

2025 구조물 내진설계 경진대회

# 구조물 붕괴방지를 위한 내진설계

팀 명 KUERI

지도교수 주영규 교수님

소 속 고려대학교 건축사회환경공학부



**김준수**  
• 내진성능평가

**김수현**  
• 구조해석

**임지원**  
• 구조설계

**정윤주**  
• 진동대 실험

## 목차

**1**

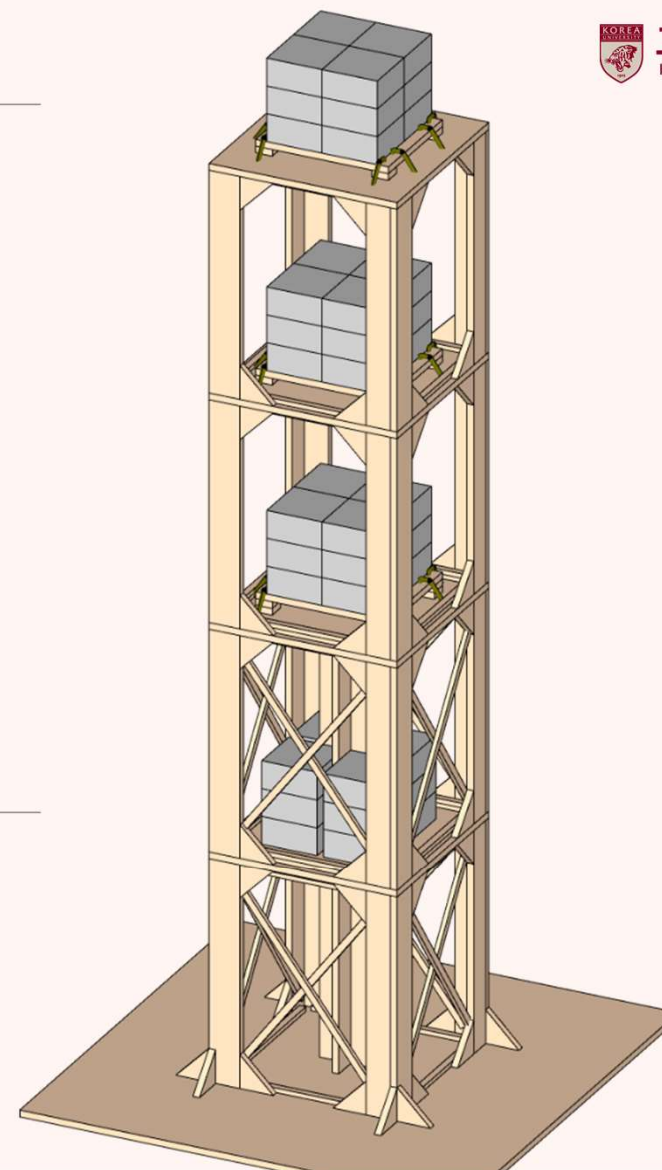
내진설계 목표

**2**

설계 과정

**3**

최종 모델



# 1 내진설계 목표

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 않은 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

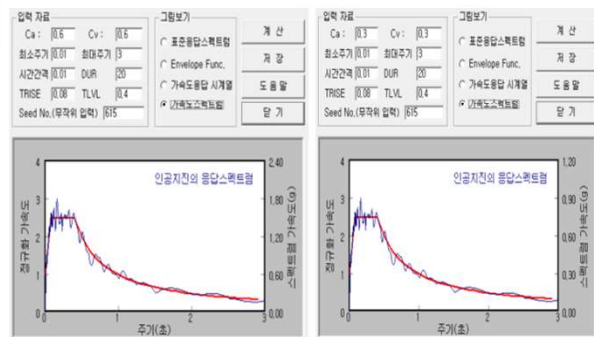
## 설계응답스펙트럼

구분	단주기 설계 스펙트럼 가속도 (SDS)	1초 주기 설계 스펙트럼 가속도 (SD1)
재현주기(년)		
500	0.75g	0.3g
2400	1.5g	0.6g
SDS=S*2.5*Fa*2/3 SD1=S*Fv*2/3		
지반응답증폭계수		
단주기 (Fa)	1.5	
1초 주기 (Fv)	1.5	
구조물의 고유주기 (500년 & 2400년)		
T0=0.2SD1/SDS	0.08 sec	
TS=SD1/SDS	0.4 sec	

