

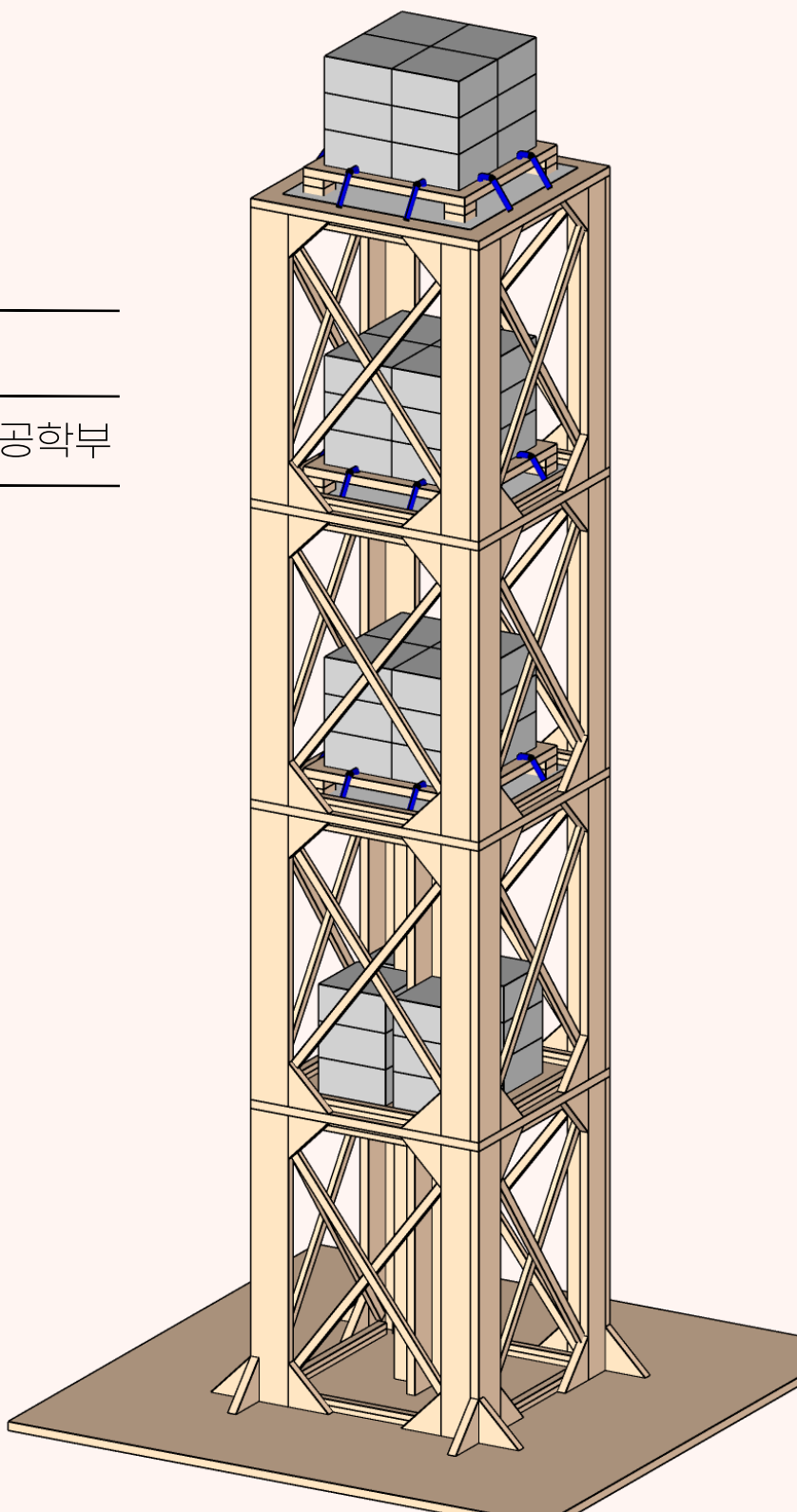
2025 구조물 내진설계 경진대회

구조물 붕괴방지를 위한 내진설계

팀 명 KUERI

지도교수 주영규 교수님

소 속 고려대학교 건축사회환경공학부



고려대학교
KOREA UNIVERSITY

KUERI 팀소개

KUERI는 미국의 지진공학 연구 기관인 EERI를 기반으로 하여 설립된 고려대학교 건축사회환경공학부 내 유일한 학회입니다. 구조물 실물 모형에 대한 정밀한 내진 설계를 구현하기 위해, 다음과 같은 목표를 설정하여 프로젝트를 수행하였습니다.

1. 내진설계 개념의 정확한 이해

- A. 내진설계 목표 및 성능수준 파악
- B. 실험 조건에 부합하는 인공지진파 시계열 데이터 제작

2. 모델 해석값과 진동대 실험 결과 간의 정합성 확보

- A. 지진 시 구조물 거동 예측
- B. 주요 부재 강도 및 내진 성능 평가

3. 최소 7회 이상의 모형 제작 및 진동대 실험 수행

- A. 설계지진 초과 시 붕괴 메커니즘을 고려한 파괴 유도
- B. 반복실험을 통해 시공성, 경제성, 심미성, 창의성을 고려한 최적 설계안 도출



김준수

- 내진성능평가

김수현

- 구조해석

임지원

- 구조설계

정윤주

- 진동대 실험

목차

1

내진설계 목표 및
성능수준 검토

2

구조 설계

3

설계 도서

4

시공성 및
경제성 검토

1 내진설계 목표 및 성능수준 검토

내진설계 및 설계응답스펙트럼 작성에 관한 사항은 첨부 건축물 내진설계기준 (KDS 41 7 00 : 2019)을 참조하되, 본 대회에서는 진동대 실험 조건을 고려하여 아래에서 정의하는 지진하중의 크기 (유효수평지반가속도)와 내진성능목표를 적용한다.

