

17CTAP
-C114966
-02

보안 과제(), 일반 과제(○) / 공개(○), 비공개()발간등록번호()
국토교통기술촉진 사업 제2차 연도 최종 보고서

R&D / 17CTAP-C114966-02

수직방진 및 수평면진을 융합한 3차원
면진장치 개발 최종 보고서

2019
국토교통과학기술진흥원
국토교통부

수직방진 및 수평면진을 융합한 3차원 면진장치 개발 최종보고서

2019.2.11.

주관연구기관 / 단국대학교 산학협력단

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통과학기술진흥원 귀하

‘수직방진 및 수평면진을 융합한 3차원 면진장치개발’(연구개발 기간 : 2016.10.24. ~ 2018. 12.23.) 과제의 최종보고서 2부를 제출합니다.

2019. 2. 11.

주관연구기관명 : 단국대학교 산학협력단 (대표자) 황 석 호 (인)

주관연구기관책임자: 허 무 원



국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	16CTAP -C114966-01	해당 단계 연구 기간	2017.6.24. - 2018.12.23	단계구분	(해당단계)/ (총단계)
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명	창의도전연구			
연구과제명	대과제명	수직방진 및 수평면진을 융합한 3차원 면진장치개발			
	세부과제명	수직방진 및 수평면진을 융합한 3차원 면진장치개발			
연구책임자	허무원	해당단계 참여연구원 수	총: 4 명 내부: 4 명 외부: 명	해당단계 연구비	정부:50,000천원 민간: 천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계:50,000천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 4 명 내부: 4 명 외부: 명	총 연구비	정부:70,000천원 민간: 천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계:70,000천원
연구기관명 및 소속 부서명	단국대학교 산학협력단			참여기업명	
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위탁연구	연구기관명:			연구책임자:	

※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음

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

9대 성과 등록·기탁번호

구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설 · 장비	기술요약 정보	소프트 웨어	화합물	생명자원		신품종	
								생명 정보	생물 자원	정보	실물
등록·기 탁 번호	2	1(2)	1			1					

국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

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

요약(연구개발성과를 중심으로 개조식으로 작성하되, 500자 이내로 작성합니다)

보고서 면수

요약문

연구의 목적 및 내용	수직진동을 저감할 수 있는 방진기능과 설계지진력을 저감할 수 있는 면진기능을 함께 가진 3축 면진장치 개발 - 교통진동원의 진동전달 특성 저감 소재를 검토 - 기존의 적층고무면진장치의 상부 또는 하부에 별도의 방진패드를 추가하는 방안을 검토 - 방진패드 부분이 수평으로 이동하는 것을 방지하기 위한 시스템을 검토 - 건물의 연직하중을 안정적으로 지지하면서 방진기능이 우수한 소재 검토 및 분석 - 고무의 전단탄성계수 조절에 따른 방진효과를 검토 - 고무층 두께에 따른 방진효과를 검토 - 도로교통, 지하철, 철로변 등 도심지에서의 주요 불편 진동원 따른 구조물의 미치는 영향을 비선형 동적해석을 통해 검토 - 개발된 3차원 면진장치를 비선형 동적해석을 통하여 검증 - 탄성해석 프로그램을 비선형 해석 프로그램으로 변환하는 소프트웨어 개발 - 교통진동에 대한 수직진동 저감효과를 검증 - 면진층 상부 구조물의 가속도 및 설계지진력 저감효과를 검증 - 면진장치 시공 및 이송 중 발생할 수 있는 인장하중을 방지할 수 있는 장치 개발 - 기존 장치들 대비 비용을 절감효과를 검증 - 3축 면진장치 시공 매뉴얼 작성				
연구개발성과	- 다기능 융복합 방진 및 면진장치를 개발 및 특허출원 - 비선형 동적해석을 통한 방진 및 면진장치의 성능 평가 - 방진 · 면진장치 품질관리 시공 매뉴얼 작성 - 면진장치 인장방지용 장치 개발, 특허출원 및 특허등록 - 수직증축 리모델링 공동주택의 면진 적용성 평가 및 최적 주기 산정 논문 게재 - 마이더스 탄성해석 프로그램을 비선형 동적해석 프로그램으로 변환하는 소프트웨어 개발 및 소프트웨어 등록				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	1) 활용계획 - 철도부지 및 인공지반을 활용한 신축 건물 시공시의 방진 및 면진시스템으로 활용. - 건축물의 리모델링 수직증축 시 방진 및 면진시스템으로 활용. - 탄성해석 프로그램을 활용한 비선형 동적해석 프로그램 모델링 시 활용 - 면진장치를 적용한 수직증축 리모델링 공동주택의 최적 면진주기 산정 시 활용 2) 기대효과 - 인공지반 및 철도부지의 활용에 의한 도심건축의 활성화 및 건설 제비용의 감소 효과 - 면진장치 적용에 의한 지진하중의 감소로 인한 면진층 상부 골조물량 감소 효과 - 방진 및 면진과 관련된 국내 기술선도 및 해외 유수업체와의 경쟁력 확보 - 선진국의 방진 및 면진분야에 대한 동등한 기술력확보를 통한 국가이미지 제고 - 3차원 면진시스템의 해외특허를 통한 시장진출 - 건물의 사용성 증진과 내진안정성을 동시에 확보하여 삶의 질 향상시킴 - 건물의 지진피해 저감 기술 적용으로 장수명화에 기여함				
국문핵심어 (5개 이내)	방진장치	교통진동	거주성향상	면진장치	시공매뉴얼
영문핵심어 (5개 이내)					

< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요	5
가. 면진관련 국내외 현황	5
나. 각 장치별 특징 분석	9
다. 교통진동	21
라. 구조물 손상가능성 평가기준	22
마. 바닥슬래브의 사용성 기준	26
바. 수직증축 리모델링 시 면진시스템 적용성 평가	32
2. 연구수행내용 및 성과	34
가. KBC2016에 따른 면진시스템 설계 절차	34
나. 면진시스템 적용성 평가	41
다. 3축 면진장치를 적용한 건축물의 수직 및 수평 해석 평가	65
라. 연구개발 성과	137
마. 연구결과	143
3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	144
4. 연구개발성과의 활용 계획 등	146
붙임. 참고 문헌	147

1. 연구개발과제의 개요

가. 면진관련 국내외 현황

(1) 국내현황

국내 면진장치 대부분이 토목구조물에 적용된 반면 건축분야의 시장은 아직 적용 초기단계이다. (사)한국면진제진협회가 국내 면진시장 동향을 분석한 결과, 시장의 형성은 아직까지 토목구조물에 의존하고 있으며 그 규모가 연간 약 800억 원에 이르는 것으로 조사됐다(한국건설기술연구원-지식경제부-지진재해 저감 기술 현황조사보고서, 2009). 2004년 이후 건축물의 경우 매년 2~3개동 정도 설계가 되고 있으며, 최근 동일본대지진 이후 중요시설물에 설계적용 검토를 위한 움직임이 활발한 실정이다. 면진 시공의 경우 2012년 이후 매년 1개동 이상씩 건설되고 있는 실정이다.

한국과학기술정보연구원(KISTI)는 최근 10년간 전 세계 공학 논문 약 2,000만 건의 빅 데이터 자료 분석을 토대로 “스마트 면진 시스템”을 미래 유망 기술의 하나로 선정했다. 면진기술은 사회기반시설 같은 구조물은 물론 박물관 내 문화유산·예술작품과 통신·전산장비 시스템 보호 등에도 폭넓게 보급될 전망이다(한국과학기술연구원, 2012.7.27. Vol.290).

〈표 1-1〉 면진 및 제진 관련 설계 제작회사

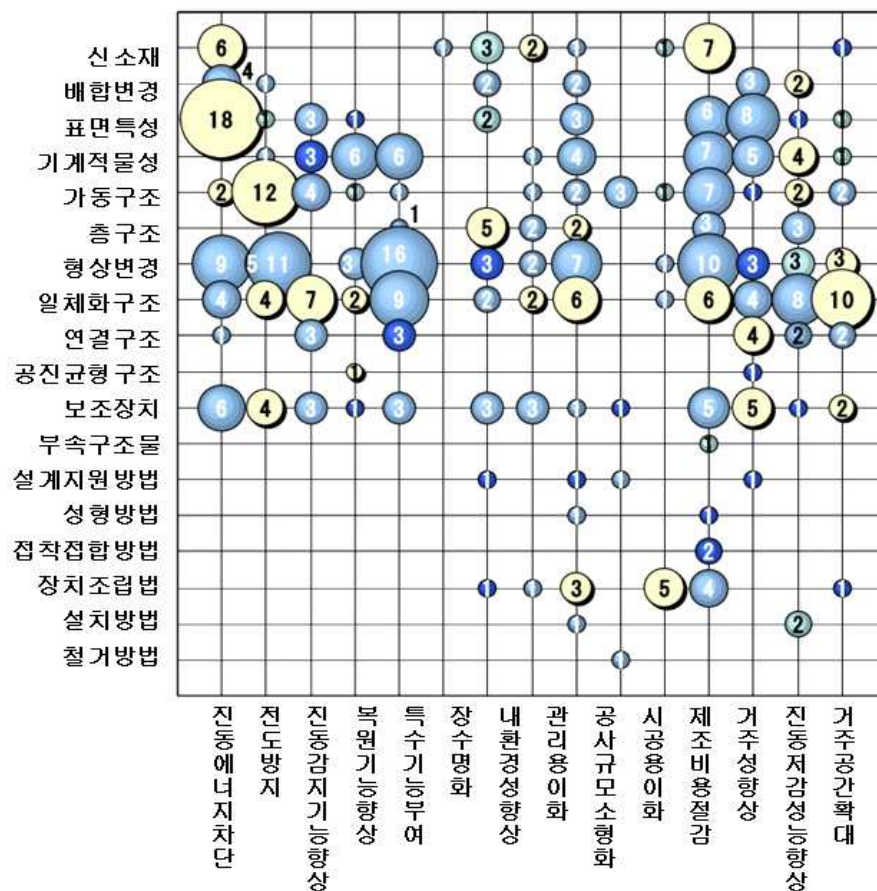
회사명	업체별 능력	비 고
DRB동일	면진고무개발, 면진, 제진 시공기술 보유	건축용 면진장치 및 제진장치, 엔지니어링
에코닝(주)	정보통신시설 면진장치 제작 및 시공	장비면진, Floor 면진, 면제진 엔지니어링
면진테크	면진테이블 개발	장비면진
삼익THK	면진시스템 (SSI) 개발	산업용리니어가이드
티이솔루션	진동제어 및 풍동분야 선두기업	풍진동 제어 설계 및 제진장치 제작
유니슨이엔씨	면진장치 및 제진장치 개발 및 시공	건축, 토목용 적층고무장치 제작

국내의 면진 혹은 진동제어 관련 연구자 및 인프라는 일본 및 미국 등과 비교하여 크게 부족한 수준이다. 1997년~2008년(발행년도 기준)에 세계에서 발행된 “면진·제진 시스템”에 관한 논문 6,310건 중 3,800건을 조사 대상으로 하여, 국적별 논문 발행 건수를 조사한 결과, 논문 발행 건수는 일본의 연구자 소속 기관이 2,426건으로 제일 많았으며, 그 다음으로 미국 461

건, 대만 96건, 중국 90건, 한국 87건의 순으로 나타났다. 상기의 기술 범위의 문헌 3,800건 가운데, 국제 중요 잡지인 6개 잡지, 537건 문헌을 대상으로 국적별 논문 발행 건수를 조사한 결과, 논문 발행 건수는 미국국적의 연구자 소속 기관이 202편으로 가장 많고, 그 다음으로 일본 50편, 대만 42편, 중국 38편, 이탈리아 25편, 인도 24편, 한국 19편의 순이었다.

<표 1-2> 면진 관련 국내 인프라 수준

인프라 항목	선진국 대비 인프라 수준				
	부족	다소 부족	동등	우월	보다 우월
연구시설 및 인프라		○			
연구 및 생산설비	○				
연구인력		○			
산업기술인력		○			
산학연 공동 연구기반		○			
국제기술협력기반		○			
정보화			○		



[그림 1-1] 면진장치의 특허기술 분석

〈표 1-3〉 면진관련 특허출원 동향

기술 분류	검색 Keyword	특허출원 동향	기술선진국
3차원 면진장치 (Floor, 부분 면진, 기기 면진)	3차원 면진장치 3차원 면진구조 3차원 면진기술	631건	일본(533건) 중국(24건) 미국(18건)
면진장치/구조	면진장치, 면진구조, 면진기술	9,162건	일본(7860건) 미국(375건) 중국(227건)

“3차원 면진” 관련 논문은 면진관련 다른 분야보다 적은 편이다. 총 140건의 논문 중 일본이 69.3%(97편)로 가장 많았으며, 미국 11.4%(16편), 한국 4.3%(6편), 유럽 4.3%(6편), 중국 0.7%(1편), 기타 10.0%(14편)순으로 나타났다. 면진관련 연구의 주요 테마는 ① 액티브 제진 기술, ② 3차원 면진 기술, ③ 기계 설비의 면진·제진 기술, ④ 저비용 기술로 조사되었다. 1997~2007년 기간 동안 개발된 특허수를 비교할 때 3차원 면진 분야에서 전체 631건의 특허 중 한국이 16건(2.0%)으로 기술개발 수준이 해외선진국에 비해 많이 부족한 것으로 나타났다.

(2) 해외현황

(가) 미국(1984년 이후)

건축 토목 분야에서의 지침 등이 존재하며, 운용은 각 관할에 의해서 행해지고 있다. 예를 들면 CALTRANS(캘리포니아주 운수국)에서의 면진 장치 기준 또는 품질관리 규정은 AASHTO(미국 도로교 표준 시방서)의 가이드라인에 따르지만, 테스트를 실시하는 경우 제조사의 자주 테스트와 UCSD(University of California, San Diego)의 시험 설비를 이용한다. 적용현황은 건축물에 약 80개동, 교량에 약 150개 이상 적용되었다.

(나) 중국

면진용 적층 고무의 국가 규격, 지진 대책용 고무 지승(支承, Support)의 국가 규격을 제정하였지만, 일본과 같은 인정 제도는 없다. 적용현황은 건축물에 약 1,000~1,500개동 적용되었다.

(다) 일본(1983-2015년)

면진·제진 시스템 기술은 장치 제조사나 설계, 시공을 하청 받은 종합건설업 자가 주로 개발하고 있다. 대규모 기업이 개발을 실시하는 경우가 많지만, 일부 벤처기업(대학의 지적재산을 기본으로 한 벤처 등) 등도 참여하는 경우도 있다. 건축 용도로는 대규모 고층 아파트부터

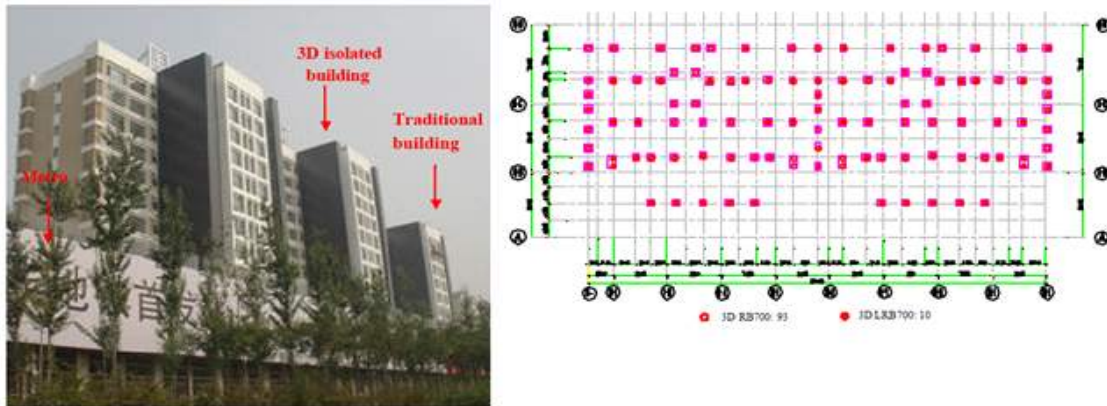
소규모의 단독주택, 병원이나 학교, 미술관 등에, 토목 용도로는 교량, 항만 시설, 공항시설, 원자력 발전소 등에 면진·제진 기술을 적용되고 있다. 건축 분야, 토목 분야에서의 면진에 관한 기술기준 등은 면진 구조의 보급에 수반해, 기술적인 기준이나 매뉴얼이 작성되어 면진 구조 채용을 위한 절차가 정비되어 왔다. 건축 분야에서는 2000년에 건설성(현 국토교통성)에 의해 건축기준법 개정과 관련 고시가 교부되어 일정 조건을 갖춘 면진 건축물이면 일반 확인만으로 건축이 가능하게 되는 등 면진설계 및 절차가 간소화되었다. 적용현황으로는 건축물 및 거주시설의 면진장치 적용은 약 5,000건 이상이며 연평균 6,000개 이상의 면진장치를 제조하고 있다

〈표 1-4〉 세계시장을 선도하는 주요 회사

회사명(국적)	업체별 능력	비 고
DIS(미국)	천연고무계, 납삽입적층고무 등	미국면진장치선도
Bridge Stone(일본)	천연고무계, 고감쇠적층고무 등	대형장치, 고감쇠적층고무
Oiless(일본)	천연고무계, 납삽입적층고무, 미끄럼장치 등	천연고무계적층고무
Alga(이탈리아)	천연고무계, 납삽입적층고무, 미끄럼장치 등	유럽면진장치선도
Vibrotech(중국)	천연고무계, 납삽입적층고무 등	중국면진장치선도

〈표 1-5〉 해외 입체도시 개발 사례(입체도시계획 활용방안 연구, 박신영, 주택연구원)

입체화 대상	사례	면적(규모)	사업연도	사업대상자
철도	쿨롱베이 아파트(홍콩)	부지 10ha 주거 26층 12개동 / 11층 29개동	1979	민간
	도쿄 니시다이 주택단지(일본)	부지 36,000m ² / 주거 1,502세대	1973	공공
도로	듀프레 니시다이와 단지(일본)	주거 1,427세대	1995	공공
	뉴욕 와시브릿지아파트(미국)	부지 1.17ha 주거 32층 960세대	1960	공공+민간
	슈랑겐바더슈트라쎄(독일)	부지 88000m ² / 주거 14층 2개동	1969	공공



[그림 1-2] 배경역사 적용 예

나. 각 장치별 특징 분석

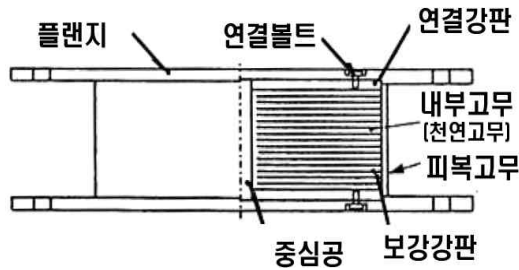
(1) 적층 고무계 면진장치

적층 고무계 면진장치는 사용하는 내부고무재료와 구조 등의 차이에 의해 많은 종류로 분류되고 있다. 내부고무에 천연고무를 사용한 천연 고무계 면진장치(NRB, Natural Rubber Bearing), 적층고무의 중심부에 원주상의 납을 삽입한 납 플러그 삽입 면진장치(LRB, Lead Rubber Bearing), 내부고무에 감쇠성이 큰 고무를 사용한 고감쇠 면진장치(HDRB, High Damping Rubber Bearing)의 3종류가 주를 이루고 있다. 아래에 각 면진장치의 특징을 기술하였다.

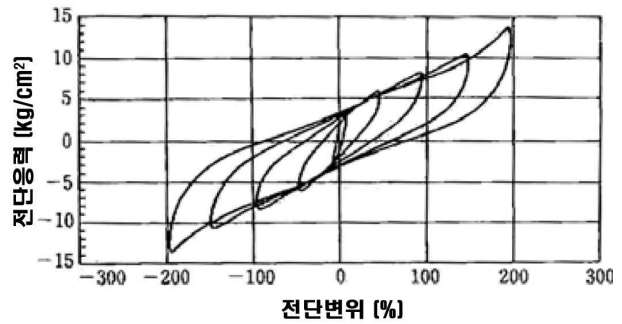
(가) 고감쇠 면진장치 (HDRB : High Damping Rubber Bearing)

고감쇠 면진장치(HDRB)는 감쇠성이 높은 특수배합의 고무재료를 내부고무로써 사용한 것으로, 스프링 기능과 함께 에너지 흡수기능을 동시에 가지고 있는 면진장치이다. 고무재료는 천연고무를 주체로 한 것에 특수한 충전제, 보강제, 수지 등을 배합한 것으로 분자간의 점성 감쇠요소, 마찰 감쇠요소를 부여한 것이다. 댐핑기능 일체형이기 때문에 공간을 줄일 수 있다는 시공 상의 이점도 있다. 고감쇠 면진장치의 구조와 이력곡선을 그림에 나타내었다.

이력특성은 여러 사이클 이후 안정된 특성을 나타내지만, 천연 고무계 면진장치와 비교하면 온도, 진동수, 변형량, 변위이력에 대한 의존성이 일반적으로 크다. 또 작은 진폭시의 강성이 높고 진폭이 커짐에 따라 등가강성, 등가감쇠정수가 함께 작아져 간다. 감쇠특성에 대한 평가 방법으로는 등가감쇠정수로써 평가하는 방법과 이력형으로서 복원력특성을 설정하는 방법 등이 있다. 후자의 경우에는 수정 바이리니형(Modified Bilinear) 모델이 사용되는 경우가 많다. 고무배합에 의해 성능이 달라질 수 있기 때문에 각 메이커 마다 여러 가지 모델이 제안되고 있다.



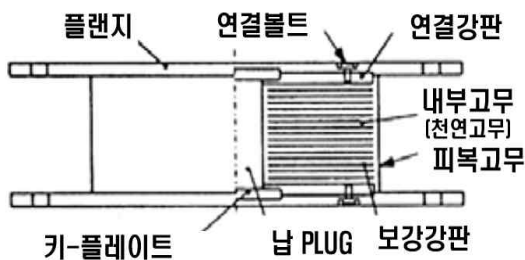
[그림 1-3] 고감쇠 변진장치 구조



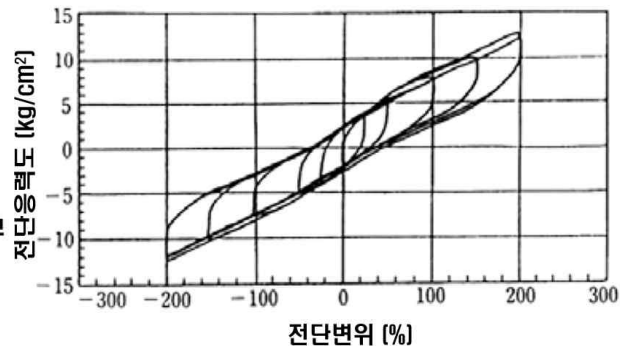
[그림 1-4] 고감쇠 변진장치 이력곡선

(나) 납 삽입 변진장치 (LRB : Lead Rubber Bearing)

납 삽입 변진장치(LRB)는 천연 고무계 변진장치의 중앙부에 만들어진 원주상의 구멍에 납을 삽입한 것으로, 에너지를 흡수하는 댐퍼를 내장한 천연 고무계 변진장치라고 할 수 있다. 댐퍼 내장형이기 때문에 공간을 줄일 수 있다는 시공상의 이점을 가지고 있다. 납 삽입 변진장치의 구조와 이력곡선을 그림에 나타내었다. 납 삽입 변진장치의 이력특성은 변진장치의 수평강성과 납의 이력특성의 조합으로써 나타나며, 전단응력 8.0~8.5 MPa 정도에서 납이 항복하고 그 이상에서는 적층고무에 의하여 수평강성이 발현된다. 한편 납은 소성변형에 의해 분자구조가 파괴되어도 냉각되면서 재결정화 되기 때문에 손상이 발생하지 않는다는 특징이 있다. 응답해석에서는 이력곡선을 수정 바이리니어형(Modified Bilinear)으로써 모델화하는 경우가 많으나 바이리니어형(Bilinear)으로 모델화 하는 경우도 있다.



[그림 1-5] 납 삽입 변진장치 구조



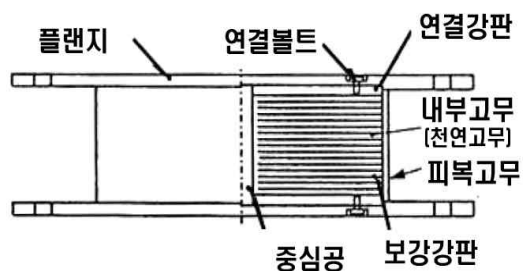
[그림 1-6] 납 삽입 변진장치 이력곡선

(다) 천연 고무계 변진장치 (NRB : Natural Rubber Bearing)

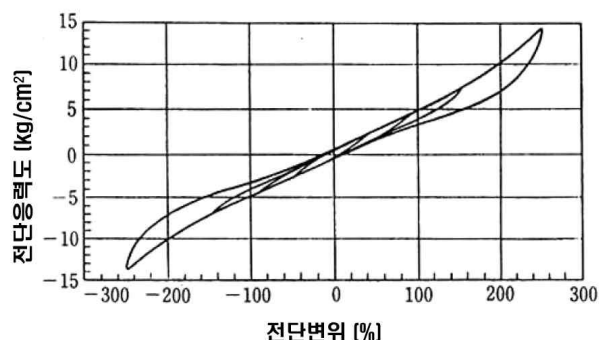
천연고무(NRB)는 뛰어난 고무탄성과 기계적 강도를 가지며, 온도변화에 의한 물성변화가 작은 재료로써 이것을 내부고무로서 사용한 것이 천연 고무계 변진장치(NRB)이다. 그러므로 천연 고무계 변진장치는 선형성 높은 수평방향의 강성을 가지며, 신장특성 및 내 클리프성이 뛰어나고 온도에 대해서 특성변화가 적은 특징이 있다.

천연 고무계 변진장치의 구조와 이력곡선을 그림에 나타내었다. 이력루프의 면적은 작고,

감쇠성능은 거의 없다. 등가감쇠 정수는 고무배합에 의해 달라지지만 대개 2~3% 이하이다. 그 때문에 면진부재로서 기능을 발휘하기 위해서는 에너지 흡수 부재로써 댐퍼가 필요하다. 천연 고무계 면진장치의 이력특성은 압축력의 변화와 변위이력에 대한 의존성이 거의 없고 극소변형에서 큰 변형에 이르기까지 안정된 스프링 특성을 가지고 있기 때문에 해석을 위한 모델화가 간단하고 선형스프링으로써 취급되는 경우가 많다. 따라서 천연 고무계 면진장치는 댐퍼와 적절한 조합에 의해서 면진층의 이력특성을 설계자의 의도대로 설정하는 것이 가능하다.



[그림 1-7] 천연 고무계 면진장치 구조



[그림 1-8] 천연 고무계 면진장치 이력곡선

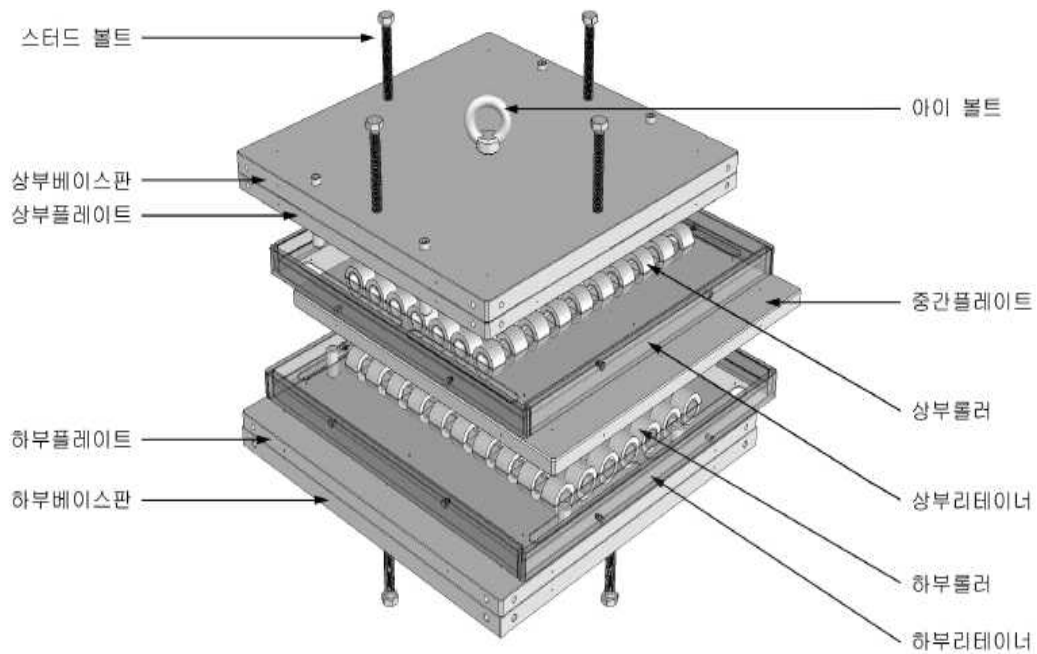
(2) 비 적층 고무계 면진장치

비 적층 고무계 면진장치는 주 재료가 대부분 Steel 이며 이 장치들은 대부분 낮은 마찰계수와 인발에 저항 할 수 있도록 만들어졌다. Roller Type 면진장치, Linear Type 면진장치 및 Ball Type 면진장치 3종류가 주류를 이루고 있으며, 아래에 각 면진장치들의 특징을 기술하였다.

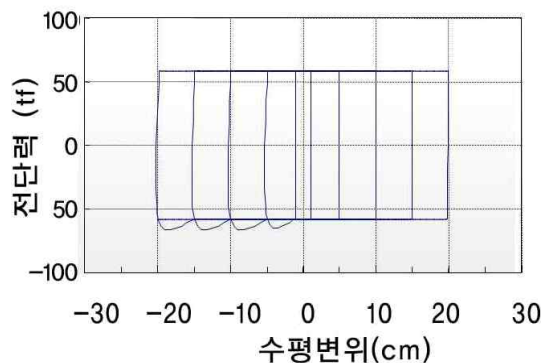
(가) Roller Type 면진장치 (IRB : Isolation Roller Bearing)

롤러형 면진장치인 IRB(Isolation Roller Bearing)는 중간 플레이를 중심으로 상부 플레이트와 하부 플레이트가 서로 직교되게 3단 적층 구조로 형성되고, 그 적층 결합단면에 롤러를 수납시켜 지진의 진동이 발생 방향에 따라 X, Y축으로 슬라이드 되는 방식으로 구성되어 있다. 현재 우리나라 면진시스템 생산 업체가 주로 제조하고 있는 면진시스템은 적층 고무계 면진장치로서 천연고무와 같은 합성고무와 철판을 교대로 쌓고 고온, 고압으로 접착한 장치이다.

하지만 적층 고무계 면진장치는 보편적으로 쓰이는 면진시스템이지만, 이 시스템의 성능을 고성능으로 가져가기 위해서는 면압(장치에 작용하는 수직하중의 양)을 충분히 확보해야 하는 어려움이 있다. 뿐만 아니라 수평방향 유효강성이 높아 상부구조물에 전달되는 지진에너지를 완벽히 차단하기에는 한계가 있을 수밖에 없다. IRB(Isolation Roller Bearing)는 기존 적층 고무계 면진장치보다 마찰계수가 10배 이상 작기 때문에 비교적 간단히 건물의 고유주기를 장주기로 이동시키는 보다 고성능의 면진효과를 발휘할 수가 있다.



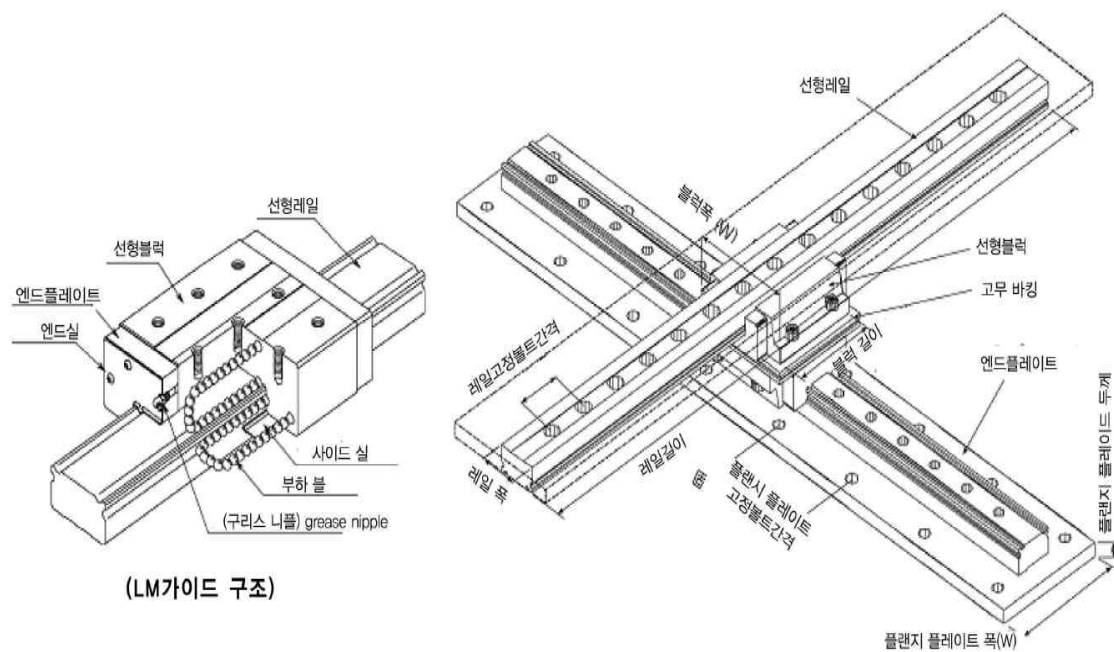
[그림 1-9] IRB 면진장치 구조



[그림 1-10] IRB 면진장치 이력곡선

(나) Linear Type 면진장치 (CLB : Cross Linear Bearing)

Linear Type 면진장치 중 대표적인 CLB(Cross Linear Bearing)는 왕복대 내의 볼 베어링이 전동면 활동을 요하는 것으로, 높은 지지하중과 초저마찰을 실현한 면진장치이다. CLB의 마찰 계수는 0.005정도로 매우 작기 때문에 응답속도, 응답 변위량, 진동수에 의존하지 않으므로 장 주기 설계가 가능하다. 또한 다른 면진장치에 없는 높은 인장 강도를 발휘하기 때문에 탑상비 등의 높은 건물에도 적용이 가능하다. 제품의 기본 구성은 그림과 같다.



[그림 1-11] CLB 면진장치의 구조

(다) Ball Type 면진장치 (BSB : Ball Steel Bearing)

Ball Type 면진장치는 그 구조 및 형식이 IRB와 거의 유사하며 특·장점으로는 작은 볼베어링으로 큰 하중을 받을 수 있다. 또한, 높은 인발강도를 발휘하기 때문에 탑상비가 높은 건물에 유리하며, 낮은 마찰계수를 가진다. 하지만 국내에서는 생산되지 않으며, 대부분 일본에서 수입한다. 그 가격 또한 상당히 고가이다.



[그림 1-12] SBB 면진장치의 구조

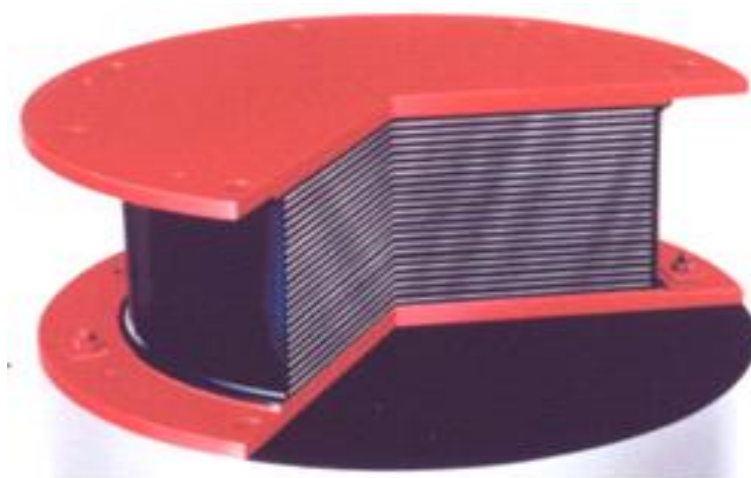
〈표 1-6〉 각 장치별 특징 비교

장치명		건축계획 장애요인	시공성	가격	교체비용	고성능 면진화	비고
적층 고무계 면진장치	고감쇠 면진장치	◎	○	△	○	○	국내생산
	납 삽입 면진장치	◎	○	◎	○	○	국내생산
	천연고무계 면진장치	◎	○	◎	○	○	국내생산
비적층 고무계 면진장치	Roller Type 면진장치	◎	○	△	△	◎	국내생산
	Linear Type 면진장치	○	△	△	△	◎	해외생산
	Ball Type 면진장치	△	○	×	×	◎	해외생산

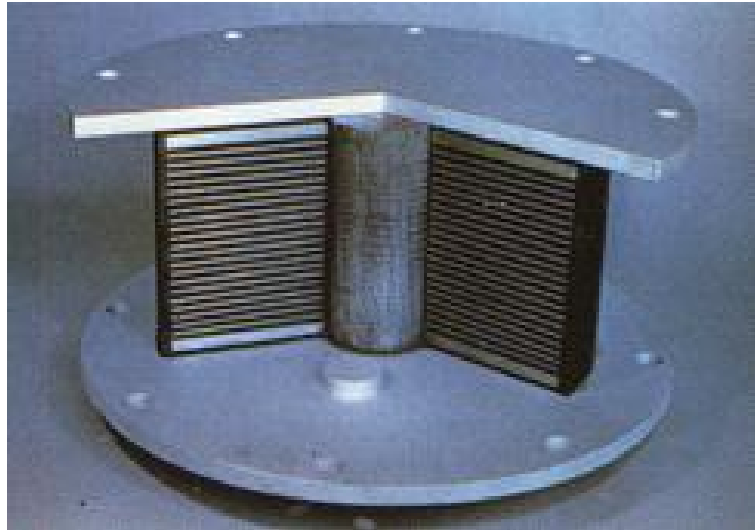
매우좋음(◎), 좋음(○), 보통(△), 나쁨(×)

(3) 고무층 두께에 따른 면진장치 특성

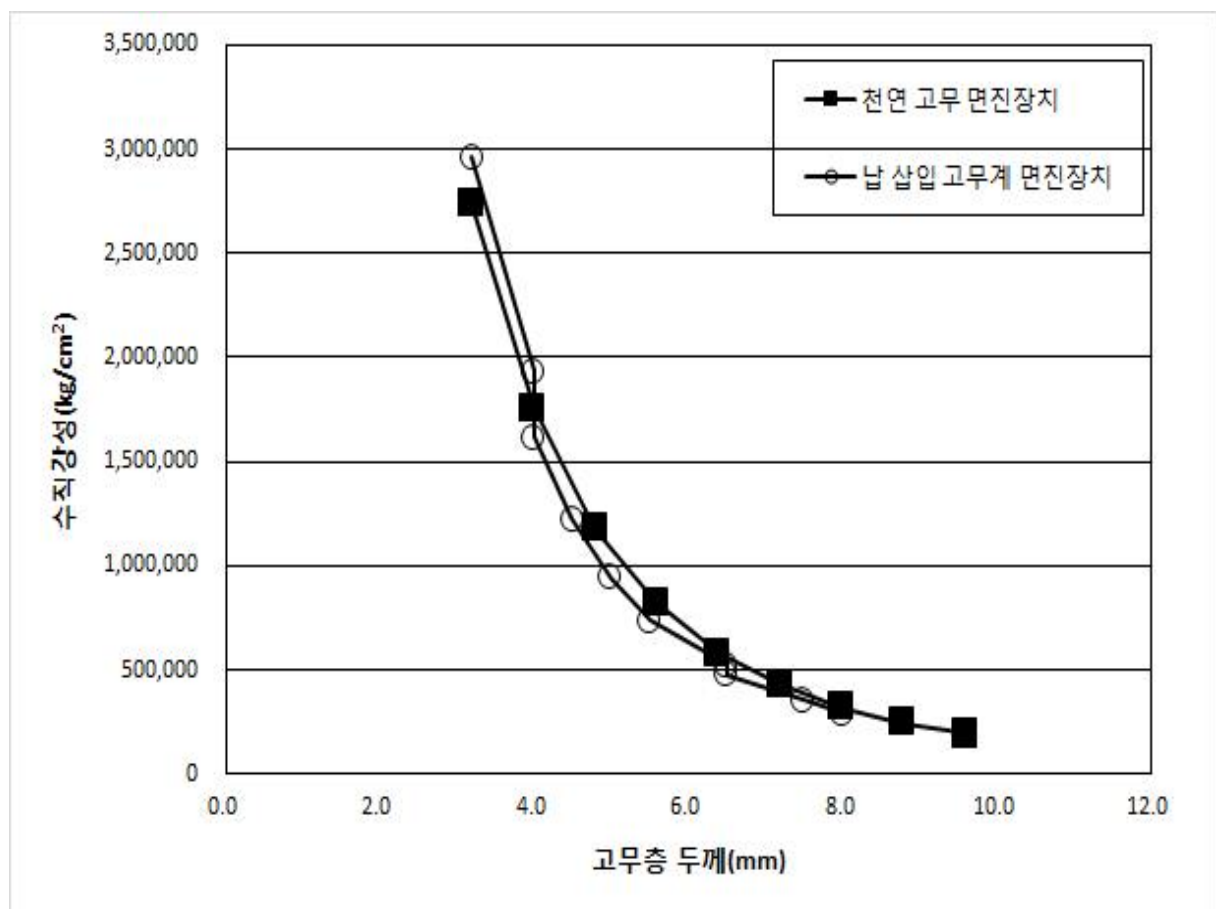
납 삽입 면진장치와 천연 고무계 면진장치에 대한 고무층 두께에 대한 각각의 특성치 값의 차이를 아래 〈표 1-7〉과 〈표 1-8〉에 나타내었다. 천연 고무계와 납 삽입 고무계 면진장치의 각각의 데이터를 활용하여 3축 면진장치 설계 시 설계 자료로 활용하고자 한다. 또한, 면진장치 단독의 경우 별도의 방진장치로 활용은 어려울 것으로 예상되지만, 방진설치 시 추가적인 효과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.



[그림 1-13] 천연 고무계 면진장치



[그림 1-14] 납 삼입 고무계 면진장치



[그림 1-15] 고무 1개 층 두께에 따른 면진장치의 수직강성 차이

〈표 1-7〉 천연 고무계 면진장치의 고무두께에 따른 특성

No.	항 목	기호	단 위	1	2	3	4	5
1	고무외경	D_o	mm	500	500	500	500	500
2	고무내경	D_i	mm	15	15	15	15	20
3	고무 단면적	A	mm^2	196172.83	196172.83	196172.83	196172.8	196035.4
4	고무 1층 두께	t_r	mm	3.2	4	4.8	5.6	6.4
5	고무 층수	n	ea	25	25	25	25	25
6	고무 총 두께	h	mm	80	100	120	140	160
7	내부강판두께	t_{ip}	mm	3.2	3.2	3.2	3.2	4.5
8	End PlateThk.	t_{ep}	mm	25	28	28	28	28
9	제품높이	H	mm	256.8	288.8	308.8	328.8	380
10	1차 형상계수	S1		37.89	30.31	25.26	21.65	18.75
11	2차 형상계수	S2		6.25	5.00	4.17	3.57	3.13
12	수직강성	K_V	kgf/cm	2738068	1754766	1176458	819254	579769
13	수평강성	K_H	kgf/cm	956.3	765.1	637.6	546.5	477.8
14	전단탄성계수	G	kgf/cm ²	3.9	3.9	3.9	3.9	3.9
15	종탄성계수	E_o	kgf/cm ²	11	11	11	11	11
16	체적탄성계수	E_∞	kgf/cm ²	20000	20000	20000	20000	20000
17	경도보정계수	k		0.8	0.8	0.8	0.8	0.8

No.	항 목	기호	단 위	6	7	8	9	10
1	고무외경	D_o	mm	500	500	500	500	500
2	고무내경	D_i	mm	20	25	25	25	25
3	고무 단면적	A	mm^2	196035.38	195858.67	195858.67	195858.7	195858.7
4	고무 1층 두께	t_r	mm	7.2	8	8.8	9.6	9.6
5	고무 층수	n	ea	25	25	25	25	27
6	고무 총 두께	h	mm	180	200	220	240	259.2
7	내부강판두께	t_{ip}	mm	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
8	End PlateThk.	t_{ep}	mm	32	32	32	32	32
9	제품높이	H	mm	416	436	456	476	504.2
10	1차 형상계수	S1		16.67	14.84	13.49	12.37	12.37
11	2차 형상계수	S2		2.78	2.50	2.27	2.08	1.93
12	수직강성	K_V	kgf/cm	428628	318842	246642	194387	179988
13	수평강성	K_H	kgf/cm	424.74	381.92	347.20	318.27	294.69
14	전단탄성계수	G	kgf/cm ²	3.9	3.9	3.9	3.9	3.9
15	종탄성계수	E_o	kgf/cm ²	11	11	11	11	11
16	체적탄성계수	E_∞	kgf/cm ²	20000	20000	20000	20000	20000
17	경도보정계수	k		0.8	0.8	0.8	0.8	0.8

〈표 1-8〉 납 삽입 고무계 면진장치의 고무두께에 따른 특성

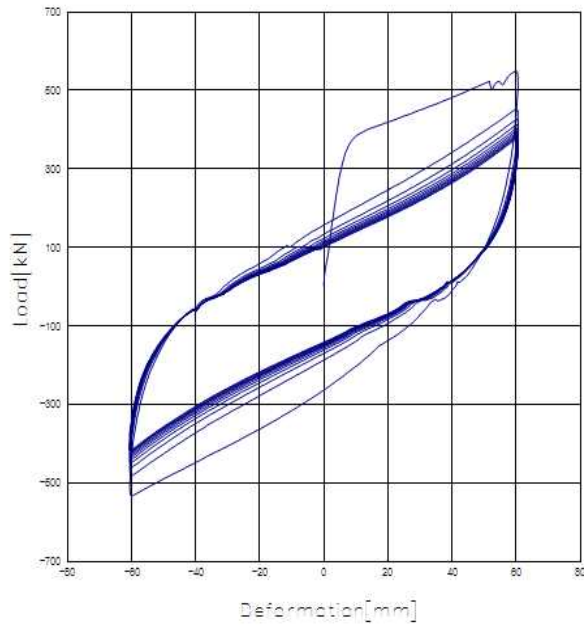
No.	항 목	기호	단 위	1	2	3	4	5
1	고무외경	D_o	mm	500	500	500	500	500
2	고무내경	D_i	mm	70	90	105	125	145
3	고무 단면적	A	mm^2	192501	189988	187691	184078	179837
4	고무 1층 두께	t_r	mm	3848	6362	8659	12272	16513
5	고무 층수	n	ea	3.2	4	4	4.5	5
6	고무 총 두께	h	mm	25	25	30	31	32
7	내부강판두께	t_{ip}	mm	80	100	120	139.5	160
8	End PlateThk.	t_{ep}	mm	3.2	3.2	3.2	3.2	4.5
9	제품높이	H	mm	25	28	28	28	28
10	1차 형상계수	S1		256.8	288.8	324.8	347.5	411.5
11	2차 형상계수	S2		39.1	31.3	31.3	27.8	25.0
12	수직강성	K_V	kgf/cm	6.25	5.00	4.17	3.58	3.13
13	수평강성	K_H	kgf/cm	2959335	1935390	1612825	1222777	941332.2
14	전단탄성계수	G	kgf/cm ²	1318.3	1410.0	1531.4	1827.5	2203.3
15	종탄성계수	E_o	kgf/cm ²	3.9	3.9	3.9	3.9	3.9
16	체적탄성계수	E_∞	kgf/cm ²	11.7	11.7	11.7	11.7	11.7
17	경도보정계수	k		20000	20000	20000	20000	20000

No.	항 목	기호	단 위	6	7	8	9	10
1	고무외경	D_o	mm	500	500	500	500	500
2	고무내경	D_i	mm	160	180	200	220	240
3	고무 단면적	A	mm^2	176243	170903	164934	158336	151111
4	고무 1층 두께	t_r	mm	20106	25447	31416	38013	45239
5	고무 층수	n	ea	5.5	6.5	6.5	7.5	8
6	고무 총 두께	h	mm	33	31	34	32	33
7	내부강판두께	t_{ip}	mm	181.5	201.5	221	240	264
8	End PlateThk.	t_{ep}	mm	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
9	제품높이	H	mm	32	32	32	32	32
10	1차 형상계수	S1		453.5	464.5	497.5	507.5	536
11	2차 형상계수	S2		22.7	19.2	19.2	16.7	15.6
12	수직강성	K_V	kgf/cm	2.75	2.48	2.26	2.08	1.89
13	수평강성	K_H	kgf/cm	734806.2	524648.6	478356.1	354760.2	291166.3
14	전단탄성계수	G	kgf/cm ²	2518.6	3030.8	3613.9	4265.9	4975.7
15	종탄성계수	E_o	kgf/cm ²	3.9	3.9	3.9	3.9	3.9
16	체적탄성계수	E_∞	kgf/cm ²	11.7	11.7	11.7	11.7	11.7
17	경도보정계수	k		20000	20000	20000	20000	20000

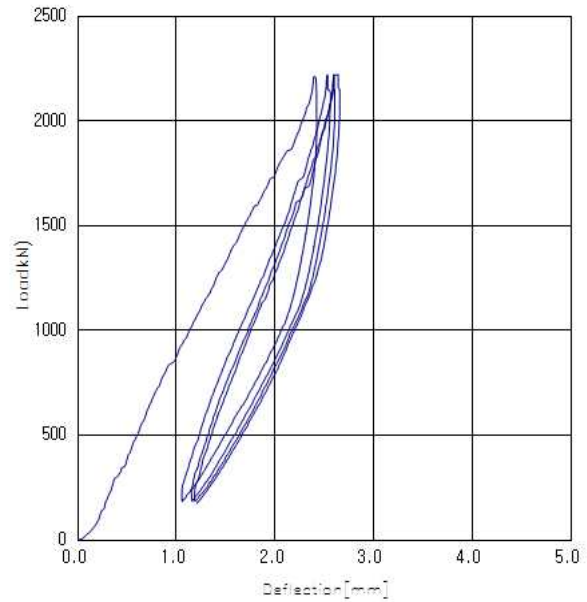
(4) 고감쇠 고무 재료 시험

(가) $400 \times 500 \times 116$ T(60mm) - 100% 가력 시 재료 시험 결과 - 1차 시험

60mm 가력 시 고감쇠 고무의 K_{eff} 는 3.459kN/mm이고 에너지소산면적은 15449.1kN·mm으로 나타났다. 감쇠비는 약 19.35%로 나타났다.



전단하중 재하시험

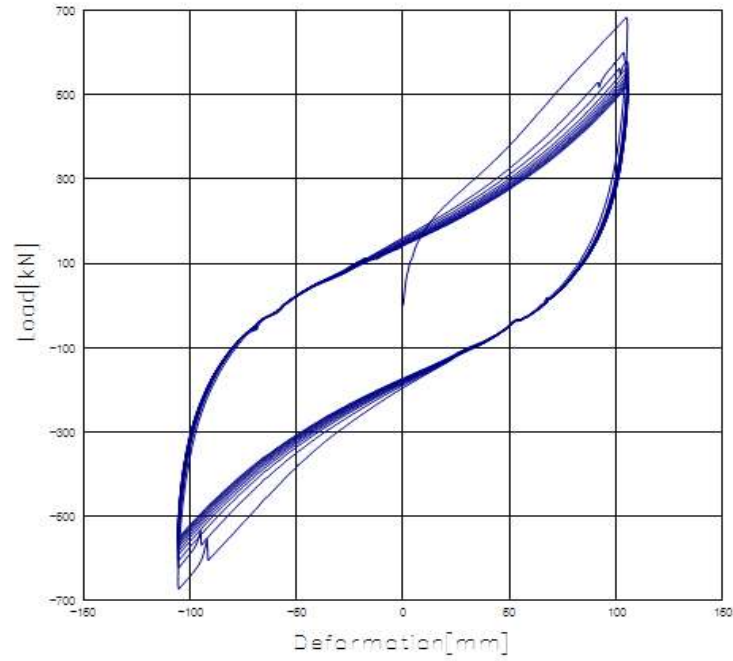


압축시험

NO.	K_{eff}	EDC	감쇠비
	kN/mm	kN·mm	%
01	4.472	25912.0	25.16
02	3.858	18641.5	20.98
03	3.658	16946.1	20.07
04	3.550	16077.8	19.66
05	3.479	15534.9	19.38
06	3.426	15149.8	19.20
07	3.383	14842.1	19.04
08	3.350	14605.9	18.93
09	3.322	14402.4	18.85
10	3.292	14239.6	18.75
11	3.273	14050.9	18.64
ave.	3.459	15449.1	19.35

(나) 400×500×116T(60mm) - 175% 가력 시 재료 시험 결과 - 1차 시험

105mm 가력 시 고감쇠 고무의 K_{eff} 는 2.658kN/mm이고 에너지소산면적은 34039.1kN·mm으로 나타났다. 감쇠비는 약 18.3%로 나타났다.

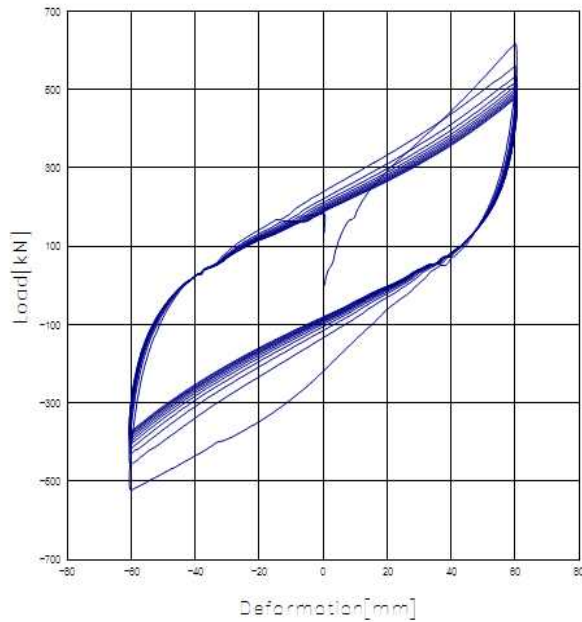


전단하중 재하시험

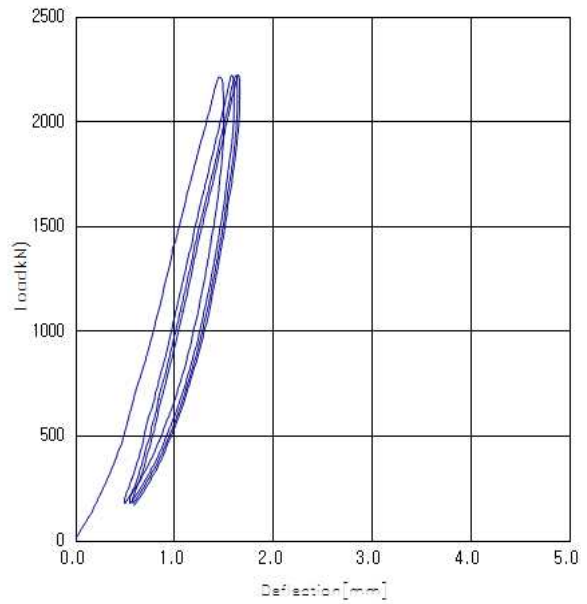
NO.	K_{eff}	EDC	감쇠비
	kN/mm	kN·mm	%
01	3.212	40916.0	18.22
02	2.894	37330.7	18.43
03	2.801	35854.6	18.28
04	2.732	34937.1	18.28
05	2.680	34389.9	18.33
06	2.642	33879.8	18.34
07	2.610	33447.2	18.32
08	2.586	33108.4	18.31
09	2.564	32763.2	18.28
10	2.545	32479.5	18.25
11	2.527	32201.2	18.22
ave.	2.658	34039.1	18.30

(다) 400×500×116T(60mm) - 100% 가력 시 재료 시험 결과 - 2차 시험

60mm 가력 시 고감쇠 고무의 K_{eff} 는 3.459kN/mm이고 에너지소산면적은 15449.1kN·mm으로 나타났다. 감쇠비는 약 19.35%로 나타났다.



