

# “구조물 붕괴방지를 위한 내진설계”

## 2025 구조물 내진설계 경진대회

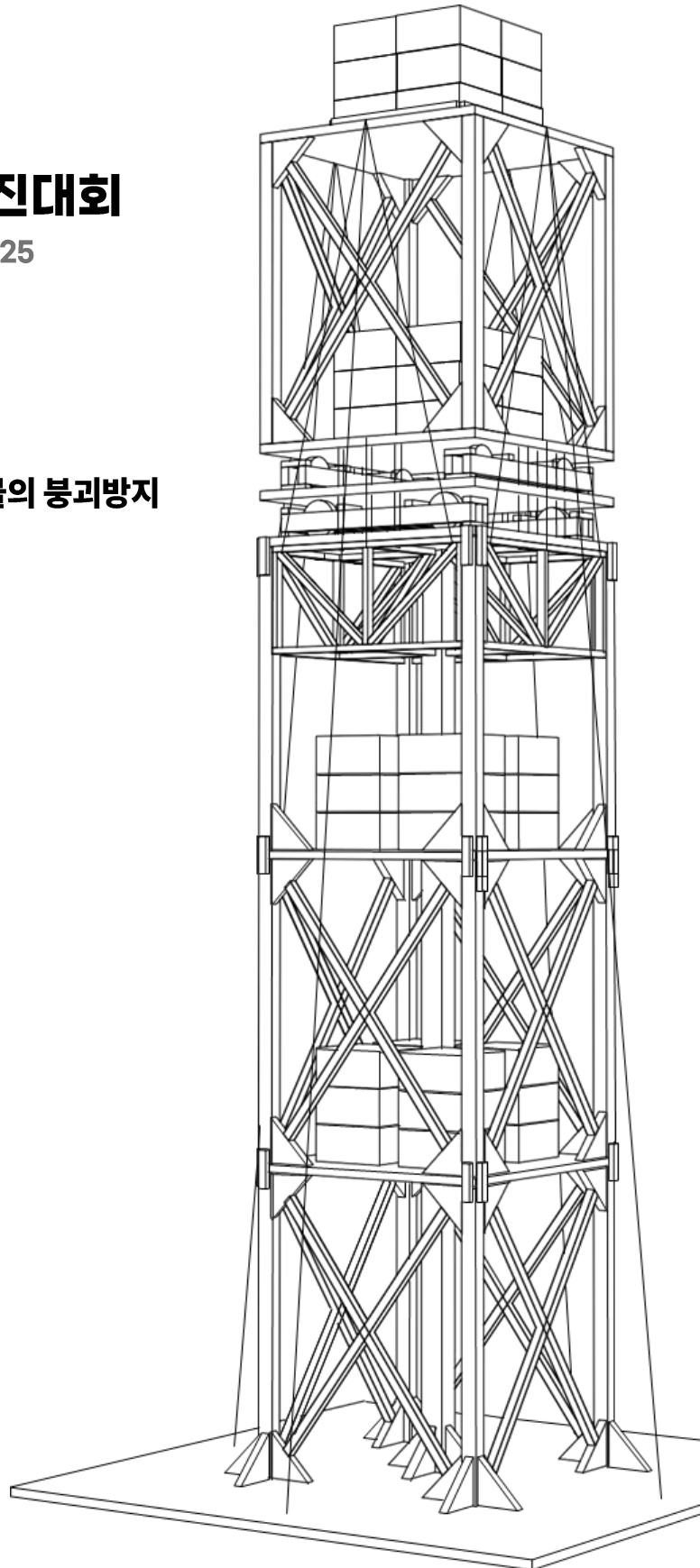
Seismic Structural Design Contest 2025

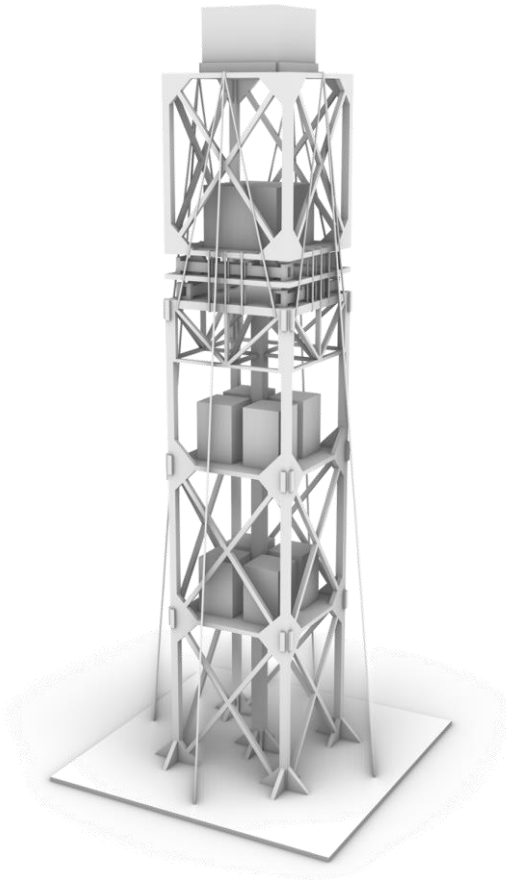
지도교수 : 이상호 교수님

팀명 : INNOSYS

대학 : 부산대학교 건축공학과

제목 : 중간층 면진을 활용한 구조물의 붕괴방지





## 01. INTRO

- 팀 소개
- 구조물 심사 기준
- 설계 개념
- 지진파 분석
- 재료 물성치 분석

## 02. MAIN

- 면진층 구성요소 선정
- 구조설계 개요
- 실험 및 분석
- 구조해석프로그램 분석
- 붕괴메커니즘

## 03. CONCLUSION

- 평면도&입면도
- 경제성 분석
- 시공성 분석

## Team 팀 소개



<INNOSYS>

INNOSYS는 부산대학교 건축공학과 소속 동아리로 'INNOvative Structure sYSTEM'의 약어에서 비롯되었습니다.

건축 구조의 기본 개념을 바탕으로 창의적 사고를 접목하여 기능적이고 혁신적인 구조 시스템을 개발하는 것을 지향하며 이러한 목표를 구체화하고 실현 가능한 대안을 제시하는 데 중점을 두고 있습니다.