지진위험도

재현주기(년)	성능 수준	유효수평지반가속도(S)	위험도계수(I)	지진구역계수(Z)
500	*기능수행	0.3g	1	0.3g
2400	*붕괴방지	0.6g	2	0.3g

*기능수행: 구조적 손상이 발생하지 않는 상태로 기타 요소의 파손 및 낙하는 허용

*붕괴방지: 다음에서 제시한 손상이 발생하지 않는 상태 - 1. 구조물 완전 붕괴 2. 하중블록 이탈 3. 바닥판 이탈 4. 구조부재 3개 이상 완전 파단 5. 그 외, 심사위원 2인 이상 파괴에 대한 판단 의견 제시

설계응답스펙트럼

구분 재현주기(년)	단주기 설계 스펙트럼 가속도 (SDS)	1초 주기 설계 스펙트럼 가속도 (SD1)
500	0.75g	0.3g
2400	1.5g	0.6g

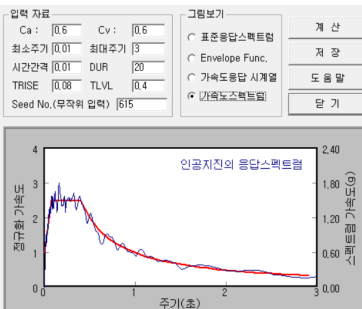
$SDS = S \times 2.5 \times F_a \times 2/3$ $SD1 = S \times F_v \times 2/3$

지반응답증폭계수	
단주기 (Fa)	1.5
1초 주기 (Fv)	1.5

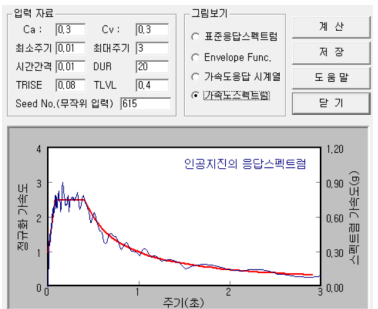
구조물의 고유주기 (500년 & 2400년)	
$T_0 = 0.2SD1/SDS$	0.08 sec
$T_s = SD1/SDS$	0.4 sec

0.08 ~ 0.4 sec 에서 설계 스펙트럼 가속도 최대

500년 주기 설계응답스펙트럼



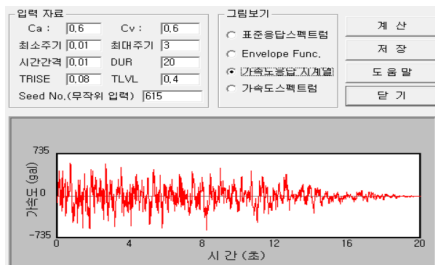
2400년 주기 설계응답스펙트럼



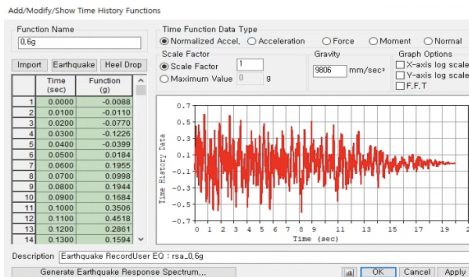
인공지진파 제작

인공지진파는 국토교통부 건설기준 건축물 내진설계기준 스펙트럼에 기초하여 제작한 가속도 시간이력을 사용합니다.

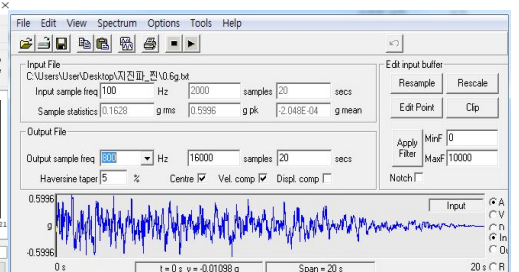
가속도 응답 시계열 데이터



MIDAS: 시간이력해석 데이터



진동대: 지진파 가진 데이터



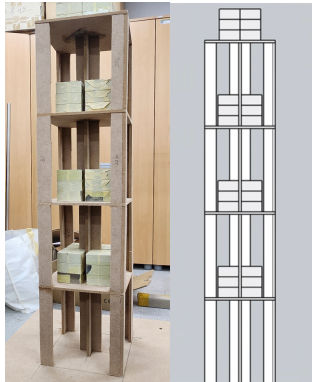
• 보유 장비: APS400 1축 진동대

대회 진동대 실험 규정에 따라 스케일을 조정하여, 최대가속도 0.2g~0.8g를 갖는 인공지진파를 단계별로 제작

- 인공지진파를 직접 입력함으로써, 모델의 하중 조건을 진동대 실험 조건과 동일하게 설정
- 시간에 따른 구조물의 응답(변위, 가속도)을 정밀하게 추적

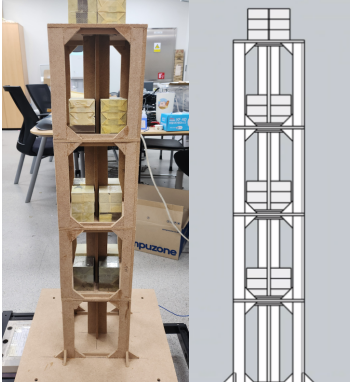
2 구조 설계

1차 모델



구성요소	슬래브+기둥+코어
붕괴시점	0.2g 단계
붕괴위치	1층 기둥 접합부
붕괴원인	기초판-기둥 접합부가 밀면전단력을 버티지 못하고 파단
대책	강성을 높이기 위해 보, 현치 추가

