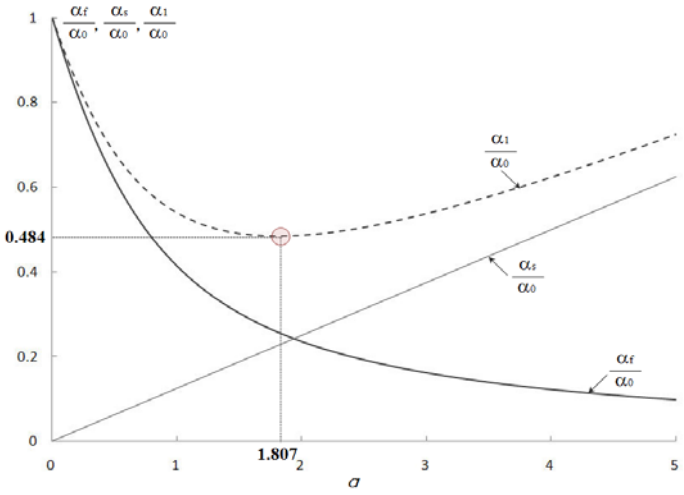


그림 3.2.6.47 면진구조의 포락해석용 도표

표 3.2.6.27 a값에 따른 면진구조의 포락설계값

a	α_0	α_f	α_s	α_1	α_1/α_0	${}_fQ_m$ (kN)	${}_sQ_Y$ (kN)	δ_m (cm)
1.0		0.113	0.034	0.147	0.536	20.34	6.12	34.46
1.5		0.083	0.051	0.134	0.489	14.94	9.18	25.31
1.95	0.320	0.066	0.067	0.133	0.485	11.65	11.48	20.13
2.0		0.065	0.069	0.134	0.489	11.70	12.42	19.82
2.5		0.062	0.100	0.162	0.505	18,500	30,000	13.79

표 3.2.6.28 강재댐퍼의 치수

재 질	곡선부분 외경 반지름 R(mm)	평판부 길이 L(mm)	형상비 L/R	폭 W(mm)	두께 T(mm)	개구부 t(mm)
SS400	110	304	2.76	50	10	10

본 실험에서 사용된 적층고무 및 강재댐퍼는 면진층의 목표주기를 3.5초로 설정하여 계획한 형상 및 크기가 선행 실험에서 계획하고 제작한 적층고무와 강재댐퍼와 요구성능과 비슷하여 전단시험을 별도로 실시하지 않고 제작하였다. 그리고 HTS를 사용한 강재댐퍼는 본 연구의 종료시점까지 제작하는데 어려움이 있는 관계로 본 실험에서는 SS400강재를 사용한 강재댐퍼만을 사용하였다.

(4) 실험 방법 및 측정 계획

본 실험에서는 절대가속도, 상대변위, 슬래브 철근의 변형 및 강재댐퍼 각부의 변형을 계측하기 위해서 표 3.2.6.29에 나타낸 것과 같이 계측 장치를 부착하였다.

표 3.2.6.29 센서 종류 및 주요제원

센서 종류		수량	주요 제원
Displacement	Dynamic LVDT	6EA (층별 2EA)	±20cm
Accelerometer		6EA (층별 2EA)	±10g
Strain Gauge	실험체	1축 : 20EA	Plastic Type
	댐퍼	1축 : 42EA	

진동대 실험방법은 구조물의 내진설계 및 연구에 주로 사용되어지는 El_Centro NS파(PGA 350cm/s^2, 1940년)에 대하여 지진응답해석결과를 참고하여 최대 지반가속도를 기준으로 Scale 조정하여 총 7단계(30/40/70/100/130/160/200%)로 나누어 실시한다. 실험 단계별 지잔파의 크기 및 규모를 표 3.2.6.30에 나타내었다.

표 3.2.6.30 실험 단계별 지진파의 크기 및 규모

Scale(%)	PGA (cm/s^2)	지진의 규모	비면진 실험체	면진 실험체	복합면진 실험체	
					SS400	HTS
30	107	5.1~5.5	○	○	○	○
40	143	5.3~5.8	○	○	○	○
70	250	5.7~6.3	○	×	○	○
100	357	6.0~6.6	○	×	○	○
130	464	6.2~6.9	○	×	○	○
160	571	6.3~7.1	○	×	○	○
200	714	6.5~7.3	○	×	○	○

참고로, 진동대 실험을 위한 진동대 테이블의 성능은 그림 3.2.6.48과 표 3.2.6.36에 나타내었다.

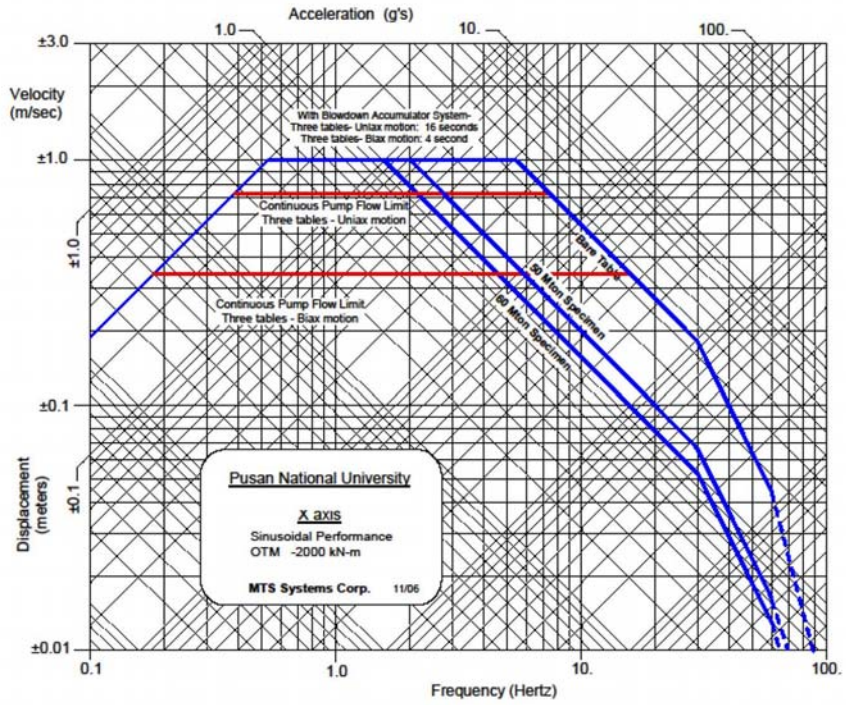


그림 3.2.6.48 진동대의 성능곡선

표 3.2.6.31 진동대의 성능

ITEMS	X-Axis	Y-Axis
Table Size(m)	5×5	
Degrees of Freedom	3	
Full Payload(tons)	60	
Nominal Payload(tons)	50	
Desired Overturning Moment(kN-m)	2,000	
Operating Frequency Range(Hz)	0.1 ~ 60	
Acceleration at Full Payload(g)	1.0	1.0
Acceleration at Nominal Payload(g)	1.25	1.25
Maximum Velocity(cm)	100	100
Maximum Stroke(cm)	±30	±20

3.2.7 면진APT의 구조설계 및 경제성/시공성 평가

가. 면진구조 APT의 구조시스템 선정 및 개념설계

연구 대상 건물은 148㎡-2호 조합에 해당하는 지상 17층 규모의 판상형 대형 평형 아파트로서 그림 3.2.7.1은 아파트의 기준층 구조평면이고 그림 3.2.7.2는 입면도를 나타내고 있으며 입면도를 나타낸 것이며, 구조 개요는 아래 표 3.2.7.1과 같다.

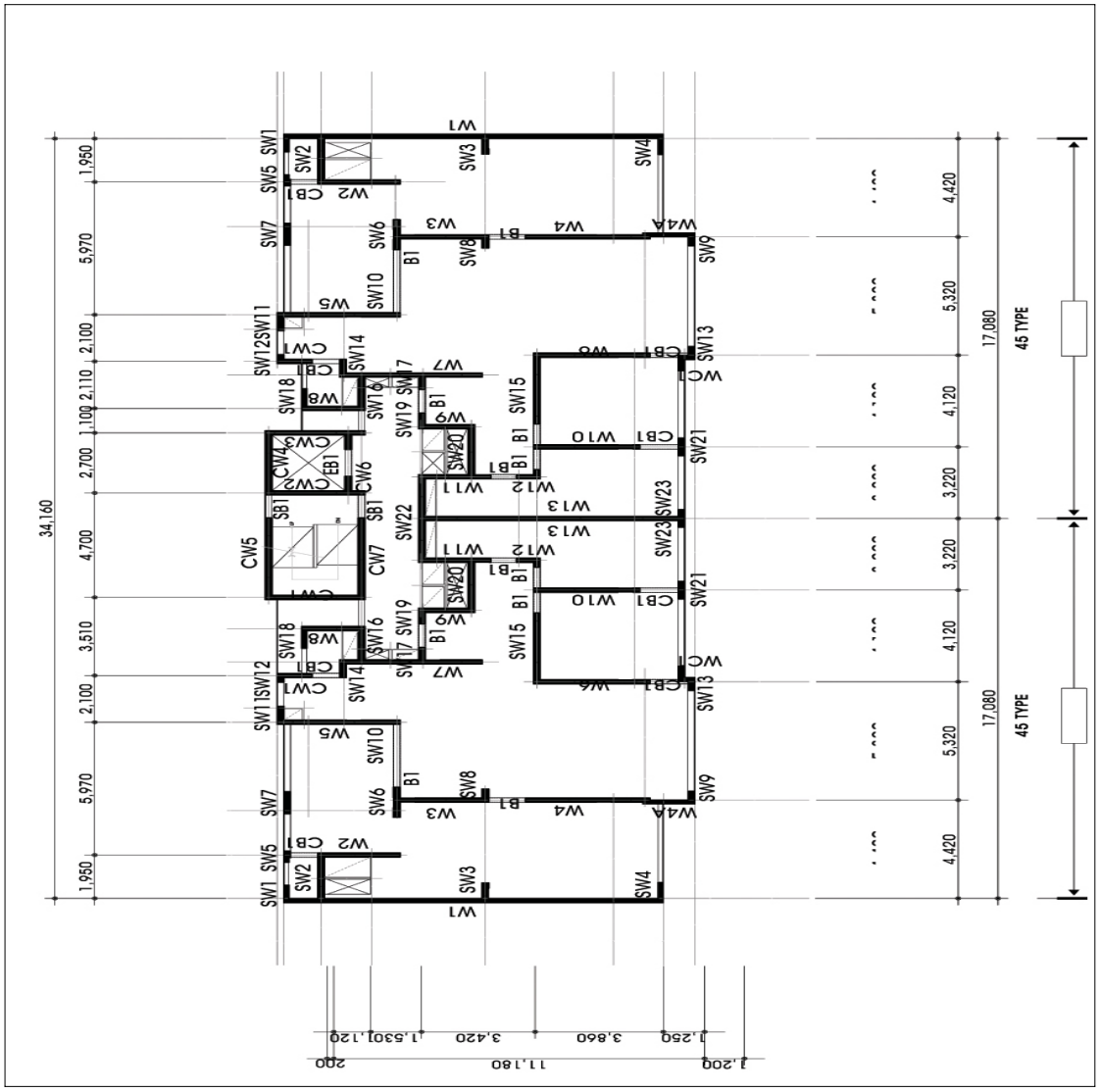


그림 3.2.7.1 기준층 구조평면도

표 3.2.7.1 구조개요

	내 용	비 고
건 물 위 치	경기도 용인시	
건 물 용 도	공동주택	
규 모	지상 17층	
구 조 형 식	철근콘크리트 전단벽식 구조	

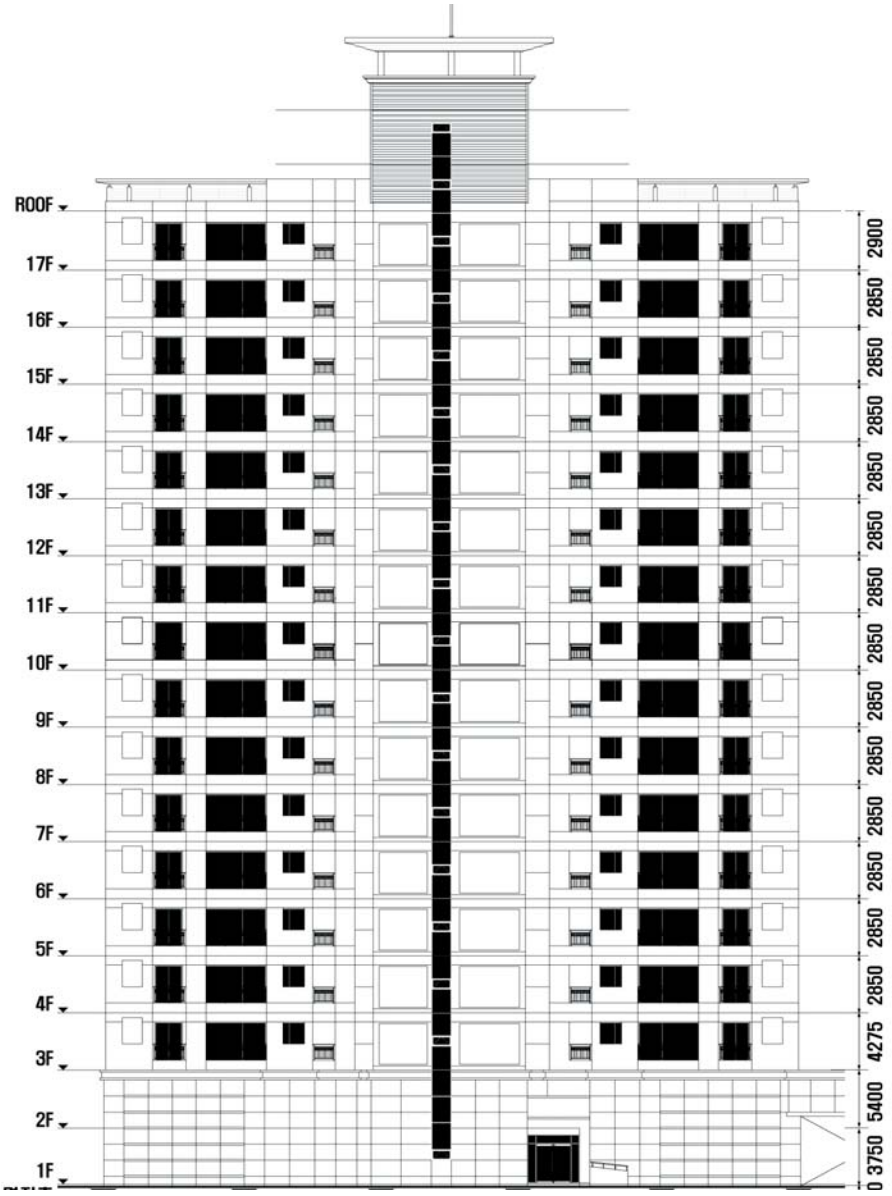


그림 3.2.7.2 입면도

(1) 상부구조 재료 및 형식 선정

표 3.2.7.2는 본 예제 건물의 구조 재료의 강도를 나타낸 것이며 본 건물의 설계하중은 아래와 같다.

표 3.2.7.2 콘크리트(fck, MPa) 및 철근(fy, MPa)

구 분	층 수	수 평 재 (MPa)	수 직 재 (MPa)
아파트	3 ~ 15층	21	21
	1 ~ 2층	24	24
	기 초	21	

- HD22철근이하 SD400적용 (f_y=400MPa)
- HD25철근이상 SD500적용 (f_y=500MPa)

■ 설계하중

(1) 옥탑 평지붕 (단위 kN/m^2)

1) 고정하중	두 께		사용하중	계수하중
방수 및 보호몰탈	(THK = 50 mm)	:	1.00	
콘크리트 슬래브	(THK = 210 mm)	:	5.04	
			6.04	8.46
2) 적재하중			2.00	3.40
Total Load		:	8.04	11.86

(2) 지붕층 (단위 kN/m^2)

1) 고정하중	두 께		사용하중	계수하중
보호몰탈	(THK = 20 mm)	:	0.40	
방 수		:	0.10	
무근콘크리트	(THK = 100 mm)	:	2.30	
콘크리트 슬래브	(THK = 210 mm)	:	5.04	
			7.84	10.98
2) 적재하중			2.00	3.40
Total Load		:	9.84	14.38

(3) 엘리베이터 기계실 (단위 kN/m^2)

1) 고정하중	두 께		사용하중	계수하중
무근콘크리트	(THK = 100 mm)	:	2.30	
콘크리트 슬래브	(THK = 210 mm)	:	5.04	
			7.34	10.28
2) 적재하중			15.00	25.50
Total Load		:	22.34	35.78

(4) 침실, 거실, 주방 (단위 kN/m^2)

1) 고정하중	두 께		사용하중	계수하중
보호몰탈	(THK = 50 mm)	:	1.00	
경량기포 콘크리트	(THK = 40 mm)	:	0.40	
차음재	(THK = 20 mm)	:	0.20	
콘크리트 슬래브	(THK = 210 mm)	:	5.04	
Ceiling		:	0.20	
			6.84	9.58
2) 적재하중			2.00	3.40
Total Load		:	8.84	12.98

(5) 욕실 (단위 kN/m^2)

1) 고정하중	두 께		사용하중	계수하중
타일 및 몰탈	(THK = 70mm)	:	1.40	
콘크리트 슬래브	(THK = 210mm)	:	5.04	
Ceiling		:	0.20	
		:		
			6.64	9.30
2) 적재하중			2.00	3.40
Total Load		:	8.64	12.70

(6) 현관 (단위 kN/m^2)

1) 고정하중	두 께		사용하중	계수하중
타일 및 몰탈	(THK = 40mm)	:	0.80	
콘크리트 슬래브	(THK = 210mm)	:	5.04	
		:		
			5.84	8.18
2) 적재하중			2.00	3.40
Total Load		:	7.84	11.58

(7) 확장형 발코니 (단위 kN/m^2)

1) 고정하중	두 께		사용하중	계수하중
방수 및 몰탈	(THK = 100 mm)	:	2.00	
콘크리트 슬래브	(THK = 210 mm)	:	5.04	
			7.04	9.86
2) 적재하중			3.00	5.10
Total Load		:	10.04	14.96

(8) 발코니 (단위 kN/m^2)

1) 고정하중	두 께		사용하중	계수하중
방수 및 몰탈	(THK = 70 mm)	:	1.40	
콘크리트 슬래브	(THK = 210 mm)	:	5.04	
			6.44	9.02
2) 적재하중			3.00	5.10
Total Load		:	9.44	14.12

(9) 복도 (단위 kN/m^2)

1) 고정하중	두 께		사용하중	계수하중
인조석 물갈기	(THK = 30 mm)	:	0.81	
몰탈	(THK = 20 mm)	:	0.40	
콘크리트 슬래브	(THK = 210 mm)	:	5.04	
		:		
			6.25	8.75
2) 적재하중			3.00	5.10
Total Load		:	9.25	13.85

(10) 계단참 (단위 kN/m^2)

1) 고정하중	두 께		사용하중	계수하중
인조석 물갈기	(THK = 50 mm)	:	1.00	
콘크리트 슬래브	(THK = 210 mm)	:	5.04	
		:		
		:		
			6.04	8.46
2) 적재하중			3.00	5.10
Total Load		:	9.04	13.56

(11) 계단 (단위 kN/m^2)

1) 고정하중	두 께		사용하중	계수하중
인조석 물갈기	(THK = 50 mm)	:	1.00	
콘크리트 슬래브	(AVER.THK=294 mm)	:	7.06	
			8.06	11.28
2) 적재하중			3.00	5.10
Total Load		:	11.06	16.38

(12) 실내화단 (단위 kN/m^2)

1) 고정하중	두 께		사용하중	계수하중
인조토양(흙, 자갈)	(THK = 300 mm)	:	5.70	
무근 콘크리트	(THK = 100 mm)	:	2.30	
콘크리트 슬래브	(THK = 210 mm)		5.04	
			13.04	18.26
2) 적재하중			3.00	5.10
Total Load		:	16.04	23.36

(13) RAMP (단위 kN/m^2)

1) 고정하중	두 께		사용하중	계수하중
무근 콘크리트	(THK = 150 mm)	:	3.45	
콘크리트 슬래브	(THK = 200 mm)	:	4.80	
		:		
		:		
			8.25	11.55
2) 적재하중			10.00	17.00
Total Load		:	18.25	28.55

(14) 내 벽(0.5B) (단위 kN/m^2)

1) 고정하중	두 께		사용하중	계수하중
몰 탈 및 타 일	(THK = 30 mm)	:	0.60	
벽 돌(0.5B)	(THK = mm)	:	1.90	
		:		
		:		
			2.50	3.50

(15) 내 벽(1.0B) (단위 kN/m^2)

1) 고정하중	두 께		사용하중	계수하중
몰 탈 및 타 일	(THK = 30 mm)	:	0.60	
벽 돌(1.0B)	(THK = mm)	:	3.80	
		:		
		:		
			4.40	6.16

(16) 기타 (단위 kN/m^2)

콘크리트 난간	(THK = 120 mm)	:	2.88
경량벽체	(THK = mm)	:	1.00
샷 시		:	0.50

■ 풍하중

○ 설계기본풍속(Vo) : 25.0 m/sec

○ 노풍도 : B

■ 지진하중

○ 지역계수 : A=0.11(지진지역 1)

○ 지반계수 : Sc (SDS=0.4389, SD1= 0.2341)

○ 중요도 계수 (Iw) : 1.5 (고정기초 내진설계, 내진특등급, 도시계획구역 내)

※ 면진구조물은 점유범주에 관계없이 중요도 계수를 1.0으로 한다 (ASCE7-05 17.2.1)

○ 지진력 저항시스템 : 철근 콘크리트 전단벽

○ 반응수정계수(R) : 4.5

○ 시스템초과강도계수(Ω_0) : 2.5

○ 변위증폭계수(C_d) : 4.0

(2) 면진구조시스템의 개념 설정 및 설계

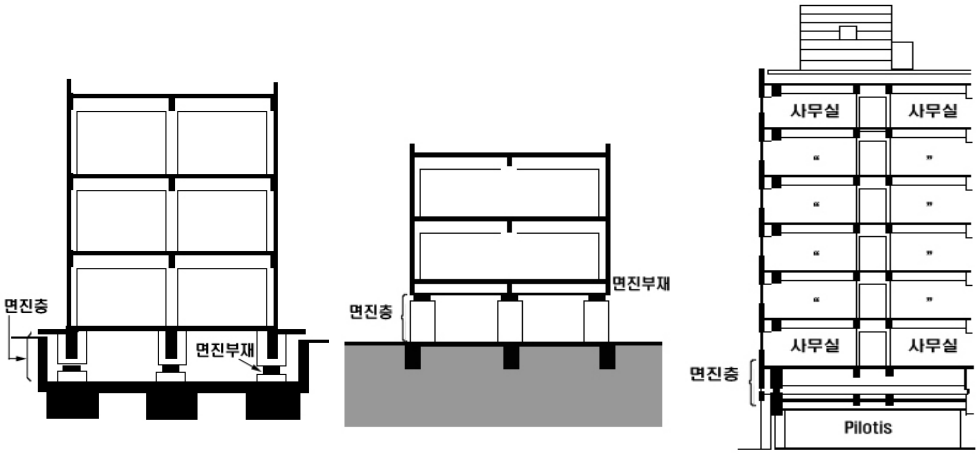
면진기법은 건물과 기초 사이에 지진으로 인한 진동하중을 감소시킬 수 있는 특수한 분리장치를 삽입하여 지반과 건물을 분리시켜 지진으로 인한 지반진동이 상부 건물에 직접 전달되는 것을 차단하거나 감소시키는 기법으로 지진지역에서 내진설계의 효과가 상대적으로 적은 신축건물은 물론이고 내진설계가 되어 있지 않은 기존 건물에 대해서도 효과적으로 적용시킬 수 있으며 진동에 대한 제어효과의 탁월성으로 인해 지진에 대한 안전성 뿐 아니라 사용성면에 있어서도 우수한 성능의 확보가 기대되는 기술이다. 면진 층의 위치는 그림 3.2.7.3과 같이 건물의 최하부에 설치하는 기초 면진과 건물의 중간층에 설치하는 중간층 면진으로 크게 나눌 수 있다.

(가) 기초면진

기초면진은 가장 기본적인 면진구조의 형식으로서 건물의 최하층 기초부분에 면진 층을 두고 여기에 면진장치를 설치하는 방식이다. 기초면진으로 대상건물 전체를 면진화할 수도 있지만 건물 아래에 미리 면진 층을 구성해야 하기 때문에 터파기양이나 구체수량이 증대함에 따라 공기도 그만큼 늘어나게 된다. 또 건물이 지반과 절연되어 천천히 크게 흔들리게 되기 때문에 특히 출입구 등에서는 상대변형에 대해 충분히 배려한 디테일이 필요하다. 면진에 대한 적용사례가 많은 일본의 경우 최근 면진 건물로 가장 많은 집합주택은 대부분이 이런 기초면진의 형식을 취하고 있다. 이 형식을 채용할 경우 설계상의 유의점은 아래와 같다.

- ◦ 건물 외주에 건물기초보다 큰 면진 층 부분이 필요하므로 부지에 여유가 있는지를 확인한다.
- ◦ 면진 층 외주에 벽면의 턱(Scarcement) 등이 설치되기 때문에 지진 시 상부구조가 이동했을 때 문제가 발생하지 않음을 확인해야 한다(면진 클리어런스 확보).
- ◦ 향후 증축 등을 고려할 경우 면진장치의 점검이나 교체가 용이해야 한다.
- ◦ 설비배관은 면진 층의 변형에 대응한 유연접합부(Flexible Joint 또는 Ball Joint)로 해야 한다.

◦ 면진건물과 다른 건물과의 사이를 잇는 연결통로는 상대변형에 대응하는 상세가 필요하다.



(a) 기초면진 (b) 중간층 면진(1) (c) 중간층 면진(2)

그림 3.2.7.3 면진 층의 위치

(나) 중간층 면진

중간층 면진은 기초보다 위의 레벨인 임의 층에 면진 층을 만들고 하부구조는 일반적인 건물과 같이 지반과 접하게 된다. 중간층 면진은 기초면진의 경우에서와 같은 터파기양이나 구체수량의 문제는 해소되지만 면진 층보다 아래층(하부구조)에서는 면진효과를 크게 기대할 수 없다는 단점이 있다. 또한 면진 층을 통과하는 계단, 엘리베이터 샤프트나 설비배관에 대한 면진 층의 변형대책이 필요하다. 계단, 엘리베이터 샤프트에 대한 대책의 한 예로서 이들을 상부구조로부터 내리고 하부구조와는 이격거리를 확보하여 충돌하지 않도록 하는 방법이 있다. 최근에는 엘리베이터레일을 변형시킴으로써 변형에 대응하는 예도 있다.

면진 층을 건축적으로 이용할 경우에는 면진장치의 내화성능 확보를 위해 내화피복이 요구되는 경우도 있다. 도시에서 부지에 여유가 없는 경우 중간층이 지상에 설치되어 공중에서 변형하게 되고 면진 클리어런스(Clearance) 만큼이 유리해지는 경우도 있다. 또한 지하굴착을 줄일 필요가 있는 경우에도 지상에 면진 층을 설치하는 것이 유리하다. 이런 형식을 채용할 경우의 설계상 유의점은 다음과 같다.

◦ 면진 층 부분의 건물 외벽은 면진 층의 변형에 대응하여 큰 수평이동이 가

능한 이음구조를 지녀야 하며, 지수성능, 차음성능 및 방화성능을 확보하면서 외관상도 위화감을 주지 않도록 해야 한다.

◦ 면진 층을 관통하는 계단, 엘리베이터샤프트 및 설비배관 등에는 변형대책뿐만 아니라 방화구획에 대한 배려가 필요한 경우도 있다.

◦ 면진장치나 내화피복의 점검과 교체가 용이해야 한다.

그림 3.2.7.4는 면진구조 설계의 일반적인 절차를 나타낸 것이며, 설계의 주요 항목들에 대해서는 이후 절에서 자세하게 설명하기로 한다. 후술되는 주요 항목의 설명에서는 ASCE7-05 17장 관련 절의 원문을 번역하여 함께 수록함으로서 실무자들의 이해를 돕고자 하였다.

면진구조의 설계에서는 먼저 면진구조로서 건물의 동적특성을 목표성능에 맞춰 정하고 이후 각부 설계로 진행하는 것을 원칙으로 하며, 일반적으로 면진구조의 안전성 및 목표성능은 면진부재를 포함한 건물모델을 대상으로 시간이력해석에 의해 검토하는 것을 원칙으로 한다. 설계는 등가수평력해석에 의한 예비설계와 동적해석에 의한 최종설계로 나누어 수행하며, 건물이 일정조건을 만족할 경우 등가수평력해석(ASCE7-05 17.4.1)이나 응답스펙트럼해석(ASCE7-05 17.4.2.1)을 설계에 직접 사용할 수 있다.

면진구조의 해석과 설계는 사용될 면진장치의 실증적인 변형특성에 근거하여야 하나(ASCE 7-05 17.5.2), 면진장치의 변형특성은 건물에 직접 사용될 면진장치를 대상으로 한 실험이 수행되기 전에는 알 수 없으며, 이러한 면진장치는 건물의 목표성능을 만족하기 위한 변수들이 설계를 통하여 선행적으로 결정되어야만 제작이 가능하므로, 면진구조의 최초 설계단계에서는 면진장치의 변형특성을 가정하여 시작하고, 설계의 반복적인 수행을 통하여 가정한 설계 값과 실험을 통한 실증 값이 수렴하는지의 여부를 확인하는 시행착오적인 방법으로 설계를 진행하도록 한다.

등가수평력해석은 면진장치의 비선형적인 특성을 등가강성과 등가감쇠로 치환하여 설계하도록 한 약식 설계방법으로서 예비설계를 위한 방법으로 채택하고, 이로부터 결정된 면진시스템의 요구강성과 감쇠조건 들을 토대로 실증적인 면진장치들의 특성 값을 결정한 후 시간이력해석을 통하여 목표성능을 만족하는지의 여부를 확인하는 순서로 설계를 진행하도록 한다. 이 경우 전술하였듯이 건물이

일정 조건을 만족한다면 예비설계 단계에서 사용되었던 등가수평력해석이나 응답스펙트럼해석이 직접 반복하여 설계에 사용될 수도 있다.

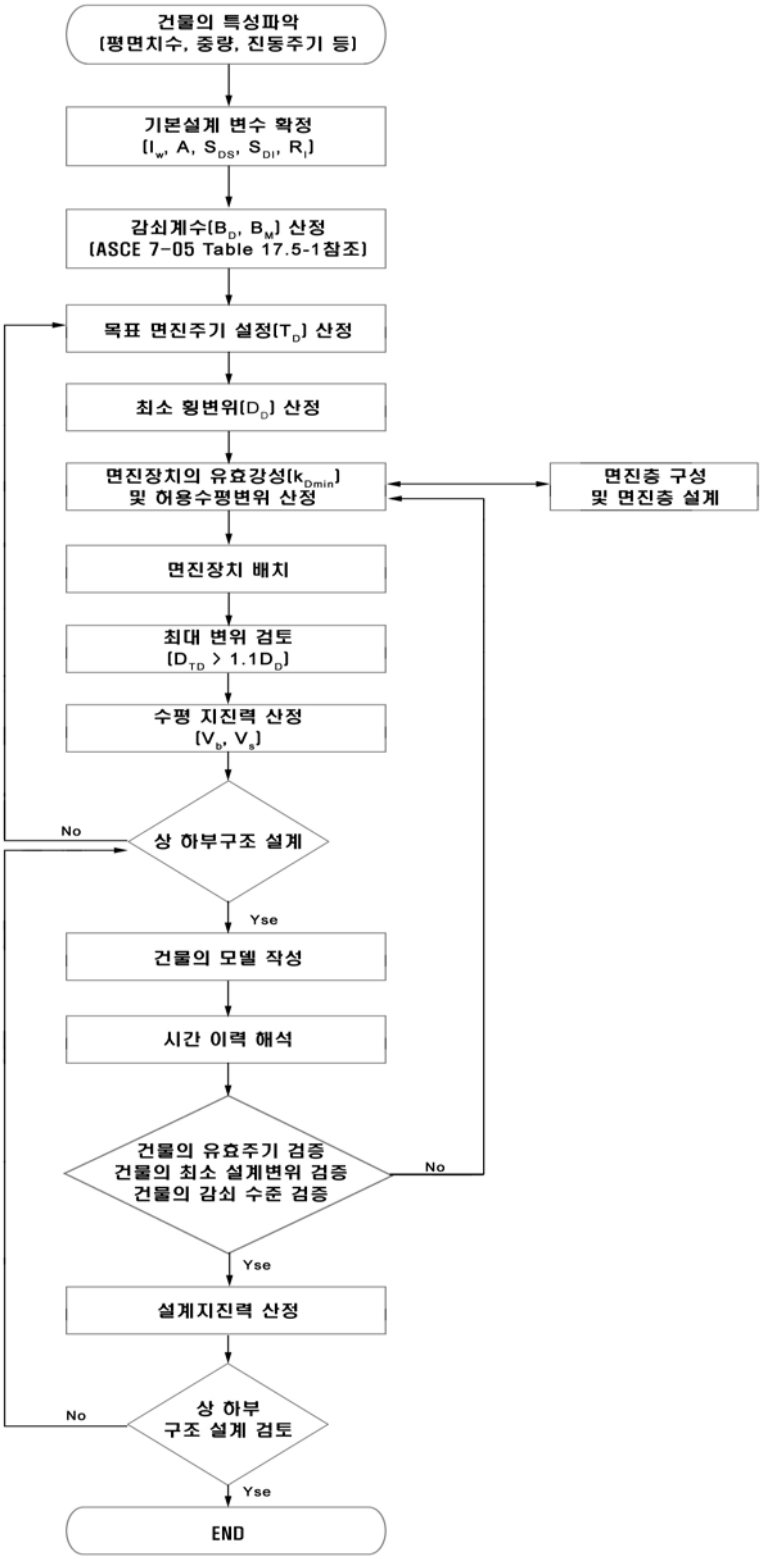


그림 3.2.7.4 Flow Chart

이상에서 설명된 각 단계별 주요 내용을 요약하면 다음과 같다.

① 예비설계 단계

면진시스템의 목표주기에 따른 적절한 설계변위와 최대변위를 설정하고 면진층의 강성과 감쇠비를 구성하여 각각의 면진장치로 강성과 감쇠성능을 분배한다. 이 때 개개의 면진장치는 감쇠기능을 포함한 장치와 감쇠기능이 없는 장치로 구분되며 설계변위 시 강성수준과 최대변위 시 안정성을 만족시켜야한다.

예비설계 시 입력 값으로 목표 면진주기(T_D), 상부구조의 자중(W), 그리고 면진시스템의 감쇠비(β)를 결정하면 면진층의 설계변위를 응답스펙트럼의 가속도계수(S_{D1})와 응답변위와의 관계로부터 다음과 같이 산출할 수 있다.

$$D_D = g\frac{S_{D1}T_D}{4\pi^2\beta}$$

면진층의 유효 강성은 고유주기와 강성과의 관계에서 다음 식과 같이 유도된다.

$$K_{eff} = \frac{4\pi^2 W}{T^2 g}$$

유효 강성(K_{eff})과 자중(W)는 개개의 면진장치에서 강성의 병렬조합과 축력의 총합으로 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$K_{eff} = \sum_i^n K_i \ , \quad W = \sum_i^n F_{Vi}$$

예비설계에서 결정된 축력과 분배된 강성을 만족하도록 개개의 면진장치를 설계한다. 이 때 주의할 점은 설계지진의 수준과 최대지진의 수준을 구분하여 설계지진 시 총 설계변위에서 설계 강성을 만족하도록 설계하고 최대지진 시 총 최대변위에서 안정성을 만족하도록 설계하여야 한다.

적층고무 면진장치는 ISO 22762-Part3:Building편의 설계원칙에 따라 아래와 같이 세부규격을 검토하는 것으로 한다.

㉮ 하중지지 유효면적 결정 : 관례적으로 적층고무 면진장치(RB, LRB, HDRB)는 설계변위에서 최상의 면진성능을 발휘하도록 고안된 장치로서 수직방향으로 상부하중을 지지하고 수평방향으로 최대변위까지 안전성을 확보하도록 수직 면압 6~12MPa에서 하중지지 유효면적을 결정한다.

㉯ 총고무두께(T_r) 결정 : 설계변위 시 수평강성을 만족하도록 총 고무높이를 조정하며 일반적으로 설계변위의 0.8~1.2배 정도로 결정한다.

㉰ 최대변위 시 안전성능 확보 : 최대지진 시 변위에서 지지의 안전성능은 한 층 고무두께에서 고무면적과 둘레면적의 비인 1차형상비(S_1)와 면진장치 직경과 총 고무두께의 비인 2차형상비(S_2)가 지지성능의 주요 변수이다. 최대지진 시 전단변위를 고려하여 총 고무높이의 200%까지는 고무의 파단 및 면진장치의 좌굴안전성능을 확보하도록 한다.

② 설계수정 단계

예비설계에서 선정된 각 면진장치의 힘-변위 특성을 근거로 전제 면진시스템을 구성하고 적당한 설계변위를 가정하여 면진층의 유효강성(K_{eff})과 면진주기(T_D) 및 설계변위(D_D)를 재산정하고, 시행착오법을 적용하여 반복계산에 의해 설계변위(D_D)를 결정한다.

면진장치의 타입시험을 수행하여 면진의 거동특성을 확보한다. 이 때 최적의 면진시스템을 구성하기 위하여 개별 면진장치의 규격을 변경해 가면서 설계수정 단계를 반복 수행하여 최종적으로 설계변위(D_D)를 결정한다.

③ 검증 단계

예비설계와 설계수정 단계를 거쳐서 선정된 면진시스템의 설계변위와 최대변위의 시스템특성을 이용하여 시간이력해석을 수행하여 검증한다. 면진장치의 현장적용 시 적합성을 검토하기 위하여 시방서 기준에 따른 성능시험 전수검사를 실시하며, 시공자와 감리자의 승인을 득한 후 현장적용을 확정하도록 한다.

(3) 지진응답해석에 의한 구조성능 검증

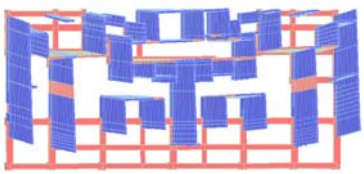
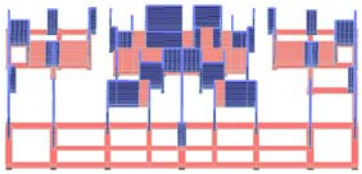
면진설계를 위해서는 면진장치가 설치되기 전 건물의 동적특성을 파악하여 설치될 면진장치와의 상호작용을 고려하여야 한다. 이는 면진장치가 상부 구조물의 강성분포나 질량분포에 따라 거동이 달라질 수 있고 지지 구조물의 비정형을 고려하여 배치하여야 하기 때문이다. 본 예제의 경우 면진장치의 적용에 따른 효과를 비 면진구조와 비교하기 위하여 비 면진 건물로 설계 시 지진하중을 표 3.2.7.3에 나타내었고, 이에 따른 건물의 기본적인 동적특성을 표 3.2.7.4에 나타내었다.

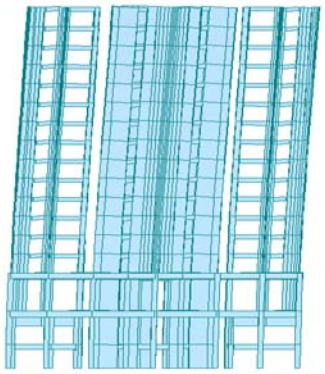
표 3.2.7.3 지진하중

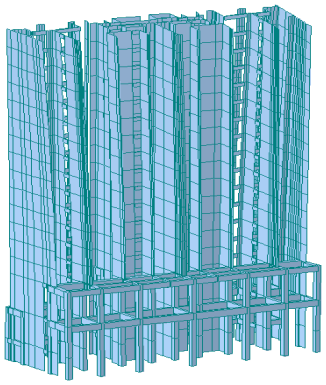
STORY NAME	STORY WEIGHT (KN)	STORY LEVEL (mm)	STORY FORCE (KN)	STORY SHEAR (KN)	OVERTURNING MOMENT (KN · mm)
Roof	54400	1475	780.7823	0	0
17F	51450	2900	976.3446	780.7823	2300000
16F	48600	2850	907.2763	1757.127	7300000
15F	45750	2850	844.7987	2664.403	15000000
14F	42900	2850	783.0206	3509.202	25000000
13F	40050	2850	721.9799	4292.222	37000000
12F	37200	2850	661.7196	5014.202	51000000
11F	34350	2850	602.2882	5675.922	68000000
10F	31500	2850	543.7419	6278.21	85000000
9F	28650	2850	486.1459	6821.952	100000000
8F	25800	2850	429.5772	7308.098	130000000
7F	22950	2850	374.1283	7737.675	150000000
6F	20100	2850	319.9123	8111.804	170000000
5F	17250	2850	267.072	8431.716	190000000
4F	14400	4275	453.757	8698.788	220000000
3F	8700	5400	232.7174	9152.545	270000000
2F	3600	4350	46.45168	9385.262	320000000
G.L.	0	1800	--	9431.714	350000000

표 3.2.7.4 모드별 진동주기 및 형상

Mode No.	Angular Freq. (rad/sec)	Frequency (cycle/sec)	Period (sec)
1	3.5181	0.5599	1.786
2	5.1723	0.8232	1.2148
3	6.7355	1.072	0.9328





Mode 1 | Mode 2 | Mode 3

(가) 목표 면진주기와 면진장치 설계

① 목표 면진주기의 설정

면진건물의 유효주기는 면진시스템의 변형특성을 이용하여 결정되어야 하며, 면진시스템의 변형특성을 결정짓는 목표 면진을 달성하기 위해 필연적으로 수반되어야 하는 면진 층의 최소 수평변위는 유효 주기에 의해 영향을 받게 되므로, 유효 주기와 면진시스템의 변형특성은 상호 연관된 순환 고리를 갖고 있어 어느 것을 먼저 결정하여야 하는 가에 대해서는 정답이 없다.

다만, 면진주기의 설정은 설계하고자 하는 건물의 성능을 결정하는 것이므로 성능설계의 관점에서는 설계절차에서 가장 선행되어야 하는 단계이고, 실무적으로도 목표 면진주기를 먼저 설정하고 설계변위와 최대변위, 그리고 수평력 등을

검토해 가는 과정으로 접근하는 것이 편리하기 때문에 엔지니어는 클라이언트와 협의하여 목표 면진주기를 먼저 설정해 둘 필요가 있다.

본 건물에서는 설계변위에서의 유효 면진주기는 3.0초로 가정하고, 최대변위에서의 유효 면진주기는 4.5초로 가정한다.

② 면진시스템의 유효 강성 결정

설계변위(D_D)와 최대변위(D_M)에서 면진건물의 유효 주기는 다음의 식(3.2.7.1)에 따라 면진시스템의 변형특성을 이용하여 결정되어야 하므로, 기 설정된 목표 면진주기를 이용하여 역으로 목표 면진주기를 만족시키기 위한 면진시스템의 변형특성(유효 강성)을 결정한다.

$$T_D(\text{or } T_M) = 2\pi\sqrt{\frac{W}{K_{Dmin}(\text{or } K_{Mmin})\cdot g}} \qquad (3.2.7.1)$$

$$K_{Dmin} = \frac{4\pi^2\cdot W}{T_D^2\cdot g} = 23.274 \text{ KN/mm}$$

$$K_{Mmin} = \frac{4\pi^2\cdot W}{T_M^2\cdot g} = 10.34 \text{ KN/mm}$$

여기서, W : 상부 건물의 유효 중량(=104,112.3 KN)

K_{Dmin} : 수평방향으로 설계변위에서 면진시스템의 유효강성

K_{Mmin} : 수평방향으로 최대변위에서 면진시스템의 유효강성

③ 면진장치 설계 및 면진시스템 구성

이전 단계에서 구한 면진시스템의 유효강성과 감쇠특성을 이용하여 중력, 횡력, 그리고 변위 요구조건에 적합하도록 면진장치를 설계한다. 또한 설계된 면진장치의 힘-변위 이력곡선을 설정한다. 이 이력곡선은 면진장치 제작자에 의해 제공된 비슷한 형태, 크기 혹은 특성을 갖는 면진장치의 실험결과에 기인할 수 있다. 지금 단계에서 가정된 이력특성은 실제 사용될 면진장치의 실험결과가 나왔을 때 최종 설계단계에서 확인되고 정정되어질 수 있다.

상기 조건에 따라 면진시스템의 구성요소로 결정된 면진장치는 복합면진장치 및 IRB 2종류이며, 각각 18개, 10개의 장치가 면진시스템의 구성을 위하여 사용되었다. 이러한 면진장치의 조합은 설정된 면진시스템의 주기, 강성 등의 조

건을 모두 만족하는 것으로 가정한다. 실제 면진설계 시에는 상부 구조물의 중력하중, 풍하중 등의 영향으로 면진 층의 주기가 예비설계 단계에서 가정된 주기를 정확히 구현하기는 현실적으로 어렵다고 볼 수 있다. 따라서 실제 설계 시에는 설계하중 조건과 구현 가능한 면진장치를 가지고 많은 반복해석 작업을 통하여 최적의 조합으로 설계하여야 한다.

(나) 풍하중 검토

표 3.2.7.5는 풍하중 적용 시 X방향, Y방향의 변위를 나타낸 것으로 풍하중에 대하여 면진 층이 항복하지 않아야 한다.

표 3.2.7.5 풍하중 적용 시 변위

Story	Level (mm)	Story Height (mm)	Maximum Displacement (mm)	
			X 방향	Y 방향
Roof	54400	1475	9.1668	13.3092
17F	51450	2900	8.5696	12.3719
16F	48600	2850	7.9848	11.4611
15F	45750	2850	7.3918	10.5454
14F	42900	2850	6.7909	9.6266
13F	40050	2850	6.1839	8.708
12F	37200	2850	5.5735	7.7937
11F	34350	2850	4.9636	6.8892
10F	31500	2850	4.3588	6.0011
9F	28650	2850	3.765	5.1369
8F	25800	2850	3.1886	4.3055
7F	22950	2850	2.6378	3.5166
6F	20100	2850	2.1197	2.7815
5F	17250	2850	1.6465	2.1108
4F	14400	4275	1.2323	1.5262
3F	8700	5400	0.5581	0.6375
2F	3600	4350	0.1384	0.148
G.L.	0	1800	0	0

○ 면진층 변위

- X방향 : 0.1348 mm < $_{W}D_{y}$ = 8.0mm(면진 층 항복변위) → O.K.
- Y방향 : 0.148 mm < $_{W}D_{y}$ = 8.0mm(면진 층 항복변위) → O.K.

(다) 최소 수평변위 산정

① 설계변위(D_D)

면진시스템은 다음의 식 (3.2.7.2)에 따라 구조물의 수평 주축방향으로 발생하는 최소 수평변위(D_D)를 견딜 수 있도록 설계되어야 한다.

$$D_D = \frac{g \cdot S_{D1} \cdot T_D}{4\pi^2 B_D} \qquad (3.2.7.22)$$

$$= \frac{9800 \cdot 0.23408 \cdot 3}{4\pi^2 \cdot 1.5} = 116.3325\,\text{mm} < \frac{D}{2} = \frac{1000}{2} = 500\text{mm} \rightarrow \text{O.K.}$$

여기서 g : 중력가속도, 설계 변위

S_{D1} : 주기 1초에서 설계 5%감쇠 스펙트럼의 가속도 변수

$= 1.6MA = 1.6 \times 1.33 \times 0.11 = 0.23408$

T_D : 고려 방향의 설계 변위에서 면진 구조물의 유효주기(=3.0초)

B_D : 면진시스템의 유효 감쇠(β_D)와 연관된 수치 계수, 본 예제에서는 20%의 유효 감쇠를 가정하여 아래 표 3.2.7.6으로부터 산정한다(=1.5)

표 3.2.7.6 Damping coefficient, B_D or B_M(ASCE7-05, Table 17.5-1)

Effective Damping, βD or βM (percentage of critical)	BD or BM Factor
≤2	0.8
5	1.0
10	1.2
20	1.5
30	1.7
40	1.9
≥50	2.0

D_D는 면진 층의 강성중심에서의 설계변위를 나타내는 것으로, 만약 이 값이 현재 프로젝트에서 허용하는 값보다 큰 경우 면진시스템의 강성을 증가시켜야 한다.

② 전체 설계변위(D_{TD})

면진시스템의 전체 설계변위는 면진시스템의 수평강성 분포와 편심질량의 가장 불리한 위치로부터 계산된 실제 또는 우발적인 비틀림에 의한 부가 변위를 포함해야 하며, $1.1D_D$ 이상의 값을 갖도록 설계되어야 한다. 본 예제에서는 횡력이 가해지는 방향과 직각을 이루는 평면길이의 5%가 부가적인 우발 편심으로 작용하는 것으로 고려한다.

$$D_{TD} = D_D[1 + \frac{12e}{b^2 + d^2}] \geq 1.1D_D \qquad (3.2.7.3)$$

$$D_{TD} = 116.33 \times [1 + \frac{12 \times 1,200}{34160 + 14775}] = 150.56\text{mm} > 127.96\text{mm} \rightarrow \text{O.K.}$$

$$< \frac{D}{2} = \frac{1000}{2} = 500\text{mm} \rightarrow \text{O.K.}$$

③ 최대변위(D_M)

구조물의 붕괴방지를 고려하기 위해 최대 고려지진(Maximum Considered Earthquake, MCE)에 대한 검토가 수행되어야 한다.

$$D_M = \frac{g \cdot S_{M1} \cdot T_M}{4\pi^2 B_M} \qquad (3.2.7.4)$$

$$D_M = \frac{9,800 \cdot 0.35112 \cdot 4.5}{4\pi^2 \cdot 1.5} = 261.75\ \text{mm}$$

여기서 g : 중력가속도, 설계 변위

S_{M1} : 주기 1초에서 5%감쇠 응답가속도 변수($= S_{D1} \times \frac{3}{2} = 0.35112$)

T_M : 최대변위에서 면진건물의 유효주기(=4.5초)

B_M : 최대변위에서 면진시스템의 유효감쇠 β_M과 관련된 수치계수 (표 3.2.7.6 참조)

④ 전체 최대변위(D_{TM})

설계변위에서와 같이 횡력이 가해지는 방향에 대해 직각을 이루는 평면길이의 5%가 부가적인 우발편심에 의한 비틀림으로 작용하는 것으로 고려한다.

$$D_{TM} = D_M [1 + \frac{12e}{b^2 + d^2}] > 1.1 D_M \quad (3.2.7.5)$$

$$D_{TD} = 264.75 \times [1 + \frac{12 \times 1,200}{34160 + 14775}] = 342.66\text{mm} > 291.23\text{mm} \rightarrow \text{O.K.}$$

(라) 최소 수평지진력 산정

① 면진 층과 면진 층 하부구조

면진 층과 면진 층 하부구조 요소는 식 (3.2.7.6)으로 산정되는 최소 수평지진력(V_b)에 견디도록 설계되어야 한다.

$$V_b = K_{Dmax} \cdot D_D \quad (3.2.7.6)$$

$$V_b = 27.274 \times 116.33 = 3,172.78\ \text{KN}$$

② 면진 층 상부구조

면진 층 상부구조는 식 (3.2.7.7)로 산정되는 최소 수평지진력(V_s)에 견디도록 설계되어야 한다.

$$V_s = \frac{K_{Dmax} \cdot D_D}{R_I} \quad (3.2.7.7)$$

$$V_s = \frac{27.274 \times 1.2 \times 116.33}{1.125} = 3,384.303\ \text{KN}$$

여기서, V_s는 다음 값들보다 작지 않아야 한다.

1. 기초 고정이고 무게가 W, 주기가 TD인 시스템에 가해지는 횡지진력 → 3015.86
2. 설계 바람하중에 의한 밑면전단력 → 2302.5 KN
3. 면진장치가 완전히 작동되는데 필요한 횡지진력의 1.5배, 만약 Vb나 Vs 값이 현재 과제에서 허용하는 값보다 큰 경우 → 3453.75 KN

참고로 K_{Dmax}는 면진장치의 강성변동으로 인한 영향을 반영하기 위한 것으로, 본 예제에서는 K_{Dmin}의 1.2배를 고려하여 적용하였으며, R_I값은 기초고정 건물의 내진설계 시 도입된 R값의 3/8을 취하되, 1.0 이상 2.0 이하로 한다 (ASCE7-05, 17.5.4.2).

(마) 상부구조 설계

면진 층 상부구조는 전절에서 구한 최소 수평지진력(V_s)을 식 (3.2.7.8)을 이용하여 건물의 높이를 따라 분배하여 설계한다.

$$F_x = V_s \frac{h_x w_x}{\sum_{i=1}^{N} w_i h_i} \qquad (3.2.7.8)$$

여기서, h_x, h_i : 면진장치로부터 레벨 x, i까지의 높이,

w_x, w_i : 면진장치로부터 각각 레벨 x, i에 위치한 층 중량

표 3.2.7.6은 식 (3.2.7.8)에 따른 하중분배 결과와 이를 이용하여 상부구조를 설계한 면진 구조물과 비면진구조물에 대하여 해석한 층간변위 결과를 나타낸 것이다. 층간변위의 경우 허용층간변위 $0.015\,h_x$/RI를 초과해서는 안 된다. 비면진 구조물의 경우에는 허용층간변위를 초과하는 경우가 발생하지만 면진구조물의 경우는 면진 층을 제외한 모든 층에서 허용층간변위를 만족하는 것으로 나타났다.

(바) 시간이력 해석 및 설계

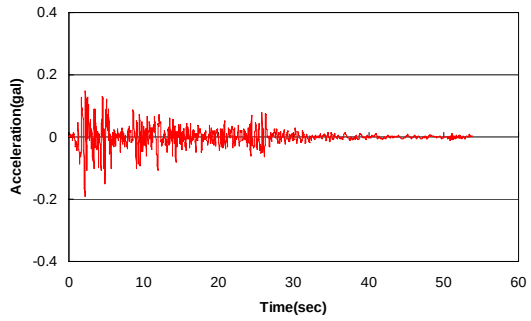
전술한 바와 같이 면진설계는 기본적으로 응답제어 설계이므로 등가수평력 해석으로 설계한 경우라도 경계비선형 동적해석을 통하여 검토를 수행하는 것이 바람직하다. 다만 특수한 조건 하에서는 등가수평력 해석이나 응답스펙트럼 해석에 의한 설계를 할 수 있다.

비선형 동적해석 시 구조물은 지진파의 특성에 따라 다양한 응답을 보이며 해당 구조물에 입력될 지진의 동적특성을 정확히 예측하여 구조물을 해석한다는 것은 불가능하기 때문에, 최소한의 제한조건을 기준에서 명시하고 있다. 대부분 이러한 제한조건은 등가수평하중 해석에 근거를 두고 있기 때문에 등가수평력 해석도 반드시 필요하다고 할 수 있다.

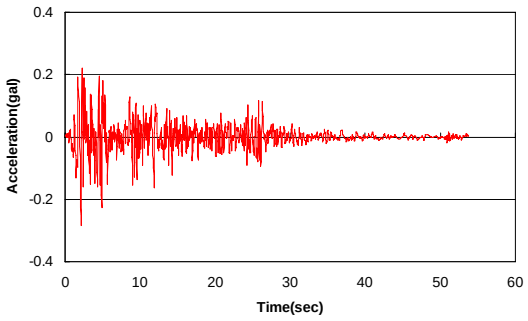
본 건물은 전술된 바와 같이 등가수평력 해석을 수행하기 위한 제한조건을 만족시키지 못함으로 시간이력 해석을 반드시 수행해야 하며, 이 결과를 이용하여 설계하여야 하나 여기서는 설계대상 건물이 정형구조물이므로 등가수평력 해석에 의한 결과가 어느 정도 신뢰성을 가질 것으로 기대하여 시간이력해석 결과와 비교하여 설계결과를 검토하고, 수정·보완하는 것으로 한다.

① 입력지진동

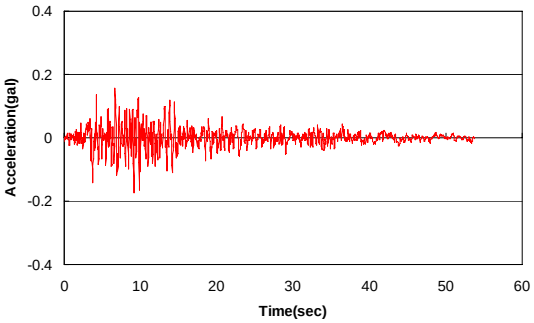
본 건물에서는 ASCE7-05 17.6.3.4절의 규정에 따라 El Centro NS, TAFT EW, KOBE NS의 3개 지진동을 입력지진파로 사용하고, 해당지반에 적합하게 EPA를 조절하여 DBE수준과 MCE수준의 해석을 실시하였다. 그림 3.2.7.5와 그림 3.2.7.6은 해석에 사용된 3개 지진파의 시간이력과 응답스펙트럼을 각각 나타낸 것이다.



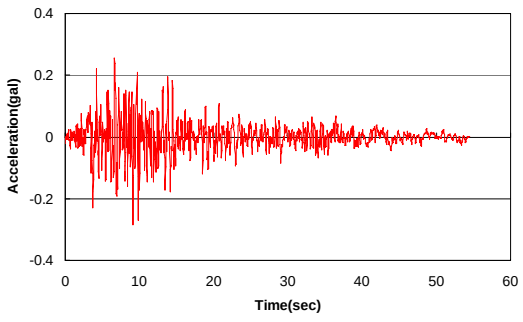
(a) El Centro NS (DBE)



(b) El Centro NS (MCE)

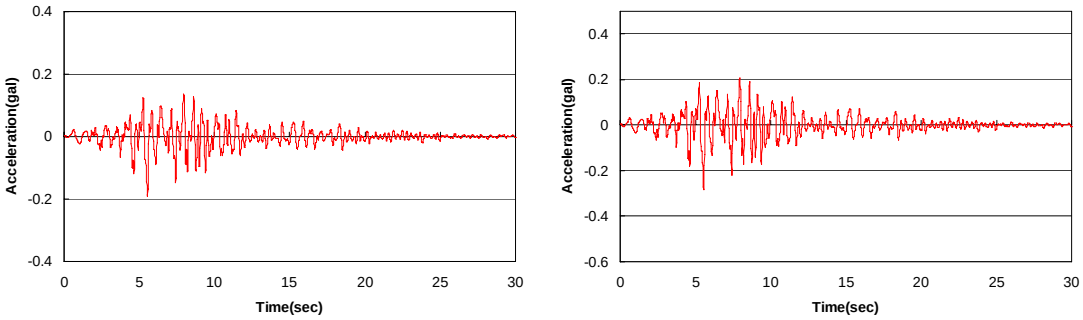


(c) TAFT EW (DBE)



(d) TAFT EW (MCE)

그림 3.2.7.5 입력지진동의 시간이력(계속)



(e) KOBE NS (DBE)　　(f) KOBE NS (MCE)

그림 3.2.7.5 입력지진동의 시간이력

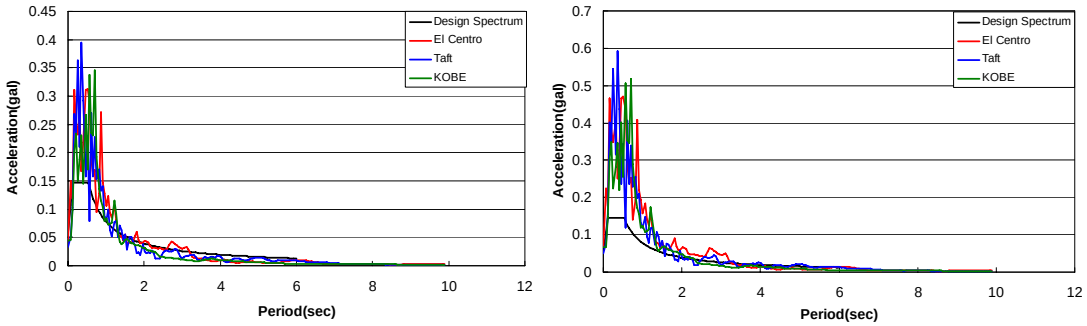


그림 3.2.7.6 가속도의 진동수 성분

② 비 면진건물과 면진건물의 해석결과 비교 - 수평변위 검토

표 3.2.7.6은 면진과 비 면진의 경우 해석결과를 비교하여 정리한 것이며, 그림 3.2.7.7은 이를 도식화하여 나타낸 것이다.

