

2025년도

# 구조물 내진설계 경진대회

: 구조물 붕괴방지를 위한 내진설계

“경사형 면진시스템을 활용한  
원점 복귀형 내진 구조체 설계”

지도교수: 신동현 교수님

팀 명: 2놈들 바라?

대 학: 부산대학교 건축공학과

## 팀장 최지원

- 대회규정분석
- 구조물 제작
- 경제성 분석
- 설계제안서 제작

## 이상민

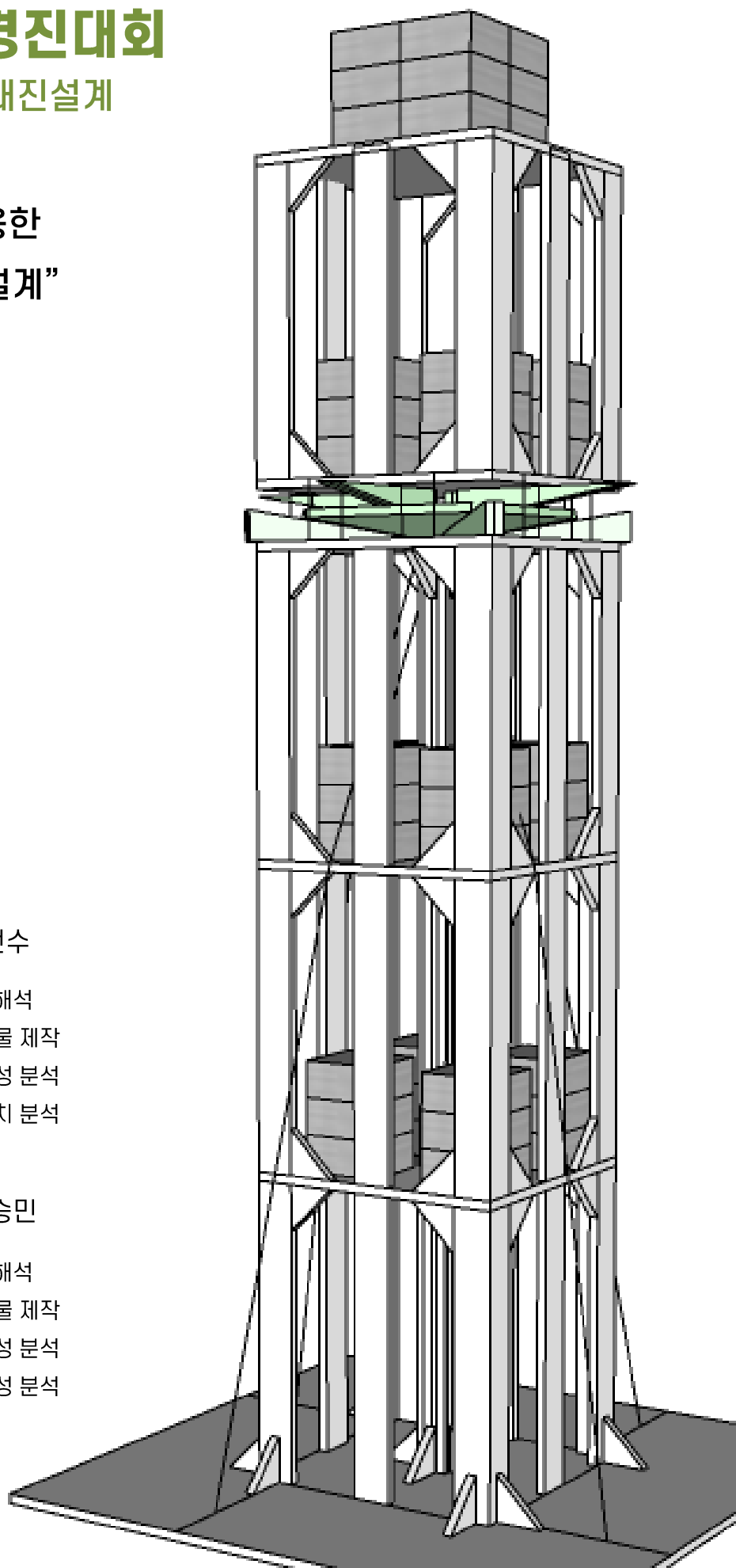
- 구조해석
- 구조물 제작
- 시공성 분석
- 3D 모델링

## 박건수

- 구조해석
- 구조물 제작
- 시공성 분석
- 물성치 분석

## 이승민

- 구조해석
- 구조물 제작
- 시공성 분석
- 경제성 분석



# 구조물 붕괴방지를 위한 내진설계

## 작품 심사 기준

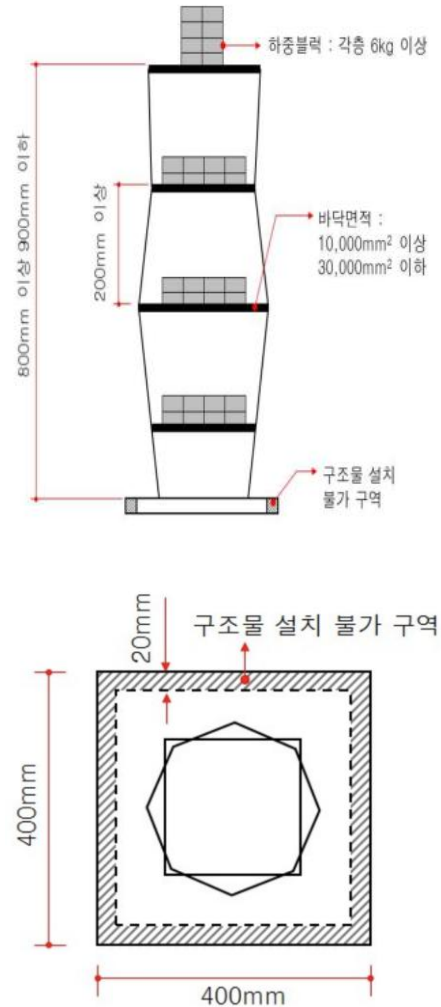
1. 구조물의 내진설계 목표와 성능수준의 이해
2. 구조물의 지진 시 **거동 예측 능력 및 부재강도 평가 능력**
3. **500년** 빈도 지진발생 시 **기능수행** 수준 내진설계
4. **2,400년** 빈도 지진발생 시 **붕괴방지** 수준 내진설계
5. 설계지진 초과 시 구조물의 **붕괴 메커니즘을 고려한 파괴를 유도하는 정밀한 설계**
6. **시공성과 경제성**을 고려하고 구조물의 **심미성과 창의성**을 추구하는 설계
7. **구조해석 능력** 외 도면화, 수량산출 및 내역작성 기술

## 작품 제작 재료

재료명	단위	규격	단위수량[개]	단가[백만원]
MDF Base	개	400mm×400mm×6mm	1	(기본제공)
MDF Strip	개	600mm×4mm×6mm	1	10