2차 모델

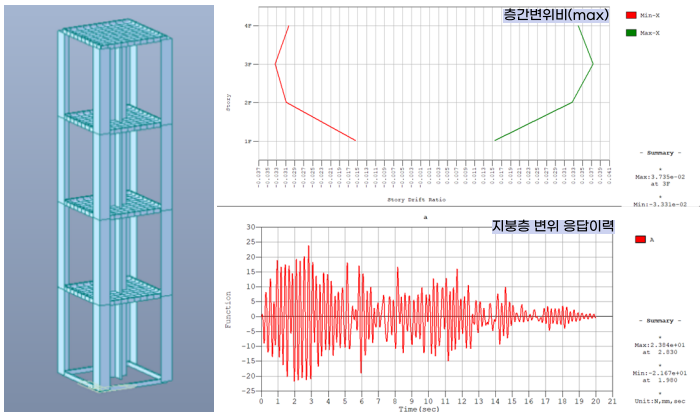


구성요소	슬래브+기둥+코어+보+현치
붕괴시점	0.2g 단계
붕괴위치	1층 기둥 접합부
붕괴원인	기초판-기둥 접합부가 밀면전단력을 버티지 못하고 파단
대책	횡하중 저항성을 높이기 위해 가새 추가

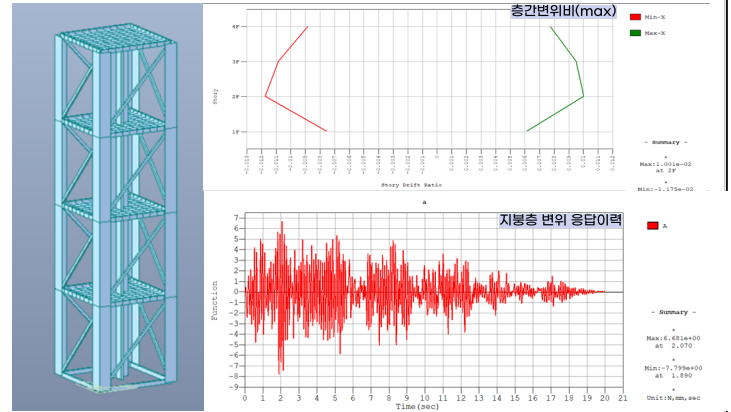
가새 분석

지진파에 대한 층간변위비(max) 및 지붕층 변위 응답이력 결과값을 통해 가새 형상별 성능 평가

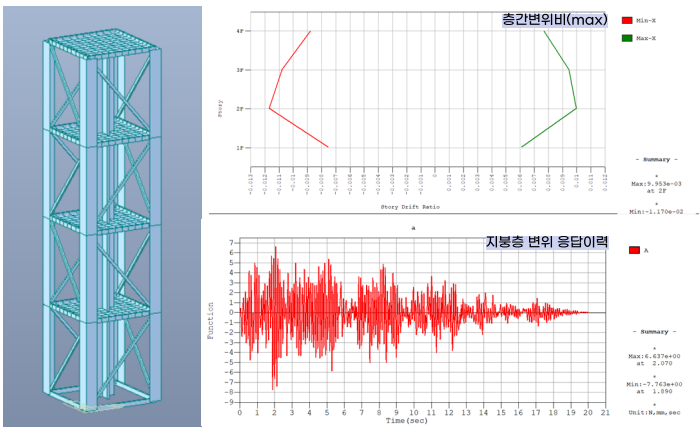
가새 없음



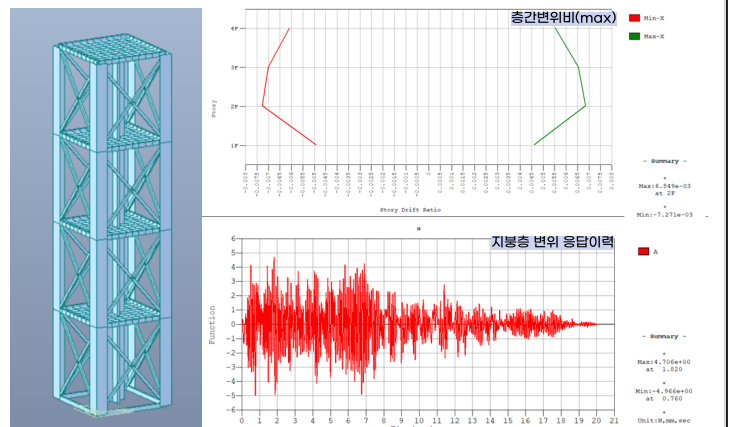
대각가새(한방향)



대각가새(방향교차)



X자 가새




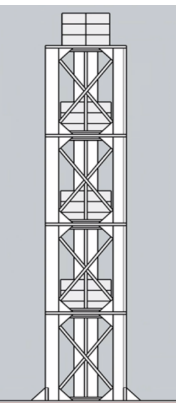
결과값 / 구분	가새 없음	한방향	방향교차	X자 가새
층간변위비(max) 최댓값	3.735e-02	1.175e-02	1.17e-02	7.271e-03
지붕층 변위 응답이력 최댓값 [mm]	2.384e+01	7.799e+00	7.763e+00	4.966e+00