부산대학교 건축공학과

**이상호** 자문 및 지도교수

### 박규남 팀장

- 대회규정분석
- 지진파 분석
- 보고서 제작
- 구조물 제작

### 한상훈 팀원

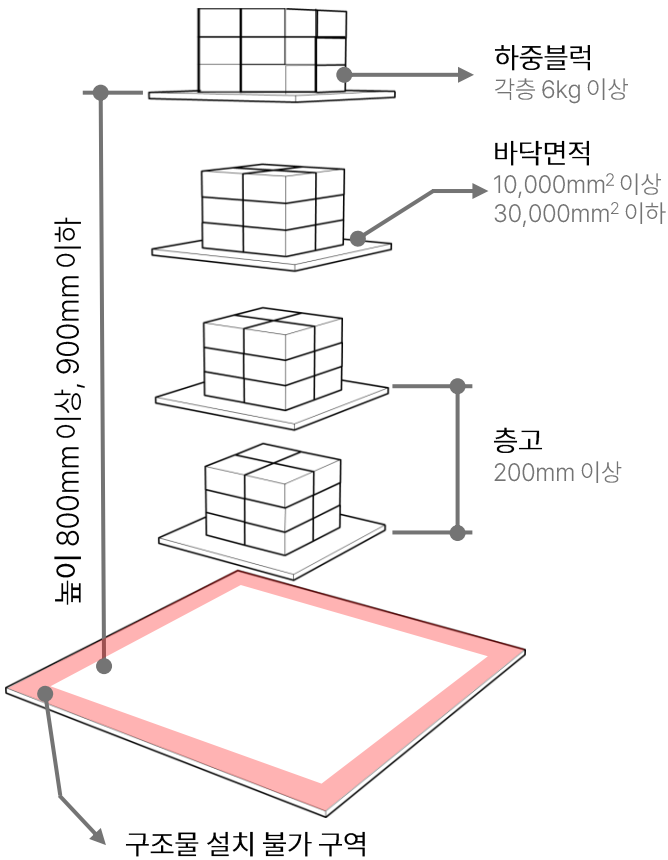
- 물성치 분석
- 경제성 분석
- 시공성 분석
- 구조물 제작

### 김무빈 팀원

- 모델링
- 구조해석
- 시공성 분석
- 구조물 제작

### 정승아 팀원

- 물성치 분석
- 경제성 분석
- 시공성 분석
- 구조물 제작



## 지진하중 분석

재현주기 (년)	유효수평지반가속도 (S)
500	0.3 g
2400	0.6 g

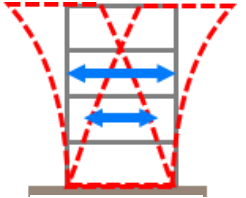
\*구조물의 파괴는 0.7g에 정규 분포하여 발생할 것

성능목표	
재현주기 (년)	구조물의 성능 수준
500	기능수행, 즉시복구
2400	붕괴방지

기능수행: 구조적 손상이 일어나지 않은 상태

붕괴방지: 치명적인 구조적인 손상이 발생하지 않은 상태  
Ex) 구조물의 붕괴, 하중블럭 이탈 및 추락, 수직재의 3군데 이상 파단, 작품의 기초판 이탈