또한 면진일 경우 DBE에서 최대변위는 X방향 220.17mm, Y방향 212.14mm이고, MCE에서 최대변위는 X방향 289.29mm, Y방향 276.53mm로 등가수평력 해석에서 산정된 값인 116.33mm 및 264.75mm와 비교 하였을 때 DBE 수준에서는 X방향의 경우 약 53%, Y방향은 55%로 산정되었고 MCE 수준에서는 X방향은 약 91%, Y방향은 96%의 수준으로 산정되었다.

하지만, 등가수평력 해석은 정밀한 해석이 아님으로 다소 보수적인 결과가 산정된 것으로 판단되며, 결과적으로 최소 수평변위는 충분히 안전 측으로 확보되도록 설계되었음을 확인할 수 있다.

표 3.2.7.6 시간이력 해석에 의한 수평변위 (㎜)

Story	Level (㎜)	DBE											
		X방향						Y방향					
		비면진			면진			비면진			면진		
		El Centro	TAFT	KOBE	El Centro	TAFT	KOBE	El Centro	TAFT	KOBE	El Centro	TAFT	KOBE
Roof	54400	134.36	142.35	106.58	156.88	220.17	100.92	88.96	121.29	83.95	155.39	212.14	97.82
17F	51450	117.49	129.54	102.79	156.95	219.22	100.46	70.51	106.90	76.58	154.79	211.65	97.61
16F	48600	103.53	114.96	98.89	156.75	218.19	99.98	66.74	94.97	70.48	154.23	211.09	97.36
15F	45750	92.34	101.02	91.98	156.40	217.15	99.47	62.73	84.84	67.35	153.68	210.50	97.07
14F	42900	83.01	87.85	84.38	155.94	216.09	98.92	58.26	76.47	64.40	153.13	209.89	96.76
13F	40050	75.49	75.69	77.99	155.38	214.99	98.34	53.54	68.81	60.38	152.61	209.26	96.43
12F	37200	69.79	64.69	74.85	154.72	213.84	97.71	48.59	61.16	55.32	152.09	208.63	96.07
11F	34350	64.37	54.88	70.05	153.99	212.64	97.08	43.42	53.43	49.38	151.59	207.99	95.70
10F	31500	58.52	46.08	63.57	153.20	211.41	96.42	38.11	45.81	43.79	151.09	207.36	95.32
9F	28650	52.16	38.09	55.79	152.37	210.17	95.75	32.76	38.57	38.95	150.59	206.74	94.95
8F	25800	45.36	31.33	47.29	151.52	208.94	95.08	27.51	31.77	33.64	150.11	206.13	94.58
7F	22950	38.30	25.97	38.65	150.67	207.74	94.41	22.43	25.53	28.08	149.64	205.52	94.22
6F	20100	31.20	22.17	30.42	149.84	206.60	93.79	17.62	19.81	22.49	149.20	204.94	93.88
5F	17250	24.40	18.40	23.04	149.05	205.53	93.20	13.22	14.73	17.11	148.78	204.39	93.56
4F	14400	18.11	14.75	16.94	148.31	204.54	92.66	9.38	10.37	12.29	148.40	203.90	93.28
3F	8700	7.93	6.87	7.38	147.05	202.87	91.76	3.85	4.23	5.08	147.80	203.10	92.86
2F	3600	1.88	1.65	1.75	146.22	201.76	91.20	0.88	0.97	1.16	147.45	202.62	92.61
1.5	600	0.94	0.82	0.88	145.85	201.24	90.96	0.44	0.48	0.58	147.30	202.42	92.52
G.L.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

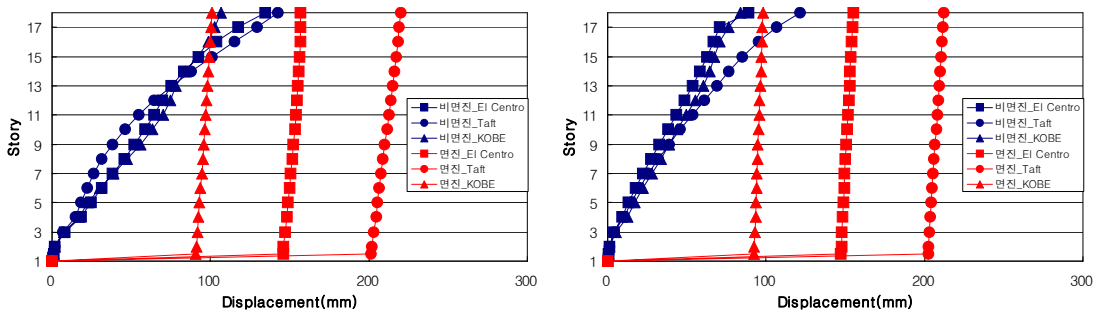


그림 3.2.7.7 면진과 비면진 건물의 수평변위 비교 [DBE]

표 3.2.7.7 시간이력 해석에 의한 수평변위 (㎜)

Story	Level (㎜)	MCE											
		X방향						Y방향					
		비면진			면진			비면진			면진		
		El Centro	TAFT	KOBE	El Centro	TAFT	KOBE	El Centro	TAFT	KOBE	El Centro	TAFT	KOBE
Roof	54400	200.52	213.52	160.72	236.68	289.29	150.36	133.61	181.37	126.69	234.75	276.53	145.82
17F	51450	175.54	194.46	153.29	236.79	288.14	149.69	106.41	160.14	114.59	233.99	276.02	145.53
16F	48600	154.81	172.68	148.11	236.49	286.84	148.98	100.76	142.36	105.58	233.23	275.40	145.17
15F	45750	138.10	151.81	138.21	236.01	285.54	148.22	94.77	127.15	101.78	232.46	274.71	144.75
14F	42900	124.17	132.07	127.07	235.40	284.24	147.42	88.04	114.54	97.30	231.70	273.99	144.29
13F	40050	112.91	113.81	117.37	234.65	282.91	146.56	80.91	103.18	91.25	230.96	273.25	143.80
12F	37200	104.32	97.29	112.73	233.78	281.50	145.65	73.44	91.78	83.57	230.24	272.51	143.28
11F	34350	96.16	82.56	105.51	232.78	280.02	144.70	65.63	80.30	74.64	229.54	271.78	142.75
10F	31500	87.40	69.33	95.85	231.70	278.49	143.74	57.61	68.90	65.40	228.86	271.06	142.21
9F	28650	77.88	57.31	84.15	230.56	276.95	142.76	49.57	58.11	58.13	228.20	270.35	141.68
8F	25800	67.72	47.04	71.40	229.41	275.43	141.78	41.64	47.93	50.21	227.57	269.64	141.16
7F	22950	57.17	38.35	58.44	228.27	273.97	140.81	33.94	38.53	41.91	226.95	268.95	140.65
6F	20100	46.57	32.77	46.04	227.16	272.59	139.90	26.70	29.94	33.55	226.36	268.28	140.16
5F	17250	36.43	27.09	34.90	226.12	271.30	139.06	20.03	22.27	25.53	225.79	267.64	139.71
4F	14400	27.03	21.77	25.65	225.14	270.11	138.28	14.21	15.68	18.33	225.27	267.04	139.30
3F	8700	11.85	10.15	11.19	223.45	268.07	137.00	5.83	6.40	7.58	224.43	266.08	138.69
2F	3600	2.81	2.44	2.66	222.29	266.69	136.18	1.33	1.46	1.73	223.92	265.48	138.33
1.5	600	1.41	1.22	1.33	221.72	266.00	135.83	0.67	0.73	0.87	223.69	265.21	138.19
G.L.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

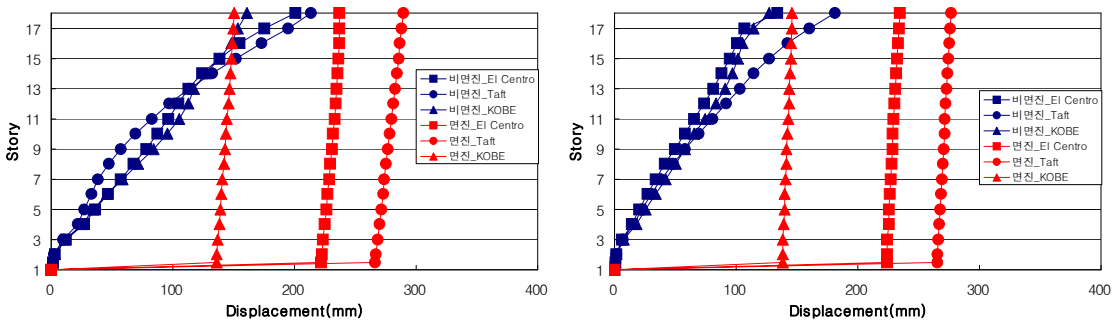


그림 3.2.7.8 면진과 비면진 건물의 수평변위 비교 [MCE]

③ 비 면진건물과 면진건물의 해석결과 비교 - 층가속도 검토

각 층의 응답가속도를 표 3.2.7.8과 그림 3.2.7.9에 나타내었다. 각 층의 응답가속도 분포를 비교한 그림 3.2.7.9를 보면, 비 면진건물의 경우 상부 층으로 갈수록 응답가속도가 증가하는 양상을 보이고 있는 반면, 면진건물의 경우에는 각 층의 응답가속도가 거의 일정한 분포를 나타내고 있다.

지진에 의한 사용성은 가속도에 지배를 받기 때문에 가속도 응답의 저감은 입력에너지의 감소와 더불어 지진 하중 시에 발생할 수 있는 비구조물의 비산과 전도를 방지하여 2차 피해를 예방할 수 있는 효과가 있다. 따라서 면진을 적용하여 본 구조물의 사용성과 안전성을 증가시키는 효과가 있음을 알 수 있다.

또한 모든 지진파에 대하여 면진건물의 최대 응답가속도가 기초고정 구조물의 최대 응답가속도 보다 현저하게 감소하는 경향을 보이고 있는데, 설계입력가속도 DBE Level에서는 X 및 Y방향 모두 약 1/4 ~ 1/8로, 최대입력가속도 MCE Level에서는 X 및 Y방향 모두 약 1/5 ~ 1/10의 감소를 나타내었다. 이러한 가속도의 감소는 결국 상부구조에서 설계전단력의 감소를 의미함으로 면진구조의 우수함을 충분히 확인할 수 있다.

표 3.2.7.8 시간이력 해석에 의한 층별 가속도 (㎜/sec^2)

Story	Level (㎜)	DBE											
		X방향						Y방향					
		비면진			면진			비면진			면진		
		El Centro	TAFT	KOBE	El Centro	TAFT	KOBE	El Centro	TAFT	KOBE	El Centro	TAFT	KOBE
Roof	54400	485.08	458.14	549.07	17.27	17.66	25.59	517.75	625.71	533.53	10.33	13.48	9.27
17F	51450	329.45	439.44	309.01	15.10	15.72	17.67	290.89	301.52	442.36	10.37	13.48	9.37
16F	48600	262.76	243.95	250.62	13.03	14.41	13.60	190.65	374.28	360.58	10.41	13.50	9.37
15F	45750	228.47	296.78	236.32	10.86	13.64	13.88	233.78	369.23	321.64	10.44	13.53	9.22
14F	42900	226.75	225.71	229.17	9.95	13.50	15.05	178.05	322.17	367.71	10.42	13.55	9.07
13F	40050	196.45	224.28	218.07	10.41	13.35	15.02	239.99	220.30	246.02	10.36	13.57	8.95
12F	37200	192.00	225.51	247.23	10.78	13.37	14.35	248.54	283.32	288.13	10.26	13.60	9.10
11F	34350	190.50	227.95	183.69	10.90	13.37	13.39	235.50	183.37	221.19	10.10	13.65	9.36
10F	31500	182.89	249.87	195.78	10.81	13.39	12.19	214.49	211.10	232.28	9.87	13.70	9.50
9F	28650	178.60	192.04	246.44	10.60	13.47	10.86	234.31	313.32	340.50	9.56	13.76	9.82
8F	25800	170.39	236.76	157.28	10.35	13.54	9.54	162.70	194.35	204.32	9.20	13.83	10.06
7F	22950	170.22	211.91	146.86	10.11	13.59	9.33	144.15	175.31	179.88	9.75	13.90	10.16
6F	20100	170.15	265.05	194.62	9.95	13.63	10.23	196.70	215.58	233.11	10.30	13.97	10.11
5F	17250	165.78	259.36	181.25	9.80	13.65	11.30	185.39	203.09	222.89	10.84	14.11	10.32
4F	14400	160.75	198.23	133.89	9.82	13.66	12.06	133.84	154.69	154.21	11.36	14.27	10.67
3F	8700	145.33	167.90	134.94	10.00	13.63	12.64	145.33	167.90	134.94	11.86	14.47	11.71
2F	3600	121.65	148.06	127.70	10.12	13.58	12.67	122.54	153.86	132.99	12.30	14.78	12.90
1.5	600	119.73	153.51	120.82	10.04	13.52	12.37	118.53	143.26	130.33	12.97	15.17	15.57
G.L.	0	117.82	158.96	113.95	145.33	167.90	134.94	114.52	132.66	127.67	145.33	167.90	134.94

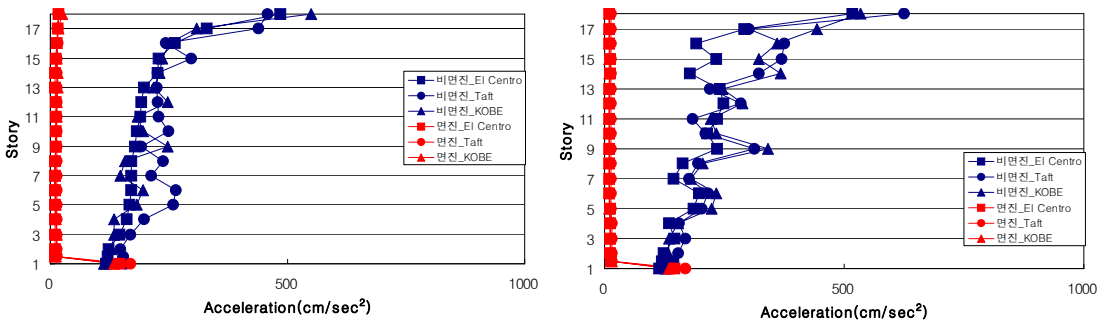


그림 3.2.7.9 면진과 비면진 건물의 층별 가속도 비교 [DBE]

표 3.2.7.9 시간이력 해석에 의한 층별 가속도 (㎜/sec^2)

Story	Level (㎜)	MCE											
		X방향						Y방향					
		비면진			면진			비면진			면진		
		El Centro	TAFT	KOBE	El Centro	TAFT	KOBE	El Centro	TAFT	KOBE	El Centro	TAFT	KOBE
Roof	54400	722.60	692.98	827.35	24.19	24.65	37.30	780.50	951.32	797.42	17.23	20.63	23.17
17F	51450	494.08	655.02	467.93	21.09	22.26	25.69	438.37	445.61	665.94	16.57	19.25	19.17
16F	48600	345.62	446.10	356.72	17.92	20.31	19.45	354.28	550.90	486.85	16.01	18.79	17.35
15F	45750	393.68	365.44	375.32	14.67	18.58	19.70	287.40	565.03	540.91	15.35	18.46	15.71
14F	42900	339.49	340.08	344.77	13.20	17.18	21.37	266.94	489.98	553.60	14.64	18.18	14.38
13F	40050	270.36	289.18	370.26	13.82	17.02	21.32	353.82	469.77	514.31	13.89	17.90	14.04
12F	37200	284.81	336.64	373.06	14.35	17.10	20.35	377.76	426.20	436.75	13.13	17.61	14.02
11F	34350	292.57	337.53	331.03	14.52	17.05	18.98	360.94	332.41	369.57	12.38	17.32	13.82
10F	31500	285.52	338.73	275.71	14.41	16.93	17.26	355.40	274.54	331.74	12.66	17.20	13.43
9F	28650	274.33	372.64	294.99	14.11	16.95	15.35	324.58	316.98	348.41	13.08	17.11	13.33
8F	25800	253.95	395.93	294.63	13.76	17.03	13.43	295.28	324.37	349.43	13.40	17.05	13.10
7F	22950	246.69	388.45	275.39	13.45	17.10	12.81	278.82	302.98	333.99	13.62	16.99	12.71
6F	20100	254.21	355.32	240.17	13.23	17.17	14.25	245.33	290.88	306.43	13.76	16.95	12.54
5F	17250	254.77	318.20	221.50	13.03	17.22	15.79	216.26	263.17	269.74	13.85	16.92	12.75
4F	14400	241.72	297.84	201.64	13.08	17.25	16.90	201.49	232.73	231.45	13.88	16.90	13.00
3F	8700	176.84	238.62	171.32	13.41	17.24	17.74	172.91	200.07	191.98	13.84	16.88	13.24
2F	3600	182.42	222.30	191.63	13.59	17.20	17.77	183.79	230.60	199.62	13.79	16.88	13.26
1.5	600	200.20	237.06	197.01	13.48	17.13	17.33	200.89	241.21	201.01	13.74	16.89	13.11
G.L.	0	217.99	251.82	202.40	217.99	251.82	202.40	217.99	251.82	202.40	217.99	251.82	202.40

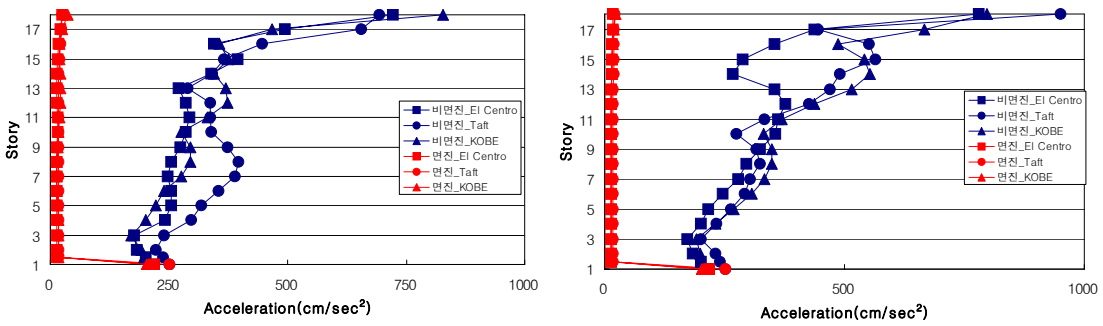


그림 3.2.7.10 면진과 비면진 건물의 층별 가속도 비교 [MCE]

④ 비 면진건물과 면진건물의 해석결과 비교 - 층 전단력 검토

각 층의 층 전단력을 표 3.2.7.10과 그림 3.2.7.11에 나타내었다. 해석결과, 층 전단력은 DBE수준에서 EL Centro 지진과 Taft 지진의 경우 기초고정 건물과 비교하여 면진건물이 X방향은 각각 82%, 73% 감소하는 것으로 나타났고, Y방향은 각각 84%, 74%로 나타났으며, Northrdige 지진에서는 X방향은 88%, Y방향은 88%의 감소효과가 있는 것으로 나타났다. 또한, MCE수준에서는 EL Centro 지진과 Taft 지진의 경우 X방향은 각각 85%, 82% 감소하는 것으로 나타났고, Y방향은 87%, 86% 감소하는 것으로 나타났다. Northrdige 지진에서는 X방향 및 Y방향 모두 약 93% 감소하는 것으로 나타났다. 이는 지진파별로 다소간 차이는 있으나 면진으로 인한 층 전단력의 감소결과는 결국 상부 구조의 부재설계에 있어서 작용하는 하중의 감소를 의미하므로 상부구조를 보다 경제적으로 설계할 수 있음을 의미한다.

표 3.2.7.10 시간이력 해석에 의한 층전단력 (kN)

Story	Level (㎜)	DBE											
		X방향						Y방향					
		비면진			면진			비면진			면진		
		El Centro	TAFT	KOBE	El Centro	TAFT	KOBE	El Centro	TAFT	KOBE	El Centro	TAFT	KOBE
Roof	54400	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17F	51450	2228.00	2716.00	2502.80	180.92	184.75	173.46	2821.90	2826.50	2085.70	171.76	159.65	153.68
16F	48600	3253.40	3661.60	3776.70	268.99	281.16	238.28	4760.00	3473.00	3326.50	267.39	258.66	218.91
15F	45750	3150.60	3678.60	4085.40	341.81	372.35	290.80	6092.20	4994.80	4441.80	364.27	353.81	273.81
14F	42900	4029.60	4236.20	3989.50	405.01	462.33	340.24	6403.70	6063.10	5600.20	455.65	443.00	322.54
13F	40050	4572.60	4548.20	3915.60	462.76	552.38	397.35	5842.90	6815.50	6521.90	539.26	526.46	369.67
12F	37200	4850.00	4716.60	4231.30	516.15	641.14	461.53	5076.90	7447.80	6945.60	614.98	605.83	418.67
11F	34350	5029.40	4781.80	4888.20	564.16	726.13	523.01	4917.80	7835.30	6947.40	683.95	683.45	469.04
10F	31500	5105.70	4927.00	5100.80	605.62	805.40	577.49	5790.60	8829.80	7024.10	747.76	761.76	518.59
9F	28650	5024.80	5117.70	5193.10	641.00	878.46	623.87	6611.50	9552.00	8058.10	808.06	842.97	565.91
8F	25800	5014.00	5236.80	6010.70	685.54	946.35	662.45	7320.10	9928.20	8865.30	866.38	928.76	610.43
7F	22950	5541.90	5236.10	6790.40	749.38	1011.20	694.59	7924.60	10097.00	9397.80	923.90	1020.10	652.10
6F	20100	6142.80	5296.30	7291.70	814.66	1086.00	722.26	8460.80	10227.00	9814.10	981.45	1117.40	691.10
5F	17250	6800.60	5292.40	7546.20	882.51	1170.40	747.38	8946.20	10431.00	10870.00	1040.00	1220.50	728.00
4F	14400	7355.50	5075.20	7639.20	1033.70	1368.60	800.34	9366.40	10671.00	11740.00	1165.70	1447.60	803.23
3F	8700	8276.90	6421.50	7795.20	1191.70	1593.40	853.56	10065.00	11173.00	13121.00	1288.50	1671.30	870.87
2F	3600	8668.30	7484.30	8070.50	1750.10	2414.90	1091.60	10354.00	11392.00	13669.00	1767.60	2429.00	1110.20
1.5	600	8694.75	7558.70	8091.05	1659.95	2245.00	1069.85	10373.00	11416.50	13704.50	1675.15	2258.85	1087.25
G.L.	0	8721.20	7633.10	8111.60	1569.80	2075.10	1048.10	10392.00	11441.00	13740.00	1582.70	2088.70	1064.30

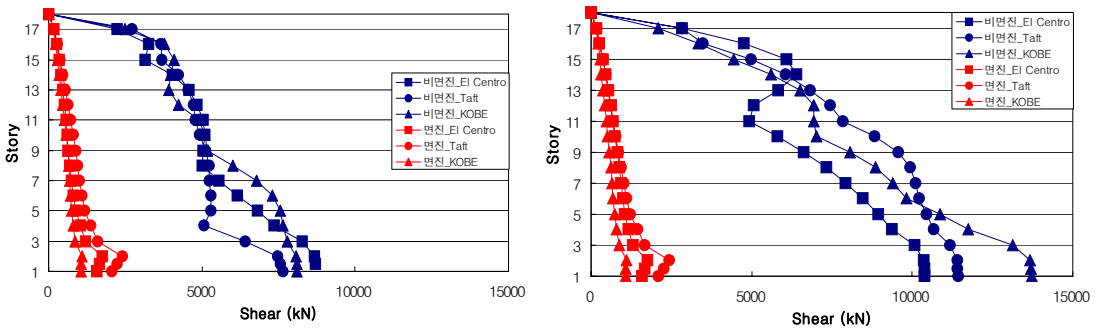


그림 3.2.7.11 면진과 비면진 건물의 층별 가속도 비교 [DBE]

표 3.2.7.11 시간이력 해석에 의한 층전단력 (kN)

Story	Level (㎜)	MCE											
		X방향						Y방향					
		비면진			면진			비면진			면진		
		El Centro	TAFT	KOBE	El Centro	TAFT	KOBE	El Centro	TAFT	KOBE	El Centro	TAFT	KOBE
Roof	54400	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17F	51450	3329.70	4060.60	3730.00	238.56	234.46	246.14	4209.30	4209.80	3144.20	230.00	190.23	229.20
16F	48600	4884.70	5496.80	5643.60	350.16	353.48	336.48	7114.70	5159.00	4995.40	362.67	314.66	326.74
15F	45750	4654.40	5509.10	6128.20	440.03	463.73	408.95	9147.70	7465.80	6529.50	494.84	432.02	408.70
14F	42900	5976.30	6350.50	6003.80	522.40	573.20	479.10	9638.20	9095.30	8461.40	617.10	538.37	481.10
13F	40050	6809.40	6825.10	5893.70	604.47	684.79	564.42	8818.30	10192.00	9863.30	725.26	634.25	550.32
12F	37200	7237.90	7084.30	6322.50	684.53	796.08	660.31	7667.80	11152.00	10536.00	820.40	722.85	620.75
11F	34350	7505.70	7186.00	7303.10	756.14	902.15	750.52	7429.30	11746.00	10567.00	905.76	808.61	691.94
10F	31500	7617.20	7394.30	7615.50	814.08	998.97	829.15	8729.50	13164.00	10512.00	985.50	896.12	761.46
9F	28650	7509.20	7684.90	7789.80	857.61	1085.30	894.33	9967.00	14279.00	12141.00	1063.70	989.36	827.62
8F	25800	7379.00	7864.10	9032.80	897.93	1163.30	947.55	11032.00	14875.00	13365.00	1143.80	1091.50	890.26
7F	22950	8171.20	7864.60	10210.00	978.40	1237.10	991.39	11955.00	15157.00	14188.00	1228.10	1204.30	949.53
6F	20100	9171.40	7926.50	10977.00	1063.70	1311.70	1029.60	12787.00	15392.00	14702.00	1318.10	1328.80	1005.90
5F	17250	10153.00	7926.50	11377.00	1159.00	1412.30	1065.60	13538.00	15723.00	16221.00	1414.50	1464.50	1060.00
4F	14400	10977.00	7616.90	11535.00	1388.30	1669.10	1145.60	14174.00	16106.00	17516.00	1629.90	1772.90	1172.70
3F	8700	12356.00	9461.40	11803.00	1659.80	1988.70	1233.80	15251.00	16891.00	19574.00	1849.00	2089.00	1277.50
2F	3600	12945.00	11049.00	12230.00	2660.60	3192.00	1629.90	15687.00	17228.00	20392.00	2684.30	3182.50	1658.30
1.5	600	12985.00	11161.00	12261.00	2392.40	2846.75	1562.05	15715.00	17253.00	20445.00	2410.55	2842.70	1586.50
G.L.	0	13025.00	11273.00	12292.00	2124.20	2501.50	1494.20	15743.00	17278.00	20498.00	2136.80	2502.90	1514.70

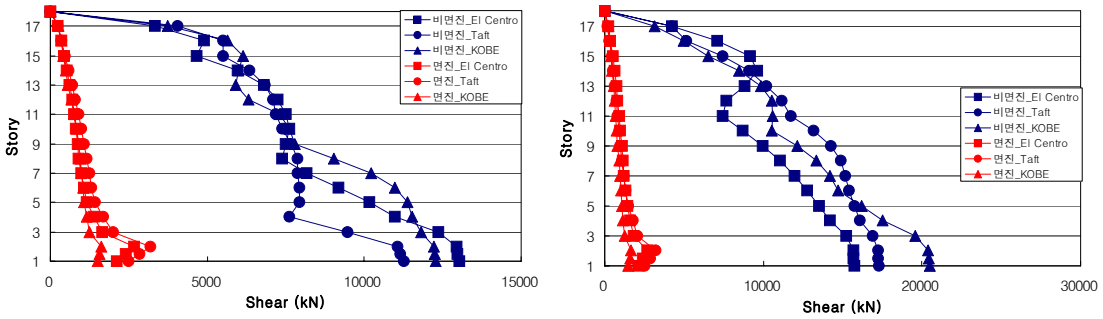


그림 3.2.7.12 면진과 비면진 건물의 층별 가속도 비교 [MCE]

다. 면진구조 APT의 경제성 시공성 평가

(1) 기존 내진구조시스템과 경제성 비교 평가

(가) 일반사항

본 장에서는 현행 내진기준(KBC2005)에 따른 구조설계와 면진설계의 차이가 골조의 물량에 미치는 영향을 비교・검토하여 경제성의 관점에서 면진구조의 효과를 검토할 것이다. 본 검토에서는 구조체의 단면은 그대로 유지하는 조건에서 각 구조 부재의 배근물량을 비교한 결과가 제시될 것이다.

면진구조는 지반으로부터 전달되는 지진에너지를 면진 층에서의 비탄성거동에 의해 흡수함으로서 지진하중이 상부구조로 거의 전달되지 않도록 설계하는 기술로서, 개념적으로는 상부골조에서의 골조물량 감소가 기대된다. 다만, 면진구조는 면진층을 기준으로 상・하부 구조가 분리되어야 함으로 지지기반을 형성하기 어려운 코어 부분에서의 처리방법에 따라 많은 물량의 차이를 가져올 수 있으며, 특히 상・하부 구조 형식이 달라지는 전이층의 경우에는 층 형상에 따라 골조물량이 상당히 증가할 것으로 예상된다. 또한 면진구조는 일반 내진구조와는 달리 면진층에서 면진장치라는 특수한 장치의 사용이 필요함으로 순수 골조비용과 함께 면진장치라는 추가적인 비용의 증가가 필요하므로 면진장치의 배치 및 개소, 구조형식의 변경에 의한 면진장치의 증감 등 다양한 시각에서 접근할 필요가 있으며, 설계자에 의해 면밀히 검토되고 판단되어야 한다.

따라서 본 장에서는 경제성의 관점에서 이러한 문제들을 총체적으로 검토하고자 하며, 본 항목의 분석을 통해 도출된 결과는 향후 실무적용을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

(나) 내진설계와 면진설계의 골조물량 비교

내진설계는 앞 절에서 제시된 하중과 같이 KBC2005 기준에 따라 중력하중, 풍하중 및 지진하중을 적용하여 설계를 수행하였으며, 면진설계는 면진에 의하여 상부로 전달되는 지진하중이 최소화 되었다는 조건 하에서 중력하중 및 풍하중과 동일한 레벨의 지진하중이 작용하는 조건으로 1차 설계를 수행하였으며, 풍하중에 의한 밑면전단력과 전도모멘트 및 슬래브 부재력을 비교하여 부재력의 차이가 10%를 초과하지 않는 조건 하에서 지진하중의 비를 산정함으로서 골조의 물량 증가를 최소화할 수 있는 지진하중 비(면진의 목표 하중비)를 역으로 산정하여 구조설계를 진행하였다.

표 3.2.7.12 물량 비교

		내 진 (kN)	면 진 (kN)	증감량 (kN)	증감율 (%)	점유율 (%)
슬 래 브		767.63	767.63	-	-	21.64
보	전이보 (주 근)	159.47	110.21	49.26	30.89	-
	전이보 (스터럽)	83.60	55.56	28.04	33.54	-
	일 반 보	98.01	91.46	6.55	6.68	-
	인 방 보	84.56	65.06	19.50	23.06	-
	소 계	425.63	322.29	103.35	24.28	12.00
기 둥	기 둥 (주 근)	579.87	344.19	235.68	40.64	-
	기 둥 (후프근)	70.04	70.04	-	-	-
	소 계	649.91	414.23	235.68	36.26	18.32
벽 체		1,245.26	784.32	460.94	37.02	35.10
계 단		60.94	60.94	-	-	1.72
기 초		397.97	305.46	92.51	23.24	11.22
총 계		3,547.34	2,654.86	892.48	25.16	100.00

※ 전이보, 기둥의 주근을 제외한 부재의 철근강도는 fy=400MPa 임. (전이보, 기둥 주근 fy=500MPa)

표의 결과를 토대로 내진설계 및 면진설계시 물량의 증감 효과 및 특징을 분석해 보면, 지진하중의 감소로 인해 횡력에 저항하는 주요 수직 부재인 기둥과 벽체의 철근 물량이 36 ~ 41% 정도 감소하는 것으로 나타났다. 특히 횡력에 저항하는 벽체량이 적은 X방향의 벽체는 표 3.2.7.13의 PSW1 배근 결과와 같이 내진설계와 면진설계의 배근량의 차이가 큰 것으로 나타났다.

표 3.2.7.13 PSW1 배근 비교

PSW1 (내진설계)	
	수직근
15F	HD10@400
14F	HD10@400
13F	HD10@300
12F	HD10@300
11F	HD13@200
10F	HD13@200
9F	HD13@200
8F	HD13@200
7F	HD13@150
6F	HD13@150
5F	HD16@150
4F	HD16@150
3F	HD16@150
2F	HD16@100
1F	HD16@100

PSW1 (면진설계)	
	수직근
15F	HD10@400
14F	HD10@400
13F	HD10@400
12F	HD10@400
11F	HD10@400
10F	HD10@400
9F	HD10@400
8F	HD10@400
7F	HD10@400
6F	HD10@400
5F	HD10@400
4F	HD10@400
3F	HD10@400
2F	HD10@300
1F	HD16@400

벽체 연결보(Link Beam)는 단면의 크기에 비해서 횡력 저항시스템에 큰 영향을 주는 부재로 철근 물량이 23% 정도 감소하는 것으로 나타났다. 일반보는 하부층 주차장과의 접합 부위에서 추가되는 부재로 횡력의 영향이 적으므로 물량 감소비율이 다소 낮은 것으로 나타났다. 그러나 전이보의 경우, 지진하중의 감소로 철근물량은 감소하였으나, 면진장치와의 접합계획 등에 의한 단면의 변화로 물량 크게 증가하는 것으로 나타났다.

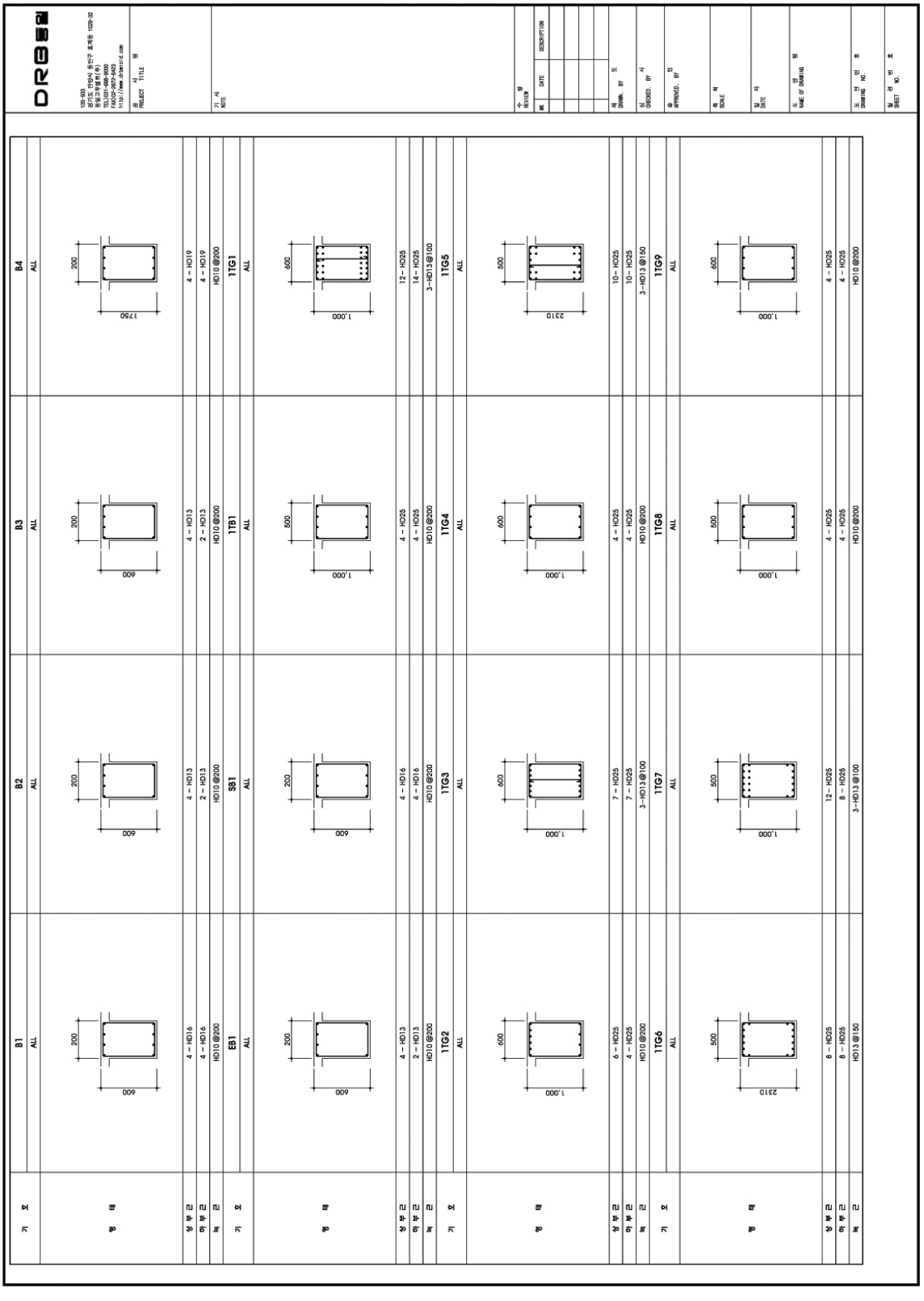
콘크리트 물량은 본 검토 시 단면의 크기는 그대로 유지하는 전제 조건하에서 검토하였으므로, 표 3.2.7.14와 같이 변화가 없는 것으로 나타났다.

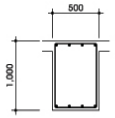
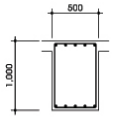
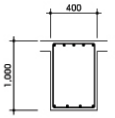
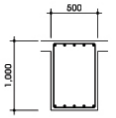
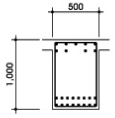
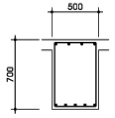
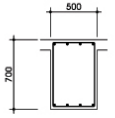
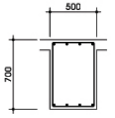
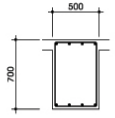
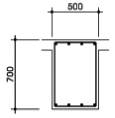
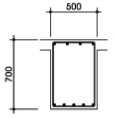
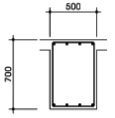
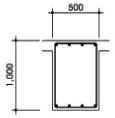
표 3.2.7.14 물량 비교

			내 진 (㎥)	면 진 (㎥)
C21	슬 래 브		1,248.59	1,248.59
	보	전 이 보	93.74	93.74
		일 반 보	-	-
		인 방 보	62.93	62.93
		소 계	156.67	156.67
	기 둥		57.95	57.95
	벽 체		1,450.02	1,450.02
	계 단		69.09	69.09
	기 초		-	-
	총 계		2,982.32	2,982.32
C24	슬 래 브		166.47	166.47
	보	전 이 보	56.43	56.43
		일 반 보	104.62	104.62
		인 방 보	3.48	3.48
		소 계	164.53	164.53
	기 둥		166.69	166.69
	벽 체		254.21	254.21
	계 단		9.22	9.22
	기 초		734.99	734.99
	총 계		**1,496.11**	**1,496.11**

(다) 내진설계와 면진설계의 배근상세 도면

① 내진설계



기 호	1TWG1	1AG1	1AG2	1AG3
	ALL	ALL	ALL	ALL
형 태				
상 부 근	4 – HD25	5 – HD22	5 – HD22	5 – HD22
하 부 근	4 – HD25	5 – HD22	4 – HD22	5 – HD22
늑 근	HD10 @300	HD10 @300	HD10 @300	HD10 @300
기 호	1AG4	–1AG1	–1AG2	–1AG3
	ALL	ALL	ALL	ALL
형 태				
상 부 근	9 – HD22	4 – HD22	4 – HD22	4 – HD22
하 부 근	16– HD22	5 – HD22	4 – HD22	4 – HD22
늑 근	HD10 @300	HD10 @300	HD10 @300	HD10 @300
기 호	–1AG4	–1AWG1	–1G2	–1G3
	ALL	ALL	ALL	ALL
형 태				
상 부 근	4 – HD22	4 – HD22	4 – HD22	4 – HD22
하 부 근	4 – HD22	4 – HD22	5 – HD22	4 – HD22
늑 근	HD10 @300	HD10 @300	HD10 @300	HD10 @300
기 호	1AWG1			
	ALL			
형 태				
상 부 근	4 – HD22			
하 부 근	4 – HD22			
늑 근	HD10 @300			

135-933
경기도 안양시 동안구 호계동 1029-32
동일고무벨트(주)
TEL)1031-468-9000
FAX)02-2672-6423
http://www.drbenold.com

공 사 명
PROJECT TITLE

기 사
NOTE

수 정
REVIEW

MK	DATE	DESCRIPTION

제 도
DRAWN. BY

검 사
CHECKED. BY

승 인
APPROVED. BY

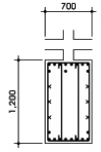
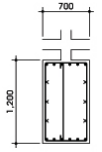
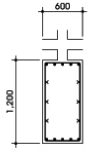
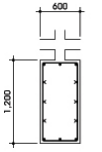
축 척
SCALE

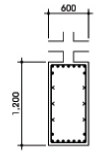
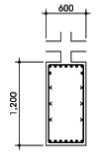
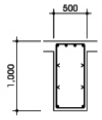
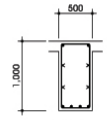
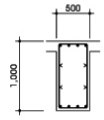
일 자
DATE

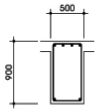
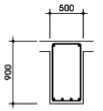
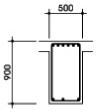
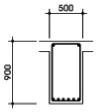
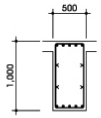
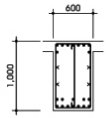
도 면 명
NAME OF DRAWING

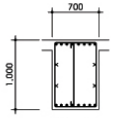
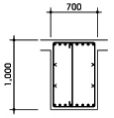
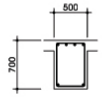
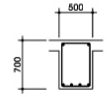
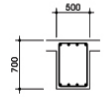
도 면 번 호
DRAWING NO.

철 려 번 호
SHEET NO.

기 호	2TG1, 2TG3	2TG2	2TG4	2TWG1
	ALL	ALL	ALL	ALL
형 태				
상 부 근	11 - HD25	6 - HD25	5 - HD25	3 - HD25
하 부 근	10 - HD25	6 - HD25	5 - HD25	3 - HD25
늑 근	4HD13 @100	3HD13 @250	HD13 @200	HD10 @250

기 호	2TB1	2TCB1	2TG5		2TG5A
	ALL	ALL	END	CEN	ALL
형 태					
상 부 근	9 - HD25	9 - HD25	4 - HD25	2 - HD25	4 - HD25
하 부 근	9 - HD25	7 - HD25	2 - HD25	4 - HD25	4 - HD25
늑 근	HD13 @100	HD13 @250	HD10 @200	HD10 @200	HD10 @200

기 호	2TG6		2TG7		2TG8	2TG9
	END	CEN	END	CEN	ALL	ALL
형 태						
상 부 근	4 - HD25	2 - HD25	6 - HD25	2 - HD25	5 - HD25	9 - HD25
하 부 근	2 - HD25	4 - HD25	3 - HD25	6 - HD25	5 - HD25	12 - HD25
늑 근	HD10 @200	HD10 @200	HD10 @150	HD10 @200	HD10 @150	3HD13 @150

기 호	2TG10, 2TG12	2TG11	2TB2		2TB2A
	ALL	ALL	END	CEN	ALL
형 태					
상 부 근	8 - HD25	8 - HD25	4 - HD25	2 - HD25	4 - HD25
하 부 근	8 - HD25	8 - HD25	2 - HD25	4 - HD25	4 - HD25
늑 근	3HD13 @100	3HD13 @200	HD10 @150	HD10 @150	HD10 @150

DRB동일

135-933
경기도 안양시 동안구 호계동 1029-32
동일고무벨트(주)
TEL)1031-688-9000
FAX)02-2672-6423
http://www.drbenold.com

공 사 명
PROJECT TITLE

기 사
NOTE

수 정
REVIEW

MK	DATE	DESCRIPTION

제 도
DRAWN. BY

검 사
CHECKED. BY

승 인
APPROVED. BY

축 척
SCALE

일 자
DATE

도 면 명
NAME OF DRAWING

도 면 번 호
DRAWING NO.

일 련 번 호
SHEET NO.

부 호	TC1,TC4	TC1A	TC2	TC3	TC4A	TC5
형 태						
주 근	24 - D25	18 - D25	20 - D25	16 - D25	28 - D25	14 - D25
대 근	HD10@150	HD10@150	HD10@150	HD10@150	HD10@150	HD10@150

부 호	TC6	TC7
형 태		
주 근	14 - D25	14 - D25
대근(중앙부)	HD10@150	HD10@150
대근(상,하부)		

135-933
경기도 안양시 동안구 호계동 1029-32
동일고무벨트(주)
TEL)031-469-9000
FAX)02-2672-0403
http://www.drbenold.com

공 사 명
PROJECT TITLE

기 사
NOTE

수 정
REVIEW

NO.	DATE	DESCRIPTION

제 도
DRAWN. BY

검 사
CHECKED. BY

승 인
APPROVED. BY

축 척
SCALE

일 자
DATE

도 면 명
NAME OF DRAWING

도 면 번 호
DRAWING NO.

철 근 번 호
SHEET NO.

WALL배근 일람표-1

층 별	CW1			CW2			CW3			CW4			CW5			CW6			CW7			PCW8		
	W. THK.	수직근(VER.)	수평근(HOR.)	W. THK.	수직근(VER.)	수평근(HOR.)	W. THK.	수직근(VER.)	수평근(HOR.)	W. THK.	수직근(VER.)	수평근(HOR.)	W. THK.	수직근(VER.)	수평근(HOR.)	W. THK.	수직근(VER.)	수평근(HOR.)	W. THK.	수직근(VER.)	수평근(HOR.)	W. THK.	수직근(VER.)	수평근(HOR.)
PH ROOF	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑				200	↑	↑			
PHF	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑				200	↑	↑			
ROOF	200	HD10@300	HD10@300	200	HD10@300	HD10@300	200	HD10@300	HD10@300	200	HD10@300	HD10@300	200	HD10@300	HD10@300	200	HD10@300	HD10@300	200	HD10@300	HD10@300			
15F	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑
14F	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	HD10@200	HD10@140	200	↑	↑	200	HD10@300	HD10@300
13F	200	↑	↑	200	↑	↑	200	HD10@300	HD10@300	200	HD10@300	HD10@300	200	↑	↑	200	↑	↑	200	HD10@300	HD10@300	200	↑	↑
12F	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑
11F	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑
10F	200	↑	↑	200	HD10@300	HD10@300	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑
9F	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	HD10@300	HD10@300	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑
8F	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	HD10@300	HD10@280	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑
7F	200	HD10@300	HD10@300	200	HD10@200	HD10@300	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑
6F	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	HD10@200	HD10@280	200	HD10@200	HD10@280	200	↑	↑	200	↑	↑	200	HD10@300	HD10@280
5F	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	HD10@200	HD10@300	200	HD10@200	HD10@280	200	↑	↑
4F	200	↑	↑	200	HD10@150	HD10@300	200	↑	↑	200	↑	↑	200	HD10@150	HD10@280	200	↑	↑	200	↑	↑	200	HD10@200	HD10@280
3F	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	HD10@150	HD10@280	250	↑	↑	200	HD10@150	HD10@140	200	HD10@150	HD10@280	200	↑	↑
2F	200	HD10@300	HD10@280	200	HD13@150	HD10@280	200	HD10@300	HD10@280	250	↑	↑	250	↑	↑	250	↑	↑	250	↑	↑	200	HD13@100	HD10@100
1F	250	↑	↑	250	↑	↑	250	↑	↑	250	HD13@150	HD10@220	250	HD13@150	HD10@220	250	HD13@150	HD10@140	250	HD10@100	HD10@220			
B1F	250	↑	↑	250	↑	↑	250	↑	↑	250	↑	↑	250	↑	↑	250	↑	↑	250	↑	↑			
B2F	250	HD10@150	HD10@220	250	HD13@150	HD10@220	250	HD10@200	HD10@220	250	HD13@100	HD10@220	250	HD13@100	HD10@220	250	HD16@100	HD10@140	250	HD13@100	HD10@220			

층 별	PSW1			SW2			PSW2			PSW3			SW4			SW5			SW6			PSW6		
	W. THK.	수직근(VER.)	수평근(HOR.)	W. THK.	수직근(VER.)	수평근(HOR.)	W. THK.	수직근(VER.)	수평근(HOR.)	W. THK.	수직근(VER.)	수평근(HOR.)	W. THK.	수직근(VER.)	수평근(HOR.)	W. THK.	수직근(VER.)	수평근(HOR.)	W. THK.	수직근(VER.)	수평근(HOR.)	W. THK.	수직근(VER.)	수평근(HOR.)
PH ROOF																								
PHF																								
ROOF																								
15F	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑
14F	200	HD10@400	HD10@350	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	HD10@200	HD10@280	200	HD10@200	HD10@280
13F	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑
12F	200	HD10@300	HD10@350	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	HD10@300	HD10@350	200	↑	↑	200	↑	↑
11F	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑
10F	200	HD13@200	HD10@350	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑
9F	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑
8F	200	HD13@200	HD10@280	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	HD13@200	HD10@280
7F	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	HD10@200	HD10@350	200	HD13@200	HD10@280	200	↑	↑
6F	200	HD13@150	HD10@280	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	HD13@150	HD10@280
5F	200	↑	↑	200	↑	↑	200	HD10@300	HD10@300	200	HD10@300	HD10@350	200	↑	↑	200	HD13@200	HD10@350	200	↑	↑	200	↑	↑
4F	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	HD10@300	HD10@350	200	↑	↑	200	↑	↑	200	HD13@100	HD10@200
3F	200	HD16@150	HD10@200	200	HD10@300	HD10@300	200	HD10@200	HD10@140	200	HD10@300	HD10@280	200	↑	↑	200	HD13@150	HD10@140	200	↑	↑	200	↑	↑
2F	250	↑	↑	250	↑	↑	200	HD13@100	HD10@100	200	HD13@100	HD10@100	200	HD13@150	HD10@140	250	↑	↑	200	HD13@150	HD10@280	200	HD16@100	HD10@100
1F	250	HD16@100	HD10@100	250	HD10@200	HD10@130	250	HD16@100	HD10@100	250	HD16@100	HD10@100	250	↑	↑	250	HD16@150	HD10@140	250	↑	↑			
B1F				250	↑	↑							250	↑	↑	250	↑	↑	250	↑	↑			
B2F				250	HD13@100	HD10@130							250	HD16@100	HD10@140	250	HD16@100	HD10@140	250	HD16@100	HD10@220			

DRB동일

135-933
경기도 안양시 동안구 호계동 1029-32
동일고무벨트(주)
TEL)1031-688-9000
FAX)02-2672-6423
http://www.drbenold.com

공 사 명
PROJECT TITLE

기 사
NOTE

수 정
REVIEW

MK	DATE	DESCRIPTION

제 도
DRAWN. BY

검 사
CHECKED. BY

승 인
APPROVED. BY

축 척
SCALE

일 자
DATE

도 면 명
NAME OF DRAWING

도 면 번 호
DRAWING NO.

일 련 번 호
SHEET NO.

WALL배근 일람표-2

층 별	SW7			SW8			W1			W1A			PW2			W3			PW3			PW4		
	W. THK.	수직근(VER.)	수평근(HOR.)	W. THK.	수직근(VER.)	수평근(HOR.)	W. THK.	수직근(VER.)	수평근(HOR.)	W. THK.	수직근(VER.)	수평근(HOR.)	W. THK.	수직근(VER.)	수평근(HOR.)	W. THK.	수직근(VER.)	수평근(HOR.)	W. THK.	수직근(VER.)	수평근(HOR.)	W. THK.	수직근(VER.)	수평근(HOR.)
17F	200	↑	↑	200	↑	↑		↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑
16F	200	↑	↑	200	↑	↑		↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑
15F	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑
14F	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑
13F	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑
12F	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑
11F	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑
10F	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑
9F	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑
8F	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑
7F	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑
6F	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	HD10@350	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑
5F	200	↑	↑	200	↑	↑	200	HD13@400	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑
4F	200	↑	HD10@350	200	↑	HD10@350	200	HD13@400	↑	200	↑	HD10@350	200	HD10@400	HD10@350	200	↑	HD10@350	200	↑	HD10@350	200	↑	HD10@350
3F	250	↑	↑	250	↑	↑	250	↑	↑	250	↑	↑	200	HD13@400	HD10@220	250	↑	↑	250	↑	↑	250	↑	↑
2F	250	↑	↑	250	↑	↑	250	↑	↑	250	↑	↑				250	↑	↑	250	↑	↑	250	↑	↑
1F	250	HD10@400	HD10@280	250	HD10@400	HD10@280	250	HD10@400	HD10@280	250	HD10@400	HD10@280				250	HD10@400	HD10@280	250	HD10@400	HD10@280	250	HD10@400	HD10@280

층 별	W5			W6			PW7			PW8			W9			PW9			W10			W11		
	W. THK.	수직근(VER.)	수평근(HOR.)	W. THK.	수직근(VER.)	수평근(HOR.)	W. THK.	수직근(VER.)	수평근(HOR.)	W. THK.	수직근(VER.)	수평근(HOR.)	W. THK.	수직근(VER.)	수평근(HOR.)	W. THK.	수직근(VER.)	수평근(HOR.)	W. THK.	수직근(VER.)	수평근(HOR.)	W. THK.	수직근(VER.)	수평근(HOR.)
17F	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑
16F	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑
15F	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑
14F	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑
13F	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑
12F	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑
11F	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑
10F	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑
9F	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑
8F	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑
7F	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑
6F	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑
5F	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	HD10@400	HD10@350	200	↑	HD10@350	200	↑	↑
4F	200	↑	HD10@350	200	↑	HD10@350	200	↑	HD10@350	200	↑	HD10@350	200	↑	HD10@350	200	HD10@200	HD10@280	200	HD13@400	HD10@280	200	↑	HD10@350
3F	250	↑	↑	250	↑	↑	250	↑	↑	250	↑	↑	250	↑	↑				250	HD13@400	HD10@220	250	↑	↑
2F	250	↑	↑	250	↑	↑	250	↑	↑	250	↑	↑	250	↑	↑				250	↑	↑	250	↑	↑
1F	250	HD10@400	HD10@280	250	HD10@400	HD10@280	250	HD10@400	HD10@280	250	HD10@400	HD10@280	250	HD10@400	HD10@280				250	HD10@400	HD10@280	250	HD10@400	HD10@280

DRB동일

135-933
경기도 안양시 동안구 호계동 1029-32
동일고무벨트(주)
TEL)1031-688-9000
FAX)02-2672-6423
http://www.drbenold.com

공 사 명
PROJECT TITLE

기 사
NOTE

수 정
REVIEW

MK.	DATE	DESCRIPTION

제 도
DRAWN. BY

검 사
CHECKED. BY

승 인
APPROVED. BY

축 척
SCALE

일 자
DATE

도 면 명
NAME OF DRAWING

도 면 번 호
DRAWING NO.

일 련 번 호
SHEET NO.

WALL배근 일람표-3

층 별	WC1			PWC3			PWC4																	
	W. THK.	수직근(VER.)	수평근(HOR.)	W. THK.	수직근(VER.)	수평근(HOR.)	W. THK.	수직근(VER.)	수평근(HOR.)															
17F	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑															
16F	200			200			200																	
15F	200			200			200																	
14F	200			200			200																	
13F	200			200			200																	
12F	200			200			200																	
11F	200			200			200																	
10F	200			200			200																	
9F	200			200			200																	
8F	200			200			200																	
7F	200			200			200																	
6F	200			200			200																	
5F	200			200			200																	
4F	200		HD10@350	200		HD10@350	200	HD10@400	HD10@350															
3F	250		↑	200	HD10@400	HD10@280	200																	
2F	250			200			200																	
1F	250	HD10@400	HD10@280	250																				

층 별																								

135-933
경기도 안양시 동안구 호계동 1029-32
중원고무벨트(주)
TEL)031-469-9000
FAX)02-2672-0423
http://www.drbworld.com

DRB동일

공 사 명
PROJECT TITLE

기 사
NOTE

수 정
REVIEW

MK	DATE	DESCRIPTION

제 도
DRAWN. BY

검 사
CHECKED. BY

승 인
APPROVED. BY

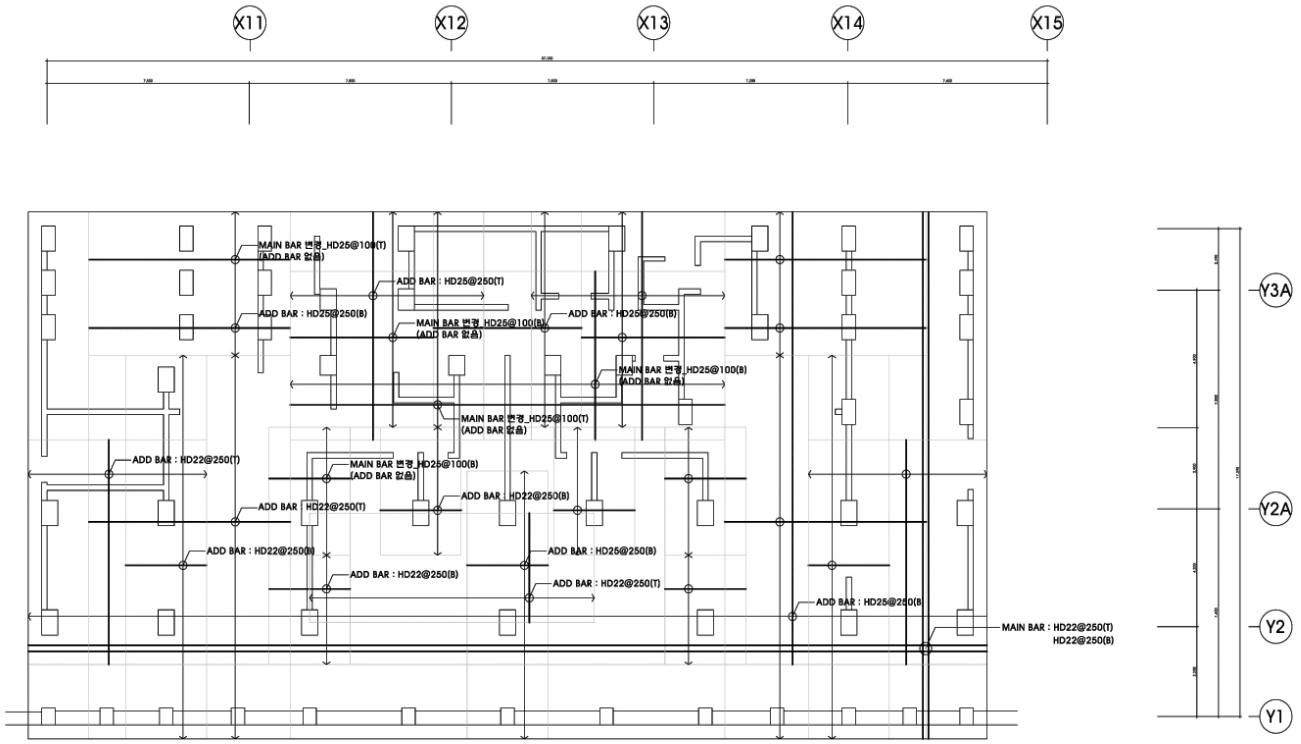
축 척
SCALE

일 자
DATE

도 면 명
NAME OF DRAWING

도 면 번 호
DRAWING NO.