0.08 ~ 0.4 sec 에서 설계 스펙트럼 가속도 최대

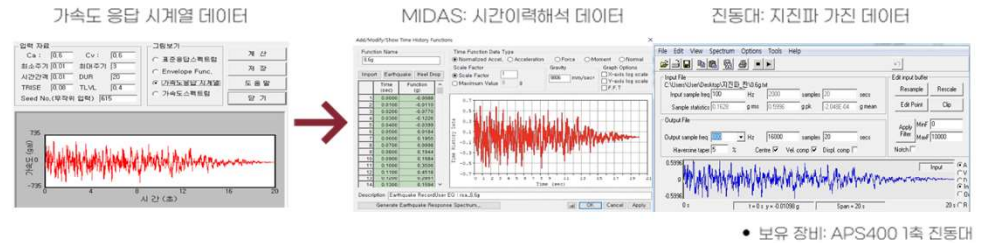
500년 주기 설계응답스펙트럼

2400년 주기 설계응답스펙트럼



## 인공지진파 제작

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



• 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

## 2축 지진하중 응답 예측

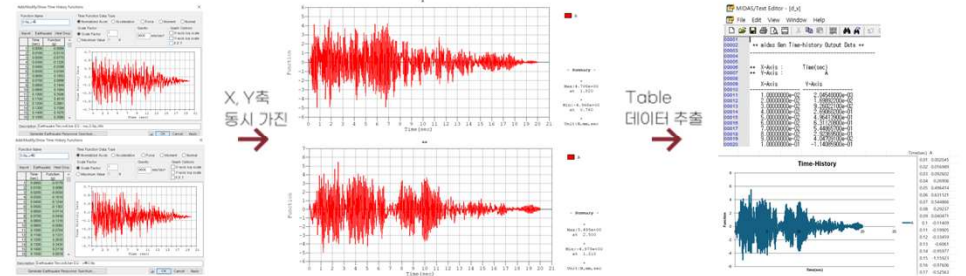
인공지진파는 상관관계(Coherence)가 0.3이하인 두 개의 지진파를 수평 2방향(X축, Y축)으로 동시에 가진한다.

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

0.6g 단계의 서로 다른 지진파

최상층 변위 응답 이력

모든 스템의 변위 벡터 합 계산



2축 지진 입력 해석에서 최상층 최대 변위가 1축 입력 대비 약 13% 크게 나타남  
-> 다축 지진효과를 반영하기 위해 1축 진동대 0.7g~0.8g 단계를 붕괴지진 단계로 설정

# 2 설계 과정

## 1차 모델

구성요소	슬래브+기둥+코어
붕괴시점	0.2g 단계
붕괴위치	1층 기둥 결합부
붕괴원인	기초판-기둥 결합부가 충전단력을 버티지 못하고 파단
대책	강성을 높이기 위해 보, 현차 추가

## 2차 모델

구성요소	슬래브+기둥+코어+보+현차
붕괴시점	0.2g 단계
붕괴위치	1층 기둥 결합부
붕괴원인	기초판-기둥 결합부가 충전단력을 버티지 못하고 파단
대책	휨하중 저항성을 높이기 위해 기새 추가

## 3차 모델

구성요소	슬래브+기둥+코어+보+현차+기새
붕괴시점	0.4g 단계
붕괴위치	2층 기둥 결합부
붕괴원인	2층 기둥 결합부가 충전단력을 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
- 기새 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 결합
지지조건	Fixed 결합

- 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

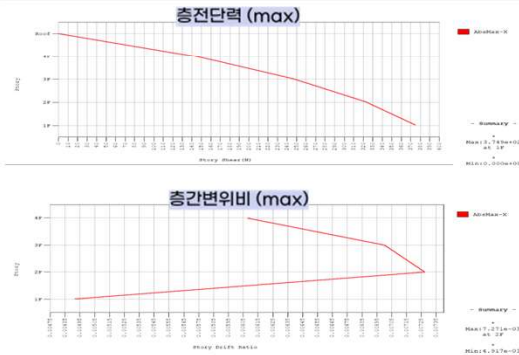
SUMMATION OF REACTION FORCES				
Load	FX (N)	FY (N)	FZ (N)	
dl	0.000000	0.000000	250.538946	

자중 및 하중블럭 무게에 해당하는 외력과 반력의 크기가 정확히 일치

결과값 / 구분	1F	2F	3F	4F
충전단력 (max) [N]	374.9101	322.5536	246.7867	143.336
층간변위비 (max)	4.917e-03	7.271e-03	7.003e-03	6.081e-03