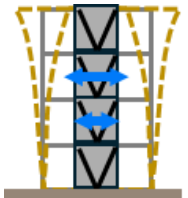
## 02 설계 개념 Conceptual Plan



**내진**

건물 강도·강성을 높여 구조물 자체의 내력으로 지진에 저항

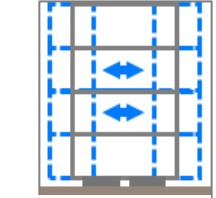
일체화 벨트트러스  
X자 가새  
중앙부 기둥



**제진**

건물의 제진 장치를 통해 지진력에 저항

실제 모형 구현에 한계가 있어 제외



**면진**

면진장치를 이용하여 지반과 건물을 분리

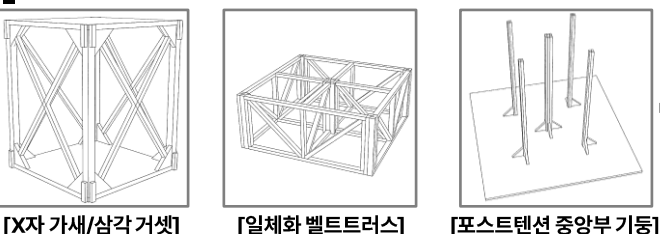
**BTI 개발 (Bi-Track-Isolator)**

### 기초 면진 vs 중간층 면진

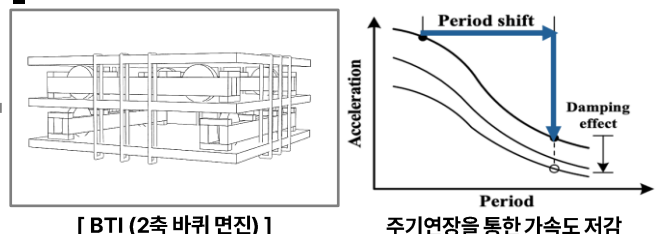
항목	기초 면진	중간층 면진
면진층 위치	지반과 건축물 사이	건축물의 중간
적용 범위	저층 건축물	중·고층 건축물
면진 대상 질량	구조물 전체 질량	구조물 부분적 질량

고층건물에 기초 면진 적용 시 과도한 전도모멘트로 인한 구조적 불안정성을 해결하기 위해 제한

### 저층부 - 내진을 통한 강도·강성 증가



### 고층부 - 면진을 통한 주기 연장



항목	위험도계수 (I)	지진구역계수 (Z)	성능목표
500년	1	0.3g	기능수행
2,400년	2	0.3g	붕괴방지

\* 지반응답증폭계수  
 - 단주기 ( $F_a$ ) : 1.5  
 - 1초 주기 ( $F_v$ ) : 1.5

### 설계 스펙트럼 가속도

- 단주기 설계 스펙트럼 가속도 ( $S_{DS}$ )

$$= S \times 2.5 \times F_a \times \frac{2}{3} \quad (F_a = 1.5)$$

=> 500년 : 0.75g / 2400년 : 1.5g

- 1초 주기 설계 스펙트럼 가속도 ( $S_{D1}$ )

$$= S \times F_v \times \frac{2}{3} \quad (F_v = 1.5)$$

=> 500년 : 0.3g / 2400년 : 0.6g

### 지진파의 주기

-  $T_0 = 0.2 \times S_{D1}/S_{DS}$

=> 500년 : 0.08sec / 2400년 : 0.08sec

-  $T_s = S_{D1}/S_{DS}$

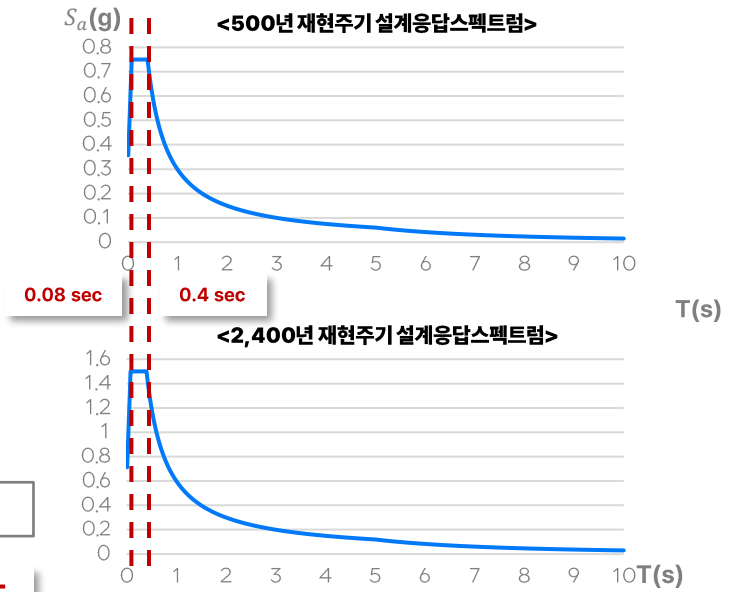
=> 500년 : 0.4sec / 2400년 : 0.4sec

⇒  $T_L = 0.4sec$

0.08 ~ 0.4 sec 에서 설계 스펙트럼 가속도 최대

Sol)