일 련 번 호
SHEET NO.



재료 강도 : fck=24MPa, fy=400MPa

기초 두께 : THK. 1000mm

허용 지내력 : qe=400kN/㎡

기초 내민길이 : 500mm

DRB동일

135-933
경기도 안양시 동안구 호계동 1029-32
동일고무벨트(주)
TEL)031-688-9000
FAX)02-2672-6403
http://www.drbworld.com

공 사 명
PROJECT TITLE

기 사
NOTE

수 정
REVISION

MK	DATE	DESCRIPTION

제 도
DRAWN BY

심 사
CHECKED BY

승 인
APPROVED BY

축 척
SCALE

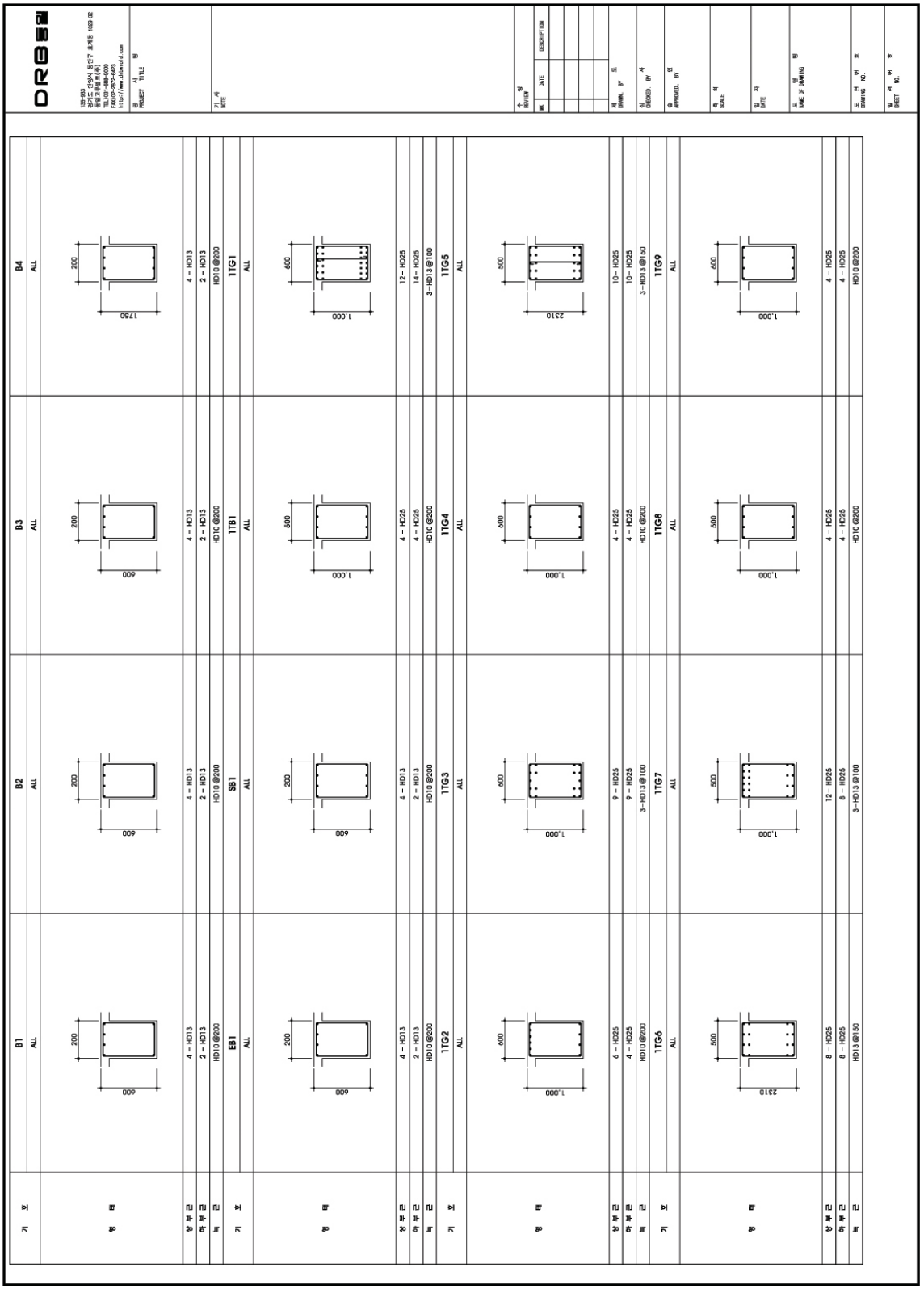
일 자
DATE

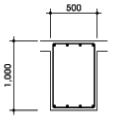
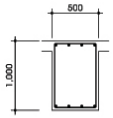
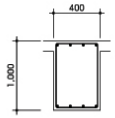
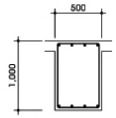
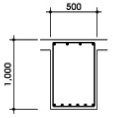
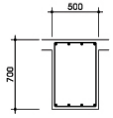
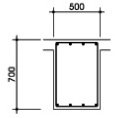
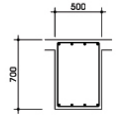
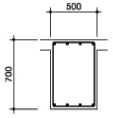
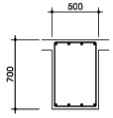
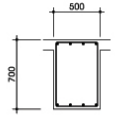
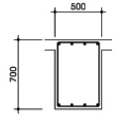
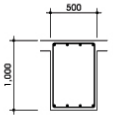
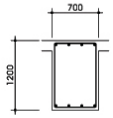
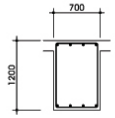
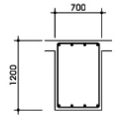
도 면 명
NAME OF DRAWING

도 면 번 호
DRAWING NO.

일 련 번 호
SHEET NO.

(2) 면진설계


DR설계
B1
B2
B3
B4
ALL
600
750
1,000
2310
4 - HD13
2 - HD13
HD10@200
4 - HD25
2 - HD25
HD10@200
12 - HD25
14 - HD25
3 - HD13@100
10 - HD25
3 - HD13@150
8 - HD26
HD13@150

기 호	1TWG1	1AG1	1AG2	1AG3
	ALL	ALL	ALL	ALL
형 태				
상 부 근	4 – HD25	4 – HD22	4 – HD22	4 – HD22
하 부 근	4 – HD25	4 – HD22	4 – HD22	4 – HD22
늑 근	HD10 @300	HD10 @300	HD10 @300	HD10 @300
기 호	1AG4	–1AG1	–1AG2	–1AG3
	ALL	ALL	ALL	ALL
형 태				
상 부 근	4 – HD22	4 – HD22	4 – HD22	4 – HD22
하 부 근	6 – HD22	4 – HD22	4 – HD22	4 – HD22
늑 근	HD10 @300	HD10 @300	HD10 @300	HD10 @300
기 호	–1AG4	–1AWG1	–1G2	–1G3
	ALL	ALL	ALL	ALL
형 태				
상 부 근	4 – HD22	4 – HD22	4 – HD22	4 – HD22
하 부 근	4 – HD22	4 – HD22	4 – HD22	4 – HD22
늑 근	HD10 @300	HD10 @300	HD10 @300	HD10 @300
기 호	1AWG1	2TG1	2TG2	2TG3
	ALL	ALL	ALL	ALL
형 태				
상 부 근	4 – HD22	4 – HD25	4 – HD25	4 – HD25
하 부 근	4 – HD22	4 – HD25	4 – HD25	4 – HD25
늑 근	HD10 @300	HD13 @250	HD13 @250	HD13 @250

DRB동일

135-933
경기도 안양시 동안구 호계동 1029-32
동일고무벨트(주)
TEL)1031-688-9000
FAX)02-2672-6423
http://www.drbenoid.com

공 사 명
PROJECT TITLE

기 사
NOTE

수 정
REVIEW

MK	DATE	DESCRIPTION

제 도
DRAWN. BY

심 사
CHECKED. BY

승 인
APPROVED. BY

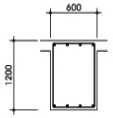
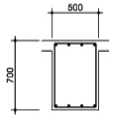
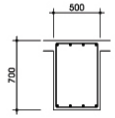
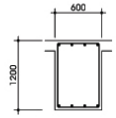
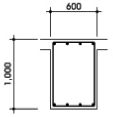
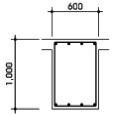
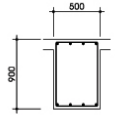
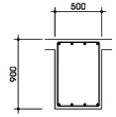
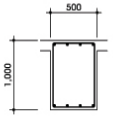
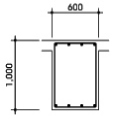
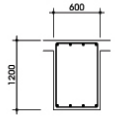
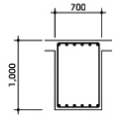
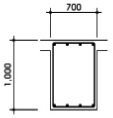
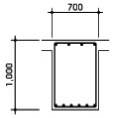
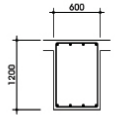
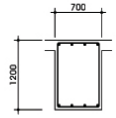
축 척
SCALE

일 자
DATE

도 면 명
NAME OF DRAWING

도 면 번 호
DRAWING NO.

철 려 번 호
SHEET NO.

기 호	2TB1	2TB2	2TB2A	2TCB1
	ALL	ALL	ALL	ALL
형 태				
상 부 근	4 - HD25	4 - HD25	4 - HD25	4 - HD25
하 부 근	4 - HD25	4 - HD25	4 - HD25	4 - HD25
늑 근	HD13 @100	HD10 @150	HD10 @150	HD13 @250
기 호	2TG5	2TG5A	2TG6	2TG7
	ALL	ALL	ALL	ALL
형 태				
상 부 근	4 - HD25	4 - HD25	4 - HD25	4 - HD25
하 부 근	4 - HD25	4 - HD25	4 - HD25	4 - HD25
늑 근	HD13 @200	HD13 @200	HD13 @200	HD13 @200
기 호	2TG8	2TG9	2TWG1	2TG10
	ALL	ALL	ALL	ALL
형 태				
상 부 근	4 - HD25	4 - HD25	4 - HD25	6 - HD25
하 부 근	4 - HD25	4 - HD25	4 - HD25	6 - HD25
늑 근	HD13 @200	HD13 @200	HD13 @250	HD13 @200
기 호	2TG11	2TG12	2TG4	2TG1
	ALL	ALL	ALL	ALL
형 태				
상 부 근	4 - HD25	4 - HD25	4 - HD25	4 - HD25
하 부 근	4 - HD25	6 - HD25	4 - HD25	4 - HD25
늑 근	HD13 @200	HD13 @200	HD13 @250	HD13 @250

DRB동일

135-933
경기도 안양시 동안구 호계동 1029-32
동일고무벨트(주)
TEL)1031-688-9000
FAX)02-2672-6423
http://www.drbworld.com

공 사 명
PROJECT TITLE

기 사
NOTE

수 정
REVIEW

MK	DATE	DESCRIPTION

제 도
DRAWN. BY

검 사
CHECKED. BY

승 인
APPROVED. BY

축 척
SCALE

일 자
DATE

도 면 명
NAME OF DRAWING

도 면 번 호
DRAWING NO.

일 련 번 호
SHEET NO.

부 호	TC1,TC1A,TC2,TC4,TC6,TC7	TC4A	TC3			
형 태						
주 근	12 - D25	16 - D25	10 - D25			
대 근	HD10@150	HD10@150	HD10@150			
부 호						
형 태						
주 근						
대근(중앙부)						
대근(상,하부)						

DRB동일

135-933
경기도 안양시 동안구 호계동 1029-32
동일고무벨트(주)
TEL)031-688-9200
FAX)02-2672-9429
http://www.drbworld.com

공 사 명
PROJECT TITLE

기 사
NOTE

수 정
REVIEW

MK	DATE	DESCRIPTION

제 도
DRAWN. BY

검 사
CHECKED. BY

승 인
APPROVED. BY

축 척
SCALE

일 자
DATE

도 면 명
NAME OF DRAWING

도 면 번 호
DRAWING NO.

일 련 번 호
SHEET NO.

WALL배근 일람표-1

층 별	CW1			CW2			CW3			CW4			CW5			CW6			CW7			PCW8		
	W. THK.	수직근(VER.)	수평근(HOR.)	W. THK.	수직근(VER.)	수평근(HOR.)	W. THK.	수직근(VER.)	수평근(HOR.)	W. THK.	수직근(VER.)	수평근(HOR.)	W. THK.	수직근(VER.)	수평근(HOR.)	W. THK.	수직근(VER.)	수평근(HOR.)	W. THK.	수직근(VER.)	수평근(HOR.)	W. THK.	수직근(VER.)	수평근(HOR.)
17F	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑
16F	200			200			200			200			200			200			200			200		
15F	200			200			200			200			200			200			200			200		
14F	200			200			200			200			200			200			200			200		
13F	200			200			200			200			200			200			200			200		
12F	200			200			200			200			200			200			200			200		
11F	200			200			200			200			200			200			200			200		
10F	200			200			200			200			200			200			200			200		
9F	200			200			200			200			200			200			200			200		
8F	200			200			200			200			200			200			200			200		
7F	200			200			200			200			200			200			200			200		
6F	200			200			200			200			200			200			200			200		
5F	200			200			200			200			200			200			200			200		
4F	200		HD10@350	200		HD10@350	200		HD10@350	200		HD10@350	200		HD10@350	200		HD10@350	200		HD10@350	200	HD10@400	HD10@350
3F	250		↑	250		↑	250		↑	250		↑	250		↑	200		↑	200		↑			
2F	250			250			250			250			250			250			250					
1F	250	HD10@400	HD10@280	250	HD10@400	HD10@280	250	HD10@400	HD10@280	250	HD10@400	HD10@280	250	HD10@400	HD10@280	250	HD10@400	HD10@280	250	HD10@400	HD10@280			

층 별	PSW1			SW2			PSW2			PSW3			SW4			SW5			SW6			PSW6		
	W. THK.	수직근(VER.)	수평근(HOR.)	W. THK.	수직근(VER.)	수평근(HOR.)	W. THK.	수직근(VER.)	수평근(HOR.)	W. THK.	수직근(VER.)	수평근(HOR.)	W. THK.	수직근(VER.)	수평근(HOR.)	W. THK.	수직근(VER.)	수평근(HOR.)	W. THK.	수직근(VER.)	수평근(HOR.)	W. THK.	수직근(VER.)	수평근(HOR.)
17F	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑
16F	200			200			200			200			200			200			200			200		
15F	200			200			200			200			200			200			200			200		
14F	200			200			200			200			200			200			200			200		
13F	200			200			200			200			200			200			200			200		
12F	200			200			200			200			200			200			200			200		
11F	200			200			200			200			200			200			200			200		
10F	200			200			200			200			200			200			200			200		
9F	200			200			200			200			200			200			200			200		
8F	200			200			200			200			200			200			200			200		
7F	200			200			200			200			200			200			200			200		
6F	200			200			200			200			200			200			200			200	HD10@400	HD10@350
5F	200	HD10@400	HD10@350	200			200			200			200			200			200			200	↑	↑
4F	200	HD10@300	HD10@280	200		HD10@350	200	HD10@400	HD10@350	200	HD10@400	HD10@350	200		HD10@350	200		HD10@350	200		HD10@350	200	HD10@300	HD10@280
3F	250	HD10@400	HD10@220	250		↑	250	HD10@150	HD10@140	250	HD10@300	HD10@220	250	HD10@400	↑	250		↑	250		↑			
2F				250									250	HD13@400		250			250					
1F				250	HD10@400	HD10@280							250	HD10@400	HD10@280	250	HD10@400	HD10@280	250	HD10@400	HD10@280			

DRB동일

135-933
경기도 안양시 동안구 호계동 1029-32
동일고무벨트(주)
TEL)1031-468-9000
FAX)02-2672-6423
http://www.drberoid.com

공 사 명
PROJECT TITLE

기 사
NOTE

수 정
REVIEW

MK	DATE	DESCRIPTION

제 도
DRAWN. BY

심 사
CHECKED. BY

승 인
APPROVED. BY

축 척
SCALE

일 자
DATE

도 면 명
NAME OF DRAWING

도 면 번 호
DRAWING NO.

철 려 번 호
SHEET NO.

WALL배근 일람표-2

층 별	SW7			SW8			W1			W1A			PW2			W3			PW3			PW4		
	W. THK.	수직근(VER.)	수평근(HOR.)	W. THK.	수직근(VER.)	수평근(HOR.)	W. THK.	수직근(VER.)	수평근(HOR.)	W. THK.	수직근(VER.)	수평근(HOR.)	W. THK.	수직근(VER.)	수평근(HOR.)	W. THK.	수직근(VER.)	수평근(HOR.)	W. THK.	수직근(VER.)	수평근(HOR.)	W. THK.	수직근(VER.)	수평근(HOR.)
17F	200	↑	↑	200	↑	↑		↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑
16F	200	↑	↑	200	↑	↑		↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑
15F	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑
14F	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑
13F	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑
12F	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑
11F	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑
10F	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑
9F	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑
8F	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑
7F	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑
6F	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	HD10@350	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑
5F	200	↑	↑	200	↑	↑	200	HD13@400	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑
4F	200	↑	HD10@350	200	↑	HD10@350	200	HD13@400	↑	200	↑	HD10@350	200	HD10@400	HD10@350	200	↑	HD10@350	200	↑	HD10@350	200	↑	HD10@350
3F	250	↑	↑	250	↑	↑	250	↑	↑	250	↑	↑	200	HD13@400	HD10@220	250	↑	↑	250	↑	↑	250	↑	↑
2F	250	↑	↑	250	↑	↑	250	↑	↑	250	↑	↑				250	↑	↑	250	↑	↑	250	↑	↑
1F	250	HD10@400	HD10@280	250	HD10@400	HD10@280	250	HD10@400	HD10@280	250	HD10@400	HD10@280				250	HD10@400	HD10@280	250	HD10@400	HD10@280	250	HD10@400	HD10@280

층 별	W5			W6			PW7			PW8			W9			PW9			W10			W11		
	W. THK.	수직근(VER.)	수평근(HOR.)	W. THK.	수직근(VER.)	수평근(HOR.)	W. THK.	수직근(VER.)	수평근(HOR.)	W. THK.	수직근(VER.)	수평근(HOR.)	W. THK.	수직근(VER.)	수평근(HOR.)	W. THK.	수직근(VER.)	수평근(HOR.)	W. THK.	수직근(VER.)	수평근(HOR.)	W. THK.	수직근(VER.)	수평근(HOR.)
17F	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑
16F	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑
15F	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑
14F	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑
13F	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑
12F	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑
11F	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑
10F	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑
9F	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑
8F	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑
7F	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑
6F	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑
5F	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑	200	HD10@400	HD10@350	200	↑	HD10@350	200	↑	↑
4F	200	↑	HD10@350	200	↑	HD10@350	200	↑	HD10@350	200	↑	HD10@350	200	↑	HD10@350	200	HD10@200	HD10@280	200	HD10@400	HD10@280	200	↑	HD10@350
3F	250	↑	↑	250	↑	↑	250	↑	↑	250	↑	↑	250	↑	↑				250	HD13@400	HD10@220	250	↑	↑
2F	250	↑	↑	250	↑	↑	250	↑	↑	250	↑	↑	250	↑	↑				250	↑	↑	250	↑	↑
1F	250	HD10@400	HD10@280	250	HD10@400	HD10@280	250	HD10@400	HD10@280	250	HD10@400	HD10@280	250	HD10@400	HD10@280				250	HD10@400	HD10@280	250	HD10@400	HD10@280

DRB동일

135-933
경기도 안양시 동안구 호계동 1029-32
동일고무벨트(주)
TEL)1031-688-9000
FAX)02-2672-6423
http://www.drbmold.com

공 사 명
PROJECT TITLE

기 사
NOTE

수 정
REVIEW

MK.	DATE	DESCRIPTION

제 도
DRAWN. BY

심 사
CHECKED. BY

승 인
APPROVED. BY

축 척
SCALE

일 자
DATE

도 면 명
NAME OF DRAWING

도 면 번 호
DRAWING NO.

일 련 번 호
SHEET NO.

WALL배근 일람표-3

층 별	WC1			WC3			WC4																	
	W. THK.	수직근(VER.)	수평근(HOR.)	W. THK.	수직근(VER.)	수평근(HOR.)	W. THK.	수직근(VER.)	수평근(HOR.)															
17F	200	↑	↑	200	↑	↑	200	↑	↑															
16F	200			200			200																	
15F	200			200			200																	
14F	200			200			200																	
13F	200			200			200																	
12F	200			200			200																	
11F	200			200			200																	
10F	200			200			200																	
9F	200			200			200																	
8F	200			200			200																	
7F	200			200			200																	
6F	200			200			200																	
5F	200			200			200																	
4F	200		HD10@350	200		HD10@350	200	HD10@400	HD10@350															
3F	250		↑	200	HD10@400	HD10@280	200																	
2F	250			200			200																	
1F	250	HD10@400	HD10@280	250																				

층 별																								

135-933
경기도 안양시 동안구 호계로 1029-32
동일고무벨트(주)
TEL)031-469-9000
FAX)02-2672-0423
http://www.drbworld.com

DRB동일

공 사 명
PROJECT TITLE

기 사
NOTE

수 정
REVIEW

MK	DATE	DESCRIPTION

제 도
DRAWN. BY

검 사
CHECKED. BY

승 인
APPROVED. BY

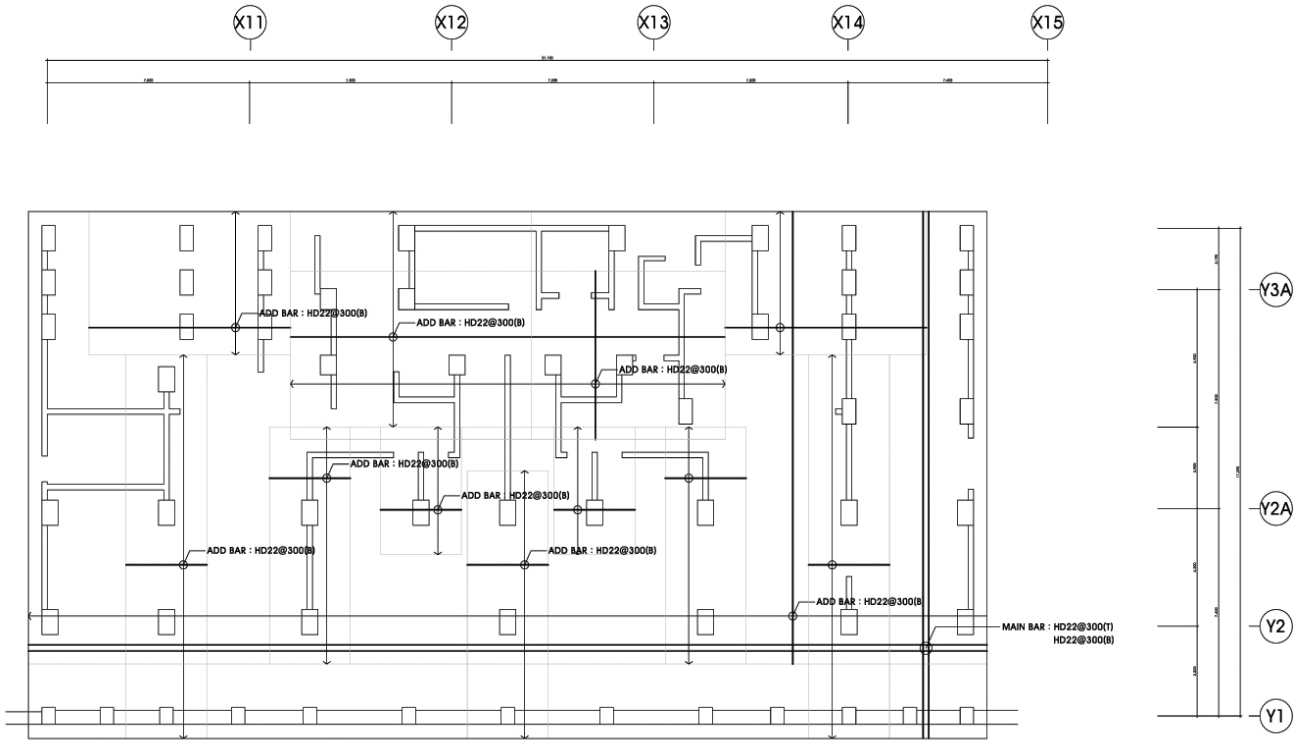
축 척
SCALE

일 자
DATE

도 면 명
NAME OF DRAWING

도 면 번 호
DRAWING NO.

일 련 번 호
SHEET NO.



재료 강도 : fck=24MPa, fy=400MPa

기초 두께 : THK. 1000mm

허용 지내력 : qe=400kN/㎡

기초 내민길이 : 500mm

135-933
경기도 안양시 동안구 호계동 1029-32
동일고무벨트(주)
TEL)031-688-9000
FAX)02-2672-6423
http://www.drbworld.com

공 사 명
PROJECT TITLE

기 사
NOTE

수 정
REVISION

MK	DATE	DESCRIPTION

제 도
DRAWN. BY

검 사
CHECKED. BY

승 인
APPROVED. BY

축 척
SCALE

일 자
DATE

도 면 명
NAME OF DRAWING

도 면 번 호
DRAWING NO.

일 련 번 호
SHEET NO.

3.2.8 면진구조 지침 및 매뉴얼 작성

가. 면진구조 및 장치의 설계 및 성능평가 기법

(1) 면진구조 설계지침(안)

(가) 일반사항

면진구조의 설계는 일반적으로 다음과 같이 요약된다.

① 고정하중, 적재하중, 풍하중 및 적설하중에 대한 상부구조, 하부구조, 기초 및 말뚝의 구조안전성은 허용응력도법에 의한 검증을 원칙으로 한다.
② 지진력에 대해서도 상부구조, 하부구조, 기초 및 말뚝이 거의 탄성영역에 머물도록 한다.
③ 면진장치는 장기하중시 및 지진시에 안전한 거동을 나타내는 것으로 한다.
④ 풍하중에 대해서는 면진층의 수평변형이 작다는 것을 확인한다.
⑤ 면진장치 주변골조와 주변부재가 지진시에도 구조안전성이 확보되도록 한다.
⑥ 면진장치에 발생하는 축력으로 인한 연직변형 및 크리프에 의한 연직변형량에 대하여 연직방향의 면진이격거리에 여유가 있도록 설계한다.
⑦ 상부구조에 대한 설계
  - 상부구조의 기둥과 보등의 설계는 중력하중과 면진층의 층전단력계수에 대한 전단력을 고려하여 결정한다.
⑧ 면진층에 대한 설계
  - 구조물은 주어진 지진입력에너지의 레벨을 견디도록 설계한다.
⑨ 골조의 응력과 변형은 원칙적으로 부재의 탄성강성으로 산정한다.
⑩ 면진장치를 교체하는 것을 전제로 설계하는 경우 시공하중을 고려한다.

[해설]
① 적재하중의 증감과 편재배치는 면진구조의 진동성상에 영향을 미치므로 고

정하중에 적재하중의 비율이 큰 공장, 창고 등의 건축물의 경우 적재하중의 변동을 고려한 설계가 필요하다. 면진건축물에 부동침하가 발생하면 면진층의 수평강성이 상대적으로 작기 때문에 연직하중에 의한 면진층에 수평변형이 발생할 가능성이 있다. 따라서 하부구조, 기초 및 말뚝의 연직하중지지능력 및 침하량의 검토는 보다 신중하게 할 필요가 있다.

② 상부구조의 비선형거동을 고려한 면진건축물의 지진응답성상을 고려한 면진 건축물 상부구조의 손상은 비면진 건축물과 비교한 경우 압도적으로 작지만, 구조부재 내력의 편차에 원인이 있는 상부구조의 항복전단력의 변화에 대해서 민감하게 변화한다는 점이다. 이것은 면진건축물은 비교적 장주기에서 진동하므로 상부구조에는 지진하중이 거의 정적으로 작용하기 때문에 상부구조가 항복내력을 넘는 지진력을 받는 경우에는 급격하게 소성변형이 진행되는 것에 기인한다고 생각된다. 면진건축물에서는 상부구조가 조기에 소성변형 하는 것을 허용하면 상부구조에 큰 소성변형이 발생할 가능성이 있기 때문에 면진건축물의 상부구조는 큰 지진시에도 거의 탄성영역에 머물도록 설계하는 것이 바람직하다. 면진건축물은 거의 대부분을 면진층에서 지진입력에너지를 흡수하는 구조형식이고 면진장치가 큰 지진시에도 안정적인 거동을 나타내는 것을 보증하기 위해서는 하부구조, 기초와 말뚝은 탄성영역에 머물도록 설계하는 것이 바람직하다. 면진피트의 옹벽설계에도 유의해야한다. 또 액상화의 우려가 있는 지반에 건설되는 면진건축물의 경우 기초구조 및 말뚝의 설계에 있어서는 가능한 한 액상화 해석결과나 동적상호작용 등의 해석 결과를 고려하는 것이 바람직하다. 면진건축물에 있어서 거의 탄성영역에 머물도록 설계하는 상부구조의 소성변형 능력은 설계에 있어서 중요하지 않다. 따라서 일반건축물의 설계법에서 변형능력 확보를 위한 여러 가지 구조관련 규정에 대해서는 설계자의 판단에 따라 적절하게 완화 할 수 있다.

③ 상부구조의 설계용 층 전단력으로 전도모멘트에 의해서 발생하는 변동축력으로 적층고무에 인장력(미끄럼면진장치의 경우에는 부상력)이 발생하지 않도록 하는 것이 바람직하다. 변동축력이 크게 발생하는 경우에는 시간이력지진응답해석 등에 의한 상세 검토로 적층고무에 인장시 구조안전성을 확인

하는 것이 바람직하다.

④ 비면진건축물의 경우에는 지진하중이 풍하중을 상회하는 경우 지진하중으로 건축물의 안전성을 확인하고 내풍설계는 생략하는 경우가 많다. 그러나 면진건축물의 경우 면진층의 수평강성이 상부구조 각층의 수평강성에 비해 작기 때문에 풍하중에 의한 면진층의 응답전단력 및 수평변형을 확인하여 안전성에 지장이 없는지를 확인한다. 분리장치와 댐퍼를 병용하는 경우 댐퍼의 항복내력을 풍하중에 의한 수평내력이상으로 설정하는 것이 일반적이다. 댐퍼가 에너지흡수를 하는 경우 풍하중이 장시간 지속적으로 작용하는 현상이 있으므로 댐퍼의 에너지흡수 성능을 확인한다.

⑤ 그림 3.2.8.1과 같이 건축물의 중량을 지지하는 적층고무의 주변에는 수평변형시에 반력분포 합력의 위치가 이동하게 된다. 이 반력분포 합력의 위치와 부재축과의 편심거리에 따라서 상, 하부구조에는 부가 휨모멘트(M)가 발생한다. 상부구조에서는 이 모멘트를 적층고무 바로 상부의 보와 기둥에 저항시키고 있다. 또 하부구조에서는 기초보, 말뚝, 지반 등에서 저항시키고 있다. 미끄럼 면진장치의 경우에는 장치의 높이가 적층고무에 비해 낮으므로 수평변형시에 발생하는 축력과 부재축과의 편심에 의한 부가 휨모멘트 M은 상부구조 또는 하부구조의 어느 쪽에 발생한다.

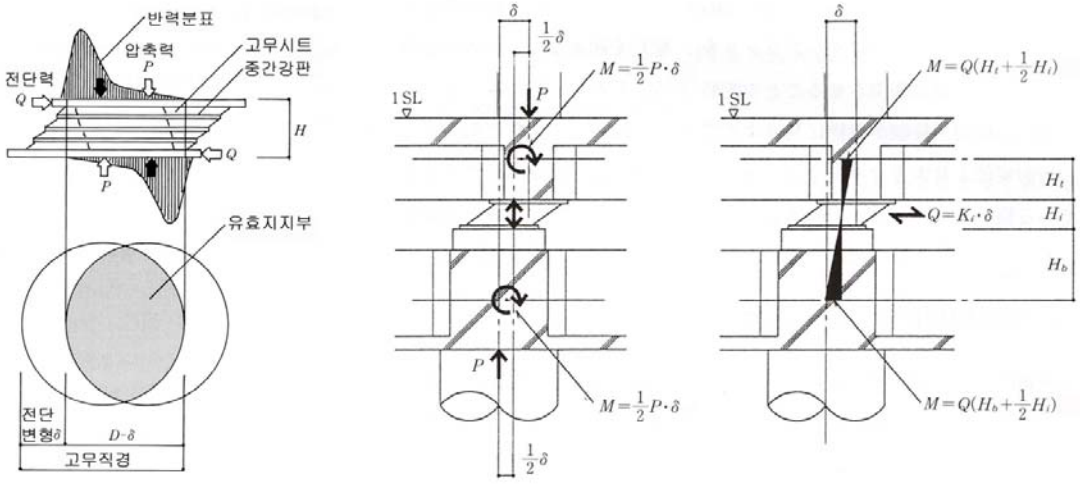


그림 3.2.8.1 적층고무의 하중기구와 유효지지부

일반적으로 면진장치는 연결볼트와 플레이트로 구조체에 연결시킨다. 따라서 면진장치의 주변부재는 면진장치의 반력을 확실하게 상부 및 하부구조에 전달할 수 있도록 해야 한다. 면진장치의 연결볼트인 앵커볼트와 스터드볼트는 수평전단력에 의한 휨모멘트에서 발생하는 인장력, 연직력에 의한 휨모멘트(P-δ효과)로 발생하는 인장력의 조합응력으로 설계한다. 최근에는 면진장치의 기술개발과 해석기술의 발달로 적층고무 분리장치에 인장을 허용하는 설계를 하는 경우도 있으므로 이 경우에는 부상력도 가미하여 구조안전성을 검토한다. 연결플렌지는 앵커볼트에 발생하는 인장력에 의한 플레이트의 면외 휨모멘트에 대하여 두께를 검토한다. 연결플레이트는 플랜지 설계시의 응력을 이용하여 볼트에 발생하는 인장력과 전단력에 대해 설계를 한다. 베이스플레이트는 스터드 볼트를 지점으로 하여 앵커볼트의 반력에 의해 발생하는 플레이트의 휨모멘트에 대하여 설계한다. 면진장치를 설치하는 패드부분의 콘크리트와 배근설계는 축력, 전단력, 휨모멘트를 기초(기초보와 기초슬래브)에 확실하게 전달할 수 있도록 설계한다. 일반적으로 적층고무의 축력 N, 전단력 Q가 발생하는 경우 스터드 볼트의 검증은 다음과 같이 한다.

플랜지플레이트에 발생하는 휨모멘트 M은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$M = Q \times H_i$$

H_i : 적층고무의 높이

스터드볼트는 유효축단면적(축방향) A_t, 축단면적(전단)A_s의 볼트 n 개 를 반경 r 의 원주에 따라 균등하게 배치하는 것으로 하면 다음과 같다..

$$I_p = A_t \times r^2 \times n$$

$$I = I_p \times \frac{1}{2}$$

$$Z = \frac{I}{r}$$

I_p : 스터드볼트의 극2차모멘트

I : 스터드볼트의 단면2차모멘트

Z : 스터드볼트의 단면계수

휨모멘트에 의해 스터드볼트에 발생하는 축방향응력도 σ_M은 다음과 같다.

$$\sigma_M = \frac{M}{Z}$$

적층고무에 작용하는 축력N 에 의해서 스터드볼트에 발생하는 축방향응력도 σ_t는 다음과 같다.

$$\sigma_t = \frac{N}{(\ n \cdot A_t)}$$

전단력에 의해서 스터드볼트에 발생하는 전단응력도 τ 는 다음과 같다.

$$\tau = \frac{Q}{(n \cdot A_s)}$$

인장과 전단력의 조합응력 상태에서 항복조건으로 스터드볼트의 검토를 한다.

$$\sigma^2 + 3\tau^2 \leqq \sigma_y^2$$

σ : 스터드볼트의 인장응력도

σ_y : 스터드볼트의 항복응력도

⑥ 장기하중일때와 지진하중(단기하중)시 분리장치의 수직방향 변형과 크리프(Creep)에 의한 연직변형량에 대하여 연직방향의 면진이격거리는 충분히 여유있는 치수로 설정한다. 장기하중시에 각 분리장치의 연직변형량에 큰 차이가 발생하면 상부구조체에 부동침하와 동등한 부정정응력이 발생하게 된다. 또 크리프에 대해서는 크리프량의 평가(예측식)를 각 장치 제조자가 제시하고 있지만, 제조업체와 적층고무의 종류별로 다르다는 것을 유의해야 한다. 특히 다른 종류의 적층고무 분리장치를 병용하는 경우에는 크리프의 특성을 적절하게 파악하여 설계에 반영할 필요하다. 또 적층고무의 크리프에 발생하는 몇 mm 정도의 연직변위에 대한 면진장치의 변형능력을 확인

한다. 댐퍼의 감쇠성능은 면진층의 복원력특성에 영향을 미치지 않도록 한다.

⑦ 면진구조에서 상부구조는 허용응력도 설계를 한다. 지진입력에너지의 대부분을 면진층에서 흡수하기 때문에 원칙적으로 상부구조는 지진에너지의 흡수능력을 기대하지 않는다. 오히려 천천히 흔들리면서 면진층에서 전달되는 준정적인 수평력에 대해 강도적으로 견딜 수 있으면 된다. 따라서 상부구조에 가해지는 최대층전단력으로 구한 수평력에 대해 상부구조가 단기허용응력도 이내어 머물도록 설계한다. 상부구조의 설계용전단력은 예비응답해석결과를 참조하여 결정한다. 상부구조의 질량, 강성의 편재로 발생하는 비틀림 진동은 면진층을 비틀림이 발생하지 않도록 설계할 수 있으므로 상부구조는 비틀림진동에 의한 응답증폭이 없기 때문에 상부구조는 정적인 수평력에 대한 비틀림을 고려하여 설계하면 된다.

⑧ 면진층의 설계는 분리장치와 댐퍼의 설계에서 설계된 면진장치를 편심이 발생하지 않도록 균형있게 배치하는 것이 중요하다.

㉮ 적층고무 분리장치의 배치는 면진층에서 비틀림이 발생하지 않도록 하기 위해 상부구조의 질량 중심과 면진층의 강심을 가능한 한 일치시키는 것이 바람직하다. 실제 설계에서는 축력과 수평강성의 비율이 일정하게 되도록 적층고무 분리장치를 선택하면 중심과 강심에 큰 차이가 거의 발생하지 않는다. 기본적인 적층고무분리장치의 배치는 각 기둥 하부에 하나씩 배치하는것을 원칙으로 한다. 그러나 기둥이 많고 각 기둥 하부에 하나의 적층고무분리장치를 배치할 경우에 적층고무의 면압이 작아지게 되어 건축물중량에 비해 면진층의 수평강성이 커지게 되는 경우가 있다. 이러한 경우 상부구조와 면진층사이에 전이층을 설치하여 적층고무의 수를 작게하여 수평강성을 작게하는 방법도 있다.

㉯ 댐퍼의 배치도 적층고무분리장치의 배치와 마찬가지로 면진층에서 면진장치의 강심을 상부구조의 중심과 일치시키는 것이 원칙이다. 부정형인 건축물의 기둥 하부에 한정된 크기의 적층고무분리장치를 배치하면 면압이 일정하게 되지 않아 상부구조의 중심에 적층고무 분리장치의 강심을 일치시킬 수 없는 경우도 발생한다. 분리장치와 분리형의 면진구조에서는 댐퍼를 면진층의 감심과 상부구조의 중심과 일치시켜서 면진층에서 비틀

림저항을 크게하여 비틀림진동을 억제할 수 있다. 또 댐퍼를 건축물외주부에 배치하여 면진층의 비틀림강성을 크게하여 비틀림 변형에 효과적으로 대응할 수 있다. 면진층의 강심과 상부구조의 중심과 일치하고 있는 경우에는 상부구조에 강심과 중심의 차이에 의한 편심이 발생하여도 면진층의 비틀림진동은 아주 작다.

⑨ 골조의 구조해석은 탄성강성을 고려하는 것을 원칙으로 하지만, 짧은스팬의 보와 잡벽이 설치된 보등 응력이 집중하는 부재의 균열이 층 강성저하에 큰 영향을 미치는 경우에는 균열을 고려한 등가강성을 이용하여 구조해석을 할 필요가 있다. 고층건축물과 같이 연직변형의 영향이 크다고 판단되는 경우에는 연직강성을 적절하게 평가한 모델화를 한다. 면진구조의 설계에 있어서 면진층의 강심과 중심을 일치시키는 것이 중요하다. 면진층에 편심이 없고 상부구조가 거의 탄성영역일 경우에는 상부구조에 발생하는 층간비틀림각은 상부구조에서 정적으로 구한 편심거리에 최대응답층전단력을 곱한 비틀림모멘트에 의한 비틀림각과 거의 일치하여 비틀림 진동이 증폭되는 경우는 없다. 따라서 상부구조에 편심이 있는 경우에도 비틀림변형을 고려하지 않은 구조해석으로 구한 층전단력을 이용하여 상부구조의 비틀림변형을 정적으로 평가하면 된다. 면진층의 편심을 가능한 한 작게되도록 면진장치를 배치한다. 면진층의 비틀림강성이 커지도록 면진장치를 배치하는 것이 바람직하다. 분리형 댐퍼의 경우 방향성에 유의한다. 유체형댐퍼는 방향성이 있어 면진층 전체로서 감쇠성능이 방향성을 지니지 않도록 배치할 필요가 있다. 또 기존건축물의 내진보강 방법으로 면진구조를 적용하는 경우도 있다. 기존건축물의 경우 현재의 건축법을 적용하면 내진설계가 적용되지 않은 경우도 있으므로 보유수평내력이 부족한 경우도 있다. 또 건축물의 노후화와 균열등에 의한 강성저하가 있는 경우도 많다. 따라서 기존건축물을 면진구조로 내진보강하는 경우에는 구조해석시에 내력과 강성을 적절히 평가할 필요가 있다.

⑩ 면진장치를 교체하는 것을 전제로 설계하는 경우 교체할 때의 Jack up 반력을 설계하중으로 고려할 필요가 있다. 이 경우에는 설계단계에서 교체방법 따른 하중을 고려하여 설계하는 경우와 교체시에 면진장치의 주위를 보강하는 방법으로 하는 경우가 있다. 주위를 보강하기 위한 비용과 건축적인

제약, 교체시에 필요로 한 비용을 건축주, 설계자가 종합적으로 판단하여 결정해야 한다. 특히 탄소성 복원력특성을 지닌 이력형댐퍼를 사용하는 경우에는 지진종료 후에 잔류변형이 발생할 가능성이 있으므로 건축물에 허용되는 잔류변형량을 최대응답변위에 대한 설계수평변위의 여유도 등을 고려한 다음에 설정하고 원위치로 되돌리는 방법과 반력기구의 필요여부를 검토할 필요가 있다.

(나) 적층고무의 설계

적층고무를 설계하는 순서는 일반적으로 다음과 같이 요약된다.

① 면진주기 T_f와 설계변위 d_{dsign}를 설정한다.
② 적층고무의 2차형상계수 S_2와 고무의 전단탄성계수 G 의 설정
③ 적층고무의 최소직경 $D_{\min}$을 설정한다.
④ 평균면압 σ_{ave}의 산정
⑤ 면진주기 T_f와 설계변위 d_{dsign}를 설정한다.
⑥ 적층고무의 2차형상계수 S_2와 고무의 전단탄성계수 G 의 설정
⑦ 적층고무의 최소직경 $D_{\min}$을 설정한다.
⑧ 평균면압 σ_{ave}의 산정
⑨ 개별 적층고무의 설계
⑩ 적층고무의 수평강성의 전체합 $\sum K_H$ 계산
⑪ 면진주기의 비교
⑫ 적층고무의 사양 결정

[해설]

면진건축물에서 분리장치와 댐퍼의 특성과 성능에 따라 지진시의 응답성능이 결정될 가능성이 있다. 이것은 면진건축물의 성능을 결정할 수 있다는 것이다. 면진건축물의 설계는 먼저 어떤 성능의 면진건축물을 설계 할 것인가를 설계자가 결정하고, 이것을 실현하기 위하여 상부구조와 댐퍼의 관계를 고려하여 적층

고무의 배치, 크기, 개수, 면압 등을 결정하게 된다.

사용하는 적층고무의 크기와 형상은 통일하여도 좋지만, 실제 적층고무에 작용하는 연직하중은 일정하지 않으므로 면진성능을 높이기 위해서는 유연한 고무재질의 적층고무와 고무층이 많은(2차형상계수가 작은)적층고무를 시용하는 경우도 있다. 이 경우 각각의 적층고무가 지니는 성능에는 차이가 있으므로 이러한 특성을 충분히 파악한 다음 설계를 하는것이 무엇보다 중요하다.

이러한 점을 고려하여 적층고무를 설계하는 순서는 대략 다음과 같다.

① 면진주기 T_f와 설계변위 d_{dsign}를 설정한다.

건축물의 용도, 지반의 종류, 응답특성을 고려하여 예상하는 지진입력과 면진성능(면진층의 전단력계수와 최대변형량)을 설정한다. 이러한 성능을 만족하도록 설계변위 d_{dsign}와 면진주기 T_f를 설정한다.

② 적층고무의 2차형상계수 S_2와 고무의 전단탄성계수 G 의 설정

적층고무의 형상과 고무의 재질을 결정한다. 기둥 축력의 크기에 따라 적층고무의 크기와 재질을 변화시키는 경우에는 대표적인 2차형상계수 S_2와 고무재질G을 설정하여 둔다.

③ 적층고무의 최소직경 $D_{\min}$을 설정한다.

천연고무계 적층고무의 복원력특성에 따라 일반적으로 전단탄성율 γ=250%를 선형한계범위라고 가정하여 $\frac{D}{d_{design}} = \frac{S_2}{\gamma}$ 의 관계에서 2차형상계수 S_2=5 의 경우에는 $D_{\min} \geqq 2d_{design}$ 이고, S_2=7 의 경우에는 $D_{\min} \geqq 3d_{design}$ 로한다. 2차형상계수가 5보다 작은 적층고무를 사용하는 경우에는 설계변위가 직경의 1/2이하가 되도록 적층고무의 크기를 결정하거나 면압을 낮추어서 사용하는 것이 일반적이다.

④ 평균면압 σ_{ave}의 산정

설정한 면진주기를 달성하기 위하여 필요한 건축물전체의 평균면압 σ_{ave}는 다음식으로 계산할 수 있다. 적층고무의 크기와 재질이 다른 경우에는 평균값을 이용하여도 무방하다.

$$\sigma_{ave} = \left(\frac{T_f}{2\pi}\right)^2 \frac{GS_2 g}{D_{\min}} = 24.8 \frac{T_f^2 GS_2}{D_{\min}}$$

이 장기하중에 대한 평균면압이 좌굴응력도 σ_{cr}의 1/3이하 인 것을 확인한다

($\sigma_{ave} \leqq \frac{\sigma_{cr}}{3}$). 만약 크게 상회한다면 설계조건을 재검토한다. 평균기둥의 축력은 다음과 같이 산정한다.

$$P_{ave} = \frac{g}{16\pi} T_f^2 G S_2 D_{\min} = 19.5 T_f^2 G S_2 D_{\min}$$

평균면압을 만족하도록 건축물의 평면계획과 구조계획을 검토한다. 만족하지 않을 경우에는 설계조건을 재검토한다.

⑤ 개별 적층고무의 설계

평균면압σ_{ave}이 되도록 적층고무의 직경 D를 설정한다. 적층고무의 직경은 ③ 단계에서 설정한 최소직경 $D_{\min}$이상으로 한다. 설정한 직경D로 적층고무의 면압σ를 산정하여 면압의 크기를 파악한다. 면압의 크기를 고려하면서 2차형상계수 S_2와 전단탄계계수G를 각각 계산한다.

⑥ 적층고무의 수평강성의 전체합$\sum K_H$ 계산

개별적으로 결정한 적층고무의 수평강성을 계산하여 면진층 전체의 수평강성 $\sum K_H$를 계산한다. 수평강성의 계산에서는 압축하중을 고려한 수평강성식을 이용할 수 있지만, 중심구멍이 작은 경우에는 다음식과 같이 약산할 수 있다.

$$K_H = \frac{\pi}{4} D S_2 G$$

⑦ 면진주기의 비교

앞의 ⑥에서 계산한 수평강성$\sum K_H$으로 배치계획한 적층고무만의 주기 T_{f0}를 다음식으로 계산한다. ①에서 가정한 T_f와 면진층의 주기 T_{f0}를 비교하여 거의 일치하는 경우에는 ⑧의 적층고무사양을 결정하면 되고, 차이가 많다면 ⑤로 가서 적층고무를 재설정하여 검토한다.

$$T_{f0} = 2\pi \sqrt{\frac{W}{\sum K_H g}}$$

⑧ 적층고무의 사양 결정

적층고무의 1차형상계수 S_1은 적층고무의 고무1층의 두께 t_R과 고무층수 n과 관계가 있고, 전고무층두께는 2차형상계수로 결정되기 때문에 1차형상계수를 만족하도록 고무1층의 두께와 층수를 결정하면된다.

적층고무의 수평강성의 저하를 10%이하로 하기 위해서는 1차형상계수는 다음식을 만족할 필요가 있다.

$$S_1 \geqq \frac{3\sigma}{GS_2}$$

중간강판의 두께 t_s는 벽층고무의 직경이ϕ700이하인 경우에는 $\frac{t_s}{t_R} \leqq 0.5$ 이고, ϕ800이상인 경우와 고면압인 경우에는 $\frac{t_s}{t_R} > 0.75$ 가 일반적이다.

(다) 댐퍼의 설계

댐퍼의 설계하는 순서는 일반적으로 다음과 같이 요약된다.

① 댐퍼의 종류를 선택한다.
② 각 댐퍼의 항복전단력의 합계를 가정한 ${}_sQ_y$가 되도록 댐퍼의 개수를 결정한다.
③ 댐퍼의 배치
④ 면진장치(분리장치와 댐퍼)의 특성값 확인

[해설]

면진층의 특성을 가정한 다음 예비응답해석과 포락해석법으로 댐퍼에 필요한 항복강도를 추정한다. 예비응답해석은 입력지진파의 진동특성에 의존한 결과가 얻어지므로 지진파의 진동특성에 의존하지 않는 포락해석법을 이용하는 것이 유효하다. 포락해석법은 그림 3.2.8.2와 같이 면진건축물의 주기 T_f, 면진층의 전단력계수 α_1, 면진층최대변위 $\delta_{\max}$, 댐퍼의 항복전단력계수 α_s의 관계를 나타내고 있다. 이 그래프에서 면진건축물의 주기 T_f와 면진층의 최대변위$\delta_{\max}$를 설정하면 면진층의 전단력계수α_1을 최소로 하는 댐퍼의 항복전단력 α_s를 구할 수 있다.

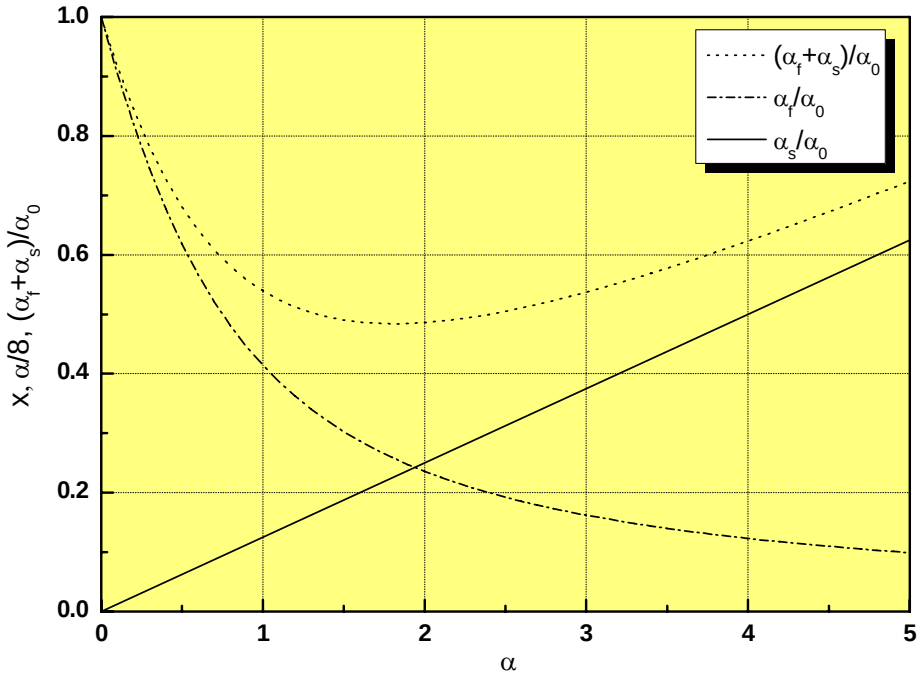


그림 3.2.8.2 댐퍼량과 응답저감율

S_D지반을 대상으로 한 등가속도 V_E=100cm/sec 정도에서 면진건축물의 주기 T_f=6.0sec, 면진층 최대변위 20-30cm로 하면 댐퍼의 항복전단력계수는α_s =0.02-0.03정도의 값이 된다.

댐퍼의 설계는 다음과 같은 순서로 할 수 있다.

① 댐퍼의 종류를 선택한다.

댐퍼의 선택은 여러 가지 특성을 고려하여 선정한다. 납댐퍼는 1차강성이 높고 항복변위가 작은(약 0.8cm) 완전 Bi-Linear 형의 복원력특성 그림 3.2.8.3와 같다. 강제댐퍼는 항복변위가 약간크고(약2.8cm) 2차강성이 있는 Bi-Linear형의 복원력특성 그림 3.2.8.4과 같다. 따라서 납댐퍼와 강봉댐퍼의 비율을 이러한 특성을 고려하여 결정하면 된다.

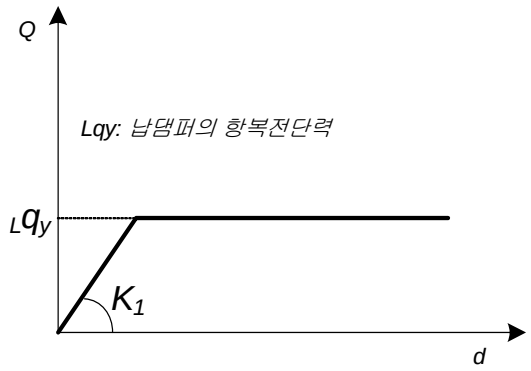


그림 3.2.8.3 전단력계수와 면진층 변위의 관계

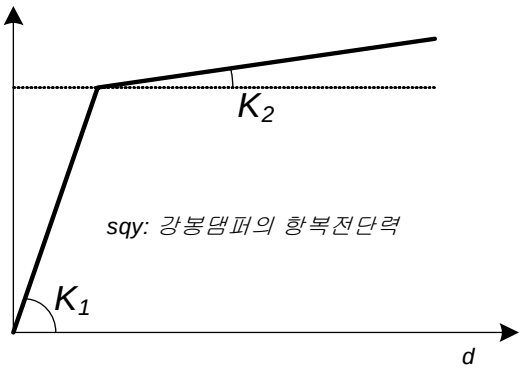


그림 3.2.8.4 전단력계수와 면진층 변위의 관계

② 각 댐퍼의 항복전단력의 합계를 가정한 ${}_sQ_y$가 되도록 댐퍼의 개수를 결정한다. 댐퍼의 항복전단력이 너무 작아지면 면진층의 최대변형이 커져서 분리장치의 변형능력과 면진층의 수평이격거리에 문제 발생할 수도 있다. 또 댐퍼의 항복전단력이 너무커지면 상부구조에 작용하는 지진력이 증가하게 되므로 주의가 필요하다.

$$ {}_sQ_y = \alpha_s W $$

α_s: 댐퍼의 항복전단력계수

W: 지진시 면진층보다 상부의 건축물중량

③ 댐퍼의 배치

댐퍼의 배치는 면진층에 편심이 발생하지 않도록 면진층의 강심위치와 면진층보다 상부 건축물중량의 중심위치가 가능한 한 일치하도록 한다. 또 면진층의 비틀림저항 강성을 높이기 위해 댐퍼는 면진층 평면의 외주부에 배치하는 것이 바람직하다.

④ 면진장치(분리장치와 댐퍼)의 특성값 확인

설계한 면진장치의 특성값을 이용하여 지진응답해석과 포락해석법으로 가정한 면진성능(면진층의 전단력계수 α_1과 면진층최대변위 $\delta_{\max}$)을 발휘할 수 있는 것을 확인한다.

(다) 면진구조의 설계순서

(나)와 (다)의 구조 특성값을 고려한 면진구조의 설계순서는 다음과 같이 요약된다.