전단하중 재하시험

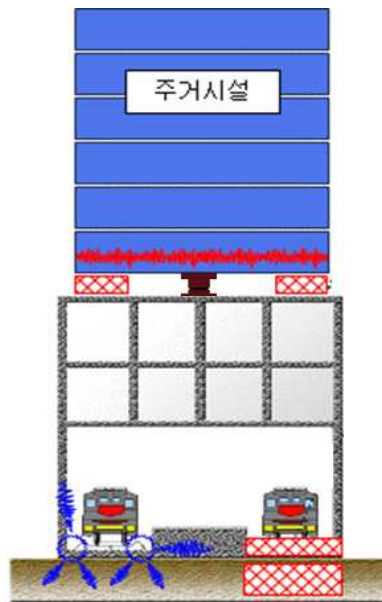


압축시험

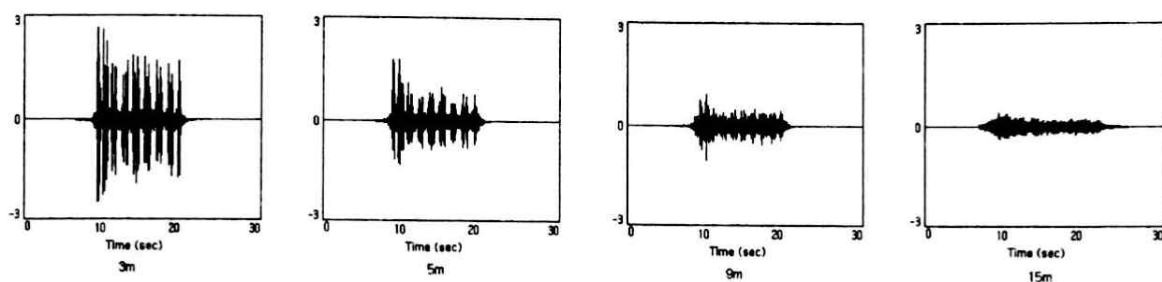
NO.	K_{eff}	EDC	감쇠비
	kN/mm	kN·mm	%
01	4.710	23252.3	21.46
02	4.196	20507.1	21.22
03	3.976	18842.4	20.61
04	3.855	17900.1	20.19
05	3.774	17249.1	19.88
06	3.707	16793.8	19.70
07	3.652	16430.0	19.56
08	3.607	16133.5	19.45
09	3.572	15880.5	19.33
10	3.538	15674.6	19.26
11	3.510	15483.0	19.18
ave.	3.739	17089.4	19.84

다. 교통진동

철도진동의 특성은 열차의 통과 시에 나타나는 현상으로서 간헐적으로 열차의 운행횟수에 따라서 반복하여 생기는 지반진동이다. 철도진동의 발생원인은 차륜 중량의 반복, 즉 열차의 차륜이 지상의 특정점을 통과함에 따라 생기는 주기적인 재하현상에 따르는 것이며, 그 주기는 차축간격과 열차속도에 관계된다. 철도 진동의 주된 발생요인은 차륜무게의 반복에 의한 것이며, 차량, 궤도, 구조물, 기초, 지반, 건물 등이 있으며 이들이 복합적으로 합쳐져서 발생한다.



[그림 1-16] 철도진동에 의한 진동전파



[그림 1-17] 철도진동의 시간응답곡선

열차진동에 의한 파형은 열차의 속도와 지반의 특성에 의한 약간의 거리감쇠 차이는 있지만, 전반적으로는 큰 차이가 없음을 알 수 있으며, 철도 진동이 유사정상진동임을 감안할 때 열차가 측정지점을 통과하여 열차의 진동에너지 특성이 최대값을 기록하는 약 10초 동안의 진동이 가장 문제가 된다고 판단된다.

라. 구조물 손상가능성 평가기준

(1) 진동의 허용한계

진동피해를 평가하는데 기준이 되는 진동의 허용한계는 <표 1-9>와 같이 입자의 가속도, 입자의 속도, 그리고 입자의 변위 중 하나를 선택하여 정하고 있다.

<표 1-9> 건물에 대한 진도에 허용한도

구 분		최대진폭	허용진폭	제안자
변위로 규정되는 곳	보통 강도의 건물	0.203 mm	0.067 mm (최대진폭의 1/3)	R. Westwater
	특히 강한 건물	0.406 mm	0.135 mm	
	설비나 기초구조	-	0.406 mm	A. G. Reid
	소량의 피해는 대단한 곳이 아닌 곳	-	0.406 mm	
	주택 및 건물	-	0.203 mm	
	교회, 오래된 기념관	-	0.127 mm	
진동속도로 규정되는 곳	전혀 손상없음	-	5 mm/s	E. Banik
	경미한 손상	-	10 mm/s	
	상당한 손상	-	50 mm/s	
	매우 큰 손상	-	100 mm/s	
	피해의 위험범위	-	> 84 mm/s	F. J. Crandell
	피해발생	-	119 mm/s	
가속도로 규정하는 것	피해가 일어나기 시작한 때	-	> 1.02 g	J. R. Thonen and Windes
	안전범위	-	< 0.102 g	

(2) 독일의 공업규격

독일은 3부분으로 구성되어 있는 DIN 4150 (Structural Vibration in Buildings)을 통하여 건물

에 대한 진동기준을 실증적이고 체계적으로 제정, 적용하고 있다. 1986년 개정본에서는 <표 1-10>과 같이 일시진동과 <표 1-11> 같이 정상진동으로 구분하고 구조물 전체와 구조물 부재에 대한 기준을 따로 구분하였으며 다시 구조물 전체에 대한 것을 3등급으로 분류하여 허용 최대 진동속도를 제한하고 있다.

<표 1-10> 건물에 대한 진도에 허용한도

건물의 등급			I	II	III
건물의 형식			상업 혹은 산업용 건물 : 사물실, 공장건물	주거용 건물 : 연립주택, 단독주택, 아파트	진동 예민 구조물 : 취약건물이나 문화재 등의 중요구조물
주파수별 허용진동 속도 (mm/s)	구조물 전체	10 Hz 이하	20	5	3
		10 ~ 50 Hz	20 ~ 40	5 ~ 15	3 ~ 8
		50 ~ 100 Hz	40 ~ 50	15 ~ 20	8 ~ 10
		주파수 복합	40	15	8
	구조물 부재	주파수 복합	20 (0.78)		

<표 1-11> 독일 공업규격 DIN 4150의 정상진동 기준

종별	구조물의 종류	구조물 전체	구조물 부재
		입자 속도 (수평방향)	입자속도 (처짐방향)
1종	상업/산업용 건물 : 기타 이와 유사한 형태로 설계된 건축물	5 mm/s (0.2 inch/s)	10 mm/s (0.39 inch/s)
2종	주거용 건물 : 기타 이와 유사한 형태로 설계되거나 주거용으로 사용되는 건축물	5 mm/s (0.2 inch/s)	
3종	진동 예민 구조물 : 진동에 특히 민감하여 1종 및 2종 구조물에 대한 규준의 적용이 불가피한 구조물 : 액면 가치로 따질 수 없는 중요 구조물	해당 없음	

(3) 스웨덴의 기준

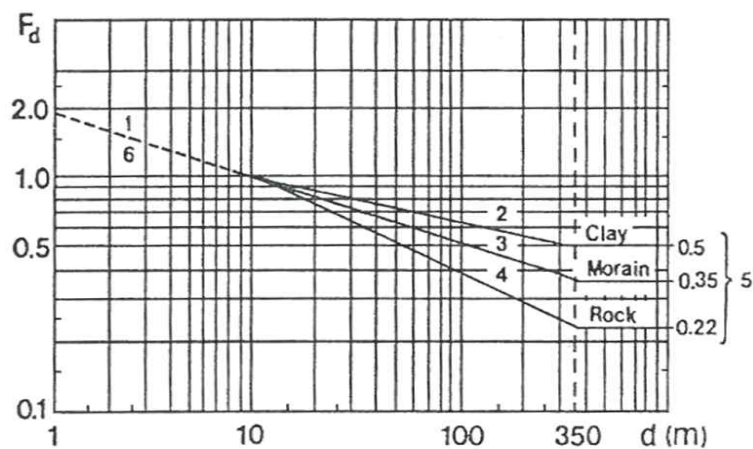
스웨덴 규정은 건축물에 영향을 주는 발파진동의 수준을 결정하기 위한 것으로 세 성분의 진동속도 값을 계측하여야 하며, 건물의 기초지반에서 계측하도록 규정하고 있다. 이 기준은 1989년에 승인되고, 1991년 한차례의 개정을 거쳤다. 기준값은 다음 식과 같이 규정한다.

$$v = v_0 \times F_k \times F_d \times F_t$$

여기서, $F_k = F_b \times F_t$ 로 하며, 각 변수에 대한 값들은 <표 1-12>에 의해 결정된다.

<표 1-12> 스웨덴의 기준값 및 계수

분 류	등급	내 용	기준값 / 계수
진동속도	1	점토, 자갈층	1.8 cm/s
	2	화석, 슬레이트, 연약한 석회석	3.5 cm/s
	3	강한 석회석, 사암, 편마암, 화강암, 현무암	7.0 cm/s
건축물 계수	1	중량급 건축물	1.70
	2	산업, 상업건물	1.20
	3	표준 주거 건물	1.00
	4	교회, 박물관 등 예민한 건물	0.65
	5	피해를 받기 쉬운 상태의 역사적 건축물	0.50
건축재 계수	1	보강 철근 콘크리트	1.20
	2	콘크리트, 벽돌	1.00
	3	경량골재 콘크리트	0.75
	4	인조 석재 벽돌	0.65
공사기간 계수	1	터널 지하공동, 도록 굴착 등 건설	1.0
	2	채석, 광산 작업	0.75 ~ 1.0



[그림 1-18] 스웨덴 기준의 거리에 따른 거리계수

(4) 스위스의 SN 640 312a (1992)

〈표 1-13〉 스위스의 기준

(단위 : cm/s)

종별	구조물의 종류	빈도	주파수 범위 (Hz)		
	지상층 건물 / 지하 건축물		< 30Hz	30 ~ 60 Hz	> 60 Hz
1	지상층 건물 해당없음 / 철근콘크리트 혹은 철제교량 철근콘크리트, 콘크리트, 축벽으로 된 지지벽 견고함 암석 혹은 잘 다져진 연약암내에 개착된 갱도, 터널, 지하공동, 수갱	가끔씩	3등급의 3배까지 허용		
		자주			
		계속적			
2	철근콘크리트의 상용 및 생산업체 건축물 (대개의 경우 외벽 모르타르 없음) Massive 하게 지어진 사일로, 탑, 높은 굴뚝 / 연약암반내 지하 공동, 터널, 수갱, 관로 지하 주차시설 지표가까이 설치된 각종 관로 건식 축벽	가끔씩	3등급의 2배까지 허용		
		자주			
		계속적			
3	콘크리트, 철근콘크리트, 벽돌로 조적된 주거건물 조적 혹은 인공적 건축자재에 모르타르로 된 사무실, 학교, 병원, 교회 건축물 저장소, 주철배관, 민감한 케이블 지하동굴, 터널의 중간천정 및 차도용 포장	가끔씩	1.5	2.0	3.0
		자주	0.6	0.8	1.2
		계속적	0.3	0.4	0.6
4	회벽 주택, 볼트식 구조물, 3등급 건물이 개축 혹은 새로이 단장된 건축물 역사적 보호 건축물 / 오래된 납 케이블, 주철배관	가끔씩	3등급의 값과 1/2수준의 사이의 값		
		자주			
		계속적			

* : 8 Hz 이하의 주파수에서는 최저 기준치 적용

* : 150 Hz 이상의 주파수에서는 더 큰 값의 기준치를 적용할 수 있다.

(5) 건교부 암발파설계기준

건교부에서 정한 암발파에 대한 진동속도기준은 <표 1-14>와 같다.

<표 1-14> 건교부 암발파 설계 기준

구분	가축류	문화재	조적가옥	RC조 가옥	공업용건물 및 철골구조
진동속도	1 mm/s	2 mm/s	3 mm/s	5 mm/s	10 ~ 50 mm/s

(6) 환경피해 구제기준 (환경부 중앙환경분쟁조정위원회, 2006. 1. 1부터 시행)

건물피해 : 2~20mm/s (건축물의 구조, 노후화 정도 등에 따라 다름)

마. 바닥슬래브의 사용성 기준

(1) ISO 기준

수직진동에 대한 바닥슬래브의 성능평가 기준으로는 일본 건축학회 평가기준, 미국의 GSA, 캐나다의 CSA, ISO 2631/2 지침 등이 있고 평가방법은 일상적인 가진원 조건에 대한 슬래브 진동응답의 파형으로부터 구한 중심 진동수 및 속도와 가속도 혹은 변위의 진폭, 감쇠 정수 등의 조합에 의해 이루어진다.

<표 1-15> ISO 건물 용도별 진동기준

지 역	시 간	연속진동 (dB, rms)	충격진동 (dB)
병원의 수술실, 정숙을 요하는 지역	-	54 (0.005 m/s ²)	54 (0.005 m/s ²)
주 거 지	낮 밤	60~66 (0.01 ~ 0.02 m/s ²) 57 (0.007 m/s ²)	83.5~93 (0.15~0.45 m/s ²) 57~80 (0.007~0.45 m/s ²)
사 무 실	-	66 (0.02 m/s ²)	89.5~96 (0.3~0.64 m/s ²)
공장, 작업장	-	72 (0.04 m/s ²)	93~96 (0.45~0.64 m/s ²)

- 진동기준치는 rms 가속도 (m/s²)를 dB로 나타냄

건물 사용용도에 따른 ISO 기준, 국립표준협회(ANSI, S3. 29-1983)과 1988년 ISO 기준에 준해 건물 용도별 설계 목표치로 제안된 일본 건축학회의 바닥 슬래브 진동평가곡선이다. 이 곡선은 수평 / 상·하 방향의 정상진동에 대한 평가곡선이며, 실효치로 정의되고 있다. 기본곡선은 정상진동에 대한 가장 민감한 사람의 감각치로 제시된 것이며, 기본곡선에 건물용도에 따라 정해지는 환경계수를 곱함으로써 각 평가곡선을 구하고 있다. 단, 환경계수는 현 단계에서 타당하다고 생각되는 값으로서 제시되고 있는 것이며, 앞으로의 연구로 변경될 수도 있는 것이다.

(2) 독일의 바닥진동 기준

Dieckmann이 제시한 K-value를 산출해내는 방법은 아래 <표 1-16>과 같다. 그 수치의 영역은 0.5 Hz에 이르는 낮은 주파수대까지 넓혀져 있으며, 뒤에 Dieckmann과 Miwa에 의해 중간대역의 주파수 영역에까지 범위를 넓힌 기준수치가 보고되었다.

<표 1-16> Dieckmann의 K-value

수직 진동		수평 진동		비 고
주파수 (Hz)	K-value	주파수 (Hz)	K-value	
5 Hz 이하	$K = Af^2$	2 Hz 이하	$K = 2Af^2$	여기서, A = 진폭 (mm), f = 주파수 (Hz) 진동의 민감도에 대한 영역의 정의는 다음과 같다. K=0.1, 감지할 수 있는 하한계 K=1, 일정 시간 동안 허용될 수 있는 한계 K=10, 짧은 시간 동안 허용될 수 있는 한계 K=100, 보통 사람에 대하여 긴장시킬 수 있는 상한계
5 ~ 40 Hz	$K = 5Af^2$	5 ~ 25 Hz	$K = 4Af$	
40 Hz 이상	$K = 200A$	25 Hz 이상	$K = 100A$	

Dieckmann의 작업과 결부하여 가장 처음으로 발표된 국가기준은 독일의 DIN 4025로써 수직, 수평 진동 모두를 포함한 기준으로 진동이 작업에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 아래 <표 17>은 K-value의 분류(DIN4025)를 나타낸 것이다.

〈표 1-17〉 K-value에 따른 진동이 작업에 미치는 영향

K-value	분 류	작업에 미치는 영향
0.1	진동이 감지되기 시작	영향 없음
0.1 ~ 0.3	진동이 감지, 견디기 쉽고 불쾌감은 없다	영향 없음
0.3 ~ 1	쉽게 감지, 견딜 수 있지만 한시가 이상 지속되면 불쾌함	여전히 영향 없음
1 ~ 3	강하게 감지, 여전히 견딜 수 있지만, 한시간 이상 지속되면 아주 불쾌함	영향이 있을 가능성이 있음
3 ~ 10	불쾌함, 한시간까지는 견딜 수 있지만 그 이상은 불가	심하게 영향 있을 가능성이 있음
10 ~ 30	아주 불쾌함, 십분이상 참을 수 없음	영향을 미칠 가능성이 높은
30 ~ 100	극도로 불쾌함, 일분이상 참을 수 없음	작업이 불가능
100 이상	참을 수 없음	작업이 불가능

Steffen은 개정판 DIN4150에 대해 기록했는데 이 기준에 적용되는 K-value는

$$K = \frac{0.005Af^2}{\sqrt{100+f^2}} = \frac{0.8Vf}{\sqrt{100+f^2}} = \frac{0.125a}{\sqrt{100+f^2}}$$
 식과 같이 얻어지고, 이렇게 얻어진 K-value의 평가는 아래 〈표 1-18〉에 의해 내려질 수 있다.

〈표 1-18〉 Steffen에 의해 개정된 K-value의 평가

K-value	감지 정도
0.1 이하	느끼지 못함
0.1	감지의 시작
0.25	약하게 감지
0.63	감지
1.6	쉽게 감지
4	강하게 감지
10	아주 강하게 감지

- 0.25와 0.63의 K-value 또한 주어지지만, 인간에 미치는 영향을 구별하는 것은 불가능하다고 설명하고 있다.

독인 DIN 4150은 아래 에 요약되어 있는 바와 같이, 주택이나 사무실, 병원 같은 건물에 대한 진동의 영향 정도를 나타내고 있다.

〈표 1-19〉 발생진동에 따른 지역별 K-value 허용치

건물지역	시간	K-value 세기의 허용치		
		지속적인 진동	반복적으로 발생하는 진동	가끔 발생하는 진동
요양지 병원 휴양지	주간 야간	최저치 이하	최저치 이하	2.5 최저치 이하
작은빌딩 사유지 순수 주거지역 일반 주거지역 주말 주거지역 대학가	주간 야간	최저치 이하	0.2 (0.1) 최저치 이하	4 최저치 이하
시골 변두리 중심가	주간 야간	0.3 (0.15) 최저치 이하	0.63 (0.3) 최저치 이하	8 최저치 이하
상업지역 산업지역 항구지역	주간 야간	0.63 (0.3) 0.4	0.8 (0.4) 0.4	12 0.4

- 최저치 이하 : Threshold of perception으로 진동을 느낄 수 있는 최저레벨 이하를 말함. 즉 최저 제한 레벨 이하이므로 진동을 느낄 수 없을 정도를 말함

(3) 국내 교통소음 진동의 한도

(가) 철도소음진동의 한도 (소음진동규제법 시행규칙 제 37조)

대상지역의 구분은 “국토의 계획 및 이용에 관한 법률”에 따르며, 정거장은 적용하지 아니하며, 철교는 2010년 1월 1일부터 적용한다. 총리령 제 474호 소음진동규제법시행규칙 중 개정령의 시행일 (1994년 11월 21일) 이후 준공되는 철도에 대하여는 2010년 1월 1일부터 한도를 적용한다. 대상지역은 교통소음진동의 영향을 받는 지역을 말한다.

〈표 1-20〉 소음진동규제법 시행규칙 제 37조

대 상 지 역	구 분	한 도			
		2000년 1월 1일 ~ 2009년 12월 31일		2010년 1월 1일부터	
		주간 (06:00 ~22:00)	야간 (22:00 ~06:00)	주간 (06:00 ~22:00)	야간 (22:00 ~06:00)
주거지역, 녹지지역, 관리지역 중 취락지구 및 관광·휴양개발진흥지구, 자연환경보전지역, 학교·병원·공공도서관의 부지경계선으로 부터 50m 이내지역	소음 Leq dB (A)	70	65	70	60
	진동 dB (V)	65	60	65	60
상업지역, 공업지역, 농림지역, 생산관리지역 및 관리지역 중 산업·유통개발진흥지구, 미고시지역	소음 Leq dB (A)	75	70	75	65
	진동 dB (V)	70	65	70	65

(나) 건물 용도별 실내소음 허용한도

① 미국 운송협회

아래 표는 미국 운송협회 (American Public Transit Association ; APTA)가 권장하고 있는 철도진동에 의해 발생한 지반진동에 의해 건물내부에 발생하는 소음, 즉 지반소음 (groundborne noise)의 허용한도를 나타내었다. 이 기준은 허용한도를 설계목표치 형태로 제시하고, 지역적 여건 및 건물용도별로 세분하고 있는 것이 특징이다.

〈표 1-21〉 철도진동에 의한 건물내 지반소음 허용한도 (미국 APTA) - 지역별 분류

지 역	일과성 (single event) 지반소음의 허용 최대치 (설계 목표치) : 단위 dB(A)		
	단독주택	다세대주택	호텔/모텔 등 (숙박전용 건물)
1. 인구희박 주거지역	30	35	40
2. 일반 주거지역	35	40	45
3. 인구밀집 주거지역	35	40	45
4. 상업활동 지역	40	45	50
5. 공장지대 / 도로변 지역	40	45	55

〈표 1-22〉 철도진동에 의한 건물내 지반소음 허용한도 (미국 APTA) - 건물종류별 분류

지 역	일과성 (single event) 지반소음의 허용 최대치 (설계 목표치) : 단위 dB(A)
연주홀 및 TV 스튜디오	25
대강당 및 음악감상실	30
교회 및 극장	35
병원 취침실	35 ~ 40
법정	35
학교 및 도서관	40
대학건물	35 ~ 40
사무실	35 ~ 45
일반 상업용 건물	45 ~ 55

제시된 허용한도는 모든 경우에 있어 반드시 전혀 들리지 않을 정도의 소음레벨을 기준한 것이 아니라, 심각할 정도로 신경이 쓰이는 침해감(Intrusion)이나 불쾌감(annoyance)을 일으키는 레벨보다는 충분히 낮은 값을 기준한 것임에 유의할 필요가 있다.

② ISO 용도별 실내소음 설계 기준

〈표 1-23〉 ISO 용도별 실내소음 설계기준

실의 용도 및 유형	설계기준 dB(A)
콘서트홀, 오페라 하우스, 리사이틀 홀	21 ~ 30
대형 공연장 및 극장, 교회 (양질의 청취)	30 이하
방송국, TV 및 녹음실용 스튜디오	34 이하
소형 공연장 및 극장, 소형교회, 음악연습실, 대형 회의실 및 회의장	42 이하
침실, 숙소용 막사, 병원, 주택, 아파트, 호텔, 모텔 (수면, 휴식)	34 ~ 47
개인 및 준개인용 사무실, 소형 회의장, 교실, 도서관 (좋은 청취)	38 ~ 47
거실 및 주거를 위한 유사공간 (대화, TV 및 라디오를 듣기 위해)	38 ~ 47
대형 사무실, 연회지역, 소매점, 카페, 레스토랑 등 (보통 좋은 청취)	42 ~ 52
로비, 실험실, 제도실 및 설계실, 일반 비밀지역 (깨끗한 청취)	47 ~ 56
사무실, 컴퓨터 장비실, 부엌, 세탁소 (보통 깨끗한 청취)	52 ~ 61
상점, 차고	56 ~ 66

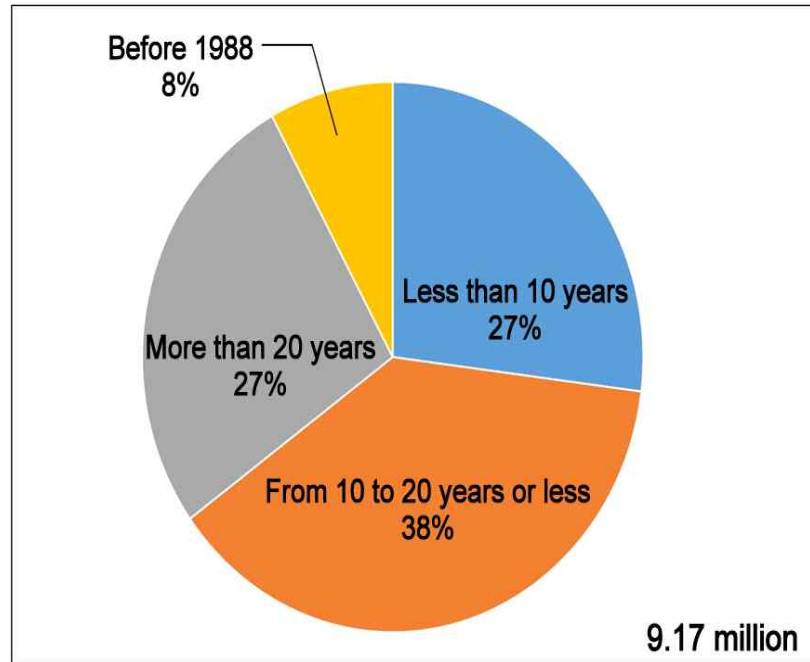
③ 미국 공조, 냉동, 냉장 기술자 협회 (ASHRAE) 기준

〈표 1-24〉 ASHRAE 기준

실 명	NC치	dB (A)	실 명	NC치	dB (A)
개인주택	25~30	35	호텔의 서비스구역	40~45	55
아파트	30~35	40	극장	25~30	35
중역실, 회의실	25~30	35	음악당	20~25	30
개인 사무실	30~35	40	녹음 스튜디오	15~25	25~30
일반 사무실	35~40	45	레스토랑	35~45	45~50
전신실, 현관로비	40~45	50	카페테리아	40~50	50~55
병원 개인병실, 수술실	25~30	35	백화점	35~45	40~50
일반병실, 검사실	30~35	40	백화점 1층, 지하층	40~50	50~55
병원 대합실	35~40	45	수영장	40~55	50~60
교회	25~30	35	체육관	30~40	40~45
학교, 교실	25~30	35	호텔객실	30~35	40
도서관	30~35	40	호텔, 연회장	30~35	40
영화관	30~35	40	호텔로비, 복도	35~40	45

바. 수직증축 리모델링 시 면진시스템 적용성 평가

우리나라는 1980년대 후반부터 급격한 산업화가 진행되었고, 부족한 주택문제를 해결하고 쾌적한 주거환경을 제공하기 위하여 정부에서는 대규모 택지개발을 통하여 공동주택을 공급하였다. 1기신도시(분당, 평촌, 산본, 중동 일산) 등이 공급된 1990년 이후 공동주택의 경우, 최근 노후 공동주택으로 분류되기 시작하였고, 공급 당시에는 주택공급이 폭증하여 노후공동주택으로 분류되는 주택도 현재 기하급수적으로 늘어나고 있는 실정이다. 따라서 이 시기에 공급된 주택들의 주거성능은 급격히 떨어지고 있으나, 국가 경제적으로 자원의 낭비와 환경파괴 등의 이유와 시장에서의 부동산가치 하락과 높은 용적율로 인한 사업성 결여로 재건축이 어려워 주거환경을 개선할 수 있는 방법이 크게 제한되고 있다. 2016년 12월을 기준으로 국토교통부에서 발표한 주택 통계자료에 따르면, [그림 1-19]와 같이 우리나라에 산재한 공동주택은 약 917만 세대가 있으며, 이 중 사용연수가 10년 이하인 세대가 약 243만 세대, 11년에서 20년 이하가 348만 세대이다(Statistics Korea, 2016). 이 중 현행법으로 리모델링 대상 건축물은 20년 이상의 세대가 약 251만세대로 조사되었고, 내진설계가 되지 않은 세대인 1988년 이전에 설계된 노후 공동주택은 9%에 해당하는 약 75만 세대에 이르고 있다.



[그림 1-19] 공동주택 현황

2000년대에 들어서며 매년 노후 된 공동주택에 대한 재건축의 수요가 폭발적으로 증가하고 있으나 재건축의 초기에 발생한 부동산 과열로 인한 사회문제 및 천연골재의 부족, 다량의 콘크리트 수요로 인한 이산화탄소 과다배출, 건축 폐자재 대량 발생 등으로 인한 환경파괴, 재건축 인근 단지 내의 전세대란 등의 부작용으로 발생되고 있다. 이에 정부는 재건축보다는 건물의 노후화억제 및 기능향상을 위하여 증축, 개축, 또는 대수선을 하는 리모델링 제도를 정책적으로 권장하고 있다. 평면확장 및 수직증축 등 리모델링을 권장하는 인센티브를 부여하는 정책을 단계별로 주택법에 도입하여 리모델링을 주거환경 개선의 한 축으로 적극 권장하고 있다. 2014년 정부에서는 입주민과 학계의 의견을 받아들여 리모델링의 사업성을 확보할 수 있는 3개층 수직증축을 허용하는 방향으로 주택법을 개정하였다. 국토교통부에서 제시한 리모델링 활성화 방안은 여러 가지가 있으나 대책의 핵심은 수직증축을 허용한 것이다. 이 방안은 그간 리모델링 사업의 최대 걸림돌이었던 사업성을 일정부분 개선하여 리모델링 사업을 활성화시키고 이를 통한 주거복지의 개선효과가 가시적으로 표현될 수 있도록 제도화 하되 몇 가지 제한사항을 두어 안전성확보를 정책의 최우선사항으로 제시하였다.

수직증축 리모델링 시 면진시스템을 적용할 경우 기존건축물의 내진 보강량을 최소화 할 수 있으며, 공사기간의 단축 등으로 사업성 측면에서 검토가 가능할 것으로 판단된다. 면진시스템을 활용한 수직증축 리모델링의 장점은 면진층 상부의 건축설계(평면, 입면 및 공간)가 자유로워진다. 또한, 기존 하부구조물의 하중전달을 최소화 할 수 있어 기존 건축물의 내진보강을 최소화할 수 있는 장점이 있다

2. 연구수행내용 및 성과

가. KBC2016에 따른 면진시스템 설계 절차

(1) 건물의 특성파악 및 기본 설계 변수 설정

면진설계 시 먼저 건물의 일반사항, 규모, 형상, 중량, 풍하중 및 지진하중 등을 파악하여 구조 설계 시에 반영하여야 한다.

(가) 지역계수 및 지반계수

면진설계를 위해 대상 구조물의 건물의 내진등급과 지역계수(A), 중요도계수(I_E)를 KBC2016에 근거하여 결정하여야 하며, 내진등급과 설계스펙트럼 가속도(S_{DS} , S_{D1})에 따라 내진설계범주를 결정한다.

지진구역 구분 및 지역계수

지진구역	행정구역		지진구역계수
I	시	서울, 인천, 대전, 부산, 대구, 울산, 광주, 세종	0.22g
	도	경기, 충북, 충남, 경북, 경남, 전북, 전남, 강원 남부*	
II	도	강원 북부**, 제주	0.14g

* 강원 남부 : 영월, 정선, 삼척, 강릉, 동해, 원주, 태백

** 강원 북부 : 홍천, 철원, 화천, 횡성, 평창, 양구, 인제, 고성, 양양, 춘천, 속초

내진등급과 중요도 계수

건축물의 중요도	내진등급	중요도계수(I_E)
중요도(특)	특	1.5
중요도(1)	I	1.2
중요도(2), (3)	II	1.0

면진구조물의 설계지진의 단주기와 주기 1초의 설계스펙트럼가속도 S_{DS} , S_{D1} 은 다음 식에 의하여 산정한다.

$$S_{DS} = S \times 2.5 \times F_a \times 2/3$$

$$S_{D1} = S \times F_v \times 2/3$$

여기서, F_a <표 0306.3.3>와 F_v <표 0306.3.4>는 지반증폭계수이다. 위 식에서 2400년 재현주기 지진의 유효지반가속도 S 값은 <표 0306.3.1>을 이용하여 결정하거나, 국가지진위험지도를 이용하여 구할 수 있다. 단, 국가지진위험지도를 이용하여 결정한 S 는 <표 0306.3.1>을 이용하여 결정한 S 값의 80 %보다 작아서는 안 된다.

단주기 지반증폭계수, F_a

지반종류		지진지역		
		$s_s \leq 0.25$	$s_s = 0.50$	$s_s = 0.75$
S_A		0.8	0.8	0.8
S_B		1.0	1.0	1.0
S_C	보통암까지의 깊이 20m 이상	1.2	1.2	1.1
	보통암까지의 깊이 20m 미만	1.4	1.4	1.3
S_D	보통암까지의 깊이 20m 이상	1.6	1.4	1.2
	보통암까지의 깊이 20m 미만	1.7	1.5	1.3
S_E		2.5	1.9	1.3

* s_s 는 설계스펙트럼 가속도 산정식(0306.3.1)에 적용된 S 를 2.5배한 값이다. 위 표에서 s_s 의 중간값에 대하여는 직선보간한다.

1초주기 지반증폭계수, F_v

지반종류		지진지역		
		$s \leq 0.1$	$s = 0.2$	$s = 0.3$
S_A		0.8	0.8	0.8
S_B		1.0	1.0	1.0
S_C	보통암까지의 깊이 20m 이상	1.7	1.6	1.5
	보통암까지의 깊이 20m 미만	1.5	1.4	1.3
S_D	보통암까지의 깊이 20m 이상	2.4	2.0	1.8
	보통암까지의 깊이 20m 미만	1.7	1.6	1.5
S_E		3.5	3.2	2.8

* S 는 설계스펙트럼 가속도 산정식(0306.3.2)에 적용된 값이다. 위 표에서 S 의 중간값에 대하여는 직선보간한다.

(나) 풍하중, 지진하중 및 감쇠계수 선정

건물에 작용하는 횡력은 크게 풍하중과 지진하중이 있다. 건물의 내풍설계는 일반적으로 면진설계에서 설정되는 지진하중이 풍하중을 상회하기 때문에 지진하중으로 건물의 강도를 확인하고 내풍설계는 생략하는 경우가 많다. 면진장치의 경우 풍하중 상태에서는 장치가 작동할 경우 사용성 문제를 야기할 수 있다. 따라서 건물이 위치한 지역의 설계기본풍속(V_0)과 노풍도를 파악하여 면진설계시 반영하여야 하며, 풍하중 시에는 면진장치가 항복하지 않도록 설계한다. 면진설계를 위해서는 반응수정계수(R), 시스템 초과강도(Ω_0) 및 변위증폭계수(C_d)를 파악하여야 한다. 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 한다.

(2) 응답 해석 및 설계

KBC2016에서 면진구조물은 미국의 ASCE/SEI 7-10(2010) 등에 제시된 것 같이 등가수평력 해석, 응답스펙트럼 해석과 같은 탄성해석을 기반으로 설계 방법론을 통한 설계가 가능할 수 있다. 하지만, 미국에 비하여 면진구조물에 대한 설계경험과 적용사례가 비교적 적은 국내의 상황을 고려할 때, 탄성기반 설계방법론을 국내 면진구조물에 적용하기에는 무리가 따른 것으로 판단된다. 이에 탄성기반 해석을 이용한 면진구조물 설계에 비하여 보다 정확한 해석결과를 도출할 수 있는 직접적분법에 의한 3차원 시간이력해석을 통한 면진구조물 설계만을 허용한다. 단, ASCE/SEI7-10(2010)의 등가정적법, 응답스펙트럼법과 같은 탄성해석을 기반으로 설계법에서 사용하는 기본개념을 이용하여 구할 수 있는 식(0306.11.1.) ~ (0306.11.4)을 사용하여 설계된 면진구조물의 최소 설계요구조건에 부합하는지를 검토한다.

(가) 예비응답 해석 및 설계

① 목표 유효감쇠 및 유효주기 설정

면진건물의 유효감쇠(β_D, β_M)와 유효주기(T_D, T_M)는 면진시스템의 변형특성을 이용하여 결정하여야 한다. 면진 층의 최소 수평변위는 유효주기에 의해 영향을 받게 되고, 유효감쇠는 에너지소산면적에 의해 결정되므로, 유효감쇠 및 유효주기와 면진시스템의 변형특성은 상호 연관된 순환 고리를 갖고 있어 어느 것을 먼저 결정하여야 하는가에 대해서는 정답이 없다. 다만, 유효감쇠 및 유효주기의 설정은 설계하고자 하는 건물의 성능을 결정하는 것이므로 성능설계의 관점에서는 설계절차에서 가장 선행되어야 하는 단계이고, 실무적으로도 목표 면진 감쇠 및 주기를 먼저 설정하고 설계변위와 최대변위, 그리고 수평력 등을 검토해 가는 과정으로 접근하는 것이 편리하기 때문에 엔지니어는 클라이언트와 협의하여 목표 주기와 면진주기를

먼저 설정해 둘 필요가 있다.

② 면진시스템의 유효 강성 결정 및 최소 수평변위 산정

기 설정된 목표 면진주기를 이용하여 면진시스템의 유효 강성을 결정한다.

$$K_{Dmin} = \frac{4\pi^2 \cdot W}{T_D^2 \cdot g} \left[K_{Mmin} = \frac{4\pi^2 \cdot W}{T_M^2 \cdot g} \right]$$

여기서, W : 상부 건물의 유효 중량

K_{Dmin} : 식 (0306.11.13)로 구한 설계변위에서의 면진시스템 최소유효강성, kN/m

K_{Mmin} : 식 (0306.11.15)로 구한 최대변위에서의 면진시스템 최소유효강성, kN/m

③ 면진장치 설계

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. 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.

④ 최소 횡변위

면진시스템은 면진시스템의 설계변위 D_D 와 최대변위 D_M 는 각각 다음 식에 의한 값보다 작아서는 안 된다.

$$D_D = \frac{g \cdot S_{D1} \cdot T_D}{4\pi^2 \beta_D} \quad (0306.12.4)$$

여기서, g : 중력가속도

S_{D1} : 주기 1초에서 설계스펙트럼가속도(0306.3.3)

T_D : 설계변위에서 면진구조물의 유효주기

β_D : 면진시스템의 유효감쇠(β_D)와 연관된 수치 계수이며 아래 <표 0301.1.1>에 따른다.

유효감쇠에 따른 감쇠계수, β_D 또는 β_M

유효 감쇠, β_D 또는 β_M (임계 퍼센트)a,b	B_D 또는 B_M
≤ 2	0.8
5	1.0
10	1.2
20	1.5
30	1.7
40	1.9
≥ 50	2.0

a 감쇠계수는 0306.12.5.3(2)에 따라 결정된 면진시스템의 유효감쇠에 근거해야 한다.

b 주어진 유효감쇠 이외의 유효감쇠에 해당하는 감쇠계수는 선형보간으로 구한다.

⑤ 면진장치 배치

면진장치의 배치는 면진층이 비틀림 진동을 일으키지 않기 위해서 상부구조의 무게중심과 면진층의 강심을 일치시키도록 하는 것이 바람직하다. 실제 설계에서는 축력과 수평강성의 비가 일정해지도록 면진장치를 선택하면 무게중심과 강성 사이에 큰 차이는 거의 발생하지 않는다. 면진장치의 배치는 각 기둥 아래에 1개의 면진장치를 설치하는 것을 원칙으로 한다. 그러나 기둥 개수가 많고 각 기둥 아래에 1개의 면진장치를 배치하는 경우 면진장치의 면압이 작아져 건물 중량에 비해 면진층의 수평강성이 커지는 경우가 있다. 이런 경우에는 상부구조의 최하층에 강한 바닥판 또는 보 등을 설치하고 면진장치의 개수를 작게 하여 수평강성을 낮추는 방법도 고려할 수 있다.

면진층의 강성중심이 상부구조의 무게중심과 일치하는 경우에는 상부구조에 강성중심과 무게중심의 차이가 있어도 면진층의 비틀림 진동은 충분히 작고 상부구조를 탄성설계로 하는 경우 상부구조에서의 편심 영향은 종래 내진설계에서 실시하는 방법과 같이 정적으로 구한 편심 량에 근거하여 각 골조의 응력을 할증하는 것으로 가능하다. 건물에 특별한 제약이 있고 면진층에 큰 편심이 일어난 경우를 제외하고는 비틀림 진동해석 등을 이용하여 편심으로 인한 동적인 영향을 조사할 필요까지는 없다.

⑥ 전체 총설계변위(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.

$$D_{TD} = D_D \left[1 + y \frac{12 e}{b^2 + d^2} \right] \quad (0306.12.6)$$

$$D_{TM} = D_M \left[1 + y \frac{12 e}{b^2 + d^2} \right] \quad (0306.12.7)$$

여기서, D_D : 설계변위, m

D_M : 최대변위, m

b : 구조물의 가장 짧은 평면치수. d 에 대하여 직 각으로 측정된 값, m

d : 구조물의 가장 긴 평면치수, m

y : 지진방향과 직각인 대상요소와 면진시스템의 강성중심과의 거리, m

e : 면진 상부구조의 질량 중심과 면진시스템의 강성중심 사이의 실제 편심거리와 힘의 방향에 직각인 건물 치수 중 최대값의 5%로 정의되는 우발편심거리를 합한 값, m

⑦ 최대변위(D_M)

구조물의 붕괴방지를 고려하기 위해 최대 고려지진(Maximum Considered Earthquake, MCE)에 대한 검토가 수행되어야 한다.

$$D_M = \frac{g S_{M1} T_M}{4\pi^2 \beta_M} \quad (0306.12.5)$$

여기서 g : 중력가속도

S_{M1} : 최대예상지진의 1초주기 스펙트럼가속도($= S_{M1} \times \frac{3}{2}$)

T_M : 최대변위에서 면진구조물의 유효주기

β_D : 면진시스템의 유효감쇠(β_D)와 연관된 수치 계수이며 아래 <표 0301.1.1>에 따른다.

⑧ 수평 지진력 산정

㉓ 면진 층과 면진 층 하부구조

면진시스템과 면진 하부구조의 밑면 전단력(V_b)는 다음 식으로 구한 값보다 작아서는 안된다.

$$V_b = 0.9 k_{Dmax} D_D \quad (0306.12.8.)$$

여기서, k_{Dmax} : 식(0306.12.12)로 구한 설계변위에서의 면진시스템 최대유효강성, kN/m

㉞ 면진 층 상부구조

면진 상부구조의 최소전단력 V_s 은 다음 식으로 구한 값보다 작아서는 안 된다.

$$V_s = 0.6 \frac{k_{Dmax} D_D}{R_I} \quad (0306.12.9)$$

여기서, R_I 는 <표 0306.6.1>의 반응수정계수에 3/8를 곱한 값으로 2 이하이다. 다만, 면진상부구조가 0306.4.4에 정의된 비정형구조물인 경우에는 최소밀면전단력 식(0306.11.9)을 1.33배 하여야한다.

㉞ V_s 의 값은 계수풍하중에 상응하는 밀면전단력보다 커야 하며, 다음 값 중 최대값의 60.0% 보다 작아서는 안 된다. 단 면진 상부구조가 0306.4.4.에 정의된 비정형구조물인 경우에는 다음값의 80%보다 작아서는 안된다.

- 동일 내진 중량 $W_{D+0.5L}$ 와 면진주기 T_D 를 갖는 밀면이 고정된 구조물에 대하여 0306.5에 의해 요구되는 밀면전단력
- 면진시스템의 탄성한계에 상응하는 수평지진력의 1.5배

나. 면진시스템 적용성 평가

(1) 면진시스템 적용 방안-1

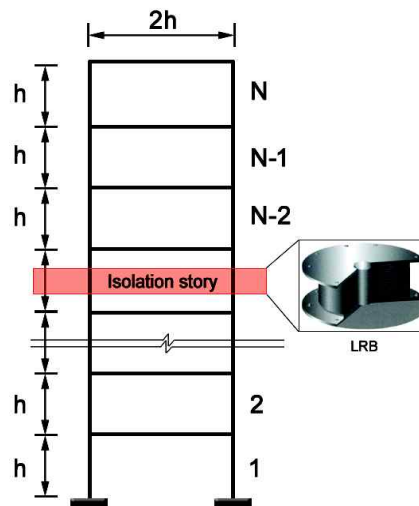
(가) 예비해석

① 연구대상 모델

골조의 동적특성을 Roehl에 의해 제안된 바에 따라 건물의 층 높이를 h 로 하고 스패를 $2h$ 로 하는 1경간 골조로 모델링하여 수직중축 층수에 따른 면진효과를 검토해 보고자 한다. 건물의 모든 부재들은 일정한 단면을 가지고 있으며, 각 층의 질량과 강성의 분포는 일정한 것으로 가정하였다. [그림 2-1]은 연구대상 모델을 도식화하여 나타낸 것이다. 건물의 기본 진동주기는 일반적으로 사용되는 건물의 층수에 대한 약산 식을 기준으로 다음과 같은 범위로 정하였다.

$$0.6T \leq T_1 \leq 1.4T \quad (1)$$

여기서, $T=0.1N$, N = 건물의 층수



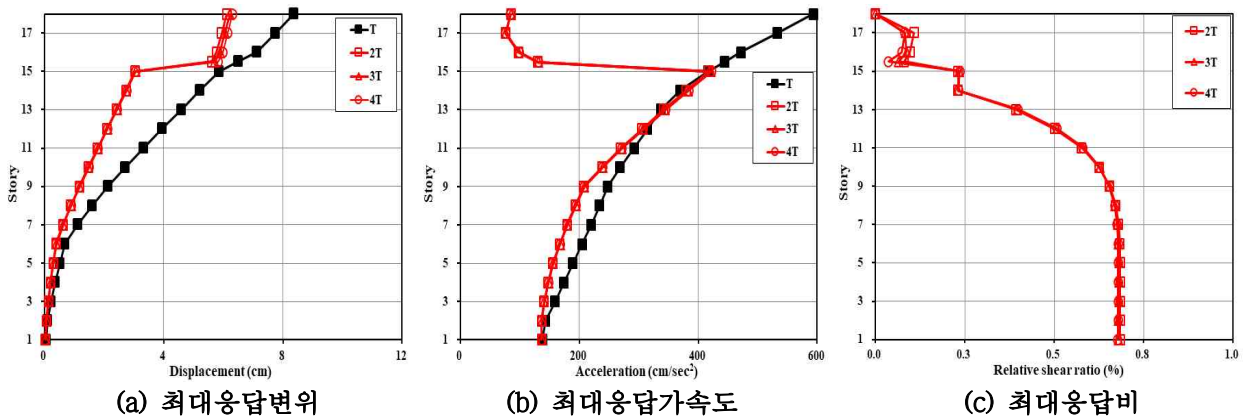
[그림 2-1] 연구대상 모델 형상

건물의 층수는 15층으로, 15층 시 3개층 까지 중축이 가능하다. 해석에 사용된 면진장치 이력 특성은 실제 면진설계에서 적용된 면진시스템의 특성(이선형 모델)을 사용하였다. 본 연구에서는 상기와 같은 변수들과 연구범위를 고려하여 수직중축 층수 3개와 면진주기 3개의 모델을 구성하여 9개의 모델을 해석하고 분석하였다. 지진동은 일반적으로 많이 사용되고 있는 El-Centro EQ를 사용하여 경계비선형 시간이력 해석을 수행하였고, 해석에 사용된 프로그램은 MIDAS Gen 2018로 상부 및 하부구조는 프레임 요소로 모델링하고 면진장치는 2축 방향으로 면진장치의 이선형적인 특성으로 모델링하였고 기둥에 하나씩 설치하였다.

② 해석결과

㉔ 3개층 수직증축 시

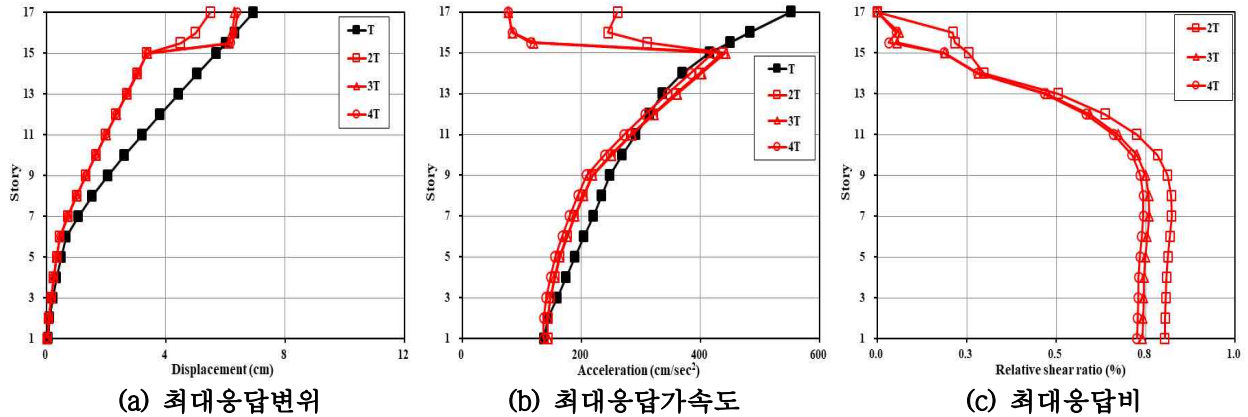
[그림 2-2]는 3개층 수직증축 시 비면진 건물과 면진 건물의 주기(2T, 3T 및 4T)에 따른 해석 결과를 나타낸 그림이다. 그림에서 알 수 있듯이 최대응답변위와 최대응답가속도의 경우 비면진 건물은 수직증축 후 건물의 높이에 따라 증가하는 변위 응답과 가속도응답을 보이고 있지만, 면진시스템을 적용한 건물의 경우, 면진층 상부 건물의 변위 응답과 가속도응답은 모두 유사한 응답 크기를 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 또한, 면진주기가 증가할수록 최대응답변위, 최대응답가속도 및 층전단력 저감효과는 크지 않은 것으로 나타났다. 층 전단력 저감 효과는 비면진 건물 대비 면진주기를 2T, 3T 및 4T 모두 약 30% 정도의 밀면전단력 저감 효과가 나타났다. 이러한 전단력의 감소는 결국 하부 구조의 작용하중의 감소를 의미하므로 하부구조의 내진보강 물량을 줄일 수 있어 경제성 확보가 가능할 것으로 판단된다. 이상의 결과를 바탕으로 3개층 수직 증축 시 면진층 상부 면진주기는 비면진 건물 주기의 2배 이상을 확보하면 목표로 하는 면진효과를 얻을 수 있는 알 수 있다.



[그림 2-2] 3개층 수직증축 시의 해석결과

㉕ 2개층 수직증축 시

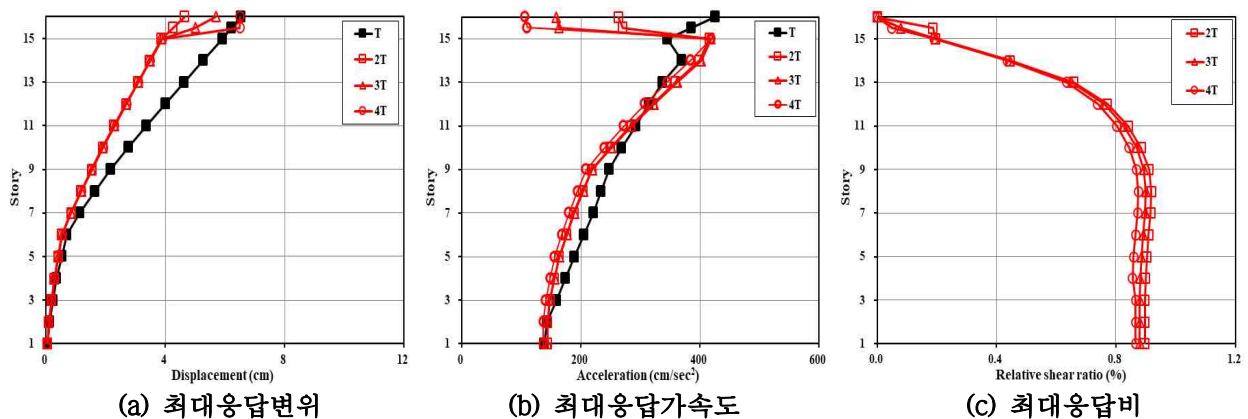
[그림 2-3]은 2개층 수직증축 시 비면진 건물과 면진 건물의 주기(2T, 3T 및 4T)에 따른 해석 결과를 나타낸 것이다. 3개층 수직증축 시의 결과와 유사하게 비면진 건물은 높이가 증가할수록 변위 응답과 가속도 응답이 증가하는 경향을 나타내지만, 면진시스템을 적용한 건물의 경우 면진층 상부 건물의 변위 응답과 가속도 응답은 모두 일정한 분포를 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 하지만, 면진주기가 비면진 건물의 주기에 2T의 경우 변위 응답은 강체거동 형태를 나타내지 않았고, 가속도 응답의 경우 응답이 증가하는 양상을 나타내었다. 이러한 결과는 면진주기가 확보되지 못하여 발생한 것으로 판단된다. 층 전단력 저감 효과는 모든 면진주기에서 약 20%~25% 내외로 나타났다. 위의 결과를 바탕으로 2개층 수직증축 시에는 면진층 상부 면진주기는 비면진 건물 주기의 약 3배 이상을 확보하여야만 목표로 하는 면진효과를 나타내는 것을 알 수 있다.



[그림 2-3] 2개층 수직증축 시의 해석결과

㉔ 1개층 수직증축 시

[그림 2-4]은 1개층 수직증축 시 비면진 건물과 면진 건물의 주기(2T, 3T 및 4T)에 따른 해석 결과를 나타낸 것이다. 1개층 수직증축 시에는 2개층 및 3개층 수직증축 시와 다르게 면진주기가 2T 및 3T에서는 강체거동효과가 나타나지 않으며, 비면진 건물과 유사한 형태의 거동을 나타내었다. 하지만, 면진주기 4T에서는 강체거동과 유사한 형태의 변위 응답과 가속도 응답을 나타내었다. 이러한 사유는 상부에 신설되는 층의 중량이 작아 동일한 면진주기라도 면진장치의 이력특성이 Linear와 유사한 형태로 되어 면진효과가 저감되는 것으로 판단된다. 층 전단력 저감 효과는 모든 면진주기에서 약 10%내외로 저감되는 것을 알 수 있었다. 위의 결과를 바탕으로 1개층 수직증축 시에는 면진층 상부 면진주기는 비면진 건물 주기의 약 4배 이상을 확보하여야만 목표로 하는 면진효과를 나타내는 것을 알 수 있다.



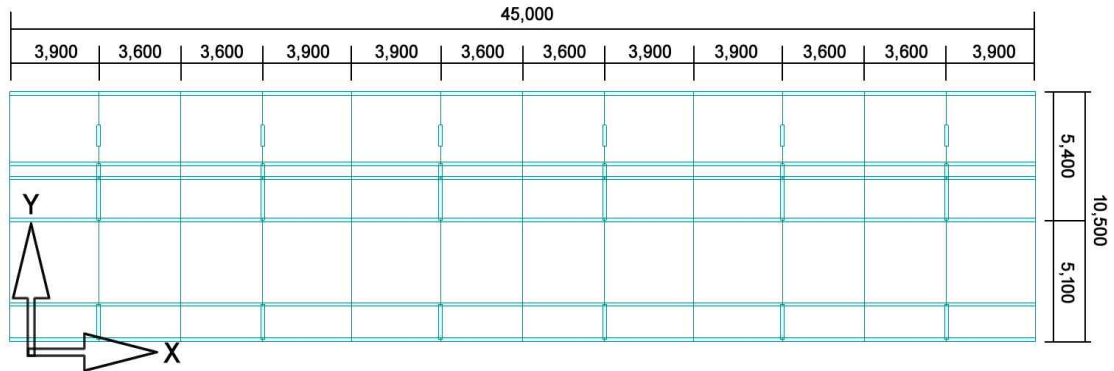
[그림 2-4] 1개층 수직증축 시의 해석결과

(나) 수직증축 리모델링 시스템 적용성 평가

① 연구대상 공동주택

연구대상 공동주택은 1990년 초에 지어진 건축물로서 경기도 성남시에 위치해 있으며 지상 15층 규모의 철근콘크리트 보통전단벽식 구조이다. 대상 건물은 3개 층까지 수직증축을 할 수

있는 건물이다. 구조재료의 강도는 콘크리트 압축강도는 24 MPa, 철근의 항복강도는 400 MPa 이다. 면진시스템 적용 전 공동주택의 주기는 1.10sec이다. 공동주택의 설계조건은 풍하중의 경우 설계 설계기본풍속(v_o)은 26.0m/sec 이며, 노풍도는 B이다. 지진하중의 경우 지역계수(A)는 0.22, 지반계수는 Sd이고, 중요도 계수(I_w)는 1.5이다. 아래 [그림 2-5]는 연구대상 공동주택의 평면도를 나타낸 것이다.

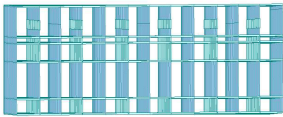
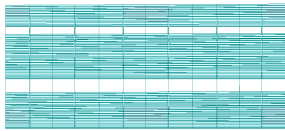
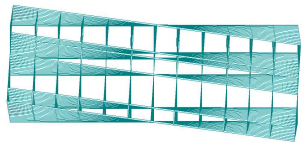


[그림 2-5] 연구대상 공동주택 형상

② 풍하중 및 지진하중

건축물에 작용하는 횡하중은 크게 풍하중과 지진하중이 있으며, 풍하중 시 면진장치는 항상 탄성에 머물러 있어야 한다. 풍하중 상태에서 면진장치가 작동할 경우 사용성 문제를 야기할 수 있으므로 공동주택에 작용하는 풍하중을 파악하여 면진장치 설계에 반영하여야 한다. <표 2-1>은 수직중축 전 건축물의 기본적인 동적특성을 나타내었으며, <표 2-2>는 건물에 작용하는 풍하중과 지진하중을 나타내었다.

<표 2-1> 주기 및 모드 형상

Mode no.	Period(sec)	X-dir mass(%)	Y-dir mass(%)	Z-dir mass(%)
1	1.10	66.0	0	0
2	0.50	0	65.1	0.1
3	0.12	0.1	0.1	65.3
Mode 1		Mode 2		Mode 3
				

〈표 2-2〉 풍하중 및 지진하중

Story	Story level(m)	Weight (kN)	Wind (kN)		Earthquake (kN)	
			Force	Story shear	Force	Story shear
Roof	39.0	3702.3	12.2	0.0	839.0	0.0
15F	36.4	4334.3	24.3	12.2	908.4	839.0
14F	33.8	4334.3	23.9	36.4	835.3	1747.5
13F	31.2	4334.3	23.3	60.3	762.9	2582.8
12F	28.6	4334.3	22.8	83.7	691.4	3345.8
11F	26.0	4334.3	22.2	106.4	620.6	4037.1
10F	23.4	4334.3	21.6	128.6	550.8	4657.7
9F	20.8	4334.3	20.9	150.2	482.1	5208.6
8F	18.2	4334.3	20.2	171.1	414.4	5690.6
7F	15.6	4334.3	19.4	191.3	348.0	6105.0
6F	13.0	4334.3	18.9	210.7	283.1	6453.1
5F	10.4	4334.3	18.8	229.7	219.9	6736.2
4F	7.8	4334.3	18.8	248.5	158.8	6956.1
3F	5.2	4334.3	18.8	267.4	100.3	7114.8
2F	2.6	4334.3	18.8	286.2	45.8	7215.2
1F	0.0	-	-	305.1	-	7260.9

③ 면진장치 설계 및 배치

㉓ 목표면진주기

면진건축물의 유효주기는 면진시스템의 변형특성을 이용하여 결정되며 전술된 바와 같이 공동주택의 3개층 증축 시 설계변위에서의 유효 면진주기는 $2T$ ($\approx 2.0\text{sec}$)로 설정하였다.