X자 가새가 층 변형 저항성 측면에서 가장 우수한 성능을 보여 최종 형상으로 채택

2 구조 설계

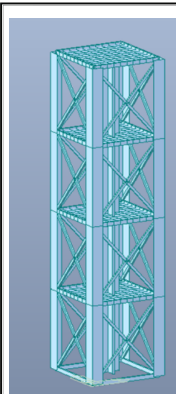
3차 모델

		구성요소	슬래브+기둥+코어+보+현치+가새
		붕괴시점	0.3g 단계
		붕괴위치	2층 기둥 접합부
		붕괴원인	2층 기둥 접합부가 밀면전단력을 버티지 못하고 파단
		대책	감쇠장치 추가

- 1~3안 모두 기둥-슬래브 접합부에서 접착제가 일관되게 가장 먼저 끊어지며 최초 파단 발생
- 기둥, 보 부재는 항복하지 않음
- 가새 부재에 좌굴이 관찰 되지 않음

재료의 비선형 거동은 지배적이지 않으며, 선형 시간이력해석으로도 지진 응답 예측 가능

모델링 특성 및 검토

	재료성질	탄성계수 및 밀도
	단면성질	설계 도서 참조
	하중조건	자중 및 하중블럭 무게 그 외 지진파 시간이력하중
	경계조건	Fixed 접합
	지지조건	Fixed 접합

- 외력과 반력의 평형 검토
 - 구조해석의 결과로 구해진 반력의 확인을 통해 하중이나 요소와 절점의 입력과정에서 오류가 없는지 개략적으로 검토

SUMMATION OF TOTAL LOAD PRINTOUT					
Concent (N)	Beam (N)	Floor (N)	Pressure (N)	Self Weight (N)	Sum (N)
0.000e+00	0.000e+00	-2.358e+02	0.000e+00	-1.471e+01	-2.505e+02

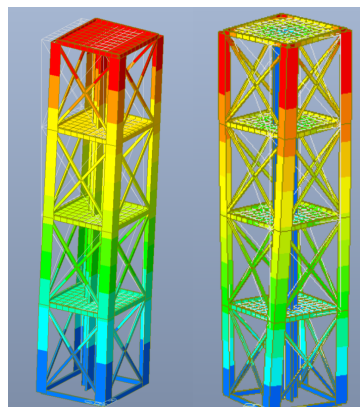
SUMMATION OF REACTION FORCES			
Load	FX (N)	FY (N)	FZ (N)
dl	0.000000	0.000000	250.538946

자중 및 하중블럭 무게에 해당하는 외력과 반력의 크기가 정확히 일치

고유치해석

Eigenvalue Analysis			
Mode No	Frequency		Period (sec)
	(rad/sec)	(cycle/sec)	
1	67.0591	10.6728	0.0937
2	67.0651	10.6737	0.0937
3	106.5743	16.9618	0.0590
4	222.9489	35.4834	0.0282
5	223.0134	35.4937	0.0282
6	313.6963	49.9263	0.0200
7	383.7716	61.0791	0.0164
8	388.5859	61.8454	0.0162
9	390.6411	62.1725	0.0161

Modal Participation Masses Printout						
Mod e No	TRAN-X		TRAN-Y		ROTN-Z	
	MASS(%)	SUM(%)	MASS(%)	SUM(%)	MASS(%)	SUM(%)
1	0.0000	0.0000	79.2990	79.2990	0.0000	0.0000
2	79.2896	79.2896	0.0000	79.2990	0.0000	0.0000
3	0.0000	79.2896	0.0000	79.2990	87.1165	87.1165
4	0.0000	79.2896	15.4031	94.7021	0.0000	87.1165
5	15.4005	94.6901	0.0000	94.7021	0.0000	87.1165
6	0.0000	94.6901	0.0000	94.7021	9.0347	96.1512
7	0.0000	94.6901	0.0000	94.7021	0.0000	96.1512
8	0.0000	94.6901	0.0000	94.7021	0.0000	96.1512
9	0.0000	94.6901	0.0000	94.7021	0.0000	96.1512



1차 모드 형상 3차 모드 형상

- 6차모드까지 각 방향의 누적 질량참여율 90%이상 확보
 - 모드 수 충족 및 동적 해석의 신뢰성 확보
- 1~2차모드에서 X, Y방향 질량참여율 각각 79.3%
 - 구조물의 지배적 진동모드로 평가
 - 구조물의 고유주기 = 0.0937sec
- 3차모드에서 비틀림 방향 질량참여율 87.1%
- 대회 설계 응답스펙트럼 특성
 - 0.08~0.4 sec에서 설계스펙트럼가속도 최대
 - 현재 구조물의 고유주기는 지진파의 고응답 영역(위험 주기대역)에 포함
 - 이는 지진 시 공진 현상으로 인해 응답이 크게 증폭될 위험이 있음을 의미