MDF Plate	개	200mm×200mm×6mm	1	100
스트링 고무줄 (Φ2~3mm)	식	600mm	1	40
A4지	장	210mm x 297mm	1	10
록타이트 401	개	20g	1	200

※ 재료의 구입 수량에는 제한이 없으나, 총 구입 비용 2,400백원 초과 시 감점

## 구조물 제작 규격



## 평가 단계

구성	평가내용	배점(100)	
1단계	제안형식의 기능성, 독창성, 디자인 우수성	10	
	내진구조에 대한 이해 및 설계 능력	7	
	붕괴 메커니즘에 대한 이해 및 설계	3	
2단계	설계안 설명 (발표 및 토론)	10	
	모형제작 및 Shaking Table 실험	시공성: 10	70
		경제성: 10	
구조성: 50			

※ 구조성

파괴 속도	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2
구조성	9	14	19	25	28	30	28	25	19	14	9

# 내진설계목표 및 성능수준

## 건축물 내진설계기준 KDS 41 17 00

### 2.1 일반사항

- (1) 구조물은 기본적으로 낮은 지진위험도의 지진에 대하여 기능을 유지하고, 높은 지진위험도의 지진에 대해서는 붕괴를 방지함으로써 인명의 안전을 확보하는 것을 내진설계의 원칙으로 한다
- (2) 높은 내진등급의 건축물은 중요도를 고려하여 상향된 지진위험도에 대하여 내진설계를 수행한다

표 2.4-2 건축물의 내진등급별 최소성능목표

내진등급	성능목표	
	재현주기 (년)	성능수준
특	2400년	인명보호
	1000년	기능수행
I	2400년	붕괴방지
	1400년	인명보호
II	2400년	붕괴방지
	1000년	인명보호