㉔ 면진시스템의 유효강성 결정

설계변위(D_D)에서 면진 구조물의 유효 주기는 다음 식 (2)에 따라 면진시스템의 변형특성을 이용하여 결정 한다. 목표 면진주기를 이용하여 역으로 목표 면진주기를 만족시키기 위한 면진시스템의 변형특성을 결정 할 수 있다.

$$T_D = 2\pi \sqrt{\frac{W}{K_D \times g}} \quad (2)$$

여기서, W : 상부 건물의 유효 중량($=13,002 \text{ kN}$), K_D : 설계변위에서 면진시스템의 유효강성

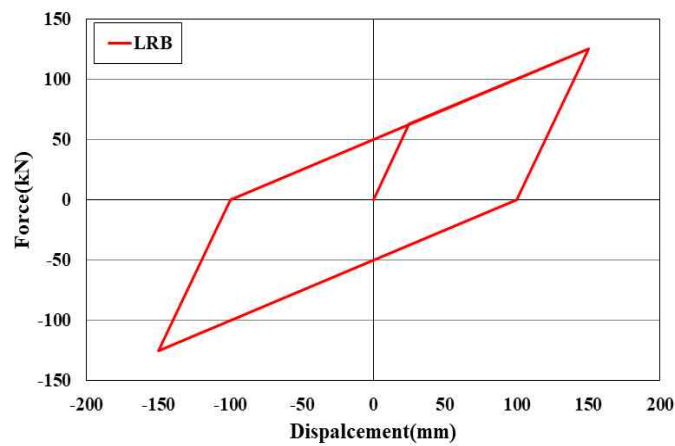
$$2.0\text{sec} : K_D = \frac{4\pi^2 \times 13,002,000}{4 \times 9800} = 13.08 \text{ kN/mm}$$

㉔ 면진장치 설계 및 면진시스템 배치

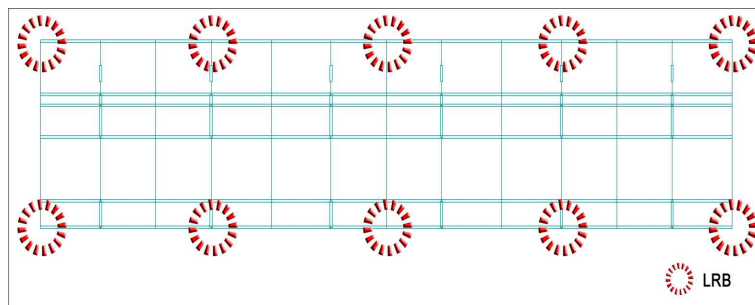
상기 조건에 따라 본 연구에서는 면진시스템의 구성요소로 납삽입적층고무(Lead rubber bearing, LRB) 장치로 구성하였고, 총 10개의 면진장치를 활용하여 각각의 면진주기에 맞게 배치하여 구성하였다. <표 2-3>과 [그림 2-6]은 설계된 면진장치의 제원과 이력특성을 나타낸 것이다. [그림 2-7]은 각 주기에 따른 면진장치 배치도이다.

<표 2-3> LRB 상세

직경(D , mm)	500
납 직경(D_i , mm)	90
고무 한층 두께(mm)	4.0
고무 층 수	25
총 고무 두께(mm)	100
철판 한층 두께(mm)	3.2
1차 형상계수 S_1	31.3
2차 형상계수 S_2	5.0
강성(kN/mm)	0.9



[그림 2-6] LRB 이력루프



[그림 2-7] 면진장치 배치

㉔ 풍하중 검토

3개층 증축 시 건물의 풍하중 적용 시 X방향 및 Y방향 모두 3.5mm를 나타내어 풍하중에 대하여 면진 층이 항복하지 않는 것을 확인할 수 있다.

○ 면진층 변위=3.5mm < ${}_wD_y = 25\text{mm}$ (면진층 항복변위)

㉕ 최소 수평변위 산정

면진시스템은 다음 식 (3)에 따라 구조물의 수평 주축방향으로 발생하는 최소 수평변위(D_D)를 견딜 수 있도록 설계되어야 한다. 본 연구에서 설계된 면진장치는 최소 수평변위를 만족하는 것으로 나타났다.

$$D_D = \frac{g \cdot S_{D1} \cdot T_D}{4\pi^2 B_D} \quad (3)$$

$$2.0\text{sec} = 164.6 \text{ mm} < \frac{D}{2} = \frac{500}{2} = 250 \text{ mm}$$

여기서 g : 중력가속도, 설계 변위

S_{D1} : 주기 1초에서 설계 5%감쇠 스펙트럼의 가속도 변수

T_D : 고려 방향의 설계 변위에서 면진 구조물의 유효주기(=2.0초)

B_D : 면진시스템의 유효 감쇠(β_D)와 연관된 수치 계수, 본 예제에서는 20%의 유효 감쇠를 가정하여 1.5로 산정한다.(ASCE7-10, Table 17.5-1)

(다) 비선형 동적해석 결과

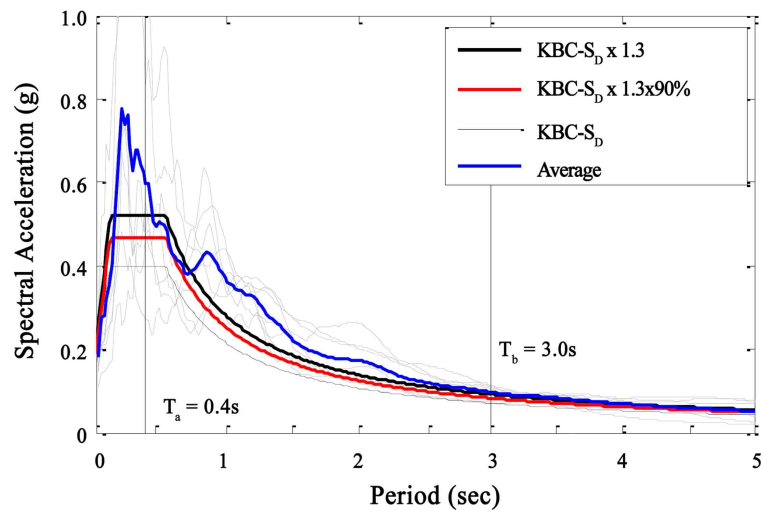
① 입력지진동

부지응답해석을 위하여 미국의 PEER Ground Motion Database에서 세계 각국에서 측정된 암반지진기록을 선별하였다. 선별조건은 계측된 위치의 지반조건이 암반($V_{s,30} > 760\text{m/s}$ 이상)이며, 본 연구에서는 암반스펙트럼과의 조정계수(Scale factor)가 0.3 ~ 3.0 정도 크기를 갖는 지진으로, 40개의 암반지진기록을 선별하였다. 40개의 암반지진기록에 대해 부지응답해석을 수행한 후 지반조건의 설계응답스펙트럼과 편차가 적으며, 기준의 제한사항(설계응답스펙트럼의 1.3배의 90%)을 만족시키는 7가지 지진파 set를 최적화 알고리즘을 통하여 선정하였다.

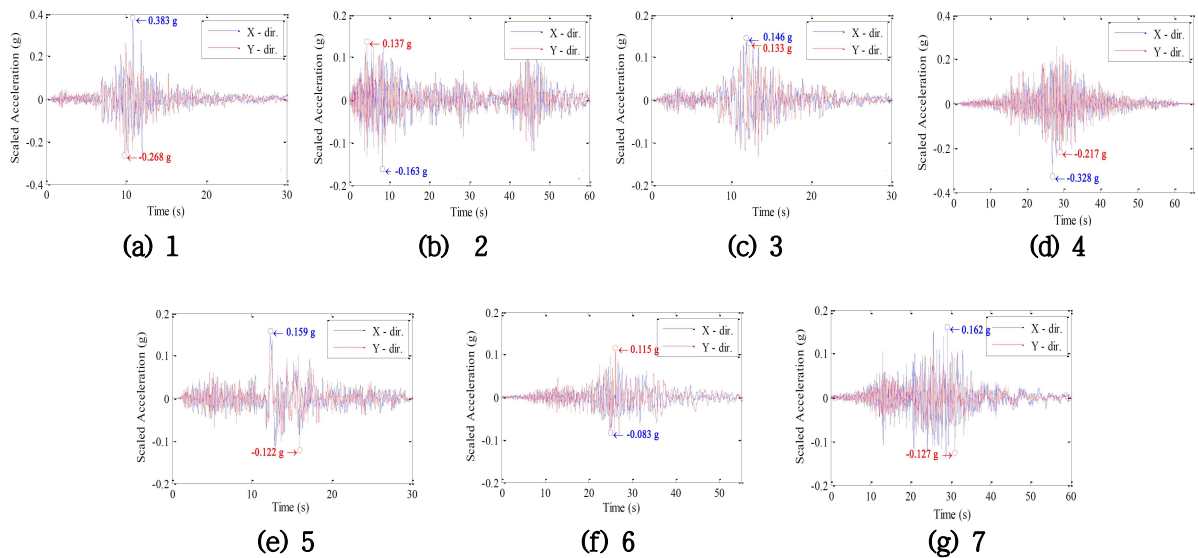
<표 2-4>는 위의 과정을 통하여 선정된 7개의 입력지진동을 나타낸 것이며, [그림 2-8]과 [그림 2-9]는 해석에 사용된 지진파의 설계지진레벨(Design based earthquake, DBE) 시 응답스펙트럼과 각 지진파의 가속도 시간이력을 나타낸 것이다. 해석에 사용된 프로그램은 MIDAS GEN 2018을 사용하였다.

〈표 2-4〉 지진파 특성

No.	Event	Country	Year	Station	M	Vs,30
1	Loma Prieta	USA	1989	Pidemont Jr High School Grounds	6.9	895
2	Campano Lucano	Italy	1980	Bisaccia	6.9	958
3	Loma Prieta	USA	1989	SF-Pacific Heights	6.9	1,250
4	Chi-Chi	Taiwan	1999	HWA003	7.6	789
5	Chi-Chi	Taiwan	1999	TAP067	7.6	808
6	Chi-Chi-06	Taiwan	1999	HWA003	6.3	1,526
7	Chi-Chi	Taiwan	1999	ILA015	7.6	783



[그림 2-8] 설계지진레벨 시의 지진파 스케일링



[그림 2-9] 해석에 적용 된 지진파

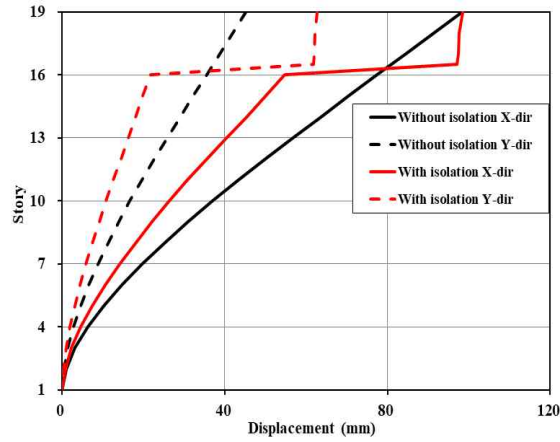
② 해석결과

최대응답변위 해석결과, 비면진건물은 높이에 따라 증가하는 변위 응답을 보이고 있는 반면 면진시스템을 적용한 건물의 경우 면진층에서 만 큰 변위가 발생하고 있을 뿐 상부 구조물은 강체거동과 유사하게 층 변위에 차이가 거의 발생하고 있지 않는 것으로 나타났다. 이 때 면진층의 최대변위는 허용변위 250mm를 넘지 않는 것을 확인하였다.

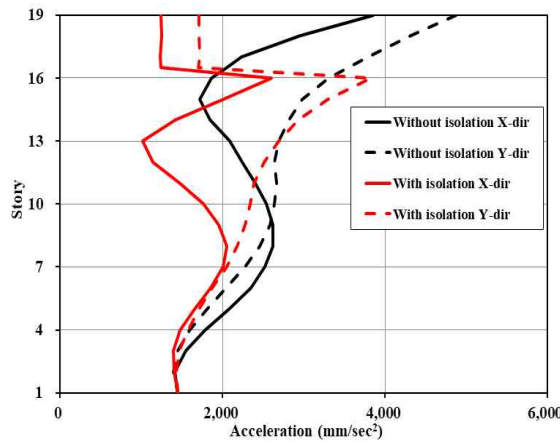
최대응답가속 해석결과, 최대응답변위 결과와 유사하게 비면진건물의 경우 상부 층으로 갈수록 응답가속도가 증가하는 양상을 보이고 있다. 하지만, 면진시스템을 적용한 건물의 경우에는 면진층 상부의 응답가속도가 거의 일정한 분포를 나타내고 있는데 이는 사용성면에서 향상된 거동을 기대할 수 있다.

〈표 2-5〉 해석결과

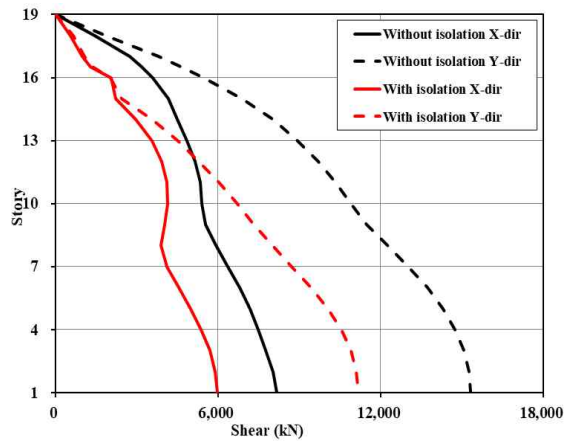
Story	Displacement(mm)				Acceleration(mm/sec ²)				Shear(kN)			
	Without isolation		With isolation		Without isolation		With isolation		Without isolation		With isolation	
	X-dir	Y-dir	X-dir	Y-dir	X-dir	Y-dir	X-dir	Y-dir	X-dir	Y-dir	X-dir	Y-dir
19	98.4	45.1	98.5	62.7	3854	4869	1241	1713	0	0	0	0
18	91.5	41.9	97.6	62.2	2954	4315	1247	1709	1463	1876	554	661
17	84.5	38.7	97.5	62.0	2229	3791	1232	1718	2735	3806	997	1081
16.5	81.0	37.1	97.0	61.8	2048	3547	1239	1701	3170	4639	1278	1380
16	77.5	35.5	54.7	21.7	1866	3303	2603	3825	3604	5472	2049	2021
15	70.5	32.3	50.1	19.9	1717	2983	2003	3299	4169	6870	2219	2442
14	63.5	29.1	45.3	18.1	1846	2818	1419	2934	4496	8021	2968	3568
13	56.6	25.9	40.4	16.2	2092	2689	1012	2689	4863	8946	3570	4516
12	49.9	22.7	35.5	14.4	2243	2635	1146	2509	5144	9707	3933	5298
11	43.3	19.6	30.8	12.6	2402	2661	1477	2383	5341	10337	4101	6023
10	37.0	16.7	26.3	10.8	2537	2642	1760	2336	5412	10911	4129	6713
9	30.9	13.9	22.0	9.1	2618	2585	1956	2281	5539	11485	4024	7332
8	25.2	11.3	18.0	7.4	2622	2454	2048	2182	5934	12241	3890	7994
7	19.7	8.8	14.1	5.9	2521	2276	2007	2052	6355	13030	4123	8707
6	14.7	6.5	10.6	4.4	2345	2046	1851	1873	6792	13722	4552	9422
5	10.2	4.5	7.4	3.1	2078	1806	1657	1714	7189	14301	4984	10048
4	6.3	2.8	4.6	2.0	1785	1591	1474	1571	7493	14756	5386	10549
3	3.2	1.4	2.4	1.0	1545	1453	1395	1467	7755	15076	5714	10900
2	1.0	0.5	0.8	0.4	1411	1397	1405	1430	8025	15258	5903	11104
1	0	0	0	0	1449	1449	1449	1449	8155	15328	5975	11184



(a) 최대응답변위



(b) 최대응답가속도



(c) 충전단력

[그림 2-10] 해석결과 비교

또한, 지진 발생 시 내부의 전도 등을 방지하는데 크게 기여할 수 있을 것으로 판단된다. <표 2-5>에서 알 수 있듯이 모든 지진파에 대하여 면진시스템을 적용한 건물의 최대응답가속도가 비면진 건물의 최대응답가속도 보다 현저하게 감소하는 경향을 보이고 있는데, 설계지진 레벨에서는 X방향의 경우에는 약 70%로, Y방향의 경우에는 약 65%의 감소를 나타내었다. 이러한 가속도 감소는 결국 신설되는 상부구조에서 설계전단력의 감소를 의미함으로 면진시스

템 적용에 따른 내진안전 확보가 용이함을 확인할 수 있다.

층 전단력 해석결과, 설계지진레벨에서는 비면진건물과 비교하여 X방향 및 Y방향 모두 약 30% 감소하는 것으로 나타났다. 면진으로 인한 층 전단력의 감소는 결국 건물 하부의 내진보강 설계에 있어서 작용하중의 감소를 의미하므로 내진보강 물량을 줄일 수 있으며, 수직 증축되는 층의 부재 사이즈 감소로 경제성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

(라) 소결

- ① 골조의 동적특성을 활용하여 수직증축 층수에 따른 최적 면진주기를 검토한 결과, 3개층 수직 증축 시에는 면진주기를 비면진 건물 주기의 2배 이상, 2개층 수직 증축 시에는 비면진 건물 주기의 3배 이상을 확보하여야만 충분한 면진효과를 나타내는 것을 알 수 있었다. 또한, 1개층 수직 증축 시에는 비면진 건물 주기의 4배 이상을 확보하여야만 면진효과를 나타내었다.
- ② 3개층 수직 증축 리모델링 건물에 면진시스템을 적용한 결과, 최상층 최대응답가속도가 비면진 건물의 최대응답가속도 보다 X방향의 경우에는 약 70%로, Y방향의 경우에는 약 65%의 감소를 나타내었다. 또한, 밀면 전단력의 경우, 비면진 건물과 비교하여 X방향 및 Y방향 모두 약 30% 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 층 전단력의 감소는 결국 건물 하부의 내진보강 설계에 있어서 작용하중의 감소를 의미하므로 내진보강 물량을 줄일 수 있음을 의미한다.
- ③ 면진시스템을 활용한 수직증축 리모델링을 실무적용 하기 위해서는 내진보강 물량 산출을 통한 경제성 평가가 이루어져야 하며, 이에 대해서는 추후 보완적인 연구가 필요한 것으로 사료된다.

(2) 면진시스템 적용 방안-2

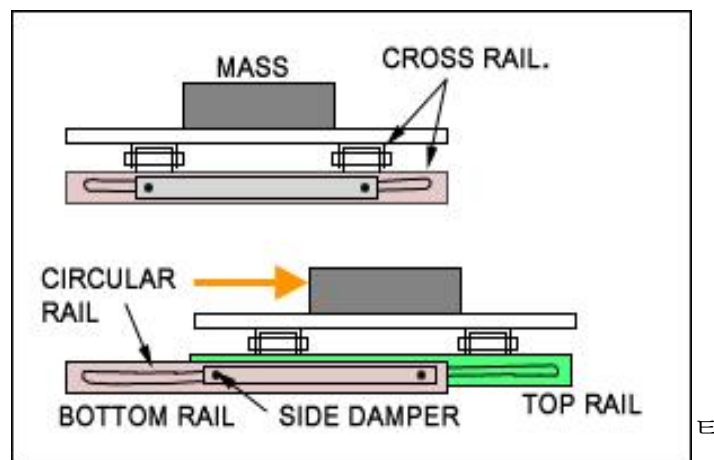
(가) 접안시설의 면진기술 적용 방안

등대 및 선박 유도시설에 적용되는 면진장치의 종류는 일반 건축물에 사용하는 적층고무 타입 보다는 미끄럼계 타입을 사용해야 한다. 적층고무타입의 면진장치는 경량물에 적용이 어렵고 코일 스프링을 이용한 시스템의 경우에도 중량이 가벼우면 무게가 변화할 때 면진효과가 저하되는 등의 문제가 발생하기 때문이다.

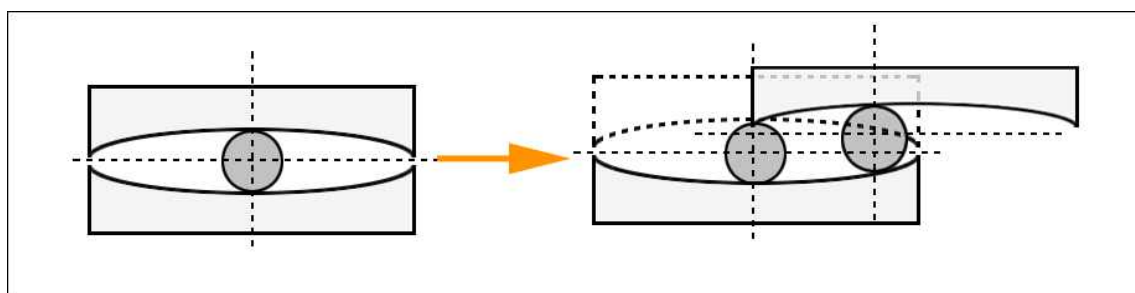
일본의 경우 과거에는 주로 교량 등 토목구조물에 면진과 같은 고성능 내진기술이 적용되어 왔으나, 1995년 고베지진이 발생한 이후 내진설계의 강화만이 최선이 아니라는 판단 하에 “건축물의 내진개수 촉진”에 관한 법률이 시행되어 공공성이 높은 건물에 내진개수를 위한

노력과 의무가 부여되었다. 또한, 이를 바탕으로 등대 면진도 시작되어 그 적용 건수가 총 5,000건이 넘는 것으로 파악되었다(Japanese Maritime Security Testing Research Center, 2000). 현재 등대면진에 적용되는 대표적인 장치들은 롤러 받침형 면진시스템과 코사인 레일형 면진장치 등이 있다(Japanese Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2005, 2006).

[그림 2-11]은 롤러 받침형 면진시스템(Roller Type Isolation)을 나타낸 것으로 곡선형레일의 받침기구, 그리고 중력에 의한 복원기구와 마찰저항에 의한 감쇠기구로 구성되어 있다. 이 시스템은 원호형태의 상하레일을 따라 롤러가 이탈하지 않게 하고 있으며 직교 2방향 독립레일로 장치를 가이드 함으로써 비틀림 진동이 발생하지 않게 되어 있다. 또한, 면진장치의 성능을 검증하기 위해 시간이력해석을 수행한 결과 면진장치는 지진에 의해 입력되는 가속도를 1/10로 감소시켜 상부구조물로 전달할 수 있는 것으로 확인되었다.



[그림 2-11] 롤러 타입 면진장치



[그림 2-12] 코사인 레일 면진장치

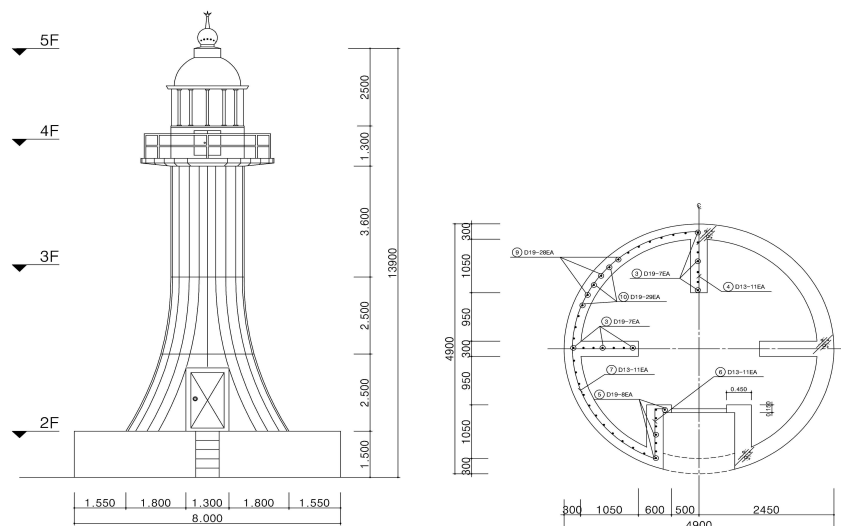
[그림 2-12]는 코사인 레일 시스템(Cosine Rail System, CRS) 면진장치의 개념을 도시한 것으로써 금속 롤러 방식의 일종으로 측면 형상이 코사인 커브 모양을 한 레일 롤러를 사이에 두는 구조이다. 지진 시 상부 구조는 수평방향으로 이동하며 진자 모양으로 진동하며 복원력은 롤러와 레일의 구배에 의해 복원특성을 나타낸다. CRS 면진장치는 마찰계수가 작아서 감쇠력을 확보하기 위해 점성댐퍼를 채용하여 고성능화를 실현하였다.

등대구조물은 중량이 가볍고 속이 빈 원통형으로서 이에 적합한 면진장치는 첫 번째는 레일의 기하학적 구조에 의한 일종의 진자 운동을 채용하고 장주기화를 유도하여 적재물의 무게와 관계없이 우수한 면진효과를 발휘할 수 있어야 한다. 또한, 중심위치가 높고 불안정한 것에 대응하기 위해 전도를 방지하는 안전장치를 갖추고 있어야 한다. 두 번째는 등대와 같은 구조물에 면진을 적용할 경우 등대가 위치하고 있는 지반의 종류, 등대의 형상 및 구조 등에 따라 바닥 지진동에 대한 응답은 각각 다르지만 지진 경험이 많은 일본의 사례를 분석해 본 결과 필요 요구 성능은 렌즈 탑 기초부 입력가속도에 대한 응답가속도 감소 1/5, 응답변위 100mm 정도를 확보하도록 하는 것이 바람직하다(The Japan Society of Seismic Isolation, 2008, Japanese Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2006). 세 번째는 기존연구(Chun, et. al., 2010)에서 제시된 중·저층 구조물의 경우 면진 전 구조물의 주기와 면진 후 주기비로 2.5배 이상, 그리고 2.0초 이상으로 적용하여야만 충분한 면진효과를 발휘할 수 있다.

(나) 면진기술 적용효과 분석

① 연구대상 구조물

연구대상 등대 구조물은 내진설계 이전인 1980년도에 지어진 무인등대로서, 대한민국 강원도 속초에 위치해 있으며 5층 규모의 철근콘크리트 구조이다. 구조재료의 강도는 콘크리트 압축강도는 18MPa, 철근의 항복강도는 300MPa이다. 면진적용 전 등대구조물의 1차 모드 주기는 0.12sec이며, 면진적용 후 주기는 기존의 연구결과(Chun, et. al., 2010)를 토대로 2.0sec를 목표로 하여 설계하였다. 연구대상 등대 구조물의 설계조건은 풍하중은 설계 설계기본풍속(V_D)은 35.0m/sec, 노풍도는 D이다. 지진하중은 지역계수는(S) 0.22, 지반계수는 $s_D(s_{Ds}=0.499, s_{D1}=0.288)$ 이고, 중요도 계수 (I_w)는 1.2이다. 아래 [그림 2-13]은 등대구조물의 입면도 및 단면도를 나타낸 것이다.



[그림 2-13] 연구대상 건물의 입면도 및 단면도

② 설계하중

㉔ 층별 중량, 풍하중 및 지진하중

지진에 의해 발생하는 관성력은 고정하중에 의한 것으로 간주하며, 등대구조물을 [그림 2-14]와 같이 5개의 층으로 구분할 때 각 층별 중량은 <표 2-6>과 같다.

<표 2-6> 등대의 중량

story	story level (m)	story weight (kN)
5F	13.9	6.0
4F	11.4	69.0
3F	6.5	303.7
2F	1.5	421.3
1F	0	-
TOTAL		800.0

구조물에 작용하는 횡하중은 크게 풍하중과 지진하중이 있으며, 풍하중 시 면진장치는 항상 탄성에 머물러 있어야 한다. 풍하중 상태에서 면진장치가 작동할 경우 사용성 문제를 야기할 수 있으므로 등대 구조물에 작용하는 풍하중을 파악하여 면진장치 설계에 반영하여야 한다.

또한, 면진시스템을 설계하기 위해서는 면진장치가 설치되기 전 구조물의 동적특성을 파악하여 설치 될 면진장치와의 상호작용을 고려하여야 한다. 이는 면진장치가 상부 구조물의 강성 분포나 질량분포에 따라 거동이 달라질 수 있기 때문이다. <표 2-7>에 등대에 작용하는 풍하중과 지진하중을 나타내었다.

<표 2-7> 풍하중 및 지진하중

story name	story weight(kN)	story level(m)	wind load		Earthquake load	
			story shear(kN)	overturning moment(kN·m)	story shear(kN)	overturning moment(kN·m)
5F	6.00	13.9	0	0	0	0
4F	68.65	11.4	0.3	0	2.4	0.7
3F	303.73	6.5	6.26	14.4	29.1	67.6
2F	421.29	1.5	35.59	192.3	119.0	662.7
1F	-	0	75.09	372.6	159.5	1000.0

③ 면진장치 설계 및 배치

㉔ CASE 1 - 등대 전체를 면진화한 경우

면진구조물의 유효주기는 면진시스템의 변형특성을 이용하여 결정되며, 면진시스템의 변형특성을 결정짓는 목표 면진을 달성하기 위해 필연적으로 수반되어야 한다. 면진주기의 설정은

설계하고자 하는 구조물의 성능을 결정하는 것이므로 설계절차에서 가장 선행되어야 하는 단계이다. 본 등대구조물은 전술된 바와 같이 설계변위에서의 유효 면진주기는 2.0초, 최대변위에서의 유효 면진주기는 3.0초로 설정하였다.

설계변위(D_D)와 최대변위(D_M)에서 면진 구조물의 유효 주기는 다음 식 (1)에 따라 면진시스템의 변형특성을 이용하여 결정한다. 그러므로 기 설정된 목표 면진주기를 이용하여 역으로 목표 면진주기를 만족시키기 위한 면진시스템의 변형특성을 결정 할 수 있다.

$$T_D = 2\pi \sqrt{\frac{W}{K_D(K_M) \times g}} \quad (1)$$

여기서, W : 상부 건물의 유효 중량(=800.0kN)

K_D : 설계변위에서 면진시스템의 유효강성

K_M : 최대변위에서 면진시스템의 유효강성

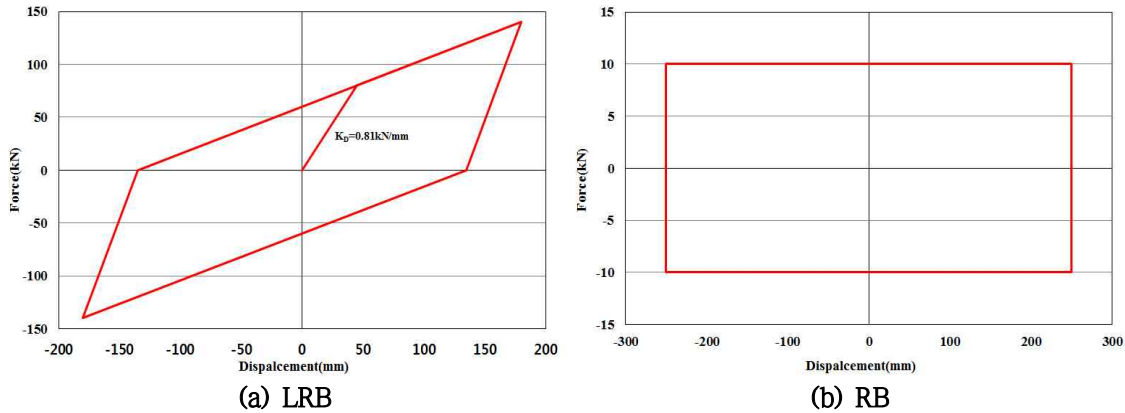
$$K_D = \frac{4\pi^2 \times 800}{4 \times 9800} = 0.81 \text{ kN/mm}$$

$$K_M = \frac{4\pi^2 \times 800}{9 \times 9800} = 0.36 \text{ kN/mm}$$

상기 조건에 따라 본 연구에서는 면진시스템의 구성요소로 납붕삼입적층고무(Lead Rubber Bearing, LRB)와 미끄럼계 베어링(Roller Bearing, RB)의 2종류 장치를 사용하였다. 적용개수는 LRB 1개와 RB 4개로 총 5개의 장치가 면진시스템의 구성을 위하여 사용되었다. 이러한 면진 장치의 조합은 설정된 면진시스템의 주기, 강성 등의 조건을 모두 만족하면서 복원력 특성을 제공하기 위한 것이다. <표 2-8>과 [그림 2-14]는 설계된 면진장치의 제원과 이력특성을 나타낸 것이다.

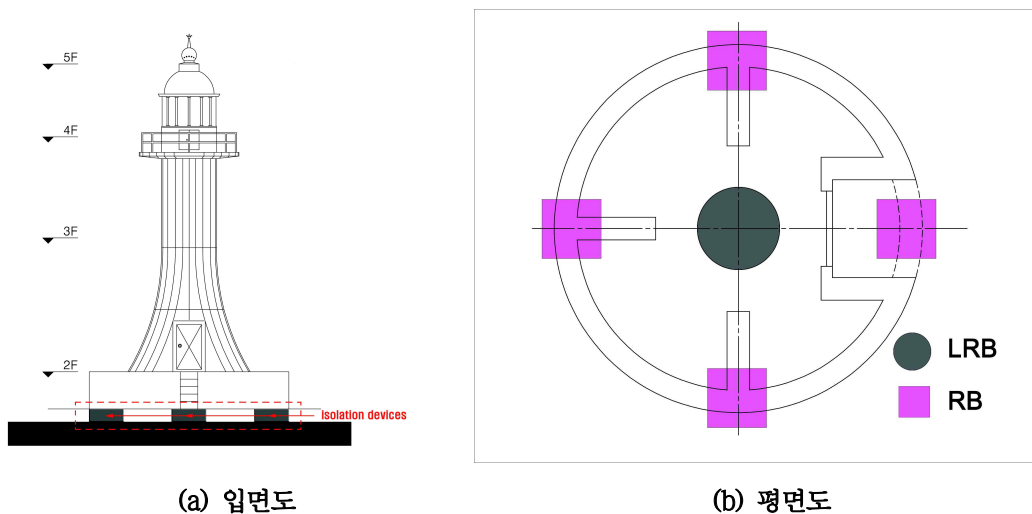
<표 2-8> LRB 및 RB 상세

LRB		RB	
Outer diameter(D , mm)	600	Roller arrangement (a×b, c×d) (ea)	(상) 2×10
Lead bar diameter(D_i , mm)	100		(하) 2×10
Rubber thickness(mm)	5.0	Roller size(mm)	φ 20×50
No of rubber layer(EA)	30	size(mm)	400×400×140
Total rubber thickness(mm)	150	Using load(kN)	800
1st Shape factor S_1	30	Maximum load(kN)	2,000
2nd Shape factor S_2	4.0	Axial stiffness(kN/mm)	3,000
Steel plate thickness(mm)	4.0	Coefficient of friction	0.002
Lateral stiffness(kN/mm)	0.9	stroke (mm)	± 250



[그림 2-14] 케이스 1에 적용된 면진장치의 이력특성

[그림 2-15]에서 보듯이 연구대상 등대 구조물의 형상은 속이 빈 원통형 모양으로서 질량(mass)이 작아 면진주기를 장주기로 설정하는데 어려움이 있으며 면진장치를 설치하기도 어렵다. 따라서 등대하부에 면진장치 설치를 용이하게 하기 위한 콘크리트 기초판을 설치하고, [그림 2-16]과 같이 외곽에는 RB를 설치하였으며, 가운데는 감쇠력과 수평강성을 지닌 LRB를 설치하여 주기를 조절하였다. 이러한 배치는 등대구조물의 질량중심과 강성중심을 일치시켜 비틀림에 의한 영향을 최소화할 수 있을 것으로 기대된다.



[그림 2-15] 케이스 1의 면진장치 설치 형상

<표 2-9>는 풍하중 적용 시 X방향, Y방향의 변위를 나타낸 것으로 풍하중에 대하여 면진 층이 항복하지 않는 것을 확인할 수 있다.

- 면진층 변위=40.6 mm < $wD_y = 45\text{mm}$ (면진층 항복변위)

〈표 2-9〉 풍하중 시 최대응답변위

Direction	story	level(m)	story height(m)	maximum displacement (mm)
X and Y	Roof	13.9	0	52.6
	5F	11.4	0.3	51.7
	4F	6.5	2.3	45.3
	3F	1.5	5.0	41.2
	2F	0.4	2.0	40.6
	1F	0	0.4	0

면진시스템은 다음 식 (2)에 따라 구조물의 수평 주축방향으로 발생하는 최소 수평변위(D_D)를 견딜 수 있도록 설계되어야 한다.

$$D_D = \frac{g \cdot S_{D1} \cdot T_D}{4\pi^2 B_D} \quad (2)$$

$$= 164.64 \text{ mm} < \frac{D}{2} = \frac{600}{2} = 300 \text{ mm} \rightarrow \text{O.K.}$$

여기서 g : 중력가속도

S_{D1} : 주기 1초에서 설계 5%감쇠 스펙트럼의 가속도 변수(= $3.4MA = 0.49742$)

T_D : 고려 방향의 설계 변위에서 면진 구조물의 유효주기(=2.0초)

B_D : 면진시스템의 유효 감쇠(β_D)와 연관된 수치 계수, 본 예제에서는 20%의 유효 감쇠를 가정하여 산정한다(=1.5)

㉔ CASE 2 - 케이스 2 - 등대구조물 내부의 등대 렌즈를 면진화한 경우

설계변위(D_D)와 최대변위(D_M)에서 면진건물의 유효 주기는 케이스 1과 동일하게 식 (1)에 따라 면진시스템의 변형특성을 이용하여 결정되어야 한다. 목표 면진주기는 앞에서 설정한 것과 동일한 조건으로 한다. 따라서 설정된 목표 면진주기를 이용하여 역으로 목표 면진주기를 만족시키기 위한 면진시스템의 변형특성을 결정한다.

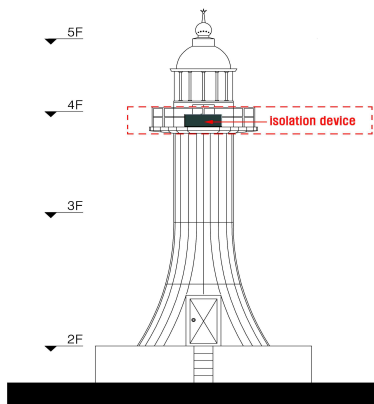
$$K_D = \frac{4\pi^2 \times 6}{4 \times 9800} = 0.006 \text{ kN/mm}$$

$$K_M = \frac{4\pi^2 \times 6}{9 \times 9800} = 0.0027 \text{ kN/mm}$$

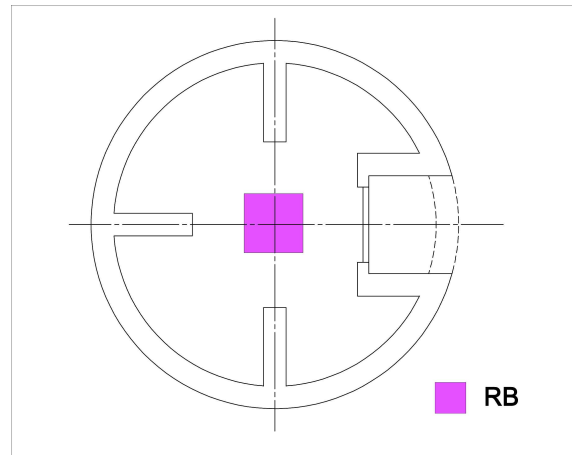
이 경우 면진시스템의 구성요소로 결정된 면진장치는 RB 1종류이다. RB는 면진시스템의 주기, 강성 등의 조건을 모두 만족한다. 등대 렌즈를 면진화 할 경우에는 질량중심과 강성중심은 일체화 되어 편심은 발생하지 않는다. 〈표 2-10〉은 설계된 RB의 장치상세를 나타낸 것이다.

〈표 2-10〉 RB 장치 상세

Roller arrangement (a×b, c×d) (EA)	(상) 2×6
	(하) 2×6
Roller Size(mm)	φ 20×50
Size(mm)	280×280×140
Using load(kN)	500
Max. Load(kN)	1,200
Axial Stiffness(kN/mm)	3,000
Coefficient of friction	0.002
stroke (mm)	± 150



(a) 입면도



(b) 평면도

[그림 2-16] 케이스 2의 면진장치 설치 형상

CASE 2의 면진시스템의 구성요소로 등대 렌즈 하부에 RB 1개를 배치하였다. 이러한 배치는 등대구조물 내부의 등대렌즈의 중량이 너무 가벼워 설정된 면진시스템의 주기 및 강성 등의 조건을 모두 만족시키고 복원력의 문제가 크지 않아 RB를 사용한 것이다. 풍하중 검토 및 최소 수평변위 산정은 앞절과 동일한 방법으로 검토하였고, 모두 만족하는 것으로 나타났다.

㉔ 케이스 3 - 등대구조물과 등대 렌즈를 동시에 면진화한 경우

CASE 3의 경우에는 전절에서 제시한 CASE1과 CASE 2를 모두 적용하여 등대구조물을 면진화한 경우이다. 목표면진주기, 유효강성 및 면진장치 구성은 CASE 1과 CASE 2를 모두 채택하였다. CASE 3을 통해 CASE 1과 CASE 2의 효과를 좀 더 명확하게 분석해 보고자 한다.

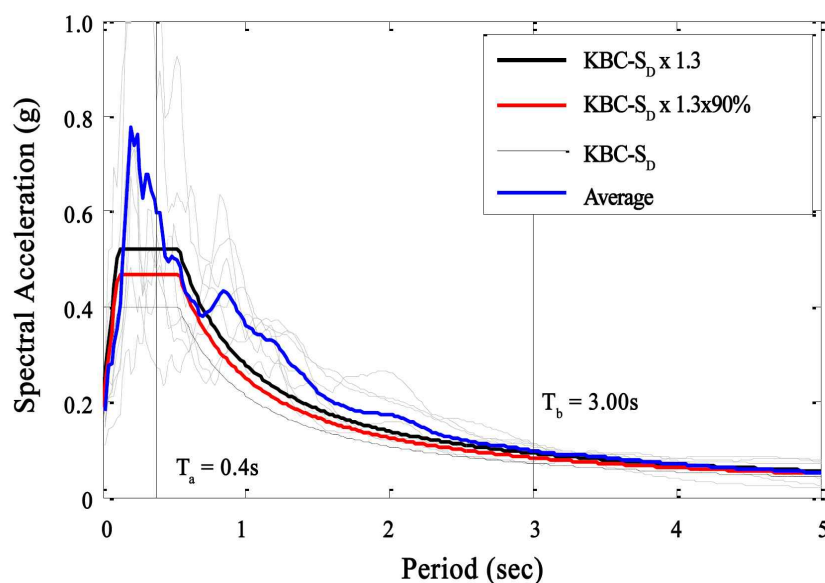
(다) 비선형 동적해석

① 입력지진동

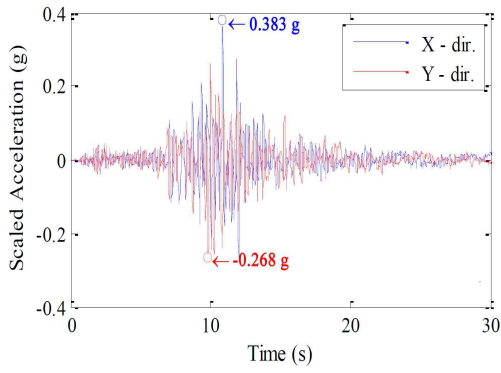
본 해석에 적용된 입력지진동은 부지응답해석을 통해 선정되었다. 부지응답해석을 위하여 미국의 PEER Ground Motion Database에서 세계 각국에서 측정된 암반지진기록을 선별하였다. 선별조건은 계측된 위치의 지반조건이 암반($V_{s,30} > 760\text{m/s}$ 이상)이며, 본 논문에서는 암반스펙트럼과의 조정계수(Scale factor)가 0.3 ~ 3.0 정도 크기를 갖는 지진으로, 40개의 암반지진기록을 선별하였다. 40개의 암반지진기록에 대해 부지응답해석을 수행한 후 지반조건의 설계응답스펙트럼과 편차가 적으며, 기준의 제한사항(설계응답스펙트럼의 1.3배의 90%11))을 만족시키는 7가지 지진과 set를 최적화 알고리즘을 통하여 선정하였다. <표 2-11>은 위의 과정을 통하여 선정된 7개의 입력지진동을 나타낸 것이며, [그림 2-17]과 [그림 2-18]은 해석에 사용된 지진파의 설계지진레벨(Design based earthquake, DBE) 시 응답스펙트럼과 각 지진파의 가속도 시간이력을 나타낸 것이다. 해석은 설계지진레벨과 최대지진레벨(Maximum consider earthquake, MCE)로 나누어 수행하였고, 해석에 사용된 프로그램은 MIDAS GEN 2017을 사용하였다.

<표 2-11> 선정된 7개의 지반운동에 대한 입력 암반지진기록

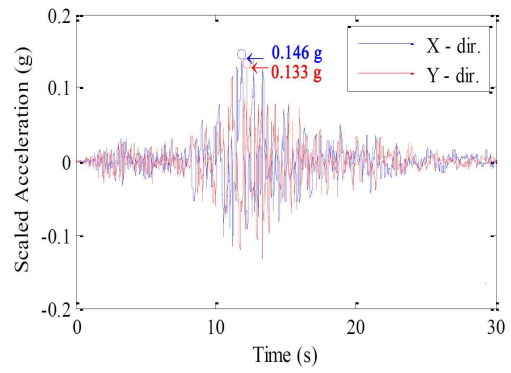
No.	Event	Country	Year	Station	M	$V_{s,30}$
1	Loma Prieta	USA	1989	Pidemont Jr High School Grounds	6.93	895
2	Loma Prieta	USA	1989	SF-Pacific Heights	6.93	1,250
3	Chi-Chi	Taiwan	1999	HWA003	7.62	789
4	Chi-Chi	Taiwan	1999	ILA015	7.62	783
5	Chi-Chi	Taiwan	1999	TAP067	7.62	808
6	Chi-Chi-06	Taiwan	1999	HWA003	6.30	1,526
7	Campano Lucano	Italy	1980	Bisaccia	6.90	958



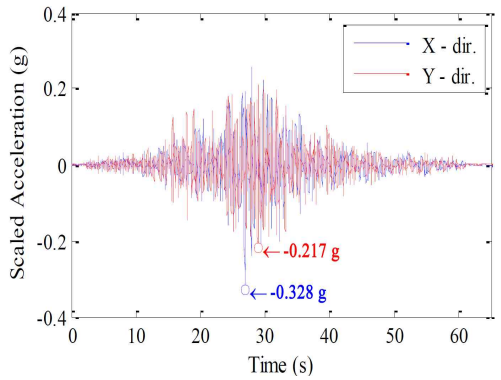
[그림 2-17] 지진파 응답스펙트럼



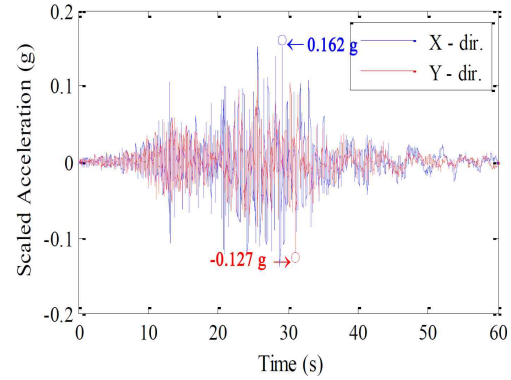
(a) No. 1



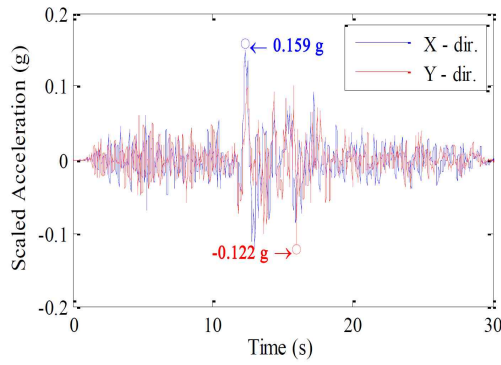
(b) No. 2



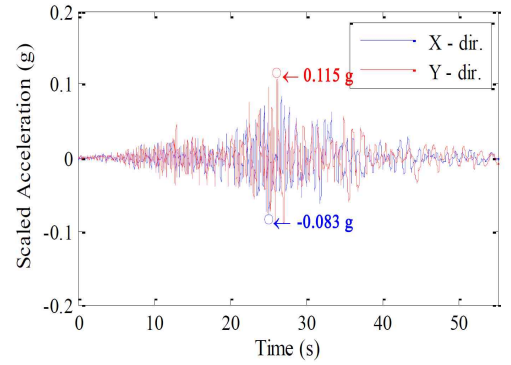
(c) No. 3



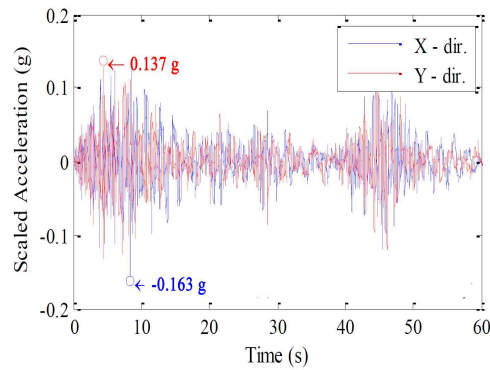
(d) No. 4



(e) No. 5



(f) No. 6



(g) No. 7

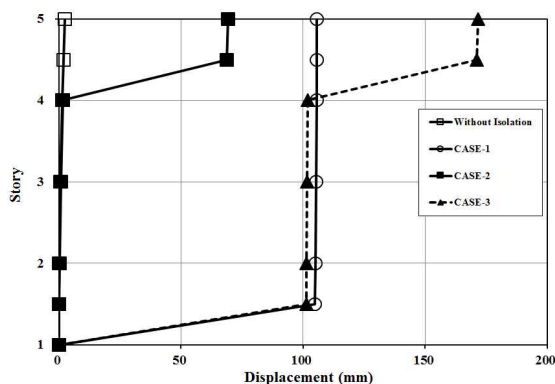
[그림 2-18] 지진파

② 최대응답변위 검토

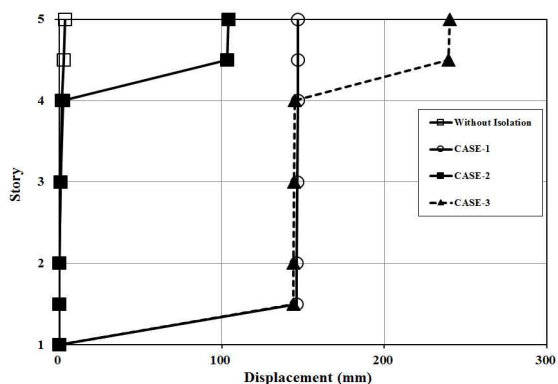
〈표 2-12〉는 DBE 레벨 시 각 지진파에 따른 비 면진과 각 CASE별 면진의 최대응답변위 해석결과를 비교하여 정리한 것이며, [그림 2-19]에 (a)는 이를 도식화하여 나타낸 것이다. 또한, [그림 2-19]의 (b)는 MCE 레벨 시의 해석결과를 도식화하여 나타낸 것이다. 비 면진구조물은 구조물의 높이에 따라 증가하는 변위응답을 보이고 있으며, 렌즈가 위치한 층에서는 층간변위를 초과하는 결과를 나타내었다. 반면, CASE 1의 경우에는 면진층에서 만 큰 변위가 발생하고 있을 뿐 상부 구조물은 강체거동과 유사하게 층 변위에 차이가 거의 발생하고 있지 않는 것으로 나타났다. 이 때 면진층의 최대변위는 허용변위를 넘지 않는 것을 확인하였다. 또한, 등대의 주요 부재인 렌즈만을 면진화한 CASE 2의 경우도 렌즈는 강체거동으로 면진효과를 충분히 발휘하는 것으로 나타났다. 단, 이와 같은 결과는 먼저 등대 전체의 안전이 확보된 경우에만 실효성이 있으므로 이점에 주의할 필요가 있다. CASE 1과 CASE 2를 모두 적용한 CASE 3의 경우에는 2중 면진효과로 인하여 면진층과 렌즈부에서 만 큰 변위를 보이는 것으로 나타났다. 또한, 면진장치 설치층에서의 최대변위는 면진장치 설계 시 적용한 허용변위를 넘지 않는 것으로 확인되었다.

〈표 2-12〉 각 케이스별 최대응답변위 해석 결과(mm)

Story	Level	Without Isolation	CASE-1	CASE-2	CASE-3
5F	13900	2.34	105.7	69.4	171.9
4.5F	11800	1.79	105.6	68.8	171.3
4F	11400	1.24	105.5	1.7	101.9
3F	6500	0.52	105.2	0.7	101.6
2F	1500	0.09	105.0	0.1	101.3
1.5F	600	0.05	104.9	0.1	101.3
1F	0	0.00	0.0	0.0	0.0



(a) 설계지진레벨



(b) 최대지진레벨

[그림 2-19] 최대응답변위 해석결과

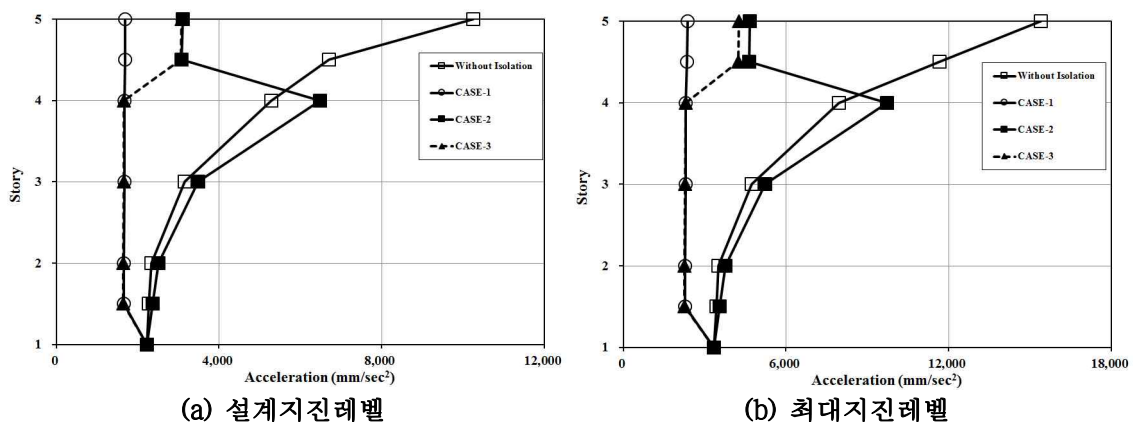
③ 최대응답가속도 검토

<표 2-13>은 DBE 레벨 시 각 지진파에 따른 비 면진과 각 CASE별 면진의 최대응답가속도 해석결과를 비교하여 정리한 것이며, [그림 2-20] (a)는 이를 도식화하여 나타낸 것이다. 또한, [그림 2-20]의 (b)는 MCE 레벨 시의 해석결과를 도식화하여 나타낸 것이다.

비 면진건물의 경우 상부 층으로 갈수록 응답가속도가 증가하는 양상을 보이고 있으며, 렌즈층과 최상층에서 최대값을 나타내고 있어 렌즈의 손상 위험이 높은 것을 알 수 있다. 반면, CASE 1의 경우에는 각 층의 응답가속도가 거의 일정한 분포를 나타내고 있는데 이는 사용성 면에서 향상된 거동을 기대할 수 있다. 그리고 지진 발생 시 내부의 전도 등으로 인한 등대의 주요 부재인 렌즈의 손상을 방지하는데 크게 기여할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 모든 지진파에 대하여 면진건물의 최대 응답가속도가 기초고정 구조물의 최대 응답가속도 보다 현저하게 감소하는 경향을 보이고 있는데, DBE에서는 약 80%로, MCE에서는 약 85%의 감소를 나타내었다. 당초 설계목표 감소량(약 80%)를 초과하는 것으로 이러한 가속도의 감소는 결국 상부구조에서 설계전단력의 감소를 의미함으로 면진기술 적용에 따른 내진안전 확보가 용이함을 확인할 수 있다.

<표 2-13> 각 케이스별 최대응답가속도 해석 결과(mm/sec²)

Story	Level	Without Isolation	CASE-1	CASE-2	CASE-3
5F	13900	10,257.3	1,695.7	3,114.0	3,076.6
4.5F	11800	6,705.2	1,686.2	3,084.3	3,061.9
4F	11400	5,289.1	1,676.7	6,482.3	1,662.2
3F	6500	3,153.2	1,667.5	3,490.2	1,651.6
2F	1500	2,334.8	1,663.3	2,507.2	1,646.4
1.5F	600	2,280.1	1,662.5	2,366.3	1,645.6
1F	0	2,225.3	2,225.3	2,225.3	2,225.3



[그림 2-20] 최대응답가속도 해석결과

CASE 2의 경우에도 렌즈부에서는 당초 설계조건보다 작기는 하지만(설계조건 약 80%감소, 해석결과 약 70%감소)비 면진구조와 비교하여 가속도 감소효과를 얻을 수 있어 등대의 주요 부재인 렌즈의 안전 확보가 가능함을 확인할 수 있었다. 따라서 등대 전체가 아닌 렌즈 하부에만 면진장치를 설치하여도 충분한 가속도 감소효과를 얻을 수 있는 것으로 나타났다. 하지만, 등대구조물 자체는 내진구조와 동일하게 거동함으로 내진설계 이전에 지어진 등대의 경우 등대구조물을 현행기준에서 만족하는 내진성능이 확보된 상태로 보강하지 않을 경우 실효성이 떨어질 수도 있다는 점에 주의하여야 할 것으로 판단된다.