1 단계 : 대상건축물의 제반조건 검토

2 단계 : 설계의 방침과 목적

3 단계 : 면진층의 특성값의 가정

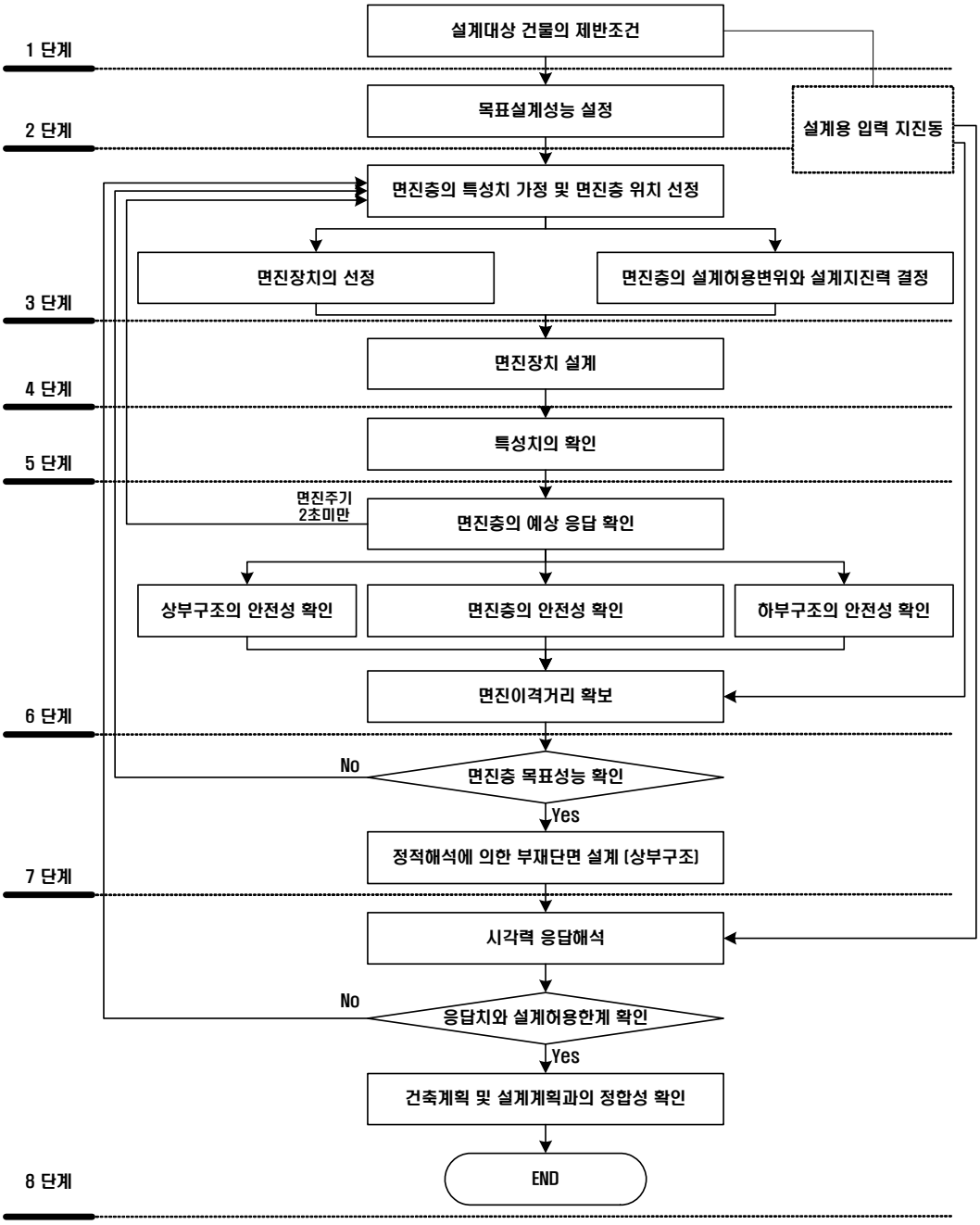
4 단계 : 면진장치의 설계

5 단계 : 특성값 확인

6 단계 : 면진층의 예상응답 확인

7 단계 : 면진층 목표성능 확인

8 단계 : 지진응답해석에 의한 안전성 확인



[해설]

이 지침에 따른 면진건축물의 구조설계 순서는 개략 Flow와 같다. 제1장에서부터 순서에 따라 설계를 진행하면 되지만, 유의해야할 점은 다음과 같다. 면진층의 계획에서는 면진장치의 모델화뿐 만 아니라, 면진층 전체의 중심과 강심을 맞추도록 면진장치의 배치계획과 면진층의 모델화를 하도록 한다.

시간이력 이력해석으로 예비검토를 하는 경우 해석모델은 상부구조를 강체로

간주한 1질점모델을 이용하는 경우가 많다. 이러한 경우에는 면진층의 응답변위 파악과 상부구조의 설계용전단력 설정을 목적으로 하고 있다. 그러나 고층면진 건축물과 같이 상부구조를 강체로 취급할 수 없을 경우에는 상부구조 진동모드의 영향을 무시할 수 없는 경우에는 예비해석 단계에서도 다질점 모델을 이용하는 것이 좋다. 시간이력응답해석에 이용하는 해석모델은 가능한 한 면진건축물의 실정에 적합한 모델을 사용하는 것이 바람직하다. 비틀림 진동모델과 건축물-지반의 상호작용 해석모델에 의한 검토를 해야 하는 경우도 있다. 면진구조는 면진장치와 댐퍼 구성되는 면진층의 응답을 예측하는 방법으로 에너지 평형법을 이용한 응답포락법과 응답스펙트럼법이 있다. 여기서는 에너지 평형법에 의한 응답예측 방법에 대하여 설명하고자 한다.

면진구조는 면진층이 어떤 위치에 설치되는가 가 중요하다. 또 면진구조의 설계를 위한 예비해석과 시간이력이력 해석을 어떻게 대응 시키는가도 중요하다.

새로운 구조형식인 면진구조에 적용해야하는 내진설계에 고려해야 하는 것은 다음과 같다.

① 기존 내진설계법과 기본 맥락을 유지한다.
② 면진구조 고유의 특성을 충분히 고려한다.

내진설계는 지진으로 구조물에 투입되는 지진입력에너지의 전부를 구조물이 손상을 입지 않고 구조물에 흡수되는 구조라고 할 수 있다. 면진구조는 면진층의 강성을 상부구조에 비하여 아주 작게하여 지진으로 투입되는 지진에너지 총량(총에너지입력)을 면진층에 집중시키는 구조이다. 또 면진층의 최대변형을 억제하기 위하여 에너지 흡수장치로 댐퍼를 설치한다. 상부구조로 입력되는 에너지는 작아서 일반구조물에 요구되는 소성에너지 흡수능력을 발휘하기 위한 여러 가지 제약조건으로부터 설계가 자유로워진다.

포락응답 예측법은 시간이력 응답해석을 종합적으로 파악하는 방법이라고 할 수 있다. 이 응답예측법을 이용하여 구조계획에 여러 가지 장치의 선택 등을 가능하게 하는 설계법의 기초라고 볼 수 있다. 따라서 상세한 특징을 간과한 거시적 예측법이기 때문에 이를 보완하기 위하여 구체적인 조건을 고려하여 상세한 해석이 필요하게 된다는 점을 잊어서는 안 된다. 적층고무면진장치의 수평강성

k_f는 휨변형 성분이 거의 없기 때문에 고무의 전단강성으로 나타낼 수 있다.

$$k_f = \frac{GA}{h}$$

G: 고무재료의 전단탄성계수

A: 적층고무의 단면적($A = \frac{\pi D^2}{4}$)

h: 고무층 전체의 두께($h = n_R \times t_R$, n_R : 고무 층수 , t_R : 고무 1층의 두께)

적층고무 면진장치의 연직강성은 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$K_V = \frac{A \cdot E_{ab}}{n \cdot t_r}$$

$$E_{ab} = \frac{E_c E_b}{E_c + E_b}$$

$$E_c = 3G(1 + 2\kappa S_1^2)$$

$$S_1 = \frac{\pi D^2}{4\pi D t_R} = \frac{D}{4t_R}$$

$$S_2 = \frac{2D}{nt_r}$$

1 단계: 설계대상 건축물의 제반조건

① 지진시 건축물의 총중량 WE를 산정한다. WE는 면진건축물의 주기와 면진층에 작용하는 전단력을 산정할 때 사용한다.

② 지반의 종류에 대해서 판단한다. SD 지반에서는 지진시 지반의 소성화까지 고려한 탁월주기가 면진건축물의 주기에 너무 근접하지 않도록 면진건축물의 주기를 충분히 길게 할 필요가 있다.

2 단계: 목표설계 성능 설정

면진구조의 성능을 충분히 발휘시키기 위하여 건축물의 목적에 부흥하는 설계방침을 설계자가 결정한다.

① 설계용 지진동의 입력에너지의 속도환산치 VE의 크기는 지반종류, 건축물 중요도등을 고려하여 결정한다.

② 설계밑면전단력계수 α_a 를 설정한다.

③ 설계허용변위 δ_a 를 결정한다.

④ 면진건축물의 주기 T_f를 설정한다.

$$T_f = 2\pi \sqrt{\frac{W_E}{k_f g}}$$

k_f : 면진장치만의 수평강성(t/cm)

g : 중력가속도(cm/s^2)

⑤ 댐퍼의 항복전단력계수 α_s를 결정한다. 이것은 면진층에 에상되는 최대응답변위, 최대응답층전단력 등 과 풍하중을 고려하여 결정한다.

3 단계: 면진층의 특성값 가정

밑면전단력 계수 α_1이 설계밑면전단력계수 α_a 이하에서 면진층의 최대변위 $\delta_{\max}$가 설계허용변위 δ_a 이하가 되도록 면진건축물의 주기 $\overline{T_f}$ 및 댐퍼의 항복전단력 계수 $\overline{\alpha_s}$를 가정한다.

면진장치(천연고무의 적층고무면진장치, 납봉삽입적층고무면진장치, 댐퍼 등)에는 설계치에 대한 제품의 편차, 온도변화 및 경년변화 등에 의한 면진장치의 강성의 변화와 댐퍼의 항복내력에 대한 편차가 존재하므로 장치제조메이커의 특성값를 파악하여 어느 정도 여유를 지닌 특성값를 설정하도록 한다.

가정한 면진건축물의 주기 $\overline{T_f}$ 및 댐퍼의 항복전단력계수 $\overline{\alpha_s}$로부터 적층고무 면진장치의 수평강성 $\overline{k_f}$, 댐퍼의 항복전단력 $\overline{Q_y}$은 다음과 같이 산정한다.

$$\overline{k_f} = \frac{4\pi^2 W_E}{\overline{T_f}^2 g} \quad \text{(t/cm)}$$

$$\overline{Q_y} = \overline{\alpha_s} W_E \quad \text{(t)}$$

4 단계: 면진장치의 설계

면진장치의 설계는 면진층의 특성값에서 가정한 면진장치의 수평강성 $\overline{k_f}$ 및 댐

퍼의 항복전단력계수$\overline{Q_y}$를 이용하여 적층고무 면진장치 및 댐퍼의 종류, 성능, 배치등을 고려하여 면진장치의 기본설계를 진행한다. 적층고무 면진장치와 댐퍼는 제3장을 참고로 설계한다. 감쇠성능을 지니고 있는 적층고무면진장치에 대해서도 적층고무면진장치로서의 탄성 성능과 댐퍼로서의 감쇠성능으로 분리하여 고려한다면 예비설계에서 검토할 수 있다.

① 적층고무 분리장치의 설계

㉮ 상부구조 기초부에 있는 기둥의 연직력의 분포와 최대치 및 최소치를 파악한다.

㉯ 면진건축물의 주기$\overline{T_f}$에서 적층고무 면진장치의 평균면압을 설정한다. 초기의 면진건축물의 주기$\overline{T_f}$는 2초 정도였지만, 최근에는 면진건축물의 대형화와 장치의 개수를 적게하는 등 면압을 높게 설정하기도 한다. 면진건축물의 주기$\overline{T_f}$가 4초 이상으로 면진효과가 높은 건축물릐 경우 고면압으로 설정하기도 한다. 일반적으로는 50㎏/㎠～150㎏/㎠의 면압에서 사용되고 있다.

㉰ 면진층의 설계변위δ_a의 2배 이상이 되도록 적층고무면진장치의 최소직경을 결정한다.

㉱ 각 적층고무면진장치의 직경을 기둥축력을 기준으로 결정한다. 장치 설치기둥축력이 작고 적층고무면진장치의 직경이 평균 면압이 아닌 최소직경으로 결정되는 것 이 많을 경우 면진층의 강성이 커져서 면진건축물의 주기가 가정주기보다 짧아지는 경우가 있을 수 있다. 이 경우에는 상부구조의 구조설계(기둥 배치 등)을 재검토 할 필요성이 있다.

㉲ 각 적층고무 면진장치의 수평강성의 합계가 가정한 $\overline{k_f}$가 되도록 각 적층고무 면진장치를 설계한다.

② 댐퍼의 설계

㉮ 댐퍼의 종류를 결정한다.

㉯ 댐퍼의 항복변위 δ_y가 설계변위 δ_a에 비해 충분히 작은 것을 확인한다.

㉰ 각 댐퍼의 항복전단력의 합계가 가정한 $\overline{Q_y}$가 되도록 댐퍼의 수량을 결

정한다.

㈑ 댐퍼는 면진층에 편심이 발생하지 않도록 면진층의 강심위치와 상부구조의 중심위치가 일치하도록 배치한다. 또 비틀림 강성을 크게 하기 위하여 댐퍼는 가능한 한 면진층 평면의 외측에 배치하는 것이 좋다.

5 단계: 특성값의 확인

4 단계 에서 설계한 각각의 면진장치의 특성값를 이용하여 면진층의 특성값 k_f, Q_y를 구하여 단계 3에서 가정한 $\overline{k_f}$, $\overline{Q_y}$에 거의 일치하는지를 확인한다. 이들 값의 차이가 크고, 적절한 면진장치를 설계할 수 없는 경우에는 면진층의 특성값를 수정하여 재검토한다.

$$k_f = \sum k_h \quad (\mathrm{t/cm})$$

$$Q_y = \sum f_{yd} \quad (\mathrm{t})$$

k_f : 각 면진장치의 수평강성(t/cm)

f_{yd} : 각 댐퍼의 항복내력(t)

6 단계: 면진층의 예상응답 확인

3, 4, 5단계에 의해 설계된 면진장치에 대한 제작 및 시공오차를 고려한 최대 응답변위 및 최대 전단력계수를 계산한다.

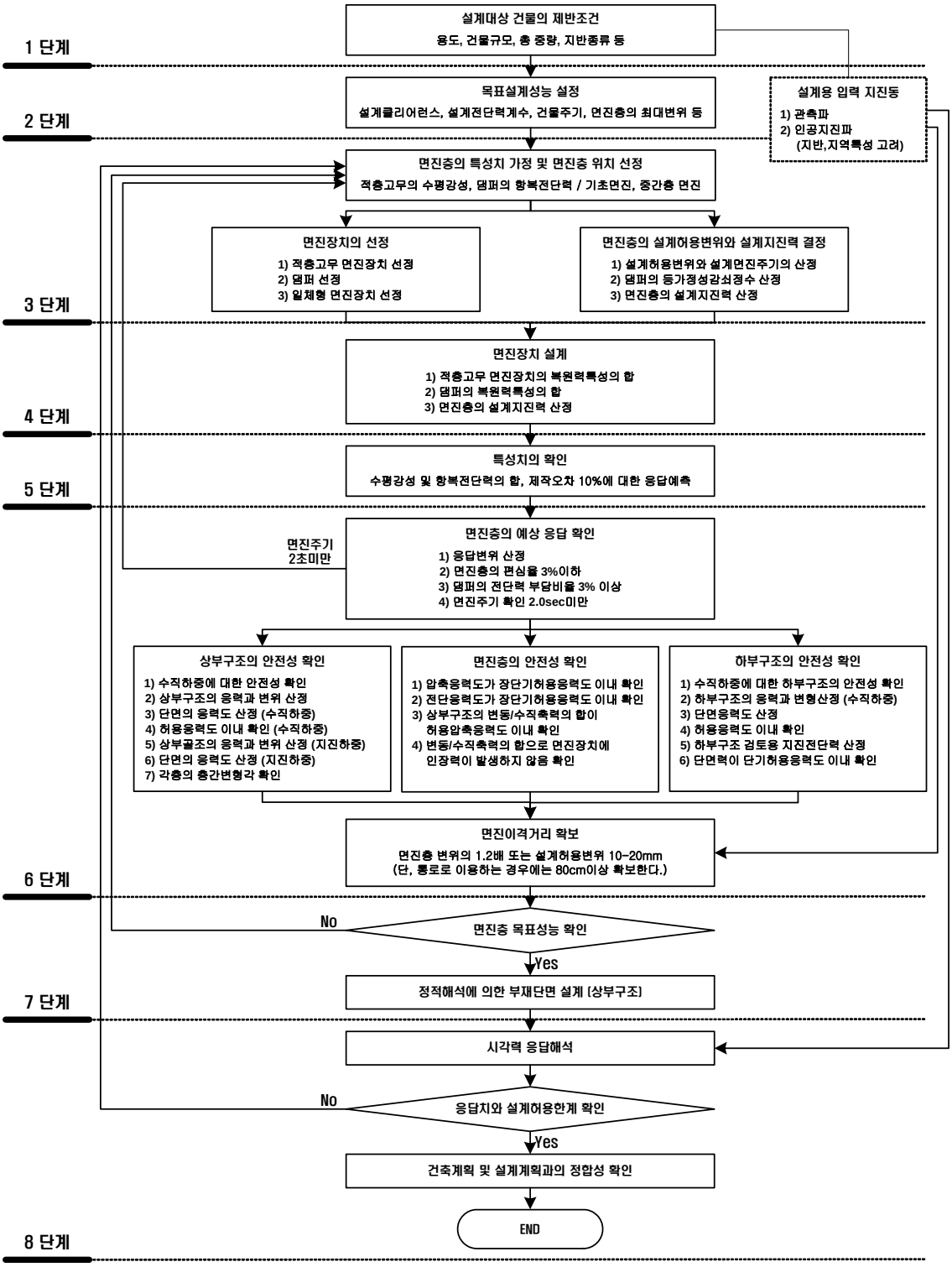
7 단계: 면진층의 목표성능 확인

예상응답 확인에서 면진층의 예상최대변위가 설계목표치의 최대변위를 상회하지 않는 것을 확인한다. 또 면진층의 예상 응답전단력계수가 설계목표치의 전단려계수를 상회하지 않는 것을 확인한다.

8 단계: 시간이력지진응답해석으로 안전성 확인

면진구조 건축물은 면진층에서 상부구조의 전중량을 지지하고 일반 건축물에서는 허용하지 않는 지진시에 변형을 허용하게 되므로 최종적으로 시간이력해석을 하여 안전성능과 여유도를 확인한다. 그러나 예비설계 단계에서는 포락해석법으로 지진응답을 예측하거나 면진층의 특성을 고려한 간략모델로 지진응답성능을 검토하는 것도 하나의 방법이다.

◆ 설계순서 상세


1 단계
설계대상 건물의 제반조건
용도, 건물규모, 총 중량, 지반종류 등
2 단계
목표설계성능 설정
설계클리어런스, 설계전단력계수, 건물주기, 면진층의 최대변위 등
설계용 입력 지진동
1) 관측파
2) 인공지진파
(지반,지역특성 고려)
면진층의 특성치 가정 및 면진층 위치 선정
적층고무의 수평강성, 댐퍼의 항복전단력 / 기초면진, 중간층 면진
3 단계
면진장치의 선정
1) 적층고무 면진장치 선정
2) 댐퍼 선정
3) 일체형 면진장치 선정
면진층의 설계허용변위와 설계지진력 결정
1) 설계허용변위와 설계면진주기의 산정
2) 댐퍼의 등가정성감쇠정수 산정
3) 면진층의 설계지진력 산정
면진장치 설계
1) 적층고무 면진장치의 복원력특성의 합
2) 댐퍼의 복원력특성의 합
3) 면진층의 설계지진력 산정
4 단계
특성치의 확인
수평강성 및 항복전단력의 합, 제작오차 10%에 대한 응답예측
5 단계
면진층의 예상 응답 확인
1) 응답변위 산정
2) 면진층의 편심율 3%이하
3) 댐퍼의 전단력 부담비율 3% 이상
4) 면진주기 확인 2.0sec미만
면진주기
2초미만
상부구조의 안전성 확인
1) 수직하중에 대한 안전성 확인
2) 상부구조의 응력과 변위 산정
3) 단면의 응력도 산정 (수직하중)
4) 허용응력도 이내 확인 (수직하중)
5) 상부골조의 응력과 변위 산정 (지진하중)
6) 단면의 응력도 산정 (지진하중)
7) 각층의 층간변형각 확인
면진층의 안전성 확인
1) 압축응력도가 장단기허용응력도 이내 확인
2) 전단응력도가 장단기허용응력도 이내 확인
3) 상부구조의 변동/수직축력의 합이
허용압축응력도 이내 확인
4) 변동/수직축력의 합으로 면진장치에
인장력이 발생하지 않음 확인
하부구조의 안전성 확인
1) 수직하중에 대한 하부구조의 안전성 확인
2) 하부구조의 응력과 변형산정 (수직하중)
3) 단면응력도 산정
4) 허용응력도 이내 확인
5) 하부구조 검토용 지진전단력 산정
6) 단면력이 단기허용응력도 이내 확인
면진이격거리 확보
면진층 변위의 1.2배 또는 설계허용변위 10~20mm
(단, 통로로 이용하는 경우에는 80cm이상 확보한다.)
6 단계
No
면진층 목표성능 확인
Yes
7 단계
정적해석에 의한 부재단면 설계 (상부구조)
시각력 응답해석
No
응답치와 설계허용한계 확인
Yes
건축계획 및 설계계획과의 정합성 확인
END
8 단계

(2) 면진구조 설계 예제 작성

면진구조 설계지침에 따른 설계 예제를 다음과 같이 나타낸다.

1 단계: 설계대상 건축물의 제반조건

용도: 전산센터

규모: 지상 8층(철근콘크리트조)

건축물높이: H=35.7m

지진시건축물 총중량 : $W_E = 9421(tf)$

상부구조의 고유주기: $T_n = N/10 = 8/10 = 0.8\sec$

지반종류 : SC

2 단계: 목표설계성능 설정

① 목표설계성능의 가정

설계용 에너지속도 : $V_E = 100cm/s$

면진건축물주기 : $T_f = 3.0(\sec)$

설계전단력계수 : $\alpha_a = 0.1$

댐퍼의 항복전단력계수 : $\alpha_s = 0.04$, (일반적으로 0.03~0.05)

설계변위 : $\delta_a = 30(cm)$

면진이격거리 : ${}_c\delta_a = 40cm$ (설계변위의 약 1.2배 or 10-20mm이상)

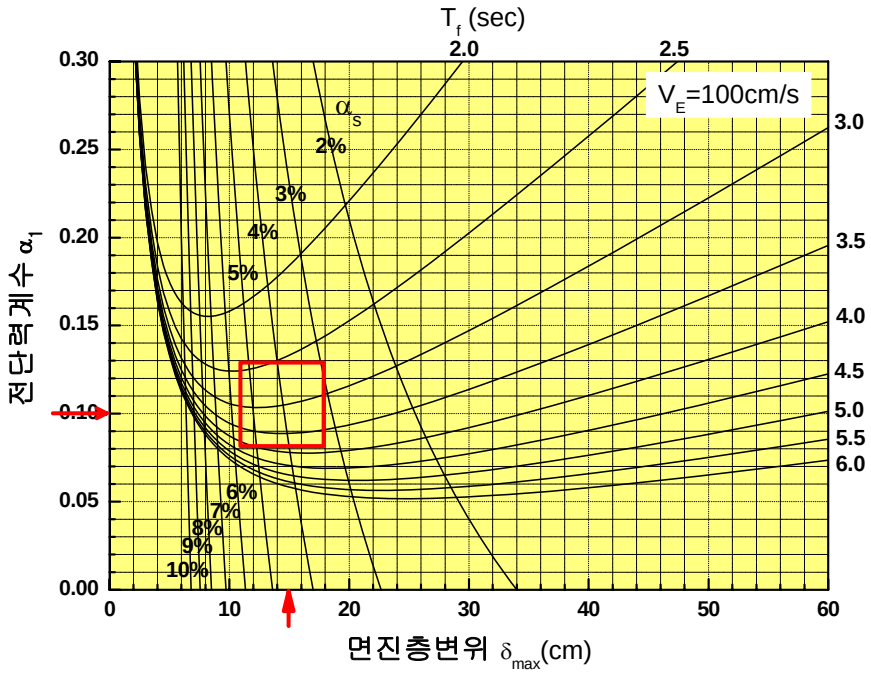


그림 3.2.8.5 전단력계수와 면진층 변위의 관계

② 그래프상의 목표설계성능의 가정

면진건축물의 주기 : $T_f = 3.0s$

전단력계수 : ${}_d\alpha_1 = 0.1$

댐퍼의 항복전단력계수 : ${}_d\alpha_s = 0.04$

면진층 최대변위 : ${}_d\delta_{\max} \fallingdotseq 14.5cm$

③ 계산에 의한 목표설계성능의 가정

설계용 에너지속도 : $V_E = 100cm/s$

면진건축물의 목표주기 : $T_f = 3.0s$를 설계조건으로 대입하면

$\alpha_0 = \dfrac{2\pi V_E}{T_f \cdot g} = 0.214$ (속도와 목표가정주기에 대한 전단력계수)

댐퍼의 항복전단력계수 : $\alpha_s = 0.04$

$$a = 8\left(\frac{\alpha_s}{\alpha_0}\right) = 1.498$$

$$\alpha_f = \left(-a + \sqrt{a^2+1}\right) \cdot \alpha_0 = 0.0647$$

$$\alpha_1 = \alpha_f + \alpha_s = 0.104$$

$$\delta_{\max} = \frac{T_f^2 \cdot \alpha_f \cdot g}{4\pi^2} = 14.46cm$$

∴ 거의 설계목표값의 가정값과 일치한다는 것을 알 수 있다.

3 단계: 면진층의 특성값 가정

① 적층고무의 수평강성 : $K_f = \frac{4\pi^2 \cdot W_E}{g \cdot T_f^2} = \frac{4\pi^2 \cdot 9421}{980 \cdot 3.0^2} = 42.2(t/cm)$

- 수평강성에 대해서는 댐퍼의 강성은 고려하지 않는다

② 댐퍼의 항복전단력 : $Q_y = {}_d\alpha_s \cdot W_E = 0.04 \times 9421 = 377(t)$

4 단계: 면진장치의 설계

4-1: 적층고무 분리장치의 설계

① 면진장치는 천연고무계 분리장치와 U형 강재댐퍼를 사용하기로 한다.

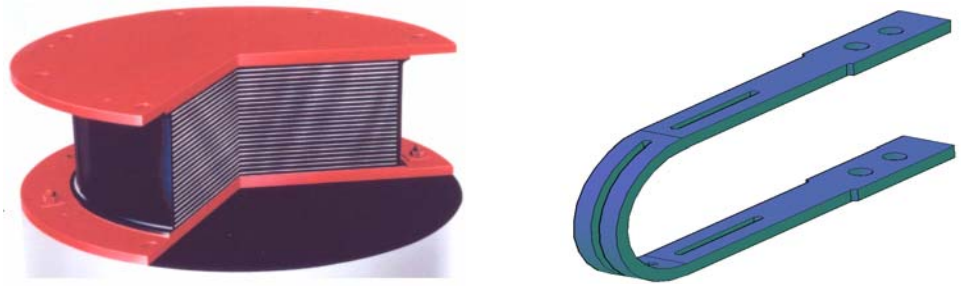


그림 3.2.8.6 천연고무계 분리장치와 U형 강재댐퍼

② 적층고무 분리장치(Isolator)의 크기

- 축력을 고려한 적층고무 장치의 크기

평면에서 축력은 기둥의 배치를 고려하여 각 기둥에서 큰 차이가 없는 것으로 가정 하고 적층고무의 평균면압 $\bar{\sigma} = \frac{N_c}{A} = 128.0(kg/cm^2)$를 이용하여 다음과 같이 계산한다.

$$W_E = n_c \bar{\sigma} A = 20 \times 128.0\, kg/cm^2 \times A = 9421 \times 10^3 kg$$

$$\therefore A = 3680.1 cm^2,\ A = \frac{\pi D^2}{4}$$ 이므로 "D=68.5cm" 이상이어야 한다.

- 설계변위를 고려한 적층고무 장치의 크기

설계변위에 대해서는 예상설계변위 14.5cm에 대한 2배 이상을 고려하여 "D=30cm" 이상이어야 한다. 따라서 두 조건을 고려하고, 중간기둥과 외주기둥의 구별 없이 "75cm"로 설정하였다.

③ 적층고무의 좌굴안전성을 고려하여 2차 형상계수 S_2는 가능한 한 $S_2 = 4 \sim 5$ 가 되도록 고려하였다.

④ 기둥 수 : $n_c = 20$개(적층고무 분리장치의 수)

⑤ 고무의 전단탄성계수 : $G = 4.0(kg/cm^2)$

⑥ 고무층의 전두께 : $h_R = \frac{G \cdot A}{K_f} \cdot n_c = \frac{4.0 \cdot \frac{\pi 75^2}{4}}{42.2} \cdot 20 = 8.4(cm)$

⑦ 고무 1층의 두께 : t_r=4.8mm 로 가정

- 일반적으로 4~8mm 사용

⑧ 고무층의 수 $n = \frac{h_R}{t_r} = \frac{8.4}{0.48} = 17.5 \approx 18$ 장

- 적층고무의 좌굴안전성 및 1차형상계수와 2차형상계수를 고려하여 고무층의 수를 30장으로 결정

⑨ 고무층의 두께 $h_R = t_r \times n = 4.8 \times 30 = 14.4(cm)$

⑩ 적층고무분리장치의 수평강성을 다시 산정한다.

$$\sum K_f = \frac{G \cdot A}{h_R} \cdot n_c = \frac{4.0 \cdot \frac{\pi 75^2}{4}}{14.4 \cdot 1000} \cdot 20 = 24.5(t/cm)$$

⑪ 2차형상계수 : $S_2 = \frac{\text{고무직경}}{\text{전고무층두께}} = \frac{D}{h_R} = \frac{75}{14.4} = 5.2$

⑫ 1차형상계수 : $S_1 = \frac{\text{고무의 구속면적}}{\text{고무1층의 자유표면적}} = \frac{Di - d_i}{4 \cdot t_r} = \frac{75 - 14}{4 \times 0.48} = 31.8$

- 적층고무 분리장치의 특성값는 목표가정치의 범위에 있음을 확인한다.

⑬ 적층고무의 연직강성

$$\sum K_V = 3116.4 \times 20 = 62327.4(t/cm)$$

⑭ 적층고무분리장치의 최대변형능력 ${}_f\delta_a$는 $\phi 750$의 절반인 37.5cm이하로 한다.

${}_f\delta_a \geqq \delta_a$ 이므로 OK

⑮ 장치 제공업체의 납봉삽입천연고무적층고무 분리장치의 선형한계변위를 고무층 두께의 250%라고 하면

${}_f\delta_u = 14.4 \times 2.5 = 36cm \geqq {}_f\delta_a$ 이므로 OK

4-2: 댐퍼의 설계

① 장치의 항복전단력 $Q_y = 5(t)$ (장치제조업체에서 제공)

② 장치의 항복변위 $\delta_y = 3cm$ (장치제조업체에서 제공)

③ 댐퍼의 최대변형능력 ${}_d\delta_u = 40cm \geqq \delta_a$

5 단계: 특성값의 확인

* 3 단계 에서 가정한 특성값을 이용하여 4 단계 에서 설계한 분리장치 및 댐퍼에 대해서 재계산을 하여 값을 확인한다.

① 수평강성의 합 : $K_f = \sum K_h = 24.5t/cm$

② 댐퍼의 항복전단력의 합 : ${}_dQ_y = 5 \times 80 = 400t \geqq 376.8$ 이므로 OK

6 단계: 응답예측

이상의 면진장치의 특성값를 이용하여 지진응답을 예측하면 다음과 같다.

① 면진주기 : $T_f = 2\pi\sqrt{\frac{W_E}{g \cdot K_f}} = 2\pi\sqrt{\frac{9421}{980 \cdot 24.5}} = 3.94(\sec)$

② $\alpha_s = Q_y / W_E = 400/9421 = 0.042$

③ $\alpha_0 = \frac{2\pi V_E}{T_f \cdot g} = 0.163$

④ $a = 8\left(\frac{\alpha_s}{\alpha_0}\right) = 8\left(\frac{0.042}{0.163}\right) = 2.061$

⑤ $\alpha_f = \left(-a + \sqrt{a^2+1}\right) \cdot \alpha_0 = \left(-2.061 + \sqrt{2.061^2+1}\right) \cdot 0.163 = 0.037$

⑥ $\alpha_1 = \alpha_f + \alpha_s = 0.079$

⑦ $\delta_{\max} = \frac{T_f^2 \cdot \alpha_f \cdot g}{4\pi^2} = \frac{3.94^2 \cdot 0.037 \cdot 980}{4\pi^2} = 14.26(cm)$

⑧ 장치의 제작 및 시공오차를 ±10% 정도 고려하여 적층고무 분리장치의 수평강성과 댐퍼의 항복전단력을 변화시켜 조합하여 응답을 예측하면 표 3.2.8.1과 같다.

표 3.2.8.1 응답예측결과

구 분	적층고무강성(-10%)	적층고무강성(0%)	적층고무강성(+10%)
댐퍼 (-10%) α_1	0.075	0.079	0.083
δ_{max}(cm)	15.82	15.80	15.56
댐퍼 (0%) α_1	0.076	0.079	0.083
δ_{max}(cm)	14.5	14.2	14.1
댐퍼 (+10%) α_1	0.077	0.081	0.084
δ_{max}(cm)	13.0	13.1	13.01

7 단계: 면진층 목표성능 확인

응답예측결과에서 면진층의 예상최대변위가 설계목표치의 최대변위를 상회하지 않는 것을 확인한다. 또 면진층의 예상 응답전단력계수가 설계목표치의 전단력계수를 상회하지 않는 것을 확인한다.

① 면진층의 최대변위 : 표 3.2.8.1에서 $\delta_{max} = 15.82(cm) \leqq \delta_a = 30(cm)$로 만족한다.

② 전단력계수 : 표 3.2.8.1에서 $\alpha_1 = 0.084 \leqq \alpha_a = 0.1$ 로 만족한다.

8 단계: 시간이력지진응답해석으로 안전성 확인

최종적으로 시간이력지진응답해석을 하여 안전성을 확인하여 안전 여유도를 확인하면 설계가 종료된다.

* 안전율 확인 : 면진층의 최대변위 능력(30cm)에 도달할 수 있는 속도스펙트럼 값을 구하여 안전율을 구한다.

※ 이상의 결과에 의해 설계된 적층고무를 정리하면 표 3.2.8.2와 같다.

표 3.2.8.2 적층고무의 사양

직경(㎜)	1층 고무 두께(㎜)	고무층수	S_1	S_2	K_H (kN/㎜)	K_V (kN/㎜)
750	4.8	30	31.8	5.2	2.0	7478

나. 복합면진장치의 설치 프로세스 및 면진구조의 시공지침 작성

(1) 에너지흡수장치의 설계지침

본 절에서는 변형능력 및 응력분포가 우수한 그림 3.2.8.7의 형상을 가진 에너지흡수장치의 설계식을 제안하기 위하여 형상비(L/R)를 1.8, 2.4, 3.0으로, 두께(T)를 20, 40, 60mm로, 폭(W)을 30, 50, 70mm로 두고 각 변수에 따라 비선형 유한요소해석을 수행한다. 해석결과에 근거하여 형상비, 두께 및 폭에 따른 댐퍼의 변형능력을 각각 평가한 결과, 두께 및 폭에 따른 댐퍼의 변형능력은 하중의 작용방향에 관계없이 선형으로 변화하는 경향을 나타내기 때문에 두께와 폭이 댐퍼의 한계변형량에 대한 영향을 조합하여 폭과 두께 3배의 합(W+3T)을 하나의 변수로 나타낸다. 제안된 설계식에 근거하여 결정된 댐퍼의 한계변형량은 하중의 작용방향에 관계없이 항상 작은 값을 기준으로 한다.

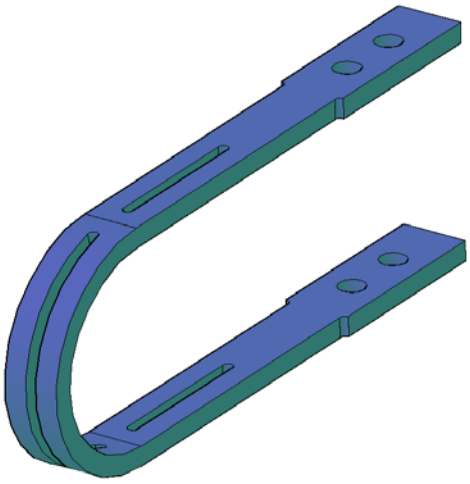


그림 3.2.8.7 에너지 흡수장치의 형상

(가) 길이방향 하중이 작용할 경우의 설계식

선행 연구에서 수행되었던 에너지흡수장치의 비선형 유한요소 해석결과에 근거하여 길이방향 하중을 받을 경우, 댐퍼의 한계변형량, $W+3T$ 및 형상비의 관계를 그림 3.2.8.8에 나타낸다. 그림에서 나타낸 것과 같이 한계변형량과 는 역시 선형관계를 이루고 관계식에서 기울기와 상수항은 형상비에 관계되며, 간단한 설계식을 제안하기 위하여 기울기의 절대값을 , 상수항을 으로 두고 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\delta_{\lim} = -A_1 \cdot (W+3T) + B_1 \qquad (3.2.8.1)$$

여기서, $\delta_{\lim}$: 한계변형량 (mm)

W : 두께 (mm)

T : 높이 (mm)

L/R와 기울기의 절대값 및 상수항 의 관계를 파악하기 위하여 그림 3.2.8.8에 나타낸 추세선에서 기울기의 절대값과 상수항을 취하여 형상비와의 관계를 각각 그림 3.2.8.9와 그림 3.2.8.10에 나타낸다.

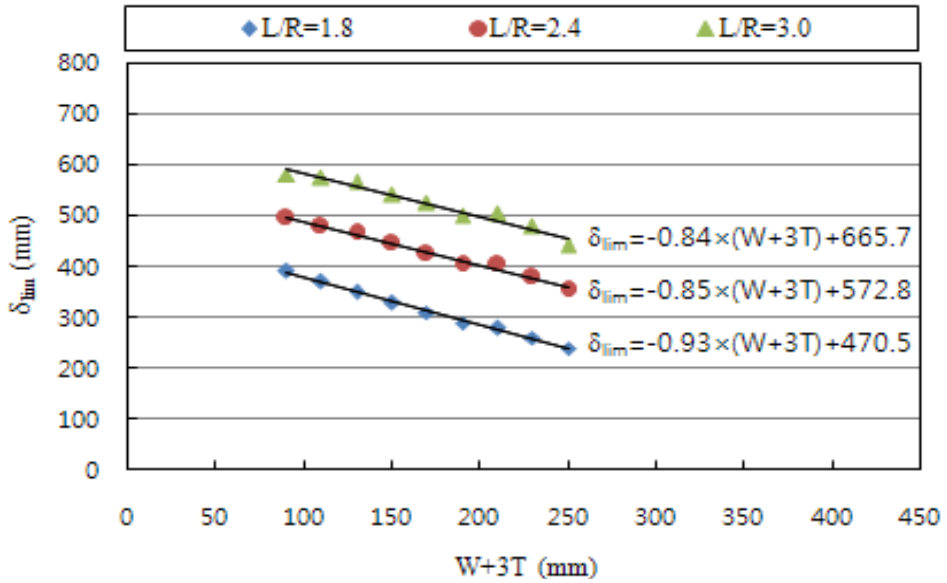


그림 3.2.8.8 길이방향 하중일 경우의 한계변형량과 변수의 관계

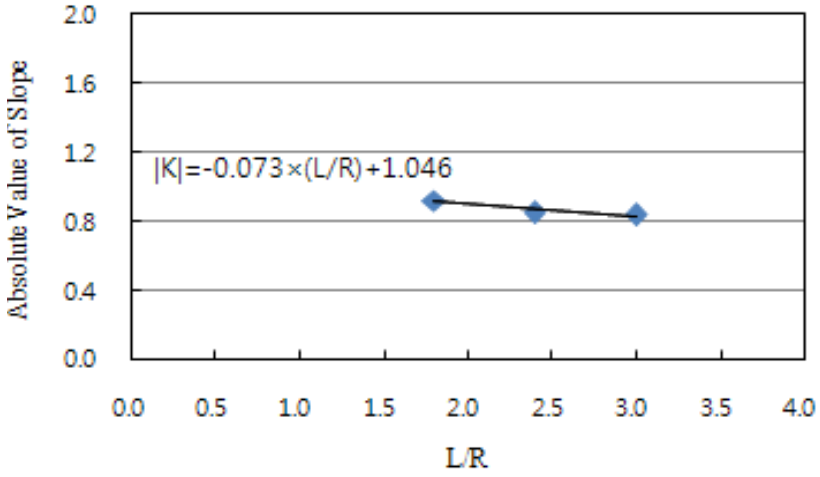


그림 3.2.8.9 길이방향 하중일 경우의 형상비와
기울기 절대값의 관계

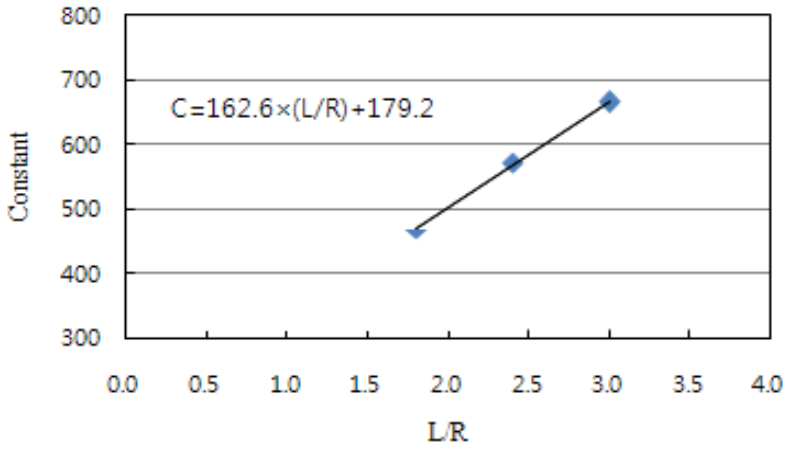


그림 3.2.8.10 길이방향 하중일 경우의 형상비와
상수항의 관계

그림 3.2.8.9와 그림 3.2.8.10에서 나타낸 추세선에 근거하여 기울기의 절대값과 L/R의 관계를 식 (4.2)에, 상수항 과 L/R의 관계를 식 (4.3)에 나타낸다.

$$A_1 = -0.073 \times (L/R) + 1.046 \qquad (3.2.8.2)$$

$$B_1 = 162.6 \times (L/R) + 179.2 \qquad (3.2.8.3)$$

식 (3.2.8.1)~식 (3.2.8.3)은 HTS를 사용한 댐퍼의 요구되는 한계변형량과 두께 및 폭에 근거하여 최적의 형상비를 결정하는데 사용할 수 있다. 제안된 설계

식을 사용하여 횡축을 로, 종축을 한계변형량으로 두고 선정된 몇개의 형상비에 따른 설계도표를 그림 3.2.8.11에 나타낸다. 그림 3.2.8.11을 이용하여 댐퍼를 설계할 경우에는 형상적이고도 간단하여 시간을 적게 들일 수 있는 이점이 있을 것으로 생각된다.

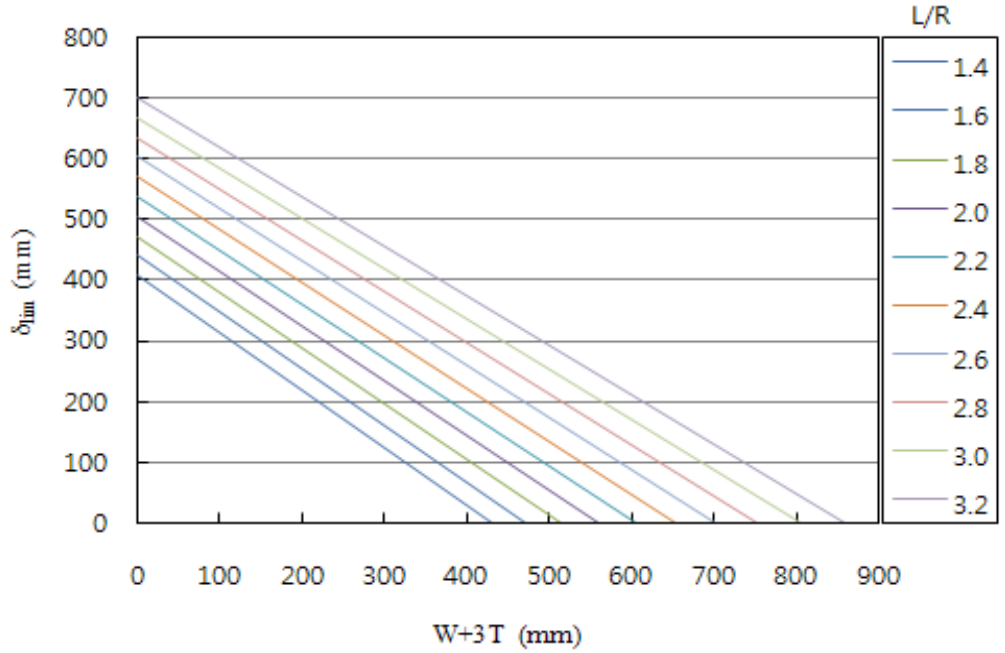


그림 3.2.8.11 길이방향 하중일 경우의 댐퍼의 설계도표

(나) 수직방향 하중이 작용할 경우의 설계식

길이방향 하중을 받을 경우의 설계식의 유도방법과 같은 방법으로 수직방향 하중이 작용할 경우의 설계식을 제안할 수 있다. 그림 3.2.8.12, 그림 3.2.8.13 및 그림 3.2.8.14에 근거하여 수직방향 하중을 받을 경우의 강재댐퍼는 아래와 같은 식으로 설계할 수 있다. 여기서 길이방향 하중을 받는 경우와 구별하기 위하여 기울기의 절대값과 상수항을 각각 와 로 나타낸다.

$$\delta_{\lim=} -A_2 \bullet (W+3T)+B_2 \qquad (3.2.8.4)$$

$$A_{2=} -0.093\times(L/R)+1.115 \qquad (3.2.8.5)$$

$$B_{2=} 260.9\times(L/R)+51.06 \qquad (3.2.8.6)$$

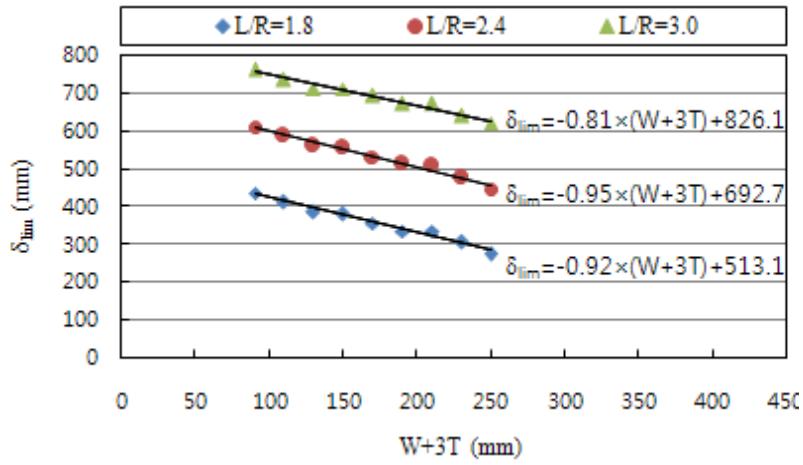


그림 3.2.8.12 수직방향 하중일 경우의 한계변형량과 변수의 관계

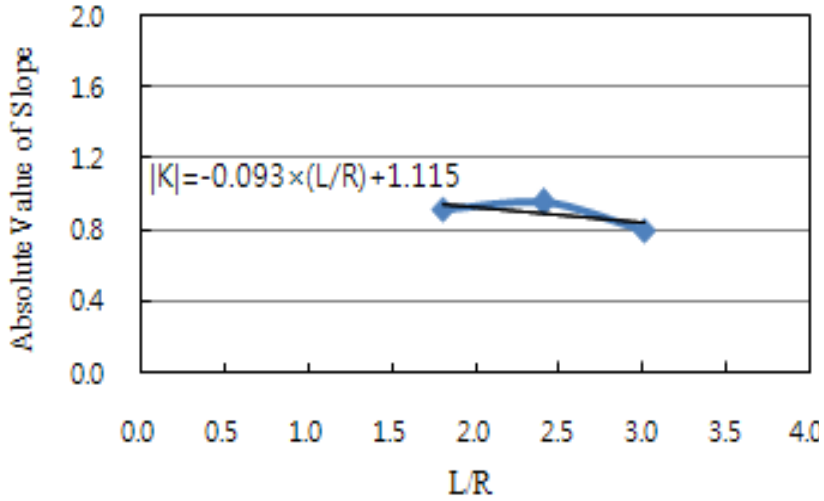


그림 3.2.8.13 수직방향 하중일 경우의 형상비와 기울기 절대값의 관계

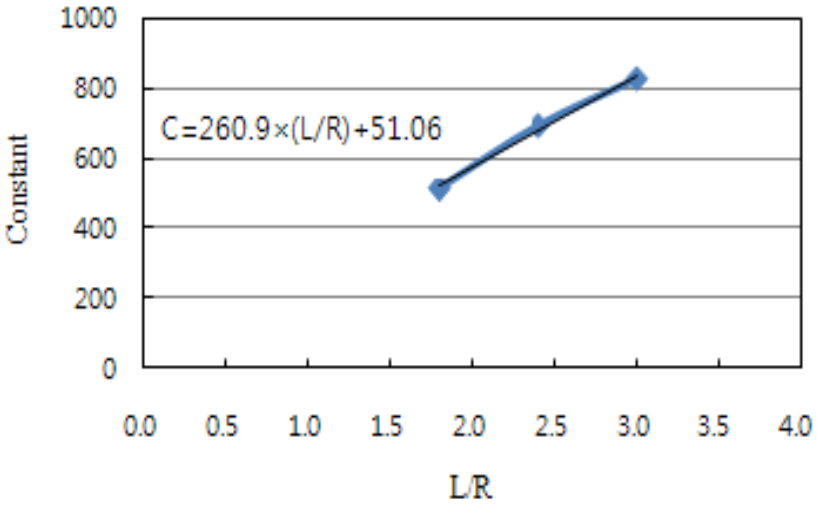


그림 3.2.8.14 수직방향 하중일 경우의 형상비와 상수항의 관계

댐퍼의 설계과정을 간단하게 하고 시간을 절약하기 위하여 수직방향 하중을 받는 경우에도 식 (3.2.8.4)~식 (3.2.8.6)을 사용하여 횡축을 로, 종축을 한계변형량으로 두고 선정된 몇개의 형상비에 따른 설계도표를 그림 4-20에 나타낸다. 단, 그림 4-16과 그림 4-20을 사용하여 댐퍼를 설계할 경우에 한계변형량은 작은 값을 기준으로 하여야 한다.

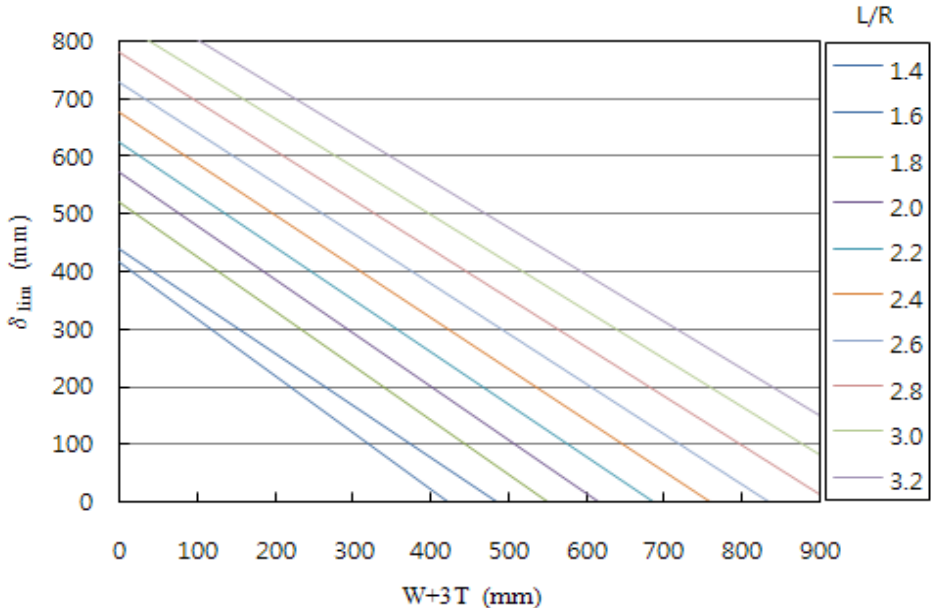


그림 3.2.8.15 수직방향 하중일 경우의 댐퍼의 설계도표

(2) 면진구조의 시공순서 및 지침 작성

면진층의 시공은 면진구조의 시공과정에서 가장 핵심이 되는 부분이다. 자세한 설명은 부록을 참조하기 바란다. 아래 그림 3.2.8.16은 간략하게 그림으로 면진장치 시공방법을 도식화하여 나타내고 있다.

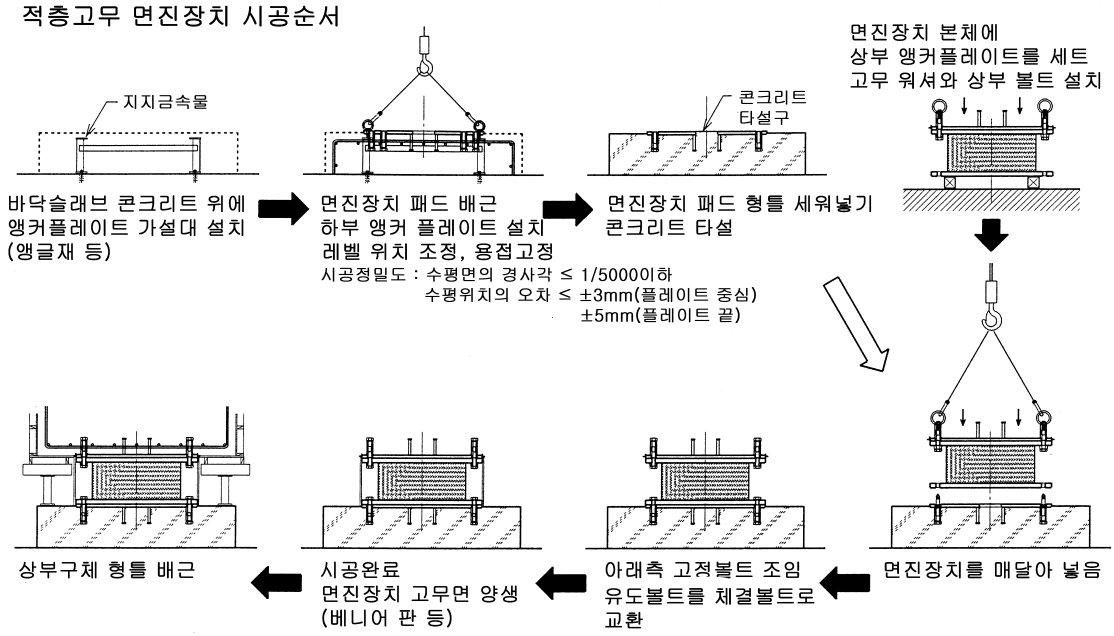


그림 3.2.8.16 복합면진장치의 시공순서

다. 복합면진장치 품질관리 작성

(1) 복합면진장치의 품질관리

복합면진장치의 제작공정에서 시공자가 실시하는 품질관리는「면진장치 제작자에 의한 자체확인 관리」와 「시공자 입회검사에 의한 관리」두 종류가 있으며 면진장치의 성능, 구조, 치수, 품질 등이 적정한가를 확인한다. 각각의 검사항목에 대해 서류(검사보고서)확인이나 입회검사에 근거하여 품질관리를 실시한다. 복합면진장치 제작관리 흐름도는 아래 그림 3.2.8.17와 같다. 면진장치 제작 후 제작자는 공장에서 면진장치의 재료, 외관, 치수, 방청, 성능검사 등을 시행하여야 하며 시공자는 임의 추출에 의해 입회검사를 실시한다. 복합면진장치의 품질검사 항목과 판정기준 및 검사방법은 표 3.2.8.3과 같으며 치수검사 방법은 표 3.2.8.4과 같다. 또한 시공자는 베이스플레이트가 설계도서 또는 공사감리자의 승인을 받아 규정된 것에 적합한 품질임을 제작공장에서 확인한다. 특히 시공성 증진을 위해 설치하는 플레이트 중앙부 구멍이나 여러 개의 공기구멍 등이 설치되었는지를 확인하여야 하며 도면에 미 표기되어 있는 경우는 설계자와 협의하

여 설치하도록 한다. 베이스플레이트 하부에 콘크리트를 충전할 경우 중앙부에 콘크리트 타설용 구멍이 필요하다. 구멍의 크기는 구조적으로 지장이 없는 범위에서 ϕ150~200 정도로 한다. 베이스플레이트 하부에 콘크리트를 타설할 때 중앙부보다 외측을 향해 공기를 압출하도록 타설하는데 도중에 공기가 빠지지 않고 모이는 현상이 자주 발생하기 때문에 공기빠짐용 구멍(ϕ30)을 여러 개 설치할 필요가 있다.