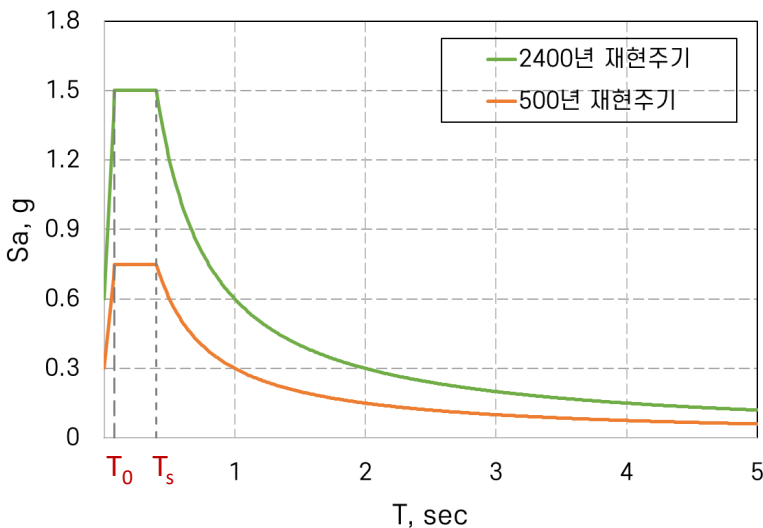
본 경진대회의 성능목표

성능목표	
재현주기	구조물의 성능수준
500년	기능수행
2400년	붕괴방지

**기능수행:** 구조적 손상이 발생하지 않는 상태, 기타 요소의 파손 및 낙하 허용  
**붕괴방지:** 구조물의 완전 붕괴, 하중블록의 이탈 또는 탈락, 바닥판을 이탈하는 경우, 수직하중을 지지하는 부재가 3개 이상 파단 등

## 설계응답스펙트럼

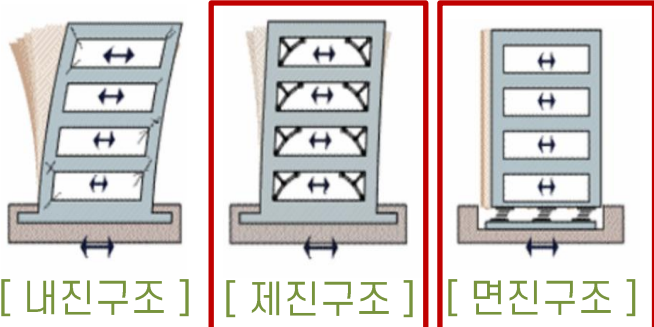
설계계수	500년 재현주기	2400년 재현주기
유효지반가속도 $[S]$	0.3	0.6
단주기 지반증폭계수 $[F_a]$	1.5	1.5
1초주기 지반증폭계수 $[F_v]$	1.5	1.5
단주기설계스펙트럼 가속도 $[S_{DS} = S \times 2.5 \times F_a \times 2/3]$	0.75	1.5
1초주기 설계스펙트럼가속도 $[S_{D1} = S \times F_v \times 2/3]$	0.3	0.6
$T_0 = 0.2 \times S_{D1} / S_{DS}$	0.08	0.08
$T_s = S_{D1} / S_{DS}$	0.4	0.4
$T_L$	5	5



- ①  $T \leq T_0, S_a = 0.6 \times S_{DS} \times \frac{T}{T_0} + 0.4 \times S_{DS}$
- ②  $T_0 < T \leq T_s, S_a = S_{DS}$
- ③  $T_s < T \leq T_L, S_a = S_{D1} / T$
- ④  $T > T_L, S_a = S_{D1} \times T / T^2$

0.08 ~ 0.4 사이의 주기에서  
 최대가속도가 발생

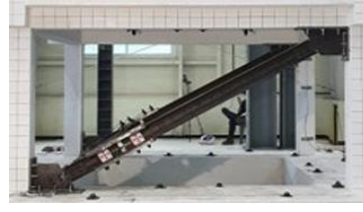
# DESIGN IDEA



내진설계	건물의 강성과 강도를 높여 지진하중에 저항하는 설계
제진구조	건물에 부여되는 지진 에너지를 제진 장치로 상쇄하는 설계
면진구조	면진장치를 통해 건물의 주기를 변화, 지진에너지를 분산하는 설계