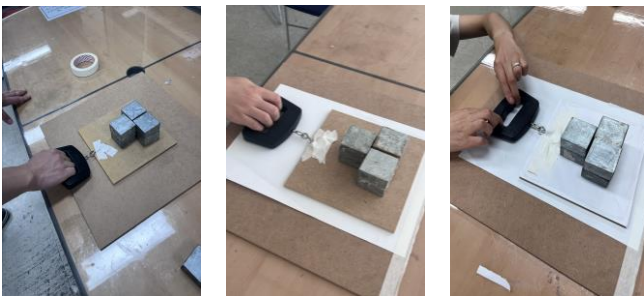
1. 구조물 고유 주기 0.08 sec 이하 (0.08sec이하 불가)
2. 구조물 고유 주기 0.40 sec 이상 (변진을 통한 주기 연장)



# 04 물성치 분석

Material Property Analysis

### 마찰면 마찰계수

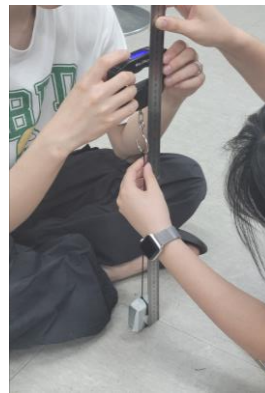


재료명	MDF-MDF	MDF-A4	A4-A4
물성치			
하중 (F)	1.13N	0.94N	0.6N
질량 (m)	3kg	3kg	3kg
운동마찰계수	0.37	0.31	0.2

$$F_K = \mu_K N \quad (F_K: \text{마찰력}, \mu_K: \text{마찰계수}, N: \text{수직항력})$$

A4-A4의 마찰계수가 가장 적은 것을 확인  
 → 변진층 마찰 감소를 위해 사용

### 고무줄 및 strip 탄성계수



고무줄 직경 2.0mm

부재명	고무줄
물성치	
단면적(mm <sup>2</sup> )	3.14
변위(mm)	20
탄성계수(Mpa)	0.78

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{PL}{A\Delta L} \quad \begin{matrix} \epsilon = 0.4 \\ \sigma = 0.31 \text{ Mpa} \\ E = \frac{0.31}{0.4} = 0.78 \text{ Mpa} \end{matrix}$$



부재명	Strip
물성치	
단면2차모멘트 (mm <sup>4</sup> )	32
처짐(mm)	10
탄성계수(Mpa)	1021.8

$$E = \frac{PL^3}{3EI} \quad \begin{matrix} I = \frac{6 \times 4^3}{12} = 32 \text{ mm}^4 \\ E = \frac{7.84 \times 50^3}{3 \times 32 \times 10} = 1021.8 \text{ Mpa} \end{matrix}$$





## 외곽 기둥, 중앙부 기둥 물성치 분석 및 비교



부재명 물성치	외곽 기둥
길이(mm)	100
P(N)	15
단면2차모멘트 (mm <sup>4</sup> )	832
처짐(mm)	5
탄성계수(Mpa)	1209.3



부재명 물성치	중앙부 기둥
길이(mm)	200
P(N)	34.3
단면2차모멘트 (mm <sup>4</sup> )	5120
처짐(mm)	10
탄성계수(Mpa)	1786

Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
			
8×12 mm <sup>2</sup>	10×10 mm <sup>2</sup>	16×16 mm <sup>2</sup>	22×22 mm <sup>2</sup>
96 mm <sup>2</sup>	96 mm <sup>2</sup>	192 mm <sup>2</sup>	288 mm <sup>2</sup>
$I_x = 1152 \text{ mm}^4$ $I_y = 512 \text{ mm}^4$	$I_x = 832 \text{ mm}^4$ $I_y = 832 \text{ mm}^4$	$I_x = 5120 \text{ mm}^4$ $I_y = 5120 \text{ mm}^4$	$I_x = 16320 \text{ mm}^4$ $I_y = 16320 \text{ mm}^4$

### <켄틸레버 보의 처짐식 이용>

$$E = \frac{PL^3}{3\delta L} \quad \begin{matrix} E: \text{탄성계수} \\ P: \text{하중} \\ L: \text{길이} \\ \delta: \text{처짐량} \end{matrix} \quad I = \frac{bh^3}{12} \quad \begin{matrix} I: \text{단면2차모멘트} \\ b: \text{폭} \\ H: \text{높이} \end{matrix}$$