공진을 피하고 설계 목표 성능을 확보하기 위해, 고유주기를 위험 영역에서 벗어나도록 설계 변경이 필요

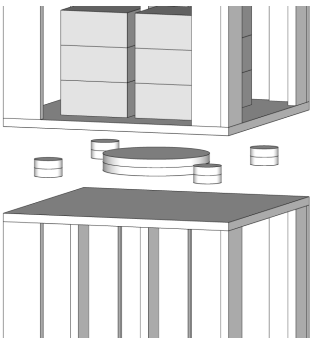
2 구조 설계

감쇠장치의 필요성

- 감쇠의 정의 : 구조물이 가진 진동에너지를 마찰, 변형 등으로 외부에 소산시키는 메커니즘
- 단자유도계의 운동방정식 : $m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = 0$
 - m : 질량, c : 감쇠계수, k : 강성, u(t) : 변위
- (무감쇠)고유진동수 : $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$ ➔
 - 감쇠를 조절해도 고유진동수 및 고유주기는 변하지 않음
 - 고유주기는 질량(m)과 강성(k)에 의해 결정되며, 이를 조절해야 주기를 변화시킬 수 있음
 - 그러나 구조 형상과 재료 특성의 한계로 인해 이러한 조정은 현실적으로 쉽지 않음
- 감쇠비의 정의 : $\zeta = \frac{c}{2\sqrt{km}}$
 - 감쇠계수 c를 조절하면 감쇠비가 직접 변함
- 감쇠가 있는 경우의 감쇠 진동수
 - 감쇠가 있으면 실제 응답 주파수는 약간 달라짐 : $\omega_d = \omega_n\sqrt{1 - \zeta^2}$
 - 감쇠비가 클수록 감쇠 진동수는 감소
- 응답해의 형태 (자유진동 해) : $u(t) = Ae^{-\zeta\omega_n t} \cos(\omega_d t + \phi)$
 - 여기서 감쇠를 조절하면,
 - 감쇠비 증가 -> 지수감쇠율이 빨라짐 -> 진동 진폭이 더 빨리 줄어듦
 - 감쇠 진동수 소폭 감소 -> 주기가 약간 길어짐

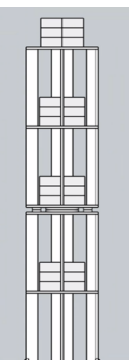
감쇠를 조절함으로써 진동의 진폭을 줄이고, 공진 시 구조 응답을 효과적으로 제어할 수 있음

면진장치 설계_1차


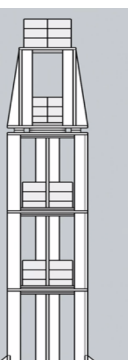


- 납고무베어링(LRB) 면진장치를 모사한 형태로 구성하여, 면진판 기준 상부와 하부 구조물의 거동을 분리함으로써 주기를 연장
- 바닥판과의 마찰에 의해 감쇠 효과를 발생시키고 에너지 소산을 유도
- 2층과 3층 사이 바닥판 사이에 배치되어 1·2층과 3·4층 각각의 강성이 독립적으로 유지되도록 계획
 - 중앙의 큰 기둥은 상부 구조물의 수직하중 대부분을 아래쪽 코어로 집중 전달
 - 외곽의 작은 기둥들은 하중을 분산 전달함으로써 균형을 유지하고, 큰 수평 변위나 전도를 방지하는 역할을 수행
 - 고무줄은 상부와 하부 구조물 사이의 상대변위를 일정 수준 이하로 제한하며, 복원력을 제공해 구조물이 원위치로 되돌아갈 수 있도록 함

4차 모델

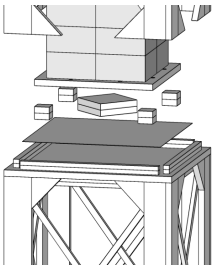
		<table border="1"> <tr> <td>구성요소</td> <td>슬래브+기둥+코어+면진판</td> </tr> <tr> <td>붕괴시점</td> <td>0.3g 단계</td> </tr> <tr> <td>붕괴위치</td> <td>2층 기둥과 슬래브 사이 접합부 파단</td> </tr> <tr> <td>붕괴원인</td> <td>2층 기둥 접합부가 밀면전단력을 버티지 못하고 파단 면진층 상부의 전도를 막지 못함</td> </tr> <tr> <td>대책</td> <td>면진판 상부 구조물 형상 변경, 보 추가, 기초에 현치 추가</td> </tr> </table>	구성요소	슬래브+기둥+코어+면진판	붕괴시점	0.3g 단계	붕괴위치	2층 기둥과 슬래브 사이 접합부 파단	붕괴원인	2층 기둥 접합부가 밀면전단력을 버티지 못하고 파단 면진층 상부의 전도를 막지 못함	대책	면진판 상부 구조물 형상 변경, 보 추가, 기초에 현치 추가
구성요소	슬래브+기둥+코어+면진판											
붕괴시점	0.3g 단계											
붕괴위치	2층 기둥과 슬래브 사이 접합부 파단											
붕괴원인	2층 기둥 접합부가 밀면전단력을 버티지 못하고 파단 면진층 상부의 전도를 막지 못함											
대책	면진판 상부 구조물 형상 변경, 보 추가, 기초에 현치 추가											

5차 모델

		<table border="1"> <tr> <td>구성요소</td> <td>슬래브+기둥+코어+ tapered형 면진판+ 보+기초 현치</td> </tr> <tr> <td>붕괴시점</td> <td>0.4g 단계</td> </tr> <tr> <td>붕괴위치</td> <td>2층 기둥과 슬래브 사이 접합부 파단</td> </tr> <tr> <td>붕괴원인</td> <td>2층 기둥 접합부가 밀면전단력을 버티지 못하고 파단 면진층 상부의 전도를 막지 못함</td> </tr> <tr> <td>대책</td> <td>면진판 모양 변경, 가새 추가</td> </tr> </table>	구성요소	슬래브+기둥+코어+ tapered형 면진판+ 보+기초 현치	붕괴시점	0.4g 단계	붕괴위치	2층 기둥과 슬래브 사이 접합부 파단	붕괴원인	2층 기둥 접합부가 밀면전단력을 버티지 못하고 파단 면진층 상부의 전도를 막지 못함	대책	면진판 모양 변경, 가새 추가
구성요소	슬래브+기둥+코어+ tapered형 면진판+ 보+기초 현치											
붕괴시점	0.4g 단계											
붕괴위치	2층 기둥과 슬래브 사이 접합부 파단											
붕괴원인	2층 기둥 접합부가 밀면전단력을 버티지 못하고 파단 면진층 상부의 전도를 막지 못함											
대책	면진판 모양 변경, 가새 추가											