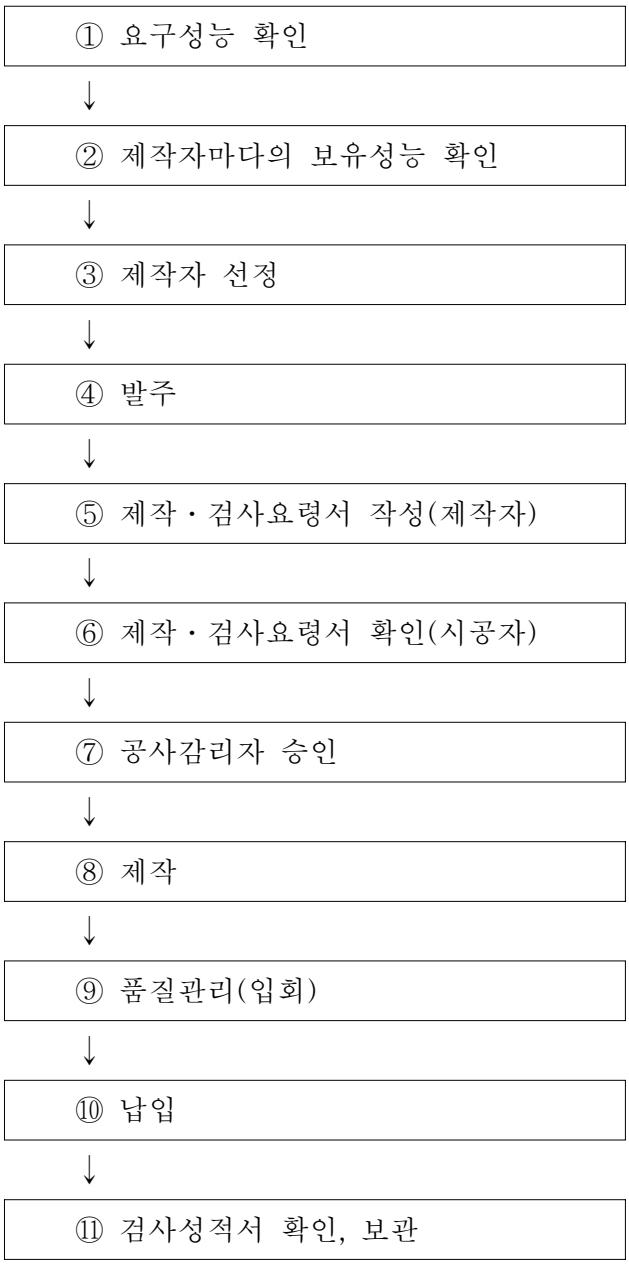


그림 3.2.8.17 면진장치의 제작관리 흐름도

표 3.2.8.3 적층고무 면진장치의 품질검사

구분	검사항목		검사빈도	판정기준	처치	검사방법	
						제작자	시공자
재료검사	고무재료의 물성검사	경도	1물건에 1회 이상	사양과 차이가 없음	재료의 재제작	자체	서류
		인장응력					
		인장강도					
		신장					
	사용강재의 밀시트		전수	사양과 차이가 없음	"	서류	서류
외관검사	완성품의 외관검사		전수	유해한 흠이나 변형, 도장, 도금의 들뜸, 박리, 고무와 철판간 접합부 결함	보수	자체	입회
치수검사	제품높이		전수	설계값±1.5%나 ±6㎜ 전제품 평균값과의 차 ±6㎜	보수 또는 재제작	자체	입회
	고무부 외경			설계값 ±0.5%나 ±4㎜			
	플랜지 기울기			플랜지외경의 0.5%나 3㎜ 이내			
	플랜지 길이			설계값 ±3㎜			
	플랜지 어긋남			5㎜이내			
	플랜지 볼트구멍 피치			설계값 ±1.2㎜			
방청	도장 막두께 검사		동일제품 중 50%이상	사양과 차이가 없다	보수	자체	입회
성능검사	연직 재하시험	연직강성	전수	설계값±20%	재제작	자체	입회
	수평 재하시험	수평강성	전수	설계값±20%	재제작	자체	입회
		등가감쇠정수	전수	설계값±20%			

(주) 성능검사에서 설계값의 편차 20%는 최대값을 나타내며, 특기시방서에 따르든지 또는 공사감리자와 협의한 다음 적절한 값을 설정한다.

표 3.2.8.4 베이스플레이트의 품질검사

검사부위	검사항목	검사방법	빈도	판정기준	판정기준을 벗어난 경우의 조치
재료	강재의 밀시트	조합	전수	사양과 차이가 없을 것	제품교체
머리부 착 스터드 볼트	용접부의 외관	육안	전수	형상에 이상이 없을 것	제품교체
	용접부의 강도	휨 시험	임의 추출	소정의 강도가 있을 것	제품교체
베이스 플레이트	볼트구멍의 위치, 지름	계측	전수	시공할 수 있음을 조사	제품교체
	플레이트면의 휨	계측	전수	휨차 1/500이하 또는 3㎜이내	교정
	국부적 변형, 타격상처	육안	전수	설치에 지장이 없을 것	교정 또는 제품교체
	도장상태	육안	전수	들뜸, 박리가 없을 것	보수

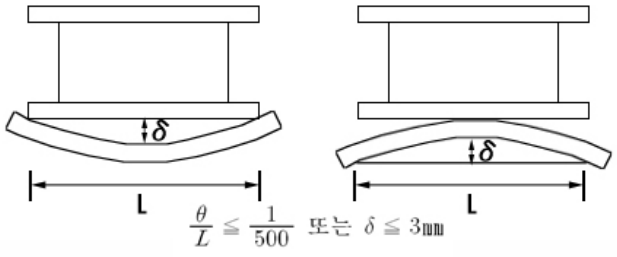


그림 3.2.8.18 베이스플레이트의 휨 검사

면진장치의 현장반입 시, 각종 성능 및 치수 등에 대해서는 제작 시 확인 검사한 사항으로 현장에서는 제품 확인과 운반시의 손상을 검사한다. 운반시의 손상검사는 임의 추출검사를 수행하며 설치 시 전수검사를 시행한다.

(2) 고인성 강재 규격서

고인성 압연강재 합금 조건과 열처리 조건에 따라 특성을 파악하여 등급화함으로써 상용화 후 엔드 유저가 적용 환경에 따라 강종을 선택할 수 있게끔 규격서를 제작하였다. 실제 적용 시에 편의성을 부여하여 기존 강재와의 경쟁력을 갖춘 강재를 개발하는 것이 본 규격서의 제작 목적이다.

고망간・고인성 압연 강재

(High Manganese Rolled Damping Alloy Steel)

(가) 적용범위

이 규격은 고망간・고인성 압연강재(이하 고인성 압연강재)에 대하여 규정한다.

(나) 용어의 뜻

① 고인성 압연강재: 고인성 압연강재란 내부마찰(Internal Friction)이 커서 외부에서 가한 진동에너지의 대부분을 열로 전환시키는 합금으로 인성이 특히 우수한 합금을 말한다.

② 진동감쇠능: 진동에너지를 열로 변환시키는 능력을 말하며, 감쇠능의 크기는 비감쇠능, 대수감쇠율, 내부마찰 등으로 표시된다.

(다) 종류 및 기호

고인성 압연 강재의 종류 및 기호는 표 3.2.8.5에 따른다.

표 3.2.8.5 고인성 압연 강재의 종류 및 기호

종류	기호	적요
1종	HMnD	일반용
2종	HMnD Cu	내후성용
3종	HMnD Cr	내식성용
4종	HMnD CTi	일반용
5종	HMnD C2Ti	고장력용
6종	HMnD CCo	일반용

(라) 제조방법

① 고인성 압연강재는 열간압연 후 열처리를 하고 산세 또는 이에 준하는 처리를 한 후 적당한 교정을 한다.

② 고용화 열처리는 950~1,050℃에서 시행한 후 급냉 또는 서냉한다.

(마) 화학성분

고인성 압연강재의 화학성분은 레이들 분석에 따르고, 그 값은 표 3.2.8.6에 따른다. 또한, 지정에 의하여 제품 분석을 할 경우의 허용 변동치는, KS D 0228 (강재의 제품 분석방법 및 그 허용 변동치)의 5.의 표 4를 적용한다. 다만 이 표가 적용되지 않는 화학성분 규정치에 대해서는, 주문자와 제조자간의 협정에 따른다.

표 3.2.8.6 고인성 압연강재의 화학성분

종류의 기호	화학성분 %					
	C	Mn	Si	P	S	기타
HMnD	0.06 이하	17~21	0.1 이하	0.02 이하	0.02 이하	
HMnD Cu	0.06 이하	16~18	0.1 이하	0.02 이하	0.02 이하	Cu 0.1~0.7
HMnD Cr	0.06 이하	16~18	0.1 이하	0.02 이하	0.02 이하	Cr 0.1~0.5
HMnD CTi	0.06~0.15	16~19	0.1 이하	0.02 이하	0.02 이하	Ti 0.2~0.7
HMnD C2Ti	0.19~0.23	16~19	0.1 이하	0.02 이하	0.02 이하	Ti 0.3~0.5
HMnD CCo	0.1~0.2	16~19	0.1 이하	0.02 이하	0.02 이하	Co 0.1~1.0

(바) 기계적 성질

고인성 압연강재의 고용화 열처리를 실시한 후의 내력, 인장강도, 연신율 및 경도는 표 3.2.8.7에 따른다. 다만 내력은 특히 주문자의 지정이 있는 경우에 적용한다.

표 3.2.8.7 고인성 압연강재의 내력, 인장강도, 연신율 및 경도

종류의 기호	인장시험			경도시험		
	인장강도 MPa	내력 MPa	연신율 %	HB	HRB	HV
HMnD	900 이상	280 이상	50 이상	181 이상	89 이상	194 이상
HMnD Cu	780 이상	320 이상	46 이상	162 이상	85 이상	170 이상
HMnD Cr	750 이상	320 이상	40 이상	171 이상	87 이상	180 이상
HMnD CTi	850 이상	350 이상	30 이상	190 이상	91 이상	198 이상
HMnD C2Ti	1100 이상	350 이상	30 이상	228 이상	98 이상	240 이상
HMnD CCo	700 이상	250 이상	14 이상	193 이상	92 이상	204 이상

(사) 진동감쇠능

고인성 압연강재의 고용화 열처리를 실시한 후의 진동감쇠능은 표 3.2.8.8에 따른다.

표 3.2.8.8 고인성 압연강재의 진동감쇠능

종류의 기호	진동감쇠능 (SDC, %)
HMnD	22 이상
HMnD Cu	17 이상
HMnD Cr	17 이상
HMnD CTi	15 이상
HMnD C2Ti	15 이상
HMnD CCo	12 이상

(아) 겉모양, 모양, 치수, 무게 및 그 허용차

강재의 겉모양, 모양, 치수, 무게 및 그 허용차는 다음 규격에 따른다.

KS D 3051(열간압연 봉강 및 코일 봉강의 모양, 치수 및 무게와 그 허용차)
KS D 3052(열간압연 평강의 모양, 치수 및 무게와 그 허용차)
KS D 3500(열간압연 강판 및 강대의 모양, 치수 및 무게와 그 허용차)
KS D 3502(열간압연 형강의 모양, 치수 및 무게와 그 허용차)

이 경우 강판 및 강대의 길이 및 커트에지의 경우, 나비의 허용차는 특히 지정하지 않는 한 허용차 A에 따른다.

(자) 시험

① 분석시험

㉮ 분석시험의 일반사항 및 레이들 분석 시료의 채취방법은 KS D 0001(강재의 검사통칙) 3.의 규정에 따른다.

㉯ 제품 분석 시료 채취 방법은 KS D 0228(강재의 제품 분석 방법 및 그 허용 변동치)의 3.의 규정에 따른다.

㉰ 분석방법은 다음에 따른다.

KS D 1652(철 및 강의 광전 측광식 발광 분광 분석방법)
KS D 1655(철 및 강의 형광 X선 분석방법)
KS D 1659(철 및 강의 원자 흡광 분석방법)
KS D 1802(철 및 강의 인 분석방법)
KS D 1803(철 및 강의 황 분석방법)
KS D 1804(철 및 강의 탄소 분석방법)
KS D 1805(철 및 강의 규소 분석방법)
KS D 1806(철 및 강의 망간 분석방법)
KS D 1807(철 및 강의 크롬 분석방법)
KS D 1810(철 및 강의 구리 분석방법)
KS D 1875(철 및 강의 코발트 분석방법)
KS D 1876(철 및 강의 티탄 분석방법)

② 기계시험

㉮ 인장시험

인장시험은 다음 각 항에 따른다.

㉠ 시험편은 KS B 0801(금속재료 인장시험편)에 규정한 10호 시험편, 13B호 시험편, 14A호 시험편 및 14B호 시험편의 어느 것을 사용한다. 또한 4호 시험편 또는 5호 시험편을 사용해도 좋다.

㉡ 시험방법은 KS B 0802(금속재료 인장시험방법)에 따른다. 다만 시험온도는 20±5℃를 표준으로 한다.

㉯ 경도시험

경도시험은 다음의 각 항에 따른다.

㉠ 시험편은 인장시험편의 일부를 사용할 수 있다.

㉡ 시험방법은 다음의 어느 규격에 따른다. 다만, 시험온도는 20±5℃를 표준으로 한다.

KS B 0805(브리넬 경도 시험방법)

KS B 0806(로크웰 경도 시험방법)

KS B 0811(비커스 경도 시험방법)

③ 진동시험

㉮ 진동시험은 Fopple-Pertz형 비틀림 진자시험 및 임팩트 시험에 의하여 실시한다.

㉯ 진동감쇠능의 크기는 비감쇠능(SDC)로 나타내고, 이는 다음과 같이 정의한다.

W는 진동에너지, △W는 1주기당 진동에너지 손실, Yn, Yn+1은 2개의 연속된 진폭의 크기

(차) 검사

① 검사의 일반 사항은 KS D 0001(강재의 검사통칙)에 따른다.

② 화학성분, 기계적 성질, 진동감쇠능의 성적은 4.~6.의 규정에 적합하여야 한다. 다만 인장시험, 경도시험은 주문자의 승인을 얻어 그 일부 또는 전부를 생략할 수 있다.

(카) 표시

검사에 합격한 강재에는 강재마다 또는 1 묶음마다 다음 항목을 적당한 방법

으로 명시하여야 한다. 다만 주문자의 승인을 얻은 경우에는 그 일부를 생략할 수 있다.

① 종류의 기호

② 용강 번호 또는 검사 번호

③ 치수

④ 1 묶음마다의 무게 또는 수량(강판과 강대의 경우)

⑤ 제조자 명 또는 그 약호

(타) 보고

KS D 0001의 8.의 규정에 따른다.

고망간・고인성 주강품
(High Manganese Damping Alloy Steel Castings)

(가) 적용범위

이 규격은 고망간・고인성 주강품(이하 고인성 주강품)에 대하여 규정한다.

(나) 용어의 뜻

① 고인성 주강품 : 고인성 주강품이란 내부 마찰(Internal Friction)이 커서 외부에서 가한 진동에너지의 대부분을 열로 전환시키는 합금으로 인성이 특히 우수한 합금을 말한다.

② 진동감쇠능 : 진동에너지를 열로 변환시키는 능력을 말하며, 감쇠능의 크기는 비감쇠능, 대수감쇠율, 내부마찰 등으로 표시된다.

(다) 종류 및 기호

고인성 주강품의 종류 및 기호는 표 3.2.8.9에 따른다.

표 3.2.8.9 고인성 주강품의 종류 및 기호

종류	기 호	적 요
1종	HMnDSC 1	일반용(보통품)
2종	HMnDSC 2	일반용(보통품)
3종	HMnDSC 3	일반용(보통품)
4종	HMnDSC 4	일반용(고급품)

(라) 제조방법

① 고인성 주강품은 로 내에서 각 부를 균일하게 가열하여 표 3.2.8.10의 열처리를 하여야 한다.

② 고인성 주강품은 용접, 기타 적당한 방법에 의하여 보수할 수 있다. 다만, 보수에 의하여 품질에 영향을 미칠 우려가 있는 경우에는 미리 주문자와 제조자가 협의하여야 한다. 또한, 용접 보수 후는 필요에 따라 재 열처리를 한다.

표 3.2.8.10 고인성 주강품의 열처리 조건

종류의 기호	열처리 조건
HMnDSC 1	열처리를 전혀 실시하지 않음
HMnDSC 2	용체화처리만 실시
HMnDSC 3	균질화처리만 실시
HMnDSC 4	균질화처리 후 용체화처리 실시

비고) 균질화처리는 약 1100℃에서 12~24시간 열처리 후 급냉 또는 서냉하고, 용체화처리는 약 1050℃에서 1시간 열처리 후 급냉 또는 서냉한다.

(마) 품질

① 고인성 주강품은 품질이 균일하고 사용상 해로운 홈 또는 블로우 홀(blow hole) 등이 없어야 한다.

② 고인성 주강품의 화학성분은 레이들 분석에 따르고, 그 값은 표 3.2.8.11에 따른다.

표 3.2.8.11 고인성 주강품의 화학성분

종류의 기호	화학성분 %				
	C	Mn	Si	P	S
HMnDSC 1	0.06 이하	17 ~ 21	0.1 이하	0.02 이하	0.02 이하
HMnDSC 2	0.06 이하	17 ~ 21	0.1 이하	0.02 이하	0.02 이하
HMnDSC 3	0.06 이하	17 ~ 21	0.1 이하	0.02 이하	0.02 이하
HMnDSC 4	0.06 이하	17 ~ 21	0.1 이하	0.02 이하	0.02 이하

③ 고인성 주강품의 기계적 성질은 표 3.2.8.12에 따른다.

표 3.2.8.12 고인성 주강품의 기계적 성질

종류의 기호	인장시험			경도시험		
	인장강도 MPa	내력 MPa	연신율 %	HB	HRB	HV
HMnDSC 1	370 이상	330 이상	3 이상	280 이상	105 이상	296 이상
HMnDSC 2	560 이상	240 이상	10 이상	294 이상	107 이상	311 이상
HMnDSC 3	580 이상	320 이상	19 이상	200 이상	93 이상	210 이상
HMnDSC 4	570 이상	260 이상	22 이상	181 이상	89 이상	194 이상

④ 고인성 주강품의 진동감쇠능은 표 3.2.8.13에 따른다.

표 3.2.8.13 고인성 주강품의 진동감쇠능

종류의 기호	진동감쇠능 (SDC, %)
HMnDSC 1	15 이상
HMnDSC 2	20 이상
HMnDSC 3	18 이상
HMnDSC 4	22 이상

(바) 겉모양, 모양, 치수, 무게 및 그 허용차

고인성주강품의 모양, 치수 및 무게는 도면 또는 모형에 따르고, 길이 및 두께의 허용차는 KS B 0418(주강품 보통 허용차)에 따른다. 다만, 주문자와 제조자의 협정에 의할 때는 협정에 따른다.

(사) 시험

① 분석시험

㉮ 분석 시료는 레이들에서 채취한다. 다만, 주문자의 요구가 있을 경우는 주강품에 대하여 제품 분석을 한다. 이때, 분석 시료의 채취방법 및 화학성분의 허용 변동은 주문자와 제조자 사이의 협정에 따른다.

㉯ 화학분석 방법은 다음에 따른다.

KS D 1652(철 및 강의 광전 측광식 발광 분광 분석방법)

KS D 1655(철 및 강의 형광 X선 분석방법)

KS D 1659(철 및 강의 원자 흡광 분석방법)

KS D 1802(철 및 강의 인 분석방법)

KS D 1803(철 및 강의 황 분석방법)

KS D 1804(철 및 강의 탄소 분석방법)

KS D 1805(철 및 강의 규소 분석방법)

KS D 1806(철 및 강의 망간 분석방법)

② 기계시험

기계시험은 원칙으로 제조소에서 한다. 이때, 주문자의 요구가 있을 때는 제조자는 이 시험에 주문자를 입회시켜야 한다. 다만, 주문자와 제조자의 협정에 따라 기계시험을 생략할 수 있다.

㉮ 인장시험 : 인장시험은 다음의 각 항에 따른다.

㉠ 시험편은 KS B 0801(금속재료 인장시험편)에 규정한 10호 시험편, 13B호 시험편, 14A호 시험편 및 14B호 시험편의 어느 것을 사용한다. 또한 4호 시험편 또는 5호 시험편을 사용해도 좋다.

㉡ 시험방법은 KS B 0802(금속재료 인장시험방법)에 따른다. 다만 시험온도는 20±5℃를 표준으로 한다.

㉯ 경도시험 : 경도시험은 다음의 각 항에 따른다.

㉠ 시험편은 인장시험편의 일부를 사용할 수 있다.

㉡ 시험방법은 다음의 어느 규격에 따른다. 다만 시험온도는 20±5℃를 표준으로 한다.

KS B 0805(브리넬 경도 시험방법)

KS B 0806(로크웰 경도 시험방법)

KS B 0811(비커스 경도 시험방법)

③ 진동시험

㉮ 진동시험은 Fopple-Pertz형 비틀림 진자시험 및 임팩트 시험에 의하여 실시한다.

㉯ 진동감쇠능의 크기는 비감쇠능(SDC)로 나타내고, 이는 다음과 같이 정의한다.

W는 진동에너지, △W는 1주기당 진동에너지 손실, Yn, Yn+1은 2개의 연속된 진폭의 크기

(아) 검사

① 겉모양, 치수, 화학성분, 기계적 성질 및 진동감쇠능의 성적은 (마) 및 (바)의 규정에 합격하여야 한다.

② 분석 시료는 1 용해마다 1개로 한다. 다만, 2기 이상의 로에서 출강한 용강을 1 레들에 모은 경우에는 이것을 1 용해로 본다.

③ 공시재는 다음에 따른다.

㉮ 공시재는 주강품과 별개로 주입한 것이어야 한다.

㉯ 공시재의 모양 및 치수는 그림 3.2.8.19에 따른다.

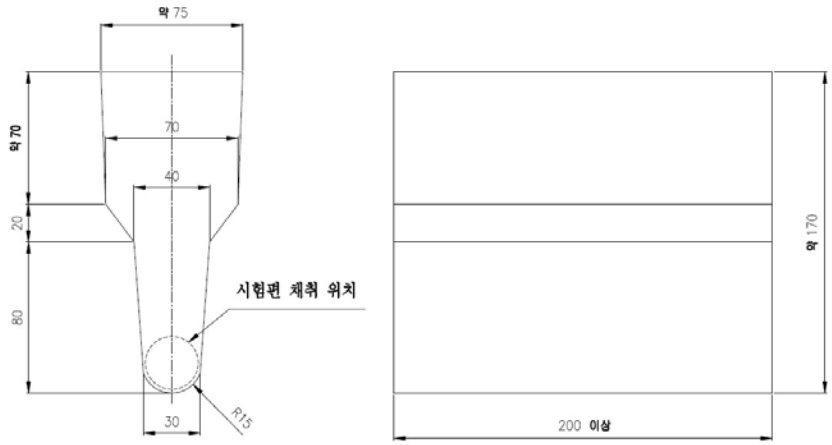


그림 3.2.8.19 공시재의 모양 및 치수

㉰ 공시재는 원칙으로 고인성 주강품과 동시 열처리를 한 것이어야 한다. 다만, 주문자와 제조자의 협정에 따라 별개로 열처리할 수 있다.

④ 인장시험편은 동일 용해마다 채취한 공시재에서 1개를 채취한다.

⑤ 주강품은 검사 전에 도장 기타 검사에 방해가 되는 어떠한 처리를 하여서는 안 된다.

⑥ ①의 검사 이외에 주문자는 다음에 기재하는 검사 중 필요한 검사를 지정할 수 있다.

㉮ 방사선 투과 시험

㉯ 형광 침투 탐상 시험

㉰ 기타의 시험

이 경우 시험방법 및 합부 판정 기준은 주문자와 제조자 사이의 협정에 따른다. 또한, 시험방법에 있어서 (아)항의 ③-㉮ 및 ㉯에 대하여는 다음 규격에 따른다.

KS D 0227(주강품의 방사선 투과 시험방법 및 투과 사진의 등급 분류)

KS B 0816(침투 탐상 시험방법 및 결함 지시 모양의 등급 분류)

(자) 재시험

① 시험편의 끝맺음이 불량하거나 또는 재질에 관계가 없다고 인정되는 흠이 있을 때에는 시험 전에 이것을 폐각하고, 다시 다른 시험편으로 대치할 수

있다.

② 인장시험에서 시험편이 표점 사이의 중심에서 표점 거리의 1/4 이외의 곳에서 절단되고, 그 성적이 규정에 적합하지 않을 때에는 그 시험을 무효로 하고, 다시 그 시험편을 채취한 공시재의 조에서 다른 시험편을 채취하여 재시험할 수 있다.

③ 기계시험의 성적이 규정에 적합하지 않을 때에는, 그 시험편을 채취한 공시재의 조에서 소정의 시험편의 2배수의 시험편을 채취하여 재시험을 할 수 있다. 이때, 어느 시험편이나 모두 규정에 적합하여야 한다.

④ 시험 성적이 불량할 때에는 재열처리를 하여 재시험을 할 수 있다. 이 경우 시험편의 수는 (아)항의 ③과 동일수로 하고, 기계시험이 전부 규정에 적합하여야 한다. 재열처리는 2회를 한도로 한다.

(차) 표시

검사에 합격한 고인성 주강품에는 주강품마다 제조소에서 다음 항목을 명시하여야 한다. 다만, 주문자의 승인을 얻었을 때는 그 일부를 생략할 수 있다. 또한, 이들을 표시하기가 곤란한 경우에는 적당한 방법에 따라도 좋다.

① 종류의 기호

② 용해 번호

③ 제조자 명 또는 그 약호

(카) 보고

제조자는 용해 번호 및 시험 성적을 기재한 성적표를 주문자에게 제출하여야 한다.

(2) 고인성 강재 면진장치 품질관리 지침서

고인성 압연강재로 면진장치를 제작하는 경우 균일한 품질의 압연강재를 생산할 수 있도록 제작 공정에 대한 품질관리 지침서를 작성하였다.

(가) 목적

본 절차서는 고망간·고인성 압연 강재(High Manganese Rolled Alloy Steel)를

사용하여 제작되는 면진 댐퍼(U-type Isolation Damper) 제품이 고객의 요구사항을 만족하는지 검사하여, 제품의 건전성을 확보하는데 목적이 있다.

(나) 적용범위

본 절차서는 고망간·고인성 압연 강재(High Manganese Rolled Alloy Steel)를 사용하여 제작되는 면진 댐퍼(U-type Isolation Damper)의 제품검사에 적용한다.

(다) 관련자료

- KS D 0001 강재의 검사 통칙
- KS B 0228 강재의 제품분석방법 및 그 허용 변동치
- KS B 0801 금속재료 인장시험편
- KS B 0802 금속재료 인장시험 방법
- KS D 1652 철 및 강의 광전 측광식 발광 분광 분석방법
- KS D 1655 철 및 강의 형광 X선 분석방법
- KS D 1659 철 및 강의 원자 흡광 분석방법
- KS D 1802 철 및 강의 인 분석방법
- KS D 1803 철 및 강의 황 분석방법
- KS D 1804 철 및 강의 탄소 분석방법
- KS D 1805 철 및 강의 규소 분석방법
- KS D 1806 철 및 강의 망간 분석방법
- KS B 0418 주강품 보통허용공차
- KS B 0805 브리넬 경도 시험방법
- KS B 0806로크웰 경도 시험방법
- KS B 0811비커스 경도 사험방법
- KS B 0816 침투탐상 시험방법 및 결함지시 모양의 등급 분류

(라) 용어의 정의

① 고망간·고인성 압연 강재

내부마찰(Internal Friction)이 커서 외부에서 가한 물리적 진동에너지의 대부

분을 열로 전환시키는 합금으로 인장강도가 높으면서 연신율이 우수한 강재를 의미한다.

② 레이들(Ladle)

융해로부터 나온 융해 금속(쇳물)을 받아, 운반하거나 주형에 주입할 때 사용하는 용기

③ 모래 개재물(Sand Inclusion)

응고된 주물에 모래부스러기 등이 내부 및 외부표면에 석여 들어간 현상

④ 슬러그 개재물(Slag Inclusion)

응고된 주물의 내부 및 외부표면에 슬러그가 석여 들어간 현상

⑤ 표면기공(Surface Porosity)

기공은 응고된 금속에서 가스 거품들이 밖으로 탈출하지 못하거나 탈출한 기공이 모재 표면에서 완전히 없어지지 않고 존재하여 표면에서 공동현상(Cavitation)으로 존재하는 결함

⑥ 수축공(Shrinkage Cavity)

응고 과정 중 금속의 수축에 의해 형성된 공간을 의미하며, 용융 금속은 두께가 얇은 쪽이먼저 응고하게 되며 따라서 두께가 두꺼운 부분의 용융금속이 이동하게 되어 충분한 용융금속이 보충되지 않을 경우 수축에 의한 공간 즉 수축공(Shrinkage Cavity)이 발생한다.

⑦ 열간 균열(Hot Tears)

열간 균열(Hot Tears)은 두께의 두꺼운 부분과 얇은 부분의 응고속도 차이에 기인하여 응력분포의 갑작스런 변화에 의해 나타나는 일종의 균열(Crack) 결함이다.

⑧ 콜드 샷(Cold Shut)

콜드 샷(Cold Shut)은 이미 응고된 금속에 응고되지 않은 금속이 들어감으로써 생겨나는 결함이며 금속의 경계부위가 드러난다.

⑨ 블로우 홀(Blowhole)

모래 및 주형내부의 습기가 용융금속에 의해 증발하여 이 가스압력이 주물 내부에 커다란 공간을 형성하여 발생하는 현상

⑩ 용체화 처리(Solid Solution Treatment)

합금을 일반적으로 최대의 고용체로 되는 온도까지 가열한 후, 이것을 냉각하여 상온에서 과포화 고용체를 얻도록 하는 처리

(마) 책임

① 품질관리 검사자는 제품검사 항목에서 요구된 검사를 실시하고 그 결과를 기록할 책임이 있다.

② 품질보증책임자는 제품검사 항목에서 요구된 검사를 실시되었는지 확인하고 검사결과를 승인할 책임이 있다.

(바) 장비

① EDS(Energy Dispersive X-ray Spectrometer)

② Carbon 분석기

③ 버니어 캘리퍼스

④ 줄자

⑤ 경도측정기

⑥ 확대경(7x 이상)

⑦ 표면조도기

⑧ 나사 링 게이지

⑨ R-게이지

⑩ 온도측정기

(사) 검사항목

제품 검사에서 확인하여야 할 항목은 다음과 같다.

① 자재 검사(성분분석 검사)

② 자재 검사(기계적 성질 검사)

③ 치수 검사

④ 열처리 검사

⑤ 비파괴 검사

⑥ 도장 검사

⑦ 외관 검사

⑧ 포장 검사

(아) 제품 검사시기, 절차 및 합격기준

① 성분분석 검사(Chemical Composition)

㉮ 검사시기

성분분석 검사는 금속이 용해(Melting)된 상태에서 주형(Mold)에 주입하기 전 용융로에서 성분분석 시료를 채취하여 성분분석 검사를 실시한다.

㉯ 검사 절차

성분분석 검사는 시료 채취기를 이용하여 1용탕/1Heat (Lot=Charge)의 시료를 최소 1개소이상 Sample을 발췌하여 EDS(Energy Dispersive X-ray Spectrometer)를 사용하여 성분함량을 분석하고, Carbon 분석기를 사용하여 Carbon (탄소)의 성분 함량비를 측정해야 하며 합격기준을 만족하지 못할 때에는 1용탕/1Heat (Lot)를 전량 폐기 해야 하며, 성분분석 검사의 시료를 발췌하여 탄소(C)는 KS D 1804(철 및 강의 탄소 분석방법), 망간(Mn)은 KS D 1806(철 및 강의 망간 분석방법), 규소(Si)는 KS D 1805(철 및 강의 규소 분석방법), 인(P)은 KS D 1802(철 및 강의 인 분석방법), 황(S)은 KS D 1803(철 및 강의 황 분석방법)에 준하여 성분분석 검사를 실시한다.

㉰ 합격기준

잉고트(Ingot) - 고망간 · 고인성 압연 강재 (High Manganese Rolled Alloy Steel)의 화학성분은 표 3.2.8.14을 만족해야 한다.

표 3.2.8.14 화학성분(Chemical Composition / Weight %)

종류의 기호	화학성분				
	C	Mn	Si	P	S
HMnD	0.06 이하	17.0~21.0	0.1 이하	0.02 이하	0.02 이하

② 기계적 성질 검사 (Mechanical Property)

㉮ 검사시기

기계적 성질 검사의 시료 발췌 시기는 열간 압연(Hot Rolling) 이후 열처리(Heat Treatment)를 실시하고 판재가 상온에 도달할 때 판재 일부에서 1용탕 <1Heat (Lot=Charge)>당 시료를 최소 1개소 이상 Sample을 발췌하여 기계적 성질 검사를 실시한다.

㉯ 검사절차

기계적 성질 검사는 절단기를 이용하여 1용탕<1Heat(Lot=Charge)>의 시료를 최소 1개소이상 Sample을 발췌하여 KS B 0801(금속재료 인장시험편), KS B 0802(금속재료 인장시험 방법), KS B 0805(브리넬 경도 시험방법), KS B 0806 (로크웰 경도 시험방법), KS B 0811(비커스 경도 시험방법)에 준하여 기계적 성질 검사를 실시한다.

㉰ 합격기준

판재(Plate) - 고망간·고인성 압연 강재(High Manganese Rolled Alloy Steel)의 화학성분은 표 3.2.8.15를 만족해야 한다.

표 3.2.8.15 기계적 성질 (Mechanical Property)

종류의 기호	인장시험			경도시험		
	인장강도 (MPa)	항복강도 (MPa)	연신율 (%)	HB	HRB	HV
HMnD	900 이상	280 이상	50 이상	181 이상	89 이상	194 이상

주) 고객의 외부 공인기관의 성분분석 및 기계적 성질 검사 성적서 요구시 분석절차 및 방법은 ①항 ㉮, ㉯에 따라 분석하고 합격기준은 ①항에 (3)에 준하여 합부 판정을 실시한 공인기관의 성적서로 성분분석검사를 대체한다.

③ 치수검사

㉮ 검사시기

㉠ 1차 치수검사 : 고망간·고인성 압연 강재(High Manganese Rolled Alloy Steel)를 가공기계를 통해서 가공한 후 검사를 실시한다.

㉡ 2차 치수검사 : 용체화 처리가 끝나고 절곡(Bending)이 완료된 후 검사를 실시한다.

㉯ 검사절차

㉠ 1차 치수검사

제작도면의 각각의 치수값을 버니어 컬리퍼스 또는 내측 캘리퍼스, 마이크로미터를 사용하여 길이는 최소 3 Point(양쪽 끝단과 중간)를 최소 2회 이상 측정하고, 두께는 최소 2 Point(양쪽 끝단)를 최소 2회 이상 측정하여 검사성적서에 기록한다.

㉡ 2차 치수검사

제작도면의 절곡부위 반지름을 R 게이지를 사용하여 최소 3회 이상 측정하고 버니어 컬리퍼스 또는 줄자를 사용하여 최소 2 Point(양쪽 끝단)을 최소 2회 이상 측정하여 검사성적서에 기록한다.

㉰ 합격기준

㉠ 1차 치수검사

치수검사 합격기준은 그림 3.2.8.20 및 표. 3.2.8.16에 준하여 검사를 실시하고 승인된 제작도면의허용공차를 만족해야 한다.

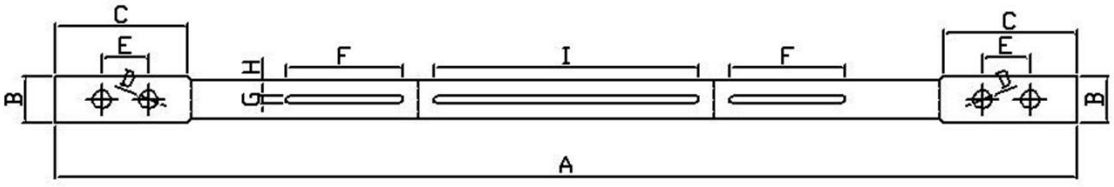


그림 3.2.8.20 1차 치수검사 합격기준

표 3.2.8.16 치수 및 허용공차 (단위 : ㎜)

ID. / STD.	A	B	C	D	E	F	G	H	I
	1303	60	170	25	60	148	10	20	337
허용공차	±5	±3	±3	±2	±2	±3	±1	±2	±3

㉡ 2차 치수검사

치수검사 합격기준은 그림 3.2.8.21 및 표 3.2.8.17에 준하여 검사를 실시하고 승인된 제작도면의 허용공차를 만족해야 한다.

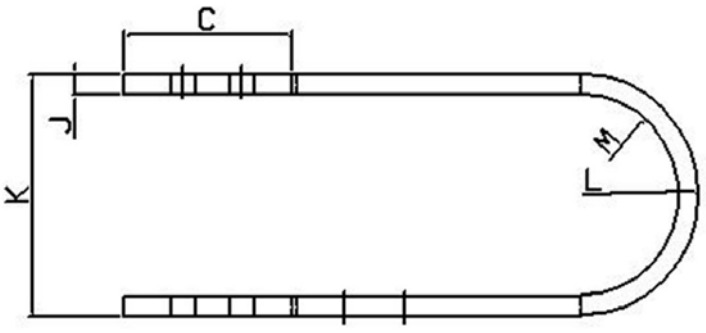


그림 3.2.8.21 2차 치수검사 합격기준

표 3.2.8.17 치수 및 허용공차 (단위 : ㎜)

ID. / STD.	J	K	L	M
	20	240	R120	R100
허용공차	± 1	+ 5	± 2.5	± 2

④ 열처리 시험

㉮ 검사시기

열처리 전(Before - Heat Treatment) 1차 치수검사를 실시 한 후와 열처리 종료 후 검사를 실시한다.

㉯ 검사절차

고망간·고인성 압연 강재(High Manganese Rolled Alloy Steel)의 고인성 특성을 부여하기 위해 용체화 처리 및 냉각처리를 실시해야 함으로 열처리 전(Before - Heat Treatment) 열처리로(Furnace)의 온도와 시간을 설정한 후 열처리 검사성적서에 기록하고 열처리 종료시 온도와 경과시간을 열처리 검사성적서에 기록한다. 질소 가스 냉각(N2 Gas Cooling)시 냉각 시간을 측정하여 검사성적서에 기록한다.

주) 필요 시 레코더를 사용하여 온도와 경과시간을 기록한다.

㉰ 합격기준

열처리 온도는 1,050℃(±10℃) 이고, 열처리 시간은 최소2시간 이상이여야 하며, 질소 가스 냉각에 의해 10분당 200℃ 이상의 냉각이 이루어져야 한다.

⑤ 비파괴 검사

㉮ 검사시기

열처리(Heat Treatment)를 실시한 후 절곡(Bending)을 실시한 다음 비파괴 검사를 실시한다.

㉯ 검사절차

고망간·고인성 압연 강재(High Manganese Rolled Alloy Steel) 열처리 후 표면의 이물질을 제거하고 절곡 부위를 KS B 0816 (침투탐상 시험방법 및 결함지시 모양의 등급 분류)에 준하여 침투탐상검사를 실시한다.

주) 침투탐상검사 후 댐퍼(Damper) 표면에 잔존하는 검사 시액은 방청처리에 영향을 주기 때문에 제거해야 한다.

㉰ 합격기준

고객이 요구하는 합격기준이 규정되지 않을 경우에는 고객과 제작사의 합의에 의해 합격기준을 정한다. 단 고객이 합격기준을 규정하지 않을 때에는 다음에 따라 판정한다.

㉠ 지시의 평가

표면을 가로지르는 기계적 불연속부는 침투제의 누출에 의해 나타나게 되지만 기계가공지시, 스케일 또는 자국(Dent) 때문에 생길 수 있는 국부 불연속부는 결함과는 상관없는 지시를 보이나 결함과는 무관한 것으로 판단되는 지시가 합격기준을 초과할 경우에는 이들을 재검사하여 실제로 결함이 있는지를 확인해야 한다. 결함을 덮고 있을 가능성이 있는 무관지시 및 넓은 착색구역은 불합격이므로 제거 후 검사를 실시해야 한다.

유관지시란 결함 때문에 생긴 긴 쪽 길이가 1.6㎜ 이상인 지시를 말하며 선형지시(Liner Indication)는 그 길이가 폭의 3배를 넘는 지시를 말하며 원형지시(Rounded Indication)는 폭의 3배 이하인 길이를 가진 원형 또는 타원형지시를 말하며, 다음의 유관지시는 불합격이다.

㉡ 두께가 16 ㎜미만의 재료에 대해서는 1.6㎜, 16 ㎜이상 51 ㎜미만의 재료에 대해서는 3.2 ㎜, 51 ㎜를 초과하는 재료에 대해서는 4.8 ㎜보다 길이가 긴 선형지시

㉢ 두께가 16 ㎜미만의 재료에 대해서는 3.2㎜, 16 ㎜이상의 재료에 대해서는 4.8 ㎜보다 큰 원형지시

㉣ 4개 이상의 지시가 선단간격이 1.6㎜이하의 간격으로 일렬로 늘어서 있을 때.

㉤ 평가대상지시에 대해 조건이 가장 열악한 위치에서 잡은 임위 부위 [면적이 6in^2 (3871㎟), 긴 쪽 길이가6in(152㎜)이하]내에 10개 이상의 지시가 있을 때.

⑥ 도장 검사(Coating Inspection)

㉮ 검사시기

최종검사 중 외관검사 전 실시한다.

㉯ 검사절차

㉠ 검사자는 도장 전 표면처리 요건을 확인한 후 적합한 표면처리가 되었는지를 검사하고, 도장 후 도막두께측정기 및 육안으로 도장의 두께, 도장의 색상, 도장상태가 각 사별 도장 관련 승인사양서, 제작도면 및 구매시방서에 만족하는지 도장검사를 실시한다.

㉡ 도장상태는 도장 외관에 기포, 크랙, 깨짐, 이물질이 없는지를 검사한다.

㉰ 합격기준

㉠ 표면 전처리 규격, 도장 색상, 도장 상태, 도장 두께가 각 사별 도장 관련 승인사양서, 제작도면 및 구매시방서에 만족해야 한다.

㉡ 검사자는 도장 검사 후 성적서에 각 사별 도장 관련 승인사양서, 제작도면 및 구매시방서를 첨부하여 합격 여부를 판단한다.

⑦ 외관 검사(Appearance Inspection)

㉮ 검사시기

최종검사 중 포장 전 외관검사를 실시한다.

㉯ 검사절차

㉠ 검사자 육안으로 면진 댐퍼(Isolation Damper)의 외관에 기계적 불연속에 의한 스크레치(scratch) 및 노치(Notch) 현상이 없는지를 검사한다.

㉡ 외부의 변형(절곡-Bending) 및 열피로(Thermal Fatigue)에 의한 크랙(Crack)이 발생하였는지를 검사 한다.

㉰ 합격기준

㉠ 검사자 육안으로 면진 댐퍼(Isolation Damper)의 외관에 기계적 불연속에 의한 스크레치(scratch) 및 노치(Notch) 현상이 없어야 한다.

㉡ 외부의 변형(절곡-Bending) 및 열피로(Thermal Fatigue)에 의한 크랙(Crack)이 없어야 한다.

⑧ 포장 검사(Packing Inspection)

㉮ 검사시기

최종검사 후 제품 출하 전 실시한다.

㉯ 검사절차

㉠ 검사자는 포장 전 제품의 외관에 손상 및 파손이 없는지를 육안으로 확인한 후 고객이 지정한 포장처리 요건(또는 등급)을 확인하여 적합한 포장처리가 되었는지를 검사하고, 포장 후 외부의 습기, 바람, 비등에 제품이 노출되지 않도록 육안으로 포장의 상태를 검사해야 하며, 포장 외부 중 식별이 용이한 곳 또는 고객이 지정한 위치에 제품 식별표가 단단하게 부착되었는지를 검사해야 한다.

㉡ 포장 식별표에는 고객명, 제조사, 주소 및 연락처, 포장의 크기 및 중량, 공사명, 공사번호, 제품명, 제품번호, 포장검사 일자, 포장번호등 고객이 요구하는 사양이 최소한 명기되었는지를 검사 하고, 운반요령 식별 표시가 부착되었는지를 검사한다.

㉰ 합격기준

㉠ 포장 외관에 손상 및 파손이 없어야 하며, 내부에는 유해한 이물질이 없어야 하며, 고객이 지정한 포장처리 요건(또는 등급)을 만족할 것.

㉡ 외부의 습기, 바람, 비등에 제품이 노출되지 않도록 포장의 상태는 찢어짐, 손상 및 파손 등이 없이 단단하게 고정되어 있을 것.

㉣ 포장 식별표에는 고객명, 제조사, 주소 및 연락처, 포장의 크기 및 중량, 공사명, 공사번호, 제품명, 제품번호, 포장검사 일자, 포장번호 등 고객이 요구하는 사양이 최소한 명기되어 있어야 하며, 운반요령 식별표 또는 방법을 식별할 수 있는 식별표가 부착되어 있어야 한다.

(자) 기록

검사성적서는 발행되어야 하며 최소한 다음의 내용을 포함하여야 한다.

① 검사일 및 검사자의 서명

② 성적서 번호

③ 검사결과

④ 시험대상품 이름 및/또는 번호

⑤ 요구되는 경우 프로젝트 명 및 번호

⑥ 검사장비명 및 S/No.

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 관련분야에의 기여도

4.1 연구개발 수행 진도율

구 분 / 연구내용	추 진 일 정												진도(%)
	1/4	2/4	3/4	4/4	1/4	2/4	3/4	4/4	1/4	2/4	3/4	4/4	
면진구조시스템 적용사례 및 설계기법분석													100
면진구조 설계용 성능스펙트럼 제시													
면진 구조시스템 개발방향 설정													
복합 면진장치의 목표 성능 제시													
적층고무의 구조성능 평가													
에너지 흡수장치 요구성능 설정													
에너지 흡수장치 형상 개발													
면진구조의 지진응답 예측식 제시													
면진구조의 성능설계프로세스 제시													
에너지 흡수장치 구조성능평가 실험 및 FEM 해석													
에너지 흡수장치 최적 형상제시													
복합 면진장치 시제품 제작													
면진 구조설계													
면진구조의 경제성/시공성 평가													
지침 및 매뉴얼 작성													
에너지흡수장치의 진동성능평가 실험													
복합 면진장치의 진동성능평가													
복합 면진장치의 복원력 특성 모델 제시													
Mock-up test에 의한 연결부 성능 검증													
총 누적 진도율	15	20	25	30	35	45	55	60	70	80	95	100	100

4.2 연구개발 목표의 달성도

연구 목표	달성도(%)	내 용
면진구조시스템 적용사례 및 설계기법분석	100	▪ 건축용도, 구조형식별 면진구조 적용사례 조사 ▪ 면진장치의 형식조사 및 분석 ▪ 면진구조 시스템의 설계기법분석
면진구조 설계용 성능스펙트럼 제시	100	▪ 지반종별 설계용 에너지스펙트럼 제시 ▪ 에너지장치 성능스펙트럼 제시
면진 구조시스템 개발방향 설정	100	▪ 구조재료에 따른 경제성 평가 ▪ 상부구조형식에 따른 효율성 제고 ▪ 면진구조 적용 최적 대상 건물용도 설정
복합 면진장치의 목표성능 제시	100	▪ 면진층과 상부구조의 최적 내력비, 강성비 제시 ▪ 복합 면진장치 목표성능 설정
적층고무의 구조성능 평가	100	▪ 전단변형에 의한 변형능력 평가 ▪ 연진축력 저항성 평가
에너지 흡수장치 요구성능 설정	100	▪ 에너지 흡수장치 변형능력과 적층고무 변형능력의 관계곡선 도출 ▪ 에너지 흡수장치의 한계 변형능력 제시
에너지 흡수장치 형상개발	100	▪ 고변형 성능 확보위한 강재 성형조건 도출 ▪ 시험제작 및 구조성능 평가
면진구조의 지진응답 예측식 제시	100	▪ 지진응답해석에 의한 면진층 에너지 분포율 평가 ▪ 상부구조의 층별 에너지 분포식 제시 ▪ 상부구조와 면진층의 강성변화에 의한 성능예측식 제시
면진구조의 성능 설계 프로세스 제시	100	▪ 에너지법에 의한 성능평가기법 확립 ▪ 면진구조의 성능평가 곡선 제시 ▪ 성능설계 프로세스 제시 미 타당성 검증
에너지 흡수장치 구조성능평가 실험 및 FEM 해석	100	▪ 에너지 흡수장치 형상비에 따른 FEM 해석 ▪ 에너지 흡수장치 형상결정 및 실험 ▪ 열처리 프로세스 결정
에너지 흡수장치 최적형상제시	100	▪ 실험결과와 해석결과의 비교분석 ▪ 에너지 흡수장치 최적형상 도출
복합 면진장치 시제품 제작	100	▪ 적층고무와 에너지 흡수장치 접합부 상세 ▪ 복합 면진장치제작 프로세스 정립 ▪ 시제품 제작

면진 구조설계	100	▪ 상부구조형식 및 재료설정 ▪ 층고절감형 면진구조 시스템 개념 설정 ▪ 면진구조의 구조상세 설정 ▪ 면진장치의 상세 설계
면진구조의 경제성/시공성 평가	100	▪ 전이보에 대한 시공성 평가 ▪ 기존 내진구조 시스템과 경제성 비교
지침 및 매뉴얼 작성	100	▪ 면진구조 및 장치의 설계지침 및 매뉴얼 작성 ▪ 복합면진장치의 설치프로세스 및 면진구조의 시공지침 작성 ▪ 복합면진장치 품질관리지침 작성
에너지흡수장치의 진동성능평가 실험	100	▪ 지진파입력 동적 진동 실험 ▪ 가속도 크기에 따른 구조성능 평가 ▪ 소성변형능력 및 에너지 흡수능력 평가
복합 면진장치의 진동성능평가	100	▪ 복합 면진장치의 진동성능평가 실험 ▪ 복합 면진장치의 각부에서의 응력 집중율 평가
복합 면진장치의 복원력 특성 모델제시	100	▪ 복합 면진장치의 에너지 흡수효율 평가 ▪ 복합 면진장치의 복원력 특성 모델 제시 ▪ 정적 복원력 특성과 동적 복원력 특성 비교
Mock-up test에 의한 연결부 성능 검증	100	▪ 복합 면진장치와 구조체와의 연결부 상세 개발 ▪ Mock-up에 의한 연결부 시공성 평가 ▪ 구조성능 평가 실험에 의한 연결부의 성능 검증

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

5.1 연구성과의 활용방안

- 면진구조 지진응답해석 예측식, 설계지침, 매뉴얼 등을 활용하여 면진구조 설계의 단순화를 통한 실무설계에서 용이하게 활용하고 면진구조 기술교육 및 보급위한 자료로 활용할 예정임.

- 고인성 강재를 이용한 에너지 흡수장치 및 적층고무와 함께 사용한 복합 면진장치는 제품화하여 (주)우진과 동일고무벨트(주)에서 사업화할 예정임.

- 고인성 강재에 대한 원천기술을 확보하고, 향후 토목 및 기계산업 분야 등에 적용하기 위한 후속 연구를 수행할 예정임.

구 분	연구 성과	활용 가능성 및 기대효과
에너지 흡수장치 형상 최적화 및 복합면진장치 형상 개발	에너지 흡수장치 최적형상	• 기존 제품 대비 변형능력 향상 • 사업화 추진 및 해외 판매 추진 가능
	복합면진장치 최적형상	• 복합면진장치 설계 및 제작 원천기술 확보 • 사업화 추진 및 해외 판매 추진 가능
	복합면진장치 성능평가식	• 복합면진장치 실용화 설계 활용 • 면진구조 효율 극대화 위한 면진장치 목표성능 예측 가능
에너지법에 의한 성능설계 프로세스 개발	면진구조 지진응답 예측식	• 면진구조 설계의 단순화 • 성능 예측 가능한 면진구조 설계 가능 및 설계기준 작성에 기초자료 활용
	면진구조 설계지침 및 메뉴얼	• 면진구조 실설계 활용 • 면진구조 기술교육 및 보급 위한 자료 활용

(1) 하월곡 주상복합 동일하이빌 신축공사 (개발 면진장치 부분 시범적용)

하월곡동에 건립중인 동일 하이빌 주상복합에 본 연구에서 개발된 복합면진장치를 시범적용할 예정이다. 하월곡동 주상복합은 지하 7층, 지상 35층 4개동으로 이루어져 있으며 상가와 주거건물 사이 지상 7층에 388개의 면진장치가 설치되는 것으로 설계되어 있다. 당 현장에 대한 2007년에 이미 설계작업이 시작되어 연구결과를 전면 적용하기에는 시기적으로 무리가 있었다. 따라서 본 현장에는 본 연구과제의 연구결과인 복합면진장치를 104동 코어 하부층에 4개소 시범적용하기로 하였다. 연구결과를 실제 현장에 적용함으로써 설계능력과 시공성과 사용성에 대한 검증이 가능할 것으로 판단된다.



그림 5.1 하월곡동 주상복합 조감도

1. 공사명	**하월곡 주상복합 동일하이빌 신축공사**
2. 위치	**서울시 성북구 하월곡동 88-38번지**
3 . 공사기간	**2009.11.23~2010.02.10**
4. 공사공정	**면진장치 설치 (지상 7층)**
5. 면진장치	**- 천면고무 면진장치(NRB) - 납삽입 면진장치(LRB)**
6. 면진장치 수량	**총수량 : 388 set - NRB : 132 set - LRB : 256 set**

그림 5.2 하월곡동 주상복합 사업개요

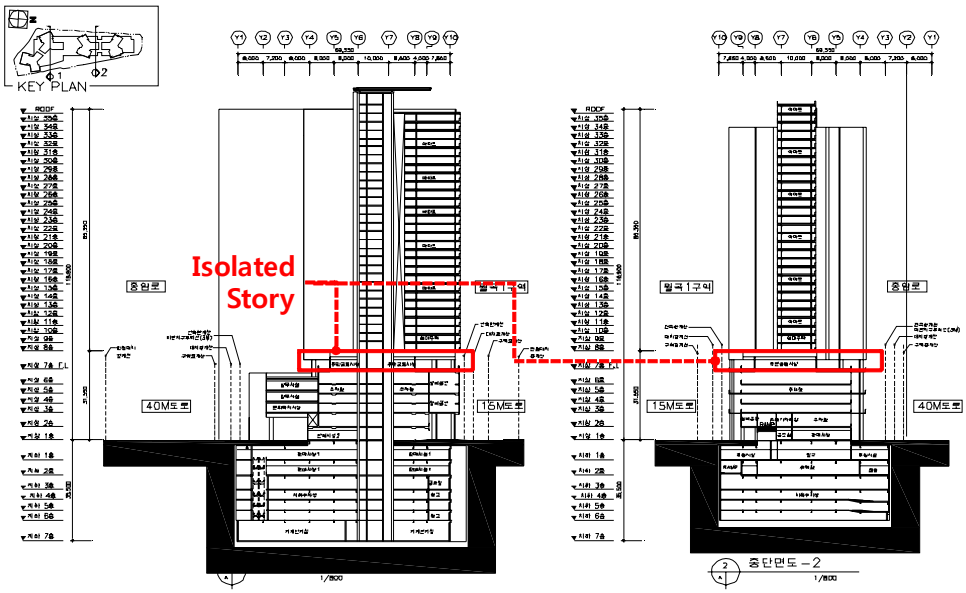


그림 5.2 하월곡동 주상복합 면진층



그림 5.3 하월곡동 주상복합 현장사진 (2009.12.7일)

구 분	2009년		2010년	
	101동	102동	103동	104동
Base Plate	11월 30일	12월 22일	1월 4일	1월 18일
면진고무	12월 5일	12월 30일	1월 12일	1월 25일
Upper Plate	12월 5일	12월 30일	1월 12일	1월 25일

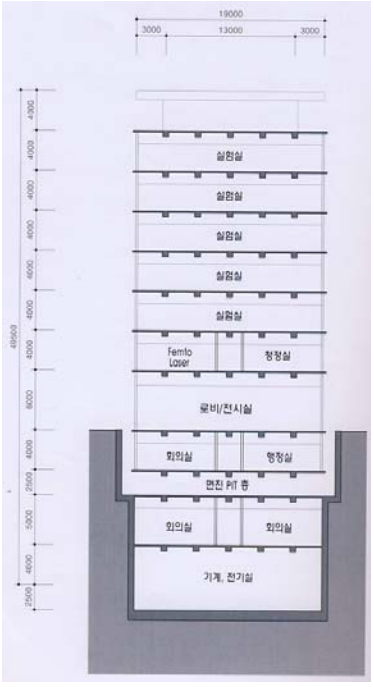
표 5.2 면진층 공사 일정

(2) 서강대학교 인공 광합성 연구센터 신축공사(개발 면진장치 적용)

서강대학교에 각종 연구시설 및 교수실, 회의실을 포함한 연구센터가 계획 중이다. 본 건물은 지하 2층, 지상 8층으로 구성되며 2010년 3월경에 사업이 착수될 예정인데 지하층과 지상층 경계 부분에 본 연구과제의 결과인 복합면진장치를 전면 적용할 예정이다. 당 연구센터는 2010년 3월부터 3년에 걸쳐 공사가 이루어질 예정이며, 면진층의 공사는 2011년에 이루어질 계획이다.



그림 5.4 서강대학교 인공광합성 연구센터 (K-SERC) 신축공사 조감도 계획안



구 분		내 용
사업명		서강대학교 인공광합성 연구센터 (K-SERC) 신축공사
위 치		서울특별시 마포구 신수동 1-1번지 일대
지역/지구		1종 일반주거지역, 자연경관지구
용 도		교육 및 연구시설
층 수		지상 8층, 지하 2층
구 조		철골철근콘크리트조
건축면적		716.00㎡ (216.59평)
연면적	지하층	1,316.40㎡ (398.21평)
	지상층	5,462.32㎡ (1,652.35평)
	합 계	6,778.72㎡ (2,050.56평)

그림 5.5 서강대학교 인공광합성 연구센터 (K-SERC) 신축공사 층단면도 및 사업개요

(3) 망우역사 주상복합 (개발 면진장치 적용 계획)

망우역사에 계획중인 주상복합은 하부에 전철이 상시 통과하기 때문에 소음 및 진동을 방지할 수 있는 대책이 필요하다. 또한 상부에 전단벽과 하부 골조 시스템에 지진하중이 작용할 경우에 기존 내진설계법을 적용하면 부재 사이즈가 증대되고 이에 따라 건축비용이 증대되는 단점이 있다. 이에 망우역사 건립계획에 있어 본 연구과제의 복합면진장치를 주거부분에 설치하여 전철의 진동 및 횡력하중의 저감을 통한 부재 사이즈 축소의 효과를 가져오기 위하여 면진구조시스템을 제안하였으며, 면진장치의 채택이 상당히 유력한 상황이다.

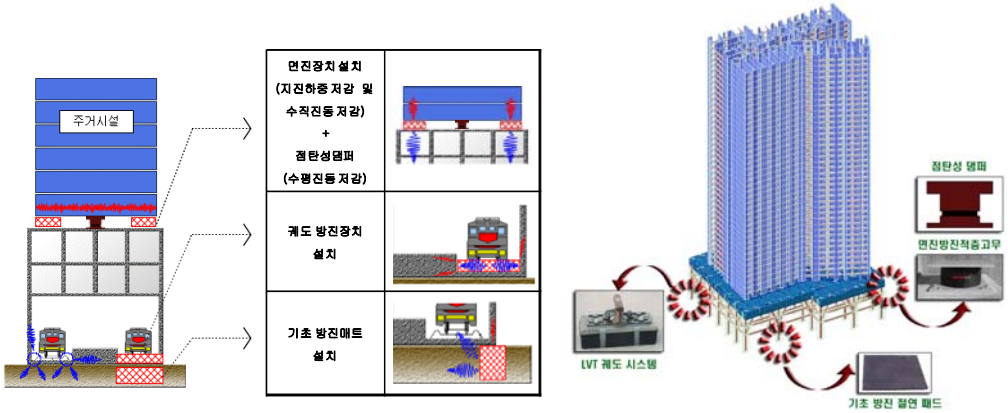


그림 5.6 망우역사 면진, 방진 대책 계획안

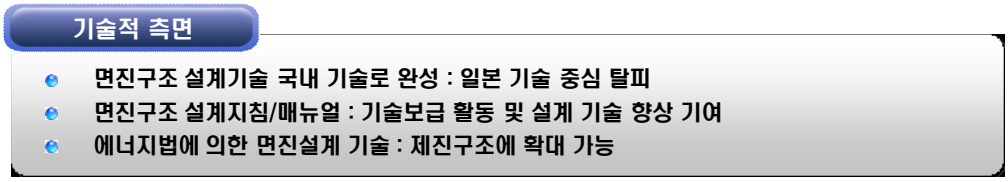
(4) 설계지침 활성화 방안

본 연구과제에서 제안한 면진구조 설계지침을 내진구조 전문가를 상대로 공청회를 거쳐 학계 및 산업계의 다양한 의견을 수렴하여 대한건축학회의 발의를 통한 KBC에 반영할 계획입니다. 현재 KBC2009가 건교부 고시로 발행되었기 때문에 다음 KBC에 반영할 예정입니다.