균일한 단면성능과 힘의 저항을 고려하여 10×10 mm<sup>2</sup> 기둥을 외곽 기둥으로 선정

내진성능, 경제성, 바닥면적 제한을 고려하여 16×16 mm<sup>2</sup> 기둥을 중앙부 기둥으로 선정

## 05 면진층 구성요소 선정 Selection of Seismic Isolation Layer Component

### <실험조건>

면진판 위의 슬라브에 12kg의 하중을 올린 후 슬라브가 움직이는 순간의 힘 측정



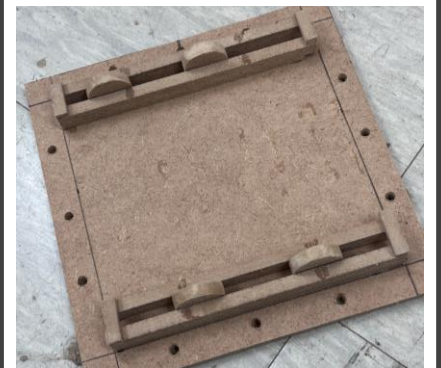
### 종이공 면진

- ✓ 마찰력 24.5N
- ✓ 원형 제작의 어려움 존재
- ✓ 많은 양의 접착제 필요
- ✓ 12kg의 하중에 변형 발생



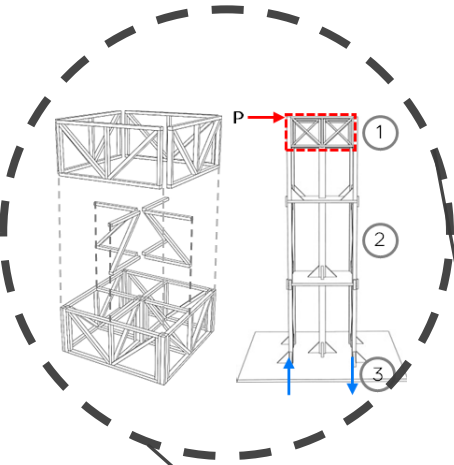
### 나무공 면진

- ✓ 마찰력 26.3N
- ✓ 강도 확보  
→ 하중이 가해져도 변형 x
- ✓ 완벽한 구형 제작 불가능
- ✓ 특정 각도에서 회전 불가능
- ✓ 제작시간 오래 소요



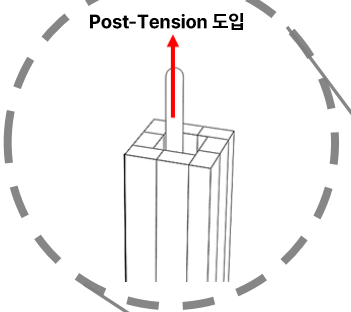
### 나무바퀴 면진

- ✓ 마찰력 3.9N
- ✓ 고무줄 추가 시 마찰력 14.7N
- ✓ 강도 및 회전력 확보
- ✓ 비교적 가공 난이도 낮음
- ✓ 마찰력 가장 적음  
→ 면진 성능 우수



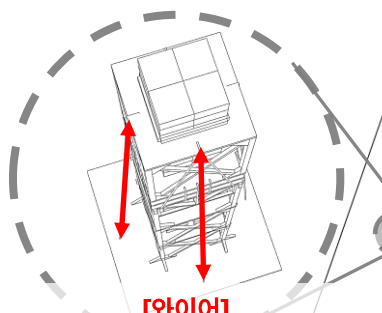
### [Integrated-Belt Truss System]

- ① 코어에 발생하는 모멘트를 기둥에 전달
  - ② 중력+횡력에 저항
  - ③ 코어와 기둥이 전도 모멘트를 분담하여 저항
- 전단력에 비해 전도 모멘트가 큰 세장한 건물이므로 아웃리거 적용
  - 기둥은 벨트트러스로 연결하여 일체화
  - 아웃리거 연결부의 축강성 증대를 위해 중앙부기둥을 함께 적용
  - 부재 최대길이 150mm 이하로 제작되어, 수평방향으로 긴 부재 제작 후 남은 부재 사용



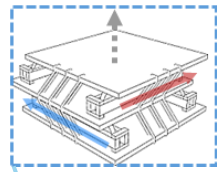
### [Post-Tension 중앙부 기둥]

- 완성된 중앙부 기둥을 기초판 천공 후 고정된 뒤 고무줄을 넣고 잡아당긴 후 긴결 및 정착하여 중앙부기둥에 압축력 작용
- 초기 긴장력에 의한 압축력을 통해 수평하중에 의한 모멘트를 저감하여 구조물을 연직방향으로 굳은 상태를 유지시켜주는 셀프센터링 효과 발생



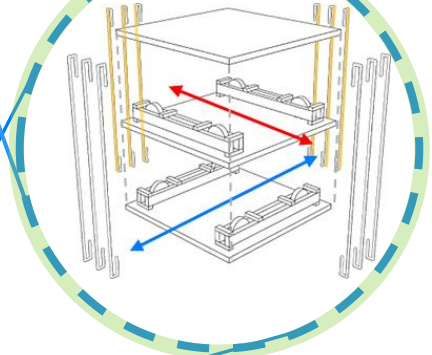
### [와이어]