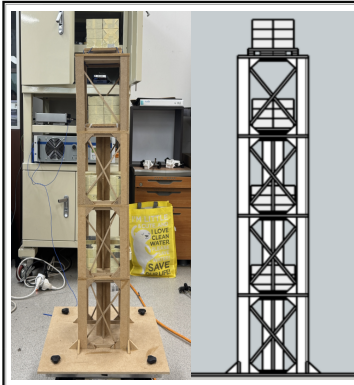
2 구조 설계

면진장치 설계_2차



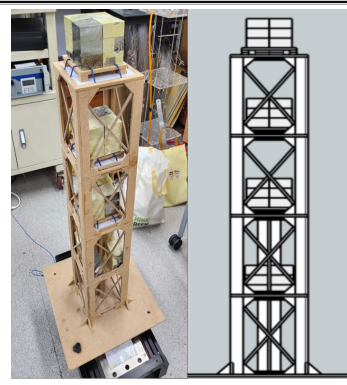
- 한 면진장치가 한 층의 하중만을 부담하도록 개선한 모델
- 각 층의 지진응답을 독립적으로 제어하고, 감쇠를 통해 지진 에너지를 보다 효과적으로 소산
- 받침판의 크기를 축소하여 전도 방지 효과를 향상
- 각 기둥과 바닥판 사이에 종이를 부착하여 바닥판과 면진 기둥 사이의 마찰력을 줄임으로써, 상대적으로 작은 지진력에도 면진장치가 원활히 작동하도록 유도
- 기둥과 고무줄의 역할은 동일

6차 모델



구성요소	슬래브+기둥+코어+축소면진판x2 +보+가새+현치
붕괴시점	0.6g 단계
붕괴위치	2층 기둥과 슬래브 사이 접합부 파단
붕괴원인	2층 기둥 접합부가 밀면전단력을 버티지 못하고 파단
대책	축소면진판 개수 추가 면진층 현치 추가 보강

최종 모델



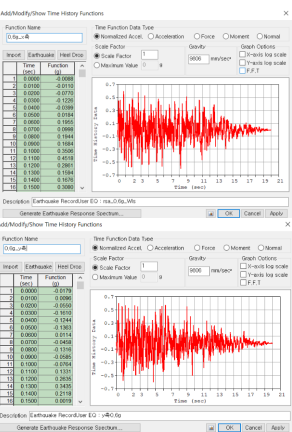
구성요소	슬래브+기둥+코어+축소면진판x3 +보+가새+현치
붕괴시점	0.8g 단계
붕괴위치	2층 하중블록 이탈
붕괴원인	2층 하중블록 접합면이 밀면전단력을 버티지 못하고 이탈
대책	대회 실험 조건인 2축 지진 입력 상황을 고려해 합리적으로 과설계하여 최종 모델로 선정

2축 지진 하중 응답 예측

인공지진파는 상관관계(Coherence)가 0.30이하인 두 개의 지진파를 수평 2방향(X축, Y축)으로 동시에 가진한다.

- 보유 장비(1축 진동대)의 한계 보완 → 모델 해석을 통해 2축 지진 응답을 예측

0.6g 단계의 서로 다른 지진파



X, Y축
동시 가진



최상층 변위 응답 이력

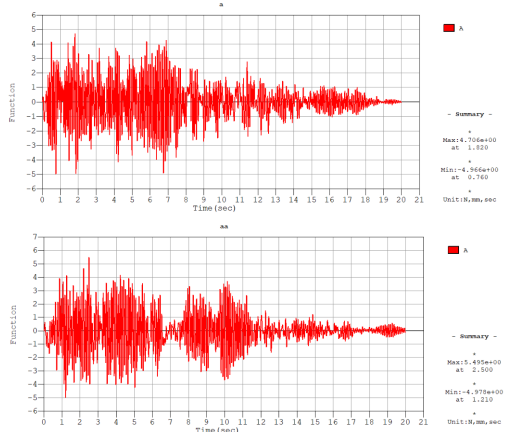
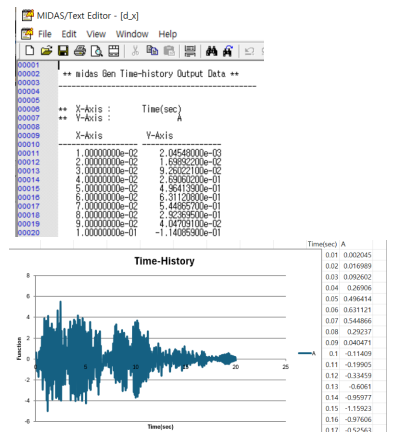


Table
데이터 추출



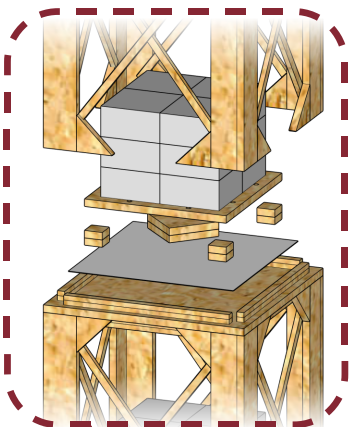
모든 스텝의 변위 벡터 합 계산



2축 지진 입력 해석에서 최상층 최대 변위가 1축 입력 대비 약 13% 크게 나타남
→ 다축 지진효과를 반영하기 위해 1축 진동대 0.8g 단계를 붕괴지진 단계로 설정