## 제진 구조

### 변위 의존형 제진 장치



### 속도 의존형 제진 장치

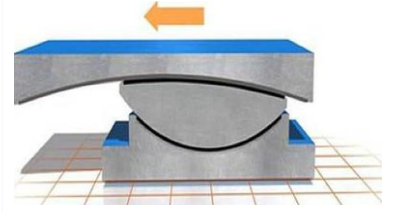


## 면진 구조

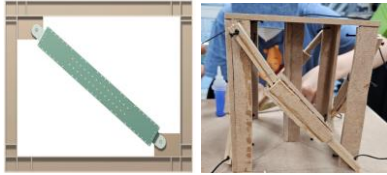
### 적층 고무 면진



### 슬라이딩 면진



### Step 1. 제진 장치의 적용



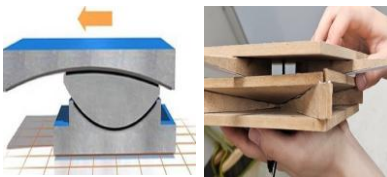
- 비좌굴가새의 형태로 강성 및 강도를 보강하고 에너지를 소산하는 제진장치를 제작하고자 하였으나 목재 및 고무줄의 재료적인 특성으로 인해 제진장치의 이력 거동을 모사하기가 어려움
- 목재 사이의 마찰을 이용한 마찰형 좌굴방지가새를 제작하고자 하였으나, 가새의 양단 편접합의 구현에 어려움이 존재

### Step 2. 적층 고무 면진 개념 적용

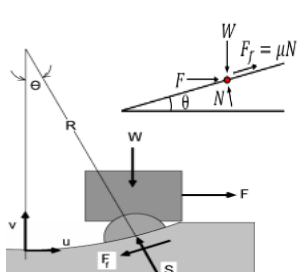


- 종이의 복원 성능을 활용하여 면진 장치의 복원력 특성을 모사하고자 하였으나, 종이의 낮은 초기 탄성강성으로 인해 면진층의 총강성이 낮아져 충분한 횡력 저항성능을 발휘하지 못하였음
- 목재나 고무줄로는 일반적으로 적층 고무 면진 장치의 중심부에 납과 같은 소성 변형 능력을 발휘할 수 있는 특징을 모사하기에는 한계가 있음

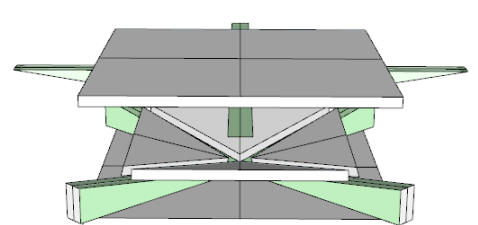
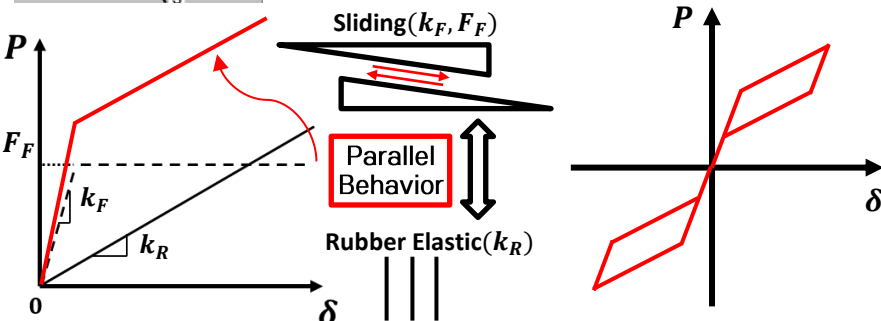
### Step 3. 슬라이딩 면진 장치의 적용



- 재료를 사이의 마찰거동을 활용하여 에너지 소산에 필요한 이력 거동을 모사할 수 있을 것으로 판단
- 마찰력은 수직항력에 비례하는 힘으로 하중의 크기가 정해지면 간단한 실험을 통해 마찰계수를 산정 고무줄과의 병렬 연결 관계를 통해 면진층의 강성을 손쉽게 조절할 수 있음.
- 경사 면진 장치의 기하학적 형상을 통해 낮은 마찰계수를 보강하고, 마찰 강성을 조절할 수 있도록 함