5.2 연구성과의 기대효과

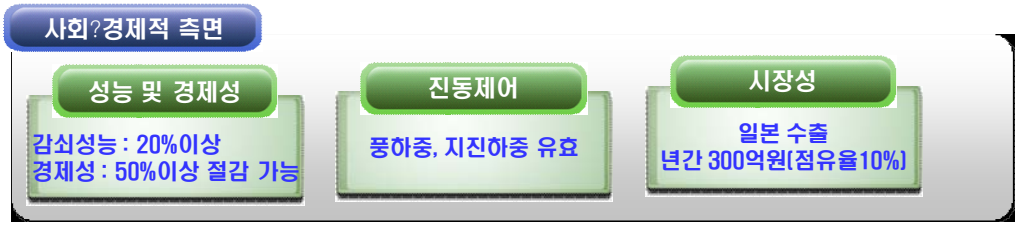
5.2.1 기술적 측면

- 일본을 중심으로 한 면진장치 제작기술 및 면진구조 설계기술을 국내 기술로 완성할 수 있는 기틀을 마련하고, 면진구조 시스템의 자체 설계 및 시공 기술을 확보하여 일본의 기술 노하우를 능가할 수 있을 것으로 기대됨.
- 면진구조 설계 지침 및 매뉴얼을 중심으로 기술교육 및 보급 활동을 강화함으로써 내진성능 향상을 위한 설계 기술 보급이 가능함.
- 에너지법을 이용한 면진설계 기술은 내진구조, 제진구조 등에도 같은 방법으로 적용할 수 있으므로 일반적인 내진구조 및 새로운 구조시스템에 일괄된 방법으로 설계가 가능하여 설계법이 간단하게 됨.



5.2.2 사회·경제적 측면

- 복합 면진장치는 기존의 면진장치에 비해 약 20%이상 성능이 향상됨을 목표로 하였으며, 가격이 저렴하고 친환경적인 강재를 에너지 흡수장치로 사용하였기 때문에 면진구조 시스템의 경제성을 향상시킬 수 있음.
- 본 연구에서 사용하는 고인성 강재는 일본에서 강재 에너지 흡수장치로 사용하는 강재에 비해 변형능력이 뛰어나 면진구조의 효율을 극대화 시킬 수 있어, 일본 제품을 대체할 수 있을 뿐만 아니라 일본 등에 수출이 가능할 것으로 판단됨.



5.2.3 기업 활용

- 우진의 경우 방진합금을 이용한 기계중심의 제품에서 고감쇠 강재를 이용한 면진장치개발로 인하여 건설시장으로 사업영역 확대가 가능할 것으로 예상됨.
- 동일고무의 경우 고무벨트만을 위주로 생산하였지만 복합면진장치의 개발로 고무를 활용한 제품을 추가적으로 생산하여 건축시장으로 확대가 가능하며 2007년에 일본건설성으로부터 획득한 품질인증서를 바탕으로 복합면진장치의 완제품 형태로 일본 수출이 가능할 것으로 예상됨.
- 전명기계의 경우 우진에서 생산한 고인성 강재를 가공하여 복합면진장치를 구성하는 강재댐퍼를 제작하여 건설시장으로의 사업영역 확대가 가능할 것으로 판단됨.



제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

- New York (2009.4)

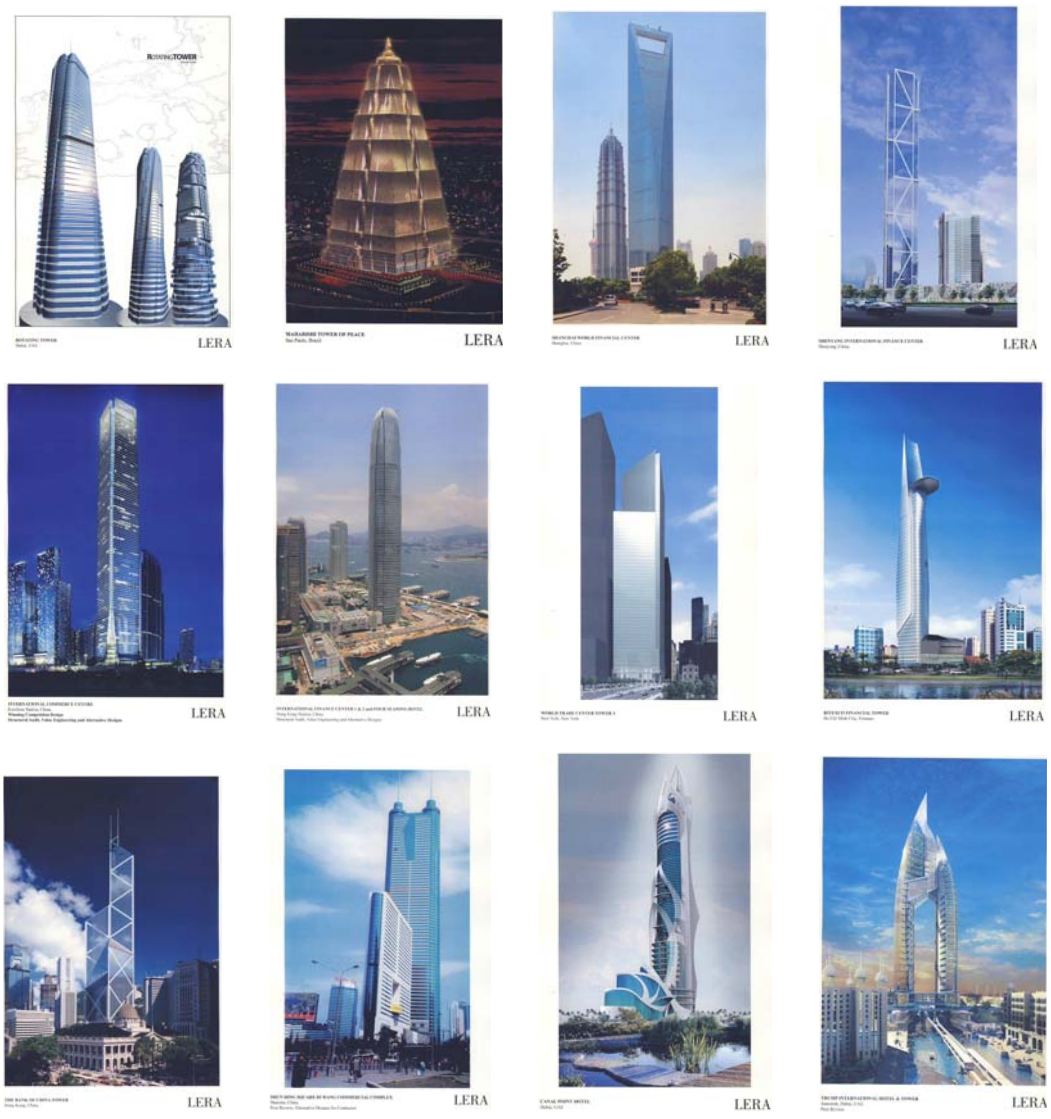
세계 주요 초고층 건물의 구조설계를 담당하고 있는 LERA에 방문하여 C.E.O.인 william J. Faschan 및 현지 전문가와 고층 건물의 면제진 설계 추세 및 Blast, Progressive collapse design을 고려한 방재 설계등에 대하여 의견을 교환하였다.



6.1 LERA CEO와 의견교환



6.2 WTC 붕괴현장 및 Freedem tower 건설현장



6.3 다양한 면제진장치를 적용한 세계 주요 고층 건물

- Leihigh University (2009.4)

Civil engineering 교수진 및 연구진들과 MR댐퍼, 복합면진장치 등의 선진기술에 대하여 의견을 교환하였다.



6.4 리하이 대학 구조실험동 및 실험체

제 7 장 참고 문헌

■ Detailed Models of Piezoelectric Actuation of Beams, Crawley, E.F. and Anderson, E.H. J. Inter. Mat. Sys. and Struct.,1(1), 4～25, 1990

■ Correlation of Experimental Results with Prediction of Viscoelastic Damping of Model Structure, Soong, T. T. and Lai, M. L., Proceedings of Damping 91, San Diego, CA, FCB1-9., 1991.

■ Seismic testing of steel plate energy dissipation devices, Whittaker, A.S., Bertero, V.V., Thompson, C.L., Alonso, L.J., Earthquake Spectra, Vol. 7, No. 4, 1991.

■ Influence of ADAS element parameter on building seismic response, Xia, Ch., and Hanson, R.D., Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 118, No. 7, pp 1903-1918., 1992

■ Seismic Design of Viscoelastic Dampers for Structural Applications, Zhang, R. H. and Soong, T. T., Journal of Structural Engineering, 118(5), 1992, pp. 1375-1392.

■ Design of steel triangular plate energy absorber for earthquake resistant-construction, Tsai, K.C., Chen, H.W., Hong, C.P. and Su, Y.F.,Earthquake Spectra, Earthquake Engineering Research Institute, Vol. 9, No. 3, 1993.

■ Temperature effect of viscoelastic dampers during earthquakes, Tsai, C. S., Journal of Structural Engineering, ASCE, 120, 1994, pp. 394-409.

■ Commercial Magnto Rheological Fluid Devices, Proceedings of the 5th International Conference on ER Fluids, Carlson, J.D., Catanzarite, D.M. and St. Clair K.A., MR Fluids and Associated Technology, U.Sheffield, UK, 1995

■ シソポヅウム “免振構造の研究と設計”, 日本建築學會 免振構造小委員會, 1996.

■ Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering, T.T.Soong, G.F.Dargush, State University of New York at Buffalo, USA, 1997

■ Passive Vibration Control, Denys J.Mead, John Wiley & Sons Ltd., 1998

■ 鋼種が異なるせん斷型パネルダンパーの靜的履歷特性に關する實驗硏究, 田中淸, 佐々木康人, 米山眞一朗, 日本建築學會構造系論文集, 第520号, pp 117-124, 1999

■ Guides Specifications for Seismic Isolation Design, AASHTO, 2nd Ed., 1999

■ Progress of Application and R&D for Seismic Isolation and Passive Energy Dissipation for Civil and Industrial Structures in Korea, Koh H. M., et al., Proceedings of 7th International Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation and Active Control of Vibrations of Structures, 2001.

■ Recommendation for the Design of Base Isolated Buildings, 日本建築學會, 2001.

■ Efficient seismic analysis of building structures with added viscoelastic dampers, Lee, D. G., Hong, S. and Kim, J., Engineering Structures, Vol. 24, 2002, pp. 1217-1227.

■ International Building Code, IBC2003, p.267～343., 2003

■ Comparative Study of Seismic Isolation Codes Worldwide, Demin Feng, International Seminar of Korea Society of Seismic Isolation and Vibration Control. Seoul. No.1

■ Kelly, J. M., Base Isolation: Linear Theory and Design, Earthquake Spectra, Vol.6, No.2, pp.223-244, 1990.

■ Taylor, A. W., Lin, A. N. and Martin, J. W., Performance of Elastomers in Isolation Bearings: A Literature Review, Earthquake Spectra, Vol.8, No.2, pp. 279-304, 1992.

■ Skinner, R. I., Robinson, W. H. and McVerry, G. H., AnIntroduction to Seismic Isolation, Wiley, Chichester, England,1993.

■ Moteki, M., Ohtsuka, S., Hayakawa, K. and Nakae, A., The

Experimental Study on Fatigue Characteristics of Steel Damper Used for Seismic Isolation Device, Seismic, Shockand Vibration Isolation, ASME, pp.171-176, 1995.

■ Kato, A., Seki, M., Shirahama, K. and En, K., Seismic Safety Evaluation of Steel Damper for Base Isolation, World Conferenceon Earthquake Engineering, NewZealand Society for Earthquake Engineering, pp.807-815, 1996.

■ Abrahamson, N. A. and Shedlock, K. M., Overview, Seismol. Res. Lett., Vol.68, No.1, pp.9-23, 1997.

■ Naeim, F. and Kelly, J. M., Design of Seismic Isolated Structures: From Theory to Practice, Wiley, Chichester, England, 1999.

■ Suzuki, K., Watanabe, A. and Saeki, E., Development of U-shaped Steel Damper for Seismic Isolation System, Shinnittetsu Giho, Nippon Steel Corporation, No.382, pp.53-57, 2005.

■ Kishiki, S., Ohkawara, Y., Yamada, S. and Wada, A., Experimental Evaluation of Cyclic Deformation Capacity of U-shaped Steel Dampers for Base-isolated Structures, Journal of Structural and Construction Engineering, Transactions of AIJ, Vol.73, No.624, pp.333-340, 2008.

■ Kelly, J. M., The Role of Damping in Seismic Isolation, Earthquake Engineering and Structural Dynamic, Vol.28, pp.4-20, 1999.

■ Kelly, J. M., The Current State of Base Isolation in the United States, Proc., 2nd WorldConf. onStructural Control, Kyoto, Japan, Vol.1, pp. 1043-1052, 1999.

■ Dynamic Isolation System Inc. (DIS), Force Control Bearing for Bridge Seismic Isolation Design, 1994.

■ International Conference of Building Officials (ICBO), Uniform Building Code, earthquake regulations for seismic-isolated structures, Vol.2, Appendix Chapter.16, Whittier, Calif., 1994.

■ International Conference of Building Officials (ICBO), Uniform Building Code, earthquake regulations for seismic-isolated structures, Vol.2,

Appendix Chapter.16, Whittier, Calif., 1997.

■ Structural Engineers Association of Southern California, Design and Construc-tion of Base Isolated Buildings, 1988.

■ Staudacher, E., Habacher, C. and Siegenthaler, R., Erdbebensi-cherung in Baum, Neue Zürcher Zeitung, Technikbeilage, Zurich, Swit-zerland, 1970.

■ Robinson, W. H. and Tucker, A. G., Test Results for Lead Rubber Bearings for the William M. Clayton Building, Toe Toe Bridge and Waiotukupuna Bridge, Bull.NewZealand Natl. Soc. Eng., Vol.14, No.1, pp.21-33,1983.

■ Jolivet, J. and Richi, M. H., A Seismic Foundation System for Nuclear Power Stations, Proc. 4th Int. Conf. on Structure Mechanics in Reactor Technology, SanFrancisco, CA., 1997.

■ ANSYS, Inc.ANSYSMANUAL, Release9.0, 2005.

■ Ugural, A. C. and Fenster, S. K., A dvanced Strength and Applied Elasticity(4thedition), PrenticeHall, USA, 2003.

■ Gere, J. M., Mechanics of Materials(6thedition), Thomson Learning Academic Resource Center, USA, 2004.

■ Kato, B. and Akiyama, H., Predictable Properties of Material under Incremental Cyclic Loading, IABS, Preliminary Publication Lisbon, pp.119-124,1973.

■ Dynamic Isolation System Inc.(DIS), Force Control, Kyoto, Japan, Vol.1, PP.1043-1052, 1999.

■ Structural Engineers Association of Southern California, Design and Construction of Base Isolated Buildings, 1988.

■ 기술표준원 기계건설표과, 교량 지지용 탄성 받침(KSF4420), 1987. 7.

■ 황기태, 임종만, 김동원, “고성능 적층고무 면진장치의 요구 성능”, 한국지진공학회 학술발표대회 논문집, 2006, pp.487-494.

■ 권순일, “재료특성 및 형상에 따른 면진용 강재댐퍼의 구조 성능 평가”, 부산대학교 공학석사학위논문, 2008.

■ 오상훈, 김영주, 최호정, 김정철, 김태훈, “Fe-Mn 방진합금의 재료적 특성에 관한 연구”, 한국강구조학회 학술발표대회논문집, 제19권, 제2호, 2007. 6, pp.621-626.

■ Housner, G. W., “Limit Design of Structures to Resist Earthquakes”, Proc. of 1st WCEE, 1956.

■ Housner, G. W., “Behavior of Structures during Earthquakes”, ASCE, EM4, Oct. 1959.

■ 대한건축학회, 건축구조설계기준(KBC2005), 기문당, 2005. 4.

■ (주)마이다스아이티, MIDAS Gen(Ver.741) 사용자 매뉴얼, 2008.

■ 김두기 저, 구조동역학, 구미서관, 2005.

■ 송성훈, 유홍식, 오상훈, 이상호, “면진장치의 적용 유무에 따른 구조물의 동적특성 파악을 위한 진동대 실험계획”, 대한건축학회지회연합회 학술발표대회논문집, 제4권, 제1호, 2008, pp.273-276.

■ 천영수, 허무원, “중저층 골조에서 면진주기 설정에 따른 면진효과 분석”, 대한건축학회 추계학술발표논문집, 제28권, 제1호, 2008, pp.199-202.

■ 토목연구정보센터, 세계 최초 초고층 오피스 빌딩에 혼성물 면진시스템을 적용, 2001.

■ 한국면진제진학회, 처음 배우는 면진건축, 구미서관, 2004.

■ 고 망간 방진합금 개발 및 적용, 백승한, 대한금속학회 춘계학술발표대회개요집, 1995

■ Fe-Mn 합금의 진동감쇠능 및 기계적 성질의 변화, 손용철, 백승한, 김정철, 최종술, 대한금속학회 춘계학술발표대회, 1995

■ 지진 입력 에너지에 의한 에너지 등가 속도 스펙트럼의 제안, 문태섭, 오상훈, 이선욱, 대한건축학회논문집 구조계, 제16권, 제4호, 2000, p.3～9.

■ 슬래브 합성의 영향을 고려한 합성보의 에너지 흡수능력평가, 오상훈, 山田哲, 대한건축학회 추계학술발표대회, 2000.

■ 에너지 평형법에 의한 건축물의 내진설계, akiyama hiroshi(저), 오상훈(역), 구미서관, 2002.

■ 강재판형감쇠기의 소성거동에 관한 실험연구, 민경원, 정진욱, 대한건축학회논문집 구조계, 대한건축학회, 18권5호(통권163호), 2002.

■ 슬릿형 댐퍼를 이용한 구조시스템의 구조적 거동, 이수진, 박지영, 오상훈, 윤영호, 대한건축학회 학술발표논문집, 대한건축학회, 23권1호, 2003.
■ T-스티프너로 보강한 콘크리트 충전 각형강관 기둥-H형강보 접합부의 개발 및 실용화에 관한 연구 (2002 - 2003), 한양대 초대형구조시스템연구센터
■ 건축구조물의 내진성능 평가 기법 및 내진성능 향상 기술 개발 (2000.12 - 2002.5), 포항산업과학연구원
■ 세립형 고강도 구조용강을 이용한 강구조물 평가기법 및 설계기법 개발 (1998.3 - 2003.6), 포항산업과학연구원
■ 전단패널형 댐퍼를 이용한 횡력저항 제진구조시스템의 개발 (2000.8 - 2001.9), 포항산업과학연구원
■ 리모델링을 위한 구조성능 진단 프로그램 개발 및 접합보강법 개발 (2002.5 - 2003.7), 포항산업과학연구원
■ 건축구조설계 기준 2005, 대한건축학회, 기문당, 2005, pp.597.
■ Fe-Mn 방진합금재료의 특성에 관한 실험적 연구, 오상훈, 유홍식, 김영주, 백승한, 김정철, 한국강구조학회 학술발표논문집, 2006
■ 권순일, 이상호, 오상훈, 유홍식, 박진삼, 면진장치용 강재댐퍼의 형상 최적화, 한국구조물진단유지관리공학회 봄학술발표대회 논문집, 제12권, 1호, pp. 123-128, 2008.
■ 문태섭, 오상훈, 이선욱, “지진 입력 에너지에 의한 에너지 등가 속도 스펙트럼의 제안”, 대한건축학회논문집, 제16권, 제4호, 2000, pp.3-9.
■ 오상훈, 유홍식, “국내 지진하중을 고려한 에너지 등가 속도 스펙트럼의 제안”, 한국강구조학회 학술발표대회 논문집, 2007. 6, pp.184-187.

부　　록

A. 면진구조 설계지침

B. 복합면진장치 시공매뉴얼

C. 복합면진장치 품질관리매뉴얼

D. 고인성 강재 규격서

E. 고인성 강재용 면진장치 제품검사 규격서

A. 면진구조 설계지침(안)

1. 일반사항

면진구조의 설계는 일반적으로 다음과 같이 요약된다.

가. 고정하중, 적재하중, 풍하중 및 적설하중에 대한 상부구조, 하부구조, 기초 및 말뚝의 구조안전성은 허용응력도법에 의한 검증을 원칙으로 한다.

나. 지진력에 대해서도 상부구조, 하부구조, 기초 및 말뚝이 거의 탄성영역에 머물 도록 한다.

다. 면진장치는 장기하중시 및 지진시에 안전한 거동을 나타내는 것으로 한다.

라. 풍하중에 대해서는 면진층의 수평변형이 작다는 것을 확인한다.

마. 면진장치 주변골조와 주변부재가 지진시에도 구조안전성이 확보되도록 한다.

바. 면진장치에 발생하는 축력으로 인한 연직변형 및 크리프에 의한 연직변형량에 대하여 연직방향의 면진이격거리에 여유가 있도록 설계한다.

사. 상부구조에 대한 설계

- 상부구조의 기둥과 보등의 설계는 중력하중과 면진층의 층전단력계수에 대한 전단력을 고려하여 결정한다.

아. 면진층에 대한 설계

- 구조물은 주어진 지진입력에너지의 레벨을 견디도록 설계한다.

자. 골조의 응력과 변형은 원칙적으로 부재의 탄성강성으로 산정한다.

차. 면진장치를 교체하는 것을 전제로 설계하는 경우 시공하중을 고려한다.

[해설]

가. 적재하중의 증감과 편재배치는 면진구조의 진동성상에 영향을 미치므로 고정하중에 적재하중의 비율이 큰 공장, 창고 등의 건축물의 경우 적재하중의 변동을 고려한 설계가 필요하다. 면진건축물에 부동침하가 발생하면 면진층의

수평강성이 상대적으로 작기 때문에 연직하중에 의한 면진층에 수평변형이 발생할 가능성이 있다. 따라서 하부구조, 기초 및 말뚝의 연직하중지지능력 및 침하량의 검토는 보다 신중하게 할 필요가 있다.

나. 상부구조의 비선형거동을 고려한 면진건축물의 지진응답성상을 고려한 면진 건축물 상부구조의 손상은 비면진 건축물과 비교한 경우 압도적으로 작지만, 구조부재 내력의 편차에 원인이 있는 상부구조의 항복전단력의 변화에 대해서 민감하게 변화한다는 점이다. 이것은 면진건축물은 비교적 장주기에서 진동하므로 상부구조에는 지진하중이 거의 정적으로 작용하기 때문에 상부구조가 항복내력을 넘는 지진력을 받는 경우에는 급격하게 소성변형이 진행되는 것에 기인한다고 생각된다. 면진건축물에서는 상부구조가 조기에 소성변형 하는 것을 허용하면 상부구조에 큰 소성변형이 발생할 가능성이 있기 때문에 면진건축물의 상부구조는 큰 지진시에도 거의 탄성영역에 머물도록 설계하는 것이 바람직하다. 면진건축물은 거의 대부분을 면진층에서 지진입력에너지를 흡수하는 구조형식이고 면진장치가 큰 지진시에도 안정적인 거동을 나타내는 것을 보증하기 위해서는 하부구조, 기초와 말뚝은 탄성영역에 머물도록 설계하는 것이 바람직하다. 면진피트의 옹벽설계에도 유의해야한다. 또 액상화의 우려가 있는 지반에 건설되는 면진건축물의 경우 기초구조 및 말뚝의 설계에 있어서는 가능한 한 액상화 해석결과나 동적 상호작용 등의 해석 결과를 고려하는 것이 바람직하다. 면진건축물에 있어서 거의 탄성영역에 머물도록 설계하는 상부구조의 소성변형 능력은 설계에 있어서 중요하지 않다. 따라서 일반건축물의 설계법에서 변형능력 확보를 위한 여러 가지 구조관련 규정에 대해서는 설계자의 판단에 따라 적절하게 완화 할 수 있다.

다. 상부구조의 설계용 층 전단력으로 전도모멘트에 의해서 발생하는 변동축력으로 적층고무에 인장력(미끄럼면진장치의 경우에는 부상력)이 발생하지 않도록 하는 것이 바람직하다. 변동축력이 크게 발생하는 경우에는 시간이력지진응답해석 등에 의한 상세 검토로 적층고무에 인장시 구조안전성을 확인하는 것이 바람직하다.

라. 비면진건축물의 경우에는 지진하중이 풍하중을 상회하는 경우 지진하중으로 건축물의 안전성을 확인하고 내풍설계는 생략하는 경우가 많다. 그러나 면진건축물의 경우 면진층의 수평강성이 상부구조 각층의 수평강성에 비해 작기 때문에 풍하중에 의한 면진층의 응답전단력 및 수평변형을 확인하여 안전성에 지장이 없는지를 확인한다. 분리장치와 댐퍼를 병용하는 경우 댐퍼의 항복내력을 풍하중에 의한 수평내력이상으로 설정하는 것이 일반적이다. 댐퍼가 에너지흡수를 하는 경우 풍하중이 장시간 지속적으로 작용하는 현상이 있으므로 댐퍼의 에너지흡수 성능을 확인한다.

마. 그림 1과 같이 건축물의 중량을 지지하는 적층고무의 주변에는 수평변형시에 반력분포 합력의 위치가 이동하게 된다. 이 반력분포 합력의 위치와 부재축과의 편심거리에 따라서 상, 하부구조에는 부가 휨모멘트(M)가 발생한다. 상부구조에서는 이 모멘트를 적층고무 바로 상부의 보와 기둥에 저항시키고 있다. 또 하부구조에서는 기초보, 말뚝, 지반 등에서 저항시키고 있다. 미끄럼 면진장치의 경우에는 장치의 높이가 적층고무에 비해 낮으므로 수평변형시에 발생하는 축력과 부재축과의 편심에 의한 부가 휨모멘트 M은 상부구조 또는 하부구조의 어느 쪽에 발생한다.

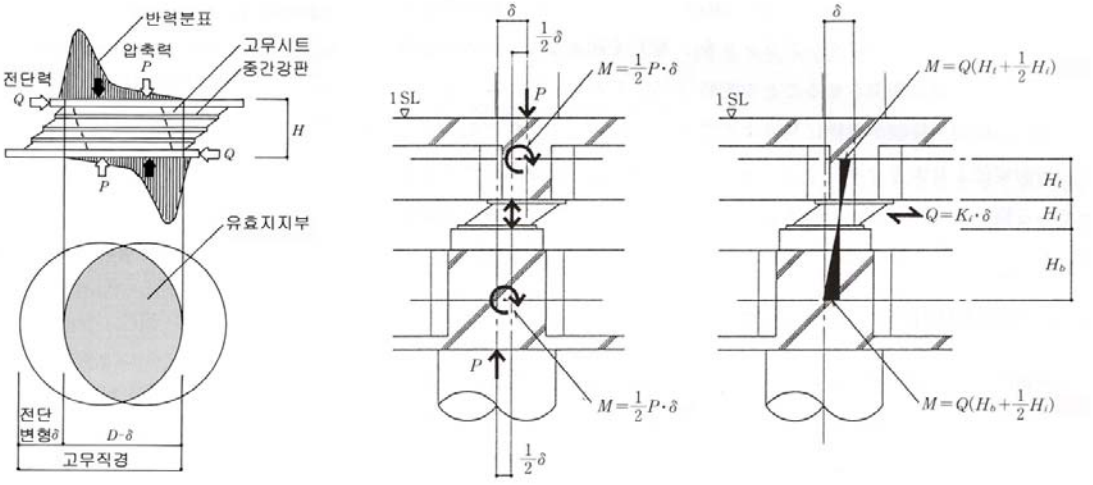


그림 1 적층고무의 하중기구와 유효지지부

일반적으로 면진장치는 연결볼트와 플레이트로 구조체에 연결시킨다. 따라서 면진장치의 주변부재는 면진장치의 반력을 확실하게 상부 및 하부구조에 전달할 수 있도록 해야 한다. 면진장치의 연결볼트인 앵커볼트와 스터드볼트는 수평전단력에 의한 휨모멘트에서 발생하는 인장력, 연직력에 의한 휨모멘트(P-δ효과)로 발생하는 인장력의 조합응력으로 설계한다. 최근에는 면진장치의 기술개발과 해석기술의 발달로 적층고무 분리장치에 인장을 허용하는 설계를 하는 경우도 있으므로 이 경우에는 부상력도 가미하여 구조안전성을 검토한다. 연결플렌지는 앵커볼트에 발생하는 인장력에 의한 플레이트의 면외 휨모멘트에 대하여 두께를 검토한다. 연결플레이트는 플랜지 설계시의 응력을 이용하여 볼트에 발생하는 인장력과 전단력에 대해 설계를 한다. 베이스플레이트는 스터드 볼트를 지점으로 하여 앵커볼트의 반력에 의해 발생하는 플레이트의 휨모멘트에 대하여 설계한다. 면진장치를 설치하는 패드부분의 콘크리트와 배근설계는 축력, 전단력, 휨모멘트를 기초(기초보와 기초슬래브)에 확실하게 전달할 수 있도록 설계한다. 일반적으로 적층고무의 축력 N, 전단력 Q가 발생하는 경우 스터드 볼트의 검증은 다음과 같이 한다.

플랜지플레이트에 발생하는 휨모멘트 M은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$M = Q \times H_i$$

H_i : 적층고무의 높이

스터드볼트는 유효축단면적(축방향) A_t, 축단면적(전단)A_s의 볼트 n 개 를 반경 r 의 원주에 따라 균등하게 배치하는 것으로 하면 다음과 같다..

$$I_p = A_t \times r^2 \times n$$

$$I = I_p \times \frac{1}{2}$$

$$Z = \frac{I}{r}$$

I_p : 스터드볼트의 극2차모멘트

I : 스터드볼트의 단면2차모멘트

Z : 스터드볼트의 단면계수

휨모멘트에 의해 스터드볼트에 발생하는 축방향응력도 σ_M은 다음과 같다.

$$\sigma_M = \frac{M}{Z}$$

적층고무에 작용하는 축력N 에 의해서 스터드볼트에 발생하는 축방향응력도 σ_t는 다음과 같다.

$$\sigma_t = \frac{N}{(\ n \cdot A_t)}$$

전단력에 의해서 스터드볼트에 발생하는 전단응력도 τ 는 다음과 같다.

$$\tau = \frac{Q}{(n \cdot A_s)}$$

인장과 전단력의 조합응력 상태에서 항복조건으로 스터드볼트의 검토를 한다.

$$\sigma^2 + 3\tau^2 \leqq \sigma_y^2$$

σ : 스터드볼트의 인장응력도

σ_y : 스터드볼트의 항복응력도

바. 장기하중일때와 지진하중(단기하중)시 분리장치의 수직방향 변형과 크리프(Creep)에 의한 연직변형량에 대하여 연직방향의 면진이격거리는 충분히 여유있는 치수로 설정한다. 장기하중시에 각 분리장치의 연직변형량에 큰 차이가 발생하면 상부구조체에 부동침하와 동등한 부정정응력이 발생하게 된다. 또 크리프에 대해서는 크리프량의 평가(예측식)를 각 장치 제조자가 제시하고 있지만, 제조업체와 적층고무의 종류별로 다르다는 것을 유의해야 한다. 특히 다른 종류의 적층고무 분리장치를 병용하는 경우에는 크리프의 특성을 적절하게 파악하여 설계에 반영할 필요하다. 또 적층고무의 크리프에 발생하는 몇 mm 정도의 연직변위에 대한 면진장치의 변형능력을 확인한다. 댐퍼의 감쇠성능은 면진층의 복원력특성에 영향을 미치지 않도록 한다.

사. 면진구조에서 상부구조는 허용응력도 설계를 한다. 지진입력에너지의 대부분을 면진층에서 흡수하기 때문에 원칙적으로 상부구조는 지진에너지의 흡수능력을 기대하지 않는다. 오히려 천천히 흔들리면서 면진층에서 전달되는 준정적인 수평력에 대해 강도적으로 견딜 수 있으면 된다. 따라서 상부구조에 가해지는 최대층전단력으로 구한 수평력에 대해 상부구조가 단기허용응력도 이내어 머물도록 설계한다.

상부구조의 설계용전단력은 예비응답해석결과를 참조하여 결정한다. 상부구조의 질량, 강성의 편재로 발생하는 비틀림 진동은 면진층을 비틀림이 발생하지

않도록 설계할 수 있으므로 상부구조는 비틀림진동에 의한 응답증폭이 없기 때문에 상부구조는 정적인 수평력에 대한 비틀림을 고려하여 설계하면 된다.

아. 면진층의 설계는 분리장치와 댐퍼의 설계에서 설계된 면진장치를 편심이 발생하지 않도록 균형있게 배치하는 것이 중요하다.

(1) 적층고무 분리장치의 배치는 면진층에서 비틀림이 발생하지 않도록 하기 위해 상부구조의 질량 중심과 면진층의 강심을 가능한 한 일치시키는 것이 바람직하다. 실제 설계에서는 축력과 수평강성의 비율이 일정하게 되도록 적층고무 분리장치를 선택하면 중심과 강심에 큰 차이가 거의 발생하지 않는다. 기본적인 적층고무분리장치의 배치는 각 기둥 하부에 하나씩 배치하는것을 원칙으로 한다. 그러나 기둥이 많고 각 기둥 하부에 하나의 적층고무분리장치를 배치할 경우에 적층고무의 면압이 작아지게 되어 건축물중량에 비해 면진층의 수평강성이 커지게 되는 경우가 있다. 이러한 경우 상부구조와 면진층사이에 전이층을 설치하여 적층고무의 수를 작게하여 수평강성을 작게하는 방법도 있다.

(2) 댐퍼의 배치도 적층고무분리장치의 배치와 마찬가지로 면진층에서 면진장치의 강심을 상부구조의 중심과 일치시키는 것이 원칙이다. 부정형인 건축물의 기둥 하부에 한정된 크기의 적층고무분리장치를 배치하면 면압이 일정하게 되지 않아 상부구조의 중심에 적층고무 분리장치의 강심을 일치시킬 수 없는 경우도 발생한다. 분리장치와 분리형의 면진구조에서는 댐퍼를 면진층의 감심과 상부구조의 중심과 일치시켜서 면진층에서 비틀림저항을 크게하여 비틀림진동을 억제할 수 있다. 또 댐퍼를 건축물외주부에 배치하여 면진층의 비틀림강성을 크게하여 비틀림 변형에 효과적으로 대응할 수 있다. 면진층의 강심과 상부구조의 중심과 일치하고 있는 경우에는 상부구조에 강심과 중심의 차이에 의한 편심이 발생하여도 면진층의 비틀림진동은 아주 작다.

자. 골조의 구조해석은 탄성강성을 고려하는 것을 원칙으로 하지만, 짧은스팬의 보와 잡벽이 설치된 보등 응력이 집중하는 부재의 균열이 층 강성저하에 큰 영향을 미치는 경우에는 균열을 고려한 등가강성을 이용하여 구조해석을 할 필

요가 있다. 고층건축물과 같이 연직변형의 영향이 크다고 판단되는 경우에는 연직강성을 적절하게 평가한 모델화를 한다. 면진구조의 설계에 있어서 면진층의 강심과 중심을 일치시키는 것이 중요하다. 면진층에 편심이 없고 상부구조가 거의 탄성영역일 경우에는 상부구조에 발생하는 층간비틀림각은 상부구조에서 정적으로 구한 편심거리에 최대응답층전단력을 곱한 비틀림모멘트에 의한 비틀림각과 거의 일치하여 비틀림 진동이 증폭되는 경우는 없다. 따라서 상부구조에 편심이 있는 경우에도 비틀림변형을 고려하지 않은 구조해석으로 구한 층전단력을 이용하여 상부구조의 비틀림변형을 정적으로 평가하면 된다.

면진층의 편심을 가능한 한 작게되도록 면진장치를 배치한다. 면진층의 비틀림강성이 커지도록 면진장치를 배치하는 것이 바람직하다. 분리형 댐퍼의 경우 방향성에 유의한다. 유체형댐퍼는 방향성이 있어 면진층 전체로서 감쇠성능이 방향성을 지니지 않도록 배치할 필요가 있다.

또 기존건축물의 내진보강 방법으로 면진구조를 적용하는 경우도 있다. 기존건축물의 경우 현재의 건축법을 적용하면 내진설계가 적용되지 않은 경우도 있으므로 보유수평내력이 부족한 경우도 있다. 또 건축물의 노후화와 균열등에 의한 강성저하가 있는 경우도 많다. 따라서 기존건축물을 면진구조로 내진보강하는 경우에는 구조해석시에 내력과 강성을 적절히 평가할 필요가 있다.

차. 면진장치를 교체하는 것을 전제로 설계하는 경우 교체할 때의 Jack up 반력을 설계하중으로 고려할 필요가 있다. 이 경우에는 설계단계에서 교체방법 따른 하중을 고려하여 설계하는 경우와 교체시에 면진장치의 주위를 보강하는 방법으로 하는 경우가 있다. 주위를 보강하기 위한 비용과 건축적인 제약, 교체시에 필요로 한 비용을 건축주, 설계자가 종합적으로 판단하여 결정해야 한다. 특히 탄소성 복원력특성을 지닌 이력형댐퍼를 사용하는 경우에는 지진종료 후에 잔류변형이 발생할 가능성이 있으므로 건축물에 허용되는 잔류변형량을 최대응답변위에 대한 설계수평변위의 여유도 등을 고려한 다음에 설정하고 원위치로 되돌리는 방법과 반력기구의 필요여부를 검토할 필요가 있다.

2. 적층고무의 설계

적층고무를 설계하는 순서는 일반적으로 다음과 같이 요약된다.

가. 면진주기 T_f와 설계변위 d_{dsign}를 설정한다.
나. 적층고무의 2차형상계수 S_2와 고무의 전단탄성계수 G 의 설정
다. 적층고무의 최소직경 $D_{\min}$을 설정한다.
라. 평균면압 σ_{ave}의 산정
마. 면진주기 T_f와 설계변위 d_{dsign}를 설정한다.
바. 적층고무의 2차형상계수 S_2와 고무의 전단탄성계수 G 의 설정
사. 적층고무의 최소직경 $D_{\min}$을 설정한다.
아..평균면압 σ_{ave}의 산정
자. 개별 적층고무의 설계
카. 적층고무의 수평강성의 전체합 $\sum K_H$ 계산
타. 면진주기의 비교
파. 적층고무의 사양 결정

[해설]

면진건축물에서 분리장치와 댐퍼의 특성과 성능에 따라 지진시의 응답성능이 결정될 가능성이 있다. 이것은 면진건축물의 성능을 결정할 수 있다는 것이다. 면진건축물의 설계는 먼저 어떤 성능의 면진건축물을 설계 할 것인가를 설계자가 결정하고, 이것을 실현하기 위하여 상부구조와 댐퍼의 관계를 고려하여 적층고무의 배치, 크기, 개수, 면압 등을 결정하게 된다.

사용하는 적층고무의 크기와 형상은 통일하여도 좋지만, 실제 적층고무에 작용하는 연직하중은 일정하지 않으므로 면진성능을 높이기 위해서는 유연한 고무재질의 적층고무와 고무층이 많은(2차형상계수가 작은)적층고무를 시용하는 경우도 있다. 이 경우 각각의 적층고무가 지니는 성능에는 차이가 있으므로 이러한 특성을 충분히 파악한 다음 설계를 하는것이 무엇보다 중요하다.

이러한 점을 고려하여 적층고무를 설계하는 순서는 대략 다음과 같다.

가. 면진주기 T_f와 설계변위 d_{dsign}를 설정한다.

건축물의 용도, 지반의 종류, 응답특성을 고려하여 예상하는 지진입력과 면진성능(면진층의 전단력계수와 최대변형량)을 설정한다. 이러한 성능을 만족하도록

설계변위d_{dsign}와 면진주기T_f를 설정한다.

나. 적층고무의 2차형상계수S_2와 고무의 전단탄성계수 G 의 설정

적층고무의 형상과 고무의 재질을 결정한다. 기둥 축력의 크기에 따라 적층고무의 크기와 재질을 변화시키는 경우에는 대표적인 2차형상계수S_2와 고무재질G을 설정하여 둔다.

다. 적층고무의 최소직경$D_{\min}$을 설정한다.

천연고무계 적층고무의 복원력특성에 따라 일반적으로 전단탄성율 γ=250%를 선형한계범위라고 가정하여 $\frac{D}{d_{design}} = \frac{S_2}{\gamma}$ 의 관계에서 2차형상계수S_2=5 의 경우에는 $D_{\min} \geqq 2d_{design}$ 이고, S_2=7 의 경우에는 $D_{\min} \geqq 3d_{design}$ 로한다. 2차형상계수가 5보다 작은 적층고무를 사용하는 경우에는 설계변위가 직경의 1/2이하가 되도록 적층고무의 크기를 결정하거나 면압을 낮추어서 사용하는 것이 일반적이다.

라. 평균면압σ_{ave}의 산정

설정한 면진주기를 달성하기 위하여 필요한 건축물전체의 평균면압 σ_{ave}는 다음식으로 계산할 수 있다. 적층고무의 크기와 재질이 다른 경우에는 평균값을 이용하여도 무방하다.

$$\sigma_{ave} = \left(\frac{T_f}{2\pi}\right)^2 \frac{GS_2 g}{D_{\min}} = 24.8\frac{T_f^2 GS_2}{D_{\min}}$$

이 장기하중에 대한 평균면압이 좌굴응력도 σ_{cr}의 1/3이하 인 것을 확인한다($\sigma_{ave} \leqq \frac{\sigma_{cr}}{3}$). 만약 크게 상회한다면 설계조건을 재검토한다. 평균기둥의 축력은 다음과 같이 산정한다.

$$P_{ave} = \frac{g}{16\pi} T_f^2 GS_2 D_{\min} = 19.5\, T_f^2 GS_2 D_{\min}$$

평균면압을 만족하도록 건축물의 평면계획과 구조계획을 검토한다. 만족하지 않을 경우에는 설계조건을 재검토한다.

마. 개별 적층고무의 설계

평균면압σ_{ave}이 되도록 적층고무의 직경 D를 설정한다. 적층고무의 직경은 ㉮

단계에서 설정한 최소직경 $D_{\min}$이상으로 한다. 설정한 직경D로 적층고무의 면압σ를 산정하여 면압의 크기를 파악한다. 면압의 크기를 고려하면서 2차형상계수 S_2와 전단탄계계수G를 각각 계산한다.

바. 적층고무의 수평강성의 전체합$\sum K_H$ 계산

개별적으로 결정한 적층고무의 수평강성을 계산하여 면진층 전체의 수평강성 $\sum K_H$를 계산한다. 수평강성의 계산에서는 압축하중을 고려한 수평강성식을 이용할 수 있지만, 중심구멍이 작은 경우에는 다음식과 같이 약산할 수 있다.

$$K_H = \frac{\pi}{4} D S_2 G$$

사. 면진주기의 비교

앞의 ㉥에서 계산한 수평강성$\sum K_H$으로 배치계획한 적층고무만의 주기 T_{f0}를 다음식으로 계산한다. ㉮에서 가정한 T_f와 면진층의 주기 T_{f0}를 비교하여 거의 일치하는 경우에는 ㉰의 적층고무사양을 결정하면 되고, 차이가 많다면 ㉯로 가서 적층고무를 재설정하여 검토한다.

$$T_{f0} = 2\pi \sqrt{\frac{W}{\sum K_H g}}$$

아. 적층고무의 사양 결정

적층고무의 1차형상계수 S_1은 적층고무의 고무1층의 두께 t_R과 고무층수 n과 관계가 있고, 전고무층두께는 2차형상계수로 결정되기 때문에 1차형상계수를 만족하도록 고무1층의 두께와 층수를 결정하면된다.

적층고무의 수평강성의 저하를 10%이하로 하기 위해서는 1차 형상계수는 다음식을 만족할 필요가 있다.

$$S_1 \geqq \frac{3\sigma}{G S_2}$$

중간강판의 두께 t_s는 벽층고무의 직경이ϕ700이하인 경우에는 $\frac{t_s}{t_R} \leqq 0.5$ 이고,ϕ800이상인 경우와 고면압인 경우에는 $\frac{t_s}{t_R} > 0.75$ 가 일반적이다.

3. 댐퍼의 설계

댐퍼의 설계하는 순서는 일반적으로 다음과 같이 요약된다.

가. 댐퍼의 종류를 선택한다.

나. 각 댐퍼의 항복전단력의 합계를 가정한 $_sQ_y$가 되도록 댐퍼의 개수를 결정한다.

다. 댐퍼의 배치

라. 면진장치(분리장치와 댐퍼)의 특성값 확인

[해설]

면진층의 특성을 가정한 다음 예비응답해석과 포락해석법으로 댐퍼에 필요한 항복강도를 추정한다. 예비응답해석은 입력지진파의 진동특성에 의존한 결과가 얻어지므로 지진파의 진동특성에 의존하지 않는 포락해석법을 이용하는 것이 유효하다. 포락해석법은 그림 2와 같이 면진건축물의 주기 T_f, 면진층의 전단력계수 α_1, 면진층최대변위 $\delta_{\max}$, 댐퍼의 항복전단력계수 α_s의 관계를 나타내고 있다. 이 그래프에서 면진건축물의 주기 T_f와 면진층의 최대변위$\delta_{\max}$를 설정하면 면진층의 전단력계수α_1을 최소로 하는 댐퍼의 항복전단력 α_s를 구할 수 있다.

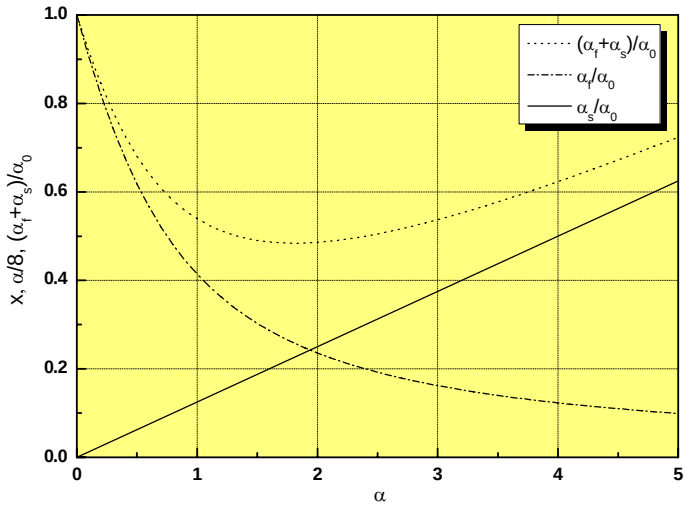


그림 2. 댐퍼량과 응답저감율

S_D지반을 대상으로 한 등가속도 V_E=100cm/sec 정도에서 면진건축물의 주기 T_f=6.0sec, 면진층 최대변위 20-30cm로 하면 댐퍼의 항복전단력계수는α_s =0.02-0.03정도의 값이 된다.

댐퍼의 설계는 다음과 같은 순서로 할 수 있다.

가. 댐퍼의 종류를 선택한다.

댐퍼의 선택은 여러 가지 특성을 고려하여 선정한다. 납댐퍼는 1차강성이 높고 항복변위가 작은(약 0.8cm) 완전 Bi-Linear 형의 복원력특성 그림 3과 같다. 강제댐퍼는 항복변위가 약간크고(약2.8cm) 2차강성이 있는 Bi-Linear형의 복원력특성 그림 4와 같다. 따라서 납댐퍼와 강봉댐퍼의 비율을 이러한 특성을 고려하여 결정하면 된다.

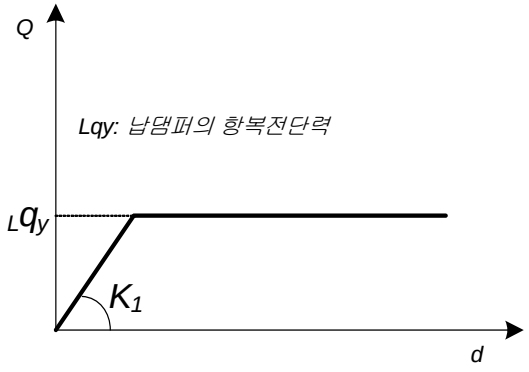


그림 3 전단력계수와 면진층 변위의 관계

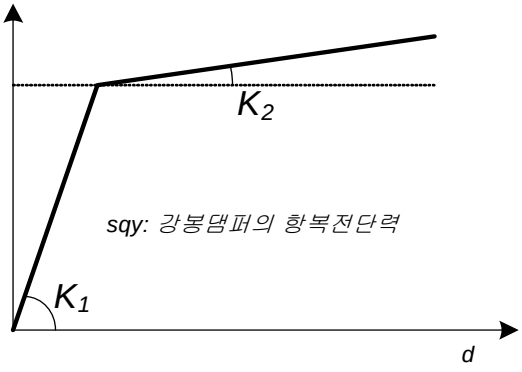


그림 4 전단력계수와 면진층 변위의 관계

나. 각 댐퍼의 항복전단력의 합계를 가정한 $_sQ_y$가 되도록 댐퍼의 개수를 결정한다. 댐퍼의 항복전단력이 너무 작아지면 면진층의 최대변형이 커져서 분리장치의 변형능력과 면진층의 수평이격거리에 문제 발생할 수도 있다. 또 댐퍼의 항복전단력이 너무커지면 상부구조에 작용하는 지진력이 증가하게 되므로 주의가 필요하다.

$$_sQ_y = \alpha_s W$$

α_s: 댐퍼의 항복전단력계수

W: 지진시 면진층보다 상부의 건축물중량

다. 댐퍼의 배치

댐퍼의 배치는 면진층에 편심이 발생하지 않도록 면진층의 강심위치와 면진층 보다 상부 건축물중량의 중심위치가 가능한 한 일치하도록 한다. 또 면진층의 비틀림저항 강성을 높이기 위해 댐퍼는 면진층 평면의 외주부에 배치하는 것이 바람직하다.

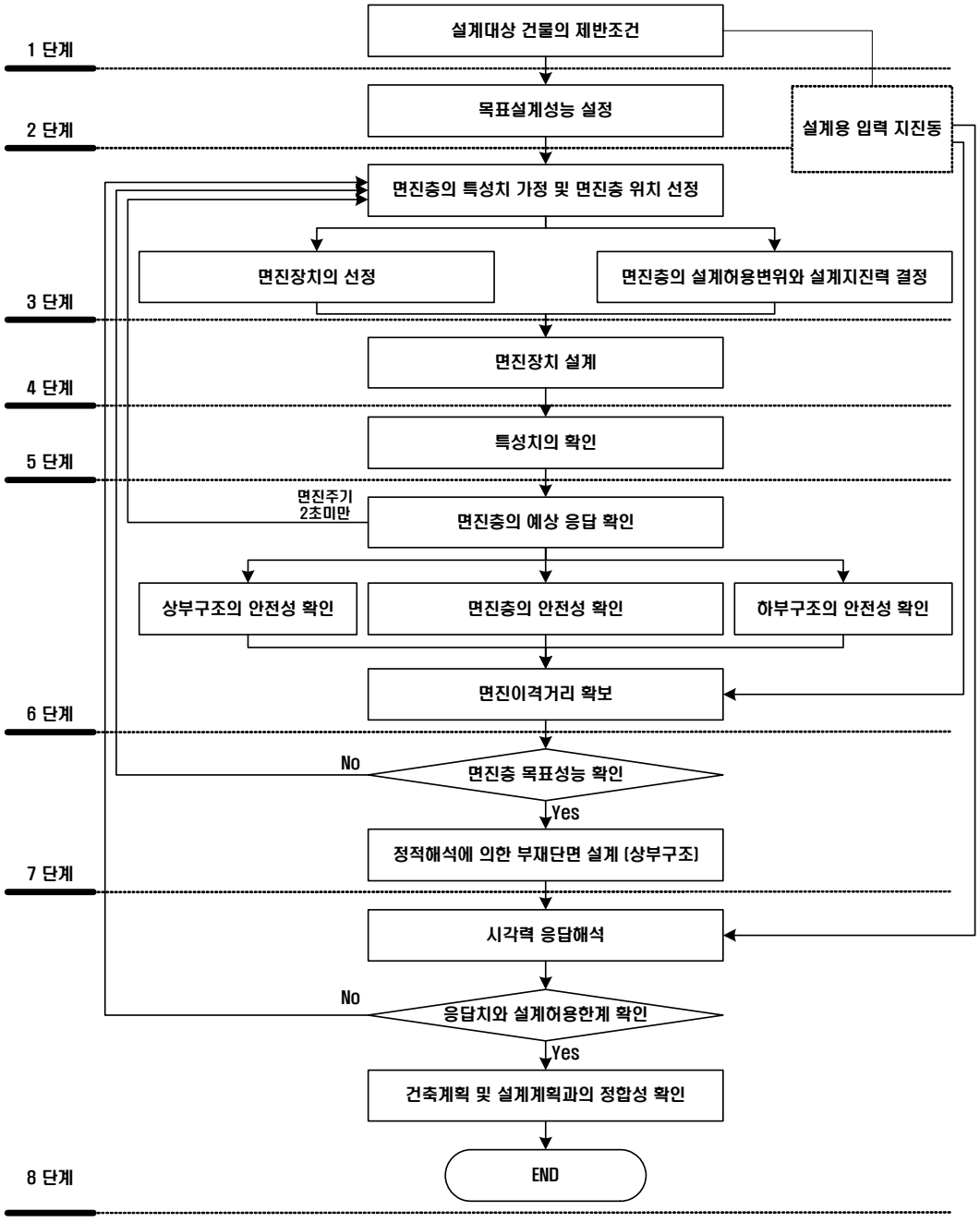
라. 면진장치(분리장치와 댐퍼)의 특성값 확인

설계한 면진장치의 특성값을 이용하여 지진응답해석과 포락해석법으로 가정한 면진성능(면진층의 전단력계수 α_1과 면진층최대변위 $\delta_{\max}$)을 발휘할 수 있는 것을 확인한다.

4. 면진구조의 설계순서

2, 3절의 구조 특성값을 고려한 면진구조의 설계순서는 다음과 같이 요약된다.

1 단계 : 대상건축물의 제반조건 검토
2 단계 : 설계의 방침과 목적
3 단계 : 면진층의 특성값의 가정
4 단계 : 면진장치의 설계
5 단계 : 특성값 확인
6 단계 : 면진층의 예상응답 확인
7 단계 : 면진층 목표성능 확인
8 단계 : 지진응답해석에 의한 안전성 확인



[해설]

이 지침에 따른 면진건축물의 구조설계 순서는 개략 Flow와 같다. 제1장에서부터 순서에 따라 설계를 진행하면 되지만, 유의해야할 점은 다음과 같다. 면진층의 계획에서는 면진장치의 모델화뿐 만 아니라, 면진층 전체의 중심과 강심을 맞추도록 면진장치의 배치계획과 면진층의 모델화를 하도록 한다.

시간이력 이력해석으로 예비검토를 하는 경우 해석모델은 상부구조를 강체로

간주한 1질점모델을 이용하는 경우가 많다. 이러한 경우에는 면진층의 응답변위 파악과 상부구조의 설계용전단력 설정을 목적으로 하고 있다. 그러나 고층면진 건축물과 같이 상부구조를 강체로 취급할 수 없을 경우에는 상부구조 진동모드의 영향을 무시할 수 없는 경우에는 예비해석 단계에서도 다질점 모델을 이용하는 것이 좋다. 시간이력응답해석에 이용하는 해석모델은 가능한 한 면진건축물의 실정에 적합한 모델을 사용하는 것이 바람직하다. 비틀림 진동모델과 건축물-지반의 상호작용 해석모델에 의한 검토를 해야 하는 경우도 있다. 면진구조는 면진장치와 댐퍼 구성되는 면진층의 응답을 예측하는 방법으로 에너지 평형법을 이용한 응답포락법과 응답스펙트럼법이 있다. 여기서는 에너지 평형법에 의한 응답예측 방법에 대하여 설명하고자 한다.

면진구조는 면진층이 어떤 위치에 설치되는가 가 중요하다. 또 면진구조의 설계를 위한 예비해석과 시간이력이력 해석을 어떻게 대응 시키는가도 중요하다.

새로운 구조형식인 면진구조에 적용해야하는 내진설계에 고려해야 하는 것은 다음과 같다.

가. 기존 내진설계법과 기본 맥락을 유지한다.
나. 면진구조 고유의 특성을 충분히 고려한다.

내진설계는 지진으로 구조물에 투입되는 지진입력에너지의 전부를 구조물이 손상을 입지 않고 구조물에 흡수되는 구조라고 할 수 있다. 면진구조는 면진층의 강성을 상부구조에 비하여 아주 작게하여 지진으로 투입되는 지진에너지 총량(총에너지입력)을 면진층에 집중시키는 구조이다. 또 면진층의 최대변형을 억제하기 위하여 에너지 흡수장치로 댐퍼를 설치한다. 상부구조로 입력되는 에너지는 작아서 일반구조물에 요구되는 소성에너지 흡수능력을 발휘하기 위한 여러 가지 제약조건으로부터 설계가 자유로워진다.

포락응답 예측법은 시간이력 응답해석을 종합적으로 파악하는 방법이라고 할 수 있다. 이 응답예측법을 이용하여 구조계획에 여러 가지 장치의 선택 등을 가능하게 하는 설계법의 기초라고 볼 수 있다. 따라서 상세한 특징을 간과한 거시적 예측법이기 때문에 이를 보완하기 위하여 구체적인 조건을 고려하여 상세한 해석이 필요하게 된다는 점을 잊어서는 안 된다. 적층고무면진장치의 수평강성

k_f는 휨변형 성분이 거의 없기 때문에 고무의 전단강성으로 나타낼 수 있다.

$$k_f = \frac{GA}{h}$$

G: 고무재료의 전단탄성계수

A: 적층고무의 단면적($A = \frac{\pi D^2}{4}$)

h: 고무층 전체의 두께($h = n_R \times t_R$, n_R : 고무 층수 , t_R : 고무 1층의 두께)

적층고무 면진장치의 연직강성은 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$K_V = \frac{A \cdot E_{ab}}{n \cdot t_r}$$

$$E_{ab} = \frac{E_c E_b}{E_c + E_b}$$

$$E_c = 3G(1 + 2\kappa S_1^2)$$

$$S_1 = \frac{\pi D^2}{4\pi D t_R} = \frac{D}{4t_R}$$

$$S_2 = \frac{2D}{nt_r}$$

1 단계: 설계대상 건축물의 제반조건

① 지진시 건축물의 총중량 WE를 산정한다. WE는 면진건축물의 주기와 면진층에 작용하는 전단력을 산정할 때 사용한다.

② 지반의 종류에 대해서 판단한다. S_D 지반에서는 지진시 지반의 소성화까지 고려한 탁월주기가 면진건축물의 주기에 너무 근접하지 않도록 면진건축물의 주기를 충분히 길게 할 필요가 있다.

2 단계: 목표설계 성능 설정

면진구조의 성능을 충분히 발휘시키기 위하여 건축물의 목적에 부흥하는 설계방침을 설계자가 결정한다.

① 설계용 지진동의 입력에너지의 속도환산치 VE의 크기는 지반종류, 건축물

중요도등을 고려하여 결정한다.

② 설계밑면전단력계수 α_a 를 설정한다.

③ 설계허용변위 δ_a 를 결정한다.