- 충전단력은 저층부에 집중되고 상층으로 갈수록 감소하는 경향
- 층간변위비는 중간층에서 최대 약 0.7%

취약층 분석을 통한 집중 보강 대책 설정

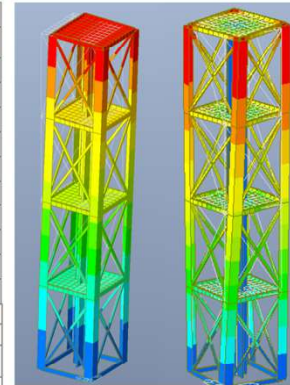


## 고유치해석

Mod # No	Eigenvalue Analysis		
	Frequency		Period
	(rad/sec)	(cycle/sec)	(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

Mod # No	Modal Participation Masses Printout					
	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	79.2895	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



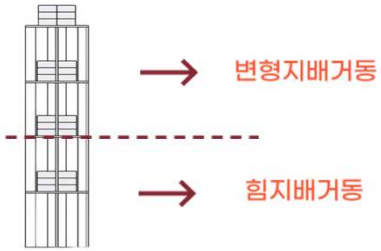
1차 모드 형상      3차 모드 형상

- 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%
- 대위 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 설계 과정

## 설계 목표

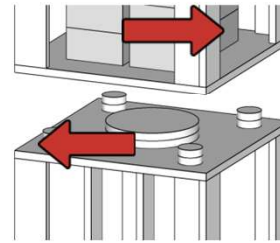


- 상부와 하부 구조를 기능적으로 분리
  - 상부는 감쇠장치를 통해 지진 에너지를 소산
  - 하부는 코어 중심의 시스템이 힘으로 직접 저항
- > 접합부 파단 위치를 상층부로 유도
- > 구조물 지진 응답 저감

## 감쇠장치의 필요성

- 감쇠의 정의 : 구조물이 가진 진동 에너지를 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:  $\zeta = \frac{c}{2\sqrt{km}}$ 
    - 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



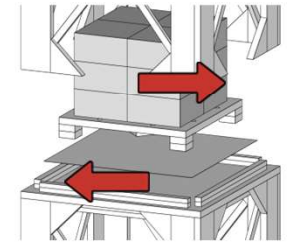
### 4차 모델

구성요소	슬래브+기둥+코어+면진판
붕괴시점	0.3g 단계
붕괴위치	2층 기둥과 슬래브 사이 접합부 파단
붕괴원인	2층 기둥 접합부가 증전단력을 버티지 못하고 파단 면진층 상부의 전도를 막지 못함
대책	면진판 상부 구조를 형상 변경, 보 추가, 기초에 현치 추가

### 5차 모델

구성요소	슬래브+기둥+코어+ tapered형 면진판+ 보+기초 현치
붕괴시점	0.4g 단계
붕괴위치	2층 기둥과 슬래브 사이 접합부 파단
붕괴원인	2층 기둥 접합부가 증전단력을 버티지 못하고 파단 면진층 상부의 전도를 막지 못함
대책	면진판 모양 변경, 기새 추가

## 면진장치 설계\_2차



### 6차 모델

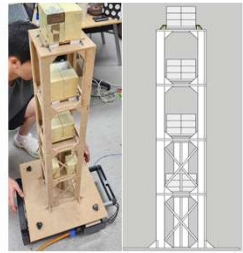
구성요소	슬래브+기둥+코어+속소면진판x2 +보+기새+현치
붕괴시점	0.6g 단계
붕괴위치	2층 기둥과 슬래브 사이 접합부 파단
붕괴원인	2층 기둥 접합부가 증전단력을 버티지 못하고 파단
대책	속소면진판 개수 추가 면진층 현치 추가 보강

### 7차 모델

구성요소	슬래브+기둥+코어+속소면진판x3 +보+기새+현치
붕괴시점	0.8g 단계
붕괴위치	2층 하중벽에 이달
붕괴원인	2층 하중벽에 접합면이 증전단력을 버 티지 못하고 이달
대책	최적화 진행