- 기초판과 지붕을 연결시켜 면진층 변위에 의한 전도 방지



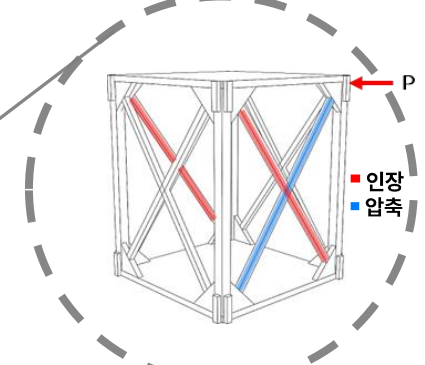
- 주거동 방향이 아닌 방향에 대한 마찰을 줄이기 위해 종이를 부착하여 대각선방향으로 원활한 거동 가능

- 면진층 변위에 의한 복원력
- 1축 방향 변위(X축)
- 1축 방향 변위(Y축)



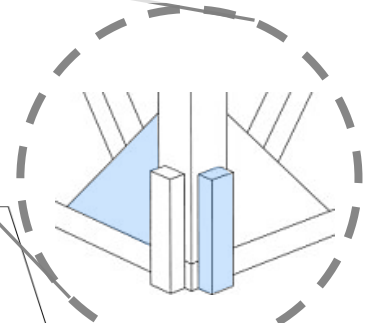
### [Bi-Track-Isolator]

- 나무 바퀴를 이용한 2방향 면진 시스템
- 나무 바퀴의 회전에 의한 수평변위 발생
- 면진층은 큰 변위와 긴 주기를 가져 받는 스펙트럼 가속도가 크게 감소 => 지진하중에 의한 건물의 붕괴 방지
- 케이블의 복원력으로 반대하중에 대비하여 나무 바퀴 원위치



### [X가새]

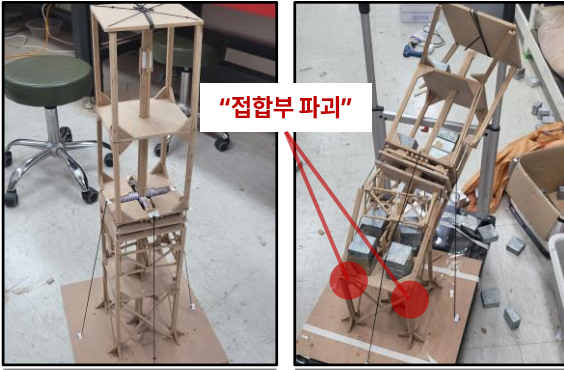
- 강축 방향으로 설치하여 수평하중에 대하여 변위 제어
- 하부층 강성 증대
- 하중불력의 이탈 방지



### [JOINT DETAIL]

- 삼각거셋: 응력 집중부 보강
- 이음재: MDF 슬래브의 층상균열 방지

## 1차 모델 실험 및 분석



1차 모델

1차 모델 파단

### <실험 조건>

- 면진층 2층
- 종이댐퍼 사용
- 전층 중앙부 기둥 (포스트텐션)
- 외주 포스트텐션
- 면진층과 기초판 와이어 연결

파괴지점:  $a_{max}: 0.34m/s^2 \rightarrow 0.03g$

### <파괴 원인>

- 면진층 상부의 하중이 커 면진성능 부족
- 종이댐퍼 기능수행 불가
- 저층부에 상층부의 모든 하중이 집중되어 접합부 응력 집중으로 인해 파단

## 면진층 3층으로 이동

2층에 면진층 설치시 수평 하중에 의한 전도 발생 위험 대폭 증가  
→ 3층으로 면진층 이동 시 전도로 인한  
건물의 파괴위험 감소 및 사용 재료 절약 가능

## 구조해석 프로그램을 활용한 X자 가새, 일체화 벨트트러스 선정

[2400년 주기 2축 지진하중]

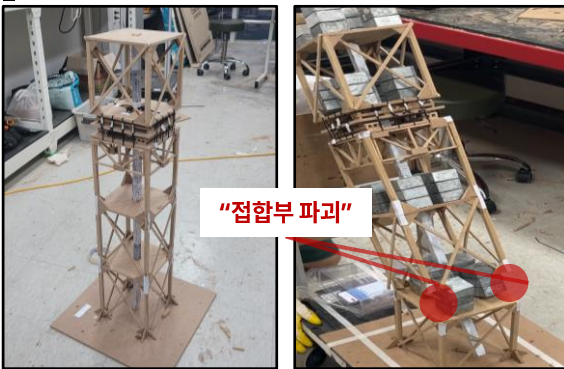
변형 형태				
위치	2층 벨트트러스	3층 벨트트러스	전층 X가새	전층 벨트트러스
변위	7.7mm	2.58mm	2.5mm	15mm
층당 가격	80(백만원)	80(백만원)	120(백만원)	60(백만원)