④ 면진건축물의 주기 T_f를 설정한다.

$$T_f = 2\pi \sqrt{\frac{W_E}{k_f g}}$$

k_f : 면진장치만의 수평강성(t/cm)

g : 중력가속도(cm/s2)

⑤ 댐퍼의 항복전단력계수 α_s를 결정한다. 이것은 면진층에 에상되는 최대응답변위, 최대응답층전단력 등 과 풍하중을 고려하여 결정한다.

3 단계: 면진층의 특성값 가정

밑면전단력 계수 α_1이 설계밑면전단력계수 α_a 이하에서 면진층의 최대변위 $\delta_{\max}$가 설계허용변위 δ_a 이하가 되도록 면진건축물의 주기 $\overline{T_f}$ 및 댐퍼의 항복전단력 계수 $\overline{\alpha_s}$를 가정한다.

면진장치(천연고무의 적층고무면진장치, 납봉삽입적층고무면진장치, 댐퍼 등)에는 설계치에 대한 제품의 편차, 온도변화 및 경년변화 등에 의한 면진장치의 강성의 변화와 댐퍼의 항복내력에 대한 편차가 존재하므로 장치제조메이커의 특성값를 파악하여 어느 정도 여유를 지닌 특성값를 설정하도록 한다.

가정한 면진건축물의 주기 $\overline{T_f}$ 및 댐퍼의 항복전단력계수 $\overline{\alpha_s}$로부터 적층고무면진장치의 수평강성 $\overline{k_f}$, 댐퍼의 항복전단력 $\overline{Q_y}$은 다음과 같이 산정한다.

$$\overline{k_f} = \frac{4\pi^2 W_E}{\overline{T_f}^2 g} \text{ (t/cm)}$$

$$\overline{Q_y} = \overline{\alpha_s} W_E \text{ (t)}$$

4 단계: 면진장치의 설계

면진장치의 설계는 면진층의 특성값에서 가정한 면진장치의 수평강성 $\overline{k_f}$ 및 댐퍼의 항복전단력계수 $\overline{Q_y}$를 이용하여 적층고무 면진장치 및 댐퍼의 종류, 성능, 배치등을 고려하여 면진장치의 기본설계를 진행한다. 적층고무 면진장치와 댐퍼

는 제3장을 참고로 설계한다. 감쇠성능을 지니고 있는 적층고무면진장치에 대해서도 적층고무면진장치로서의 탄성 성능과 댐퍼로서의 감쇠성능으로 분리하여 고려한다면 예비설계에서 검토할 수 있다.

① 적층고무 분리장치의 설계

㉮ 상부구조 기초부에 있는 기둥의 연직력의 분포와 최대치 및 최소치를 파악한다.

㉯ 면진건축물의 주기 $\overline{T_f}$에서 적층고무 면진장치의 평균면압을 설정한다. 초기의 면진건축물의 주기 $\overline{T_f}$는 2초 정도였지만, 최근에는 면진건축물의 대형화와 장치의 개수를 적게하는 등 면압을 높게 설정하기도 한다. 면진건축물의 주기 $\overline{T_f}$가 4초 이상으로 면진효과가 높은 건축물의 경우 고면압으로 설정하기도 한다. 일반적으로는 50㎏/㎠～150㎏/㎠의 면압에서 사용되고 있다.

㉰ 면진층의 설계변위 δ_a의 2배 이상이 되도록 적층고무면진장치의 최소직경을 결정한다.

㉱ 각 적층고무면진장치의 직경을 기둥축력을 기준으로 결정한다. 장치설치기둥축력이 작고 적층고무면진장치의 직경이 평균 면압이 아닌 최소직경으로 결정되는 것 이 많을 경우 면진층의 강성이 커져서 면진건축물의 주기가 가정주기보다 짧아지는 경우가 있을 수 있다. 이 경우에는 상부구조의 구조설계(기둥 배치 등)을 재검토 할 필요성이 있다.

㉲ 각 적층고무 면진장치의 수평강성의 합계가 가정한 $\overline{k_f}$가 되도록 각 적층고무 면진장치를 설계한다.

② 댐퍼의 설계

㉮ 댐퍼의 종류를 결정한다.

㉯ 댐퍼의 항복변위 δ_y가 설계변위 δ_a에 비해 충분히 작은 것을 확인한다.

㉰ 각 댐퍼의 항복전단력의 합계가 가정한 $\overline{Q_y}$가 되도록 댐퍼의 수량을 결정한다.

㉱ 댐퍼는 면진층에 편심이 발생하지 않도록 면진층의 강심위치와 상부구

조의 중심위치가 일치하도록 배치한다. 또 비틀림 강성을 크게 하기 위하여 댐퍼는 가능한 한 면진층 평면의 외측에 배치하는 것이 좋다.

5 단계: 특성값의 확인

4 단계 에서 설계한 각각의 면진장치의 특성값를 이용하여 면진층의 특성값 k_f, Q_y를 구하여 단계 3에서 가정한 $\overline{k_f}$, $\overline{Q_y}$에 거의 일치하는지를 확인한다. 이들 값의 차이가 크고, 적절한 면진장치를 설계할 수 없는 경우에는 면진층의 특성값를 수정하여 재검토한다.

$$k_f = \sum k_h \quad (\text{t/cm})$$

$$Q_y = \sum f_{yd} \quad (\text{t})$$

k_f : 각 면진장치의 수평강성(t/cm)

f_{yd} : 각 댐퍼의 항복내력(t)

6 단계: 면진층의 예상응답 확인

3, 4, 5단계에 의해 설계된 면진장치에 대한 제작 및 시공오차를 고려한 최대응답변위 및 최대 전단력계수를 계산한다.

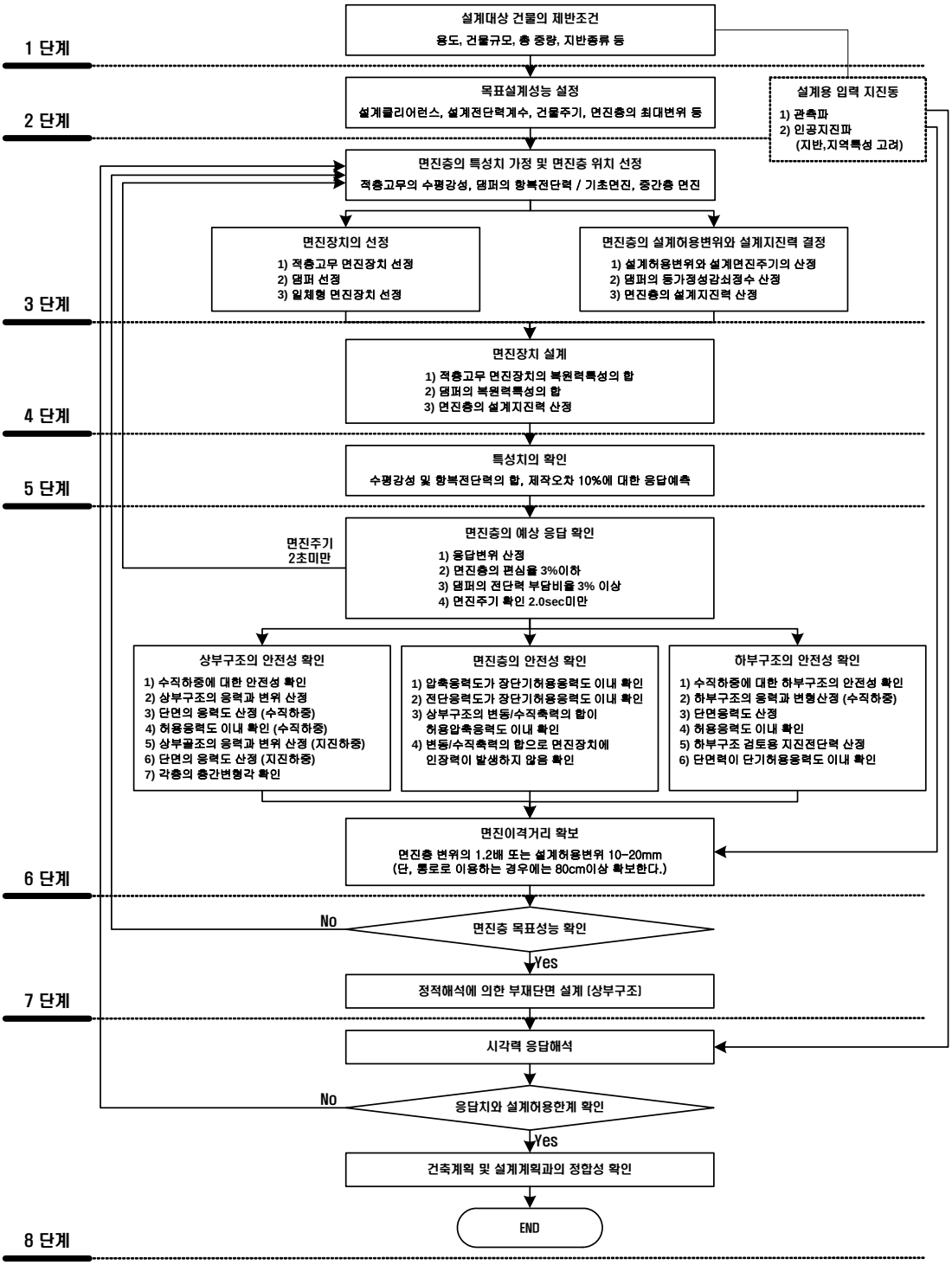
7 단계: 면진층의 목표성능 확인

예상응답 확인에서 면진층의 예상최대변위가 설계목표치의 최대변위를 상회하지 않는 것을 확인한다. 또 면진층의 예상 응답전단력계수가 설계목표치의 전단려계수를 상회하지 않는 것을 확인한다.

8 단계: 시간이력지진응답해석으로 안전성 확인

면진구조 건축물은 면진층에서 상부구조의 전중량을 지지하고 일반 건축물에서는 허용하지 않는 지진시에 변형을 허용하게 되므로 최종적으로 시간이력해석을 하여 안전성능과 여유도를 확인한다. 그러나 예비설계 단계에서는 포락해석법으로 지진응답을 예측하거나 면진층의 특성을 고려한 간략모델로 지진응답 성능을 검토하는 것도 하나의 방법이다.

◆ 설계순서 상세


1 단계
2 단계
3 단계
4 단계
5 단계
6 단계
7 단계
8 단계
설계대상 건물의 제반조건
용도, 건물규모, 총 중량, 지반종류 등
목표설계성능 설정
설계클리어런스, 설계전단력계수, 건물주기, 면진층의 최대변위 등
설계용 입력 지진동
1) 관측파
2) 인공지진파
(지반,지역특성 고려)
면진층의 특성치 가정 및 면진층 위치 선정
적층고무의 수평강성, 댐퍼의 항복전단력 / 기초면진, 중간층 면진
면진장치의 선정
1) 적층고무 면진장치 선정
2) 댐퍼 선정
3) 일체형 면진장치 선정
면진층의 설계허용변위와 설계지진력 결정
1) 설계허용변위와 설계면진주기의 산정
2) 댐퍼의 등가정성감쇠정수 산정
3) 면진층의 설계지진력 산정
면진장치 설계
1) 적층고무 면진장치의 복원력특성의 합
2) 댐퍼의 복원력특성의 합
3) 면진층의 설계지진력 산정
특성치의 확인
수평강성 및 항복전단력의 합, 제작오차 10%에 대한 응답예측
면진주기
2초미만
면진층의 예상 응답 확인
1) 응답변위 산정
2) 면진층의 편심을 3%이하
3) 댐퍼의 전단력 부담비율 3% 이상
4) 면진주기 확인 2.0sec미만
상부구조의 안전성 확인
1) 수직하중에 대한 안전성 확인
2) 상부구조의 응력과 변위 산정
3) 단면의 응력도 산정 (수직하중)
4) 허용응력도 이내 확인 (수직하중)
5) 상부골조의 응력과 변위 산정 (지진하중)
6) 단면의 응력도 산정 (지진하중)
7) 각층의 층간변형각 확인
면진층의 안전성 확인
1) 압축응력도가 장단기허용응력도 이내 확인
2) 전단응력도가 장단기허용응력도 이내 확인
3) 상부구조의 변동/수직축력의 합이
허용압축응력도 이내 확인
4) 변동/수직축력의 합으로 면진장치에
인장력이 발생하지 않음 확인
하부구조의 안전성 확인
1) 수직하중에 대한 하부구조의 안전성 확인
2) 하부구조의 응력과 변형산정 (수직하중)
3) 단면응력도 산정
4) 허용응력도 이내 확인
5) 하부구조 검토용 지진전단력 산정
6) 단면력이 단기허용응력도 이내 확인
면진이격거리 확보
면진층 변위의 1.2배 또는 설계허용변위 10~20mm
(단, 통로로 이용하는 경우에는 80cm이상 확보한다.)
No
면진층 목표성능 확인
Yes
정적해석에 의한 부재단면 설계 [상부구조]
시각력 응답해석
No
응답치와 설계허용한계 확인
Yes
건축계획 및 설계계획과의 정합성 확인
END

B. 복합면진장치 시공매뉴얼

1. 면진장치의 품질관리

1.1 관리조직의 구성

① 시공자는 면진건물의 착공과 동시에 설계 시 요구된 성능을 만족할 수 있도록 효율적인 시공관리 조직을 구성하여야 한다.

② 시공책임자는 면진건물의 설계 요구품질을 충분히 이해하고 시공 관리할 수 있는 기술자를 배치하여야 한다.

[해설]

① 면진시공 총괄책임자는 공사착수와 동시에 품질관리에 적합한 조직을 구성하며 공사감리자 및 구조설계자와 긴밀한 협조가 이루어질 수 있도록 하여야 한다.

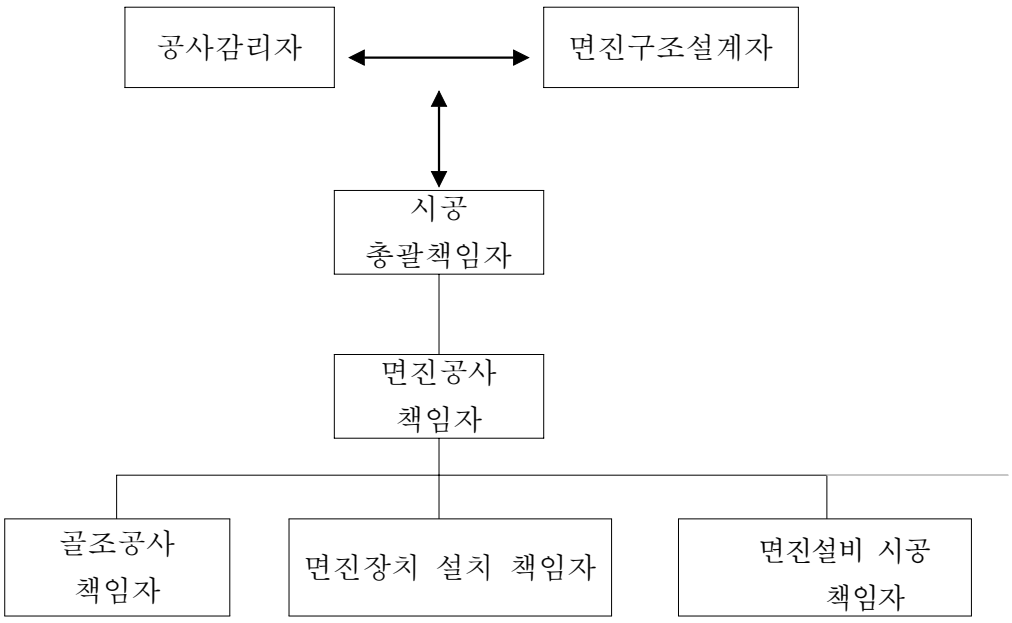


그림 1.1 면진시공 관리조직도

② 시공 총괄책임자는 면진공사 전반에 대한 시공경험이 있거나 지도를 받을 수 있는 기술자를 면진공사 책임자로 구성하고 그 하부에 면진장치 설치와 관련된 분야별 책임자를 배치하며 면진공사 책임자는 분야별 책임자간에 유기적인 협조가 이루어져 공사가 수행될 수 있도록 관리한다.

1.2 품질관리 착공회의 개최

① 시공자는 면진공사 착수 전 장치제작자, 감리자, 설계자 등 관련 기술자와 품질 확보를 위한 종합회의를 개최하여야 한다.

[해설]

① 시공자는 면진공사의 품질확보를 위하여 공사착수 전 관련 기술자들 간의 종합회의를 개최하여 각 분야별 시공을 위한 의견을 수렴하고 시공계획 수립 시 반영하여야 한다. 종합회의의 내용은 다음과 같다.

㉠ 설계자의 설계의도 파악과 설계상 문제점 사전파악
㉡ 설치될 장치의 성능과 규격 이해
㉢ 효율적 시공방법이나 일정계획 협의
㉣ 시공 시 유의점이나 문제점 사전 파악 등

1.3 품질관리계획의 수립

① 시공자는 면진건물의 설계요구 품질을 만족하기 위하여 공정별 검사, 승인, 확인시기 등의 관리계획을 수립하여야 한다.

[해설]

① 면진부재의 품질관리를 위해 검사, 승인, 확인 등의 절차계획을 수립하고 품질관리 항목에 따라 1.4절의 품질확보를 위한 관리서류와 2장의 제작관리 및 검사항목에 따라 품질관리 하여야 한다. 표준적인 품질관리 흐름은 그림 1.2와 같으며 면진부재의 품질관리 항목은 다음과 같다.

㉠ 면진부재의 종류, 치수, 개수, 배치

㉡ 면진부재의 성능품질(수평강성, 연직강성, 등가 감쇠정수, 마찰계수, 기타특성 등)

㉢ 면진층 관련부위 검사

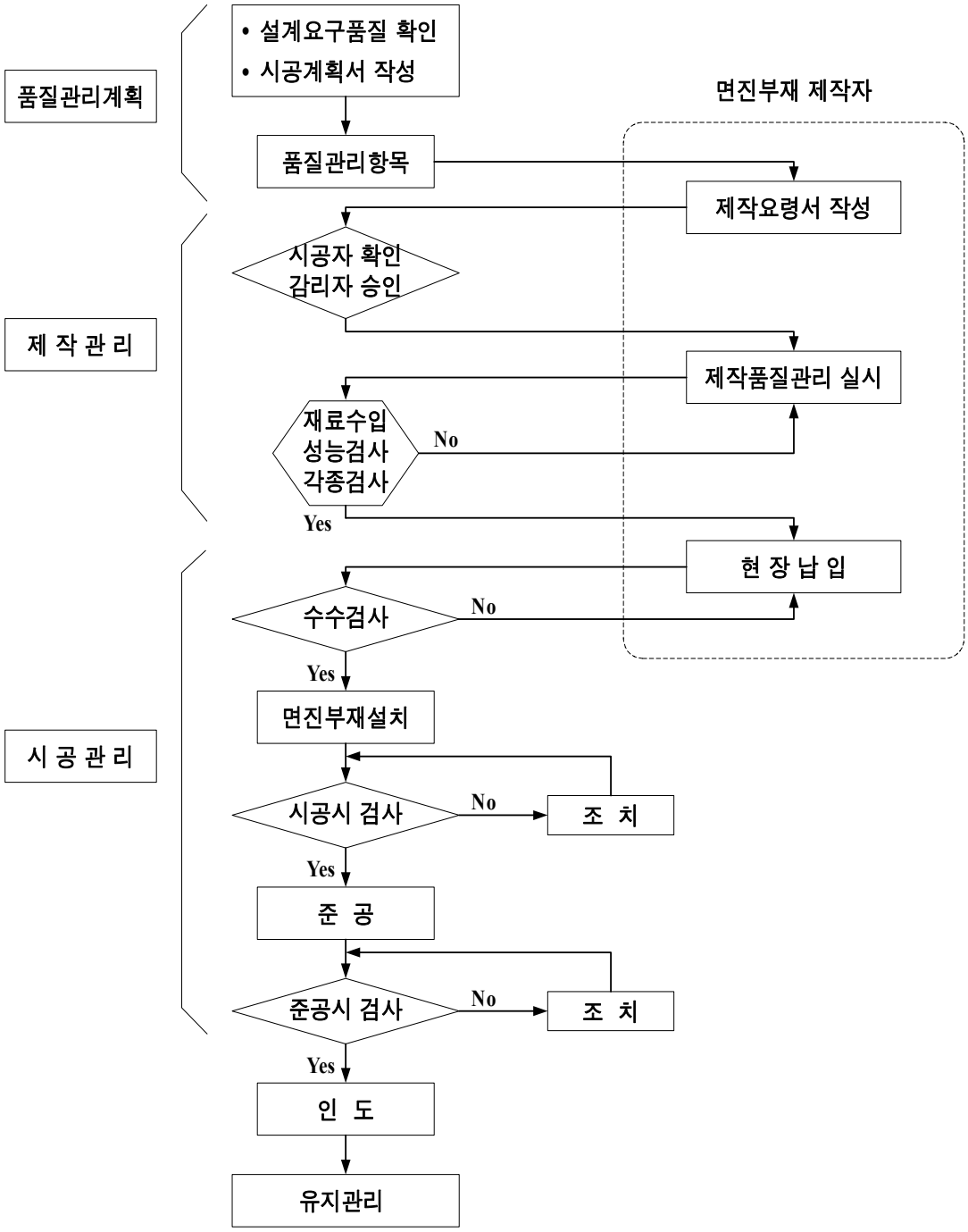


그림 1.2 면진시공의 품질관리도

1.4 품질관리를 위한 서류의 작성/승인

① 시공자와 장치 제작자, 감리자는 공사의 품질관리를 위하여 시공관리 서류를 작성하거나 확인, 승인하여야 한다.

［해설］

① 시공 시 품질관리를 위한 관련서류의 종류와 승인, 확인, 작성 등의 관리절차를 보면 표 1.1과 같다.

표 1.1 시공관리 서류일람

관리서류 명칭	공사감리자	시공자	제작자
㉠ 면진공사 시공계획서	승인	◎	-
㉡ 면진부재 설치요령서	승인	◎	-
㉢ 면진부재 제작·검사요령서 (부재마다 작성) ·면진장치 ·감쇠장치 ·베이스플레이트	승인	확인	◎
㉣ 면진부재 제작관리보고서 (부재마다 작성) ·면진장치 ·감쇠장치 ·베이스플레이트	승인	확인	◎
㉤ 면진부재 성능검사보고서 (부재마다 작성) ·면진장치 ·감쇠장치	승인	확인	◎
㉥ 설비배관이음 (부재마다 작성) ·주요치수 검사성적서 ·성능검사 성적서	승인	확인	◎
㉦ 면진시공 시 검사보고서	승인	◎	-
㉧ 면진준공 시 검사보고서	승인	◎	-

주) ◎는 성적서 작성, 자료제출 의무를 나타낸다.

② 면진공사 시공계획서에는 시공요령뿐만 아니라 각종 검사의 실시, 기록, 승인, 시공계획상의 유의점, 안전관리 등의 내용을 포함하며 설치요령서는 관련 생산업체의 시방기준을 적용하거나 현장에 맞게 수정하여 사용한다. 장치의 제작, 검사요령서, 제작관리보고서 등은 제작자에 의해 작성되며 성능검사 보고서도 설계 요구품질에 적합한지에 대한 검증을 제작자가 수행하여야 한다.

③ 시공 시 검사보고서나 준공 시 검사보고서는 시공 시 시공기준의 적합여부 확인 검사내용이나 준공 시 변형 및 상태 등을 검사한 보고서로 상세한 사항은 2장에 표기하였다.

④ 제작요령서에 포함될 일반적인 내용은 다음과 같다

㉠ 총　　칙 : 적용범위, 관련규격, 제작범위, 부재제작의 흐름 등

㉡ 회사개요 : 부재제작 장소, 회사개요

㉢ 재　　료 : 고무, 강판 등 사용재료와 그 규정

㉣ 제작방법 : 부재의 구조, 장치 제작공정, 주요 공정의 특기사항

㉤ 검　　사 : 검사항목, 검사방법, 검사빈도, 허용값(형상치수, 재료, 탄력정수(연직, 수평), 감쇠정수(이력곡선) 등)

㉥ 표　　시 : 제품으로의 표시내용

㉦ 출　　하 : 물건의 상태

㉧ 제출서류 : 발주자에게 제출하는 서류

㉨ 제작도면 : 제작용 도면

2 면진장치의 제작관리 및 검사

2.1 제작관리

① 시공자는 면진장치의 제작을 발주할 때「설계도서」나 「특기시방서」에 규정된 적합한 품질이 확보되도록 제작자와 충분한 협의를 갖고 제작관리를 실시한다.

〔해설〕

① 면진장치의 제작공정에서 시공자가 실시하는 품질관리는「면진장치 제작자에 의한 자체확인 관리」와 「시공자 입회검사에 의한 관리」두 종류가 있으며 면진장치의 성능, 구조, 치수, 품질 등이 적정한가를 확인한다. 각각의 검사항목에 대해 서류(검사보고서)확인이나 입회검사에 근거하여 품질관리를 실시한다.

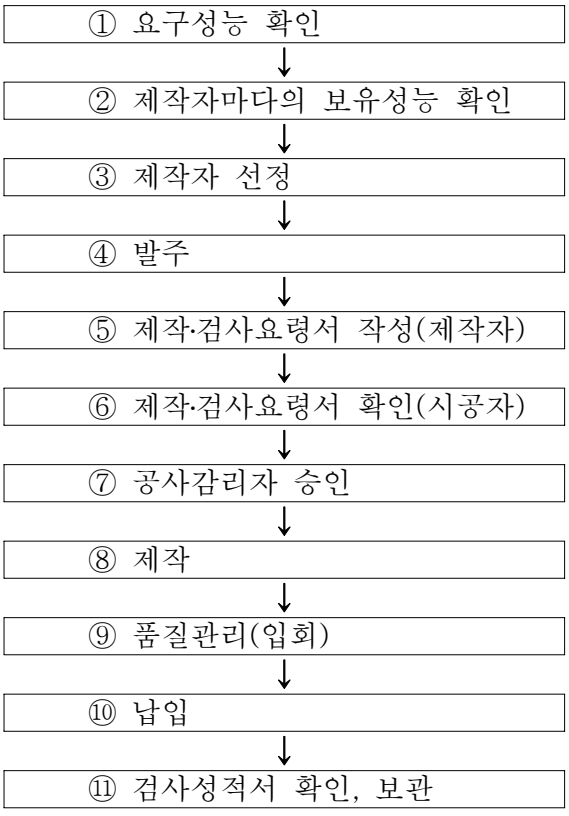


그림 2.1 면진장치의 제작관리 흐름도

2.2 검사

① 공장검사에는 제작자에 의한 자체검사와 시공자에 의한 입회검사가 있다

② 설계도서 또는 감리자의 승인을 받아 규정된 것에 적합한 면진장치의 현장 반입을 확인하기 위하여 현장반입 시 면진장치의 검사를 하여야 한다.

표 2.1 적층고무 면진장치의 품질검사

구분	검사항목		검사빈도	판정기준	처치	검사방법	
						제작자	시공자
재료검사	고무재료의 물성검사	경도	1물건에 1회 이상	사양과 차이가 없음	재료의 재제작	자체	서류
		인장응력					
		인장강도					
		신장					
	사용강재의 밀시트		전수	사양과 차이가 없음	"	서류	서류
외관검사	완성품의 외관검사		전수	유해한 흠이나 변형, 도장, 도금의 들뜸, 박리, 고무와 철판간 접합부 결함	보수	자체	입회
치수검사	제품높이		전수	설계값 ±1.5%나 ±16㎜ 전제품 평균값과의 차 ±16㎜	보수 또는 재제작	자체	입회
	고무부 외경			설계값 ±0.5%나 ±14㎜			
	플랜지 기울기			플랜지외경의 0.5%나 3㎜이내			
	플랜지 길이			설계값 ±3㎜			
	플랜지 어긋남			5㎜이내			
	플랜지 볼트구멍 피치			설계값 ±1.2㎜			
방청	도장 막두께 검사		동일제품 중 50%이상	사양과 차이가 없다	보수	자체	입회
성능검사	연직 재하시험	연직강성	전수	설계값±20%	재제작	자체	입회
	수평 재하시험	수평강성	전수	설계값±20%	재제작	자체	입회
		등가 감쇠정수	전수	설계값±20%			

(주) 성능검사에서 설계값의 편차 20%는 최대값을 나타내며, 특기시방서에 따르든지 또는 공사감리자와 협의한 다음 적절한 값을 설정한다.

［해설］

① 면진장치 제작 후 제작자는 공장에서 면진장치의 재료, 외관, 치수, 방청, 성능검사 등을 시행하여야 하며 시공자는 임의 추출에 의해 입회검사를 실시한다.

㉠ 적층고무 면진장치의 품질검사 항목과 판정기준 및 검사방법은 표 2.1과 같으며 치수검사 방법은 표 2.2과 같다.

㉡ 또한 시공자는 베이스플레이트가 설계도서 또는 공사감리자의 승인을 받아 규정된 것에 적합한 품질임을 제작공장에서 확인한다.

㉢ 특히 시공성 증진을 위해 설치하는 플레이트 중앙부 구멍이나 여러 개의 공기구멍 등이 설치되었는지를 확인하여야 하며 도면에 미 표기되어 있는 경우는 설계자와 협의하여 설치하도록 한다.

ⓐ 콘크리트 충전구멍

베이스플레이트 하부에 콘크리트를 충전할 경우 중앙부에 콘크리트 타설용 구멍이 필요하다. 구멍의 크기는 구조적으로 지장이 없는 범위에서 ϕ150~200 정도로 한다.

ⓑ 공기빠짐 구멍

베이스플레이트 하부에 콘크리트를 타설할 때 중앙부보다 외측을 향해 공기를 압출하도록 타설하는데 도중에 공기가 빠지지 않고 모이는 현상이 자주 발생하기 때문에 공기빠짐용 구멍(ϕ30)을 여러 개 설치할 필요가 있다.

표 2.2 베이스플레이트의 품질검사

검사부위	검사항목	검사 방법	빈도	판정기준	판정기준을 벗어난 경우의 조치
재료	강재의 밀시트	조합	전수	사양과 차이가 없을 것	제품교체
머리부착 스터드볼트	용접부의 외관	육안	전수	형상에 이상이 없을 것	제품교체
	용접부의 강도	휨시험	임의 추출	소정의 강도가 있을 것	제품교체
베이스 플레이트	볼트구멍의 위치, 지름	계측	전수	시공할 수 있음을 조사	제품교체
	플레이트면의 휨	계측	전수	휨차 1/500이하 또는 3㎜이내	교정
	국부적 변형, 타격상처	육안	전수	설치에 지장이 없을 것	교정 또는 제품교체
	도장상태	육안	전수	들뜸, 박리가 없을 것	보수

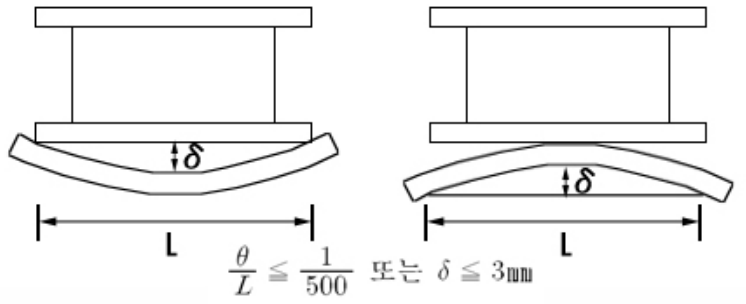


그림 2.2 베이스플레이트의 휨 검사

② 면진장치의 현장반입 시, 각종 성능 및 치수 등에 대해서는 제작 시 확인 검사한 사항으로 현장에서는 제품 확인과 운반시의 손상을 검사한다. 운반시의 손상검사는 임의 추출검사를 수행하며 설치 시 전수검사를 시행한다.

표 2.3 적층고무 면진장치의 현장검사

검사대상	검사항목	검사방법	판정기준	조치
적층 고무부	가로흠·세로흠	노기스계측용 주걱	피복고무두께 미만	접착제로 보수
			피복고무두께 이상	제품을 교체
	코너부 결손	육안, 촉진	강판에 도달하지 않는다	접착제로 보수
			강판에 도달하였다	공장에서 가류접착
	코너부 균열	육안, 촉진	균열이 발생하고 있다	접착제로 보수
	강판에 변형이 발생하고 있다고 생각되는 변형	육안	변형이 발생하고 있다	제품을 교체
플랜지부	플랜지플레이트의 국부적 변형, 흠	육안, 촉진, 계측	설치에 지장을 일으킬 때	보수·재가공 또는 제품교체
	제작자명, 부재종류, 제조번호 등	조합	제품검사표, 성능검사표 등과 조합한다	공장확인, 필요한 제품요청
양생	양생상태	육안	적층고무 부분에 피복재에 박리, 젖힘 등이 없는지	고무표면을 확인, 재제작
도장	흠, 박리, 오염	육안	흠, 박리, 오염의 발생	보수

3 시공

3.1 면진장치의 보관

① 시공자는 시공 또는 보관 중 충격, 열 및 화학물질에 의해 성능이 저하하는 일이 없이 충분히 안전하도록 관리하여야 한다.

［해설］

① 시공 중 충격에 의한 손상이나 열과 화학물질 등에 노출되어 손상되는 일이 없도록 관리하여야 하며 가능한 한 면진장치는 시공직전에 현장 반입되어 현장보관 기간이 짧도록 하여야 한다.

현장보관 시는 유해물질이 인접되지 않도록 하며 충격이나 물과 직사광선 등에 노출되지 않고 지면에 직접 닿지 않도록 하며 가능한 한 포장상태로 보관토록 한다.

3.2 면진층의 시공 흐름

① 시공자는 시공계획서에 기재된 시공순서에 따라 면진장치 및 관련 부위를 시공하며 시공 공정이 지연되는 일이 없도록 순서에 따라 사전 준비하여야 한다.

［해설］

① 면진층은 일반적으로 지하층이나 기초 상부 등에 시공하게 되어 구조체 공사의 초기에 실시하게 된다. 면진층의 시공은 특수한 시공이므로 시공 공정에 따라 사전에 면밀히 검토하여 가설재, 크레인, 자재의 수급, 일시, 검수, 보관 장소, 인력의 확보 등 원활한 시공이 이루어질 수 있도록 사전 준비작업을 철저히 하여야 한다.

일반적인 면진건물의 시공 순서는 다음과 같다.

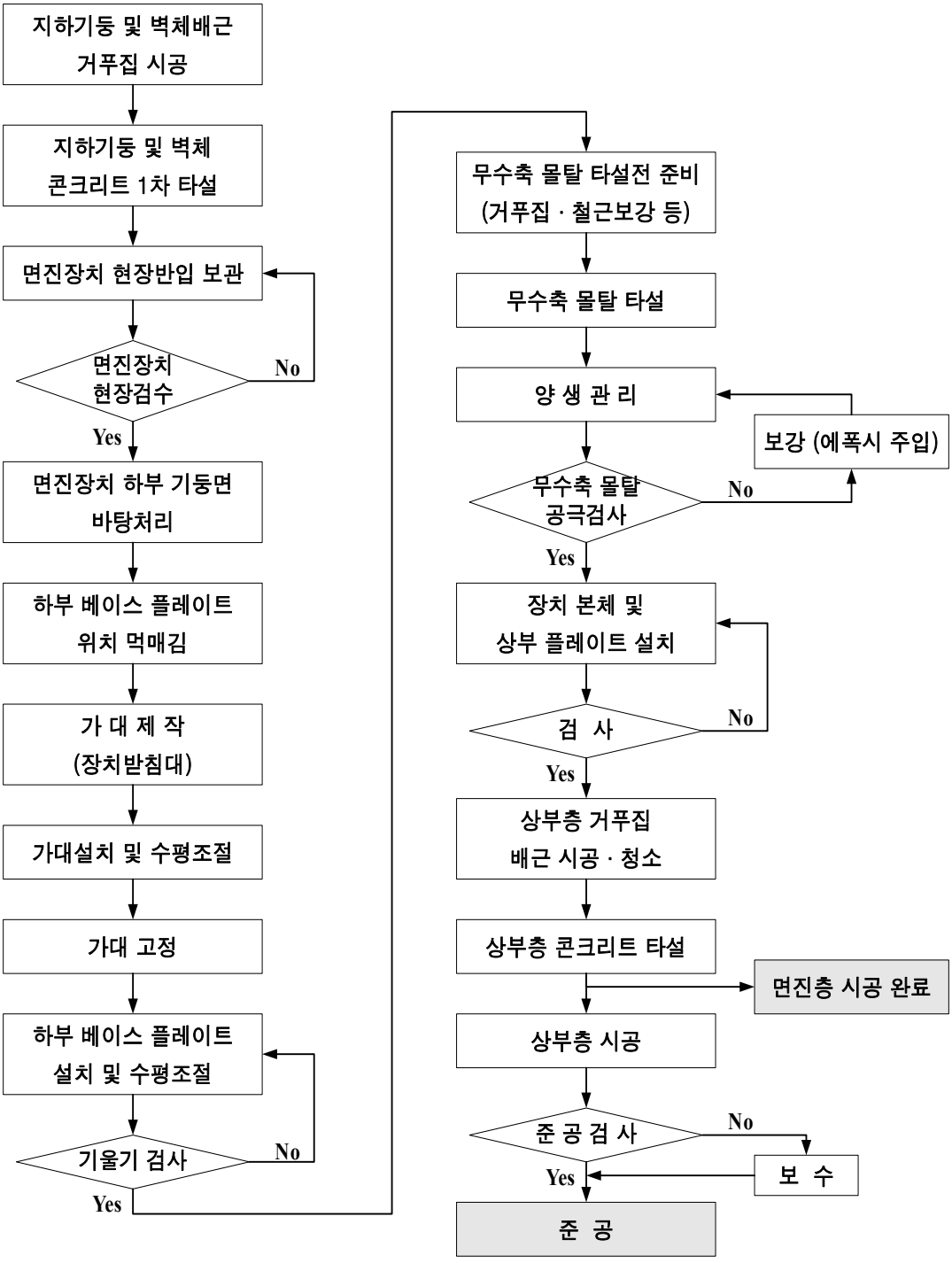


그림 3.1 면진건물의 시공순서

3.3 시공허용 오차

① 시공자는 면진층 공사 시 시공품질 확보를 위해 시공정밀도 관리기준에 따라 시공·관리하여야 한다.

〔해설〕

① 일반적으로 사용되는 면진장치의 시공정밀도 관리기준은 표 3.1과 같으며 도면과 시방서에 별도 표기되어 있는 경우에는 그에 따른다.

표 3.1 복합면진장치 시공관리기준

관리항목	관리상세	관리값	검사확인 내용	
			검사개소	검사방법
본체, 미끄럼 판, 플레이트 설치	수평정밀도	기울기 1/500	직교 2방향	수평기 측정
	위치정밀도	X, Y, Z ±5㎜	중심부 1곳	규준대 측정
양생·관리	기계적 손상 등을 막기 위해 미끄럼 판, 고무부를 보호한다. 주위에 가연물을 놓지 않도록 한다.			

㉠ 기둥 또는 기초타설 후, 중심의 수평 밀림정도 : |HPT|≤ 50㎜의 경우

㉡ 기둥 또는 기초타설 후, 중심의 수평 밀림정도 : 50㎜ ≤ |HPT|≤ 100㎜ 경우

<설치 후 장치 위치>		<시공관리목표>
·수평 밀림	H_{CT} ·····	설계중심 방향으로 50㎜ 이동
·연직레벨	V_{CT} ·····	설계레벨에 대하여 ±0㎝ 이내
·장치 상면 경사각	Θ_{CT1} ·····	1/500(rad) 이하
·상부 미끄럼판의 상면 경사각	Θ_{CT2} ·····	1/500(rad) 이하

주) · 100㎜ 이상의 기둥 중심부에서의 수평 밀림은 원칙적으로 허용하지 않는다.

· 기둥 중심부의 수평밀림이 불가피하다고 예상되는 경우 기둥의 직경을 크게 시공하는 등 초기에 대책을 검토하도록 한다.

3.4 면진층의 시공

① 면진층은 면진장치가 설치되는 층으로 소요 정밀도와 품질을 확보할 수 있도록 각 공정의 시공방법과 유의점 등을 사전에 검토하여 시공하여야 한다.

② 면진층의 시공은 3가지 공정으로 구분된다.

㉠ 면진장치 하부시공

㉡ 면진장치 시공

㉢ 면진장치 상부시공

［해설］

② ㉠ 면진장치 하부시공은 하부층 구조부재 즉 기둥이나 벽체 또는 기초의 시공으로 시공 전 다음과 같은 유의점을 검토하여 시공하여야 한다.

ⓐ 시공높이

면진장치 하부까지의 높이를 정확히 계산하여 콘크리트 타설 높이를 결정한다. 타설 높이는 면진층 하부의 무수축몰탈 타설 높이 전까지로 한다.

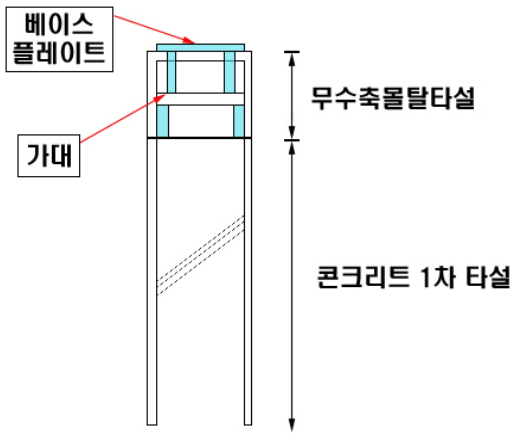


그림 3.2 면진장치 하부 콘크리트 타설 높이

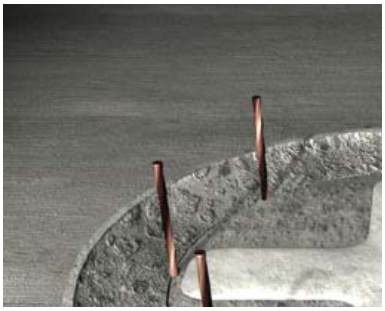
ⓑ 철근의 배근

㉮ 하부기둥의 철근은 면진장치 연결 플레이트 하부까지의 높이에서 피복 높이를 제외한 높이로 한다.

㉯ 하부기둥 철근의 최 상단 단부의 형태는 일반적으로 표준갈고리 형태로 배근되며, 수평하중에 대한 저항력이 적은 슬라이딩계 면진장치

는 모멘트에 대한 저항이 필요치 않은 경우 갈고리가 없는 형태의 배근을 사용한다.

㉰ 면진장치 연결 플레이트의 설치를 위한 가대설치 시 철근의 간섭으로 인해 가대설치가 불가능할 경우 철근배근의 변경은 설계자 및 감리자와 협의하여 개선방법을 강구하여야 한다.



(a) 수직배근(전단력이 적은 경우)



(b) 표준갈고리 배근(전단력이 큰 경우)

그림 3.3 면진장치 하부기둥의 수직철근 단부 처리

㉡ 면진장치의 시공은 베이스 플레이트의 설치, 면진장치 본체의 설치, 상부 플레이트의 설치 공정으로 구성된다.

ⓐ 베이스 플레이트의 설치

베이스 플레이트는 면진장치 하부에 설치되어 면진장치와 하부 구조체를 연결하는 부재로 면진장치의 설치위치와 수평도를 결정하게 된다. 베이스 플레이트가 정확히 설치되면 상부 면진장치의 설치는 크게 어려움이 없다.

㉮ 무수축몰탈 타설부위 바탕면 처리

1차 콘크리트 타설 부위와 신규 무수축몰탈 타설 부위의 부착력 증가를 위해 바탕면의 유해한 시멘트페이스트나 이물질을 제거하고 조면처리 한다.

㉯ 가대의 제작 및 설치

베이스 플레이트의 고정과 수평조절을 목적으로 앵글에 의한 가대를 제작, 설치한다. 가대는 베이스 플레이트가 상부에 적절히 설치될 수 있도록 치수를 확인하여 제작하여야 한다. 제작 후 위치 시공정밀도

기준에 따라 예정된 위치에 설치 후 1차적으로 가대의 수평조절볼트로 수평조절하여 향후 베이스 플레이트의 수평 조절량이 적도록 한다. 수평조절 후 움직임이 발생되지 않도록 구조체에 고정한다.

㉰ 베이스 플레이트의 설치

가대 위에 베이스 플레이트를 설치하며 설치 시 자체 수평조절볼트를 이용하여 설계도나 시방서에 명기된 허용치 이내의 기울기가 되도록 한다. 일반적인 기울기 허용치는 1/500로, 면진장치의 제작 상 오차가 없다면 베이스 플레이트의 기울기가 곧 면진장치 전체의 기울기와 동일하므로 면진장치의 시공품질에 영향을 주는 기본이 된다. 설치 후 가대에 움직임이 없도록 고정한다.

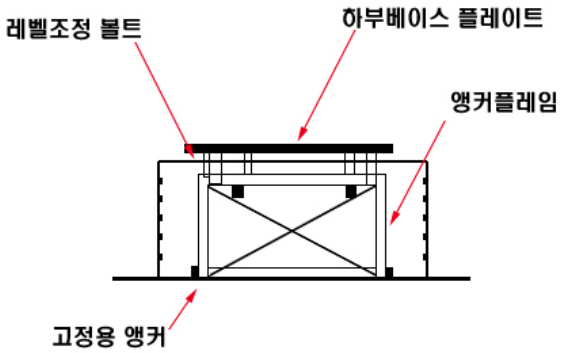


그림 3.4 베이스 플레이트의 설치

㉱ 철근보강 및 거푸집 시공

가대 및 베이스 플레이트 설치 시 손상된 철근이나 추가 보강하여야 할 철근을 배근하고 특히 띠철근은 기둥 주 철근 직경의 8배 이하로 배근하거나 15cm 이하의 간격으로 보강한다.

㉲ 베이스 플레이트 무수축몰탈 타설

베이스 플레이트 하부 몰탈 충진 시는 베이스 플레이트에 공극이 발생되지 않도록 하여야 한다. 베이스 플레이트 하면은 콘크리트 면에 묻힌 상태로 하고, 장래의 면진장치 교체 시 면진장치의 출입이 자유롭도록 베이스 플레이트 면을 콘크리트 면보다 10㎜정도 위로 하는 것이 바람직하다. 또한 베이스 플레이트 자중에 의한 변형이 발생하

지 않도록 한다.

무수축몰탈의 타설은 공극발생을 최소화할 수 있도록 측면에서 타설하여 공기의 갇힘현상이 발생되지 않도록 하며 거푸집을 밀실하게 설치하여 페이스트의 누설이 없도록 하여야 한다. 필요시는 완전 밀폐된 플라스틱 거푸집을 사용하는 방법도 있다. 타설 깊이가 300mm를 초과하는 경우는 무수축몰탈 생산회사의 기술자문을 받아 유해한 공극이 발생되지 않는 시공방안을 강구하여야 하며 강도는 본 구조체의 강도 이상의 값을 사용하여야 한다.

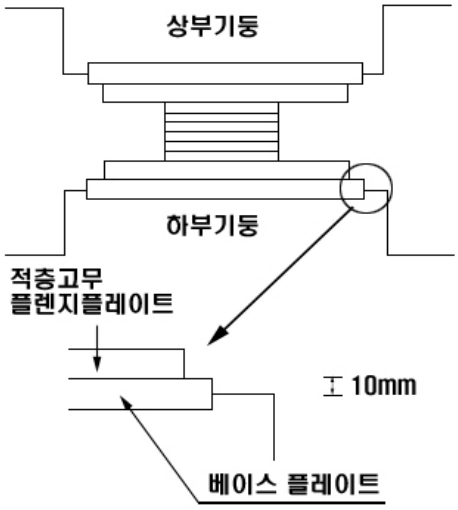


그림 3.5 베이스플레이트의 마무리

ⓑ 면진장치의 시공

면진장치는 베이스 플레이트와 볼트로 체결하여 설치한다.

㉮ 복합면진장치의 시공

베이스 플레이트 위 본체 설치		본체 위 상부 플레이트 설치
베이스 플레이트의 앵커볼트 삽입너트에 앵커볼트를 체결하여 하부플레이트와 본체 연결	⇨	상부 플레이트의 앵커볼트 삽입너트에 앵커볼트를 체결하여 상부 플레이트와 본체 연결



그림 3.6 상부 앵커 플레이트 거치



그림 3.7 상부 앵커볼트 채결상태

ⓒ 상부 플레이트 시공

이 부분은 면진장치와 연결되는 상부 구조체에 대한 시공으로 면진장치와 연결되는 기둥 부위는 하부 기둥과 동일하게 보강되어야 한다. 또한 상부 구조체와 연결된 벽체 등은 하부 구조체와 완전히 이격되어 수직하중이나 지진에 의한 수평변형 시 하부 구조체와 접촉되지 않도록 시공되어야 한다. 수직이나 수평 이격거리는 설계도에 표기되어 있다.



(a) 계단실 벽체 시공



(b) 계단 거푸집 시공

그림 3.8 계단실 벽체 및 계단 거푸집시공(약 100mm 이격)

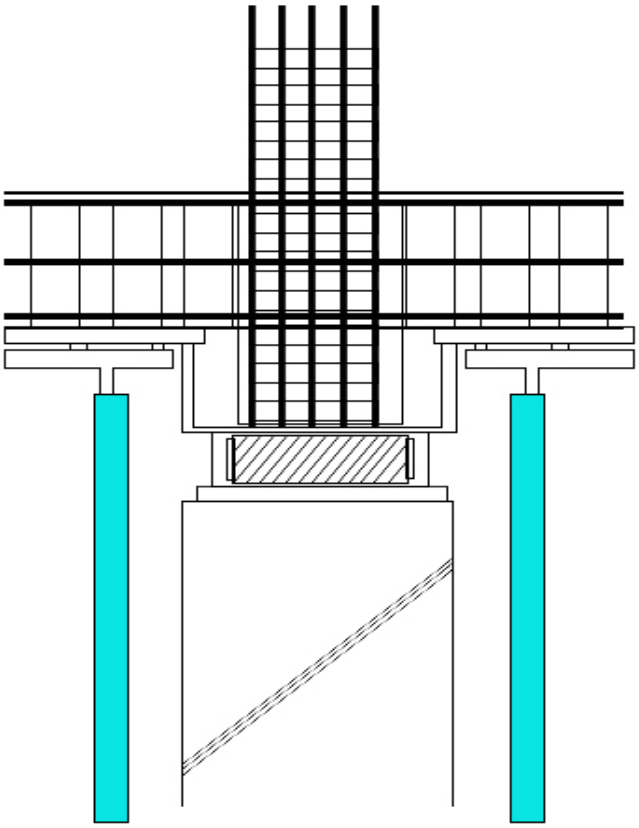


그림 3.9 면진장치 상부 배근 및 거푸집 시공

콘크리트 타설 전 면진장치 상부 플레이트 부위는 이물질이 없도록 청소하여야 하며 면진장치 주위는 타설 시 표면에 상처나 이물질이 유입되지 않도록 합판 등으로 보호해야 한다. 타설 시 충격으로 면진장치의 위치, 레벨, 수평이 흐트러지지 않도록 하여야 하며 시공 후 확인한다.

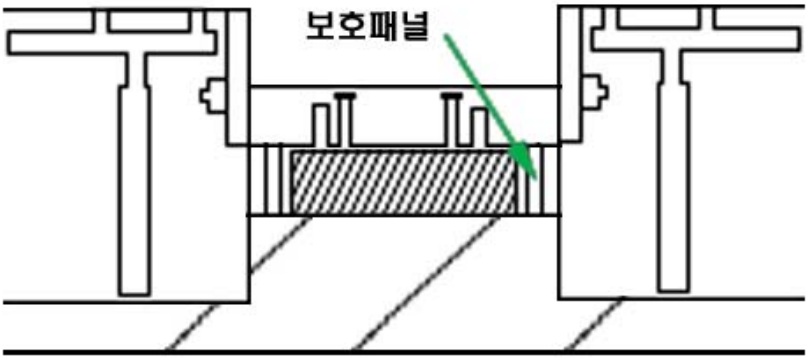


그림 3.10 면진장치 측면의 보호재 설치

3.5 면진층 상부의 시공

① 면진층 상부의 시공은 일반 건물의 시공과 동일하나 시공도중 면진층이 손상되는 일이 없도록 관리한다.

［해설］

① 면진층 상부의 시공이 면진층에 영향을 줄만한 요소는 거의 없으나 시공시 과도한 진동이나 작업자의 부주의로 면진장치가 손상되지 않도록 관리하여야 한다. 또한 시공도중 우수 등 자연환경에 노출되거나 손상되지 않도록 보호, 관리하여야 한다.

3.6 설비배관의 시공

① 시공자는 시공계획서에 기재된 시공순서에 따라 설비배관 이음 및 관련된 부위를 시공한다.

［해설］

① 설비배관 이음 시공 시는 설계 시 고려된 성능을 발휘할 수 있도록 가동범위를 확보한 다음 면진층 상부와 하부에 배관을 고정지지재로 각각 고정한 다음 소정의 배관이음을 적절한 방법으로 접합한다. 배관의 시공 및 이음방법 등은 배관 제조회사에서 제시하는 시방과 설계자의 요구에 따른다. 설비배관 시공 시 다음과 같은 사항을 고려하여 안전하게 설치하여야 한다.

ⓐ 설비배관과 인접 부위와의 간격과 설계 최대 변위량과의 관계

ⓑ 설비배관 장치의 최대 변위량, 변위방향, 회전성능 등 그 기능

ⓒ 지진 시 발생될 수 있는 배관의 손상발생 가능성에 대한 대처

지진 시 면진이음이 다른 배관이나 설비기기 또는 구조물에 접촉되지 않도록 설계 가동 량에 맞추어 충분한 작동 공간을 확보한다. 또한 면진이음 설치 후 작동 공간 내에는 장해가 되는 물건이 놓여지지 않도록 주의한다. 아래 그림은 면진이음의 변형에 따른 작동 범위를 나타낸 것이다.

ⓐ A = 설계가동량 + 플랜지 외경 × 0.5 + 100

ⓑ B = 유연부(flexible)길이 + 엘보길이

ⓒ C = 설계가동량

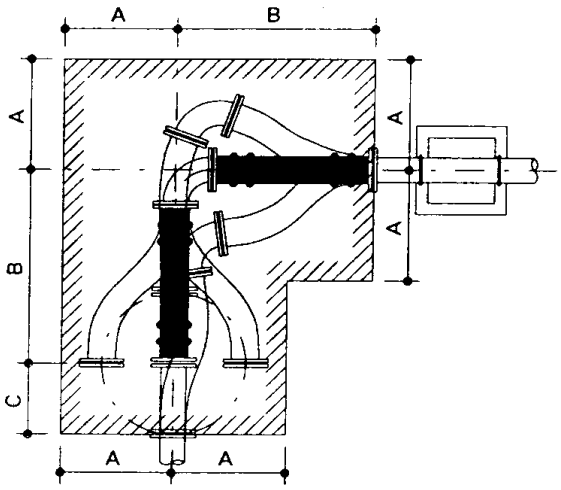


그림 3.11 작동 공간

면진이음의 변위흡수 기능을 최대한 끄집어내기 위해서는 면진층 하부나 면진층 상부의 배관고정 지지부가 충분한 강도를 확보하도록 해야 한다. 고정지지가 불완전하다면 상대변위에 의한 변위흡수가 일어나지 않고 충분한 면진효과를 발휘할 수 없기 때문에 아래 항목에 주의하여 시공한다.

ⓐ 배관의 지지는 충분한 보강을 고려하여 면진층 하부와 상부에 설치한 고정 가대에 U볼트 2개소이상으로 하고 확실히 고정한다.

ⓑ 고정 가대는 면진층 하부와 상부 모두 면진이음에 가깝게 설치한다.

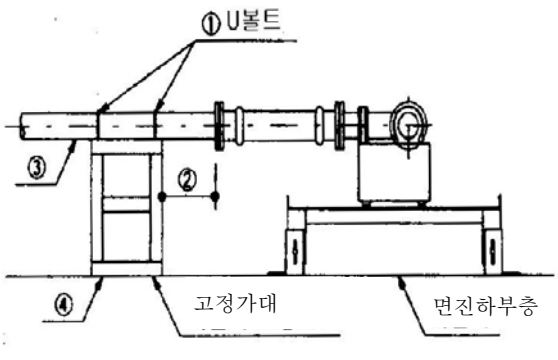


그림 3.12 면진상부층 고정

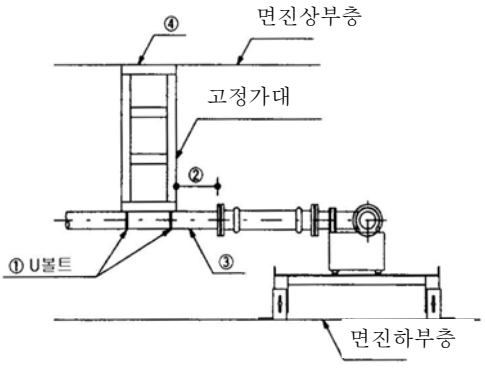


그림 3.13 면진하부층 고정

3.7 안전관리

① 시공자는 면진장치의 설치, 면진층 및 관련부위의 시공 시 안전작업에 노력하고, 산업안전보건법 등의 관련 법규를 준수해야 한다.

［해설］

① ㉠ 공통

ⓐ 신규 인력의 안전교육을 실시한다.

ⓑ 본 건물은 면진구조로 시공 중에라도 수평변위를 일으킬 가능성이 있음을 주지시킨다.

ⓒ 면진공사 책임자를 선임하고 작업을 직접 지휘토록 한다.

ⓓ 면진부재의 보관, 양생에 주의한다.

㉡ 작업개시 전

ⓐ 당일 작업예정, 역할분담, 작업에 따른 안전주의사항, 그 밖의 지시사항을 작업자 전원에게 주지시킨다.

ⓑ 사용기기, 공구 등은 취급책임자가 매일 점검하고 불량품은 제거하며 점검결과를 관리책임자에게 보고한다.

ⓒ 강풍, 폭우 등의 악 천우로 인해 작업에 위험이 예상되는 경우는 작업을 중지한다.

㉢ 작업 중

ⓐ 안전통로를 확보하여 작업한다.

ⓑ 면진장치의 양중구획에는 관계자 이외의 출입금지 조치를 취하고 양중 면진장치 아래 및 중장비의 가동반경 내에는 들어가지 않도록 한다.

ⓒ 면진장치의 설치는 상하작업이므로 안전작업을 위해 작업원의 적정한 배치가 필요하다.

ⓓ 차량의 반출·입시는 유도를 확실히 하고 제 3자에게 피해가 가지 않도록 노력한다.

㉣ 작업종료 시

ⓐ 사용한 자료, 자재를 정리한다.

ⓑ 작업장소의 정리·정돈·청소를 실시한다.

3.8 시공 시 검사

① 시공자는 면진장치의 설치공사 시 면진기능을 손상시키지 않도록 시공·관리하고 시공 시 검사를 실시한다.

② 시공자는 면진층 공사 시 면진기능을 손상시키는 일이 없도록 시공·관리하고 검사한다.