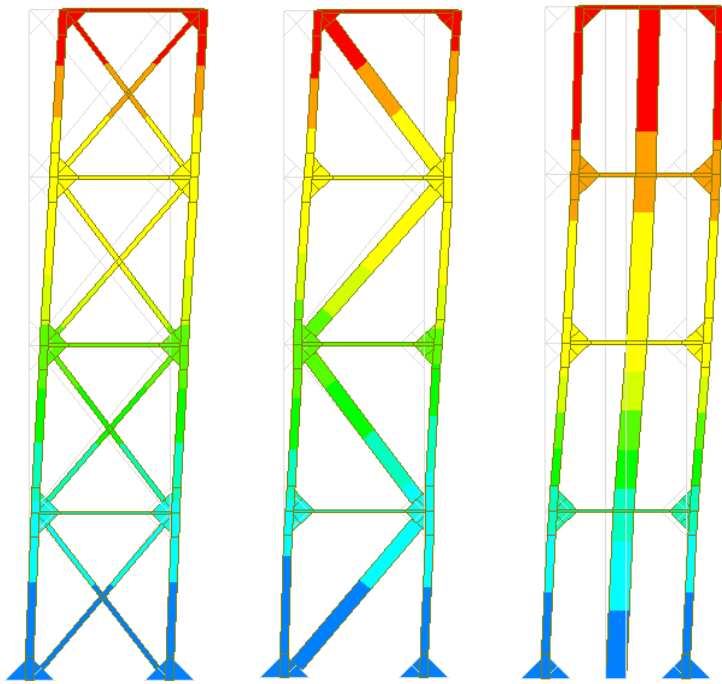
- Ball Bearing이나 원뿔형의 면진 장치는 재료 및 제작 도구의 한계로 인하여 삼각형 형태로 면진 장치 제작
  - 경사형 마찰 장치의 마찰력은  $w$ (수직항력),  $\theta$ (경사각),  $\mu$ (마찰계수)의 설계 변수를 기반으로 산정 가능
- $$F = F_r + F_f \approx W \tan \theta + W \mu = W(\tan \theta + \mu)$$
- $\mu$ 가 보다 크거나 같다면, Self-Centering 거동을 발휘하지 못하여 구조물의 잔류변형이 발생 가능.
  - 제안하는 경사형 슬라이딩 면진 장치의 경우 EigenValue Analysis를 통한 총 강성의 산정 시, 경사각이  $3^\circ \sim 5^\circ$ 일 때 최적의 경사각을 가지는 것으로 산정되었으나, 제작성 및 시공성을 고려하여  $5.5^\circ$  제작



제진 및 면진장치 시행착오

면진층 거동 분석

# 등가정적해석법을 이용한 내진설계



[ X 가새 ]

[ 일방향 가새 ]

[ 전단벽 ]

## 등가정적해석법

지진의 영향을 등가의 정적하중으로 환산한 후 이를 이용하여 정적해석을 수행하여 구조물의 지진에 의한 거동을 예측

	X 가새	일방향 가새	전단벽
주기	0.125s	0.122s	0.832s
최대 변위	9.42mm	9.06mm	7.24mm

## 사용계수

$$* C_s = S_{DS} \times I_E / R$$

R	T	I <sub>E</sub>	k	C <sub>s</sub>
1	0.08~0.40에 해당	1	1	1.5

## 하중산정

$$V \text{ (밀면전단력)} = C_s * W = 90N \quad * C_{vx} = w_i \times h_i^k / \sum_{i=1}^n w_i * hik, F_x = C_{vx} \times V$$

Floor	W <sub>i</sub>	h <sub>i</sub>	W <sub>i</sub> × h <sub>i</sub> <sup>k</sup>	C <sub>vx</sub> (수직분포계수)	F <sub>x</sub> (층별항하중)	V <sub>x</sub> (층전단력)
1	30N	0.23m	5.142	0.105	9.409	90
2	30N	0.46m	11.814	0.209	18.818	80.591
3	30N	0.69m	19.219	0.314	28.227	61.773
4	30N	0.82m	23.642	0.373	33.545	33.545

- 횡력에 저항하는 가장 효과적인 구조를 설계하기 위하여 3가지 조건에 대해 등가정적해석을 수행
- 3가지 구조 모두 0.08~0.4s 주기에 속하여 최대가속도를 발생시키는 구간에 해당
- 가장 적은 변위가 발생하는 전단벽 구조를 선택하여 구조물을 제작하기로 하였으며, 추가적으로 면진장치를 설치하여 구조물의 주기를 장주기화 시키고자 함.