Hsdx Gen  
 POST - PROC3D18  
 2400년 주기 지진하중  
 HETIC2400  
 1.5946e+001  
 1.4497e+001  
 1.3047e+001  
 1.1597e+001  
 1.0148e+001  
 8.6922e+000  
 7.2425e+000  
 5.7889e+000  
 4.3401e+000  
 2.8943e+000  
 1.4497e+000  
 0.0000e+000

- ✓ 3층 벨트트러스 사용시와 전층 X가새 사용시의 변위 발생량이 비슷함
- ✓ 벨트트러스 제작은 중앙부 기둥 제작 후의 잔여부재 사용  
→ 가새 제작과 비교하였을 때 strip 4개 절약 가능



## 2차 모델 실험 및 분석



2차 모델

2차 모델 파단

### <실험 조건>

- 면진층 3층
- 고무줄 댐퍼 사용
- 전층 중앙부 기둥 (포스트텐션)
- 면진 레일층 3개를 고무줄 하나로 연결
- 면진층과 기초판 와이어 연결

파괴지점:  $a_{max}: 0.42m/s^2 \rightarrow 0.04g$

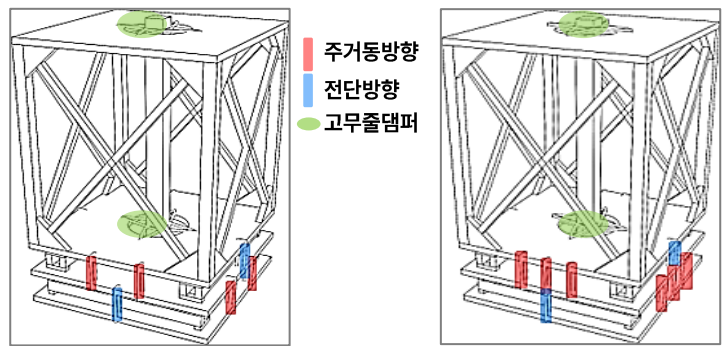
### <파괴 원인>

- 면진층의 강성이 강해 면진효과 X
- 1차실험과 마찬가지로 저층부에 응력집중
- 접합부의 종이보강이 찢어지며 접합부 파단

### <보완해야할 점>

- 면진층의 고무줄 개수변화를 통해 강성 조절
- 접합부에 종이 대신 MDF Strip을 부착하여 접합부 보강

## 2.5차 면진층 적정 강성 실험 및 분석



### <실험 조건>

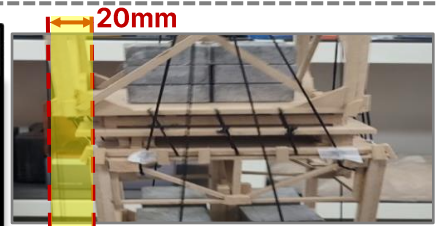
- 주거동방향 2줄
- 전단방향 1줄
- 고무줄댐퍼 4방향 1줄

### <실험 조건>

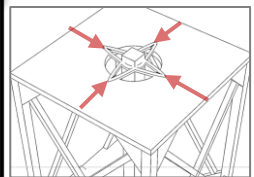
- 주거동방향 3줄
- 전단방향 1줄
- 고무줄댐퍼 4방향 2줄



<최적의 면진층>



<면진 효과>



중량부 기둥과 면진층 상부를 고무줄로 연결하여 최상층의 전도 억제

<고무줄 댐퍼>

## 3차 모델 실험 및 분석



3차 모델



3차 모델 파단

### <실험 조건>

- 중앙부 기둥 3층 높이
- 각재를 통한 접합부 보강
- 실험을 통해 찾은 적정 면진층 사용
- 하중분력 중앙으로 배치

파괴지점:  $a_{max}: 1.56m/s^2 \rightarrow 0.16g$

### <파괴 원인>

- 최상층의 전도에 의한 최상층 기둥 파단
- 최대 변위 발생 시 나무 바퀴의 이탈 및 파손

### <보완해야할 점>

- 최상층의 고무줄 조절을 통해 전도 최소화
- 면진층 강성 강화 및 레일 보강

## 4차 모델 실험 및 분석



4차 모델



4차 모델 파단

### <실험 조건>

- 면진층의 나무바퀴 거동 조정
- 고무줄 댄퍼 제거
- 최상층을 고무줄로 잡아주어 전도 최소화
- 면진층 강성 강화 및 레일 보강

파괴지점:  $a_{max}: 3.37m/s^2 \rightarrow 0.34g$

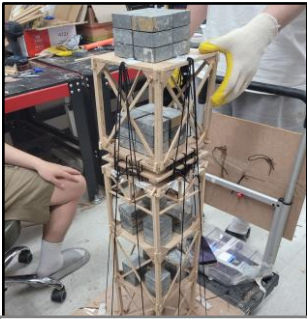
### <파괴 원인>

- 최상층 전도에 의한 최상층 기둥 파손

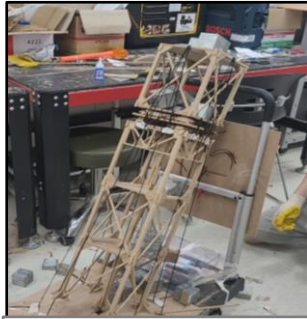
### <보완해야할 점>

- 최상층 기둥부재 접합부 보강
- 면진층의 강성 조정

## 5차 모델 실험 및 분석



5차 모델



5차 모델 파단

### <실험 조건>

- 최상층 기둥 접합부 MDF Strip을 활용하여 보강
- 면진층 고무줄 개수 변화를 통한 강성 미세조정

파괴지점:  $a_{max}: 5.0m/s^2 \rightarrow 0.51g$