2 구조 설계

최종 모델



면진 장치

- 납고무베어링(LRB) 면진 받침을 모사하여, 하중블록을 지지하는 받침판과 바닥판을 각각 천공한 후 고무줄로 엮어 제작
- 면진층은 구조물의 관성과 반대로 거동하며, 지진 시 바닥판과 받침판의 상대 변위를 허용하면서도 복원력을 제공해 에너지 소산을 유도
- 중앙에 두꺼운 기둥을 배치하여 코어 부근으로 하중을 집중 전달
- 외곽의 얇은 기둥들은 하중의 일부를 분산 전달
- 각 기둥과 바닥판 사이에 종이를 부착하여 정지 마찰력을 줄임으로써, 상대적으로 작은 지진력에도 면진장치가 원활히 작동하도록 유도
- 바닥판은 받침판보다 바깥쪽의 위치에 천공하여 고무줄로 연결함으로써, 큰 수평 변형 시 면진 장치 자체의 전도를 방지

기둥-보-슬래브 구조

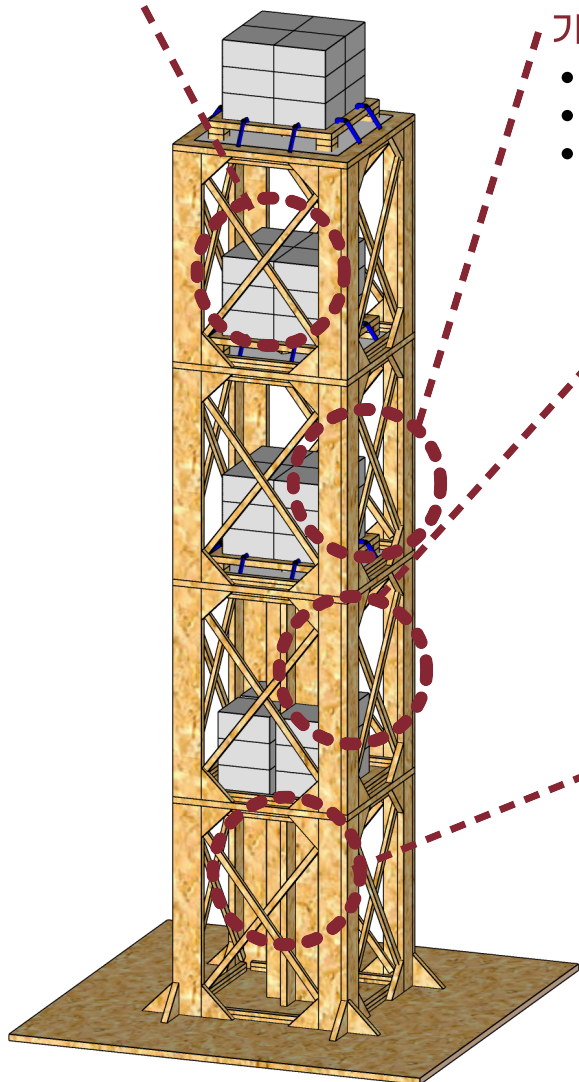
- 슬래브에서 발생하는 하중을 보를 통해 기둥으로 체계적으로 전달
- 보를 매개로 기둥과 슬래브를 구속시켜 일체성과 연속성 확보
- 가새 및 헌치를 추가적으로 활용하여 수평하중에 대하여 보다 안정적인 거동을 유도

ㄱ자형 기둥

- 수직하중을 지지하는 기둥의 역할과 전단벽의 역할을 동시에 수행하는 기둥
- 스트립이 아닌 판재를 절단하여 제작함으로써, 수직도와 길이의 정확성을 높여 시공 품질 향상