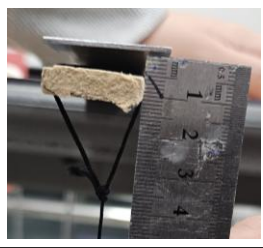
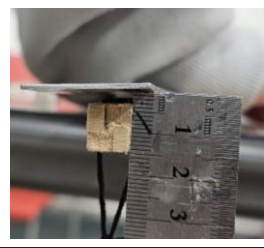
## 구조물의 붕괴 메커니즘



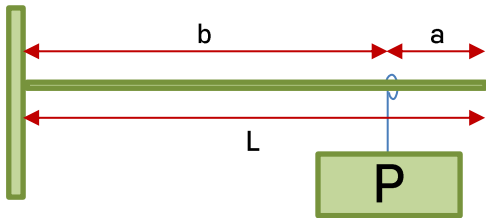
- 상대적으로 전단력을 많이 받는 1층이 붕괴
- 1차적으로 1층의 전단벽의 탈락, 2차적으로 1층 기둥과 바닥판 사이의 탈락을 붕괴 메커니즘으로 설정
- 실제 건물의 경우 상부층의 파괴를 유도하는 것이 안전성, 피난 등을 고려한 설계이나, 면진층의 파괴를 방지하고 내진설계 되어진 저층부의 파괴가 발생하도록 메커니즘을 유도함
- 면진층의 목적은 면진층 상부를 안전하도록 하는 것임

# 재료 물성치 분석

## 부재 강성 측정

	코어단면강성	기둥단면강성
		
P	9.8N	9.8N
a	20mm	20mm
b	80mm	80mm
L (a+b)	100mm	100mm
I	450mm <sup>2</sup>	832mm <sup>2</sup>
E	921N/mm	1022N/mm

$$\delta = \frac{Pb^2}{6EI} (3L - b) \rightarrow E = \frac{Pb^2}{6\delta I} (3L - b)$$