CASE 3의 경우에도 비 면진구조와 비교하여 감소된 결과를 나타내었으나, 하부 면진층에서의 가속도 감소와는 다르게 등대렌즈 하부 면진층에서는 감소된 가속도레벨 대비 오히려 가속도가 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 이중면진에 있어서 두 면진층에서 서로 다른 면진특성을 지니고 있어 가속도의 최대값을 나타내는 점에서의 위상이 달라 나타난 결과라 사료된다. 이처럼 경우에 따라서는 2중 면진효과가 부정적으로 나타날 가능성도 있으므로 향후 이 부분에 대해서는 추가적인 연구가 필요하다고 판단된다.

④ 충전단력 검토

CASE 1의 경우 층 전단력은 DBE 레벨에서 기초고정 의 경우와 비교하여 약 43% 감소하는 것으로 나타났으며, MCE 레벨에서는 약 43% 감소하는 것으로 나타났다. 이는 지진파별로 다소간 차이는 있으나 면진으로 인한 층 전단력의 감소는 결국 상부 구조의 부재설계에 있어서 작용하중의 감소를 의미하므로 상부구조의 내진보강을 보다 경제적으로 할 수 있음을 의미한다.

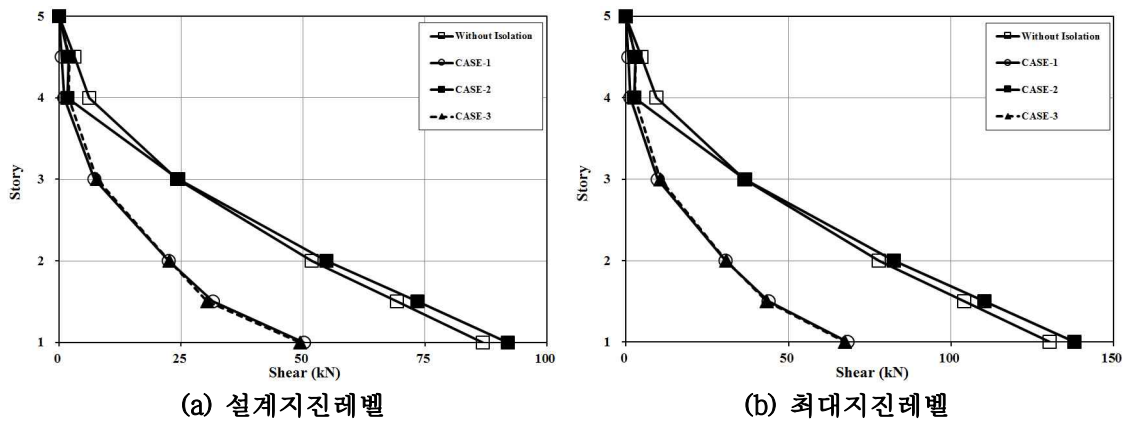
〈표 2-14〉 각 케이스별 충전단력 해석 결과(kN)

Story	Level	Without Isolation	CASE-1	CASE-2	CASE-3
5F	13900	0.0	0.0	0.0	0.0
4.5F	11800	3.1	0.5	2.0	2.1
4F	11400	6.2	1.0	1.7	1.9
3F	6500	24.2	7.2	24.4	7.7
2F	1500	51.8	22.5	54.9	22.6
1.5F	600	69.3	31.5	73.4	30.4
1F	0	86.8	50.2	92.0	49.4

케이스 2의 경우 층 전단력 감소효과는 등대전체를 면진화 하였을 때 보다 큰 효과를 나타내지 않았는데, 이는 등대 렌즈 층의 층 전단력 감소가 미소하여 하부구조에서의 전단력 감소에는 크게 기여하지 못하였기 때문으로 사료된다.

케이스 3의 경우 층 전단력 감소효과는 케이스 1과 거의 유사한 형태를 나타내었다. 하지만 등대 렌즈 부분에서는 케이스 2의 결과와 유사하게 나와 이처럼 질량이 작고 속이 텅 빈 구조

물의 경우에는 2중 면진시스템 보다는 전체 면진을 채용하는 것이 경제적인 면에서 더 유리한 것으로 판단된다.



[그림 2-21] 층전단력 해석결과

(라) 소결

- ① 내진설계 기준이 제정되기 이전의 등대구조물의 경우에 면진장치 선택 시 적층고무베어링은 장주기화나 경량물에 적용이 어렵고 코일 스프링을 이용한 시스템의 경우에도 적재물이 가볍고 무게가 변화하는 경우 면진효과가 저하되는 등의 문제가 발생하게 됨으로 등대와 같은 구조물의 경우 레일의 기하학적 구조를 사용하는 것이 유리하다. 또한, 비면진구조 대비 2.5배 이상의 면진주기 설정으로 장주기화하여 적재물의 무게와 관계없이 우수한 면진효과를 발휘할 수 있도록 조치할 필요가 있음을 제안하였다.
- ② 또한, 등대가 위치하고 있는 지반의 종류, 렌즈 구조 등에 따라 바닥 지진동에 대한 응답은 각각 다르지만 등대 면진장치의 경우 필요 요구 성능은 기초부의 입력가속도에 대한 렌즈부의 응답가속도 감소 1/5, 응답변위 100mm 정도를 확보하도록 제안하였다.
- ③ 제안된 방법에 따라 내진설계 기준이 제정되기 이전에 지어진 등대구조물을 대상으로 검토해 본 결과, 케이스 1의 경우 비면진 등대구조물 대비 최대응답변위, 최대응답가속도 및 층 전단력 측면에서 충분한 면진효과를 나타내었다. 케이스 2의 경우 등대 렌즈의 면진효과는 충분히 있었으나, 등대구조물 자체의 효과는 크지 않은 것으로 나타났다. 이는 등대구조물 자체가 비 내진 설계된 구조물로서 렌즈 파괴 이전에 등대구조물 자체파괴가 선행될 가능성이 있으므로 등대구조물 자체의 내진안전이 확보된 경우에만 적용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.
- ④ 케이스 3의 경우 비 면진구조 대비 유효한 면진효과는 나타내었지만, 최대응답가속도가 등대전체를 면진화한 경우보다 증가하는 경향을 나타내었으며, 렌즈의 면진화로 인한 층 전단력의 감소가 미소함으로 이중 면진의 적용으로 인한 실효성은 그 효과가 크지 않은 것으로 나타났다.

다. 3축 면진장치를 적용한 건축물의 수직 및 수평 해석

(1) 일반사항

(가) 개요 및 적용기준

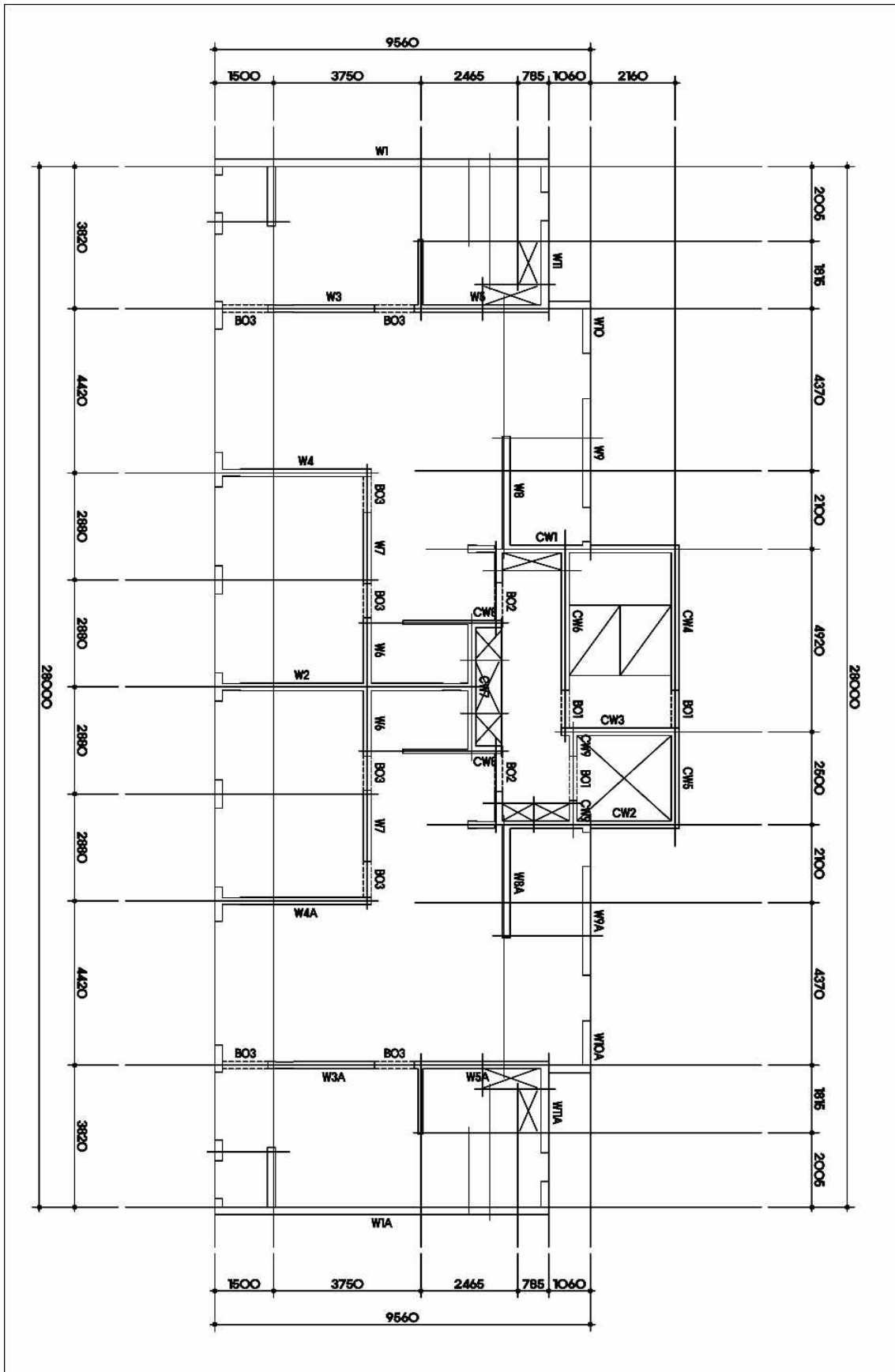
성능기반설계 내진설계 기법에 따라 성능기준을 평가 및 검토하고 목표성능수준의 만족여부를 검토하고자 한다.

〈표 2-15〉 구조 개요

구 분	내 용	비 고
건 물 용 도	공동 주택	-
건 물 규 모	지하3층 / 지상 20층 공동주택(아파트) 및 부대복지시설	-
구 조 형 식	철근콘크리트 벽식구조	(R=4.0)

〈표 2-16〉 적용 기준 및 지침

항 목	내 용
적용 기준	• 건축구조설계기준 (KBC2016), 국토해양부 • 콘크리트구조설계기준 (KBC2012), 한국콘크리트학회
참고 기준	• 공동주택 성능기반 내진설계 지침안 (대한건축학회, 2016) • 기존시설물(건축물) 내진성능평가요령, 한국시설안전관리공단(2013) • FEMA 440(2013), "Improvement of Nolinear Static Seismic Analysis Procedures" • ASCE 41-13(2013), "Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings" • ATC-72-1(2010), "Modeling and Acceptance Criteria for Seismic Design and Anaysis of Tall Buildings" • LATBSDC(2011), "An Alternative Procedure for Seismic Analysis and Design of Tall Buildings Located in the Lose Angeles Region" • PEER TBI (2010), "Guidelines for Performance-Based Seismic Design of Tall Buildings"



[그림 2-22] 기준층 구조평면도

(나) 풍하중 및 지진하중

풍하중 및 지진하중 적용 계수는 아래 표와 같다.

〈표 2-17〉 풍하중 적용 계수

구 분	풍하중 계수	비 고
기본풍속(V_0)	30m/s	
중요도계수(I_w)	1.0	중요도 (1)
지표면조도	D	
지형계수(K_{zt})	1.0	

〈표 2-18〉 지진하중 적용 계수

구 분	계수
지역계수	0.2
중요도계수	1.2
지반분류	S_c
내진설계범주	D

(다) 구조재료의 특성

본 구조물에 사용된 주요 구조 재료의 규격 및 강도는 “공동주택성능기반 내진설계지침(2016)” 을 토대로 기대강도(Expected Strength)계수를 적용한 재료 강도를 사용하였다.

〈표 2-19〉 공동주택 성능기반 내진설계 지침(2016) “표 4.1” 재료의 기대강도 계수

재료특성	공칭강도	계수
콘크리트 압축강도 (f_{ck})	21MPa 이하	1.2
	21MPa 초과 ~ 40MPa 이하	1.1
	40MPa 초과	1.0
철근의 항복강도 및 인장강도 (f_y)	300MPa 미만	1.25
	300MPa 이상 ~ 400MPa미만	1.2
	400MPa 이상 ~ 500MPa미만	1.1
	500MPa 이상 ~ 600MPa미만	1.05
	600MPa 이상	1.0

〈표 2-20〉 콘크리트 적용 강도

부 재	공칭강도 (f_{ck})	기대강도 ($f_{ck, exp}$)
	벽체, 슬래브, 연결보	
4층 벽체 ~ 지붕층	24MPa	26.4 MPa
기초 ~ 4층 슬래브	27MPa	29.7 MPa

〈표 2-21〉 철근 적용 강도

재료 규격	공칭 항복강도 (f_y)	기대 항복강도 ($f_{y, exp}$)
SD400 (벽체 및 슬래브) D16 이하	400MPa	440MPa
SD500 (벽체 및 슬래브) D19 이상	500MPa	525MPa

(라) 성능기반설계

① 목표성능 설정

공동주택 성능기반 내진설계 지침(대한건축학회, 2016)에서는 내력벽식 공동주택의 최소목표성능은 인명안전수준과 붕괴방지수준이며 이에 해당하는 공학적 요구물리량은 각각 층간변위 1.5%, 2.0%이다. 본 프로젝트에서는 발주처의 요구에 따라서, 최대고려지진(Maximum Considered Earthquake, MCE)에 대하여 붕괴방지(Collapse Prevention)를 최소한의 성능확보를 위한 목표성능으로 설정하였다.

〈표 2-22〉 내진등급과 성능목표

내진등급	성능목표	
	성능수준	지진위험도
특	기능수행 (또는 즉시거주)	설계스펙트럼가속도의 1.0배
	인명안전 및 붕괴방지	설계스펙트럼가속도의 1.5배
I	인명안전	설계스펙트럼가속도의 1.2배
	붕괴방지	설계스펙트럼가속도의 1.5배
II	인명안전	설계스펙트럼가속도의 1.0배
	붕괴방지	설계스펙트럼가속도의 1.5배

② 하중조합

하중조합은 공동주택 성능기반 내진설계 지침에 따라 적용하였고, 여기서, E는 2400년 재현 주기 지진하중(E)으로 지반운동의 직교하는 두 성분이 동시에 작용하도록 해석하였다.

〈표 2-23〉 비선형 해석모델에 대한 하중조합

구분	하중조합	비 고
Load Combination 1	$1.1D.L + 0.25L.L \pm 1.0E$	D.L : 고정하중 L.L : 활하중 E : 지진하중 ± : 양방향

③ 비선형모델

비선형해석 프로그램은 Perform 3D 이며, 다음과 같은 내용을 해석모델에 반영하였다.

〈표 2-24〉 모델 비교표

항목	선형설계	비선형설계	비고
질량	고정하중+자중	고정하중+자중	질량은 동일하게 적용
재료속성	탄성(콘크리트,철근)	비탄성(콘크리트,철근)	-
유효강성	벽체	전단면 유효	강성 차이 없음
	기둥	휨강성 : 1.0EI 축강성 : 1.0EI 전단강성 : 1.0EI	선형설계는 전단면을 사용하고 비선형설계는 기준에서 제시한 유효단면을 적용
	테두리보	설계강도만큼 강성조절	
	인방보	코아주변 인방은 양단 회전단으로 처리	
	슬래브	강막효과만을 고려 (면외 휨, 전단강성은 5%-면외강성 최소화)	
지하층 고려 (밀면전단력)	건물의 1층에서 밀면전단력고려(1층 이하 SPRING SUPPORT형성)	건물의 1층에서 밀면전단력고려 (지하층에 가상의 벽과 보를 형성하여 강성 확보)	제시된 모델링 방법의 차이에 의한 해석방법
초기감쇠	없음	2.5% 적용	-

- 질량 : 비선형 해석에 적용되는 질량은 고정하중의 1.0배를 적용한다.
- 비선형 재료 속성 : 재료의 기대강도를 반영한 콘크리트와 철근의 응력-변형률 곡선 적용.
- 벽체 : Fiber 요소로 모델링 하였다. 탄성거동이 예상되는 벽체이더라도 고층부의 에너지 상쇄능력을 검토하기 위해서 모든 벽체를 비선형으로 모델링하였다.
- 짧은 벽체 : 횡력저항요소에 포함되지 않는 짧은 벽체는 모델링은 하되 해석결과에서 제외.
- 테두리보, 연결보 : 공동주택 성능기반 내진설계 지침(대한건축학회, 2016)에 따라서 비선형특성을 적용하고 테두리보는 휨강성의 50%, 인방보는 휨강성의 20%로 모델링하였다.
- 기둥 : 공동주택 성능기반 내진설계 지침(대한건축학회, 2016)에 따라서 유효강성을 반영하여 비선형 속성으로 모델링하였다.
- 슬래브 : 비선형모델에서는 선형모델과 같이 슬래브를 직접모형화 할 수 없으므로 강막효과(Diaphragm)만을 적용하였다.
- 구조물의 초기 감쇠(Initial Damping) : 초기감쇠는 2.5%를 반영하였다.

④ 부재유효강성

부재의 유효강성은 하중조합은 공동주택 성능기반 내진설계 지침(대한건축학회, 2016)에 따라 적용하였다.

〈표 2-25〉 유효강성

부재		휨강성	전단강성	축강성
보		0.5 EI	1.0 GA	-
기둥	축력비 0.5이상	0.7 EI ²⁾	1.0 GA	1.0 EA
	축력비 0.3이하	0.5 EI ²⁾	1.0 GA	1.0 EA
벽	균열이 없는 경우	1.0 EI ¹⁾	1.0 GA	1.0 EA
	균열이 있는 경우		1.0 GA	1.0 EA
연결보(테두리보, 인방보)		0.2 EI	1.0 GA	-

1) LATBSDC의 Reinforce Concrete Stiffness Properties에 따르면 벽체의 비선형 Fiber요소는 인장저항능력이 없는 콘크리트의 인장균열을 자동적으로 계산하여 강성에 반영되므로 비선형 해석에는 균열강성을 고려하지 않는다.

2) 공동주택 성능기반 내진설계 지침(대한건축학회, 2016)에 따라 기둥의 축력비가 0.5이상일 때, 휨강

성 0.7EI, 기둥의 축력비가 0.3이하일 때, 휨강성 0.5EI로 설계한다.

- 3) 보 길이가 1.0m이하, 벽체두께가 150mm 이하, 벽체길이가 1.0m미만인 경우는 해석 모델에서 제외하였다.

⑤ 비선형시간해석 모델

비선형 해석 모델의 시간이력해석 수행 지반조건을 반영한 7쌍의 지진파를 X축과 Y축으로 나누어 시간이력해석을 수행하였고, 평가 기준은 MCE Level의 지진하중에 대하여 구조물이 목표 성능수준인 붕괴방지에 만족하도록 허용기준 아래 <표 2-26>에 근거하여 평가하였다.

<표 2-26> DBE Level 허용기준

구분	허용 기준	Reference	보강방법
층간변위	1.5% (7쌍의 지진 최대응답 평균)	공동주택 성능기반 내진설계 지침 (대한건축학회, 2016)	-
벽체 수직변형률	콘크리트 압축변형률 0.2 % 철근 인장 변형률 5% (7쌍의 지진 최대응답 평균)	ASCE/SEI 41-13 “10.3.3.1 Usable Strain Limits”	평균 압축변형률이 0.002(0.2%)를 초과할 경우에는 철근보강을 실시하거나, 벽체 단부 경계요소 설치.
벽체 회전변형률	해당 부재의 CP level	공동주택 성능기반 내진설계 지침 (대한건축학회, 2016)	-
벽체 전단력	$1.2V_u < V_n$ 여기서, V_u : 평균 소요작용력 V_n : 기대강도를 기반으로하는 설계강도, $\phi=1.0$		
보 휨모멘트 및 전단력	휨모멘트 : $M_u < M_n$ 검토 초과 시, 변형각 CP Level 전단력 : $1.2V_u < V_n$		
기둥 휨모멘트 및 전단력	휨모멘트 : $M_u < M_n$ 검토 초과 시, 변형각 CP Level 전단력 : $1.2V_u < V_n$		

(2) 해석계획

(가) 하중계수 및 질량

공동주택 성능기반 내진설계 지침(대한건축학회, 2016)의 “4.1, 하중계수 및 질량”에 의하면 비선형 해석에는 일반적으로 기본설계에서 사용하는 계수하중과는 다른 예상 중력하중을 적용한다. 본 프로젝트에서는 본 조항에서 제시하는 예상 중력하중은 고정하중의 1.1배, 활하중의 25%를 적용하여 “1.1D.L+0.25L.L”으로 설계 하였다.

LOAD CASES

Load Case Type: Gravity

Load Case Name: Gravity

Status: Saved

Analysis Method: ☒ Nonlinear

Control Information for Nonlinear Analysis:

- No. of Load Steps: 10
- Max. Events in any Step: 100
- Initial Step to First Event?: ☒ No
- Limit State to Stop Analysis: Type: Default
- Name: Deformation beyond X point for any component

Gravity Load Patterns for this Load Case:

LOAD PATTERN TO BE ADDED OR CHANGED

Load Type: ☒ Nodal ☐ Element ☐ Self Weight

Pattern Name: DL

Scale Factor:

LOAD PATTERN LIST

No.	Type	Name	Factor
1	Node	DL	1.1
2	Node	LL	0.25

[그림 2-23] 하중조합

ANALYSIS SERIES

Check Structure: **Structure is OK**

The structure is checked automatically when you start a new analysis series. If you wish, you can check it beforehand by pressing this button.

TYPE OF OPERATION

- ☒ Continue or change an existing series

CONTINUE OR CHANGE AN EXISTING SERIES

Series name: EQ

Description: EQ

Number of analyses: 0

Basic + Masses

Basic Parameters

Type of load sequence: ☒ Standard ☐ General

Include P-Delta effects?: ☒ Yes ☐ No

We recommend ignoring P-Delta effects until you are sure the analysis model is correct.

Event overshoot factor (%; default = 1): 5

Masses

Number of mode shapes to be calculated (max: 50): 10

Number to be printed. Usually 0 - see note below: 0

Mass Pattern: m

Scale Factor: 1

[그림 2-24] 하중조합

(나) 재료 비선형 모델

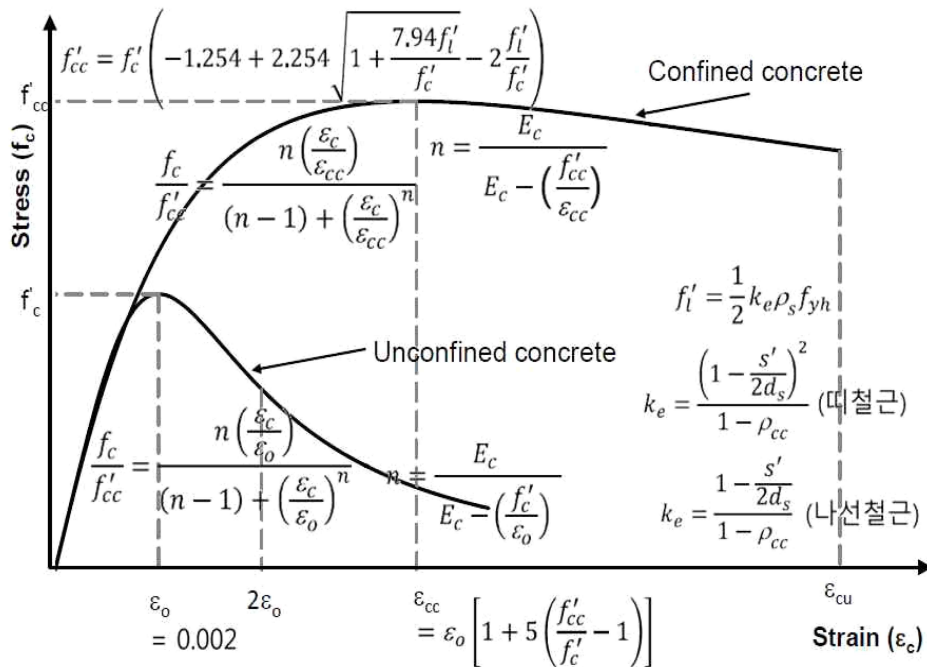
벽체의 Fiber요소를 구성하기 위한 콘크리트 특성과 철근특성에 대해서 기술하였다. 해석을 위한 비선형 해석 프로그램인 Perform-3D에서는 철근과 콘크리트의 특성의 합성(Component)을 통해서 비선형 벽체의 성질을 구현한다. 이를 위해서 콘크리트와 철근의 비선형 특성을 정의해야 한다.

① 콘크리트 재료 비선형

해석 시에 콘크리트의 비선형 특성은 [그림 2.25]에서와 같이 Mander모델의 응력-변형률 곡선을 이용한다. 콘크리트의 탄성계수는 선형프로그램 MIDAS ADS상의 탄성계수와 일치시키기 위하여 KBC2016 [0503.4.3.] 에서 제시한 할선탄성계수의 공식을 적용하여 산정하였다.

$$E_c = 0.077m_c^{1.5} \sqrt{f_{cu}} \text{ (MPa)} \text{ (보통중량골재 } m_c = 2,300\text{kg/m}^3 \text{)}$$

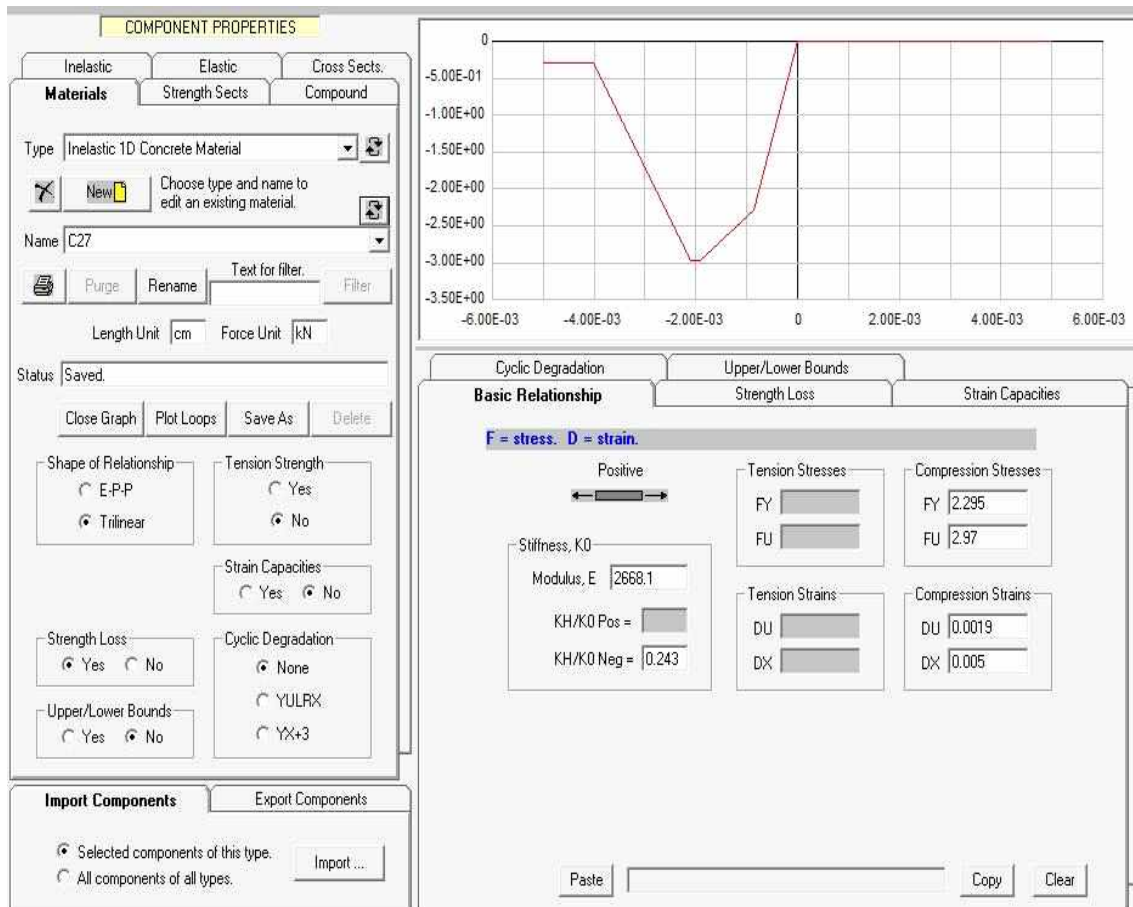
f_{ck} 값은 공동주택 성능기반 내진설계 지침에 따라 기대강도(f'_{ck})를 적용하였다. F_U 값은 공칭강도(F_{ck})에 1.1배(기대강도계수)를 곱하였고, F_Y 값은 공칭강도(F_{ck})에 0.85배를 곱하여 적용하였다. 압축변형률 D_U 와 D_L 은 최대압축강도시의 변형률인 0.002를 기준으로 하여 D_U 는 0.0019, D_L 은 0.0021을 적용하였고, D_R 은 최대압축강도시의 변형률인 0.002에 2배를 곱하였으며, 잔류응력은 최대강도 F_U 값의 10%를 적용하였다.



[그림 2-25] Mander모델의 응력-변형률 관계

② 콘크리트 재료의 허용변형률

본 구조물의 벽체에서의 최외단부 압축변형률의 평가는 중요한 사항이며 그 허용압축변형률은 공동주택 성능기반 내진설계 지침에 따라 횡구속되지 않은 콘크리트에서 최대응력에 대응하는 압축변형률은 $0.002(=0.2\%)$ 를 초과할 경우 해당부재는 압축변형에 대한 보강을 하도록 설계하였다.



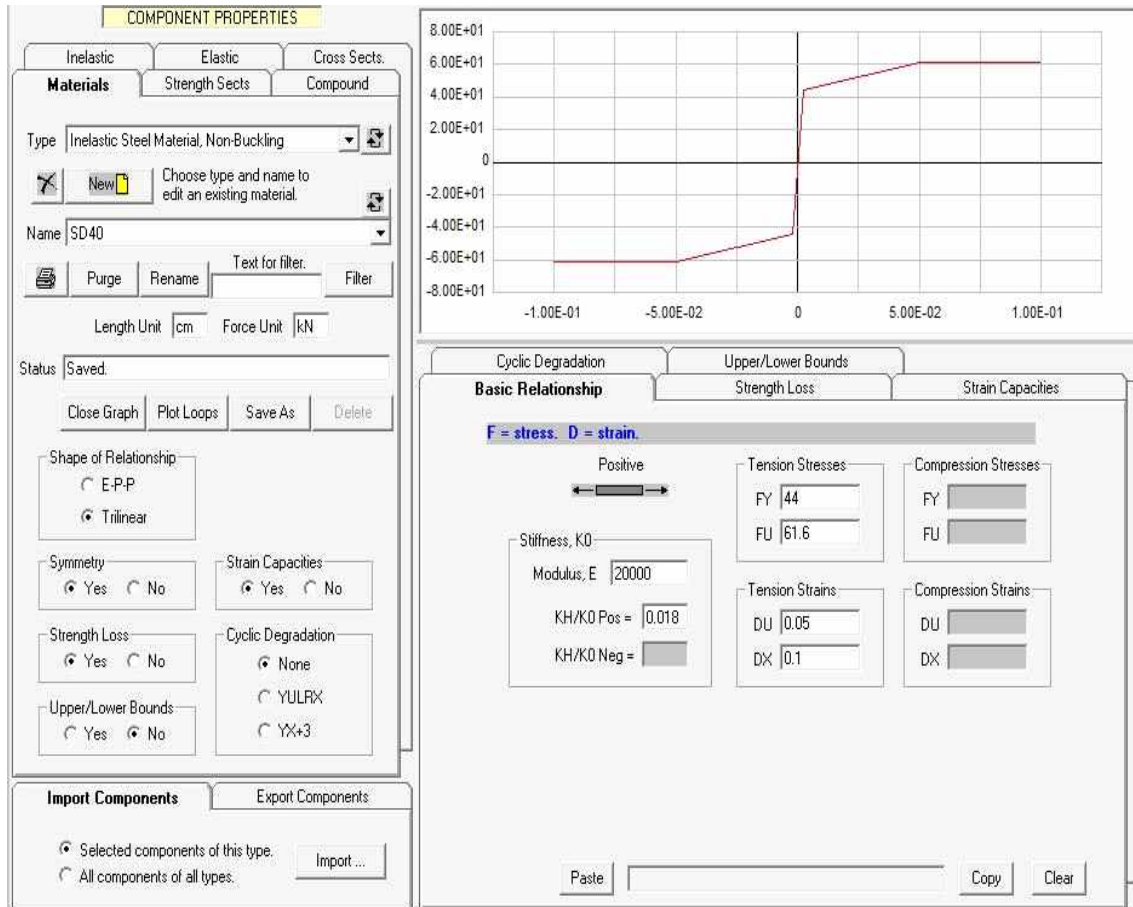
[그림 2-26] 콘크리트의 비선형 입력특성

③ 철근 재료 특성

해석 시 철근 재료의 특성은 SD40 철근의 기대강도인 $F_Y=44\text{kN/cm}^2$ 를 입력하고, HYUNDAI STEEL의 철근 물성에서 제공하는 $F_U=61.6\text{kN/cm}^2$ 값을 적용하였습니다.

④ 철근 재료의 변형률

철근의 경우 인장과 압축을 받는 철근의 응력-변형률 관계는 삼선형계를 사용하며, 탄성계수는 $2.0 \times 10^4 (\text{kN/cm}^2)$ 인장과단 변형률은 공동주택 성능기반 내진설계 지침에서 제시하는 인장과단에 의한 변형률 한계 $0.1(=10\%)$ 을 사용하였다. 압축을 받는 철근은 좌굴거동에 대한 응력저하를 공동주택 성능기반 내진설계 지침에 따라 항복응력의 10%를 적용하였다.



[그림 2-27] 철근의 비선형 입력창

(다) 부재 비선형 모델

① 벽체의 모델링

벽체 모델링 시 Perform3D에서는 Fiber(섬유)요소로 구현하였고, 입력방법은 [그림 2-26]에 서와 같이 앞서 정의했던 콘크리트요소와 철근 요소의 Fiber요소에 대한 지정이 필요하다. 여기서의 Fiber요소는 부재를 등 간격으로 나뉘어서 해석을 하게 된다. 철근비는 단위미터(1m)당의 수직철근비를 계산하여 입력한다. 벽체의 면외강성은 탄성계수를 조절하여 10% 수준으로 입력하였다. 공동주택 성능기반 내진설계 지침에 따르면 전문가의 의견에 따라서, 비선형해석 할 부재를 나뉘어 판단하지만, 고차모드의 영향을 고려하여 모든 벽체를 비선형요소로 입력하였다.

COMPONENT PROPERTIES

Materials
Strength Sects
Compound

Inelastic
Elastic
Cross Sects.

Type: Shear Wall, Inelastic Section

Name: 200_D10@100

Length Unit: cm Force Unit: kN

Status: Saved

Fiber Areas and Coordinates: AUTO SIZE option

Import Components
Export Components

☒ Selected components of this type.
☐ All components of all types.

STRUCTURAL FIBERS

CONCRETE

 Material Type: Inelastic 1D Concrete Material
 Material Name: C27
 Wall Thickness: 20 No. of Fibers: 8

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Specify factors for relative tributary widths. Go to Draw Section page to show fibers.

STEEL

 Material Type: Inelastic Steel Material, Non-Buckling
 Material Name: SD40
 Specify area as: ☒ PERCENT of concrete area ☐ Effective thickness
 Percent or thickness: 0.713 No. of Fibers: 8

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Fibers are numbered from edge IK.

Properties depend on whether section has FIXED or AUTO fibers.

[그림 2-28] 벽체의 비선형 특성 입력방법

COMPONENT PROPERTIES

Inelastic
Elastic
Cross Sects.

Materials
Strength Sects
Compound

Type: Shear Wall Compound Component

Name: 200_D10@100

Length Unit: cm Force Unit: kN

Status: Saved

Import Components Export Components

☒ Selected components of this type.
☐ All components of all types.

Axis 2 is from IJ to KL (usually vertical).

Axis 3 is from IK to JL (usually horizontal).

Basic Components

Cross Section for Vertical Axial/Bending

 Type: Shear Wall, Inelastic Section
 Name: 200_D10@100

Properties for Horizontal Axial/Bending Stiffness

 Wall Thickness: 20 Young's Modulus: 1390.2

Shear Properties:

 Shear Material Type: Elastic Shear Material for a Wall
 Shear Material Name: Shear_C7
 Effective Wall Thickness: 20

[그림 2-29] 비선형벽체의 콘크리트 속성과 합성하는 과정

② 벽체의 허용변형기준

벽체의 회전변형률 대하여 변형각 공동주택 성능기반 내진설계 지침 “표 4.6”의 허용기준을 참고하여 붕괴방지(CP) 초과여부를 평가한다.

[표 4.6] 철근콘크리트 벽체 및 연결보의 비선형 모델

조건			모델링 파라메터			허용기준(소성회전각, rad.)				
			소성회전각 (rad.)		잔류 강도비	거주 가능	1차부재		2차부재	
							인명 안전	붕괴 방지	인명 안전	붕괴 방지
a	b	c								
1. 휨에 의해 지배되는 경우 : 벽체 요소										
특수경계요소 의 유무	배근상태 와 축력비	작용 전단력의 비율								
있음	0.1 이하	0.33 이하	－	－	－	0.005	0.010	0.015	0.015	0.020
		0.5 이상	－	－	－	0.004	0.008	0.01	0.01	0.015
	0.25 이상	0.33 이하	－	－	－	0.003	0.006	0.009	0.009	0.012
		0.5 이상	－	－	－	0.0015	0.003	0.005	0.005	0.01
없음	0.1 이하	0.33 이하	－	－	－	0.002	0.004	0.008	0.008	0.015
		0.5 이상	－	－	－	0.002	0.004	0.006	0.006	0.01
	0.25 이상	0.33 이하	－	－	－	0.001	0.002	0.003	0.003	0.005
		0.5 이상	－	－	－	0.001	0.001	0.002	0.002	0.004
2. 휨에 의해 지배되는 경우 : 연결보(coupling beam)										
내진상세단면인 경우		0.25 이하	0.025	0.04	0.75	0.01	0.02	0.025	0.025	0.05
		0.5 이상	0.02	0.035	0.5	0.005	0.01	0.02	0.02	0.04
비내진상세단면인 경우		0.25 이하	0.02	0.025	0.5	0.006	0.012	0.02	0.02	0.035
		0.5 이상	0.01	0.05	0.25	0.005	0.008	0.01	0.01	0.025
대각선배근		N.A.	0.03	0.05	0.8	0.006	0.018	0.03	0.03	0.05
3. 전단에 의해 지배되는 경우 : 연결보(coupling beam)										
	작용 전단력의 비율	전체휨변형각(%) 혹은 전체회전각(rad.)		잔류 강도비	거주 가능	1차부재 (% 또는 rad.)		2차부재 (% 또는 rad.)		
		d	e			c	인명 안전	붕괴 방지	인명 안전	붕괴 방지
내진상세단면인 경우		0.25 이하	0.02	0.03	0.6	0.006	0.015	0.02	0.02	0.03
		0.5 이상	0.016	0.024	0.3	0.005	0.012	0.016	0.016	0.024
비내진상세단면인 경우		0.25 이하	0.012	0.025	0.4	0.006	0.008	0.01	0.01	0.02
		0.5 이상	0.008	0.014	0.2	0.004	0.006	0.007	0.007	0.012

1. 사이값은 선형보간한다.

2. 배근상태와 축력비는 $\frac{(A_s - A_s')f_y + P}{t_w l_w f_{ck}}$ 로 평가한다.

3. 작용전단력의 비율은 $V/(\sqrt{f_{ck}} t_w l_w)$ 로 평가한다.

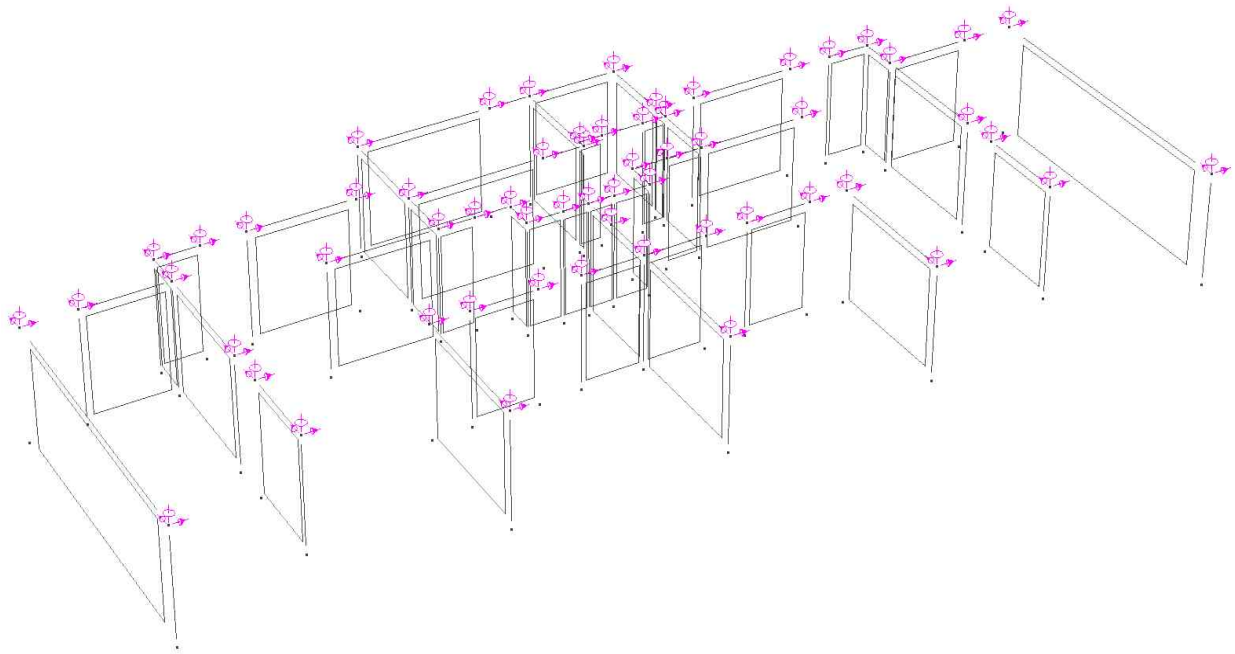
4. 내진상세단면과 비내진상세단면의 판단은 KBC2016 0520 내진설계 시 특별고려사항의 규정에 따른 횡보강근의 만족여부에 따른다.

5. 벽체가 fiber요소로 모델링 된 경우, 휨에 대한 모델링 파라미터 a, b, c를 정의할 필요가 없고, 소성 회전각에 대한 허용기준을 검토하여야 한다.

[그림 2-30] 벽체의 허용변형 기준

③ 슬래브의 모델링

탄성설계에서의 슬래브 면내방향의 전단강성은 100%, 면외방향 휨, 전단강성은 5%를 고려하여 설계되었다. 비선형 모델에서는 슬래브를 직접 모델링 하지 않고, 공동주택 성능기반 내진설계 지침의 “4.4.8 슬래브의 모델링 변수”에 따라서 전체 층에 대하여 강막(Rigid Diaphragm)으로 정의한다.



[그림 2-31] Perform 3D에서 구현된 기준층의 각막(Rigid Diaphragm)형상

④ 연결보와 지상층 테두리보의 모델링

연결보와 테두리보의 경우에 따라서 $L/H \geq 4$ 에 해당하는 부재는 휨지배 거동을 보이고, 그 외부재는 전단지배 거동을 보인다. 비선형 모델링 변수는 공동주택 성능기반 내진설계 지침의 기준에 따라 설계하였다. 테두리보는 유효강성을 고려하여 설계하였다. [그림 2-32]에서와 같이 유효강성을 조절하기 위하여 Axis 2(축), Axis 3축의 단면2차모멘트를 줄여 반영하였다.

부재의 비선형 특성은 [그림 2-33]에서 설정 할 수 있다. FY는 FU값의 0.8을 곱하여 산정하고, FU값은 콘크리트 강도에 1.1배를 곱하여 휨모멘트의 공식에 따라 산정한 값이다. DX값은 FEMA 356의 Table 6.7의 보의 연성능력을 참고하여 b로 적용하였다. DR은 $DR/DX=0.9$ 의 비율을 가지도록 하여 산정하였다. DL값은 a, DU는 DL값에 0.7을 곱하여 산정하였다. FR/FU는 c값을 반영하였다.

COMPONENT PROPERTIES

Materials

Strength Sects

Compound

Inelastic

Elastic

Cross Sects.

Type

Beam, Reinforced Concrete Section

New

Choose type and name to edit an existing section.

Name

01. 20x50

Purge

Rename

Text for filter.

Filter

Length Unit

cm

Force Unit

kN

Status

Saved.

Check

Save

Save As

Delete

Symmetry

Yes

No

Import Components

Export Components

Selected components of this type.

All components of all types.

Import ...

Dimensions and Stiffness

Inelastic Strength

Elastic Strength

Shape and Dimensions

Section Shape

Rectangle

B

20

D

50

Axis 2

Axis 3

To calculate the section properties for the above dimensions, press this button.

If you wish, you can edit the properties after they have been calculated.

Calculate

Section Stiffness

Axial Area

1000

Torsional Inertia

104760

Shear Area along Axis 2

833.3

Bending Inertia about Axis 2

33333

Shear Area along Axis 3

833.3

Bending Inertia about Axis 3

208330

Shear area = 0 means no shear deformation.

Material Stiffness

Young's Modulus

2668.1

Poisson's Ratio

0.167

Shear Modulus =

1143.1

[그림 2-32] 연결보의 단면과 부재속성 입력창

COMPONENT PROPERTIES

Materials

Strength Sects

Compound

Inelastic

Elastic

Cross Sects.

Type

FEMA Beam, Concrete Type

New

Choose type and name to edit an existing component.

Name

01. LB1-27

Purge

Rename

Text for filter.

Filter

Length Unit

cm

Force Unit

kN

Status

Saved.

Graph

Save

Save As

Delete

Shape of Relationship

E-P-P

Trilinear

Use Cross Section

Yes

No

Symmetry

Yes

No

Deformation Capacities

Yes

No

Strength Loss

Yes

No

Cyclic Degradation

None

YULRX

YX+3

Upper/Lower Bounds

Yes

No

Import Components

Export Components

Selected components of this type.

All components of all types.

Import ...

Deformation Capacities

Cyclic Degradation

Upper/Lower Bounds

Section and Dimensions

Elastic Stiffness

Basic F-D Relationship

Strength Loss

Cross Section

Type

Beam, Reinforced Concrete Section

Name

01. 20x50

Component strength, as a multiple of section strength

1

Section Dimensions

Axis 2

Axis 3

B

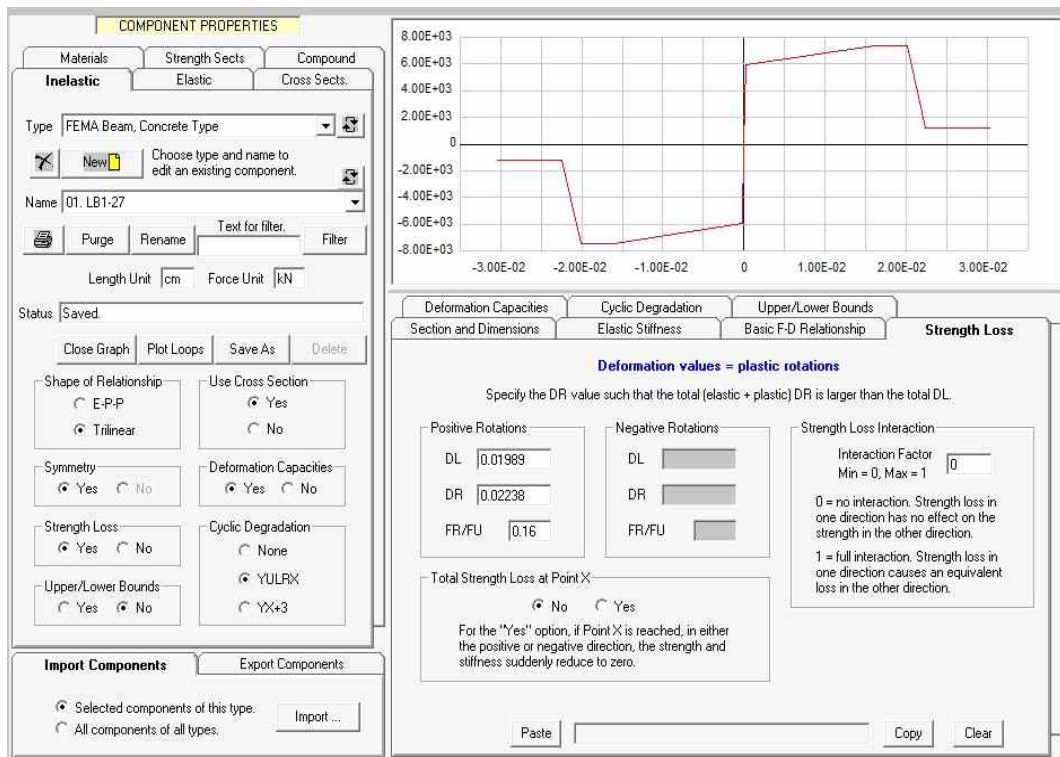
20

D

50

Items in green are obtained from the Cross Section properties.

[그림 2-33] 연결보의 FEMA속성 입력창



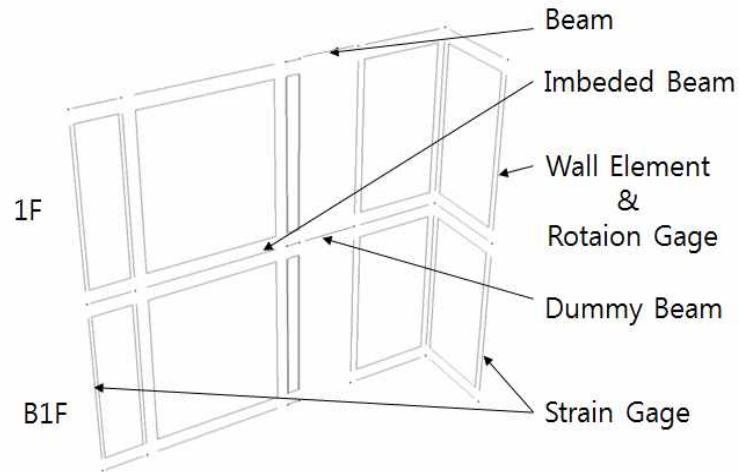
[그림 2-34] 연결보의 강도저감 입력창



[그림 2-35] 연결보의 Capacity values

⑤ 가상 모델링 요소

Gage 요소는 모든 벽체에 설치되며 [그림 2-36]에서와 같이 벽체의 양단부에 Strain Gage, 벽체와 절점을 공유하는 Rotation Gage를 모델링 하였다.



[그림 2-36] 입력된 요소

(라) P-Δ 효과

각 부재(벽체)의 그룹생성 시 기하학적 비선형성으로 P-Δ 효과를 고려하도록 설정하였으며, [그림 2-37]과 같이 기본 변수 설정에서 P-Δ 효과를 반영하여 해석을 수행하였다.

ANALYSIS SERIES

Check Structure

The structure is checked automatically when you start a new analysis series. If you wish, you can check it beforehand by pressing this button.

TYPE OF OPERATION
☐ Start a new analysis series
☒ Continue or change an existing series
☐ Delete an existing series

Exit

CONTINUE OR CHANGE AN EXISTING SERIES
Series name: Analysis Number of analyses = 0 UnChange
Description:

Change analysis series properties below if desired. Press OK to save properties and continue.

OK

Basic + Masses

Basic Parameters
Type of load sequence
☒ Standard ☐ General
Include P-Delta effects?
☒ Yes ☐ No

We recommend ignoring P-Delta effects until you are sure the analysis model is correct.

Event overshoot factor (%; default = 1)

10

A larger overshoot factor can reduce the analysis time, and can often be used without much loss of accuracy, especially for larger structures.

Masses
Number of mode shapes to be calculated (max. 50) 27
Number to be printed. Usually 0 - see note below. 0

Mass Pattern	Scale Factor
mass	1

If mode shapes are printed (in M000.txt), this file can be very large. If you need mode shape details, it is usually better to get them from a binary results file.

[그림 2-37] P-Δ 효과

(마) 초기 감쇠율

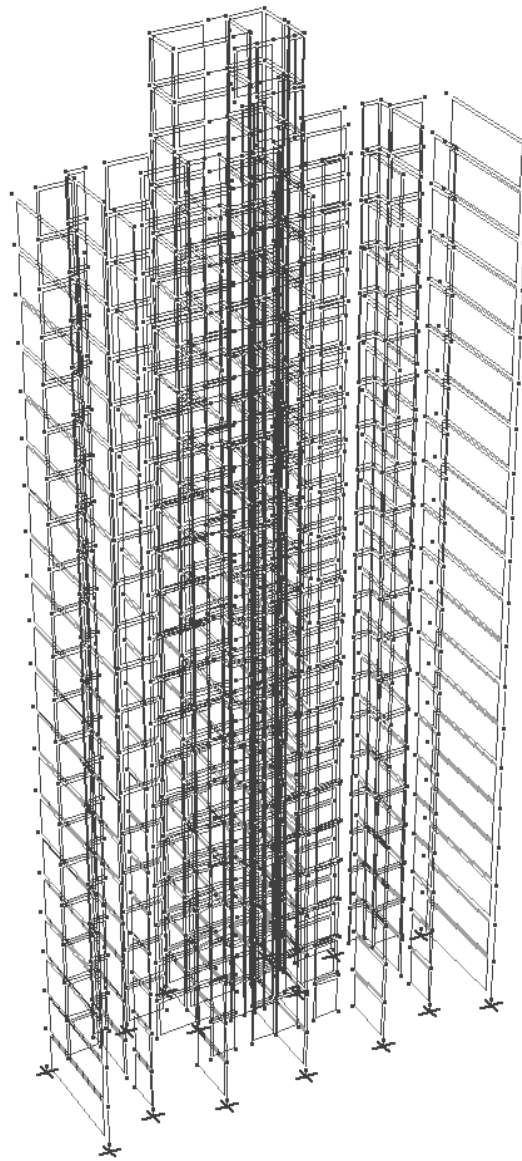
구조물의 초기 감쇠율은 [그림 2-38]과 같이 공동주택 성능기반 내진설계 지침 “4.5 초기 감쇠율” 조항을 참조하여 2.5%로 설정하였다. Perform 3D V5®에서는 점성(Viscous)감쇠 입력을 Modal Damping과 Rayleigh Damping 두 가지 방법으로 가능하도록 되어 있으며, 본 구조물의 입력 방식은 두 방법을 조합하는 방식을 선택하였다. Modal Damping에 0.25%를 입력하였으며, Rayleigh Damping에 2.25%로 입력하였다.

The screenshot shows the 'ANALYSIS SERIES' dialog box with the 'Modal Damping' tab selected. The 'TYPE OF OPERATION' section has 'Continue or change an existing series' selected. The 'CONTINUE OR CHANGE AN EXISTING SERIES' section shows 'Series name' as 'EQ' and 'Description' as 'EQ'. The 'Damping Ratios' section has 'Same damping ratio for all modes' selected with a 'Ratio (%)' of 0.25. The 'Basic + Masses' tab is also visible.

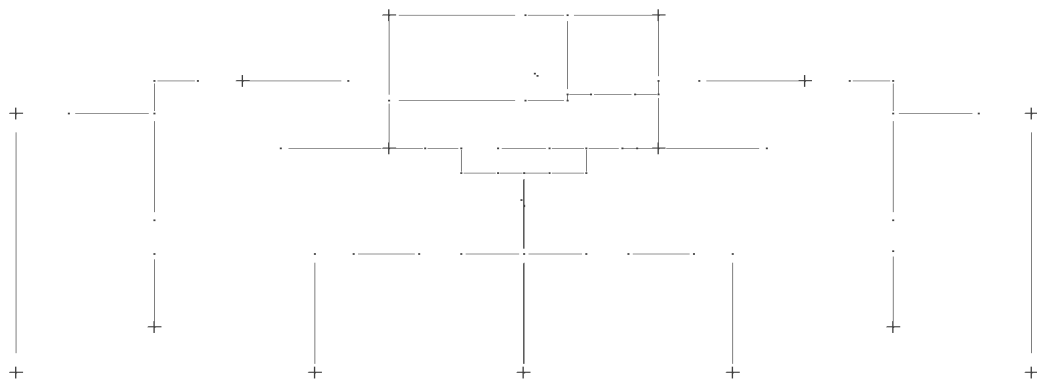
[그림 2-38] Modal Damping

The screenshot shows the 'ANALYSIS SERIES' dialog box with the 'Rayleigh Damping' tab selected. The 'Basic Values' section contains a graph of 'Percent of critical damping' vs 'Period, as a multiple of Mode 1 period'. The 'Alpha-M Options' and 'Beta-K Options' sections are also visible. The 'Period Ratio, T/T1' and 'Damping %' are set for Point A (0.2, 2.25) and Point B (0.9, 2.25). The 'Alpha' and 'Beta' values are set to 'To be found'.