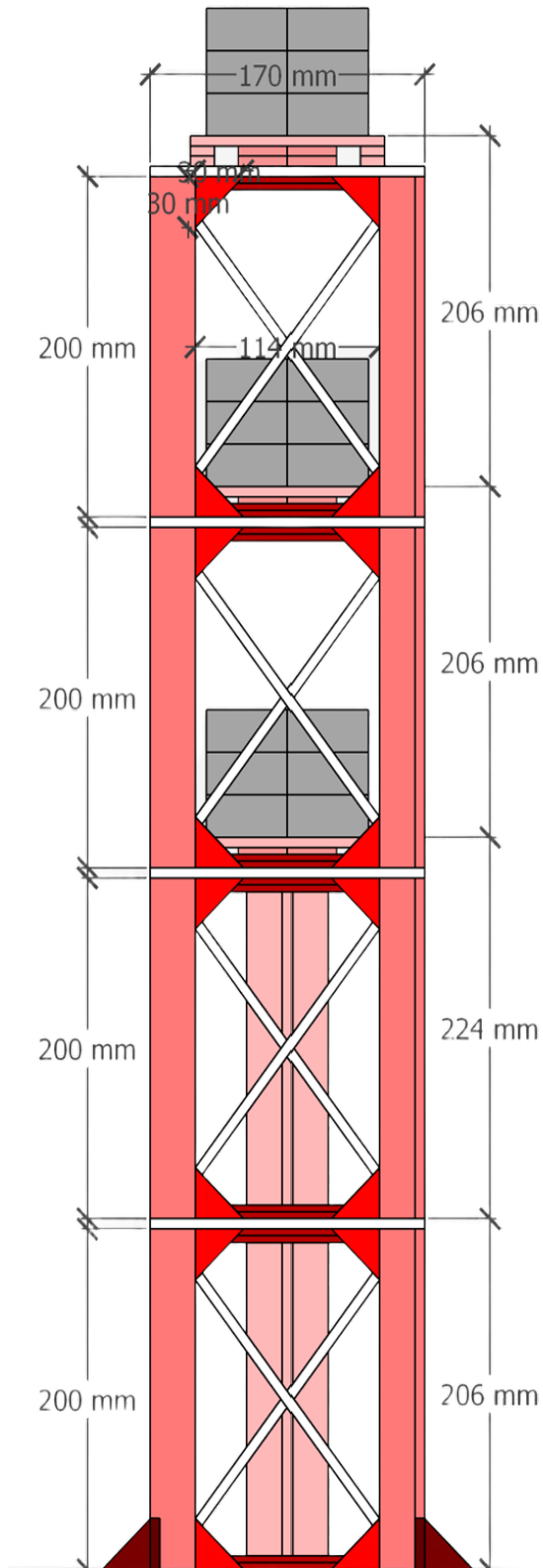
십자형 코어

- 슬래브 중앙에 배치하여 기둥으로 전달되는 수직하중을 효율적으로 분담하도록 설계
- 높은 강성과 강도를 확보해 전체 구조의 횡강성을 증대

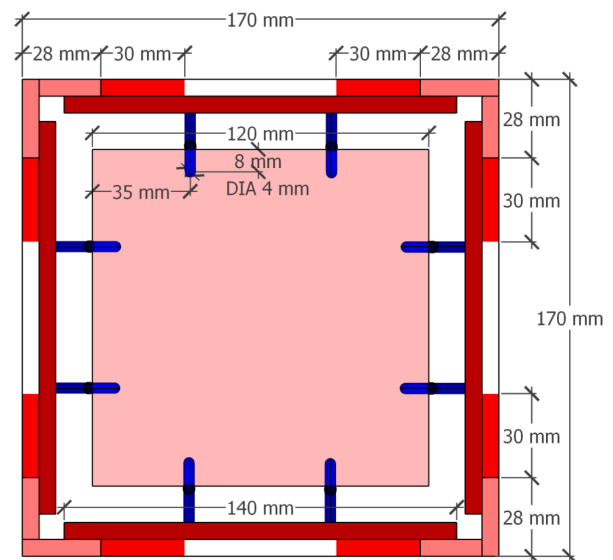
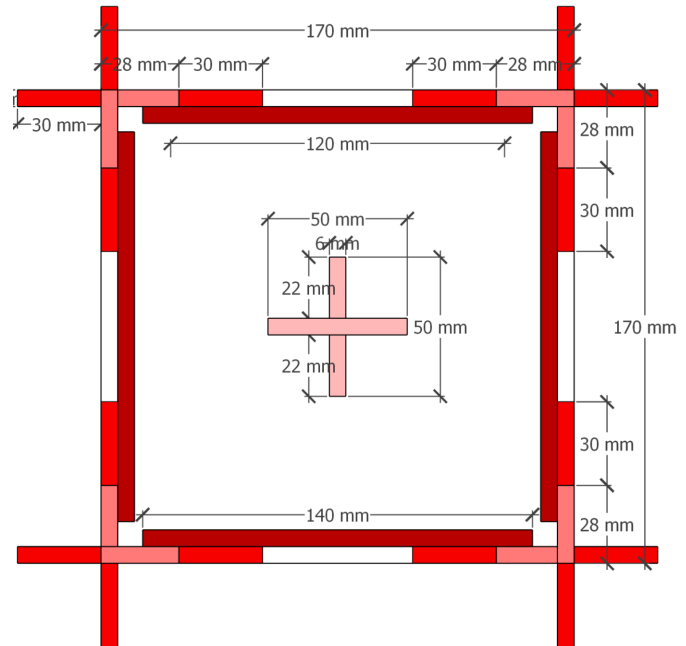


3 설계 도서

입면도



평면도



4 시공성 및 경제성 검토

공정표 및 구조계산서

■ 임지원 ■ 정윤주 ■ 김준수, 김수현 ■ 김준수, 김수현, 정윤주 ■ 모두

구분	소요시간										
	1시간				2시간				3시간		
	15	30	45	60	15	30	45	60	15	30	
설계	도면 부착										
	스트립 작도										
부재제작	부재 절단										
	가새 및 보										
	기둥 및 코어										
	헌치										
시공	면진판 타공										
	기둥, 코어, 슬래브										
	면진 장치										
마감	헌치, 가새										
	하중블록 설치										
	이음부 보강										
	검수										
총 공정시간										2시간 30분	

부재명	규격	수량	부재명	규격	수량
코어1	50*6*200	2	면진판	120*120*6	3
코어2	22*6*200	4	면진기둥1	50*50*6	6
기둥1	28*6*200	16	면진기둥2	15*15*6	24
기둥2	22*6*200	16	면진종이	140*140	3
슬래브	170*170*6	4	고무줄	30	3
보	13*6*4	64	가새1	24*6*4	16
헌치	30*30*6	72	가새2	18.5*6*4	16

재료명	재료 크기	단가	수량	합계
MDF Base	400*400*6	기본 제공	1	-
MDF Plate	200*200*6	100	11	1100
MDF Strip	600*4*6	10	26	260
고무줄	600	40	1	40
A4 용지	A4	10	1	10
접착제	20g	200	2	400
총 합액(백만원)				1710