［해설］

① 면진장치의 설치정밀도와 검사

㉠ 적층고무의 수평강성은 연직강성에 비해 1/2,000～1/3,000로 상당히 유연하다. 이 때문에 적층고무의 기울기는 면진건물의 성능에 큰 영향을 주게 된다. 위치정밀도에 대해서는 RC조인 경우 어느 정도 문제가 되지 않지만 철골조(S조, SR조)인 경우는 위치정밀도가 나쁘면 적층고무에 뒤틀림이나 변형이 발생하고 면진건물의 성능에 영향을 미친다.

㉡ 미끄럼계 면진장치는 상당히 작은 수평력으로 가동(滑動)하기 때문에 설치 시 약간의 기울기도 작동의 장해가 되어 면진건물의 성능에 영향을 미친다. RC조인 경우 수평정밀도가 큰 문제가 되는 경우는 적지만 기울기의 정밀도 관리는 세심한 주의를 기울여야만 한다.

㉢ 시공정밀도 기준은 3.3에 표기하였다.

② 면진층 검사

㉠ 클리어런스(clearance)

클리어런스는 요구되는 최소값을 반드시 지킬 필요가 있다. 준공 시 검사에서 클리어런스가 확보되지 않은 경우는 일부 철거 등 상황이 나빠지는 경우가 있으므로 철저한 시공관리와 검사가 필요하다.

㉡ 보호

적층고무는 불이나 타격에 의해 피복고무가 손상을 입는 경우가 있으므로 시공기간 중에는 지시한 보호조치가 이루어지고 있는지 확인할 필요가 있고, 구체공사의 종료 후라도 배관공사 등으로 면진부재를 손상시킬 우려가 있기 때문에 보호재의 철거시기에 주의하도록 한다.

4. 준공 시 검사

① 시공자는 면진장치 및 관련 부위의 시공이 적절히 실시되고 면진건물로서의 기능을 다하고 있는지를 확인하기 위해 면진건물의 준공 시 검사를 실시하고 그 기록을 적절히 보관·관리해야 한다. 또한 불량한 곳을 발견하면 공사감리자와 협의한 다음 적절한 조치를 취해야 한다.

［해설］

① ㉠ 검사방법

면진장치 및 면진건물의 준공 시 검사는 설계자가 제시한 구체적인 관리 값이나 본 매뉴얼의 2.2의 검사 및 3.3의 시공오차를 참조한다. 준공 시 검사항목, 방법, 관리 값 및 조치 등의 일례를 보면 표 4.1과 같다.

㉡ 검사결과 제출 및 보관

면진건물은 완성 후 정기적인 점검·유지관리가 필요하며 준공 시 검사기록은 이후 면진건물의 유지관리를 위한 초기값이 되기 때문에 상당히 중요하다. 시공자는 검사기록을 스스로 보관함과 동시에 건물 소유자, 공사감리자에게 제출토록 한다.

표 4.1 준공 시 검사항목 및 조치

위치		검사항목		관리값	개선조치	검사개소	검사방법
면진장치	적층고무·미끄러짐면진장치	피복고무외관	변색	변색 없음	조사한 다음 대처	면진층 전수	육안
			상처	피복고무 범위	관리값이내 : 보수 관리값이상 : 조사		육안, 계측
		강재	발청	들뜸녹·붉은녹 없음	도장 수복		육안
			설치부	볼트·너트의 마킹실수 없음	다시 조임, 재마킹		육안
		적층고무변위	연직변위	이상한 변위 없음①	조사한 다음 대처		계측
			수평변위	이상한 변위 없음②	조사한 다음 대처		계측
		미끄럼판	오염/이물부착	오염·이물부착 없음	철거		육안
			부식	직경 10㎜이내	조사한 다음 대처		육안
			상처	깊이 0.5㎜이내	조사한 다음 대처		육안
면진층건물외주부	건물	주변환경	클리어런스	규정간격 확보 공작물의 유무	정비·제거	외주 면진층	계측③
			건물위치	마킹 있음 이상한 변위 없음	마킹없음 : 재설치 이상한 변위조사	네모서리 및 중앙	확인④
	설비배관, 배선	주변상황	가연물	가연물 없음	정비·철거	면진층 전수	육안
			배수상황	양호	조사한 다음 대처		육안
설비배관/배선 가요부⑤	설비배관	가요이음부	설치상황 액누수 등	이상 없음	조사한 다음 대처	면진층 전수	육안
			상처·균열	상청·균열 없음	조사한 다음 대처		육안
			추가공사	면진기능상 지장 없음	조사한 다음 대처		
	전기배선	변위흡수부	여장(余長)	충분한 여장	조사한 다음 대처	면진층 전수	육안
			추가공사	면진기능상 지장 없음	조사한 다음 대처		
별도저장 시험체⑥		초기값	확인	기록 존재	조사한 다음 대처	시험체 전수	육안
		위치, 개수	확인	설치위치와 개수	조사한 다음 대처		육안

주) 육안검사로 기록을 남길 경우 사진촬영을 원칙으로 한다.

① 연직변위는 설계자가 지시한 관리값 이내로 한다.

② 수평변위는 설계자가 지시한 관리값 이내로 하고 또 건물전체에서 동일방향으로의 잔류변위가 없어야 한다.

③ 건물외주의 장해유무, 건물과 면진층 외벽(모서리부 4개소 이상), 주요위치의 클리어런스를 계측하고 계측위치를 표시해 둔다.

④ 정기, 임시점검용으로 건물 네모서리와 중앙부 1개소 총 5개소에 추를 설치하고 원점을 표시해둔다.

⑤ 설비기술자가 문제가 없음을 사전에 확인하는 것을 전제로 한다.

⑥ 별도저장 시험체의 취급은「설계도서」또는「특기시방서」에 따른다.

C. 복합면진장치 품질관리매뉴얼

1. 적용 범위

본 품질관리 매뉴얼은 복합면진장치에 대하여 적용한다.

2. 복합면진장치

2.1 사용 재료

(1) 고무

내후성, 내압축성, 동적특성 등이 우수한 천연고무를 사용하여 보강제, 노방제, 오존방지제, 가황제 등을 균일하게 혼합한 특수배합고무를 사용한다.

(2) 내부강판

복합면진장치에 사용하는 내부강판은 일반구조용 압연강재(KS D 3503)에 규정한 재료 이상의 품질을 갖는 강재를 사용하여야 하며 내부강판의 표면은 고무와 견고한 접착을 위하여 특수한 표면처리를 한다.

(3) 각종 강재류

복합면진장치에 사용하는 각종 강재류는 일반구조용 압연강재(KS D 3503)에 규정한 재료 이상의 품질을 갖는 강재를 사용하여야 하며 표면은 녹 방지를 위하여 방청처리를 한다.

2.2 구조

면진장치의 기본적인 구조는 상·하부 플랜지 플레이트를 포함하는 적층고무 본체와 건물 상·하부 구조체와의 연결을 위한 상·하부 앵커 플레이트로 구성되며 그 일례를 그림 2.1에 나타내었다.

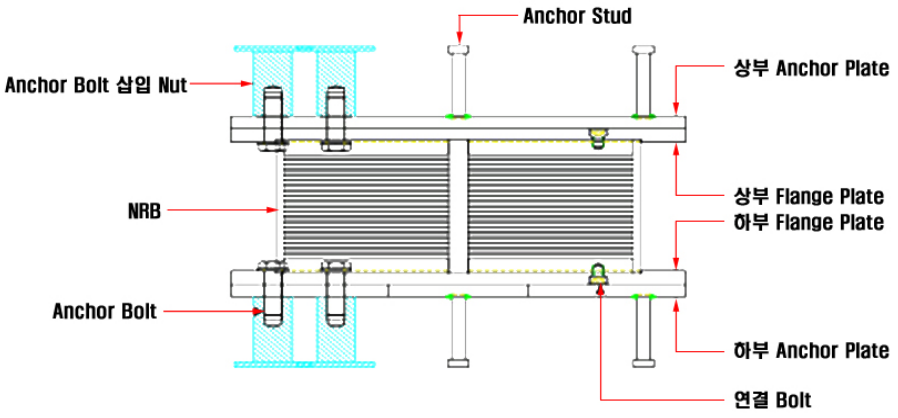


그림 2.1 NRB의 구조도

2.3 주요 치수와 허용오차

면진장치와 각종 강재류의 주요 치수와 허용오차는 표 2.1의 규정을 만족해야 한다.

표 2.1 면진장치의 치수 및 허용오차

항 목		기호	허용오차
복합면진장치에	높이1)	H	≤ 설계값의 ± 1.5%와 ± 6mm 전제품 평균치와의 차 ≤ ± 2.0 이내
	경사2)	δv	≤ 외경의 0.5%와 3mm
	직경	Do	≤ 설계값의 ± 0.5%
Flange/Anchor Plate	길이/폭	L/W	≤ ± 3.0mm
	두께	Tf	≤ ± 1.0mm
	구멍간격	-	≤ ± 1.0mm

주) 1 : 대각 4점의 평균치로 하고 표준온도인 20℃를 기준으로 한다.

2 : 대각위치의 차이로 한다.

2.4 품질 및 성능검사

(1) 천연고무

복합면진장치에 사용되는 천연고무의 물리적 성질은 표 2.2를 만족해야 한다.

표 2.2 고무의 물리적 성질

항 목	단 위	G4.0	G6.0	시험방법
경 도	(Shore A)	38±5	45±5	KS M 6518
인장강도	N/mm^2	16 이상	16 이상	KS M 6518
신 율	%	60 이상	60 이상	KS M 6518
100% 모듈러스	N/mm^2	0.7±0.3	0.9±0.3	KS M 6518
200% 모듈러스	N/mm^2	1.5±0.5	3.0±0.5	KS M 6518

(2) 내부강판

치수는 도면에 명시되어 있으며 일반구조용 압연강재(KS D 3503)에 규정한 품질 이상의 재료를 사용하여야 하고 표면은 샌드 브라스팅(sand blasting) 처리를 하여 고무와의 접착에 문제가 없도록 한다.

(3) 각종 강재류

① 치수는 도면에 명시되어 있으며 일반구조용 압연강재(KS D 3503)에 규정한 품질 이상의 재료를 사용하여야 한다.

② 공기에 노출되는 플레이트 류의 도장은 표면을 블라스팅한 후 용융아연도금 또는 이와 동등 이상의 방법을 사용하여 녹 발생을 방지해야 하며 도막두께는 $100\mu m$ 이상으로 해야 한다.

(4) 각종 볼트류

① 앵커볼트, 와셔, 너트는 용융아연도금 또는 이와 동등 이상의 방법을 사용하며 도금 면은 조립에 문제가 없도록 한다.

② 모든 연결 볼트는 전기 아연도금 또는 이와 동등 이상의 방법을 사용하여 방청처리를 해야 하며 도금 면은 조립에 문제가 없도록 한다.

(5) 복합면진장치에

① 겉모양은 표면이 평활하고 이물질 혼입, 기포, 균열, 미가황, 양부족 등의 사용상 유해한 결점이 없어야 한다.

② 현장 적용되는 복합면진장치의 성능은 다음 표 2.3의 기준값 이상으로 한다.

표 2.3 복합면진장치의 성능

성능구분	기호	단위	기준값	비고
연직강성	K_V	KN/mm	설계값의 80% 이상	
수평강성	K_h	KN/mm	설계값의 ±15% 이내	

(6) 치수 및 품질검사

표 2.4 치수 검사방법

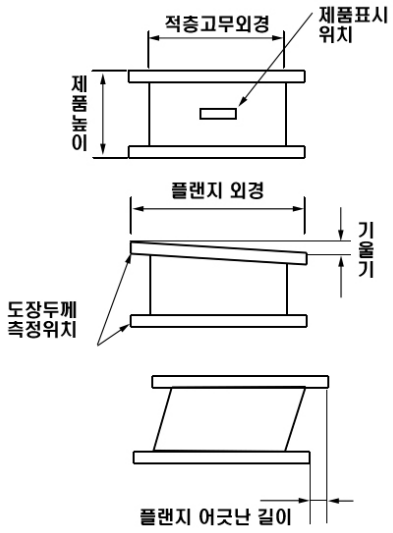
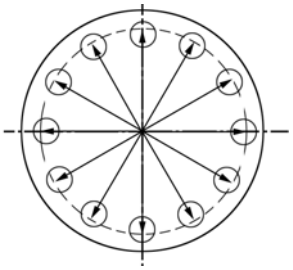
치수검사 항목	측정방법과 관리값
	<제품높이> ・4점에서 측정한 평균값으로 한다. ・제품높이는 표준온도 20℃에서의 값을 기준으로 한다. 규정 시 기온에 대해 고무의 선팽창계수를 이용하여 평가한다. <고무부 외경> ・고무부 외경은 제품을 직접 측정하는 것이 곤란하기 때문에 제품성형에 이용한 금형의 내경측정값으로 평가해도 좋다. <플랜지의 기울기> ・직교하는 4개소 각 대각에서의 제품높이 차 ・플랜지의 어긋남 ・직교하는 2개소 각 대각에서의 플랜지의 어긋남
	<플랜지 볼트구멍 피치> ・template 등에 의한 측정 <측정항목> ・구멍지름 ・구멍중심거리(대각방향)

표 2.5 복합면진장치의 품질검사

구분	검사항목		검사빈도	판정기준	처치	검사방법	
						제작자	시공자
재료검사	고무재료의 물성검사	경도	1물건에 1회 이상	사양과 차이가 없음	재료의 재제작	자체	서류
		인장응력					
		인장강도					
		신장					
	사용강재의 밀시트		전수	사양과 차이가 없음	"	서류	서류
외관검사	완성품의 외관검사		전수	유해한 흠이나 변형, 도장, 도금의 들뜸, 박리, 고무와 철판간 접합부 결함	보수	자체	입회
치수검사	제품높이		전수	설계값±1.5%나 ±6㎜ 전제품 평균값과의 차 ±6㎜	보수 또는 재제작	자체	입회
	고무부 외경			설계값 ±0.5%나 ±4㎜			
	플랜지 기울기			플랜지외경의 0.5%나 3㎜이내			
	플랜지 길이			설계값 ±3㎜			
	플랜지 어긋남			5㎜이내			
	플랜지 볼트구멍 피치			설계값 ±1.2㎜			
방청	도장 막두께 검사		동일제품 중 50%이상	사양과 차이가 없다	보수	자체	입회
성능검사	연직 재하시험	연직강성	전수	설계값±20%	재제작	자체	입회
	수평 재하시험	수평강성	전수	설계값±20%	재제작	자체	입회
		등가 감쇠정수	전수	설계값±20%			

2.5 시험방법

(1) 고무의 물리시험

고무의 물리적 성질을 시험하는 시험편은 제품을 제작하는 재료와 동일한 재료로 시험편 제작용 몰드를 사용하여 제작하며 각종 시험방법은 아래와 같다.

① 경도

가황고무 물리시험방법(KS M 6518)의 6.2항에 따른다.

② 인장강도, 신율

가황고무 물리시험방법(KS M 6518)의 4항에 따르며, 시험편은 아령형 3호를 사용한다.

③ 100%, 300% 모듈러스

가황고무 물리시험방법(KS M 6518)의 4항에 따르며, 시험편은 아령형 3호를 사용한다.

(2) 내부강판의 시험

내부강판에 대한 물성시험은 일반구조용 압연강재(KS D 3503)에 따른다.

(3) 플레이트 류의 시험

플레이트 류에 대한 물성시험은 일반구조용 압연강재(KS D 3503)에 따른다.

(4) 복합면진장치의 시험

복합면진장치의 성능시험은 완제품으로 시험하며 시험방법은 표 2.6과 같다.

표 2.6 복합면진장치의 성능시험 및 판정항목

검사항목	검사방법·조건	판정항목	판정기준
압축시험	설계수직하중(사하중+활하중)을 재하한 뒤, 설계수직하중의 ±30%에 해당하는 하중진폭으로 3회 반복재하 하여 3회째의 최대, 최소치간의 기울기로부터 압축강성을 결정함.	압축강성	설계치의 80%이상
압축·전단시험	구조물의 평균사하중을 수직재하 한 상태에서 설계지진변위 또는 고무층 두께의 100%에 해당되는 수평변위 중 큰 변위를 3회 반복재하 하여, 1회에서 3회까지의 등가강성 평균값으로 결정함.	등가강성	설계치의 ±5%이내
육안검사	구조물의 평균사하중을 수직재하 한 상태에서 상시변위와 지진시변위의 합 또는 고무층 두께의 150%에 해당하는 수평변위 중 큰 변위를 수평으로 5회 반복재하 하여 제품의 외관을 검사함.	ⓐ 고무와 철판간의 접합부 결함 ⓑ 철판의 배열상태 ⓒ 피복고무의균열 유무 ⓓ 영구변형	

① 연직강성(K_V)

설계면압에 해당하는 하중 P_o의 ±30%에 상당하는 연직하중 진폭을 3 사이클 가한 후, 3 사이클 째의 이력곡선에서 P_o±30%간의 하중(P_1, P_2)과 변위(δ_1, δ_2)를 구한다. 이때 이력곡선은 그림 2.2와 같이 기록되어야 하고, 하중(P_1, P_2)과 변위(δ_1, δ_2)의 측정값으로부터 아래 식(2.1)에 따라 연직강성(K_V)을 구한다.

$$K_V = \frac{P_1 - P_2}{\delta_1 - \delta_2} \tag{2.1}$$

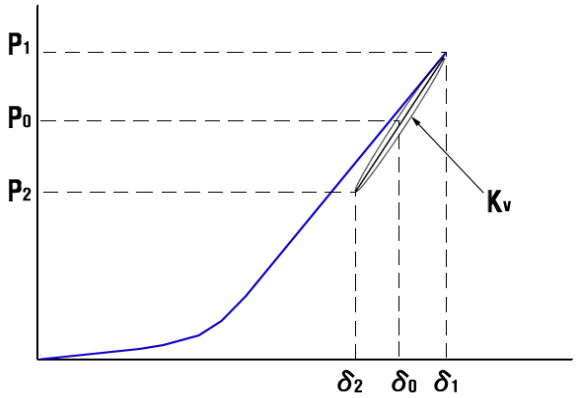


그림 2.2 연직강성 이력곡선

② 수평강성(K_h)

설계면압에 해당하는 하중 P_o를 가한 상태에서 전단변위를 총 고무두께의 ±100%로 하여 3사이클을 수평가력한 후 3사이클 째의 이력곡선에서 ±100%의 하중($Q_{\max}$, $Q_{\min}$)과 변위($X_{\max}$, $X_{\min}$)를 구한다. 이때 이력곡선은 그림 D.3과 같이 기록되어야 하고 하중($Q_{\max}$, $Q_{\min}$)과 변위($X_{\max}$, $X_{\min}$)의 측정값으로 아래 식(D.2)에 따라 수평강성(K_h)을 구한다.

$$K_h = \frac{Q_{\max} - Q_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \qquad \text{(D.2)}$$

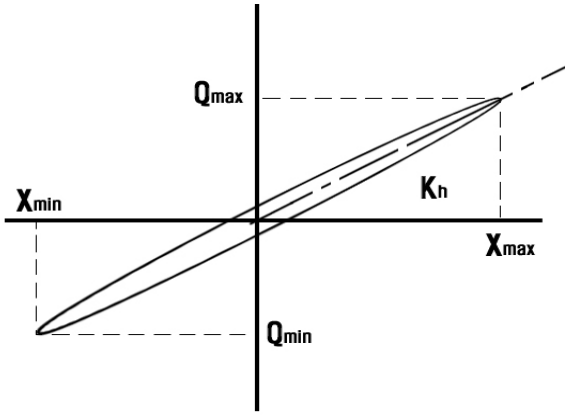


그림 2.3 수평강성 이력곡선

2.6 표시

모든 복합면진장치는 금형 또는 지워지지 않는 잉크나 페인트로 제조공장명, 제조년월일, 제품규격을 제품이 가설된 상태에서 확인이 가능하도록 측면에 표시하여야 한다.

D. 고인성 강재 규격서

고망간·고인성 압연 강재
(High Manganese Rolled Damping Alloy Steel)

[1] 적용범위

이 규격은 고망간·고인성 압연강재(이하 고인성 압연강재)에 대하여 규정한다.

[2] 용어의 뜻

2.1 고인성 압연강재: 고인성 압연강재란 내부마찰(Internal Friction)이 커서 외부에서 가한 진동에너지의 대부분을 열로 전환시키는 합금으로 인성이 특히 우수한 합금을 말한다.

2.2 진동감쇠능: 진동에너지를 열로 변환시키는 능력을 말하며, 감쇠능의 크기는 비감쇠능, 대수감쇠율, 내부마찰 등으로 표시된다.

[3] 종류 및 기호

고인성 압연 강재의 종류 및 기호는 표 1에 따른다.

표 1. 고인성 압연 강재의 종류 및 기호

종류	기호	적요
1종	HMnD	일반용
2종	HMnD Cu	내후성용
3종	HMnD Cr	내식성용
4종	HMnD CTi	일반용
5종	HMnD C2Ti	고장력용
6종	HMnD CCo	일반용

[4] 제조방법

4.1 고인성 압연강재는 열간압연 후 열처리를 하고 산세 또는 이에 준하는 처리를 한 후 적당한 교정을 한다.

4.2 고용화 열처리는 950~1,050℃에서 시행한 후 급냉 또는 서냉한다.

[5] 화학성분

고인성 압연강재의 화학성분은 레이들 분석에 따르고, 그 값은 표 2에 따른다. 또한, 지정에 의하여 제품 분석을 할 경우의 허용 변동치는, KS D 0228(강재의 제품 분석방법 및 그 허용 변동치)의 5.의 표 4를 적용한다. 다만 이 표가 적용되지 않는 화학성분 규정치에 대해서는, 주문자와 제조자간의 협정에 따른다.

표 2 강재의 제품 분석방법 및 그 허용 변동치)

종류의 기호	화학성분 %					
	C	Mn	Si	P	S	기타
HMnD	0.06 이하	17~21	0.1 이하	0.02 이하	0.02 이하	
HMnD Cu	0.06 이하	16~18	0.1 이하	0.02 이하	0.02 이하	Cu 0.1~0.7
HMnD Cr	0.06 이하	16~18	0.1 이하	0.02 이하	0.02 이하	Cr 0.1~0.5
HMnD CTi	0.06~0.15	16~19	0.1 이하	0.02 이하	0.02 이하	Ti 0.2~0.7
HMnD C2Ti	0.19~0.23	16~19	0.1 이하	0.02 이하	0.02 이하	Ti 0.3~0.5
HMnD CCo	0.1~0.2	16~19	0.1 이하	0.02 이하	0.02 이하	Co 0.1~1.0

[6] 기계적 성질

고인성 압연강재의 고용화 열처리를 실시한 후의 내력, 인장강도, 연신율 및 경도는 표 3에 따른다. 내력은 특히 주문자의 지정이 있는 경우에 적용한다.

표 3 열처리를 실시한 후의 내력, 인장강도, 연신율 및 경도

종류의 기호	인장시험			경도시험		
	인장강도 MPa	내력 MPa	연신율 %	H_B	H_RB	H_V
HMnD	900 이상	280 이상	50 이상	181 이상	89 이상	194 이상
HMnD Cu	780 이상	320 이상	46 이상	162 이상	85 이상	170 이상
HMnD Cr	750 이상	320 이상	40 이상	171 이상	87 이상	180 이상
HMnD CTi	850 이상	350 이상	30 이상	190 이상	91 이상	198 이상
HMnD C2Ti	1100 이상	350 이상	30 이상	228 이상	98 이상	240 이상
HMnD CCo	700 이상	250 이상	14 이상	193 이상	92 이상	204 이상

[7] 진동감쇠능

고인성 압연강재의 고용화 열처리를 실시한 후의 진동감쇠능은 표 4에 따른다.

표 4 열처리를 실시한 후의 진동감쇠능

종류의 기호	진동감쇠능 (SDC, %)
HMnD	22 이상
HMnD Cu	17 이상
HMnD Cr	17 이상
HMnD CTi	15 이상
HMnD C2Ti	15 이상
HMnD CCo	12 이상

[8] 겉모양, 모양, 치수, 무게 및 그 허용차

강재의 겉모양, 모양, 치수, 무게 및 그 허용차는 다음 규격에 따른다.

KS D 3051(열간압연 봉강 및 코일 봉강의 모양, 치수 및 무게와 그 허용차)

KS D 3052(열간압연 평강의 모양, 치수 및 무게와 그 허용차)

KS D 3500(열간압연 강판 및 강대의 모양, 치수 및 무게와 그 허용차)

KS D 3502(열간압연 형강의 모양, 치수 및 무게와 그 허용차)

이 경우 강판 및 강대의 길이 및 커트에지의 경우, 나비의 허용차는 특히 지정하지 않는 한 허용차 A에 따른다.

[9] 시험

9.1 분석시험

9.1.1 분석시험의 일반사항 및 레이들 분석 시료의 채취방법은 KS D 0001(강재의 검사통칙) 3.의 규정에 따른다.

9.1.2 제품 분석 시료 채취 방법은 KS D 0228(강재의 제품 분석 방법 및 그 허용 변동치)의 3.의 규정에 따른다.

9.1.3 분석방법은 다음에 따른다.

KS D 1652(철 및 강의 광전 측광식 발광 분광 분석방법)

KS D 1655(철 및 강의 형광 X선 분석방법)

KS D 1659(철 및 강의 원자 흡광 분석방법)

KS D 1802(철 및 강의 인 분석방법)

KS D 1803(철 및 강의 황 분석방법)

KS D 1804(철 및 강의 탄소 분석방법)

KS D 1805(철 및 강의 규소 분석방법)

KS D 1806(철 및 강의 망간 분석방법)

KS D 1807(철 및 강의 크롬 분석방법)

KS D 1810(철 및 강의 구리 분석방법)

KS D 1875(철 및 강의 코발트 분석방법)

KS D 1876(철 및 강의 티탄 분석방법)

9.2 기계시험

9.2.1 인장시험

인장시험은 다음 각 항에 따른다.

(1) 시험편은 KS B 0801(금속재료 인장시험편)에 규정한 10호 시험편, 13B호 시험편, 14A호 시험편 및 14B호 시험편의 어느 것을 사용한다. 또한 4호 시험편 또는 5호 시험편을 사용해도 좋다.

(2) 시험방법은 KS B 0802(금속재료 인장시험방법)에 따른다. 다만 시험온도는 20±5℃를 표준으로 한다.

9.2.2 경도시험

경도시험은 다음의 각 항에 따른다.

(1) 시험편은 인장시험편의 일부를 사용할 수 있다.

(2) 시험방법은 다음의 어느 규격에 따른다. 다만, 시험온도는 20±5℃를 표준으로 한다.

KS B 0805(브리넬 경도 시험방법)

KS B 0806(로크웰 경도 시험방법)

KS B 0811(비커스 경도 시험방법)

9.3 진동시험

9.3.1 진동시험은 Fopple-Pertz형 비틀림 진자시험 및 임팩트 시험에 의하여 실시한다.

9.3.2 진동감쇠능의 크기는 비감쇠능(SDC)로 나타내고, 이는 다음과 같이 정의한다.

W는 진동에너지, △W는 1주기당 진동에너지 손실, Yn, Yn+1은 2개의 연속된 진폭의 크기

[10] 검사

10.1 검사의 일반 사항은 KS D 0001(강재의 검사통칙)에 따른다.

10.2 화학성분, 기계적 성질, 진동감쇠능의 성적은 4.~6.의 규정에 적합하여야 한다. 다만 인장시험, 경도시험은 주문자의 승인을 얻어 그 일부 또는 전부를 생략할 수 있다.

[11] 표시

검사에 합격한 강재에는 강재마다 또는 1 묶음마다 다음 항목을 적당한 방법으로 명시하여야 한다. 다만 주문자의 승인을 얻은 경우에는 그 일부를 생략할 수 있다.

(1) 종류의 기호

(2) 용강 번호 또는 검사 번호

(3) 치수

(4) 1 묶음마다의 무게 또는 수량(강판과 강대의 경우)

(5) 제조자 명 또는 그 약호

[12] 보고

KS D 0001의 8.의 규정에 따른다.

고망간・고인성 주강품
(High Manganese Damping Alloy Steel Castings)

[1] 적용범위

이 규격은 고망간・고인성 주강품(이하 고인성 주강품)에 대하여 규정한다.

[2] 용어의 뜻

2.1 고인성 주강품: 고인성 주강품이란 내부마찰(Internal Friction)이 커서 외부에서 가한 진동에너지의 대부분을 열로 전환시키는 합금으로 인성이 특히 우수한 합금을 말한다.

2.2 진동감쇠능: 진동에너지를 열로 변환시키는 능력을 말하며, 감쇠능의 크기는 비감쇠능, 대수감쇠율, 내부마찰 등으로 표시된다.

[3] 종류 및 기호

고인성주강품의 종류 및 기호는 표 1에 따른다.

표 1. 고인성주강품의 종류 및 기호

종류	기호	적요
1종	HMnDSC 1	일반용(보통품)
2종	HMnDSC 2	일반용(보통품)
3종	HMnDSC 3	일반용(보통품)
4종	HMnDSC 4	일반용(고급품)

[4] 제조방법

4.1 고인성 주강품은 로 내에서 각 부를 균일하게 가열하여 표 2의 열처리를 하여야 한다.

4.2 고인성 주강품은 용접, 기타 적당한 방법에 의하여 보수할 수 있다. 다만,

보수에 의하여 품질에 영향을 미칠 우려가 있는 경우에는 미리 주문자와 제조자가 협의하여야 한다. 또한, 용접 보수 후는 필요에 따라 재 열처리를 한다.

표 2. 열처리 조건

종류의 기호	열처리 조건
HMnDSC 1	열처리를 전혀 실시하지 않음
HMnDSC 2	용체화처리만 실시
HMnDSC 3	균질화처리만 실시
HMnDSC 4	균질화처리 후 용체화처리 실시

비고) 균질화처리는 약 1100℃에서 12~24시간 열처리 후 급냉 또는 서냉하고, 용체화처리는 약 1050℃에서 1시간 열처리 후 급냉 또는 서냉한다.

[5] 품질

5.1 고인성 주강품은 품질이 균일하고 사용상 해로운 홈 또는 블로우 호울(blow hole) 등이 없어야 한다.

5.2 고인성 주강품의 화학성분은 레이들 분석에 따르고, 그 값은 표 3에 따른다.

표 3. 고인성 주강품의 화학성분

종류의 기호	화학성분 %				
	C	Mn	Si	P	S
HMnDSC 1	0.06 이하	17~21	0.1 이하	0.02 이하	0.02 이하
HMnDSC 2	0.06 이하	17~21	0.1 이하	0.02 이하	0.02 이하
HMnDSC 3	0.06 이하	17~21	0.1 이하	0.02 이하	0.02 이하
HMnDSC 4	0.06 이하	17~21	0.1 이하	0.02 이하	0.02 이하

5.3 고인성 주강품의 기계적 성질은 표 4에 따른다.

표 4. 고인성 주강품의 기계적 성질

종류의 기호	인장시험			경도시험		
	인장강도 MPa	내력 MPa	연신율 %	H_B	H_RB	H_V
HMnDSC 1	370 이상	330 이상	3 이상	280 이상	105 이상	296 이상
HMnDSC 2	560 이상	240 이상	10 이상	294 이상	107 이상	311 이상
HMnDSC 3	580 이상	320 이상	19 이상	200 이상	93 이상	210 이상
HMnDSC 4	570 이상	260 이상	22 이상	181 이상	89 이상	194 이상

5.4 고인성 주강품의 진동감쇠능은 표 5에 따른다.

표 5. 고인성 주강품의 진동감쇠능

종류의 기호	진동감쇠능 (SDC, %)
HMnDSC 1	15 이상
HMnDSC 2	20 이상
HMnDSC 3	18 이상
HMnDSC 4	22 이상

[6] 겉모양, 모양, 치수, 무게 및 그 허용차

고인성주강품의 모양, 치수 및 무게는 도면 또는 모형에 따르고, 길이 및 두께의 허용차는 KS B 0418(주강품 보통 허용차)에 따른다. 다만, 주문자와 제조자의 협정에 의할 때는 협정에 따른다.

[7] 시험

7.1 분석시험

7.1.1 분석 시료는 레이들에서 채취한다. 다만, 주문자의 요구가 있을 경우는 주강품에 대하여 제품 분석을 한다. 이때, 분석 시료의 채취방법 및 화학성분의 허용 변동은 주문자와 제조자 사이의 협정에 따른다.

7.1.2 화학분석 방법은 다음에 따른다.

KS D 1652(철 및 강의 광전 측광식 발광 분광 분석방법)

KS D 1655(철 및 강의 형광 X선 분석방법)

KS D 1659(철 및 강의 원자 흡광 분석방법)

KS D 1802(철 및 강의 인 분석방법)

KS D 1803(철 및 강의 황 분석방법)

KS D 1804(철 및 강의 탄소 분석방법)

KS D 1805(철 및 강의 규소 분석방법)

KS D 1806(철 및 강의 망간 분석방법)

7.2 기계시험

기계시험은 원칙으로 제조소에서 한다. 이때, 주문자의 요구가 있을 때는 제조자는 이 시험에 주문자를 입회시켜야 한다. 다만, 주문자와 제조자의 협정에 따라 기계시험을 생략할 수 있다.

7.2.1 인장시험 인장시험은 다음에 따른다.

(1) 시험편은 KS B 0801(금속재료 인장시험편)에 규정한 10호 시험편, 13B호 시험편, 14A호 시험편 및 14B호 시험편의 어느 것을 사용한다. 또한 4호 시험편 또는 5호 시험편을 사용해도 좋다.

(2) 시험방법은 KS B 0802(금속재료 인장시험방법)에 따른다. 다만 시험온도는 20±5℃를 표준으로 한다.

7.2.2 경도시험 경도시험은 다음의 각 항에 따른다.

(1) 시험편은 인장시험편의 일부를 사용할 수 있다.

(2) 시험방법은 다음의 어느 규격에 따른다. 다만 시험온도는 20±5℃를 표준으로 한다.

KS B 0805(브리넬 경도 시험방법)

KS B 0806(로크웰 경도 시험방법)

KS B 0811(비커스 경도 시험방법)

7.3 진동시험

7.3.1 진동시험은 Fopple-Pertz형 비틀림 진자시험 및 임팩트 시험에 의하여

실시한다.

7.3.2 진동감쇠능의 크기는 비감쇠능(SDC)로 나타내고, 이는 다음과 같이 정의한다.

W는 진동에너지, △W는 1주기당 진동에너지 손실, Yn, Yn+1은 2개의 연속된 진폭의 크기

[8] 검사

8.1 겉모양, 치수, 화학성분, 기계적 성질 및 진동감쇠능의 성적은 5. 및 6.의 규정에 합격하여야 한다.

8.2 분석 시료는 1 용해마다 1개로 한다. 다만, 2기 이상의 로에서 출강한 용강을 1 레들에 모은 경우에는 이것을 1 용해로 본다.

8.3 공시재는 다음에 따른다.

8.3.1 공시재는 주강품과 별개로 주입한 것이어야 한다.

8.3.2 공시재의 모양 및 치수는 그림 1에 따른다.

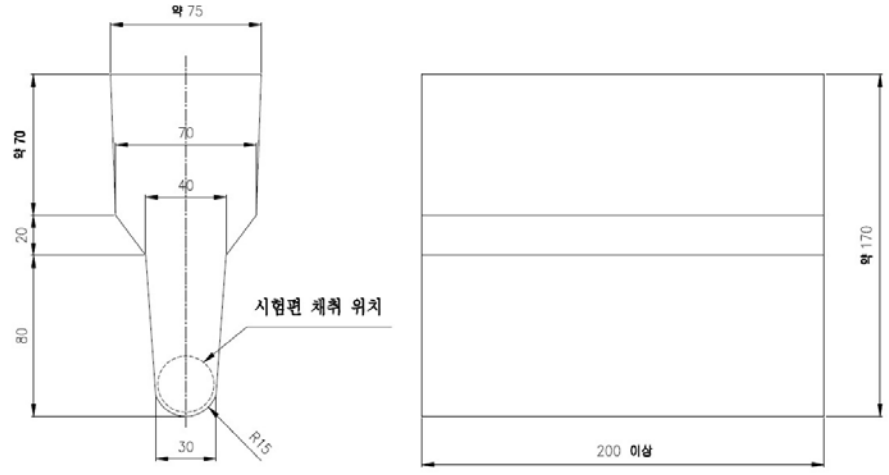


그림 1 공시재의 모양 및 치수

8.3.3 공시재는 원칙으로 고인성 주강품과 동시 열처리를 한 것이어야 한다. 다만, 주문자와 제조자의 협정에 따라 별개로 열처리할 수 있다.

8.4 인장시험편은 동일 용해마다 채취한 공시재에서 1개를 채취한다.

8.5 주강품은 검사 전에 도장 기타 검사에 방해가 되는 어떠한 처리를 하여서는 안 된다.

8.6 8.1의 검사 이외에 주문자는 다음에 기재하는 검사 중 필요한 검사를 지정할 수 있다.

8.6.1 방사선 투과 시험

8.6.2 형광 침투 탐상 시험

8.6.3 기타의 시험

이 경우 시험방법 및 합부 판정 기준은 주문자와 제조자 사이의 협정에 따른다. 또한, 시험방법에 있어서 8.3.1 및 8.3.2에 대하여는 다음 규격에 따른다.

KS D 0227(주강품의 방사선 투과 시험방법 및 투과 사진의 등급 분류)

KS B 0816(침투 탐상 시험방법 및 결함 지시 모양의 등급 분류)

[9] 재시험

9.1 시험편의 끝맺음이 불량하거나 또는 재질에 관계가 없다고 인정되는 흠이 있을 때에는 시험 전에 이것을 폐각하고, 다시 다른 시험편으로 대치할 수 있다.

9.2 인장시험에서 시험편이 표점 사이의 중심에서 표점 거리의 1/4 이외의 곳에서 절단되고, 그 성적이 규정에 적합하지 않을 때에는 그 시험을 무효로 하고, 다시 그 시험편을 채취한 공시재의 조에서 다른 시험편을 채취하여 재시험할 수 있다.

9.3 기계시험의 성적이 규정에 적합하지 않을 때에는, 그 시험편을 채취한 공시재의 조에서 소정의 시험편의 2배수의 시험편을 채취하여 재시험을 할 수 있다. 이때, 어느 시험편이나 모두 규정에 적합하여야 한다.

9.4 시험 성적이 불량할 때에는 재열처리를 하여 재시험을 할 수 있다. 이 경우 시험편의 수는 8.4와 동일수로 하고, 기계시험이 전부 규정에 적합하여야 한다. 재열처리는 2회를 한도로 한다.

[10] 표시

검사에 합격한 고인성 주강품에는 주강품마다 제조소에서 다음 항목을 명시하

여야 한다. 다만, 주문자의 승인을 얻었을 때는 그 일부를 생략할 수 있다. 또한, 이들을 표시하기가 곤란한 경우에는 적당한 방법에 따라도 좋다.

(1) 종류의 기호

(2) 용해 번호

(3) 제조자 명 또는 그 약호

[11] 보고

제조자는 용해 번호 및 시험 성적을 기재한 성적표를 주문자에게 제출하여야 한다.

E. 고인성 강재 면진장치 품질관리 지침서

고인성 압연강재로 면진장치를 제작하는 경우 균일한 품질의 압연강재를 생산할 수 있도록 제작 공정에 대한 품질관리 지침서를 작성하였다.

[1] 목적

본 절차서는 고망간·고인성 압연 강재(High Manganese Rolled Alloy Steel)를 사용하여 제작되는 면진 댐퍼(U-type Isolation Damper) 제품이 고객의 요구사항을 만족하는지 검사하여, 제품의 건전성을 확보하는데 목적이 있다.

[2] 적용범위

본 절차서는 고망간·고인성 압연 강재(High Manganese Rolled Alloy Steel)를 사용하여 제작되는 면진 댐퍼(U-type Isolation Damper)의 제품검사에 적용한다.

[3] 관련자료

3.1	KS D 0001	강재의 검사 통칙
3.2	KS B 0228	강재의 제품분석방법 및 그 허용 변동치
3.3	KS B 0801	금속재료 인장시험편
3.4	KS B 0802	금속재료 인장시험 방법
3.5	KS D 1652	철 및 강의 광전 측광식 발광 분광 분석방법
3.6	KS D 1655	철 및 강의 형광 X선 분석방법
3.7	KS D 1659	철 및 강의 원자 흡광 분석방법
3.8	KS D 1802	철 및 강의 인 분석방법
3.9	KS D 1803	철 및 강의 황 분석방법
3.10	KS D 1804	철 및 강의 탄소 분석방법
3.11	KS D 1805	철 및 강의 규소 분석방법
3.12	KS D 1806	철 및 강의 망간 분석방법
3.13	KS B 0418	주강품 보통허용공차

3.14 KS B 0805 브리넬 경도 시험방법

3.15 KS B 0806로크웰 경도 시험방법

3.16 KS B 0811비커스 경도 사험방법

3.17 KS B 0816 침투탐상 시험방법 및 결함지시 모양의 등급 분류

[4] 용어의 정의

4.1 고망간·고인성 압연 강재

내부마찰(Internal Friction)이 커서 외부에서 가한 물리적 진동에너지의 대부분을 열로 전환시키는 합금으로 인장강도가 높으면서 연신율이 우수한 강재를 의미한다.

4.2 레이들(Ladle)

융해로부터 나온 융해 금속(쇳물)을 받아, 운반하거나 주형에 주입할 때 사용하는 용기

4.3 모래 개재물(Sand Inclusion)

응고된 주물에 모래부스러기 등이 내부 및 외부표면에 석여 들어간 현상

4.4 슬러그 개재물(Slag Inclusion)

응고된 주물의 내부 및 외부표면에 슬러그가 석여 들어간 현상

4.5 표면기공(Surface Porosity)

기공은 응고된 금속에서 가스 거품들이 밖으로 탈출하지 못하거나 탈출한 기공이 모재 표면에서 완전히 없어지지 않고 존재하여 표면에서 공동현상(Cavitation)으로 존재하는 결함

4.6 수축공(Shrinkage Cavity)

응고 과정 중 금속의 수축에 의해 형성된 공간을 의미하며, 용융 금속은 두께가 얇은 쪽이먼저 응고하게 되며 따라서 두께가 두꺼운 부분의 용융금속이 이동하게 되어 충분한 용융금속이 보충되지 않을 경우 수축에 의한 공간 즉 수축공

(Shrinkage Cavity)이 발생한다.

4.7 열간 균열(Hot Tears)

열간 균열(Hot Tears)은 두께의 두꺼운 부분과 얇은 부분의 응고속도 차이에 기인하여 응력분포의 갑작스런 변화에 의해 나타나는 일종의 균열(Crack) 결함이다.

4.8 콜드 샷(Cold Shut)

콜드 샷(Cold Shut)은 이미 응고된 금속에 응고되지 않은 금속이 들어감으로써 생겨나는 결함이며 금속의 경계부위가 드러난다.

4.9 블로우 홀(Blowhole)

모래 및 주형내부의 습기가 용융금속에 의해 증발하여 이 가스압력이 주물 내부에 커다란 공간을 형성하여 발생하는 현상

4.10 용체화 처리(Solid Solution Treatment)

합금을 일반적으로 최대의 고용체로 되는 온도까지 가열한 후, 이것을 냉각하여 상온에서 과포화 고용체를 얻도록 하는 처리

[5] 책임

5.1 품질관리 검사자는 제품검사 항목에서 요구된 검사를 실시하고 그 결과를 기록할 책임이 있다.

5.2 품질보증책임자는 제품검사 항목에서 요구된 검사를 실시되었는지 확인하고 검사결과를 승인할 책임이 있다.

[6] 장비

6.1 EDS(Energy Dispersive X-ray Spectrometer)

6.2 Carbon 분석기

6.3 버니어 캘리퍼스

6.4 줄자

6.5 경도측정기

6.6 확대경(7x 이상)

6.7 표면조도기

6.8 나사 링 게이지

6.9 R-게이지

6.10 온도측정기

[7] 검사항목

제품 검사에서 확인하여야 할 항목은 다음과 같다.

7.1 자재 검사(성분분석 검사)

7.2 자재 검사(기계적 성질 검사)

7.3 치수 검사

7.4 열처리 검사

7.5 비파괴 검사

7.6 도장 검사

7.7 외관 검사

7.8 포장 검사

[8] 제품 검사시기, 절차 및 합격기준

8.1 성분분석 검사(Chemical Composition)

8.1.1 검사시기

성분분석 검사는 금속이 용해(Melting)된 상태에서 주형(Mold)에 주입하기 전 용융로에서 성분분석 시료를 채취하여 성분분석 검사를 실시한다.

8.1.2 검사 절차

성분분석 검사는 시료 채취기를 이용하여 1용탕/1Heat (Lot=Charge)의 시료를 최소 1개소이상 Sample을 발췌하여 EDS(Energy Dispersive X-ray Spectro meter)를 사용하여 성분함량을분석하고, Carbon 분석기를 사용하여Carbon (탄소)의 성분 함량비를 측정해야 하며 합격기준을 만족하지 못할 때에는 1용탕

/1Heat (Lot)를 전량 폐기 해야 하며, 성분분석 검사의 시료를 발췌하여 탄소(C)는 KS D 1804(철 및 강의 탄소 분석방법), 망간(Mn)은 KS D 1806(철 및 강의 망간 분석방법), 규소(Si)는 KS D 1805(철 및 강의 규소 분석방법), 인(P)은 KS D 1802(철 및 강의 인 분석방법), 황(S)은 KS D 1803(철 및 강의 황 분석방법)에 준하여 성분분석 검사를 실시한다.

8.1.3 합격기준

잉고트(Ingot)- 고망간·고인성 압연 강재(High Manganese Rolled Alloy Steel)의 화학성분은 표.1를 만족해야 한다

표.1 화학성분(Chemical Composition / Weight %)

종류의 기호	화학성분				
	C	Mn	Si	P	S
HMnD	0.06 이하	17.0~21.0	0.1 이하	0.02 이하	0.02 이하

8.2 기계적 성질 검사 (Mechanical Property)

8.2.1 검사시기

기계적 성질 검사의 시료 발췌 시기는 열간 압연(Hot Rolling) 이후 열처리(Heat Treatment)를 실시하고 판재가 상온에 도달할 때 판재 일부에서 1용탕 <1Heat (Lot=Charge)>당 시료를 최소 1개소 이상 Sample을 발췌하여 기계적 성질 검사를 실시한다.

8.2.2 검사절차

기계적 성질 검사는 절단기를 이용하여 1용탕<1Heat(Lot=Charge)>의 시료를 최소 1개소이상 Sample을 발췌하여 KS B 0801(금속재료 인장시험편), KS B 0802(금속재료 인장시험 방법), KS B 0805(브리넬 경도 시험방법), KS B 0806(로크웰 경도 시험방법), KS B 0811(비커스 경도 시험방법)에 준하여 기계적 성질 검사를 실시한다.

8.2.3 합격기준

판재(Plate) - 고망간·고인성 압연 강재(High Manganese Rolled Alloy Steel)의 화학성분은 표.2를 만족해야 한다.

표.2 기계적 성질 (Mechanical Property)

종류의 기호	인장시험			경도시험		
	인장강도 (MPa)	항복강도 (MPa)	연신율 (%)	HB	HRB	HV
HMnD	900 이상	280 이상	50 이상	181 이상	89 이상	194 이상

주) 고객의 외부 공인기관의 성분분석 및 기계적 성질 검사 성적서 요구시 분석절차 및 방법은 8.1.1 에 (1), (2)항에 따라 분석하고 합격기준은 8.1.1 에 (3)항에 준하여 합부 판정을 실시한 공인기관의 성적서로 성분분석검사를 대체한다.

8.3 치수검사

8.3.1 검사시기

▶ 1차 치수검사 : 고망간·고인성 압연 강재(High Manganese Rolled Alloy Steel)를 가공기계를 통해서 가공한 후 검사를 실시한다.

▶ 2차 치수검사 : 용체화 처리가 끝나고 절곡(Bending)이 완료된 후 검사를 실시한다.

8.3.2 검사절차

▶ 1차 치수검사

제작도면의 각각의 치수값을 버니어 컬리퍼스 또는 내측 캘리퍼스, 마이크로미터를 사용하여 길이는 최소 3 Point(양쪽 끝단과 중간)를 최소 2회 이상 측정하고, 두께는 최소 2 Point(양쪽 끝단)를 최소 2회 이상 측정하여 검사성적서에 기록한다.

▶ 2차 치수검사

제작도면의 절곡부위 반지름을 R 게이지를 사용하여 최소 3회 이상 측정하고 버니어 컬리퍼스 또는 줄자를 사용하여 최소 2 Point(양쪽 끝단)을 최소 2회 이상 측정하여 검사성적서에 기록한다.

8.3.3 합격기준

▶ 1차 치수검사

치수검사 합격기준은 그림. 1 및 표. 3에 준하여 검사를 실시하고 승인된 제작도면의허용공차를 만족해야 한다.

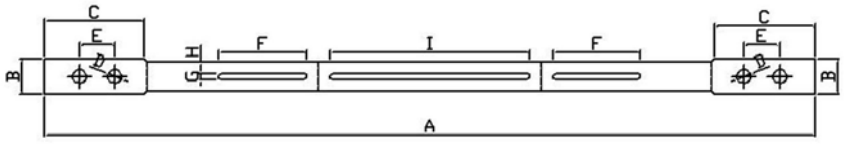


그림. 1 치수 안내선

표. 3 치수 및 허용공차 (단위 : ㎜)

ID. / STD.	A	B	C	D	E	F	G	H	I
	1303	60	170	25	60	148	10	20	337
허용공차	±5	±3	±3	±2	±2	±3	±1	±2	±3

▶ 2차 치수검사

치수검사 합격기준은 그림. 2 및 표. 4에 준하여 검사를 실시하고 승인된 제작도면의 허용공차를 만족해야 한다.

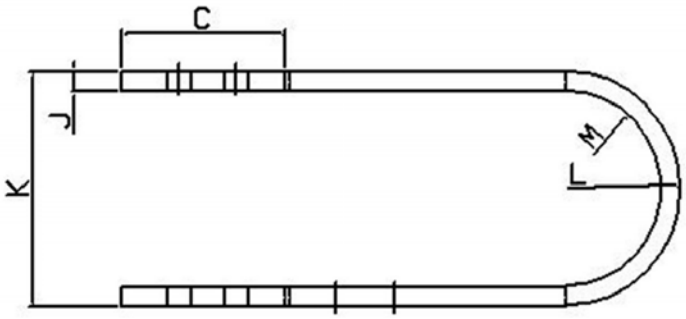


그림. 2 치수 안내선

표. 4 치수 및 허용공차 (단위 : ㎜)

ID. / STD.	J	K	L	M
	20	240	R120	R100
허용공차	±1	+5	±2.5	±2

8.4 열처리 시험

8.4.1 검사시기

열처리 전(Before - Heat Treatment) 1차 치수검사를 실시 한 후와 열처리 종료 후 검사를 실시한다.

8.4.2 검사절차

고망간·고인성 압연 강재(High Manganese Rolled Alloy Steel)의 고인성 특성을 부여하기 위해 용체화 처리 및 냉각처리를 실시해야 함으로 열처리 전(Before - Heat Treatment) 열처리로(Furnace)의 온도와 시간을 설정한 후 열처리 검사성적서에 기록하고 열처리 종료시 온도와 경과시간을 열처리 검사성적서에 기록한다. 질소 가스 냉각(N2 Gas Cooling)시 냉각 시간을 측정하여 검사성적서에 기록한다.

주) 필요 시 레코더를 사용하여 온도와 경과시간을 기록한다.

8.4.3 합격기준

열처리 온도는 1,050℃(±10℃) 이고, 열처리 시간은 최소2시간 이상이여야 하며, 질소 가스 냉각에 의해 10분당 200℃ 이상의 냉각이 이루어져야 한다.

8.5 비파괴 검사

8.5.1 검사시기

열처리(Heat Treatment)를 실시한 후 절곡(Bending)을 실시한 다음 비파괴 검사를 실시한다.

8.5.2 검사절차

고망간·고인성 압연 강재(High Manganese Rolled Alloy Steel) 열처리 후 표면의 이물질을 제거하고 절곡 부위를 KS B 0816 (침투탐상 시험방법 및 결함지시 모양의 등급 분류)에 준하여 침투탐상검사를 실시한다.

주) 침투탐상검사 후 댐퍼(Damper) 표면에 잔존하는 검사 시액은 방청처리에 영향을 주기 때문에 제거해야 한다.

8.5.3 합격기준

고객이 요구하는 합격기준이 규정되지 않을 경우에는 고객과 제작사의 합의에 의해 합격기준을 정한다. 단 고객이 합격기준을 규정하지 않을 때에는 다음에 따라 판정한다.

가) 지시의 평가

표면을 가로지르는 기계적 불연속부는 침투제의 누출에 의해 나타나게 되지만 기계가공지시, 스케일 또는 자국(Dent) 때문에 생길 수 있는 국부 불연속부는 결함과는 상관없는 지시를 보이나 결함과는 무관한 것으로 판단되는 지시가 합격기준을 초과할 경우에는 이들을 재검사하여 실제로 결함이 있는지를 확인해야 한다. 결함을 덮고 있을 가능성이 있는 무관지시 및 넓은 착색구역은 불합격이므로 제거 후 검사를 실시해야 한다.

유관지시란 결함 때문에 생긴 긴 쪽 길이가 1.6㎜ 이상인 지시를 말하며 선형지시(Liner Indication)는 그 길이가 폭의 3배를 넘는 지시를 말하며 원형지시(Rounded Indication)는 폭의 3배 이하인 길이를 가진 원형 또는 타원형지시를 말하며, 다음의 유관지시는 불합격이다.

나) 두께가 16 ㎜미만의 재료에 대해서는 1.6㎜, 16 ㎜이상 51 ㎜미만의 재료에 대해서는 3.2 ㎜, 51 ㎜를 초과하는 재료에 대해서는 4.8 ㎜보다 길이가 긴 선형지시

다) 두께가 16 ㎜미만의 재료에 대해서는 3.2㎜, 16 ㎜이상의 재료에 대해서는 4.8 ㎜보다 큰 원형지시

라) 4개 이상의 지시가 선단간격이 1.6㎜이하의 간격으로 일렬로 늘어서 있을 때.

마) 평가대상지시에 대해 조건이 가장 열악한 위치에서 잡은 임위 부위[면적이 6in2 (3871㎟), 긴 쪽 길이가6in(152㎜)이하]내에 10개 이상의 지시가 있을 때.

8.6 도장 검사(Coating Inspection)

8.6.1 검사시기

최종검사 중 외관검사 전 실시한다.

8.6.2 검사절차

가) 검사자는 도장 전 표면처리 요건을 확인한 후 적합한 표면처리가 되었는지를 검사하고, 도장 후 도막두께측정기 및 육안으로 도장의 두께, 도장의 색상, 도장상태가 각 사별 도장 관련 승인사양서, 제작도면 및 구매시방서에 만족하는지 도장검사를 실시한다.

나) 도장상태는 도장 외관에 기포, 크랙, 깨짐, 이물질이 없는지를 검사한다.

8.6.3 합격기준

가) 표면 전처리 규격, 도장 색상, 도장 상태, 도장 두께가 각 사별 도장 관련 승인사양서, 제작도면 및 구매시방서에 만족해야 한다.

나) 검사자는 도장 검사 후 성적서에 각 사별 도장 관련 승인사양서, 제작도면 및 구매시방서를 첨부하여 합격 여부를 판단한다.

8.7 외관 검사(Appearance Inspection)

8.7.1 검사시기

최종검사 중 포장 전 외관검사를 실시한다.

8.7.2 검사절차

가) 검사자 육안으로 면진 댐퍼(Isolation Damper)의 외관에 기계적 불연속에 의한 스크레치(scratch) 및 노치(Notch) 현상이 없는지를 검사한다.

나) 외부의 변형(절곡-Bending) 및 열피로(Thermal Fatigue)에 의한 크랙(Crack)이 발생하였는지를 검사 한다.

8.7.3 합격기준

가) 검사자 육안으로 면진 댐퍼(Isolation Damper)의 외관에 기계적 불연속에 의한 스크레치(scratch) 및 노치(Notch) 현상이 없어야 한다.

나) 외부의 변형(절곡-Bending) 및 열피로(Thermal Fatigue)에 의한 크랙(Crack)이 없어야 한다.

8.8 포장 검사(Packing Inspection)

8.8.1 검사시기

최종검사 후 제품 출하 전 실시한다.

8.8.2 검사절차

가) 검사자는 포장 전 제품의 외관에 손상 및 파손이 없는지를 육안으로 확인한 후 고객이 지정한 포장처리 요건(또는 등급)을 확인하여 적합한 포장처리가 되었는지를 검사하고, 포장 후 외부의 습기, 바람, 비등에 제품이 노출되지 않도록 육안으로 포장의 상태를 검사해야 하며, 포장 외부 중 식별이 용이한 곳 또는 고객이 지정한 위치에 제품 식별표가 단단하게 부착되었는지를 검사해야 한다.

나) 포장 식별표에는 고객명, 제조사, 주소 및 연락처, 포장의 크기 및 중량, 공사명, 공사번호, 제품명, 제품번호, 포장검사 일자, 포장번호등 고객이 요구하는 사양이 최소한 명기되었는지를 검사 하고, 운반요령 식별 표시가 부착되었는지를 검사한다.

8.8.3 합격기준

가) 포장 외관에 손상 및 파손이 없어야 하며, 내부에는 유해한 이물질이 없어야 하며, 고객이 지정한 포장처리 요건(또는 등급)을 만족할 것.

나) 외부의 습기, 바람, 비등에 제품이 노출되지 않도록 포장의 상태는 찢어짐, 손상 및 파손등이 없이 단단하게 고정되어 있을 것.

다) 포장 식별표에는 고객명, 제조사, 주소 및 연락처, 포장의 크기 및 중량, 공사명, 공사번호, 제품명, 제품번호, 포장검사 일자, 포장번호 등 고객이 요구하는 사양이 최소한 명기되어 있어야 하며, 운반요령 식별표 또는 방법을

식별할 수 있는 식별표가 부착되어 있어야 한다.

[9] 기록

검사성적서는 발행되어야 하며 최소한 다음의 내용을 포함하여야 한다.

9.1 검사일 및 검사자의 서명

9.2 성적서 번호

9.3 검사결과

9.4 시험대상품 이름 및/또는 번호

9.5 요구되는 경우 프로젝트 명 및 번호

9.6 검사장비명 및 S/No.

주 의

1. 이 보고서는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 건설기술연구개발사업의 최종 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 건설기술연구개발사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.

본 보고서와 관련하여 문의를 원하시는 분은 아래의 문의처로 연락을 주시기 바랍니다.

■ **문의처 : 한국건설교통기술평가원** TEL 031)389-6452
(재)포항산업과학연구원 TEL 031)370-9556
(주)동일고무벨트 TEL 051)520-9000
(주)우진 TEL 031)379-3422

R&D / 06건설핵심 D13

에너지흡수효율 극대화를 위한 면진장치 및 최적 면진구조 설계기술 개발

■ 발행일 / 2009. 12. 16.

■ 발행처 / (재) 포항산업과학연구원 강구조연구소 건축해양본부
경기도 화성시 동탄면 영천리 79-5
TEL : 031) 370-9556

■ 인쇄처 / (재)포항산업과학연구원