[그림 2-39] Rayleigh Damping



(a) 입면도



(b) 평면도
[그림 2-40] 모델링 형상

(3) 면진 설계

(가) 목표 유효감쇠 및 유효주기 설정

면진건물의 유효감쇠(β_D, β_M)와 유효주기(T_D, T_M)는 면진시스템의 변형특성을 이용하여 결정하여야 한다. 면진 층의 최소 수평변위는 유효주기에 의해 영향을 받게 되고, 유효감쇠는 에너지소산면적에 의해 결정되므로, 유효감쇠 및 유효주기와 면진시스템의 변형특성은 상호 연관된 순환 고리를 갖고 있어 어느 것을 먼저 결정하여야 하는가에 대해서는 정답이 없다. 다만, 유효감쇠 및 유효주기의 설정은 설계하고자 하는 건물의 성능을 결정하는 것이므로 성능설계의 관점에서는 설계절차에서 가장 선행되어야 하는 단계이고, 실무적으로도 목표 면진 감쇠 및 주기를 먼저 설정하고 설계변위와 최대변위, 그리고 수평력 등을 검토해 가는 과정으로 접근하는 것이 편리하기 때문에 엔지니어는 클라이언트와 협의하여 목표 주기와 면진주기를 먼저 설정해 둘 필요가 있다. 본 예제 건물의 경우 설계변위에서의 유효 면진주기는 3.0초로 가정하고, 최대변위에서의 유효 면진주기는 4.5초로 가정하였다.

(나) 면진시스템의 유효 강성 결정 및 최소 수평변위 산정

기 설정된 목표 면진주기를 이용하여 면진시스템의 유효 강성을 결정한다.

$$K_{Dmin} = \frac{4\pi^2 \cdot W}{T_D^2 \cdot g} \left[K_{Mmin} = \frac{4\pi^2 \cdot W}{T_M^2 \cdot g} \right]$$

$$K_{Dmin} = 33.23 \text{ kN/mm}, K_{Mmin} = 14.8 \text{ kN/mm}$$

여기서, W : 상부 건물의 유효 중량(74,314kN)

K_{Dmin} : 식 (0306.11.13)로 구한 설계변위에서의 면진시스템 최소유효강성, kN/m

K_{Mmin} : 식 (0306.11.15)로 구한 최대변위에서의 면진시스템 최소유효강성, kN/m

(다) 면진장치 설계

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. 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 시에

는 설계하중 조건과 구현 가능한 면진장치를 가지고 많은 반복해석 작업을 통하여 최적의 조합으로 설계하여야 한다.

(라) 최소 횡변위

면진시스템은 면진시스템의 설계변위 D_D 와 최대변위 D_M 는 각각 다음 식에 의한 값보다 작아서는 안 된다.

$$D_D = \frac{g \cdot S_{D1} \cdot T_D}{4\pi^2 \beta_D}$$

$$D_D = 142.9\text{mm}$$

여기서 g : 중력가속도

S_{D1} : 주기 1초에서 설계스펙트럼가속도(0306.3.3)

T_D : 설계변위에서 면진구조물의 유효주기

β_D : 면진시스템의 유효감쇠(β_D)와 연관된 수치 계수이며 아래 <표 0301.1.1>에 따른다.

<표 0301.3.1> 유효감쇠에 따른 감쇠계수, β_D 또는 β_M

유효 감쇠, β_D 또는 β_M (임계 퍼센트)a,b	B_D 또는 B_M
≤ 2	0.8
5	1.0
10	1.2
20	1.5
30	1.7
40	1.9
≥ 50	2.0

a 감쇠계수는 0306.12.5.3(2)에 따라 결정된 면진시스템의 유효감쇠에 근거해야 한다.

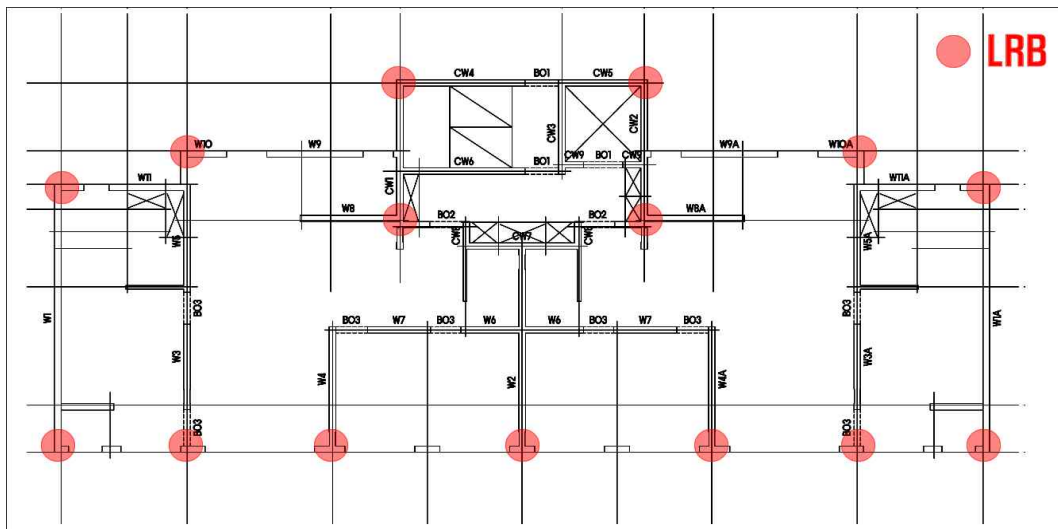
b 주어진 유효감쇠 이외의 유효감쇠에 해당하는 감쇠계수는 선형보간으로 구한다.

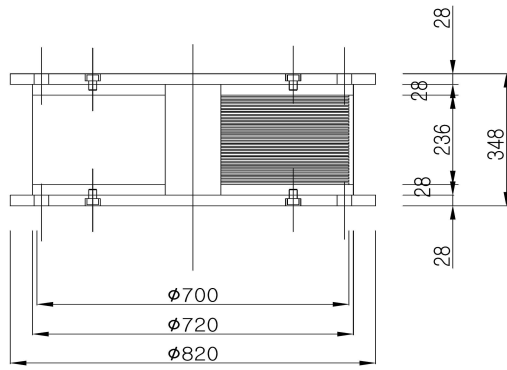
(마) 면진장치 배치

면진장치의 배치는 면진층이 비틀림 진동을 일으키지 않기 위해서 상부구조의 무게중심과 면진층의 강심을 일치시키도록 하는 것이 바람직하다. 실제 설계에서는 축력과 수평강성의 비가 일정해지도록 면진장치를 선택하면 무게중심과 강성 사이에 큰 차이는 거의 발생하지 않는다. 면진장치의 배치는 각 기둥 아래에 1개의 면진장치를 설치하는 것을 원칙으로 한다. 그러

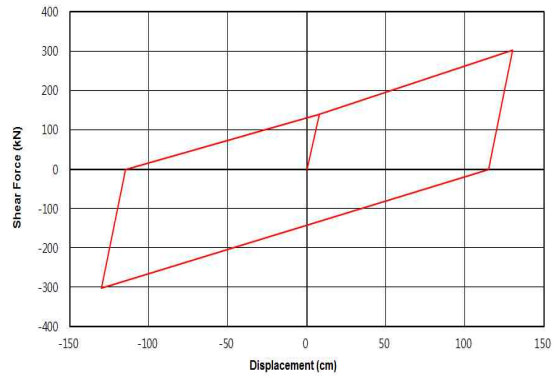
나 기둥 개수가 많고 각 기둥 아래에 1개의 면진장치를 배치하는 경우 면진장치의 면압이 작아져 건물 중량에 비해 면진층의 수평강성이 커지는 경우가 있다. 이런 경우에는 상부구조의 최하층에 강한 바닥판 또는 보 등을 설치하고 면진장치의 개수를 작게 하여 수평강성을 낮추는 방법도 고려할 수 있다.

면진층의 강성중심이 상부구조의 무게중심과 일치하는 경우에는 상부구조에 강성중심과 무게중심의 차이가 있어도 면진층의 비틀림 진동은 충분히 작고 상부구조를 탄성설계로 하는 경우 상부구조에서의 편심 영향은 종래 내진설계에서 실시하는 방법과 같이 정적으로 구한 편심량에 근거하여 각 골조의 응력을 할증하는 것으로 가능하다. 건물에 특별한 제약이 있고 면진층에 큰 편심이 일어난 경우를 제외하고는 비틀림 진동해석 등을 이용하여 편심으로 인한 동적인 영향을 조사할 필요까지는 없다. 본 예제 구조물의 경우 LRB 15개를 1층 바닥 하부에 설치하였다.





(a) 면진장치 형상



(b) 면진장치 이력곡선

[그림 2-42] 면진장치 형상 및 이력곡선

(바) 전체 총설계변위(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.

$$D_{TD} = D_D \left[1 + y \frac{12e}{b^2 + d^2} \right]$$

$$D_{TM} = D_M \left[1 + y \frac{12e}{b^2 + d^2} \right]$$

여기서, D_D : 설계변위, m

D_M : 최대변위, m

b : 구조물의 가장 짧은 평면치수. d 에 대하여 직 각으로 측정된 값, m

d : 구조물의 가장 긴 평면치수, m

y : 지진방향과 직각인 대상요소와 면진시스템의 강성중심과의 거리, m

e : 면진 상부구조의 질량 중심과 면진시스템의 강성중심 사이의 실제 편심거리와 힘의 방향에 직각인 건물 치수 중 최대값의 5%로 정의되는 우발편심거리를 합한 값, m

(사) 최대변위(D_M)

구조물의 붕괴방지를 고려하기 위해 최대 고려지진(Maximum Considered Earthquake, MCE)에 대한 검토가 수행되어야 한다.

$$D_M = \frac{g S_{M1} T_M}{4\pi^2 \beta_M}$$

여기서 g : 중력가속도

S_{M1} : 최대예상지진의 1초주기 스펙트럼가속도($= S_D \times \frac{3}{2}$)

T_M : 최대변위에서 면진구조물의 유효주기

β_D : 면진시스템의 유효감쇠(β_D)와 연관된 수치 계수이며 아래 <표 0301.1.1>에 따른다.

(아) 수평 지진력 산정

① 면진 층과 면진 층 하부구조

면진시스템과 면진 하부구조의 밀면 전단력(V_b)는 다음 식으로 구한 값보다 작아서는 안 된다.

$$\begin{aligned} V_b &= 0.9k_{Dmax} D_D \\ &= 0.9 \times 33.23 \times 142.9 = 4272.5 \text{ kN} \end{aligned}$$

여기서, k_{Dmax} : 식(0306.12.12)로 구한 설계변위에서의 면진시스템 최대유효강성, kN/m

② 면진 층 상부구조

면진 상부구조의 최소전단력 V_s 은 다음 식으로 구한 값보다 작아서는 안 된다.

$$V_s = 0.6 \frac{k_{Dmax} D_D}{R_t} = 0.6 \times \frac{33.09 \times 142.9 \times 1.33}{2} = 1886.7 \text{ kN}$$

여기서, R_t 는 <표 0306.6.1>의 반응수정계수에 3/8를 곱한 값으로 2 이하이다. 다만, 면진상부구조가 0306.4.4에 정의된 비정형구조물인 경우에는 최소밀면전단력 식(0306.11.9)을 1.33배 하여야한다.

③ V_s 의 값은 계수풍하중에 상응하는 밀면전단력보다 커야 하며, 다음 값 중 최대값의 60.0% 보다 작아서는 안 된다. 단 면진 상부구조가 0306.4.4.에 정의된 비정형구조물인 경우에는 다음값의 80%보다 작아서는 안된다.

- 동일 내진 중량 $W_{D+0.5L}$ 와 면진주기 T_D 를 갖는 밀면이 고정된 구조물에 대하여 0306.5에 의해 요구되는 밀면전단력

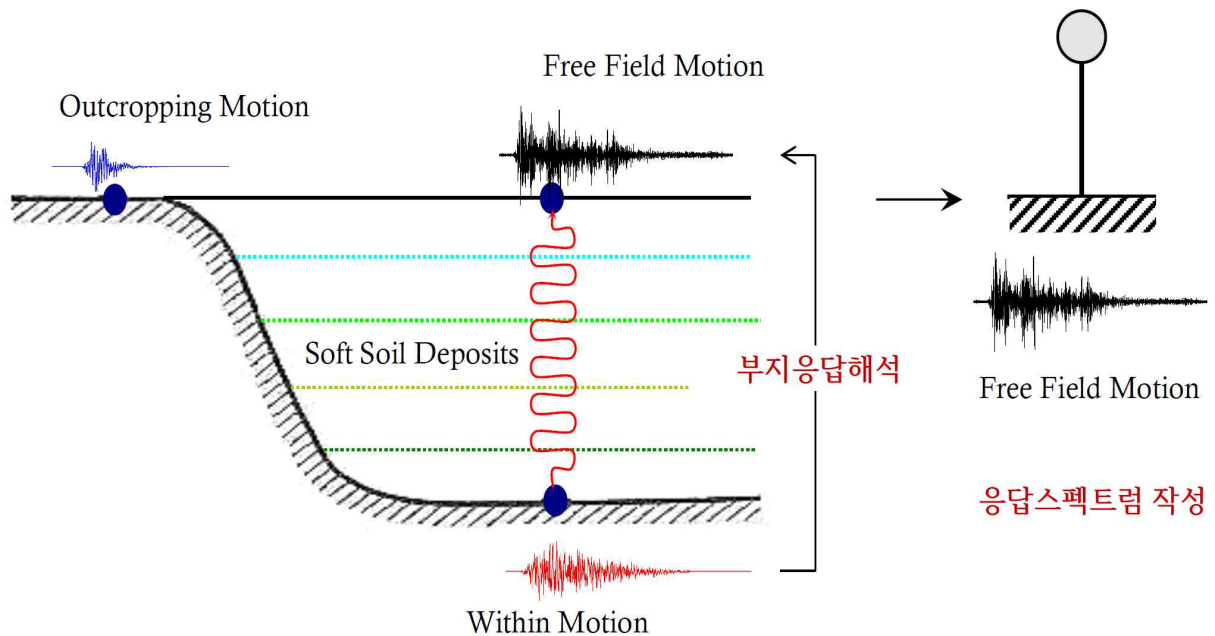
- 면진시스템의 탄성한계에 상응하는 수평지진력의 1.5배

(4) 입력지진파

(가) 부지응답해석의 절차

일반적인 부지응답해석의 절차는 다음과 같다.

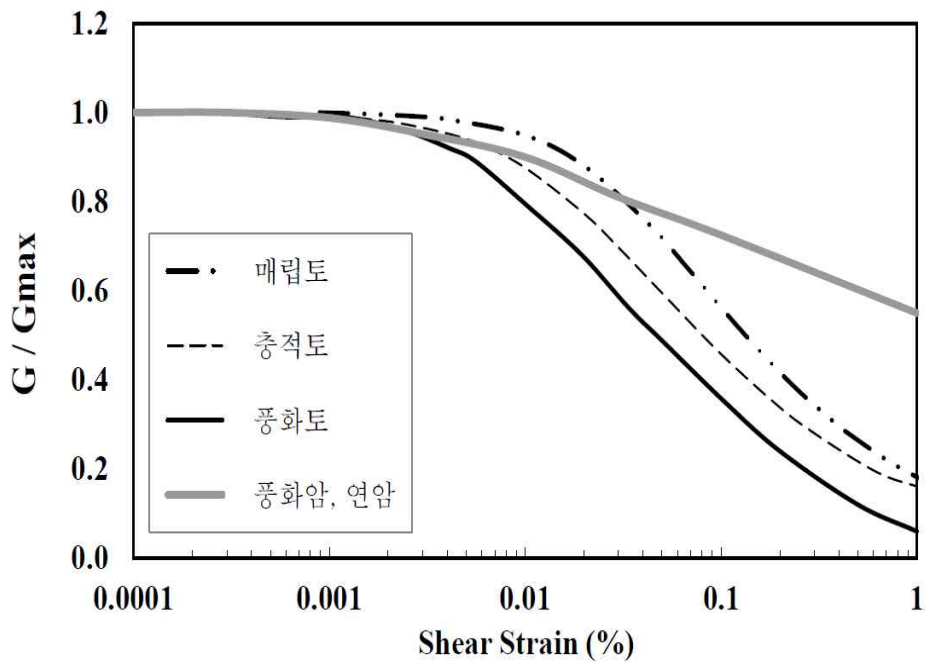
암반노두(Outcrop)에서 측정된 지진기록(Outcropping Motion)을 선별하고, 해당지역의 유효 지반가속도 및 암반에 대한 설계응답스펙트럼에 맞도록 조정(Scaling)한다. 조정된 Outcropping Motion 을 암반과 토층사이의 Within Motion 으로 변환하고, 이 과정을 Deconvolution 이라고 한다. 전단변형에 따른 지반 강성의 감소와 감쇠비의 증가를 고려할 수 있는 해석방법을 적용하여, Within Motion 이 토층에 의하여 증폭되는 부지응답해석(Site Response Analysis)를 수행한다. 지반의 지표면 가속도를 Free-Field Motion 으로 정하고, 이에 대한 응답스펙트럼(Response Spectrum)을 작성하여, 지반에 의해 증폭된 지반운동의 크기를 판단한다.



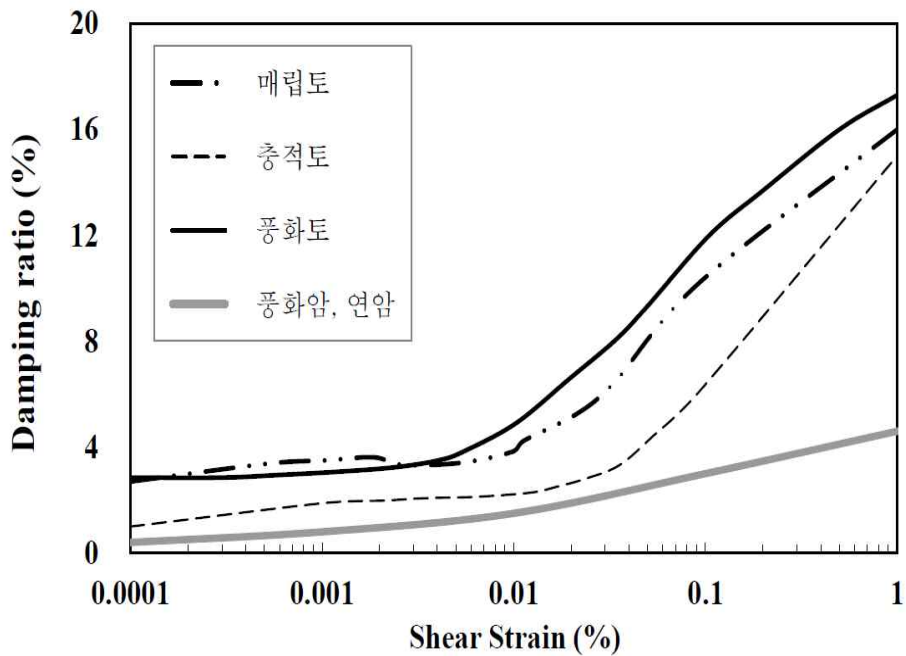
[그림 2-43] 부지응답 절차

(나) SHAKE 프로그램을 활용한 등가선형해석

등가선형해석법으로 지반의 전단변형률에 따른 강성의 감소와 감쇠비의 증가를 고려할 수 있는 SHAKE 프로그램을 사용하여 부지응답해석을 수행하였다. 지반의 비선형 물성은 아래의 그림과 같이 김동수 등 (2001)이 국내지반조건에 대하여 공진주 시험을 통하여 도출한 전단탄성계수 감소곡선과 감쇠비 곡선을 적용하였다.



[그림 2-44] 전단변형률에 따른 전단탄성계수 감소곡선



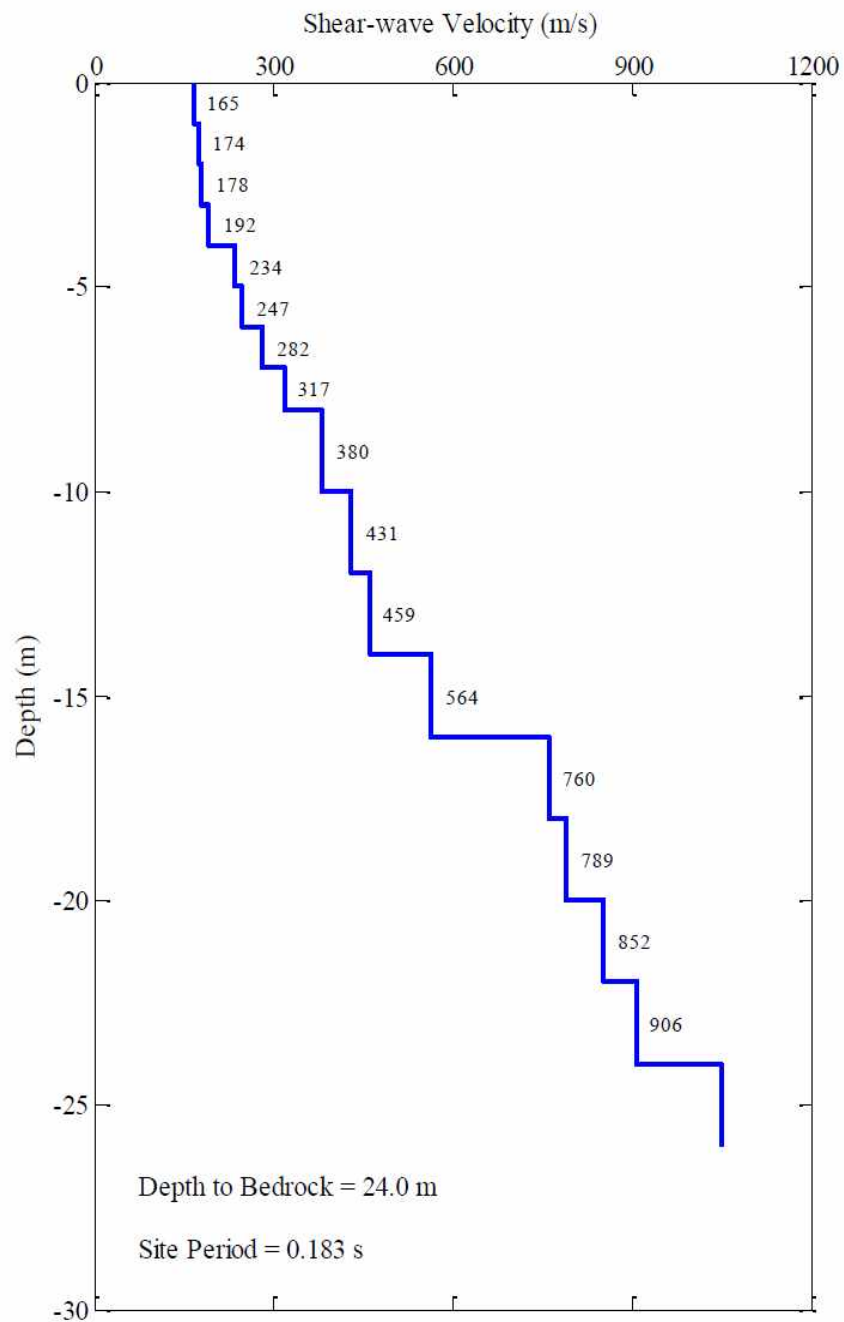
[그림 2-45] 전단변형률에 따른 감쇠비 곡선

(다) 지반 조사서

해당 지반의 경우 지표면으로부터 -4.0 m까지 퇴적층이었고, -4.0 ~ -11.0 m 까지 풍화토가 형성되어 있었다. -11.0 ~ -24.0 m에는 풍화암이 있었으며, -24.0 m 보다 깊은 곳에서는 연암이 형성되어 있었다. 조사된 지질주상도와 전단파속도를 바탕으로 전단파속도 주상도를 도시

하면 아래와 같다. -24.0 m 이하에는 암반이 있었으므로 부지응답해석에 반영되지 않고, 그 위의 토층이 부지응답해석에 적용된다.

토층에 대한 전달함수로부터 도출된 지반의 1 차 탄성주기는 0.183 초이고, 지반주기와 유사하거나 지반의 비선형성에 의해 증가된 주기와 구조물의 주기에서 지반에 의한 응답의 증폭이 발생될 것으로 예상된다.



[그림 2-46] 해당지반의 전단파속도 주상도

(라) 입력 암반 지진 기록

부지응답해석을 위하여 미국의 PEER Ground Motion Database에서 세계 각국에서 측정된 암반지진기록을 선별하였다. 선별조건은 계측된 위치의 지반조건이 암반($V_{S,30} > 760$ m/s 이상)이며, 암반스펙트럼과의 조정계수 (scale factor)가 0.3 ~ 3.0 정도 크기를 갖는 지진으로, 40개의 암반지진기록이 선별되었다.

〈표 2-28〉 입력 암반지진파의 제원(계속)

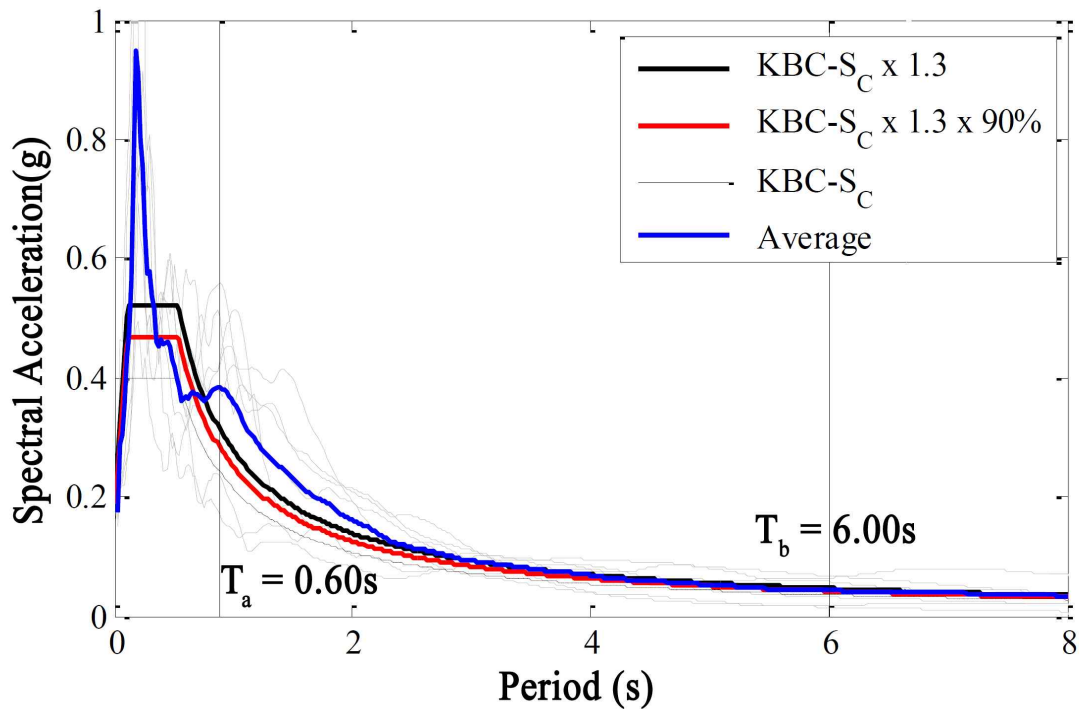
No.	Event	Country	Year	Station	M	$V_{S,30}$
1	San Fernando	USA	1971	Pasadena - Old Seismo Lab	6.61	969
2	Loma Prieta	USA	1989	Piedmont Jr High School Grounds	6.93	895
3	Loma Prieta	USA	1989	Point Bonita	6.93	1316
4	Loma Prieta	USA	1989	SF - Pacific Heights	6.93	1250
5	Loma Prieta	USA	1989	SF - Rincon Hill	6.93	873
6	Loma Prieta	USA	1989	So. San Francisco Sierra Pt.	6.93	1021
7	Northridge-01	USA	1994	LA - Wonderland Ave	6.69	1223
8	Northridge-01	USA	1994	Vasquez Rocks Park	6.69	996
9	Kobe	Japan	1995	Kobe University	6.9	1043
10	Kocaeli	Turkey	1999	Gebze	7.51	792
11	Kocaeli	Turkey	1999	Izmit	7.51	811
12	Chi-Chi	Taiwan	1999	CHY102	7.62	804
13	Chi-Chi	Taiwan	1999	HWA002	7.62	789
14	Chi-Chi	Taiwan	1999	HWA003	7.62	1526
15	Chi-Chi	Taiwan	1999	ILA001	7.62	909
16	Chi-Chi	Taiwan	1999	ILA015	7.62	783
17	Chi-Chi	Taiwan	1999	ILA063	7.62	997

〈표 2-28〉 입력 암반지진파의 제원

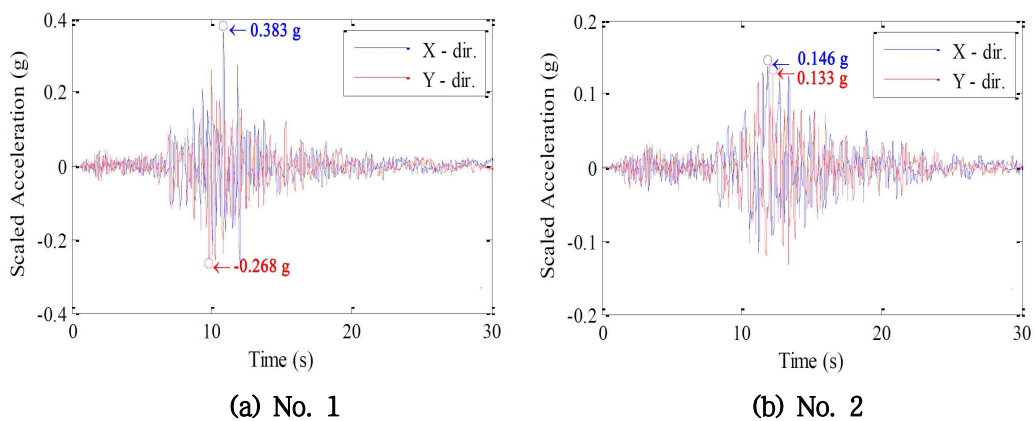
18	Chi-Chi	Taiwan	1999	KAU003	7.62	914
19	Chi-Chi	Taiwan	1999	TAP046	7.62	817
20	Chi-Chi	Taiwan	1999	TAP065	7.62	1023
21	Chi-Chi	Taiwan	1999	TAP067	7.62	808
22	Chi-Chi	Taiwan	1999	TAP075	7.62	856
23	Chi-Chi	Taiwan	1999	TAP077	7.62	1023
24	Chi-Chi	Taiwan	1999	TAP086	7.62	888
25	Chi-Chi	Taiwan	1999	TCU085	7.62	1000
26	Chi-Chi	Taiwan	1999	TTN042	7.62	845
27	Duzce	Turkey	1999	Lamont 1060	7.14	782
28	Chi-Chi-06	Taiwan	1999	HWA003	6.3	1526
29	Friuli	Italy	1976	Tolmezzo-Diga Ambiesta	6.5	1021
30	Friuli (aftershock)	Italy	1977	Tolmezzo-Base Diga	5.4	1043
31	Tabas	Iran	1978	Dayhook	7.3	826
32	Montenegro	Serbia & Montenegro	1979	Ulcinj-Hotel Albatros	6.9	1083
33	Campano Lucano	Italy	1980	Auletta	6.9	1092
34	Campano Lucano	Italy	1980	Bagnoli-Irpino	6.9	1109
35	Campano Lucano	Italy	1980	Bisaccia	6.9	958
36	Campano Lucano	Italy	1980	Sturno	6.9	1100
37	Strofades	Greece	1997	Koroni-Town Hall (Library)	6.6	1530
38	Izmit	Turkey	1999	Gebze-Tubitak Marmara Arastirma Merkezi	7.6	912
39	Izmit	Turkey	1999	Izmit-Meteoroloji Istasyonu	7.6	811
40	Izmit (aftershock)	Turkey	1999	Izmit-Meteoroloji Istasyonu	5.8	811

(마) 선정된 7개 지반 운동

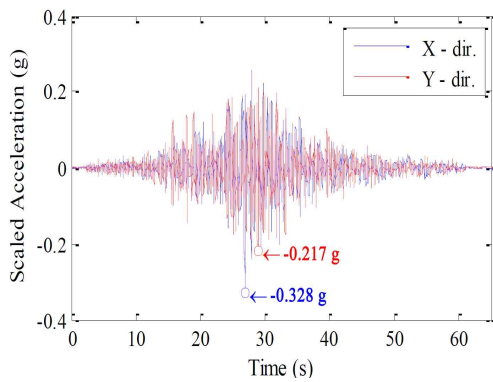
선정된 7 개의 지반운동은 다음과 같다. 해당 건물의 목표 진동주기는 3.0 초이고, KBC 2016 기준에 따라 설계응답스펙트럼에 맞게 조정되는 구간은 0.6 ~ 6.0초 이다 부지응답해석으로 생성된 40개의 지반운동에 대한 데이터베이스에 대하여 최적화 알고리즘을 적용하여 아래의 그림 및 표와 같이 선정되었다. 이 때, KBC 기준의 하한선(설계응답스펙트럼의 $1.3 \times 90\%$)을 만족시키기 위한 조정계수 (Scale factor)는 1.03 이다.



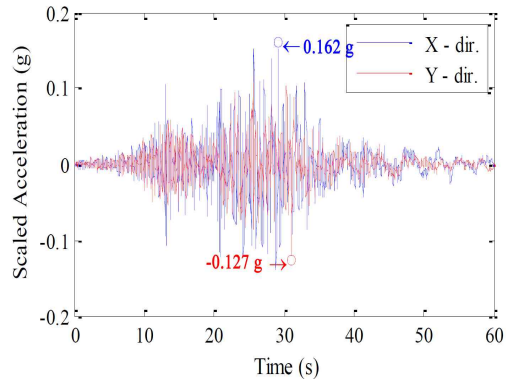
[그림 2-47] 지진파 스케일링



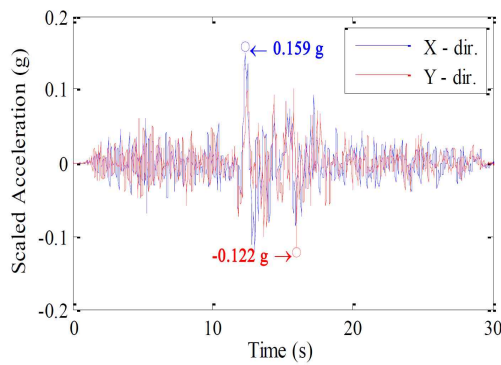
[그림 2-48] 적용된 지진파(계속)



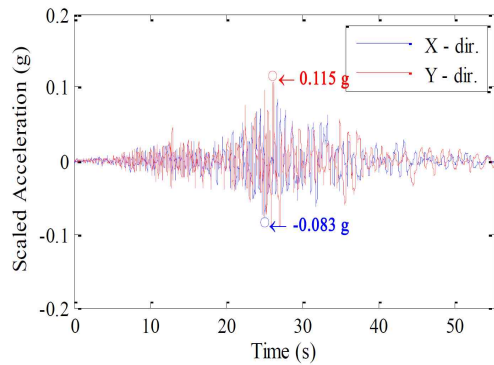
(c) No. 3



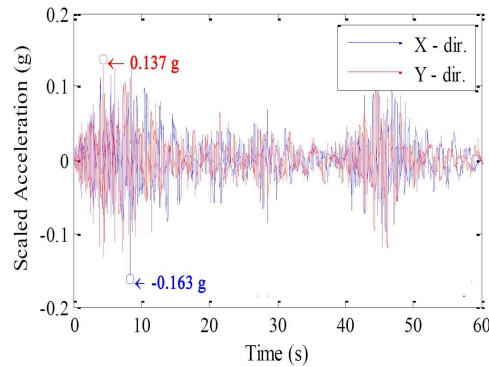
(d) No. 4



(e) No. 5



(f) No. 6



(g) No. 7

[그림 2-48] 적용된 지진파

(5) 비선형 동적해석 결과

(가) 최대응답변위

<표 2-29>부터 <표 2-32>까지는 기본건물과 면진건물의 최대응답변위 해석결과를 비교하여 정리한 것이며, [그림 2-49] 및 [그림 2-50]은 이를 도식화하여 나타낸 것이다. 또한, [그림 2-51]에는 해석결과를 더 명확하게 파악하기 위하여 각 방향별 지진파 평균값을 나타내었다.

〈표 2-29〉 비면진 건물의 최대응답변위(X방향)

(단위 :cm)

STORY	EQ1-1	EQ1-2	EQ2-1	EQ2-2	EQ3-1	EQ3-2	EQ4-1	EQ4-2	EQ5-1	EQ5-2	EQ6-1	EQ6-2	EQ7-1	EQ7-2	AVE.
21	19.5	16.6	21.6	37.7	31.4	34.2	34.2	24.6	32.7	32.7	30.3	36.9	25.6	17.9	28.3
20	17.9	14.0	19.1	35.1	29.4	32.0	32.0	23.0	30.1	30.1	28.1	34.3	22.3	16.3	26.0
19	16.5	11.7	16.6	32.7	27.5	29.8	29.8	21.4	27.6	27.6	26.0	31.8	19.1	14.7	23.8
18	15.3	9.4	14.3	30.3	25.5	27.6	27.6	19.8	25.2	25.2	23.9	29.3	16.0	13.3	21.6
17	14.3	8.6	12.9	27.9	23.6	25.4	25.4	18.3	22.8	22.8	21.9	26.9	13.0	11.8	19.7
16	13.4	8.0	12.6	25.5	21.6	23.2	23.2	16.7	20.6	20.6	19.9	24.5	10.4	10.5	17.9
15	12.6	7.4	12.2	23.1	19.7	21.1	21.1	15.2	18.5	18.5	18.1	22.2	9.1	9.2	16.3
14	11.7	7.9	11.6	20.7	17.8	18.9	18.9	13.6	16.5	16.5	16.3	19.9	8.9	8.0	14.8
13	10.8	8.5	10.9	18.4	15.8	16.8	16.8	12.1	15.2	15.2	14.6	17.6	8.9	6.9	13.5
12	9.8	8.7	10.1	16.2	13.9	14.8	14.8	10.6	13.8	13.8	12.9	15.4	8.7	6.0	12.1
11	8.8	8.4	9.2	14.0	12.0	12.7	12.7	9.1	12.4	12.4	11.2	13.2	8.3	5.1	10.7
10	7.7	7.8	8.2	11.8	10.1	10.7	10.7	7.7	10.9	10.9	9.6	11.1	7.7	4.3	9.3
9	6.7	6.9	7.2	9.8	8.3	8.9	8.9	6.3	9.5	9.5	8.0	9.1	7.0	3.6	7.8
8	5.6	5.9	6.1	7.9	6.6	7.1	7.1	5.2	8.0	8.0	6.5	7.2	6.0	3.0	6.4
7	4.6	4.8	5.1	6.1	5.0	5.4	5.4	4.3	6.5	6.5	5.1	5.4	5.0	2.4	5.1
6	3.5	3.7	4.0	4.6	3.7	4.0	4.0	3.4	5.0	5.0	3.8	3.8	4.0	1.9	3.9
5	2.5	2.6	2.9	3.2	2.5	2.8	2.8	2.5	3.5	3.5	2.6	2.4	2.9	1.3	2.7
4	1.5	1.6	1.9	2.0	1.5	1.7	1.7	1.7	2.2	2.2	1.5	1.4	1.9	0.9	1.7
3	0.8	0.8	1.0	1.0	0.7	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0	0.7	0.6	1.0	0.4	0.8
2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	0.1	0.3	0.1	0.2
1.5	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

〈표 2-30〉 면진건물의 최대응답변위(X방향)

(단위 :cm)

STORY	EQ1-1	EQ1-2	EQ2-1	EQ2-2	EQ3-1	EQ3-2	EQ4-1	EQ4-2	EQ5-1	EQ5-2	EQ6-1	EQ6-2	EQ7-1	EQ7-2	AVE.
21	22.1	17.1	22.3	12.2	16.9	20.6	17.3	15.7	15.5	18.0	20.8	19.2	20.1	23.0	18.6
20	21.4	16.6	21.6	11.8	16.4	20.0	16.8	15.2	15.0	17.5	20.2	18.6	19.5	22.3	18.1
19	20.8	16.1	21.0	11.4	15.9	19.4	16.3	14.7	14.6	17.0	19.6	18.0	18.9	21.7	17.5
18	20.2	15.6	20.3	11.1	15.5	18.8	15.8	14.3	14.1	16.5	19.0	17.5	18.3	21.0	17.0
17	19.6	15.2	19.7	10.8	15.0	18.3	15.3	13.9	13.7	16.0	18.4	17.0	17.8	20.4	16.5
16	19.0	14.7	19.1	10.4	14.5	17.7	14.9	13.4	13.3	15.5	17.9	16.4	17.2	19.8	16.0
15	18.4	14.3	18.6	10.1	14.1	17.2	14.4	13.0	12.9	15.0	17.3	15.9	16.7	19.2	15.5
14	17.8	13.8	18.0	9.8	13.7	16.7	14.0	12.6	12.5	14.6	16.8	15.5	16.2	18.6	15.0
13	17.3	13.4	17.5	9.5	13.3	16.2	13.6	12.3	12.1	14.1	16.3	15.0	15.7	18.0	14.6
12	16.8	13.0	16.9	9.2	12.9	15.7	13.2	11.9	11.8	13.7	15.8	14.6	15.3	17.5	14.2
11	16.3	12.6	16.4	9.0	12.5	15.2	12.8	11.5	11.4	13.3	15.3	14.1	14.8	17.0	13.7
10	15.8	12.2	15.9	8.7	12.1	14.7	12.4	11.2	11.1	12.9	14.9	13.7	14.3	16.5	13.3
9	15.3	11.9	15.4	8.4	11.7	14.3	12.0	10.9	10.7	12.5	14.4	13.3	13.9	16.0	12.9
8	14.9	11.5	15.0	8.2	11.4	13.9	11.6	10.5	10.4	12.1	14.0	12.9	13.5	15.5	12.5
7	14.4	11.2	14.5	7.9	11.0	13.5	11.3	10.2	10.1	11.8	13.6	12.5	13.1	15.0	12.1
6	14.0	10.8	14.1	7.7	10.7	13.0	11.0	9.9	9.8	11.4	13.2	12.1	12.7	14.6	11.8
5	13.6	10.5	13.7	7.5	10.4	12.7	10.6	9.6	9.5	11.1	12.8	11.8	12.3	14.1	11.4
4	13.2	10.2	13.3	7.2	10.1	12.3	10.3	9.3	9.2	10.7	12.4	11.4	11.9	13.7	11.1
3	12.8	9.9	12.9	7.0	9.8	11.9	10.0	9.0	8.9	10.4	12.0	11.1	11.6	13.3	10.8
2	12.4	9.6	12.5	6.8	9.5	11.5	9.7	8.8	8.7	10.1	11.7	10.7	11.2	12.9	10.4
1.5	12	9.3	12.1	6.6	9.2	11.2	9.4	8.5	8.4	9.8	11.3	10.4	10.9	12.5	10.1
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

〈표 2-31〉 비면진 건물의 최대응답변위(Y방향)

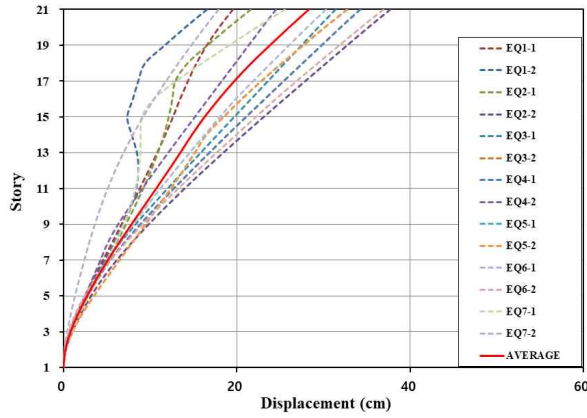
(단위 :cm)

STORY	EQ1-1	EQ1-2	EQ2-1	EQ2-2	EQ3-1	EQ3-2	EQ4-1	EQ4-2	EQ5-1	EQ5-2	EQ6-1	EQ6-2	EQ7-1	EQ7-2	AVE.
21	17.9	20.5	19.5	26.2	11.6	20.7	18.4	25.5	27.6	41.3	17.7	17.5	26.5	28.3	28.3
20	16.3	18.9	17.9	24.0	10.7	19.4	17.0	23.6	25.5	38.3	16.3	16.2	24.1	26.1	26.0
19	14.8	17.4	16.4	22.0	9.8	18.1	15.7	22.1	23.5	35.3	15.0	15.0	21.8	24.1	23.8
18	13.6	15.9	14.8	20.5	9.0	16.8	14.3	20.6	21.6	32.4	13.8	13.9	19.5	22.1	21.6
17	12.5	14.5	13.3	19.0	8.3	15.5	13.0	19.2	19.6	29.4	12.7	12.7	17.3	20.0	19.7
16	11.6	13.2	11.9	17.6	7.5	14.2	11.9	17.7	17.7	26.5	11.6	11.5	15.1	18.0	17.9
15	10.6	11.9	10.4	16.2	6.8	12.9	10.8	16.3	15.8	23.7	10.5	10.4	13.1	16.1	16.3
14	9.7	10.7	9.0	14.7	6.2	11.6	9.8	14.8	13.9	20.9	9.4	9.2	11.3	14.2	14.8
13	8.8	9.6	7.7	13.3	5.5	10.3	8.7	13.4	12.1	18.2	8.3	8.2	10.0	12.3	13.5
12	7.8	8.4	6.4	11.9	4.9	9.1	7.7	12.0	10.4	15.6	7.2	7.3	8.8	10.5	12.1
11	6.9	7.3	5.2	10.4	4.2	7.9	6.6	10.5	8.9	13.3	6.2	6.3	7.6	8.8	10.7
10	6.0	6.3	4.3	9.0	3.6	6.7	5.6	9.1	7.4	11.1	5.2	5.4	6.4	7.2	9.3
9	5.1	5.2	3.7	7.6	3.0	5.5	4.7	7.7	6.1	9.1	4.3	4.5	5.3	5.7	7.8
8	4.2	4.2	3.0	6.3	2.4	4.5	3.7	6.3	4.8	7.2	3.5	3.6	4.3	4.4	6.4
7	3.3	3.3	2.4	5.0	1.9	3.5	2.9	5.0	3.7	5.5	2.7	2.8	3.3	3.2	5.1
6	2.5	2.4	1.8	3.8	1.4	2.6	2.2	3.8	2.7	4.0	1.9	2.0	2.4	2.3	3.9
5	1.7	1.6	1.2	2.7	1.0	1.8	1.5	2.6	1.8	2.7	1.3	1.3	1.7	1.5	2.7
4	1.1	1.0	0.8	1.8	0.6	1.1	0.9	1.6	1.0	1.6	0.8	0.7	1.0	0.8	1.7
3	0.5	0.5	0.4	0.9	0.3	0.5	0.5	0.8	0.5	0.7	0.4	0.3	0.5	0.4	0.8
2	0.1	0.1	0.1	0.3	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2
1.5	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

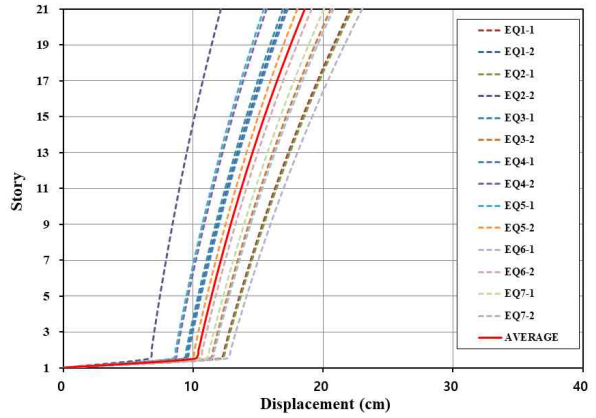
〈표 2-32〉 면진건물의 최대응답변위(Y방향)

(단위 :cm)

STORY	EQ1-1	EQ1-2	EQ2-1	EQ2-2	EQ3-1	EQ3-2	EQ4-1	EQ4-2	EQ5-1	EQ5-2	EQ6-1	EQ6-2	EQ7-1	EQ7-2	AVE.
21	11.1	14.6	9.9	15.1	15.0	11.3	11.4	11.8	12.7	10.8	14.4	14.9	13.3	14.1	12.9
20	11.0	14.6	9.9	15.1	15.0	11.3	11.4	11.8	12.7	10.8	14.3	14.8	13.3	14.1	12.9
19	10.9	14.4	9.8	14.9	14.8	11.1	11.3	11.6	12.5	10.6	14.2	14.7	13.2	13.9	12.7
18	10.9	14.4	9.7	14.9	14.7	11.1	11.2	11.6	12.5	10.6	14.1	14.6	13.1	13.9	12.7
17	10.7	14.2	9.6	14.7	14.6	11.0	11.1	11.5	12.3	10.5	14.0	14.4	13.0	13.7	12.5
16	10.7	14.2	9.6	14.7	14.5	11.0	11.1	11.5	12.3	10.5	13.9	14.4	12.9	13.7	12.5
15	10.6	14.0	9.5	14.5	14.4	10.8	11.0	11.3	12.2	10.3	13.8	14.2	12.8	13.5	12.3
14	10.6	14.0	9.5	14.4	14.3	10.8	10.9	11.3	12.1	10.3	13.7	14.2	12.7	13.5	12.3
13	10.4	13.8	9.4	14.3	14.2	10.7	10.8	11.2	12.0	10.2	13.6	14.0	12.6	13.3	12.2
12	10.4	13.8	9.3	14.2	14.1	10.6	10.8	11.1	12.0	10.2	13.5	14.0	12.6	13.3	12.1
11	10.3	13.6	9.2	14.1	14.0	10.5	10.6	11.0	11.8	10.0	13.4	13.8	12.4	13.1	12.0
10	10.3	13.6	9.2	14.0	13.9	10.5	10.6	11.0	11.8	10.0	13.3	13.8	12.4	13.1	12.0
9	10.1	13.4	9.1	13.9	13.8	10.4	10.5	10.8	11.7	9.9	13.2	13.6	12.2	12.9	11.8
8	10.1	13.4	9.1	13.8	13.7	10.3	10.5	10.8	11.6	9.9	13.1	13.6	12.2	12.9	11.8
7	10.0	13.2	9.0	13.7	13.6	10.2	10.3	10.7	11.5	9.8	13.0	13.4	12.1	12.8	11.7
6	10.0	13.2	8.9	13.6	13.5	10.2	10.3	10.7	11.5	9.7	12.9	13.4	12.0	12.7	11.6
5	9.9	13.0	8.8	13.5	13.4	10.1	10.2	10.5	11.3	9.6	12.8	13.2	11.9	12.6	11.5
4	9.8	13.0	8.8	13.4	13.3	10.1	10.2	10.5	11.3	9.6	12.8	13.2	11.9	12.5	11.5
3	9.7	12.8	8.7	13.3	13.2	9.9	10.0	10.4	11.2	9.5	12.6	13.1	11.7	12.4	11.3
2	9.7	12.8	8.7	13.2	13.1	9.9	10.0	10.4	11.1	9.5	12.6	13.0	11.7	12.4	11.3
1.5	9.6	12.7	8.6	13.1	13.0	9.8	9.9	10.2	11.0	9.4	12.4	12.9	11.6	12.2	11.2
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

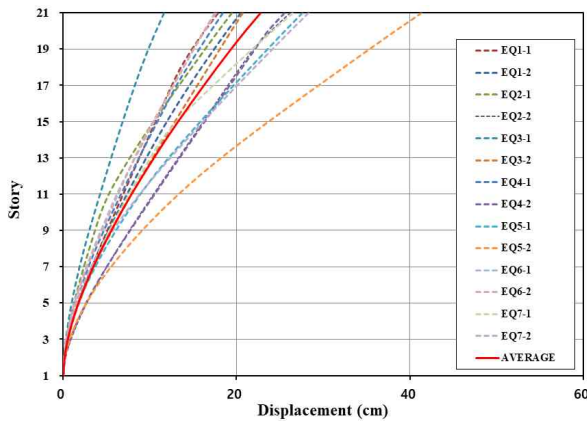


(a) 비면진건물

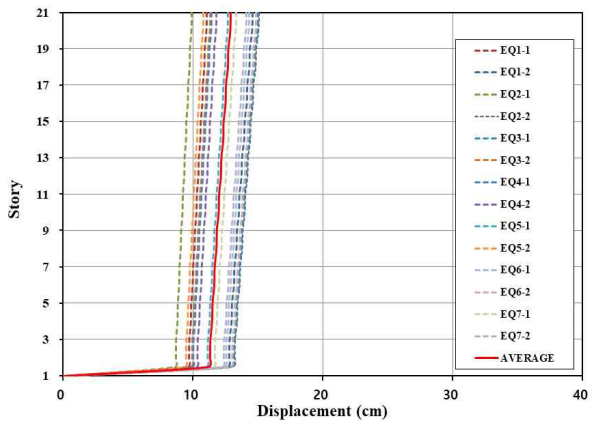


(b) 면진건물

[그림 2-49] 각 지진파에 따른 X방향 최대응답변위

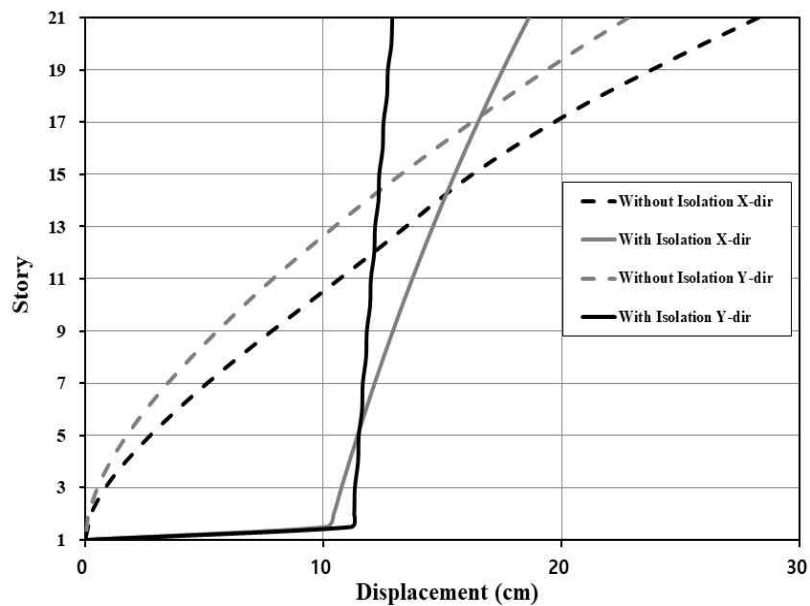


(a) 비면진건물



(b) 면진건물

[그림 2-50] 각 지진파에 따른 Y방향 최대응답변위



[그림 2-51] 각 지진파에 따른 최대응답변위 평균값

해석결과 각 지진파별로 다소 차이는 있으나 비면진 건물은 각 방향별로 상부층으로 갈수록 변위가 증가하는 양상을 나타내었다. 하지만 면진건물의 경우에는 각 방향별로 면진층에서 만 큰 변위가 발생하고 있을 뿐 상부 구조물은 강체거동과 유사하게 층 변위에 차이가 거의 발생하고 있지 않는 것으로 나타났다.

(나) 최대응답가속도

<표 2-33>부터 <표 2-36>까지는 비면진 건물과 면진건물의 최대응답가속도 해석결과를 비교하여 정리한 것이며, [그림 2-52] 및 [그림 2-53]은 이를 도식화하여 나타낸 것이다. 또한, [그림 2-54]는 해석결과를 더 명확하게 파악하기 위하여 각 방향별 지진과 평균값을 나타내었다.