# 3 최종 모델

## 최종 모델



- 5회 반복 실험을 통해 헌치, 보, 가새 개수 및 크기 최적화
  - 0.7~0.8g 단계에서 3층 기둥-슬래브 접합부 파단
- 면진장치의 에너지 소산 메커니즘을 통해 지진 하중을 분산
  - 초기 모델 대비 접합부 파단 위치를 상층부로 유도
- 면진장치의 탄성 거동과 감쇠 성능을 통해 지진 에너지를 소산
  - 구조물의 지진응답을 저감 -> 설계 목표 달성

## 기둥-보-슬래브 구조

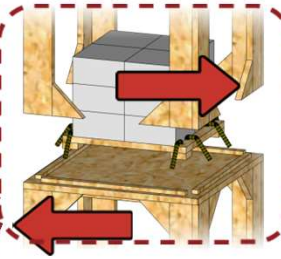
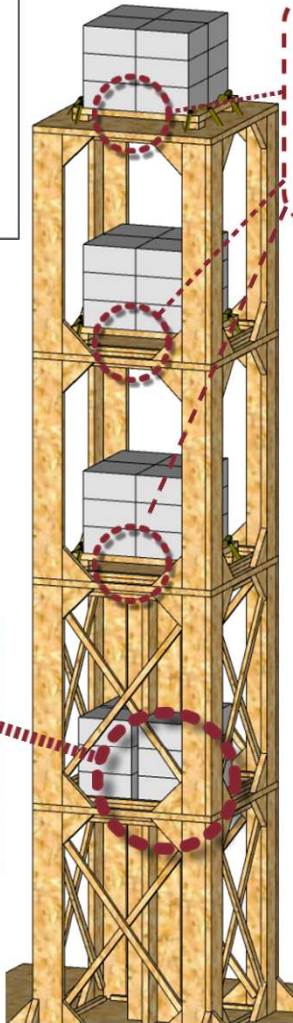
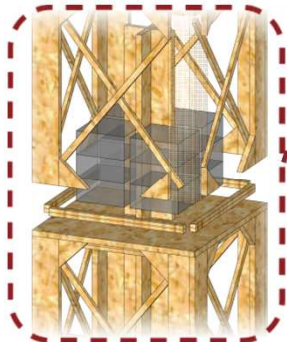
- 슬래브에서 발생하는 하중을 보를 통해 기둥으로 체계적으로 전달
- 보를 매개로 기둥과 슬래브를 구속시켜 일체성과 연속성 확보
- 가새 및 헌치를 추가적으로 활용하여 수평하중에 대하여 보다 안정적인 거동을 유도

## 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

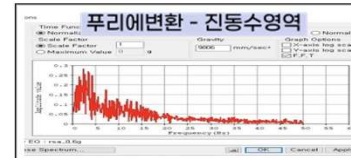
- 슬래브 중앙에 배치하여 기둥으로 전달되는 수직하중을 효율적으로 부담하도록 설계
- 높은 강성과 강도를 확보해 전체 구조물의 횡강성을 증대



## 면진 장치

- 납고무베어링(LRB) 면진 받침을 모사하여, 하중블록을 지지하는 받침판과 바닥판을 각각 천공한 후 고무줄로 묶어 제작
- 면진층은 구조물의 관성과 반대로 거동하며, 지진 시 바닥판과 받침판의 상대 변위를 허용하면서도 복원력을 제공해 에너지 소산을 유도
- 외곽의 얇은 기둥들이 하중을 분산하여 전달
- 각 기둥과 바닥판 사이에 종이를 부착하여 정지 마찰력을 줄임으로써, 상대적으로 작은 지진력에도 면진장치가 원활히 작동하도록 유도

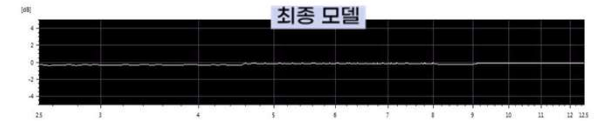
## 고유주기 탐색



항목	Start 조건	Stop 조건
주파수	2.5 Hz	12.5 Hz
가속도	0.0262 g	0.629 g
속도	0.0157 m/s	0.0785 m/s
변위	1 mm (통일)	1 mm (통일)