### <파괴 원인>

- 면진층의 강성이 커 면진 효과 저하
- 전 층의 하중을 지지하는 1층 중앙부 기둥 파괴

### <보완해야할 점>

- 면진층의 고무줄 개수를 줄여 면진층의 강성 약화

## 최종(6차) 모델 실험 및 분석



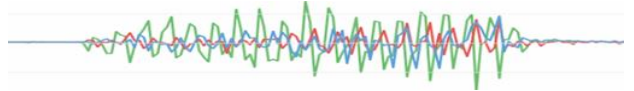
6차 모델



6차 모델 파단

### <실험 조건>

- 면진층의 하부와 면진층의 강성 조정
- 중앙부 기둥 접합부 보강



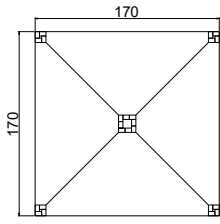
파괴지점:  $a_{max}: 6.79m/s^2 \rightarrow 0.69g$

### <파괴 원인>

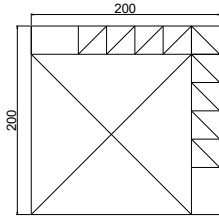
- 0.7g에서 전도에 의해 바퀴가 탈락하며 면진층 고무줄 파단

구분	1차 실험	2차 실험	2.5차 실험	3차 실험	4차 실험	5차 실험	최종 실험
파괴지점	0.03g	0.04g	-	0.16g	0.34g	0.51g	0.69g
특이사항	• 면진층 2층 • 종이 댄퍼	• 면진층 3층 • 고무줄댄퍼	• 고무줄 수량 조절	• 중앙부기둥 높이 조정	• 면진층 강성 /레일 보강	• 면진층 강성 강화	• 면진층 강성 약화

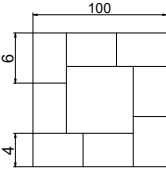
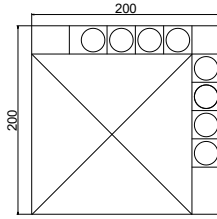




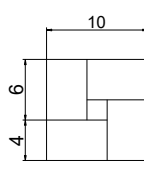
<바닥판>



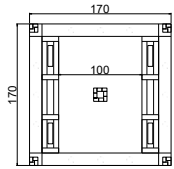
<MDF PLATE>



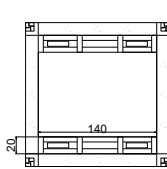
<중앙부 기둥>



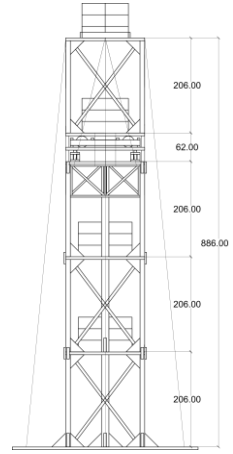
<외곽 기둥>



<레일1층>



<레일2층>



<입면도>

## 11 경제성 분석 Economic Analysis

재료명	단위	규격	부재명	수량	단가 [백만원]	합계 [백만원]
MDF Base	개	400mm x 400mm x 6mm	기초판	-	-	-
MDF Strip	개	600mm x 4mm x 6mm	기둥	57	10	570
			X자 가새			
			레일			
MDF Plate	개	200mm x 200mm x 6mm	바닥판	6	100	600
스트링 고무줄	식	600mm	와이어	8	40	320
A4지	장	210mm x 297mm	마찰판	2	10	20
접착제	개	20g	-	2	200	400
총액						1910

## 12 시공성 분석 Constructability Analysis

구분	소요시간										
	1시간				2시간				그 외		
	15분	30분	45분	60분	15분	30분	45분	60분	15분	30분	+α
제작	부재 작도	████████████████████									
	바닥판 제작		████████								
	기둥 제작			████████████████████							
	보강재 제작			████████████████████							
	면진층 제작			████████████████████							
시공	기둥 설치				████████████████████						
	바닥판 설치					████████████████████					
	보강재 설치							████████			
	면진층 설치							████████			
	와이어 설치								████████		
마감	하중블럭 설치									████████	
	마무리 작업									████████	
총 공정시간									2시간 30분		