해석결과 각 지진파별로 다소 차이는 있으나 비면진 건물은 각 방향별로 상부층으로 갈수록 응답가속도가 증가하는 양상을 보이고 있는 것을 알 수 있다. 하지만 면진건물의 경우에는 각 층의 응답가속도가 거의 일정한 분포를 나타내고 있는데 이는 사용성면에서 향상된 거동을 기대할 수 있으며, 지진 발생 시 내부 전도 등으로 인한 피해를 방지하는데 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

<표 2-33> 비면진 건물의 최대응답가속도(X방향)

(단위 :cm/sec²)

STORY	EQ1-1	EQ1-2	EQ2-1	EQ2-2	EQ3-1	EQ3-2	EQ4-1	EQ4-2	EQ5-1	EQ5-2	EQ6-1	EQ6-2	EQ7-1	EQ7-2	AVE.
21	495.8	570.4	513.4	640.5	604.5	609.8	674.1	656.6	869.3	649.2	682.1	901.2	882.6	692.9	674.5
20	410.7	367.9	395.6	532.6	478.8	509.3	494.3	481.0	666.2	490.2	518.6	693.2	687.8	510.4	516.9
19	334.0	288.8	281.4	423.9	352.6	407.3	379.7	359.9	477.2	362.5	378.9	498.1	504.0	413.1	390.1
18	296.2	266.9	242.1	371.6	290.0	361.0	371.5	360.6	439.6	343.5	350.5	453.5	466.4	402.8	358.3
17	258.5	245.0	202.9	319.4	227.4	314.6	363.4	361.4	402.1	324.4	322.2	408.9	428.8	392.5	326.5
16	254.8	264.1	219.2	235.2	155.3	234.5	330.1	368.6	360.7	342.7	332.5	363.2	389.7	355.2	300.4
15	274.0	300.6	220.4	308.2	259.1	229.4	340.7	393.2	362.8	345.4	368.2	368.5	396.0	357.0	323.1
14	278.5	374.9	249.5	376.4	352.1	255.5	366.8	389.6	429.9	378.0	387.2	433.4	469.0	383.4	366.0
13	265.9	411.5	307.2	450.5	420.6	296.4	358.5	357.2	463.0	404.7	413.5	472.3	504.0	369.5	392.5
12	264.2	410.8	342.7	501.3	466.5	321.4	395.9	401.6	493.8	425.7	433.6	510.4	506.8	409.5	420.3
11	280.7	392.8	355.0	525.0	486.3	329.8	457.5	419.9	508.4	471.1	463.3	523.1	532.9	470.8	444.0
10	284.0	449.2	365.3	522.5	482.2	322.8	497.1	413.9	512.4	489.5	489.2	524.4	549.8	512.1	458.2
9	279.0	536.9	366.0	494.7	459.4	301.1	507.6	436.1	497.1	484.0	505.7	507.3	525.7	524.0	458.9
8	270.9	593.8	350.7	444.7	422.3	270.3	488.6	442.1	456.2	473.6	508.6	465.0	483.8	505.8	441.2
7	245.0	610.2	322.9	377.2	372.7	262.4	443.0	426.0	422.5	444.0	473.5	414.0	472.2	459.8	410.4
6	242.5	571.2	287.6	302.7	315.9	245.5	376.9	375.0	389.0	379.0	400.6	379.1	434.3	392.0	363.7
5	237.1	482.4	250.0	270.8	257.2	217.1	318.7	323.3	319.3	341.3	346.7	328.9	359.5	321.3	312.4
4	218.1	363.4	218.3	240.6	213.8	187.4	281.1	289.3	282.3	301.5	305.1	296.1	304.5	282.8	270.3
3	198.3	244.8	204.9	215.4	218.6	180.3	272.0	260.5	261.7	272.3	295.2	275.9	277.4	280.2	247.0
2	205.6	271.2	205.0	218.1	223.7	181.8	272.1	286.4	267.9	270.7	293.3	279.3	295.1	279.3	253.5
1.5	204.6	269.9	204.0	217.0	222.6	180.9	270.7	285.0	266.6	269.3	291.8	277.9	293.6	277.9	252.3
1	203.6	268.5	203.0	215.9	221.4	180.0	269.4	283.6	265.2	268.0	290.4	276.5	292.2	276.5	251.0

〈표 2-34〉 면진 건물의 최대응답가속도(X방향)

(단위 :cm/sec²)

STORY	EQ1-1	EQ1-2	EQ2-1	EQ2-2	EQ3-1	EQ3-2	EQ4-1	EQ4-2	EQ5-1	EQ5-2	EQ6-1	EQ6-2	EQ7-1	EQ7-2	AVE.
21	99.2	114.1	102.7	128.1	120.9	122.0	134.8	131.3	173.9	129.8	136.4	180.2	176.5	138.6	134.9
20	99.4	114.3	102.9	128.4	121.2	122.2	135.1	131.6	174.2	130.1	136.7	180.6	176.9	138.9	135.2
19	99.6	114.6	103.1	128.6	121.4	122.5	135.4	131.9	174.6	130.4	137.0	181.0	177.3	139.2	135.5
18	99.8	114.8	103.3	128.9	121.7	122.7	135.7	132.2	175.0	130.7	137.3	181.4	177.6	139.5	135.7
17	100.0	115.1	103.5	129.2	121.9	123.0	135.9	132.4	175.3	130.9	137.6	181.8	178.0	139.7	136.0
16	102.0	117.4	105.6	131.8	124.4	125.4	138.7	135.1	178.8	133.5	140.3	185.4	181.6	142.5	138.7
15	102.2	117.6	105.8	132.0	124.6	125.7	139.0	135.4	179.2	133.8	140.6	185.8	181.9	142.8	139.0
14	102.4	117.8	106.1	132.3	124.9	126.0	139.3	135.7	179.6	134.1	140.9	186.2	182.3	143.1	139.3
13	102.6	118.1	106.3	132.6	125.1	126.2	139.5	135.9	180.0	134.4	141.2	186.6	182.7	143.4	139.6
12	107.8	118.3	106.5	132.9	125.4	126.5	139.8	136.2	180.3	134.7	141.5	187.0	183.1	143.7	140.3
11	108.0	118.6	106.7	133.2	125.7	126.8	140.1	136.5	180.7	135.0	141.8	187.3	183.5	144.0	140.6
10	108.2	118.8	107.0	133.4	125.9	127.0	140.4	136.8	181.1	135.2	142.1	187.7	183.9	144.3	140.9
9	108.4	119.1	107.2	133.7	126.2	127.3	140.7	137.1	181.5	135.5	142.4	188.1	184.2	144.7	141.2
8	108.7	119.3	107.4	134.0	126.5	127.6	141.0	137.4	181.9	135.8	142.7	188.5	184.6	145.0	141.5
7	108.9	119.6	107.6	134.3	126.7	127.8	141.3	137.7	182.2	136.1	143.0	188.9	185.0	145.3	141.7
6	109.1	119.8	107.9	134.6	127.0	128.1	141.6	137.9	182.6	136.4	143.3	189.3	185.4	145.6	142.0
5	109.4	120.1	108.1	134.8	127.3	128.4	141.9	138.2	183.0	136.7	143.6	189.7	185.8	145.9	142.3
4	109.6	120.3	108.3	135.1	127.5	128.6	142.2	138.5	183.4	137.0	143.9	190.1	186.2	146.2	142.6
3	109.8	120.6	108.5	135.4	127.8	128.9	142.5	138.8	183.8	137.2	144.2	190.5	186.6	146.5	142.9
2	110.1	120.8	108.8	135.7	128.1	129.2	142.8	139.1	184.2	137.5	144.5	190.9	187.0	146.8	143.2
1.5	110.3	121.1	109.0	136.0	128.3	129.5	143.1	139.4	184.5	137.8	144.8	191.3	187.4	147.1	197.1
1	203.6	268.5	203.0	215.9	221.4	180.0	269.4	283.6	265.2	268.0	290.4	276.5	292.2	276.5	251.0

〈표 2-35〉 비면진 건물의 최대응답가속도(Y방향)

(단위 :cm/sec²)

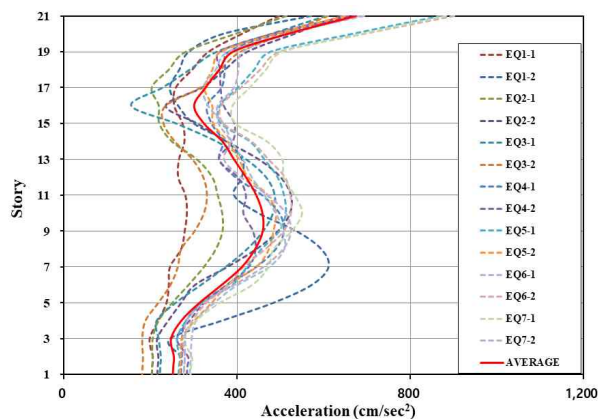
STORY	EQ1-1	EQ1-2	EQ2-1	EQ2-2	EQ3-1	EQ3-2	EQ4-1	EQ4-2	EQ5-1	EQ5-2	EQ6-1	EQ6-2	EQ7-1	EQ7-2	AVE.
21	1151.9	652.8	705.5	915.1	629.5	461.2	1000.5	933.6	787.8	952.6	985.5	784.8	1001.5	965.7	852.0
20	1017.9	588.5	617.0	837.0	576.1	432.4	860.7	816.9	685.5	841.3	871.9	680.7	897.0	848.2	755.1
19	879.8	524.4	526.3	757.7	523.0	403.8	716.1	731.8	603.5	729.4	755.7	596.4	804.8	734.7	663.4
18	810.0	501.3	484.3	718.2	496.3	389.5	651.5	688.9	570.3	675.6	700.5	560.8	758.7	683.4	620.7
17	740.3	478.3	442.3	678.8	469.7	375.2	586.9	646.0	537.2	621.8	645.3	525.1	712.5	632.2	578.0
16	640.3	434.6	385.7	606.2	421.6	348.1	545.0	572.8	509.0	559.5	579.6	496.8	631.8	577.1	522.0
15	668.3	397.3	382.0	541.2	411.9	324.6	508.4	519.6	486.9	525.8	542.8	479.4	571.6	543.3	493.1
14	693.1	363.7	387.5	482.0	410.9	320.7	515.0	464.8	471.8	489.3	503.1	467.4	509.9	507.8	470.5
13	705.7	339.8	399.0	426.9	406.5	328.6	556.0	444.3	476.7	460.3	465.6	474.2	471.8	501.3	461.2
12	704.0	332.9	402.5	370.9	398.2	332.6	583.7	463.8	514.8	454.6	448.3	513.6	491.3	507.7	465.6
11	686.6	322.1	397.2	329.9	385.5	332.6	595.5	469.4	536.9	442.2	440.9	536.3	499.3	499.0	462.4
10	653.1	307.2	383.0	327.3	368.5	328.2	590.7	470.1	536.1	431.3	434.3	535.8	493.4	474.7	452.4
9	604.3	288.5	360.1	315.1	347.5	319.6	569.7	448.8	513.0	409.9	411.5	512.5	474.2	436.6	429.4
8	542.3	266.6	329.6	294.1	323.0	307.4	534.2	420.0	469.5	386.6	380.1	468.5	442.9	410.5	398.2
7	469.9	242.4	293.1	265.9	296.2	292.2	486.6	382.2	409.1	347.9	347.6	407.3	403.9	367.6	358.0
6	391.3	217.0	252.8	237.4	268.2	275.0	430.5	343.6	356.5	304.1	307.5	356.7	362.8	321.9	316.1
5	311.3	196.7	223.0	210.9	240.6	257.0	370.2	301.8	315.9	271.7	284.0	317.9	318.7	278.2	278.4
4	235.9	187.6	214.4	203.8	215.2	239.6	311.1	291.1	274.1	259.4	277.1	277.6	299.1	272.8	254.2
3	237.9	190.8	208.7	202.8	194.6	227.5	264.4	281.1	250.9	252.9	267.6	273.5	288.7	280.3	244.4
2	271.2	205.6	218.1	205.0	181.8	223.7	286.4	272.1	270.7	267.9	279.3	293.3	279.3	295.1	253.5
1.5	269.9	204.6	217.0	204.0	180.9	222.6	285.0	270.7	269.3	266.6	277.9	291.8	277.9	293.6	252.3
1	268.5	203.6	215.9	203.0	180.0	221.4	283.6	269.4	268.0	265.2	276.5	290.4	276.5	292.2	251.0

〈표 2-36〉 면진 건물의 최대응답가속도(Y방향)

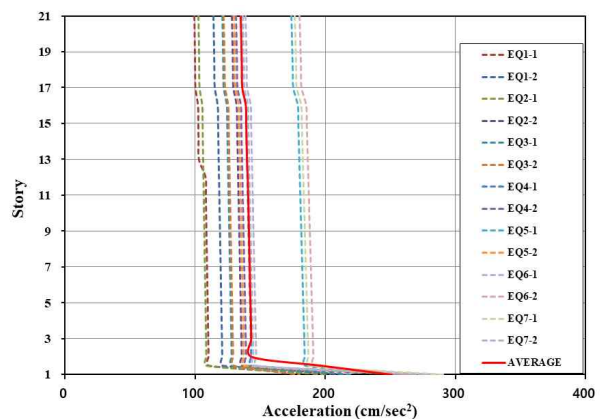
(단위 :cm/sec²)

STORY	EQ1-1	EQ1-2	EQ2-1	EQ2-2	EQ3-1	EQ3-2	EQ4-1	EQ4-2	EQ5-1	EQ5-2	EQ6-1	EQ6-2	EQ7-1	EQ7-2	AVE.
21	241.9	137.1	148.1	192.2	132.2	96.9	210.1	196.0	165.4	200.0	206.9	164.8	210.3	202.8	178.9
20	242.4	137.4	148.5	192.6	132.5	97.1	210.6	196.5	165.8	200.5	207.4	165.2	210.7	203.2	179.3
19	242.9	137.7	148.8	193.0	132.7	97.3	211.0	196.9	166.1	200.9	207.8	165.5	211.2	203.6	179.7
18	243.4	138.0	149.1	193.4	133.0	97.5	211.4	197.3	166.5	201.3	208.3	165.8	211.6	204.1	180.0
17	243.9	138.3	149.4	193.8	133.3	97.7	211.9	197.7	166.8	201.7	208.7	166.2	212.1	204.5	180.4
16	248.8	141.0	152.4	197.7	136.0	99.6	216.1	201.7	170.2	205.8	212.9	169.5	216.3	208.6	184.0
15	249.3	141.3	152.7	198.1	136.3	99.8	216.6	202.1	170.5	206.2	213.3	169.9	216.8	209.0	184.4
14	249.9	141.6	153.0	198.5	136.5	100.0	217.0	202.5	170.9	206.6	213.8	170.2	217.2	209.5	184.8
13	250.4	141.9	153.3	198.9	136.8	100.3	217.5	202.9	171.2	207.1	214.2	170.6	217.7	209.9	185.2
12	262.9	142.2	153.7	199.3	137.1	100.5	217.9	203.4	171.6	207.5	214.7	170.9	218.1	210.3	186.4
11	263.5	142.5	154.0	199.8	137.4	100.7	218.4	203.8	172.0	207.9	215.1	171.3	218.6	210.8	186.8
10	264.0	142.8	154.3	200.2	137.7	100.9	218.9	204.2	172.3	208.4	215.6	171.7	219.1	211.2	187.2
9	264.6	143.1	154.6	200.6	138.0	101.1	219.3	204.6	172.7	208.8	216.0	172.0	219.5	211.7	187.6
8	265.1	143.4	155.0	201.0	138.3	101.3	219.8	205.1	173.1	209.2	216.5	172.4	220.0	212.1	188.0
7	265.7	143.7	155.3	201.4	138.6	101.5	220.2	205.5	173.4	209.7	216.9	172.7	220.4	212.6	188.4
6	266.2	144.0	155.6	201.9	138.9	101.7	220.7	205.9	173.8	210.1	217.4	173.1	220.9	213.0	188.8
5	266.8	144.3	155.9	202.3	139.1	102.0	221.2	206.4	174.1	210.6	217.8	173.5	221.4	213.5	189.2
4	267.3	144.6	156.3	202.7	139.4	102.2	221.6	206.8	174.5	211.0	218.3	173.8	221.8	213.9	189.6
3	267.9	144.9	156.6	203.1	139.7	102.4	222.1	207.2	174.9	211.5	218.8	174.2	222.3	214.4	190.0
2	268.5	145.2	156.9	203.6	140.0	102.6	222.6	207.7	175.2	211.9	219.2	174.6	222.8	214.8	190.4
1.5	269.0	145.5	157.3	204.0	140.3	102.8	223.0	208.1	175.6	212.3	219.7	174.9	223.2	215.3	190.8
1	268.5	203.6	215.9	203.0	180.0	221.4	283.6	269.4	268.0	265.2	276.5	290.4	276.5	292.2	251.0

비면진 건물에 비해 면진건물의 최상층 가속도 저감효과는 X방향의 경우는 약 1/5, Y방향의 경우에는 약 1/5의 저감효과를 나타내었다. 이러한 가속도 감소는 결국 상부구조에서 설계전 단력의 감소를 의미함으로서 면진구조의 우수함을 충분히 확인할 수 있었다.

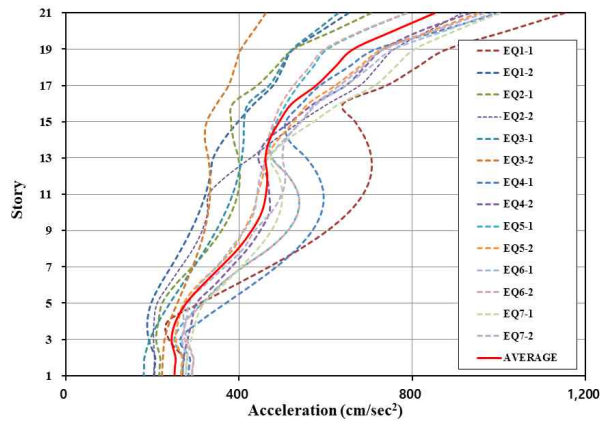


(a) 비면진건물

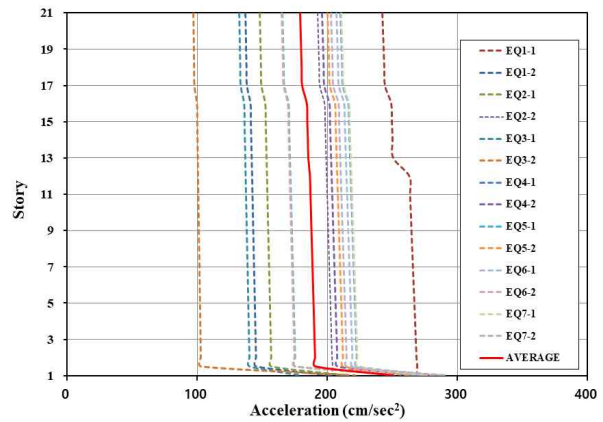


(b) 면진건물

〔그림 2-52〕 각 지진파에 따른 X방향 최대응답변위

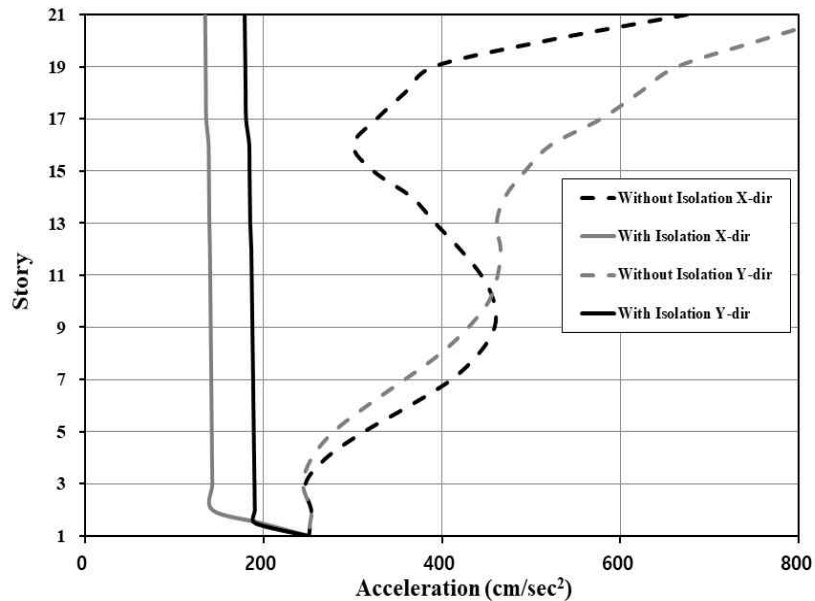


(a) 비면진건물



(b) 면진건물

[그림 2-53] 각 지진파에 따른 Y방향 최대응답변위



[그림 2-54] 각 지진파에 따른 최대응답가속도 평균값

(다) 층전단력

<표 2-37>부터 <표 2-40>까지는 비면진 건물과 면진건물의 층전단력 해석결과를 비교하여 정리한 것이며, [그림 2-55] 및 [그림 2-56]는 이를 도식화하여 나타낸 것이다. 또한, [그림 2-57]은 해석결과를 더 명확하게 파악하기 위하여 각 방향별 지진파 평균값을 나타내었다.

층전단력 해석결과 비면진 건물과 비교하여 면진건물이 X방향 및 Y방향 모두 약 35%이상의 저감효과를 나타내었다. 면진설계로 인한 층 전단력의 감소결과는 결국 상부 구조의 부재설계에 있어서 작용하는 하중의 감소를 의미하므로 상부구조를 보다 경제적으로 설계할 수 있음을 의미한다.

〈표 2-37〉 비면진 건물의 층전단력(X방향)

(단위 : kN)

STORY	EQ1-1	EQ1-2	EQ2-1	EQ2-2	EQ3-1	EQ3-2	EQ4-1	EQ4-2	EQ5-1	EQ5-2	EQ6-1	EQ6-2	EQ7-1	EQ7-2	AVE.
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	470	265	448	409	455	265	429	784	489	489	910	681	651	296	503
19	847	513	667	624	596	450	672	1098	788	788	1198	964	902	508	758
18	1661	1491	1869	1773	1381	1088	1750	2784	1678	1678	2844	2359	2462	1470	1878
17	2235	2386	2459	2136	2083	1603	2399	3233	2608	2608	2198	2431	2310	2337	2359
16	2594	2811	2834	2522	2339	1765	2481	3370	3106	3106	2094	2501	2798	2696	2644
15	2632	3015	3069	2655	2520	1769	2443	2936	3303	3303	2822	2552	3156	2717	2778
14	2571	2934	3408	2625	2667	1771	2610	2668	3500	3500	3671	2942	3207	2341	2887
13	2694	2998	3440	2498	2666	2090	2763	2442	3596	3596	4238	2915	2861	2134	2924
12	2568	2819	2717	2734	2452	2442	2624	2406	3330	3330	4289	2894	2925	2170	2836
11	2425	2373	2468	2728	2599	2702	2575	2434	2672	2672	3077	2879	2798	2021	2602
10	2441	2482	2173	2249	2537	2607	2367	2565	2876	2876	3258	2626	2622	2243	2566
9	2753	2477	2159	2169	2383	2310	2631	2674	2913	2913	3638	2740	3304	2368	2674
8	3219	2343	2674	2740	2380	2579	2946	2982	3218	3218	4673	2832	3442	2392	2974
7	3635	2835	3254	3173	2756	2797	3240	3297	3487	3487	4335	3128	3130	2257	3201
6	3954	3724	3884	3491	3170	2929	3355	3664	3640	3640	4758	3361	3179	2903	3546
5	4028	4621	4555	3944	3496	3014	3725	4036	4230	4230	4068	3442	3705	3580	3905
4	3977	5333	5099	4711	3702	3211	4202	4476	4994	4994	3875	3484	4578	4070	4336
3	4541	5856	5533	5490	3837	3362	4730	5636	5753	5753	4452	3902	5373	4442	4904
2	4959	6243	5847	6140	3970	3475	5351	6591	6459	6459	4811	4406	6132	4689	5395
1.5	5665	6624	6087	6559	4856	3550	6045	7513	7080	7080	5771	4920	6861	5000	5972
1	6465	7233	6260	6785	5420	3660	6597	8117	7588	7588	6792	5657	7481	5419	6504

〈표 2-38〉 면진 건물의 층전단력(X방향)

(단위 : kN)

STORY	EQ1-1	EQ1-2	EQ2-1	EQ2-2	EQ3-1	EQ3-2	EQ4-1	EQ4-2	EQ5-1	EQ5-2	EQ6-1	EQ6-2	EQ7-1	EQ7-2	AVE.
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	305	186	278	295	269	191	283	588	332	337	583	484	404	210	339
19	551	359	413	449	352	324	444	823	536	544	767	684	559	360	512
18	1080	1044	1159	1276	815	783	1155	2088	1141	1158	1820	1675	1527	1044	1269
17	1453	1670	1524	1538	1229	1154	1583	2425	1773	1799	1407	1726	1432	1659	1598
16	1686	1968	1757	1816	1380	1271	1637	2528	2112	2143	1340	1775	1735	1914	1790
15	1711	2111	1903	1912	1487	1273	1612	2202	2246	2279	1806	1812	1957	1929	1874
14	1671	2054	2113	1890	1573	1275	1722	2001	2380	2415	2349	2089	1989	1662	1942
13	1751	2099	2133	1799	1573	1505	1823	1832	2445	2481	2713	2069	1774	1515	1965
12	1669	1973	1684	1968	1447	1758	1732	1805	2264	2297	2745	2055	1814	1541	1911
11	1576	1661	1530	1964	1533	1945	1699	1826	1817	1844	1969	2044	1735	1435	1756
10	1587	1737	1348	1619	1497	1877	1562	1924	1956	1985	2085	1865	1626	1593	1733
9	1789	1734	1339	1562	1406	1663	1737	2005	1981	2010	2329	1945	2048	1681	1802
8	2093	1640	1658	1973	1404	1857	1945	2236	2188	2220	2990	2010	2134	1698	2003
7	2362	1985	2018	2284	1626	2014	2138	2472	2371	2406	2774	2221	1941	1602	2158
6	2570	2607	2408	2514	1870	2109	2214	2748	2475	2512	3045	2386	1971	2061	2392
5	2618	3235	2824	2840	2063	2170	2458	3027	2876	2918	2603	2444	2297	2542	2637
4	2585	3733	3161	3392	2184	2312	2773	3357	3396	3446	2480	2473	2838	2890	2930
3	2952	4099	3431	3952	2264	2420	3122	4227	3912	3969	2849	2770	3331	3154	3318
2	3223	4370	3625	4421	2342	2502	3532	4943	4392	4456	3079	3128	3802	3329	3653
1.5	3682	4637	3774	4722	2865	2556	3989	5634	4815	4885	3694	3493	4254	3550	4039
1	4202	5063	3881	4885	3198	2635	4354	6088	5160	5236	4347	4017	4638	3847	4396

〈표 2-39〉 비면진 건물의 층전단력(Y방향)

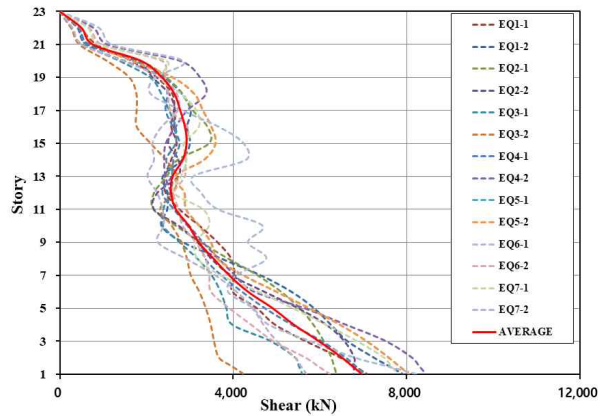
(단위 : kN)

STORY	EQ1-1	EQ1-2	EQ2-1	EQ2-2	EQ3-1	EQ3-2	EQ4-1	EQ4-2	EQ5-1	EQ5-2	EQ6-1	EQ6-2	EQ7-1	EQ7-2	AVE.
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	620	590	413	559	536	369	581	473	423	423	608	1057	630	304	542
19	1084	1076	677	1005	971	678	878	813	840	840	894	1760	1011	500	930
18	2600	2479	1632	1965	2215	1696	2357	1880	2157	2157	2114	3353	1941	1309	2132
17	3481	3630	2415	2851	2578	2423	2966	3063	2981	2981	2359	4269	2738	2024	2911
16	3485	3968	2937	3190	2740	2968	3155	3957	3556	3556	2512	3956	2897	2541	3244
15	3850	3816	3386	3496	2901	3446	3683	4426	3704	3704	2813	3926	2921	3021	3507
14	3999	3406	3442	3682	2540	3751	4025	4496	3502	3502	2567	4103	3146	3371	3538
13	3986	3592	3176	3921	2802	3728	3853	4185	3663	3663	2418	5509	3150	3632	3663
12	3820	3789	3669	4511	3390	3644	3499	3890	4075	4075	2956	6119	3312	3760	3894
11	3906	3973	3775	4904	3541	4083	3795	4154	4407	4407	3328	5132	3490	3752	4046
10	3873	4028	3531	4977	3477	4066	4457	5096	4401	4401	3471	4944	3770	3905	4171
9	4139	4124	3809	4710	3576	4299	4649	5437	5222	5222	4059	5071	4086	4028	4459
8	4330	4139	4389	4924	3839	4630	5286	5382	5681	5681	4364	5163	3925	4243	4712
7	5127	4620	4757	5795	3982	5309	5694	5862	5744	5744	4583	5203	4304	4481	5086
6	5350	5069	4941	6368	4356	5530	5916	6845	5601	5601	4537	5126	4830	4489	5326
5	5880	5081	5086	6832	4541	5934	6419	7679	5658	5658	4208	5959	5390	4509	5631
4	6191	5802	5868	7529	4757	6752	7279	8620	6613	6613	4501	6467	5999	4559	6254
3	7095	6556	6864	8512	5037	7603	8512	9841	7503	7503	4807	7182	6754	5348	7080
2	7663	7372	7684	9349	5511	8294	9929	11254	8270	8270	5093	7851	7356	5825	7837
1.5	8760	8071	8771	10124	5982	8769	10915	12524	8905	8905	5443	9178	7965	6716	8645
1	10090	8606	9498	10768	6427	9014	11303	13657	9354	9354	5919	9982	8559	7317	9275

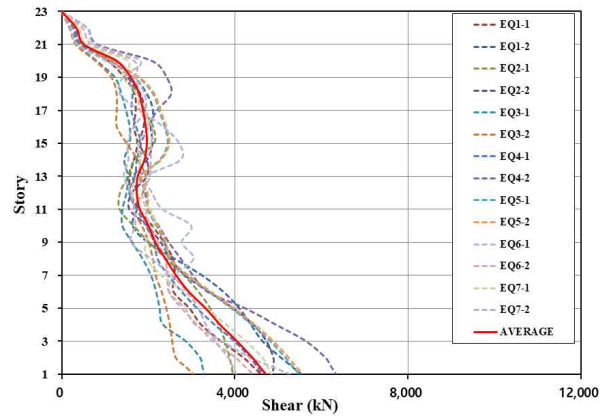
〈표 2-40〉 면진 건물의 층전단력(Y방향)

(단위 : kN)

STORY	EQ1-1	EQ1-2	EQ2-1	EQ2-2	EQ3-1	EQ3-2	EQ4-1	EQ4-2	EQ5-1	EQ5-2	EQ6-1	EQ6-2	EQ7-1	EQ7-2	AVE.
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	403	413	256	403	317	266	384	355	287	292	389	750	391	216	366
19	705	753	420	724	573	488	579	609	571	579	572	1250	627	355	629
18	1690	1735	1012	1415	1307	1221	1556	1410	1467	1488	1353	2381	1203	929	1440
17	2263	2541	1497	2053	1521	1744	1958	2297	2027	2057	1510	3031	1697	1437	1974
16	2265	2777	1821	2297	1617	2137	2082	2968	2418	2453	1608	2809	1796	1804	2204
15	2503	2671	2099	2517	1711	2481	2431	3319	2519	2556	1801	2787	1811	2145	2382
14	2599	2384	2134	2651	1499	2701	2657	3372	2381	2416	1643	2913	1950	2393	2407
13	2591	2515	1969	2823	1653	2684	2543	3139	2491	2527	1548	3911	1953	2579	2495
12	2483	2652	2275	3248	2000	2624	2309	2918	2771	2812	1892	4345	2053	2670	2647
11	2539	2781	2340	3531	2089	2940	2504	3116	2997	3041	2130	3644	2164	2664	2749
10	2517	2820	2189	3583	2051	2927	2942	3822	2993	3037	2222	3511	2338	2772	2837
9	2690	2887	2361	3391	2110	3095	3068	4077	3551	3603	2598	3601	2534	2860	3030
8	2814	2897	2721	3545	2265	3334	3488	4036	3863	3920	2793	3666	2433	3013	3199
7	3333	3234	2950	4172	2350	3822	3758	4396	3906	3964	2933	3694	2668	3182	3454
6	3478	3548	3063	4585	2570	3982	3905	5134	3809	3865	2904	3640	2995	3187	3619
5	3822	3556	3153	4919	2679	4273	4236	5759	3847	3904	2693	4231	3342	3201	3830
4	4024	4062	3638	5421	2807	4862	4804	6465	4497	4563	2881	4592	3720	3237	4255
3	4611	4589	4256	6129	2972	5474	5618	7380	5102	5177	3077	5099	4188	3797	4819
2	4981	5161	4764	6731	3251	5972	6553	8441	5623	5706	3259	5574	4561	4136	5337
1.5	5694	5649	5438	7289	3529	6313	7204	9393	6056	6145	3483	6517	4938	4768	5887
1	6559	6024	5889	7753	3792	6490	7460	10243	6360	6454	3788	7087	5307	5195	6314

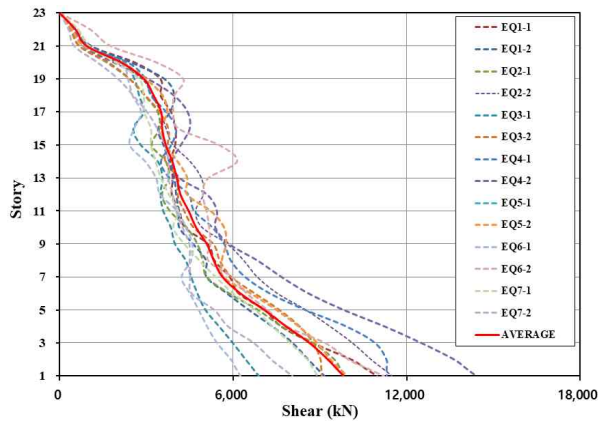


(a) 비면진건물

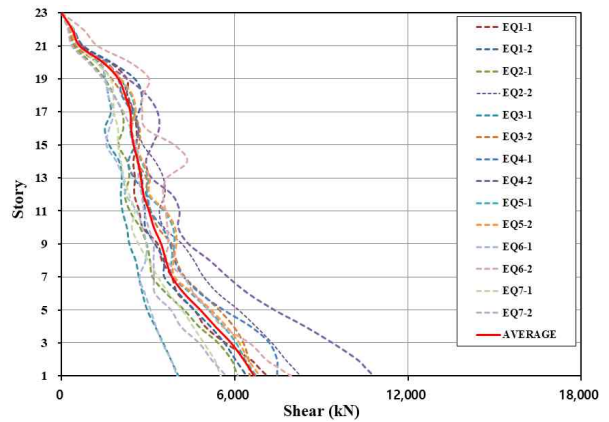


(b) 면진건물

[그림 2-55] 각 지진파에 따른 X방향 층전단력

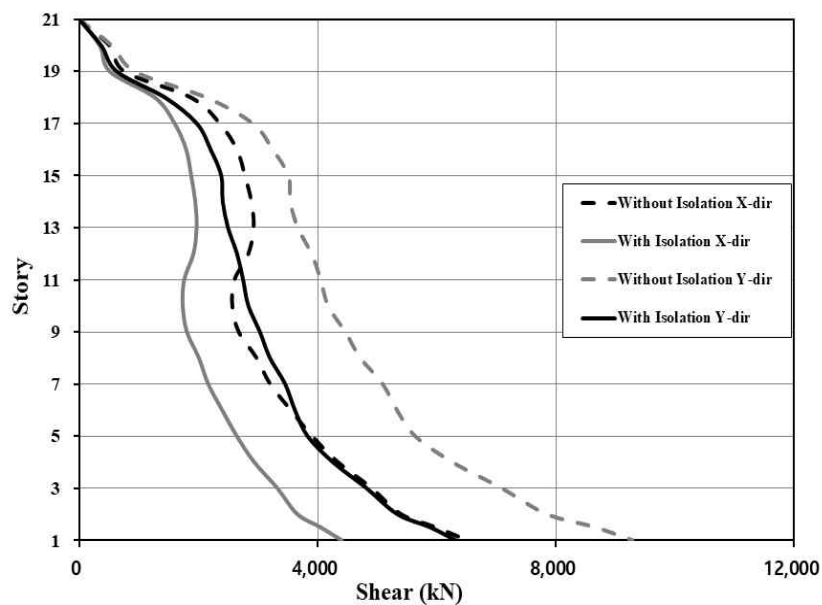


(a) 비면진건물



(b) 면진건물

[그림 2-56] 각 지진파에 따른 Y방향 층전단력

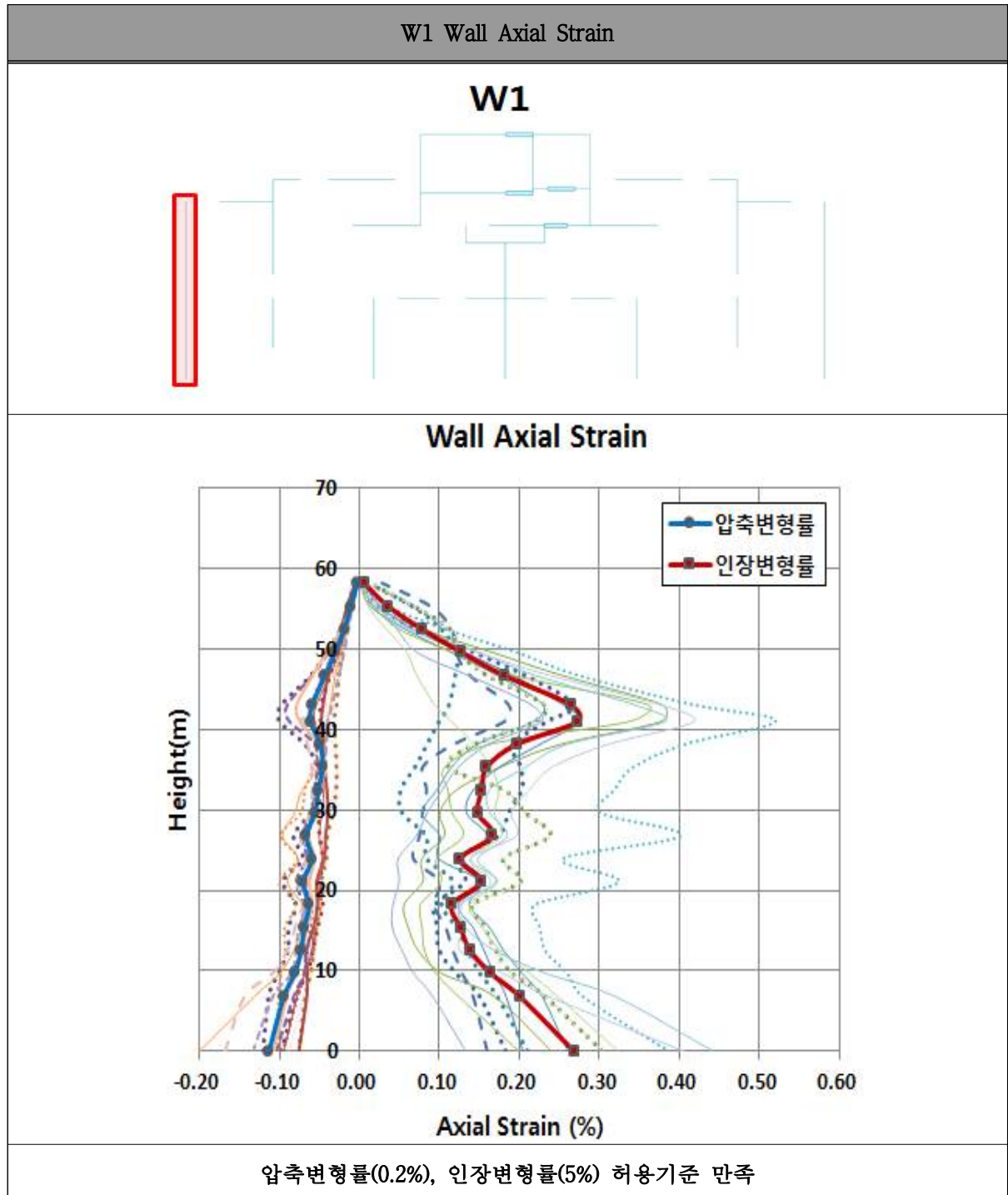


[그림 2-57] 각 지진파에 따른 층전단력 평균값

(라) 최대응답변위

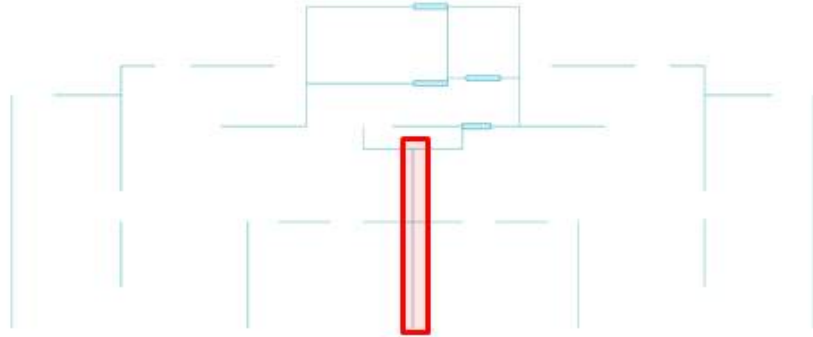
① 벽체 수직 변형률 평가

벽체의 수직변형률은 벽체의 위치 및 방향을 고려한 대표 위치를 선정하여 검토하였으며, 층별로 7쌍 지진과 평균값이 압축변형률은 0.2%, 인장변형률은 5%를 초과하는지 검토하였다. 검토 결과, 모든 벽체에 발생하는 수직변형률이 인장, 압축에 대한 변형률 허용기준을 만족하였다.