- 설계스펙트럼가속도가 최대를 나타내는 0.08~0.4sec(2.5~12.5Hz) 구간에서 사인 정현파 스위프 가진을 수행

- 주파수를 서서히 변화시키며 응답을 계속하여, 공진 발생 여부를 확인 하고 구조물의 고유주기를 탐색

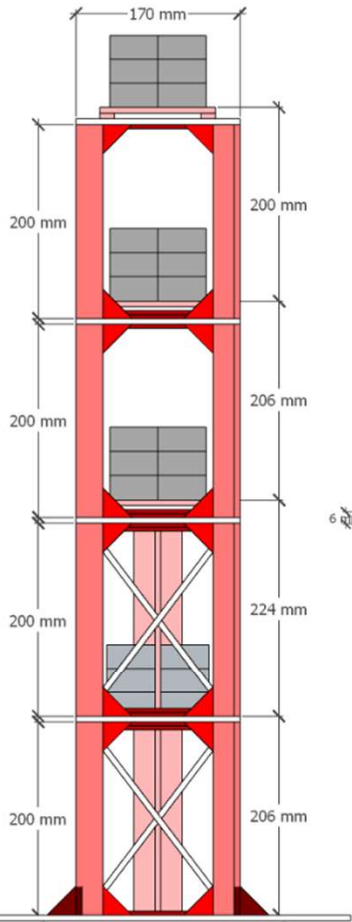


- 가속도 센서 계측 결과(오차율) 정상적인 선형 형태로 나타남
- 외관상으로도 큰 흔들림이나 공진 현상이 관찰되지 않음

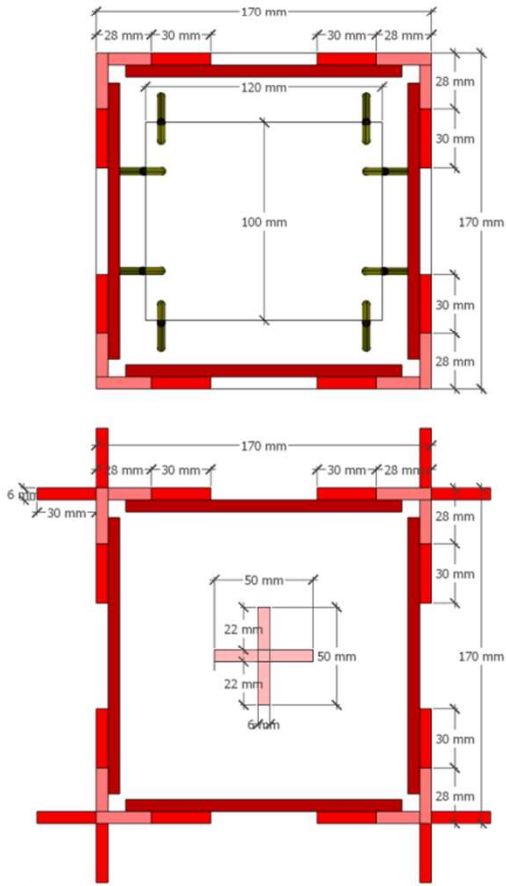
- 면진장치는 구조물과 하중블록 사이에 유연한 층을 형성하여 전체 시스템의 횡강성을 낮추게 됨
  - 이로 인해 구조물의 고유주기가 장주기 영역으로 연장되며, 설계스펙트럼 최대 응답 영역을 벗어남

# 3 최종 모델

입면도



평면도



공정표 및 구조계산서

구분	재료명	소요시간												
		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	
설계	재료검수	10												
	도면부작		10											
	이종블록 부착			20										
	스틸립작도			10	10									
	기조판 작도			10	10									
부재 제작	플레이트 절단		20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
	현치 절단													
	스틸립 절단													
	면진판 단공													
	기둥 제작													
시공	코어 제작													
	코어제작													
	면진장지 제작													
	기둥, 코어 슬래브 조립													
	면치, 보, 가새 부착													

부재명	규격	수량	재료명	재료 크기	단가	수량	합계	
슬래브	170*170*6	4	MDF Base	400*400*6	기본 제공	1	-	
코어1	50*6*200	2	MDF Plate	200*200*6	100	10	1000	
코어2	22*6*200	4	MDF Strip	600*4*6	10	18	180	
기둥1	28*6*200	16	고무줄	600	40	2	80	
기둥2	22*6*200	16	A4 용지	A4	10	1	10	
현치1	40*40*6	24	접착제	20g	200	2	400	
현치2	30*30*6	48	총 합액(백만원)					1670
보	15*6*4	48						
가새1	24*6*4	8						
가새2	18.5*6*4	8						
면진판	120*100*6	3						
면진기둥	20*15*6	16						
면진종이	20*40	16						
고무줄	10	12						