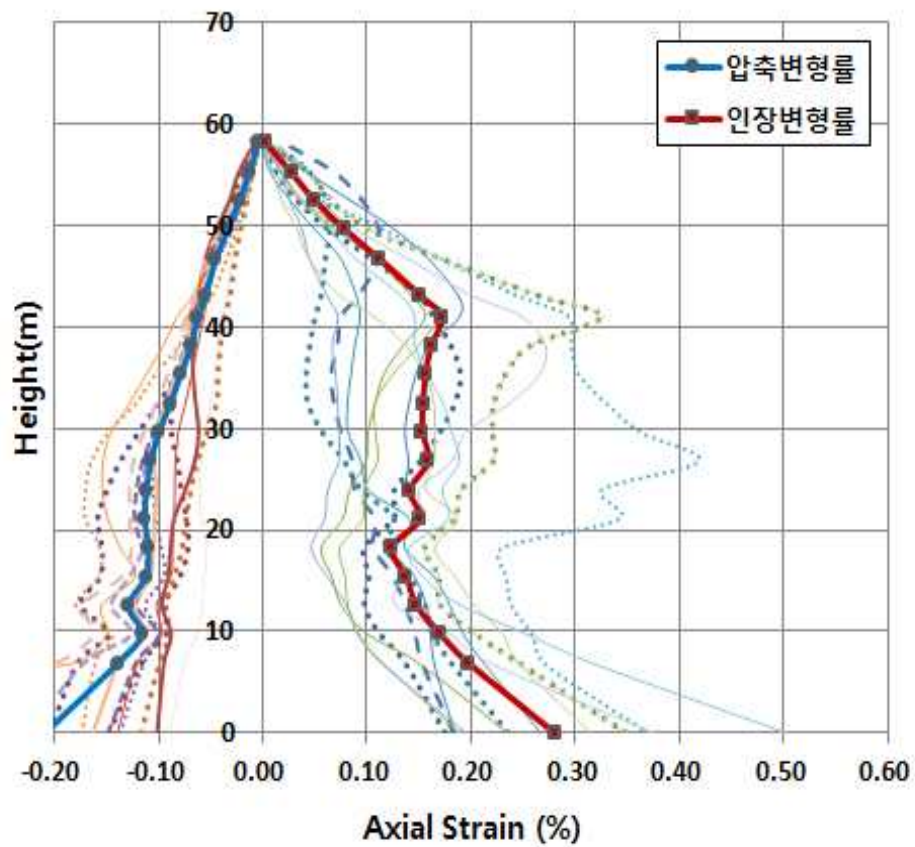


W2 Wall Axial Strain

W2



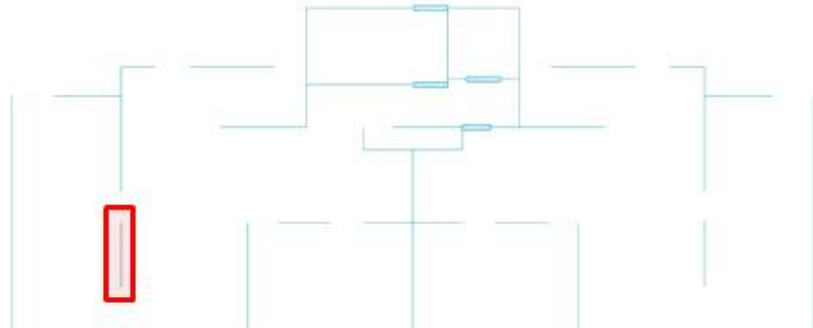
Wall Axial Strain



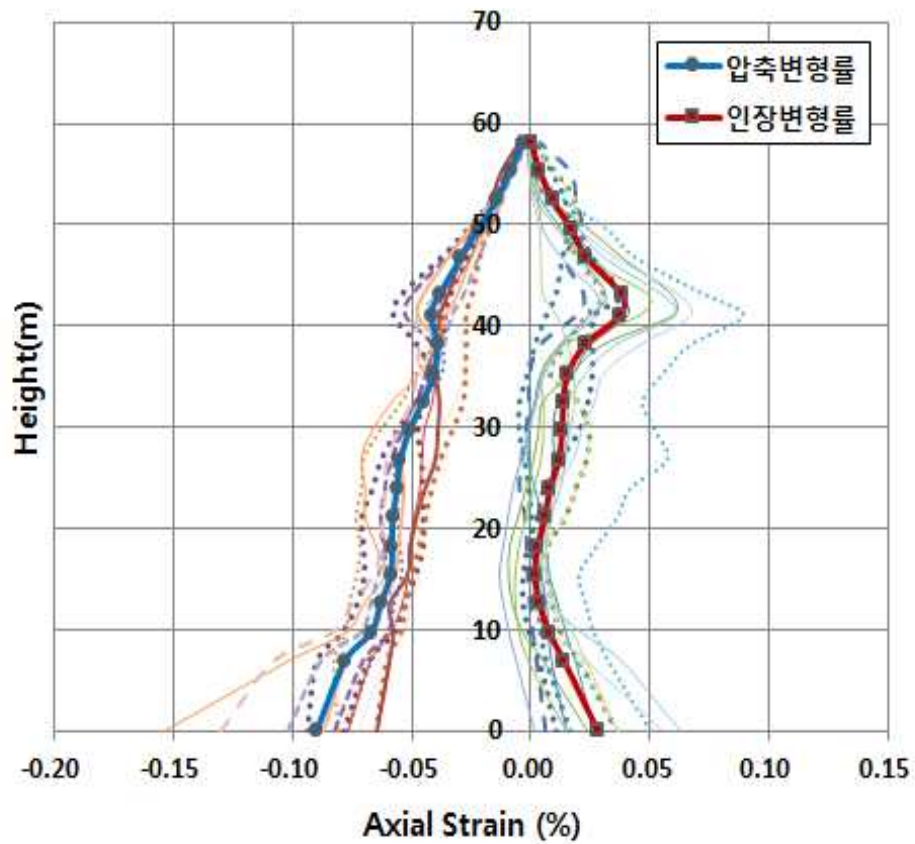
압축변형률(0.2%), 인장변형률(5%) 허용기준 만족

W3 Wall Axial Strain

W3



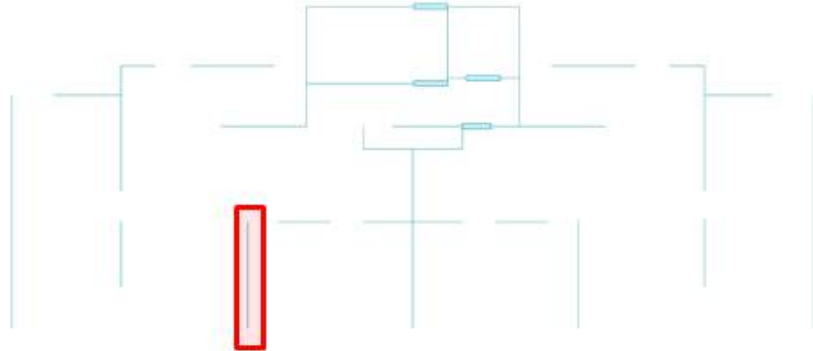
Wall Axial Strain



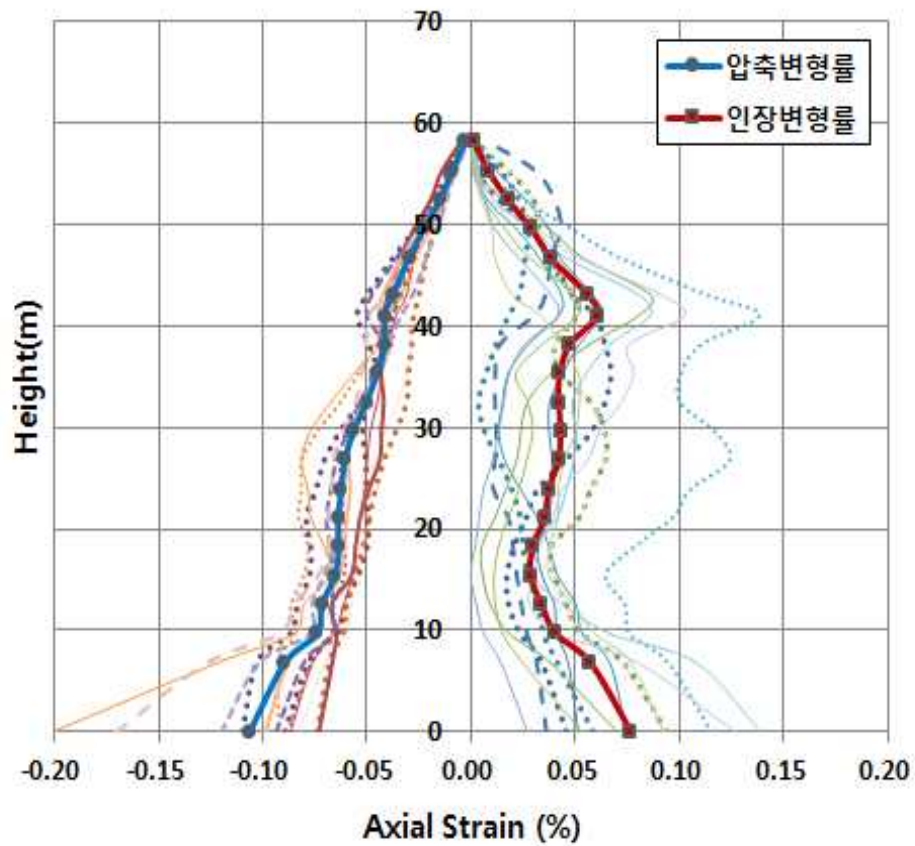
압축변형률(0.2%), 인장변형률(5%) 허용기준 만족

W4 Wall Axial Strain

W4



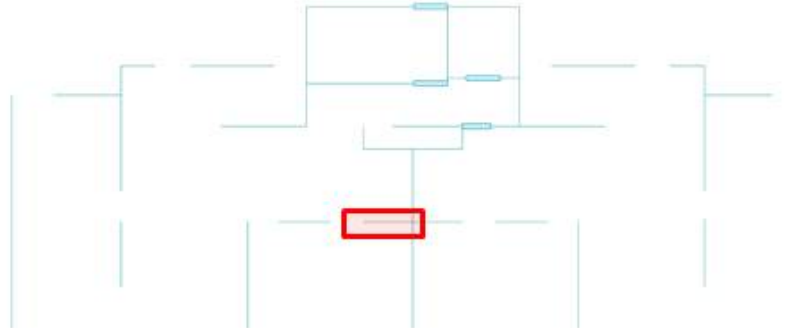
Wall Axial Strain



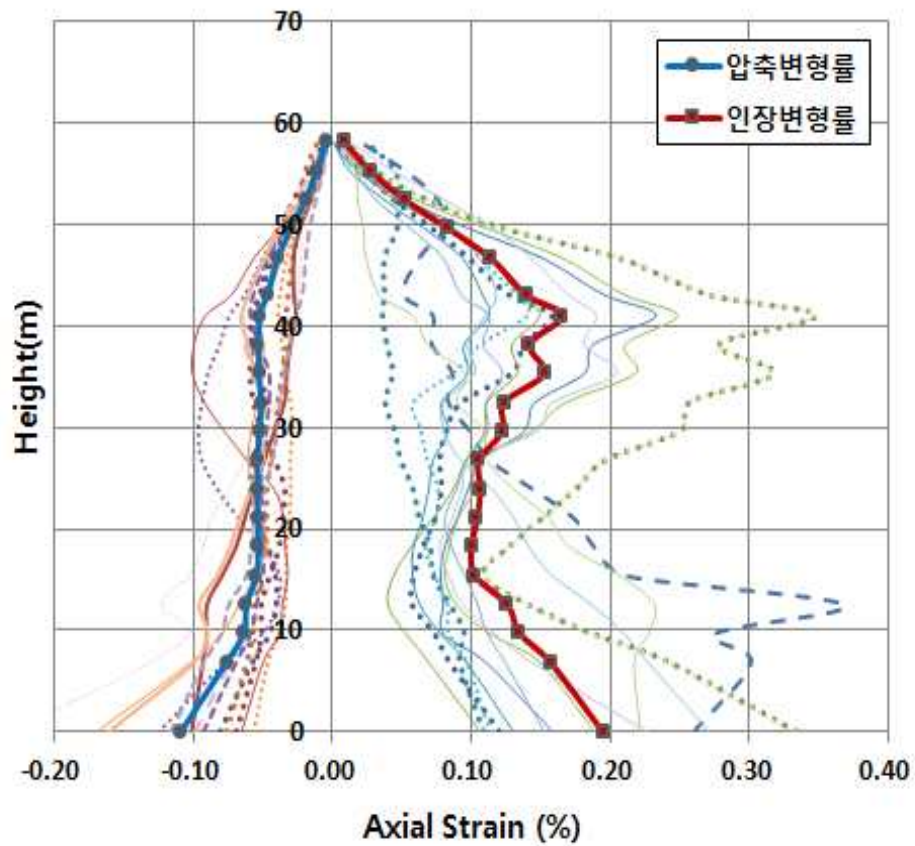
압축변형률(0.2%), 인장변형률(5%) 허용기준 만족

W6 Wall Axial Strain

W6



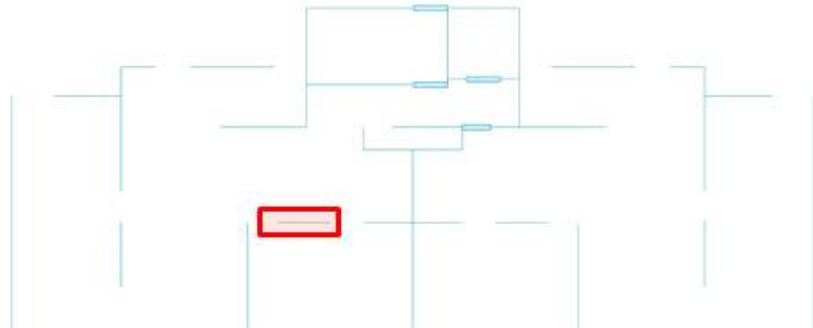
Wall Axial Strain



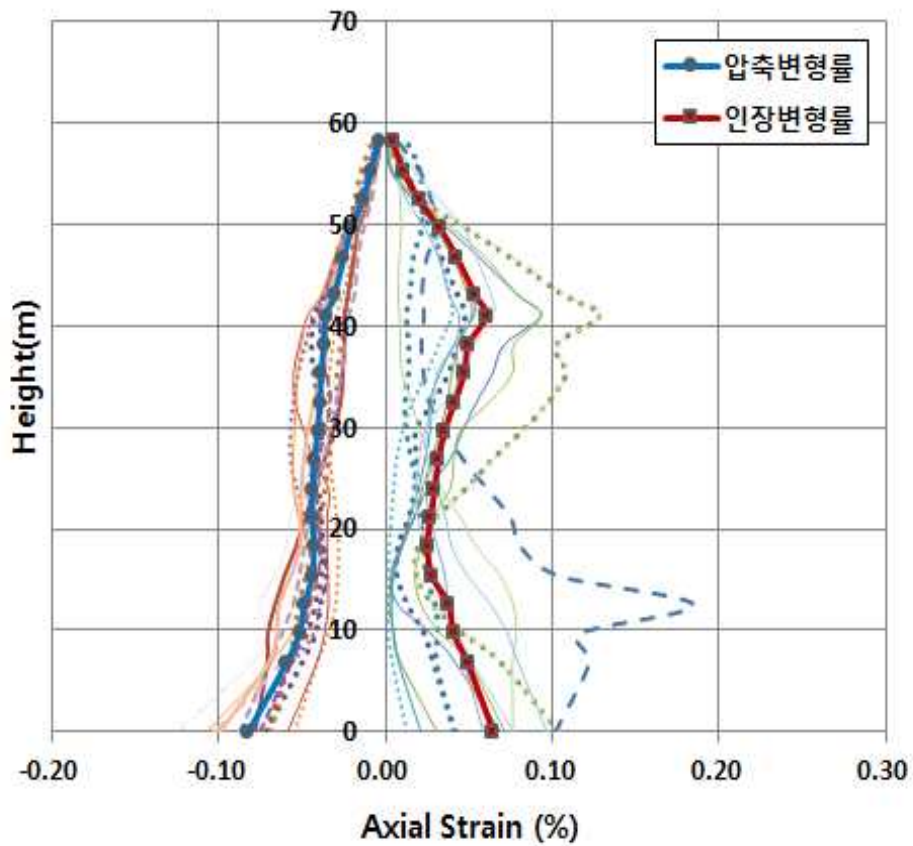
압축변형률(0.2%), 인장변형률(5%) 허용기준 만족

W7 Wall Axial Strain

W7



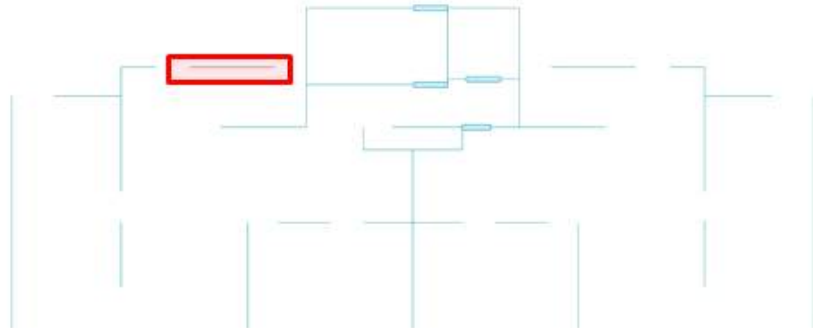
Wall Axial Strain



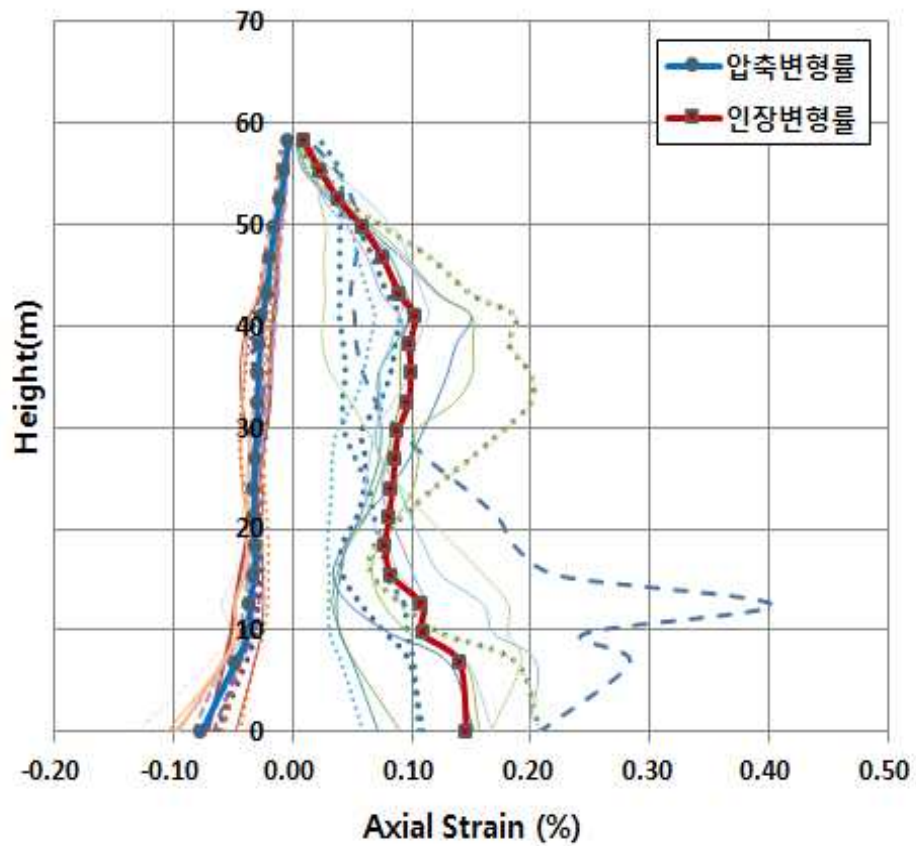
압축변형률(0.2%), 인장변형률(5%) 허용기준 만족

W9 Wall Axial Strain

W9



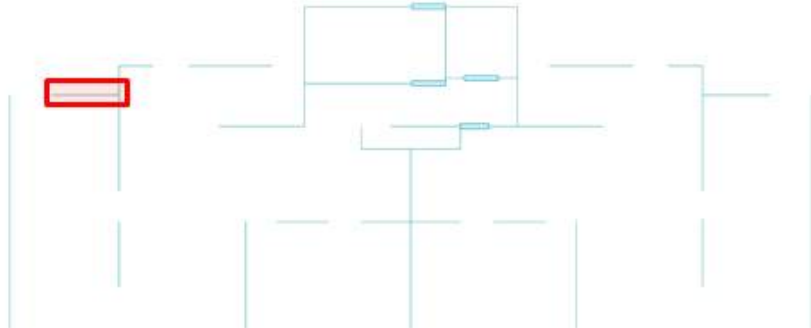
Wall Axial Strain



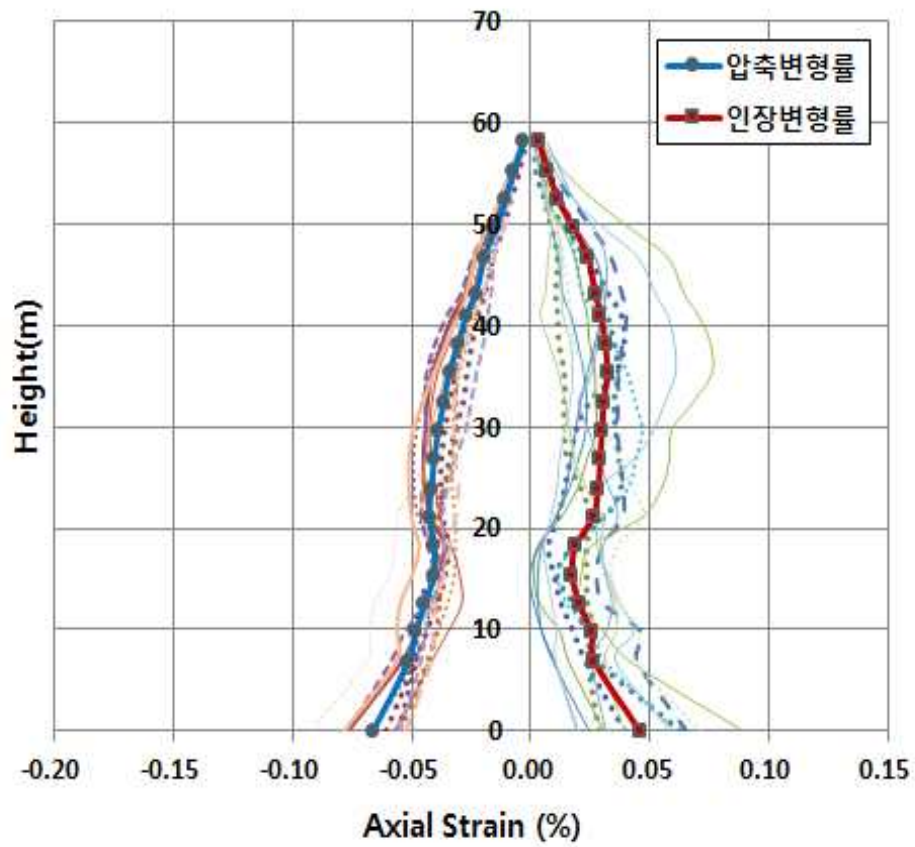
압축변형률(0.2%), 인장변형률(5%) 허용기준 만족

W11 Wall Axial Strain

W11



Wall Axial Strain

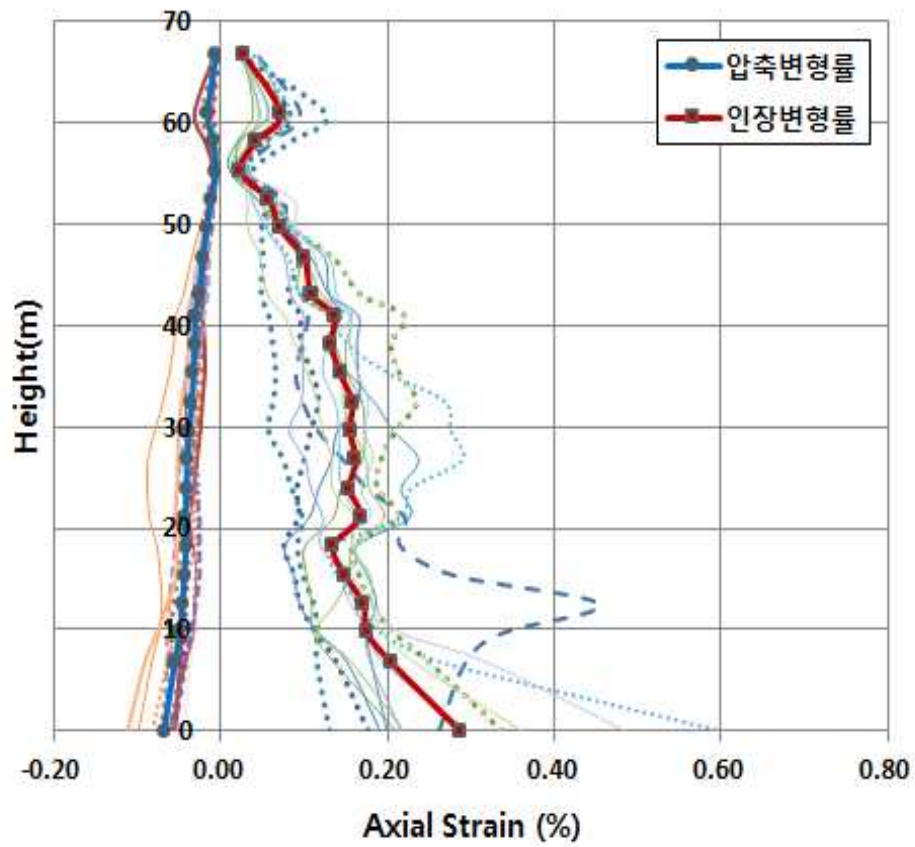


압축변형률(0.2%), 인장변형률(5%) 허용기준 만족

CW4 Wall Axial Strain

CW4

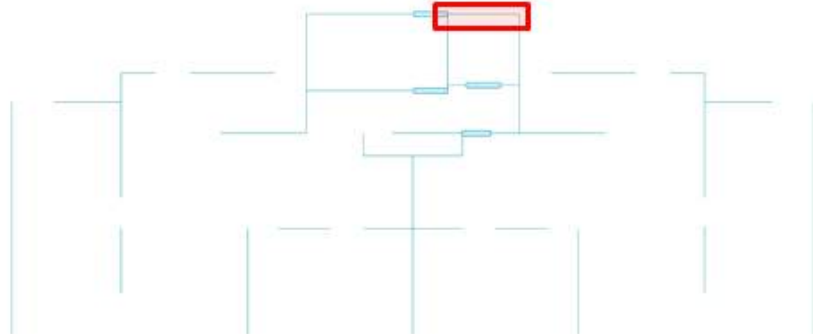
Wall Axial Strain



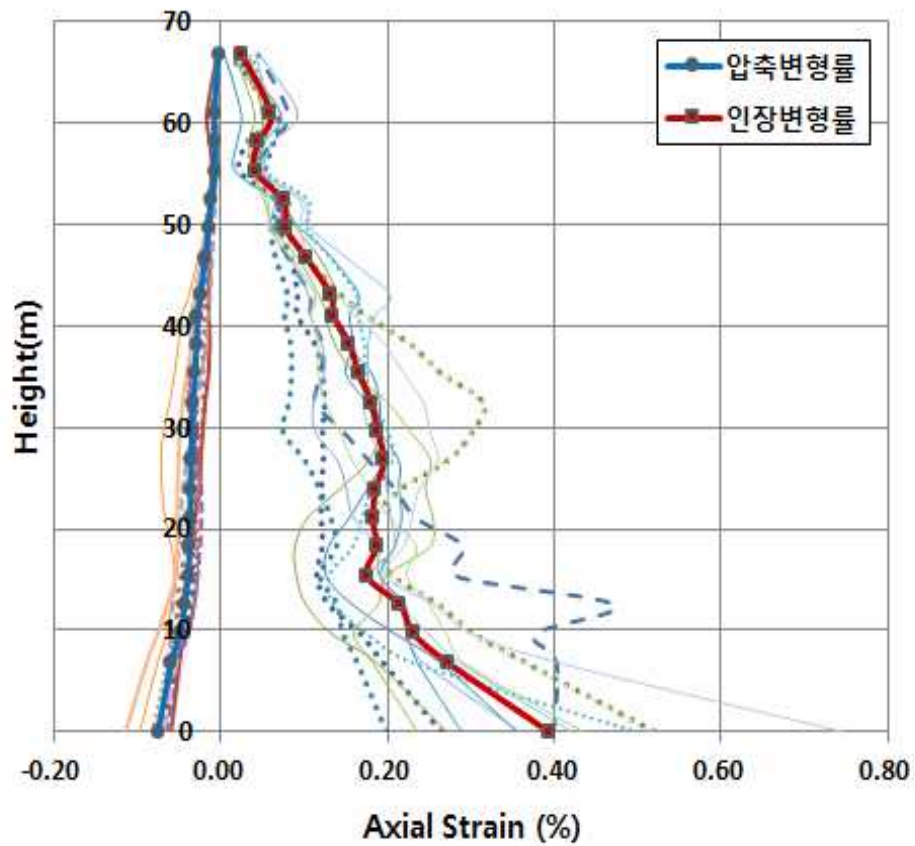
압축변형률(0.2%), 인장변형률(5%) 허용기준 만족

CW5 Wall Axial Strain

CW5



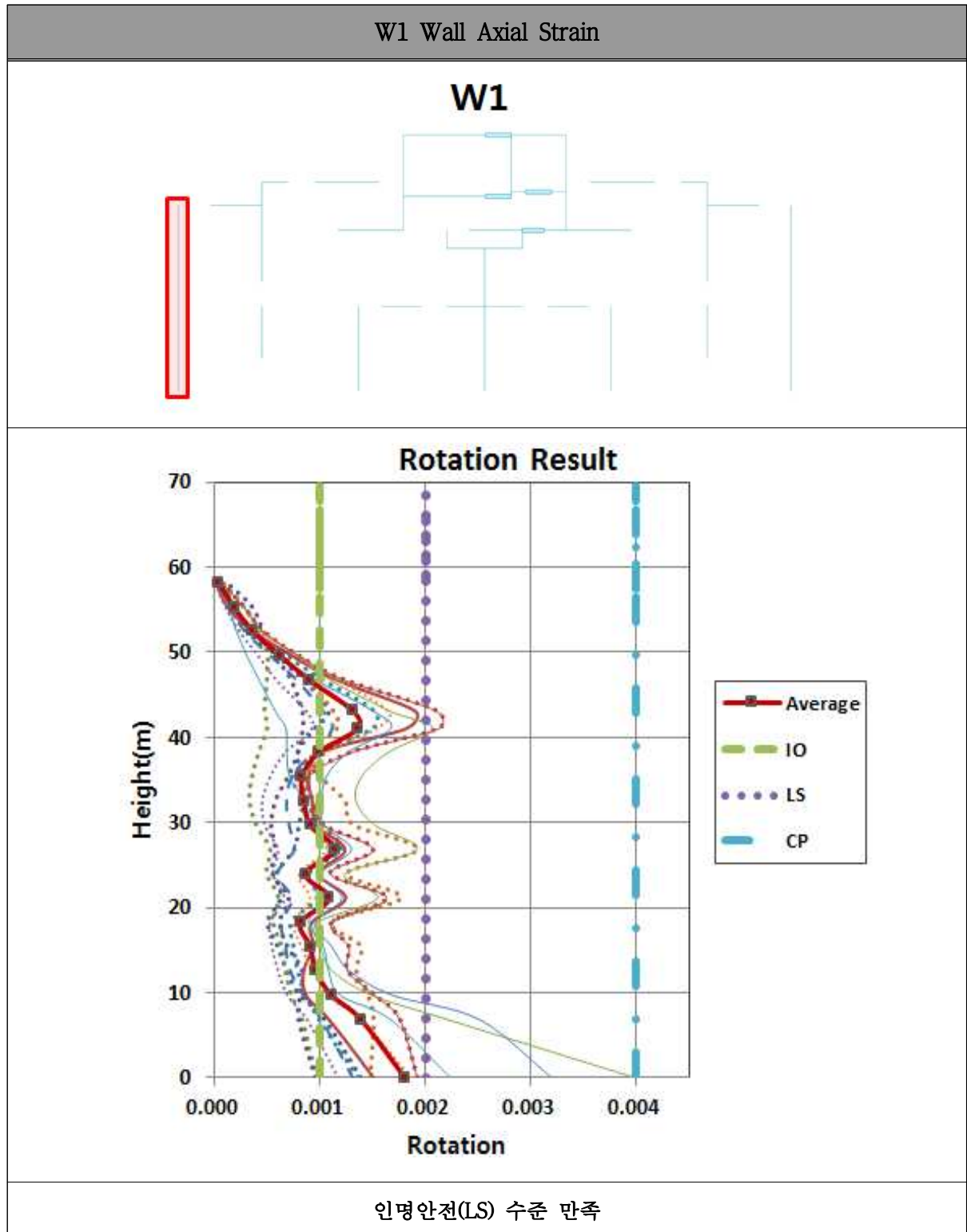
Wall Axial Strain



압축변형률(0.2%), 인장변형률(5%) 허용기준 만족

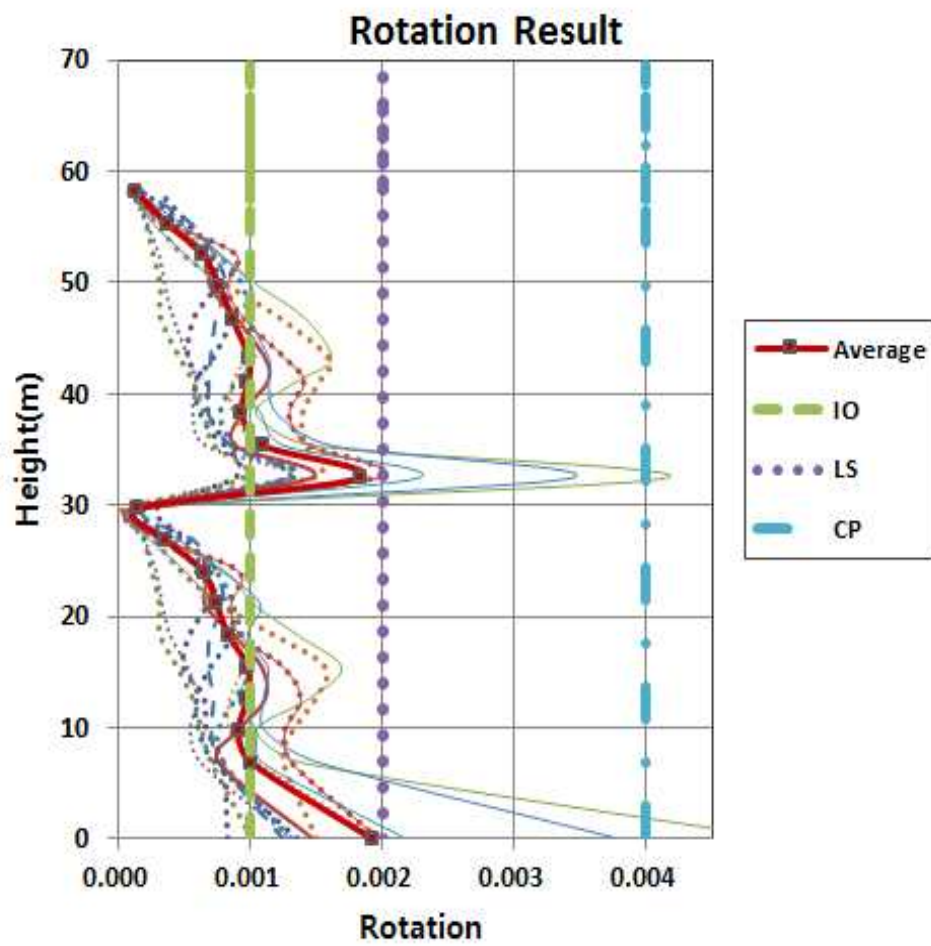
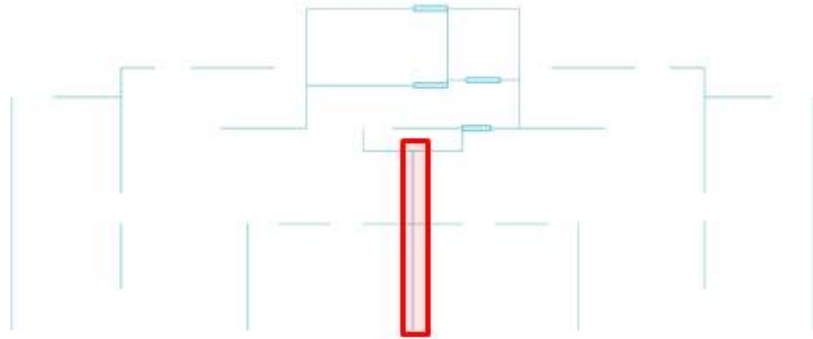
② 벽체 회전변형률 평가

벽체의 회전변형률 검토는 모든 벽체를 대상으로 검토하였으며, 각 부재의 소성회전각(7쌍 지진과의 평균)이 인명안전 수준을 초과하는지 검토하였다. 검토 결과, 모든 벽체에 발생하는 회전변형률이 인명안전(LS) 수준을 만족하였다.



W2 Wall Axial Strain

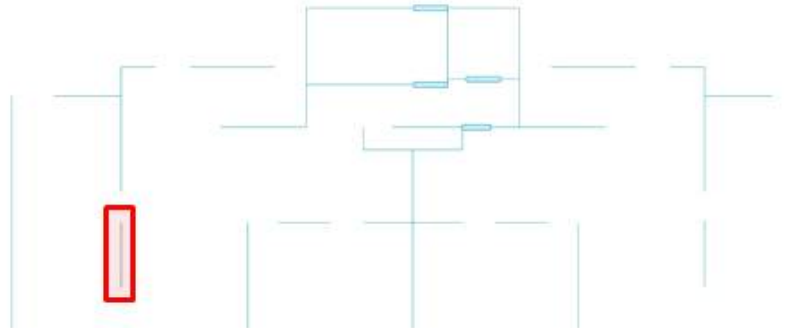
W2



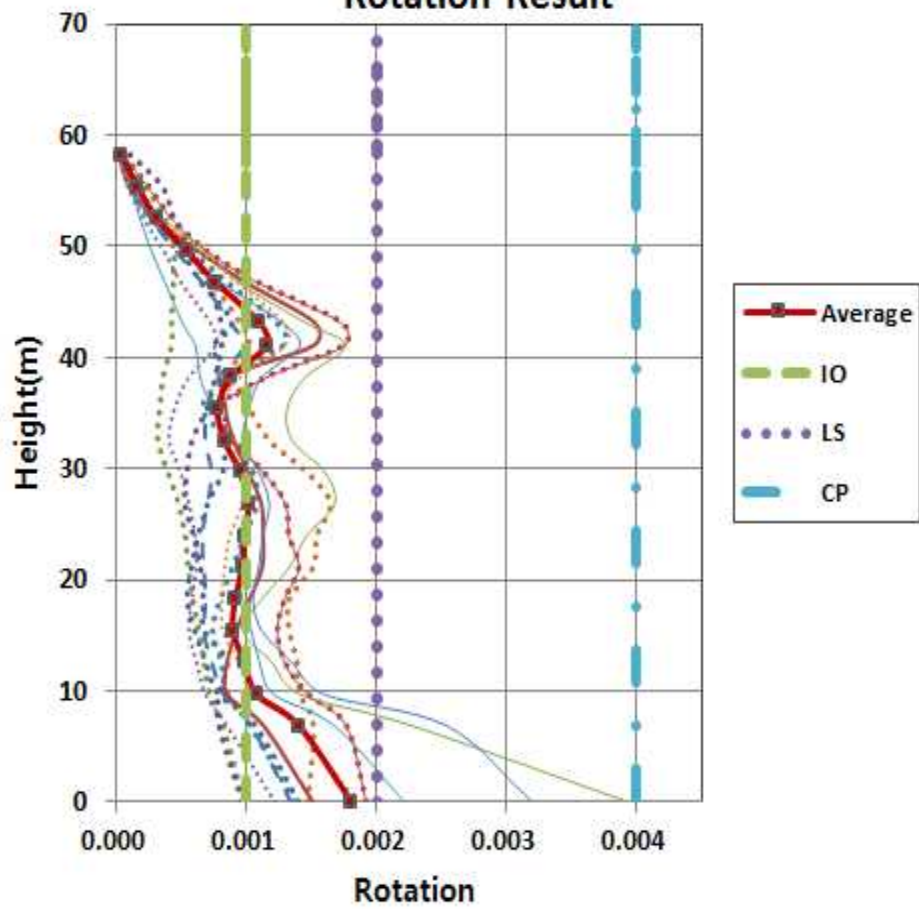
인명안전(LS) 수준 만족

W3 Wall Axial Strain

W3



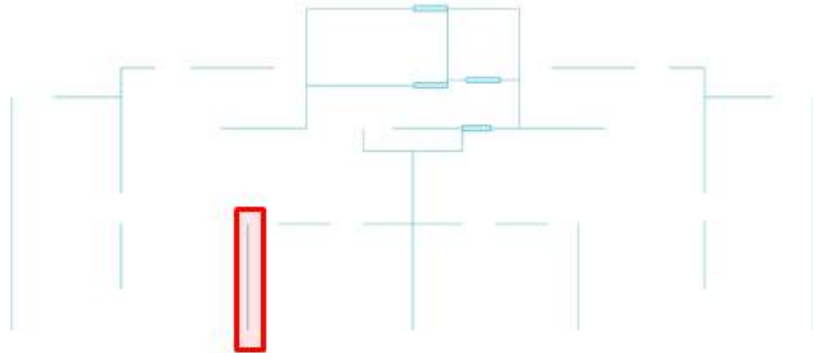
Rotation Result



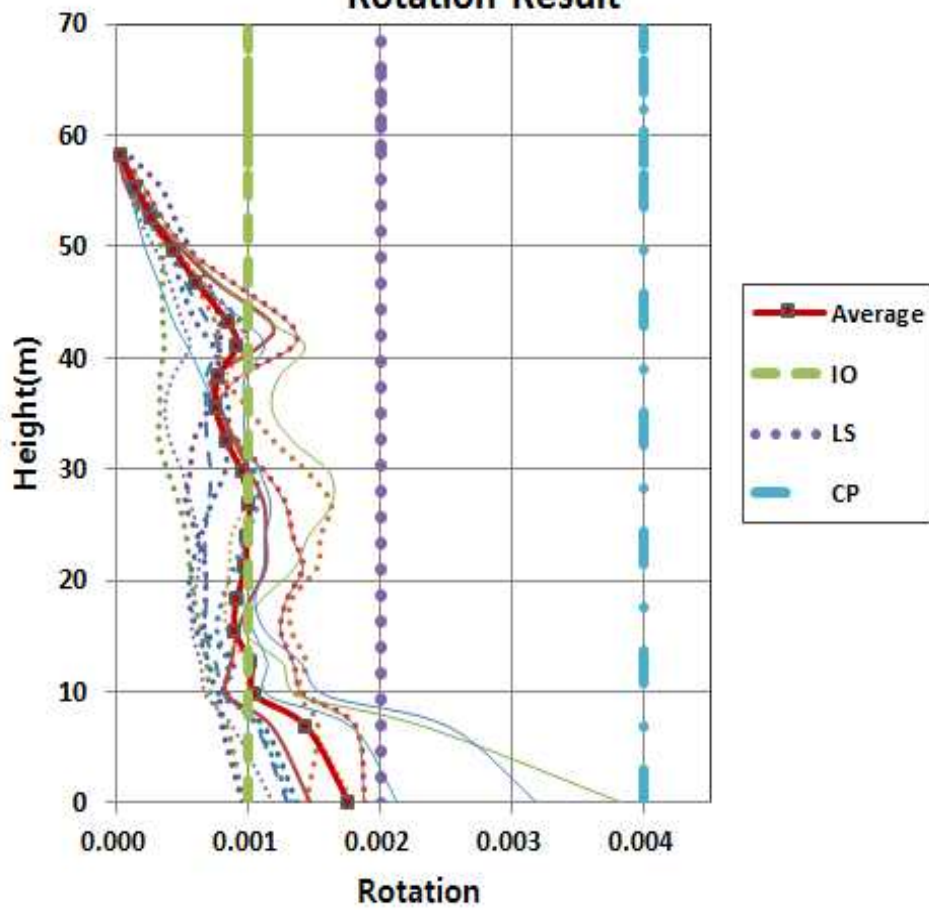
인명안전(LS) 수준 만족

W4 Wall Axial Strain

W4



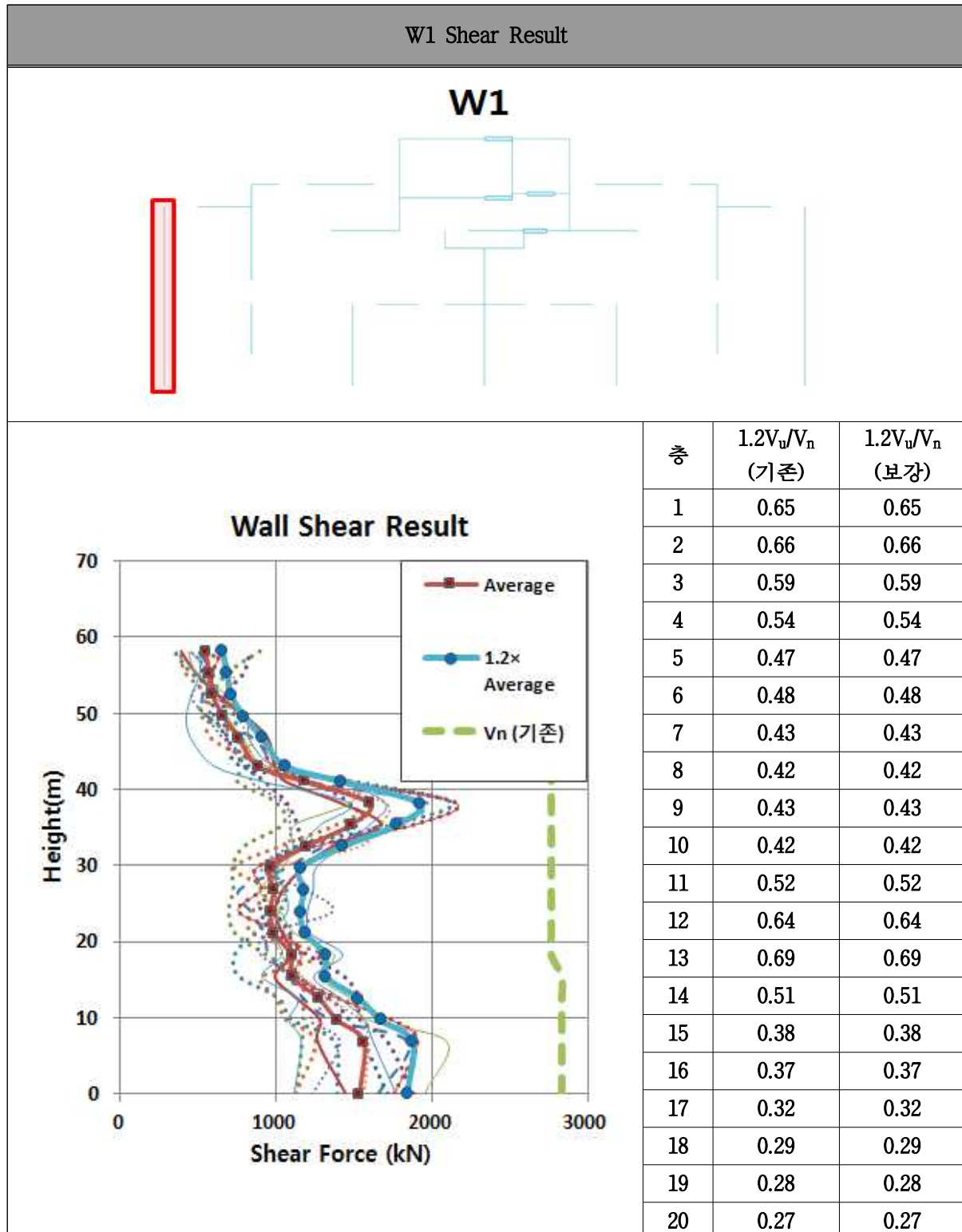
Rotation Result



인명안전(LS) 수준 만족

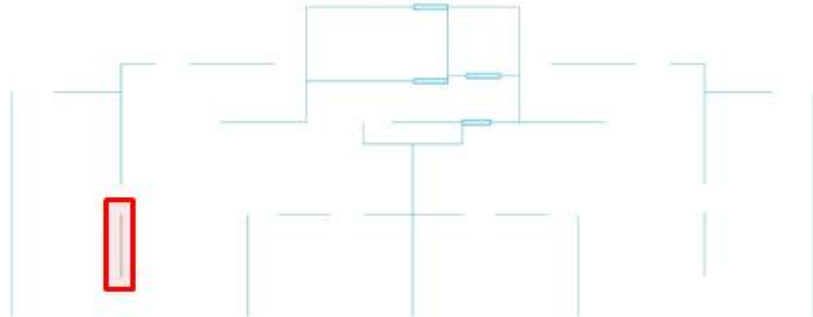
③ 벽체 전단력 검토

벽체의 전단력 검토는 대표 벽체를 대상으로 7층 지진과의 평균값(V_u)을 검토하였고, 벽체의 소요전단력(V_u)의 1.2배와 벽체의 전단강도(V_n)의 비(DCR)를 나타내었다. DCR이 1.0을 초과하는 곳은 보강이 필요한 부재로, 보강이 필요한 부재의 위치와 층을 요약하여 다음에 나타내었다.

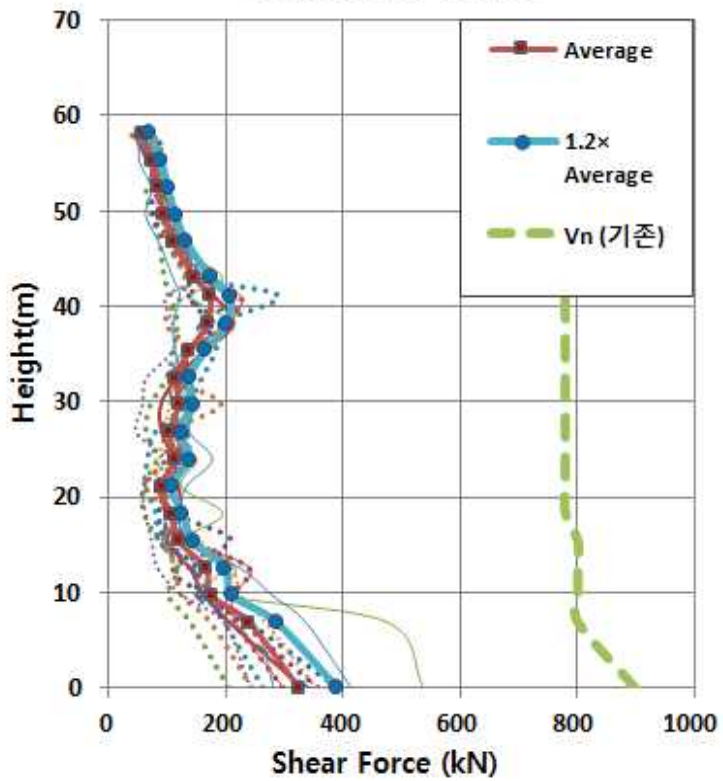


W3 Shear Result

W3



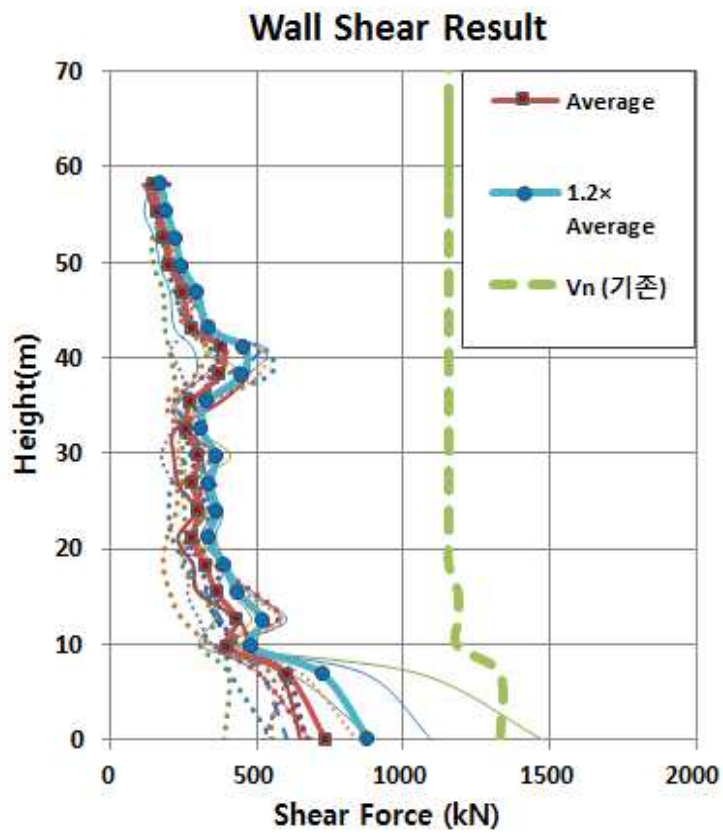
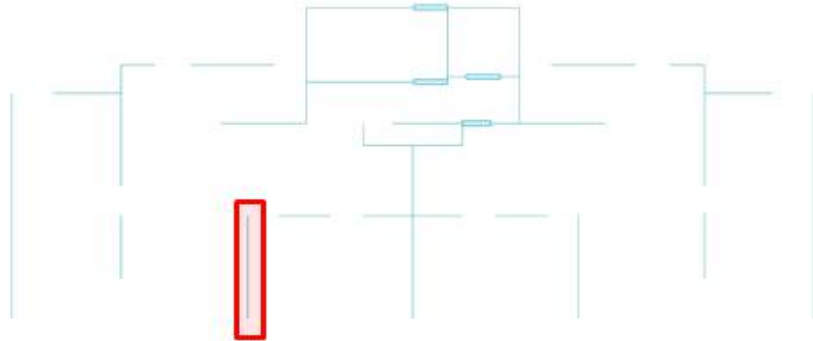
Wall Shear Result



층	$1.2V_u/V_n$ (기준)	$1.2V_u/V_n$ (보강)
1	0.43	0.43
2	0.36	0.36
3	0.26	0.26
4	0.25	0.25
5	0.18	0.18
6	0.16	0.16
7	0.14	0.14
8	0.18	0.18
9	0.16	0.16
10	0.18	0.18
11	0.18	0.18
12	0.21	0.21
13	0.26	0.26
14	0.27	0.27
15	0.22	0.22
16	0.17	0.17
17	0.15	0.15
18	0.13	0.13
19	0.11	0.11
20	0.09	0.09

W4 Shear Result

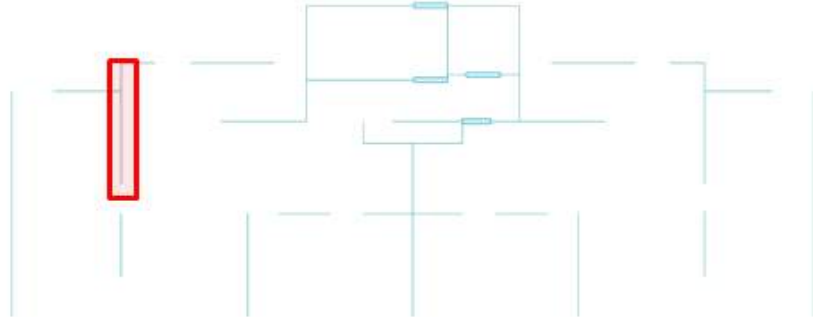
W4



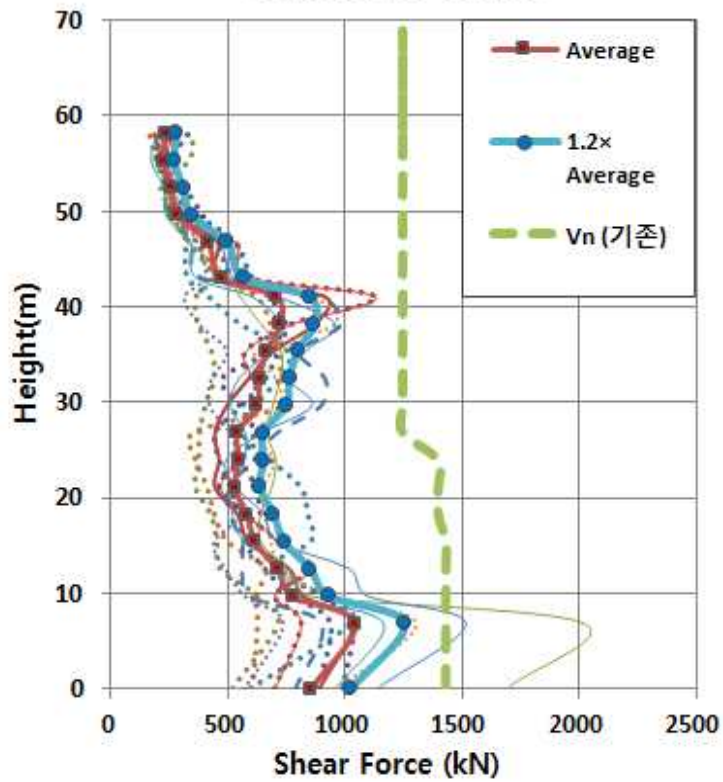
층	$1.2V_u/V_n$ (기존)	$1.2V_u/V_n$ (보강)
1	0.66	0.66
2	0.54	0.54
3	0.41	0.41
4	0.44	0.44
5	0.37	0.37
6	0.34	0.34
7	0.29	0.29
8	0.31	0.31
9	0.29	0.29
10	0.31	0.31
11	0.27	0.27
12	0.28	0.28
13	0.39	0.39
14	0.40	0.40
15	0.29	0.29
16	0.26	0.26
17	0.21	0.21
18	0.19	0.19
19	0.16	0.16
20	0.15	0.15

W5 Shear Result

W5



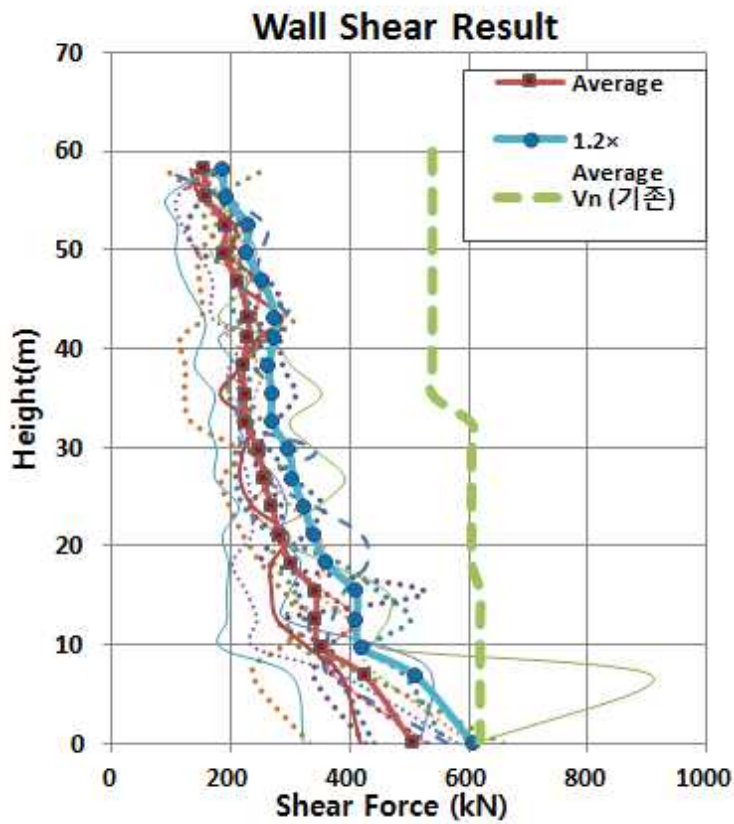
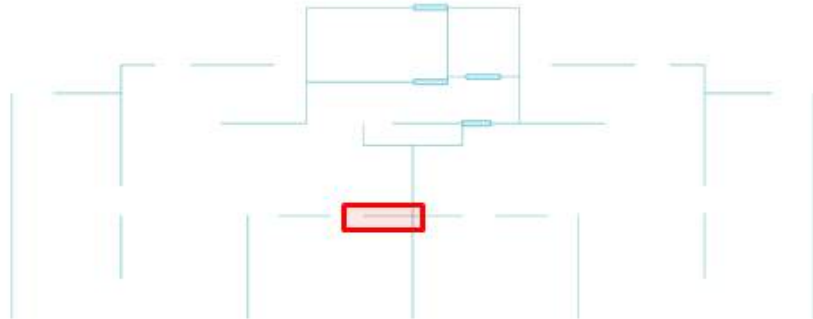
Wall Shear Result



층	$1.2V_u/V_n$ (기존)	$1.2V_u/V_n$ (보강)
1	0.72	0.72
2	0.88	0.88
3	0.65	0.65
4	0.59	0.59
5	0.52	0.52
6	0.50	0.50
7	0.46	0.46
8	0.47	0.47
9	0.52	0.52
10	0.60	0.60
11	0.61	0.61
12	0.64	0.64
13	0.70	0.70
14	0.68	0.68
15	0.45	0.45
16	0.40	0.40
17	0.28	0.28
18	0.25	0.25
19	0.22	0.22
20	0.23	0.23

W6 Shear Result

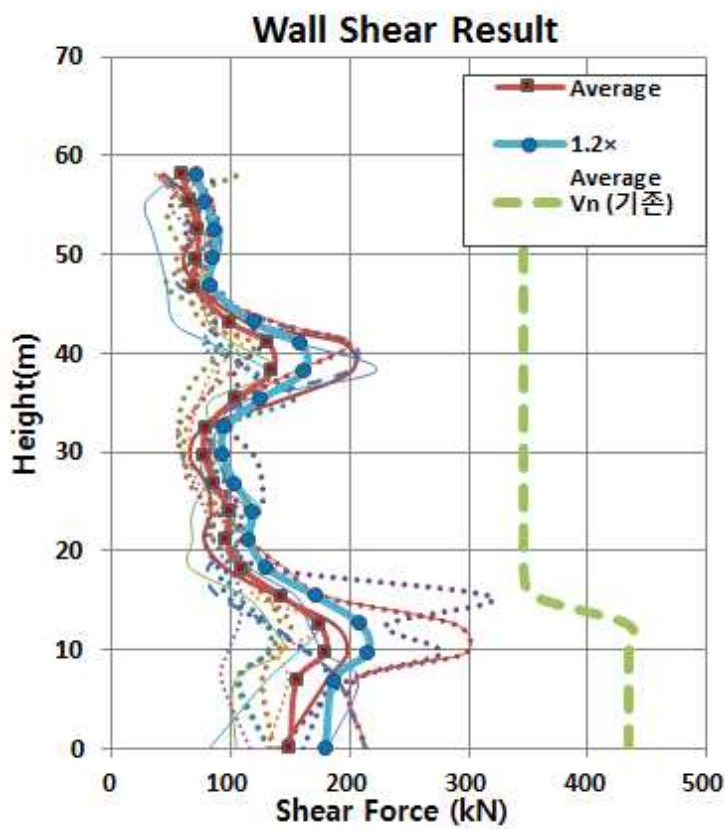
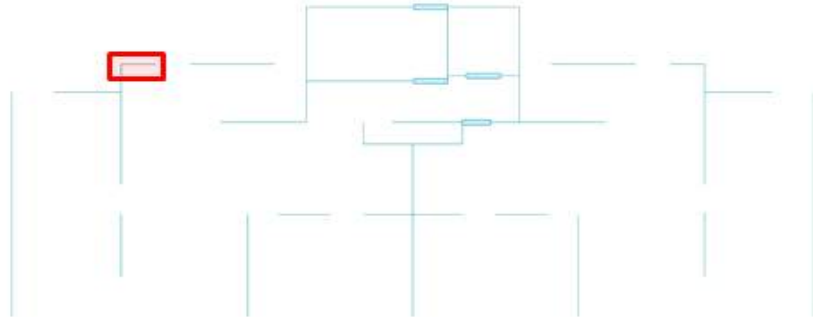
W6



층	$1.2V_u/V_n$ (기준)	$1.2V_u/V_n$ (보강)
1	0.98	0.98
2	0.83	0.83
3	0.68	0.68
4	0.67	0.67
5	0.66	0.66
6	0.60	0.60
7	0.56	0.56
8	0.53	0.53
9	0.51	0.51
10	0.49	0.49
11	0.45	0.45
12	0.50	0.50
13	0.49	0.49
14	0.51	0.51
15	0.51	0.51
16	0.47	0.47
17	0.42	0.42
18	0.43	0.43
19	0.36	0.36
20	0.35	0.35

W10 Shear Result

W10



층	$1.2V_u/V_n$ (기준)	$1.2V_u/V_n$ (보강)
1	0.41	0.41
2	0.43	0.43
3	0.50	0.50
4	0.48	0.48
5	0.48	0.48
6	0.38	0.38
7	0.33	0.33
8	0.34	0.34
9	0.30	0.30
10	0.27	0.27
11	0.28	0.28
12	0.36	0.36
13	0.47	0.47
14	0.46	0.46
15	0.35	0.35
16	0.24	0.24
17	0.25	0.25
18	0.25	0.25
19	0.23	0.23
20	0.21	0.21

(6) 교통하중(고속열차)에 의한 수직 진동 평가

(가) 고속열차 철로 근접 구조물의 가속도 계측

고속열차가 통과할 때 철로 인근 구조물에 전달되는 수직방향 진동 데이터를 수집하기 위하여 계측을 수행하였다. 계측 위치는 고속열차가 최고속력을 내는 충청남도 아산시 둔포면 소재 고속열차 인근 구조물로서 3,200Hz로 1시간(3,600초)동안 수직방향 가속도를 계측하였고 계측된 원본 데이터는 [그림 2-60] (a)와 같다.

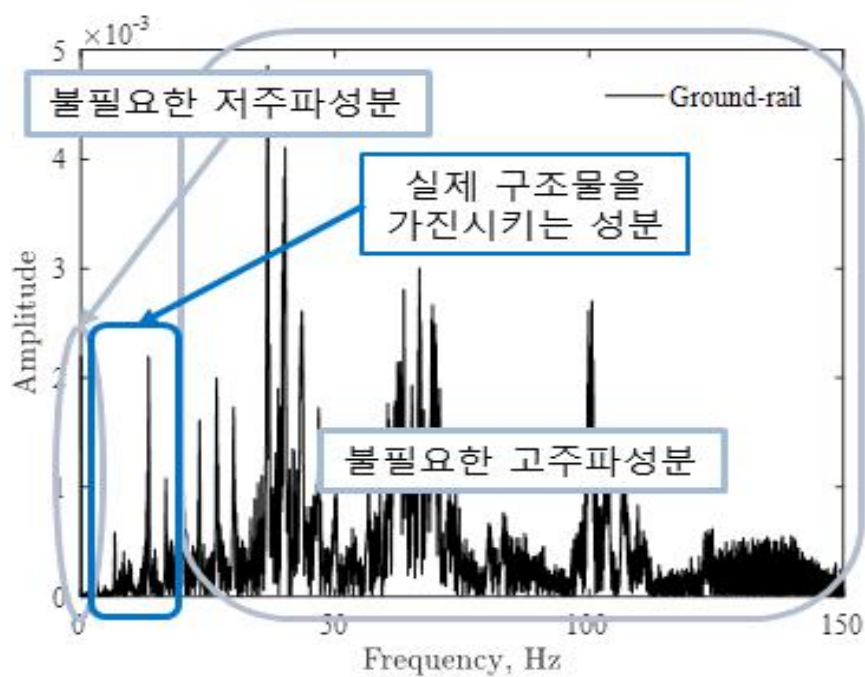


[그림 2-58] 계측지점(충남 아산시 둔포면 소재)



[그림 2-59] 가속도계의 설치 및 계측

(a) 시간이력



(b) 주파수 분석

[그림 2-60] 원본 계측 데이터

(나) 저역통과필터를 이용한 데이터 처리

계측되어진 가속도 데이터는 전기신호, 인근의 기계진동, 바람 등과 같은 여러 요소들로 인하여 고주파수 성분뿐만 아니라 저주파수 성분까지 다양한 진동수 성분을 갖게 된다. 하지만, 구조물이 실제로 영향을 받는 주파수 범위는 약 0~10Hz 내외로 이러한 고주파수 성분들은 구

조물의 진동에 큰 영향을 미치지 못하므로 적절한 필터를 이용하여 제거할 필요가 있다. 반면에 계측 시, 구조물의 정적변형 혹은 바람, 가속도계의 수평이 맞지 않는 등의 다양한 이유로, 계측 데이터에 평균성분으로 일컬어지는 극저주파 성분이 포함될 수 있다. 하지만 수평방향 변형과 달리, 수직방향에 대해서 구조물은 언제나 중력하중을 받고 있고 중력가속도를 거슬러 수직방향에 대해 정적변형이 발생하였다고 보기 힘들므로, 계측 데이터의 극저주파 성분은 평균을 빼줌으로써 제거할 수 있다. 계측 데이터는 Butterworth 저역통과필터(Low Pass Filter, LPF)를 이용하여 고주파수 성분을 제거할 수 있다. Butterworth 저역통과필터는 가장 기본적인 필터로 주파수 응답은 아래 식과 같다.

$$|H_L(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^{2N}}}$$

이때, N 은 필터의 차수를 의미하고 ω 는 주파수영역을, ω_c 는 컷오프 주파수(Cutoff Frequency)를 의미한다. Butterworth 필터 모델은 아래와 같다.

$$H_L(s) = \frac{1}{1 + a_1s + a_2s^2 + \dots + a_Ns^N}$$

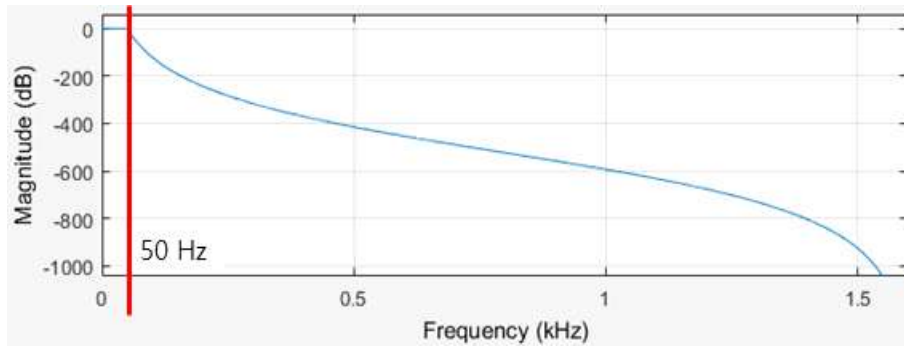
이때 필터의 계수 a 는 이미 표로 정리된 값을 가져와 필터를 설계할 수 있다. 필터의 차수 N 은 특정 주파수(ω_a)와 주파수의 크기($M_{a, \text{dB}}$)가 주어질 경우 아래와 같이 결정된다.

$$N = \frac{\log\left(10^{\frac{-M_a}{10}} - 1\right)}{2\log(\omega_a)}$$

특정 컷오프 주파수(ω_c)에 대한 저역통과필터의 설계는 아래 식과 같이 기본적인 Butterworth 필터 모델의 변수를 컷오프 주파수로 나눈 값을 대입하여 계산될 수 있다.

$$H_L(s) = H_{L_B}(s) \Big|_{s=s/\omega_c}$$

이러한 방법을 이용하여 설계된 Butterworth 저역통과필터는 아래 [그림 2-61]과 같으며, 이때 컷오프 주파수는 50Hz, 차수는 20차이다.



[그림 2-61] 저역통과필터(LPF)의 설계

(a) 시간이력

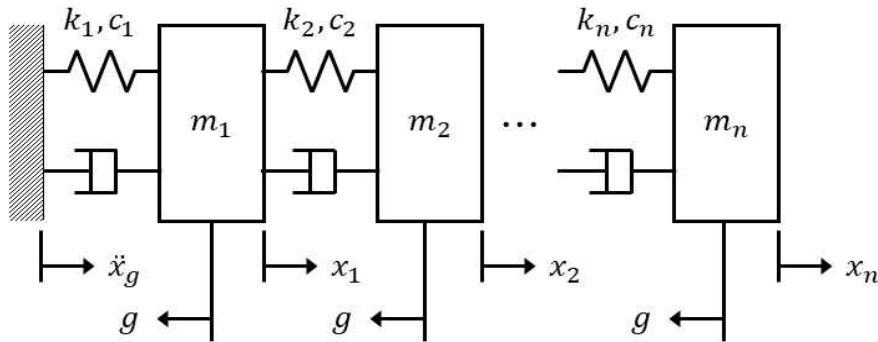
(b) 주파수 분석

[그림 2-62] 밴드패스필터를 이용해 필터링한 계측 데이터

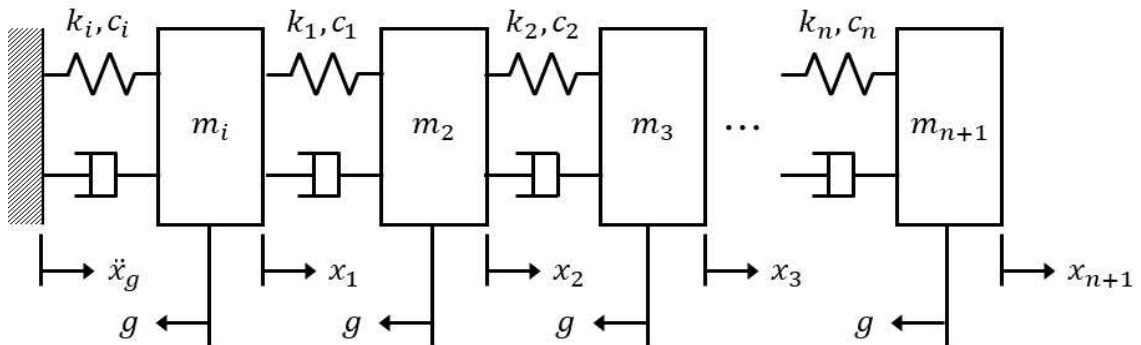
LPF를 이용하여 50Hz 이상의 고주파수 성분이 제거된 데이터는 [그림 2-62]와 같다. 계측된 데이터에서는 고속열차가 통과할때마다 약 20~40 cm/s²의 수직방향 가속도가 발생하는 것을 알 수 있으며 일반적인 사무용 시설과 주거용 시설의 진동기준이 약 2 cm/s² 수준임을 감안할 경우, 인근 구조물의 사용성 문제가 제기될 수 있다. 더욱이, 시간당 약 15대의 열차가 통행했고, 약 05시부터 익일 00시까지 고속열차와 일반열차가 지속적으로 운행함을 고려할 경우 하루 평균 약 250~300대의 열차가 통과함을 알 수 있고, 이는 고속열차 및 일반열차가 운영되는 한 철도에 근접한 사무용 및 주거용 건물들에 지속적인 수직 진동 문제가 발생할 수 있을 것으로 판단된다.

(다) 대상구조물에 대한 수직방향 면진적용 시뮬레이션

대상구조물의 구조모델과 기초면진을 적용한 구조모델은 아래 [그림 2-63]과 같다.



(a) 면진 시스템 미적용



(b) 기초부에 면진 시스템 적용

[그림 2-63] 면진 시스템이 적용된 구조모델

3축 면진장치가 적용되지 않은 구조물은 질량행렬과 감쇠행렬, 강성행렬, 그리고 시뮬레이션을 위한 상태방정식의 시스템행렬(A)와 입력 행렬(B)이 아래식과 같이 구성된다.

$$\begin{aligned}
M_e &= \begin{bmatrix} m_1 & & & \\ & m_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & m_n \end{bmatrix}, C_e = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & & \\ -c_2 & c_2 + c_3 & & \\ & & \ddots & -c_{n-1} \\ & & -c_{n-1} & c_{n-1} + c_n \end{bmatrix}, \\
K_e &= \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & & \\ -k_2 & k_2 + k_3 & & \\ & & \ddots & -k_{n-1} \\ & & -k_{n-1} & k_{n-1} + k_n \end{bmatrix} \\
A_e &= \begin{bmatrix} \{0\}_{n \times n} & I_n \\ -M_e^{-1}K_e & -M_e^{-1}C_e \end{bmatrix}, B_e = \begin{bmatrix} \{0\}_{n \times 1} \\ -\{1\}_{n \times 1} \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

3축 면진장치가 적용되어 하나의 자유도가 증가된 구조물은 질량행렬과 감쇠행렬, 강성행렬, 그리고 시뮬레이션을 위한 상태방정식의 시스템행렬(A)와 입력 행렬(B)이 아래식과 같이 구성된다.

$$\begin{aligned}
M_I &= \begin{bmatrix} m_1 & & & \\ & m_1 & & \\ & & \ddots & \\ & & & m_n \end{bmatrix}, C_I = \begin{bmatrix} c_1 + c_1 & -c_1 & & \\ -c_1 & c_1 + c_2 & & \\ & & \ddots & -c_{n-1} \\ & & -c_{n-1} & c_{n-1} + c_n \end{bmatrix}, \\
K_I &= \begin{bmatrix} k_1 + k_1 & -k_1 & & \\ -k_1 & k_1 + k_2 & & \\ & & \ddots & -k_{n-1} \\ & & -k_{n-1} & k_{n-1} + k_n \end{bmatrix} \\
A_I &= \begin{bmatrix} \{0\}_{(n+1) \times (n+1)} & I_{(n+1)} \\ -M_I^{-1}K_I & -M_I^{-1}C_I \end{bmatrix}, B_I = \begin{bmatrix} \{0\}_{(n+1) \times 1} \\ -\{1\}_{(n+1) \times 1} \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

이때 면진층의 강성(k_I)은 아래 식과 같이 3축 면진장치가 미적용된 구조물의 1차 모드주기($T_{e,1}$)의 α 배로 결정된 3축 면진장치의 주기(T_I)로 결정된다.

$$T_I = \alpha T_{e,1} = 2\pi \sqrt{\frac{m_I}{k_I}}, \quad k_I = \frac{2\pi m_I}{\alpha T_{e,1}}$$

그림에서 보는 바와 같이 구조물의 모델은 수평진동 해석을 위한 모델과 다를 바가 없으나, 질량을 가진 물체가 수직방향으로 항상 받게 되는 지구중력가속도에 의해 모든 층이 지면방향으로 일정한 하중을 받게 되며, 수직진동은 지면에서만 전달된다. [그림 2-62]에서 마지막 4개의 열차 통과 가속도데이터를 [그림 2-63]과 같이 추출하였으며, 이를 [그림 2-64]과 같이 가속도 데이터를 작성하였다.

(a) 입력 가속도 시간이력

(b) 입력 가속도 주파수 분석 [그림 2-64] 입력 가속도

실제구조물에서 중력하중은 중력저항부재의 축력과 평형을 이루며 변위나 속도를 발생시키지 않고 정적인 상태다. 이를 모사하기 위하여 구조 모델의 각층에 중력가속도를 처음부터 갑자기 적용할 경우, 시스템에 충격으로 작용하게 되고 응답이 증폭되어 실제 구조물이 받는 중력가속도를 모사할 수 없다. 이를 방지하기 위하여 미분가능한 쌍곡선 탄젠트 함수(Hyperbolic Tangent Function)을 이용하여 정적 하중을 모사하도록 하였다. 이 함수의 경우 충분히 긴 시간을 주어 구조물의 동적효과를 최소화하였으며 지반가속도의 경우 [그림 2-65] (a)의 가속도 데이터를 더하여, 철로 인근 구조물이 정적상태에서 수직 진동이 전달되도록 모사하였다.

(a) 1층 입력 가속도

(b) 전층 입력 가속도

[그림 2-65] 수직 진동을 모사하기 위한 입력 가속도

수직진동 시뮬레이션에 이용될 대상구조물은 20층의 공동주택으로 아래와 같은 특성을 갖는다. 수평방향의 진동을 해석할 경우 일반적으로 구조물의 층수(N)에 따른 1차 주기약산식은 0.1N로 결정될 수 있으나 대상구조물의 경우 벽체가 많고 일반적으로 축강성은 횡강성에 비해 크기 때문에 수직방향의 고유주기는 횡방향 주기약산식보다 작게 나옴을 알 수 있다.

〈표 2-41〉 대상구조물의 특징

층수(n)	20층
축강성($k_1, \dots, k_n$)	174,812 kN/m
층질량($m_1, \dots, m_n$)	21.5 ton
축방향 감쇠비(ξ_s)	1%
수직방향 고유주기($T_{e,1}$)	0.9 초

(라) 수직방향 진동 시뮬레이션 결과

3축 면진장치가 미적용된 일반 구조물이 철로 인근에서 고속열차의 통과에 의해 수직진동을 받을 경우를 모사한 시뮬레이션 결과는 아래와 같다. [그림 2-66]는 대상구조물의 20층에서 발생하는 변위 및 속도, 가속도 응답을 나타낸다. 특히, 구조물이 정적상태에 도달하였을 때부터 약 12분간의 응답을 나타냈다. 수직방향의 진동의 경우 구조물은 수직방향으로 중력가속도를 받고 있으며, 이 중력가속도를 상쇄하도록 하는 가속도는 일반적으로 존재하지 않으므로 수직 진동에 대해 사용성 정도를 판별할 수 있을 것으로 판단되며, 본 과제의 목적에 따라 수직방향 3축 면진장치가 수직 가속도를 감소시킬 수 있는지를 판단하고자 한다.

[그림 2-66] 3축 먼진장치 미적용 구조물의 응답

[그림 2-67]은 3축 먼진장치가 미적용된 구조물의 층간 상대 변위와 층별 절대속도, 절대가속도를 나타낸 그림이다. 3축 먼진장치가 미적용될 경우 고속열차에 의해 구조물은 최대 35cm/s^2 , 변위는 최대 0.324mm 가 발생한다.

[그림 2-67] 3축 먼진장치 미적용 구조물의 층간 상대 변위와 속도, 가속도 응답

(a) 변위 응답 비교

(b) 가속도 응답 비교

[그림 2-68] 3축 면진장치의 적용과 면진 주기 변수에 따른 응답 비교

[그림 2-69]는 면진장치가 적용되지 않았을 때와 다양한 면진 주기 변수(α)에 대해 설계된 면진장치가 적용되었을 때 변위와 가속도 응답이다. α 값이 커짐에 따라 응답이 점점 작아지는 모습을 보인다. 특히, 0.2이상의 값에서는 응답의 감소정도가 매우 미미 하며 본 대상구조물의 경우 0.2를 적용하여 설계하는 것이 가장 적절할 것으로 판단된다. 이는 수평방향 진동 수준을

크게 저감하기 위해 적용하는 일반적인 면진시스템에서는 면진주기변수(α)를 1이상의 큰 값으로 갖는 것과 대조되는 것으로, 추후에 더욱 더 많은 변수 분석과 다양한 시뮬레이션과 같은 연구가 필요하다.

[그림 2-69] 3축 면진장치 적용에 따른 층별 응답의 비교

(6) 소결

(가) 3축 면진장치 효과

고속열차가 통과할 때 철로 인근 구조물에 전달되는 수직방향 진동 데이터를 수집하여 해석을 통해 3축 면진장치의 수직 방향 효과를 검토한 결과, α 값이 커짐에 따라 응답이 점점 작아지는 모습을 보인다. 특히, 0.2이상의 값에서는 응답의 감소정도가 매우 미미 하며 본 대상구조물의 경우 0.2를 적용하여 설계하는 것이 가장 적절할 것으로 판단된다. 또한, 선정된 7 개의 지진파를 이용하여 비선형 동적해석을 수행한 결과, 목표로 한 면진층 상부 구조물의 가속도는 X방향 및 Y방향 모두 약 80%이상 저감되는 것으로 나타났다. 또한, 설계 지진력의 경우에도 목표로 한 30%이상이 저감되는 것으로 나타났다.

(나) 벽체의 수직변형률, 회전변형률 및 전단력 검토

모든 벽체에 발생하는 수직변형률이 인장, 압축에 대한 변형률 허용기준을 만족하였다. 또한, 모든 벽체에 발생하는 회전변형률이 인명안전(LS) 수준을 만족하였다. 벽체의 전단력 검토 결과 DCR이 1.0을 초과하는 벽체는 없는 것으로 나타났다.

라. 연구개발 성과

(1) 논문 성과

(가) SCIE 논문게재

- 게재연도 : 2018년
- 논문 제목 : Performance Evaluation of Seismic Isolation System by Installation Location in Lighthouse Structures
- 저자명 : 허무원, 박태원
- 학술지명 : Shock and Vibration
- Vol.(No.) : Volume 2018
- 출판일 : 2018. 9. 24

(나) KCI 논문게재 예정

- 게재연도 : 2019년
- 논문 제목 : 면진시스템을 적용한 수직중축 리모델링 공동주택의 최적 면진주기 산정
- 저자명 : 허무원, 이용훈, 이상현
- 학술지명 : (사)한국구조물유지관리공학회
- Vol.(No.) : 출판대기중
- 출판일 : 출판대기중

(2) 저작권 등록

본 소프트웨어 프로그램은 공용 탄성 해석프로그램 인 MIDAS Gen의 data를 활용하여 비선형 성능기반설계 및 내진성능 평가를 위한 동적해석 프로그램인 Perform-3d의 모델링을 위한 모델링 데이터를 생성 시키는 프로그램이다.

본 프로그램을 이용하여 ① Node data, ② Beam data, ③ Column data, ④ Shear Wall data, ⑤ Axial Gage 및 Rotation Gage, ⑥ Mass Node data, ⑦ Mass data, ⑧ Load data를 생성할 수 있으며, 생성된 데이터를 활용할 경우 비선형 해석 프로그램 모델링 시 시간 절약과 정확성을 높일 수 있다.

본 소프트웨어의 사용방법은 다음과 같다.

- ① Midas Gen 프로그램의 단위 조정
- ② Midas Gen의 메뉴의 Query를 활용하여 data를 MIDAS Input에 복사
(Node data, Element data, Mass data 및 Load data)
- ③ P-3D Output의 각 data별로 자동으로 값 추출
- ④ 추출 데이터를 TEXT파일로 저장함.
- ⑤ Perform-3d Import 시켜 Modeling을 수정

Perform-3D 복사 Data

(1) 복사대상 : 각 요소별 11월 ~ 2009년 (Data가 입력되어 있는 열까지만 복사해도 문제없음)

(2) 각 대상열을 복사하여 메모장에 붙여넣은 후, 저장

(3) Perform-3D [IMPORT/EXPORT]에 각 요소에 맞는 메뉴에서 Import 시킴.

(4) "Minimum spacing between nodes" 항목에 걸려 node가 Import 되지 못할 경우, 관련 Element도 Import되지 못함.
(Import시 Import되지 못한 Node, Element 수량을 확인한 후, 직접 입력해야 함!!!)

(5) Axial Gage 입력시, 중복입력 메시지가 뜨나, 이는 무시해도 됨.

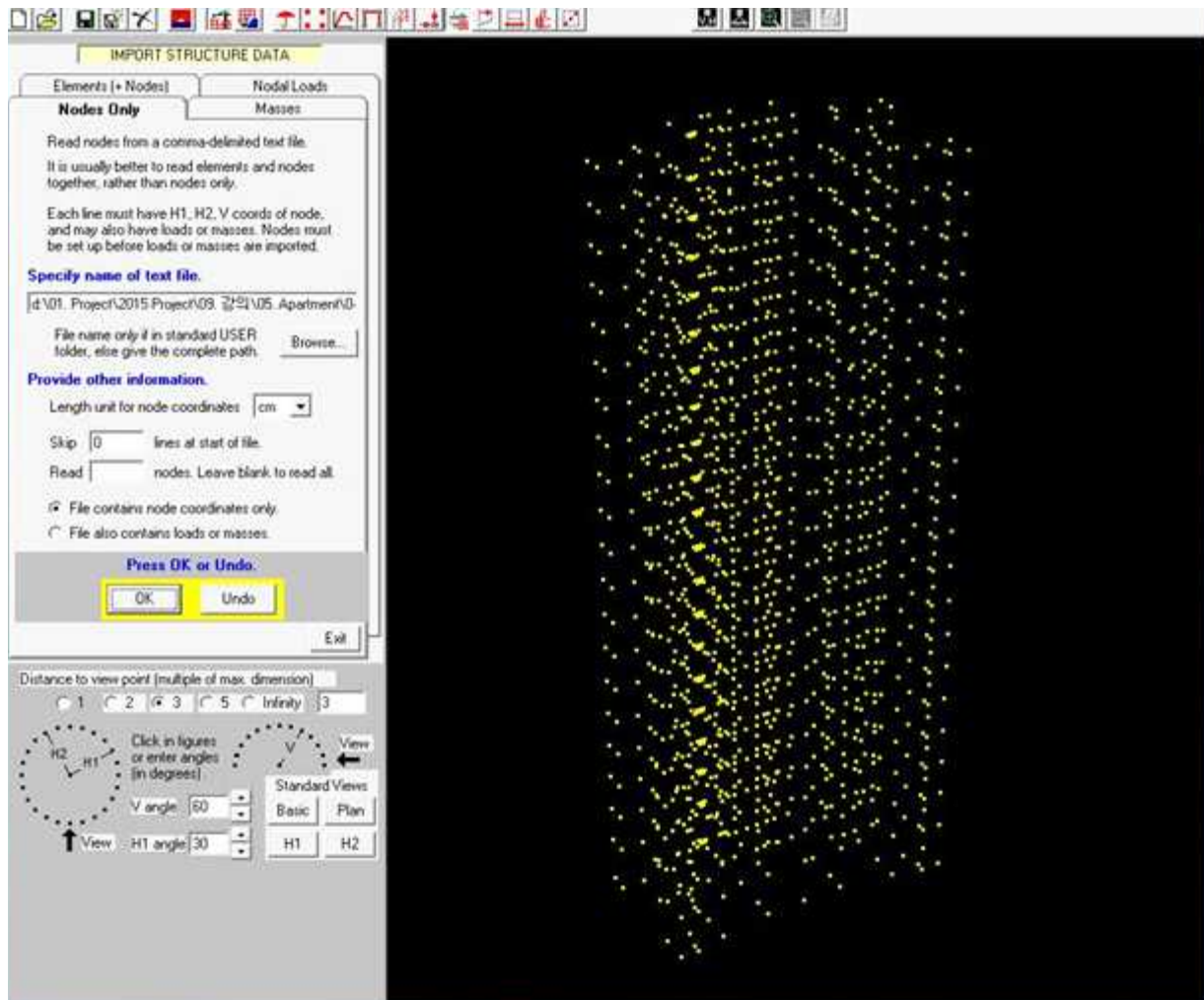
2065	494	7	1559	1559	1559	1559	1559	1559	29	4793	4793
Node	Beam	Column	Wall	Imbedded Beam	Axial Gage 1	Axial Gage 2	Rotation Gage	Mass Node	Mass	Dead Load	Live Load
0-758.0	-1098.5-758.660-1	-1098.5-498.0-10	0-758.0.0-393.5	0-758.660.0-393.5.660	0-758.0.0-393.5	0-393.5.0.0-393.5	0-758.0.0-393.5	3.281-142.1563.8	3.281-142.1563.8	0-758.0.0.0-3.58	0-758.0.0.0-1.95
-1098.5-498.0	-928.5-758.660-1	-334-498.0-334-4	0-393.5.0.0.0.0-0	0-393.5.660.0.0.660	0-393.5.0.0-393.5	0.0.0.0.0.0.0.0-0	-0.2671-119.7882	-0.2671-119.7882	-1098.5-498.0.0.0	-1098.5-498.0.0.0	
-334-498.0	-766.5-758.660-1	334-498.0.334-45	-158.0.0-76.5.0.0	-158.0.660-76.5.0.660	-158.0.0-158.0.66	-76.5.0.0-76.5.0.6	-158.0.0-76.5.0.0	-0.1775-120.5192	-0.1775-120.5192	-334-498.0.0.0-1	-334-498.0.0.0-7
334-498.0	-725.5-758.660-4	1098.5-498.0.109	-76.5.0.0.0.0-76	-76.5.0.660.0.0.660	-76.5.0.0-76.5.0.6	0.0.0.0.0.0.0.0-0	-0.1775-120.5192	-0.1775-120.5192	-334-498.0.0.0-18	334-498.0.0.0-18	
-1098.5-498.0	-486.5-758.660-1	-1098.5-121.5.0-1	0.0.0.76.5.0.0.0	0.0.660.76.5.0.0.660	0.0.0.0.660	76.5.0.0.76.5.0.660	0.0.0.76.5.0.0.0	-0.1775-120.5192	-0.1775-120.5192	1098.5-498.0.0.0-1	1098.5-498.0.0.0-1
0-393.5.0	-384.5-758.660-4	-1098.5.291.5.0-11	76.5.0.0.158.0.0-76	76.5.0.660.158.0.660	76.5.0.0.76.5.0.660	158.0.0.158.0.0.660	-0.1775-120.5192	-0.1775-120.5192	0-393.5.0.0.0-483	0-393.5.0.0.0-483	
-1098.5-121.5.0	-334-758.660-28	1098.5.291.5.0.109	-158.0.0-158.68.0-1	-158.0.660-158.68.660	-158.0.0-158.0.66	-158.68.0-158.68.660	-158.0.0-158.68.0	-0.1775-120.5192	-0.1775-120.5192	-1098.5-121.5.0.0	-1098.5-121.5.0.0
-158.0.0	-284.5-758.660-4		158.0.0.158.68.0.1	158.0.660.158.68.660	158.0.0.158.0.660	158.68.0.158.68.660	158.0.0.158.68.0.1	-0.1775-120.5192	-0.1775-120.5192	-158.0.0.0.0-17.51	-158.0.0.0.0-7.84
-76.5.0.0	-42.5-758.660-0-1		-334.68.0-334.351	-334.68.660-334.351.5.660	-334.68.0-334.68	-334.351.5.0-334	-334.68.0-334.351	-0.1775-120.5192	-0.1775-120.5192	-76.5.0.0.0.0-16.3	-76.5.0.0.0.0-7.94
0.0.0	0-758.660.42.5-7		334.68.0.334.351.5	334.68.660.334.351.5.660	334.68.0.334.68.66	334.351.5.0.334.351	334.68.0.334.351.5	-0.1775-120.5192	-0.1775-120.5192	0.0.0.0.0-18.37.0	0.0.0.0.0-10.48.0
76.5.0.0	42.5-758.660.284		-411.351.5.0-334	-411.351.5.660-334.351.5.660	-411.351.5.0-411	-334.351.5.0-334	-411.351.5.0-334	-0.1775-120.5192	-0.1775-120.5192	76.5.0.0.0.0-10.94	76.5.0.0.0.0-7.6.0
158.0.0	284.5-758.660.334		-334.351.5.0-41	-334.351.5.660-41.5.351.5.660	-334.351.5.0-334	-41.5.351.5.0-41	-334.351.5.0-41	-0.1775-120.5192	-0.1775-120.5192	158.0.0.0.0-7.77.0	158.0.0.0.0-4.7.0
-334.68.0	334-758.660.384		69.351.5.0.141.5.3	69.351.5.660.141.5.351.5.660	69.351.5.0.69.351	141.5.351.5.0.141	69.351.5.0.141.5.3	-0.1775-120.5192	-0.1775-120.5192	-334.68.0.0.0-7.94	-334.68.0.0.0-39.4
-158.68.0	384.5-758.660.68		261.5.351.5.0.334	261.5.351.5.660.334.351.5.660	261.5.351.5.0.334	334.351.5.0.334.351	261.5.351.5.0.334	-0.1775-120.5192	-0.1775-120.5192	-158.68.0.0.0-4.64	-158.68.0.0.0-3.64
158.68.0	686.5-758.660.72		-411.351.5.0-411	-411.351.5.660-411.636.5.660	-411.351.5.0-411	-411.636.5.0-411	-411.351.5.0-411	-0.1775-120.5192	-0.1775-120.5192	158.68.0.0.0-2.04	158.68.0.0.0-1.85
334.68.0	725.5-758.660.76		69.351.5.0.69.351	69.351.5.660.69.351.5.660	69.351.5.0.69.351	69.351.5.0.69.351	69.351.5.0.69.351	-0.1775-120.5192	-0.1775-120.5192	334.68.0.0.0-62.0	334.68.0.0.0-43.61
-1098.5.291.5.0	766.5-758.660.92		334.351.5.0.334.61	334.351.5.660.334.636.5.660	334.351.5.0.334.61	334.636.5.0.334.61	334.351.5.0.334.61	-0.1775-120.5192	-0.1775-120.5192	-1098.5.291.5.0.0	-1098.5.291.5.0.0
1098.5.291.5.0	928.5-758.660.10		-411.636.5.0-45.5	-411.636.5.660-45.5.636.5.660	-411.636.5.0-411	-45.5.636.5.0-45.5	-411.636.5.0-45.5	-0.1775-120.5192	-0.1775-120.5192	1098.5.291.5.0.0.0	1098.5.291.5.0.0.0
-411.351.5.0	-1098.5-758.660		69.636.5.0.334.636	69.636.5.660.334.636.5.660	69.636.5.0.69.636	334.636.5.0.334.61	69.636.5.0.334.636	-0.1775-120.5192	-0.1775-120.5192	-411.351.5.0.0.0-1	-411.351.5.0.0.0-5
-334.351.5.0	-334-758.660-33		-1098.5-758.660-1	-1098.5-758.960-328.5-758.9	-1098.5-758.660-1	-928.5-758.660-4	-1098.5-758.660-1	-0.1775-120.5192	-0.1775-120.5192	-334.351.5.0.0.0-1	-334.351.5.0.0.0-1
-41.5.351.5.0	334-758.660.334		-766.5-758.660-1	-766.5-758.960-725.5-758.96	-766.5-758.660-1	-725.5-758.660-1	-766.5-758.660-1	-0.1775-120.5192	-0.1775-120.5192	-41.5.351.5.0.0.0-2	-41.5.351.5.0.0.0-2
69.351.5.0	1098.5-758.660.1		-725.5-758.660-4	-725.5-758.960-486.5-758.96	-725.5-758.660-1	-486.5-758.660-4	-725.5-758.660-4	-0.1775-120.5192	-0.1775-120.5192	69.351.5.0.0.0-18	69.351.5.0.0.0-12
141.5.351.5.0	-334-498.660.33		-384.5-758.660-3	-384.5-758.960-334-758.960	-384.5-758.660-3	-334-758.660-3	-384.5-758.660-3	-0.1775-120.5192	-0.1775-120.5192	141.5.351.5.0.0.0-1	141.5.351.5.0.0.0-1
261.5.351.5.0	334-498.660.334		-334-758.660-28	-334-758.960-284.5-758.960	-334-758.660-3	-284.5-758.660-3	-334-758.660-28	-0.1775-120.5192	-0.1775-120.5192	261.5.351.5.0.0.0-6	261.5.351.5.0.0.0-6
334.351.5.0	725.5-758.660.72		-42.5-758.660.0-1	-42.5-758.960.0-758.960	-42.5-758.660-41	0-758.660.0-758	-42.5-758.660.0-1	-0.1762-120.5175	-0.1762-120.5175	334.351.5.0.0.0-8	334.351.5.0.0.0-4
-411.636.5.0	-1098.5-498.660.0		0-758.660.42.5-7	0-758.960.42.5-758.96	0-758.660.0-758	42.5-758.660.42.5	0-758.660.42.5-7	-0.1762-120.5175	-0.1762-120.5175	-411.636.5.0.0.0-1	-411.636.5.0.0.0-4
-45.5.636.5.0	334-408.660.334		284.5-758.660.334	284.5-758.960.334-758.960	284.5-758.660.33	334-758.660.334	284.5-758.660.33	-0.1762-120.5175	-0.1762-120.5175	-45.5.636.5.0.0.0-1	-45.5.636.5.0.0.0-1
69.636.5.0	-725.5-758.660-1		334-758.660.384	334-758.960.384.5-758.960	334-758.660.384	384.5-758.660.38	334-758.660.384	-0.1005-120.0741	-0.1005-120.0741	69.636.5.0.0.0-146	69.636.5.0.0.0-146
334.498.0	-334-408.660.33		686.5-758.660.33	686.5-758.960.725.5-758.960	686.5-758.660.68	725.5-758.660.72	686.5-758.660.72	-6.3649-190.4925	-6.3649-190.4925	334.498.0.0.0.65	334.498.0.0.0.65
-1098.5-758.660	1098.5-498.660.1		725.5-758.660.76	725.5-758.960.766.5-758.960	725.5-758.660.72	766.5-758.660.76	725.5-758.660.76	0-758.660.0.0-10	0-758.660.0.0-10	0-758.660.0.0-45	0-758.660.0.0-45
-928.5-758.660	334-458.3.660.33		928.5-758.660.10	928.5-758.960.1098.5-758.96	928.5-758.660.92	1098.5-758.660.1	928.5-758.660.10	-1098.5-498.660.0	-1098.5-498.660.0	-1098.5-498.660.0	-1098.5-498.660.0
-766.5-758.660	725.5-458.3.660.7		-1098.5-758.660-1	-1098.5-758.960-1098.5-498	-1098.5-758.660-1	-1098.5-498.660-1	-1098.5-758.660-1	-334-498.660.0.0	-334-498.660.0.0	-334-498.660.0.0	-334-498.660.0.0
-725.5-758.660	-1098.5-438.8.660		1098.5-758.660.1	1098.5-758.960.1098.5-498.94	1098.5-758.660.1	1098.5-498.660.1	1098.5-758.660.1	1098.5-498.660.0	1098.5-498.660.0	1098.5-498.660.0	1098.5-498.660.0
-886.5-758.660	-725.5-255.5.660.7		725.5-758.660.72	725.5-758.960.725.5-458.3.660	725.5-758.660.72	725.5-458.3.660.7	725.5-758.660.72	1098.5-498.660.0	1098.5-498.660.0	1098.5-498.660.0	1098.5-498.660.0
-384.5-758.660	725.5-255.5.660.7		0-758.660.0-393	0-758.960.0-393.5.960	0-758.660.0-758	0-393.5.660.0-39	0-758.660.0-393	0-393.5.660.0.0-7	0-393.5.660.0.0-7	0-393.5.660.0.0-1	0-393.5.660.0.0-1
-334-758.660	-334-304.660-33		-1098.5-498.660-1	-1098.5-498.960-1098.5-438	-1098.5-498.660-1	-1098.5-438.660-1	-1098.5-498.660-1	-1098.5-121.5.660	-1098.5-121.5.660	-1098.5-121.5.660	-1098.5-121.5.660
-304.5-758.660	334-304.660.334		334-408.660.334	334-408.960.334-458.3.960	334-408.660.334	334-458.3.660.33	334-408.660.334	-158.0.660.0.0-19	-158.0.660.0.0-19	-158.0.660.0.0-7.1	-158.0.660.0.0-7.1
-42.5-758.660	-158.0.660-76.5.0		-725.5-758.660-1	-725.5-758.960-725.5-255.5.5	-725.5-758.660-1	-725.5-255.5.660-1	-725.5-758.660-1	-76.5.0.660.0.0-15	-76.5.0.660.0.0-15	-76.5.0.660.0.0-7.1	-76.5.0.660.0.0-7.1
-0-758.660	-76.5.0.660.0.0.660		-334-408.660-33	-334-408.960-334-304.960	-334-408.660-33	-334-304.660-33	-334-408.660-33	0.0.660.0.0.0-19.57	0.0.660.0.0.0-19.57	0.0.660.0.0.0-33.6	0.0.660.0.0.0-33.6
-42.5-758.660	0.0.660.76.5.0.660		1098.5-498.660.1	1098.5-498.960.1098.5-158.5	1098.5-498.660.1	1098.5-158.5.660	1098.5-498.660.1	76.5.0.660.0.0-19	76.5.0.660.0.0-19	76.5.0.660.0.0-7.5	76.5.0.660.0.0-7.5
284.5-758.660	76.5.0.660.158.0.6		334-458.3.660.33	334-458.3.960.334-304.960	334-458.3.660.33	334-304.660.334	334-458.3.660.33	158.0.660.0.0.0-19	158.0.660.0.0.0-19	158.0.660.0.0.0-7.51	158.0.660.0.0.0-7.51
334-758.660	-158.0.660-158.61		725.5-458.3.660.7	725.5-458.3.960.725.5-255.5.5	725.5-458.3.660.7	725.5-255.5.660.7	725.5-458.3.660.7	-334.68.660.0.0-6	-334.68.660.0.0-6	-334.68.660.0.0-2	-334.68.660.0.0-2
384.5-758.660	158.0.660.158.68		-1098.5-498.8.660-1	-1098.5-498.960-1098.5-12	-1098.5-498.8.660-1	-1098.5-121.5.660	-1098.5-498.8.660-1	-158.68.660.0.0-19	-158.68.660.0.0-19	-158.68.660.0.0-4	-158.68.660.0.0-4
686.5-758.660	-725.5-35.5.660-1		0-393.5.660.0.0.960	0-393.5.960.0.0.960	0-393.5.660.0-39	0.0.660.0.0.960	0-393.5.660.0.0.96	158.68.660.0.0-41	158.68.660.0.0-41	158.68.660.0.0-41	158.68.660.0.0-41
725.5-758.660	725.5-35.5.660.77		-158.0.660-76.5.0	-158.0.960-76.5.0.960	-158.0.660-158.0	-76.5.0.660-76.5.0	-158.0.660-76.5.0	334.68.660.0.0-7	334.68.660.0.0-7	334.68.660.0.0-7.4	334.68.660.0.0-7.4

소프트웨어를 통해 생성된 데이터 예시

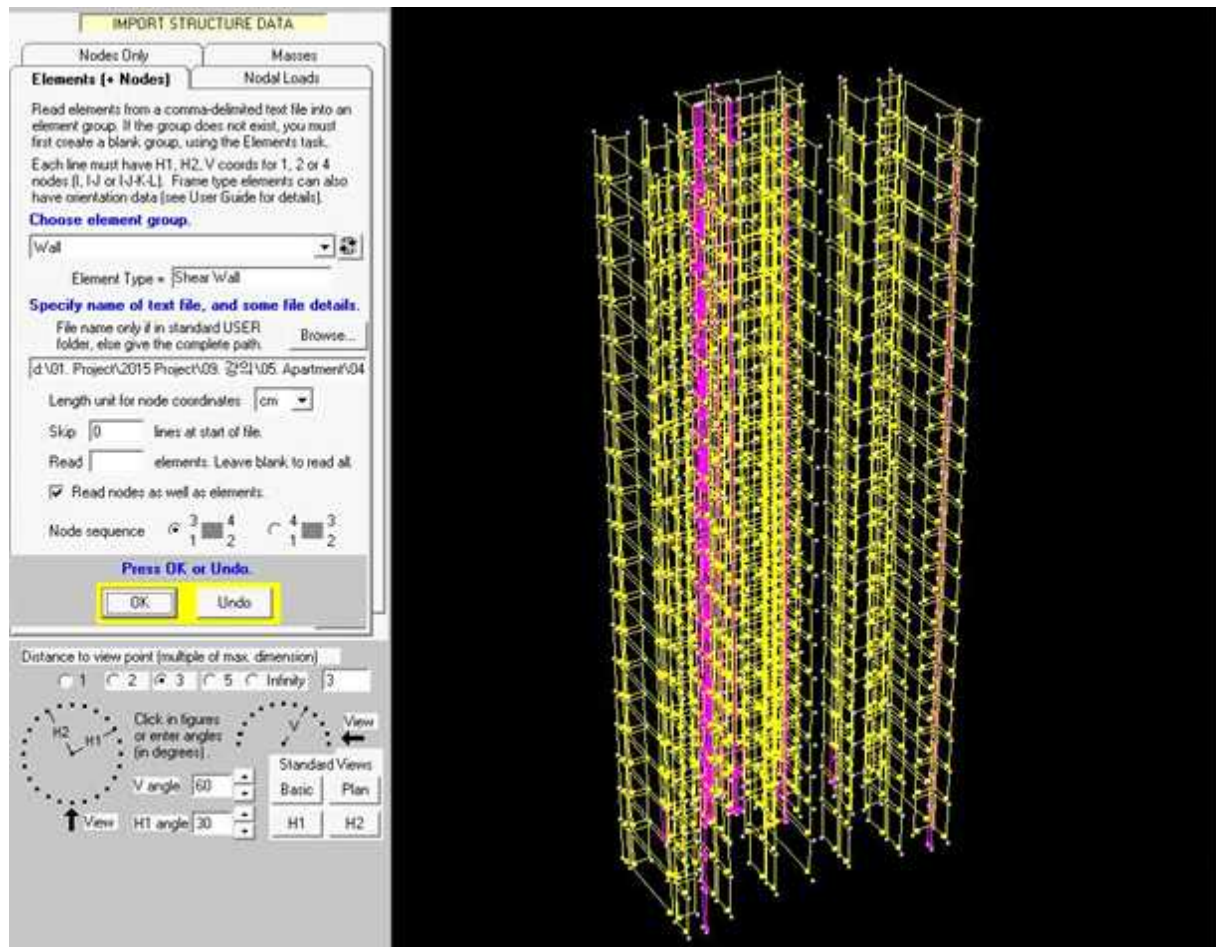
- 저작물의 제호(명칭) : 마이다스 부재 데이터를 퍼폼쓰리디 부재 데이터로 변환하는 프로그램
- 저작물의 종류 : 컴퓨터프로그램저작물>응용프로그램>과학기술>수치계산용S/W
- 저작자 성명 : 단국대학교 산학협력단
- 창작연월일 : 2017년 5월 19일
- 공표연월일 : 2017년 5월 20일
- 등록연월일 : 2017년 9월 5일
- 등록번호 : C-2017-021293

AX	2016-12-30 오후...	텍스트 문서	25KB
BEAM	2016-12-30 오후...	텍스트 문서	2KB
IM	2016-12-30 오후...	텍스트 문서	25KB
MASS NODE	2016-12-30 오후...	텍스트 문서	1KB
MASS	2016-12-30 오후...	텍스트 문서	2KB
NODE	2016-12-30 오후...	텍스트 문서	19KB
RO	2016-12-30 오후...	텍스트 문서	50KB
WALL	2016-12-30 오후...	텍스트 문서	50KB
DD	2019-02-07 오후...	텍스트 문서	37KB
LL	2019-02-07 오후...	텍스트 문서	37KB

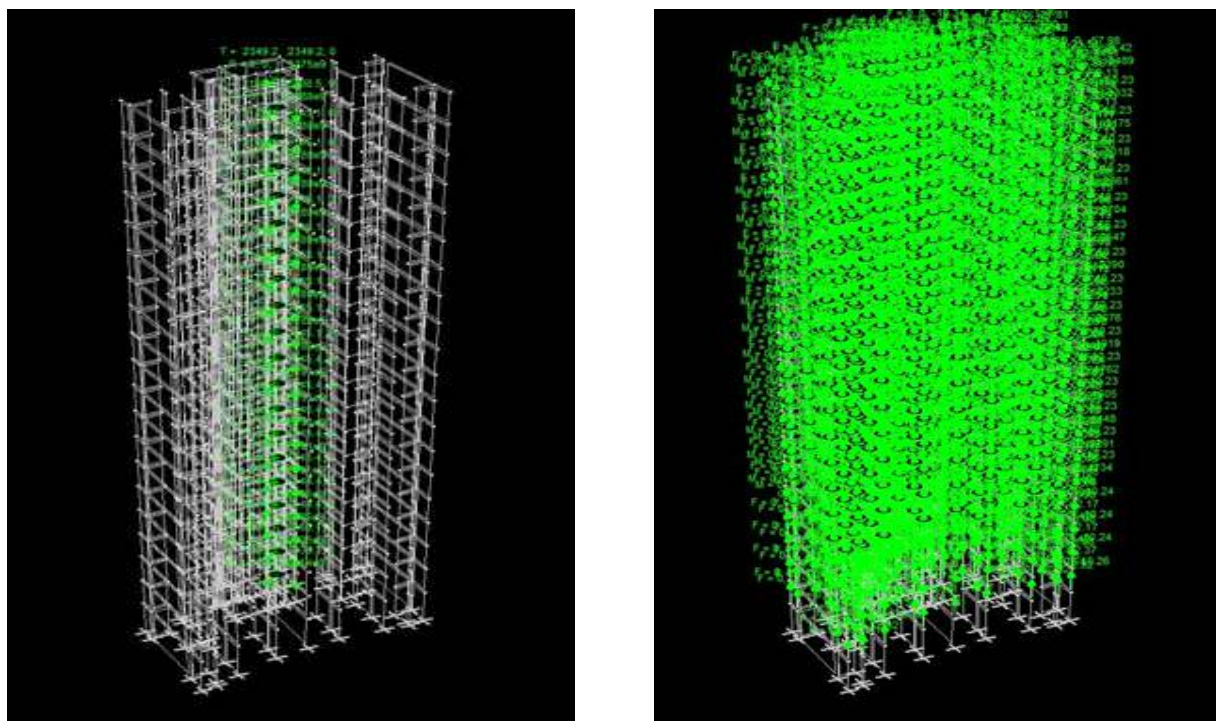
각각의 데이터로 변환된 파일



Node data Import 현황



각각의 Element Import 현황

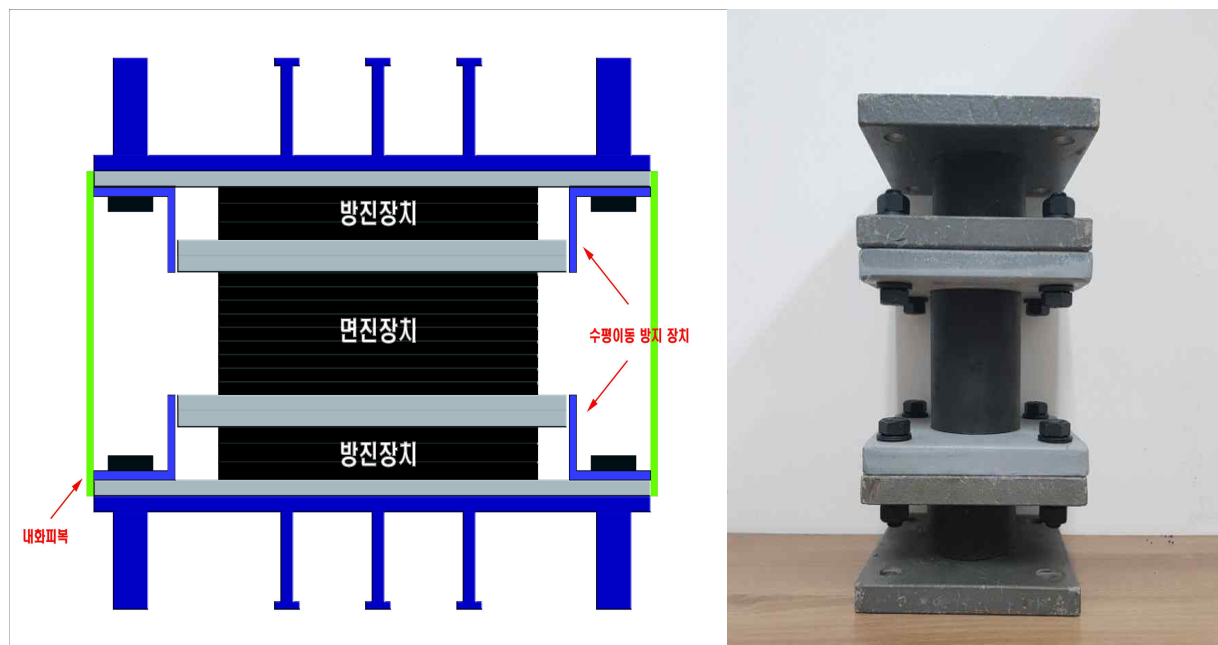


Mass data & Load data import 현황

(3) 특허 성과

(가) 특허 출원 - 수직방진 및 수평면진을 융합한 3차원 면진장치 개발

본 연구과제는 수직방진 및 수평면진을 융합한 3차원 면진장치 개발이며, 기존 면진장치 상·하부에 방진패드를 추가하는 방안과 방진 패드 부분이 수평으로 이동하는 것으로 방지하기 위한 시스템을 검토하였다. 또한, 수평이동 방지를 위해 스톱퍼에 내화기능을 추가하여 경제성과 시공성을 추가로 확보하였다.

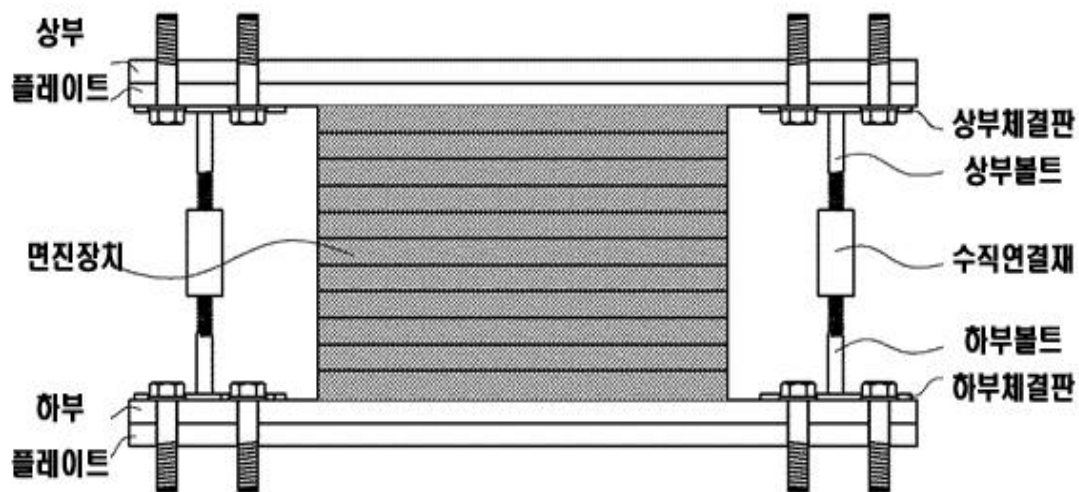


유지관리가 용이한 3차원 면진장치 형상 및 시작품

- 발명의 명칭 : 유지관리가 용이한 3차원 면진장치
- 출원일자 : 2017.05.17.
- 출원국 : 대한민국
- 출원번호 : 10-2017-0061112
- 출원인명칭 : 단국대학교 산학협력단
- 발명자명칭 : 박태원, 정란, 이상현, 허무원, 윤정환

(나) 특허 출원 및 등록 - 면진장치 인장 방지용 장치 개발

일반적으로 많이 사용되는 면진 장치는 재질에 따라 대표적으로 고무타입 면진 장치와 강재타입 면진 장치로 분류될 수 있으며, 고무타입 면진 장치는 납 삽입고무 면진 장치 및 천연고무 면진 장치를 포함한다. 고무타입 면진 장치는 성형틀에 얇은 고무판과 얇은 철판을 적층하여 면진 장치를 만들며 이때 고무와 철판 사이에 접착제를 바른다. 적층이 완료되면 성형틀에 열을 가하여 최종적으로 면진 장치를 제작한다. 고무타입 면진 장치는 강재타입 면진 장치에 비해 경제적이며 큰 수평 변위와 함께 많은 압축 하중을 받을 수 있는 장점이 있다. 그러나, 고무타입의 면진 장치이기 때문에 인장하중은 압축하중에 비해 부족하다는 단점이 있다. 이러한 단점으로 인해 면진장치 이송중이나 설치 시 또는 설치 후에 인장하중으로 인해 고무가 찢어지는 현상이 자주 발생하게 된다. 이러한 문제를 해결하고자 인장방지용 장치를 개발하였다.



인장방지용 고정장치 형상

- 발명의 명칭 : 면진 장치의 인장하중 방지용 고정 장치
- 출원일자 : 2018.02.28.
- 출원국 : 대한민국
- 출원번호 : 10-2018-0024536
- 출원인명칭 : 단국대학교 산학협력단
- 발명자명칭 : 박태원, 이상현, 허무원
- 등록번호 : 제 10-1912063호
- 등록일자 : 2018.10.19.

마. 연구결과

(1) 기술적 성과

- ① 철도부지, 인공지반 및 인근 부지를 활용한 신축 건물 시공시의 방진 및 면진시스템으로 활용 가능.
- ② 탄성해석 프로그램을 비선형 해석 프로그램은 변환하는 프로그램으로 모델링 속도와 정확도 향상에 도움을 줄 것으로 기대.
- ③ 면진시스템을 적용한 수직증축 리모델링 시 수직증축 층수에 따른 면진주기를 산정하여 설계 기초 자료로 활용 가능.
- ④ 방진 및 면진과 관련된 국내 기술선도 및 해외 우수업체와의 경쟁력 확보가 가능.

(2) 경제적·산업적 성과

- ① 면진장치 적용에 의한 지진하중의 감소로 인한 면진층 상부 골조물량 감소 효과.
- ② 건물의 사용성 증진과 내진안정성을 동시에 확보하여 삶의 질 향상시킴.
- ③ 건물의 지진피해 저감 기술 적용으로 장수명화에 기여함.
- ④ 수직증축 리모델링 시 수직증축 층수에 따른 면진주기 산정에 대한 신뢰도 증진.
- ⑤ 방진 및 면진과 관련된 국내 기술선도 및 해외 우수업체와의 경쟁력 확보.
- ⑥ 방진 및 면진시스템을 동시에 시공하여 공기 단축 및 경제성 확보.

(3) 사회적 측면 성과

- ① 건물의 지진피해 저감 기술 적용하여 인명 및 재산피해를 최소화함.
- ② 면진시스템의 신뢰도와 설계 프로세스 정립 등을 통한 지진재해에 대한 인명 및 재산피해를 최소화 함.

3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

가. 목표

본 연구의 양적성과 목표는 아래 표와 같다.

핵심성과 (CIE)		단위성과		성과점검기준					양적 성과 건수 목표치 (달성치)	
				질적 성과지표	목표 치	달성 치	측정 방법	검증 방법		
1	수직 방진 및 수평 면진 을 융합 한 3 차원 면진 장치 개발	1-1	선행연구 및 사례조사	①	선행조사 및 사례조사	-	-	-	특허 : 출원 1(1)	
		1-2	면진장치 조사 및 특징분석	①	면진장치 조사 및 특징분석	5	5	-		보고서
				②	고감쇠 고무 재료시험	5	5	-		보고서
		1-3	교통진동원의 진동전달 특성과악 및 소재검토	①	철도 진동 조사	5	5	-		보고서
				②	도로교통 진동조사	5	5	-		보고서
		1-4	3차원 면진장치 개발	①	3차원 면진장치 개발	30	30	특허 출원		특허 명세서
2	제품 개발	1-1	다기능 융복합 방진·면진장치 개발	①	다기능 융복합 방진·면진장치 개발	15	5	특허 등록, 시제품 개발	특허 명세서, 시제품	논문 : 일반 1(1) SCI(E) 1(1) 학술발표 : 0(0) 특허 : 등록 1(0) S/W : 1(1)
	소프 트웨 어	2-1	탄성해석 데이터를 비선형동적해석 데이터로 변환하는 프로그램	①	탄성해석 데이터를 비선형동적해석 데이터로 변환 가능한 프로그램 개발	15	15	소프트 웨어 등록	소프트 웨어 등록증	
	설계 개념 정립	3-1	방진·면진장치를 적용한 건축물의 실무적용을 위한 설계 프로세스 정립	①	면진설계의 표준 프로세스 정립 및 그에 따른 실시 설계 절차 개발	5	5	매뉴얼 작성	매뉴얼	
	기본 성능 검증	4-1	다기능 융복합 방진·면진장치 검증	①	다기능 융복합 방진·면진장치의 성능검증	15	15	학술 논문 게재	게재논문	
	계					100	90			

나. 목표 달성여부

본 연구의 목표에 대한 달성도를 간략히 서술하면 다음과 같다.

- (1) 특허출원 2건 (목표치 1건 / 달성치 2건)
- (2) 특허등록 1건 (목표치 1건 / 달성치 1건)
- (3) 논문게재 2건 게재 (목표치 2건 / 달성치 2건)
- (4) 소프트웨어 1건 등록 (목표치 1건 / 달성치 1건)
- (5) 학술발표 2건 발표 (목표치 0건 / 달성치 2건)

다. 후속연구의 필요성

- 3축 면진장치의 대한 아이디어를 구체화 시켜 특허출원 및 해석을 통한 검증을 실시하였지만, 3축 면진장치에 대한 성능 실험을 하지 못하였음.
- 3축 면진장치에 대한 수직방향 및 수평방향에 대한 실험을 통해 3축 면진장치에 대한 안정성 검토가 완료 된 후 관련 국내 기업에 기술이전 등을 실시하고자 함.
- 또한, 면진장치 인장방지용 장치의 경우 현재 추가 실험을 실시하여 그 성능을 검증하고 있음.

4. 연구개발성과의 활용 방안 및 기대효과

가. 활용계획

- 철도부지 및 인공지반을 활용한 신축 건축물 시공시의 방진 및 면진시스템으로 활용.
- 건축물의 리모델링 수직증축 시 방진 및 면진시스템으로 활용.
- 탄성해석 프로그램을 활용한 비선형 동적해석 프로그램 모델링 시 활용.
- 면진장치를 적용한 수직증축 리모델링 공동주택의 최적 면진주기 산정 시 활용.

나. 기대효과

- 인공지반 및 철도부지의 활용에 의한 도심건축의 활성화 및 건설 제비용의 감소 효과.
- 면진장치 적용에 의한 지진하중의 감소로 인한 면진층 상부 골조물량 감소 효과.
- 방진 및 면진과 관련된 국내 기술선도 및 해외 우수업체와의 경쟁력 확보.
- 선진국의 방진 및 면진분야에 대한 동등한 기술력확보를 통한 국가이미지 제고.
- 3차원 면진시스템의 해외특허를 통한 시장 진출.
- 건물의 사용성 증진과 내진안정성을 동시에 확보하여 삶의 질을 향상시킴.
- 건물의 지진피해 저감 기술 적용으로 장수명화에 기여.
- 방진시스템 및 면진시스템을 각각 시공 시에 발생하는 문제점을 해결하여 설계 자유도 확보, 공기단축 및 경제성 확보에 기여.
- 모듈러 건축물의 수직진동 및 수평진동을 해결하여 거주성과 사용성을 향상시킴.

붙임. 참고문헌

- (1) Wei Lu Shum, Zhou Fu Lin, “Vibration and Seismic Isolation Design for Buildings on Subway Platform, 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing“, China, 2008.
- (2) Takahiro Somaki, Testundo Nakatogawa, Akinori Miyamoto, Koichi Sugiyama, Yoshihisa and Kaoru Tamachi, “Development of 3-Dimensional Base Isolation System for Nuclear Power Plants“, Transactions, SMiRT 16, Washington DC, 2001.
- (3) Seitogiso, Kyotada Nakamura, Michiaki, Satoshi Moro, “Development of 3D Seismic Isolator using Metallic Bellows“, Transactions SMiRT 17, Prague, 2003.
- (4) Junji Shihara, Tadashi Tamura, Kazuya Ohta, Yasuo Okada, Satoshi Moro, “Research on 3D Base Isolation System Applied to New Power Reactor 3D Isolation Device with Rolling Seal Type Air Spring, Transactions SMiRT 17, Prague, 2003.
- (5) Kazuhiko Inoue, Minoru Fushimi, Satoshi Moro, Masaki Morishita, “Development of Three Dimensional Seismic Isolation System for Next Generation Nuclear Power Plant, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, 2004.
- (6) Riccardo Cami, Naurizio Indiri, Massimo Muzzarelli, Bruno Spadoni, Paolo Clemente, “The Use of An Innovative 3D Isolation System for Seismic and Ambient Vibration to Protect The Roman Ship Excavated at Ercolano, Third European Conference on Structural Control, Vienna, 2004.
- (7) Takeshi Mizuno, Masaya Takasaki, Hirohisa Suzuki, Yuji Ishino, “Development of a Three Axis Active Vibration Isolation System Using Zero-Power Magnetic Suspension“, The 42nd IEEE Conference on Decision and Control, Hawaii, 2003.
- (8) 중소기업청, “베어링의 시장기술보고서”, 2009.
- (9) 국토해양부, “철도부지를 활용한 주택 시범사업”, 국토해양부 2009년 8월 20일 보도자료, 2009.
- (10) 박신영, “입체도시 활용방안 연구-주택단지 사례를 중심으로-”, 주택도시 제 90호, 2006.
- (11) 이민정, 한상환, “철도진동의 영향을 받는 주거건물의 진동평가기준의 비교분석”, 대한건축학회 학술발표대회 논문집 구조계, 29(1), 2009.
- (12) 김영훈, 이정형, “철도역사 복합개발 사업추진 활성화 방안에 관한 기초적 연구”, 한국도시설계학회 2011년 춘계학술대회발표논문, 2011.
- (13) Statistics Korea, (2016), Housing penetration statistics report.
- (14) Choi, J. P., Choi, J. H., Kim, Y. S., (2018), A Study on Small Size Plans of Vertical Extension Remodeling for Aged Apartment, Journal of Architectural Institute of Korea Planning & Design, 34(8), pp. 3-11.

- (15) You, Y. C., Choi, K. S., Kim, M. S., Shin, J. U., (2018), Development of Technologies Ensuring Structural Safety of Existing Multi-residential Buildings for Vertical Extension, Spring conference journal of Korea Concrete Institute, pp. 787-788.
- (16) Lee, S. S., Kim, J. S., Jeon, B. K., (2015), Structural Alternatives for Remodeling of the Vertical Extension of Three Floors, Journal of Architectural Institute of Korea, 31(12) pp. 11-22.
- (17) KICT, (2014), Structural Manual for the Remodeling of Vertical Extension, Ministry of Land, Infrastructure and Transport – Housing Policy Division / KICT, 11-30.
- (18) Moon, B. W., Cho, S. H., Hyoun, C. G., Lee, E. J., (2014), Research on Vertical Extension of an Apartment-remodeling with Shear Wall Structure System, conference journal of Architectural Institute of Korea, pp. 471-472.
- (19) Korean Building and Commentary (2016), Architectural Institute of Korea.
- (20) Hwang, K. T., (2018), Technical Trends of RC Buildings Applied with Seismic Isolation Systems, Magazine of the Korea Concrete Institute, 30(3), pp. 44-52.
- (21) Kim, H. S., kim, S. G., Kang, J. W., (2018), Seismic Response Evaluation of Mid-Story Isolation System According to the Change of Characteristics of the Seismic Isolation Device, Journal of Korean Association for Spatial Structures, 18(1), pp.109-116.
- (22) Kim, k. Y., Lee, y. R., Kim, H. S., Kang, J. W., (2017), Evaluation of High-Rise Buildings Considering Installation Story of the Mid-Story Isolation System, Journal of Korean Association for Spatial Structures, 17(4), pp.85-92.
- (23) Hur, M. W., Yoon, J. H., Park, T. W., (2017), Seismic Performance Evaluation of Non-seismic designed Low-rise Building Retrofitted by Isolation device, conference journal of Korea Concrete Institute, pp. 323-324.
- (24) Hur, M. W., Lee, Y. H., Kim, J. H., Park, C. Y., Lee, S. H., (2017), Seismic Isolation Effects by the Isolation Period of the Vertically Story-added Remodeling Building, Spring conference journal of Korea Concrete Institute, pp. 705-706.
- (25) Chun, Y. S, Hur, M. W., (2015), Effects of Isolation Period Difference and Beam-Column Stiffness Ratio on the Dynamic Response of Reinforced Concrete Buildings, Journal of International Journal of Concrete Structures and Materials, 9(4), pp. 439-451.
- (26) Chun, Y. S, Hur, M. W., (2010), Seismic Isolation Effects According to Set up the Isolation Period in the Medium and Low-rise Framed Building, Journal of Korea institute for Structural Maintenance Inspection, 14(6), pp. 93-99.
- (27) Roehl, J. L., (1972), Dynamic response of ground-excited building frames. Houston, TX, Rice University.
- (28) ASCE/SEI, 2010, “Minimum design loads for buildings and other structures”, ASCE 7-10, pp.165-178.

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술초진연구사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 국토교통기술초진연구사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.