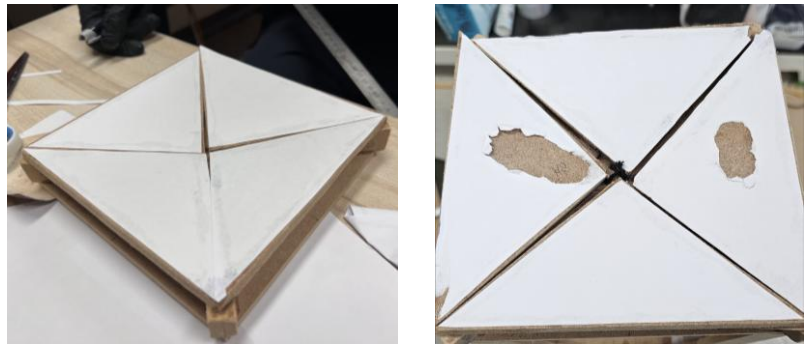
## 마찰계수 측정

	MDF-MDF	MDF-A4	A4-A4
$\mu$	0.38	0.24	0.21
F	3.72N	2.35N	2.06N

$$\ast F = \mu * N$$

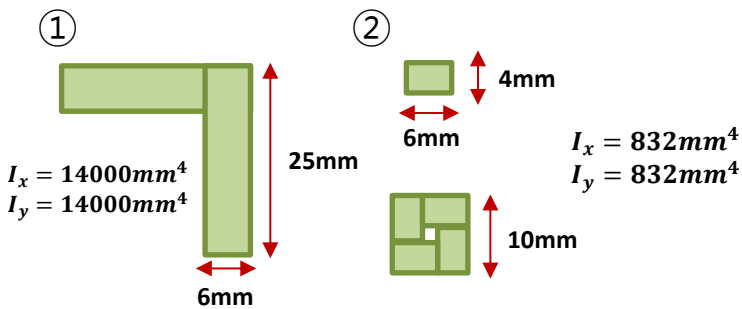


- 마찰계수는 MDF-> A4로 바꿀 수록 작아짐을 확인함



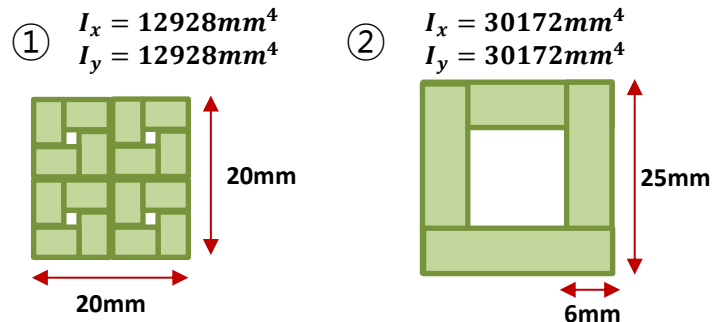
18kg 하중을 버티지 못하고 종이 찢김 현상 발생  
→ 종이-종이 에서 **MDF - 종이**로 변경

## 기둥 형상 채택



기둥 단면 결정은 단면 2차 모멘트가 큰 것으로 함, ② (strip 4개를 붙인 기둥)을 하려고 하였지만 넓은 'ㄱ'자 형태가 횡하중에 강하였기 때문에 채택 + trial and error 적인 부분에서 접착부위가 찢어지는 현상이 1번이 덜했음

## 코어 형상 채택

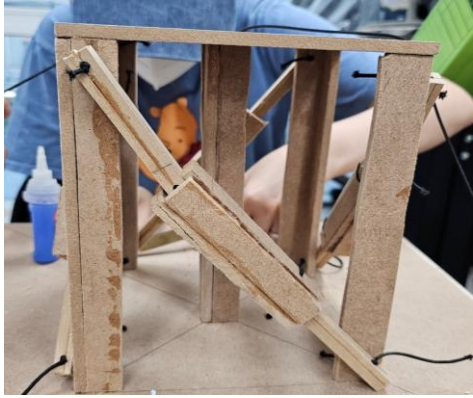


단면 2차 모멘트는 2번이 크지만, 경제성과 시공성을 고려했을 때 1번 단면을 채택 절단 없이 한번에 기둥(1-3층)을 세울 수 있다는 점에서 메가코어 채택, 또한 슬라브와 벽체 사이에 2번의 접합부위가 약한 단점을 1번 기둥이 보완할 수 있음

# 실험 및 분석

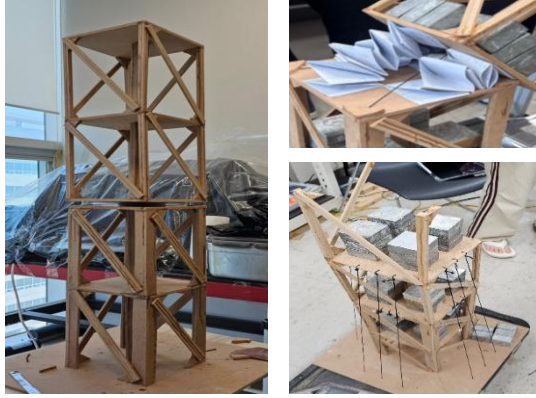
## 1차 모델 제작 및 실험 →

파괴 시 가속도: 0.13g → 0.4g



## 2차 모델 제작 및 실험 →

파괴 시 가속도: 0.31g



## 3차 모델 제작 및 실험

파괴 시 가속도: 0.25g



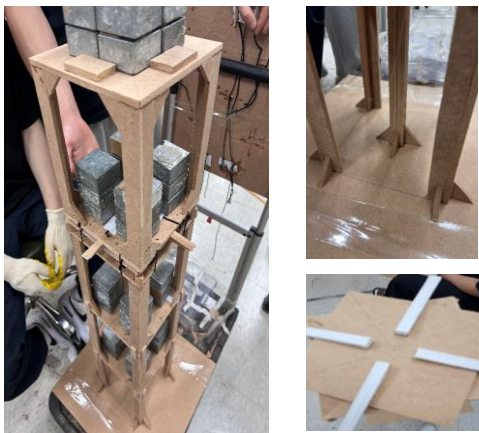
- 파괴원인: 비좌굴 마찰 가새가 X,Y축 방향에 대한 구속이 불가능. **핀접합**을 시도했지만 재료의 한계로 인한 핀접합 불가능
- 대책: 흔들리는 과정에서 기초판이 들리는 현상 발생 → 기초판 제대로 부착 후 재진행 (0.4g 파괴), 마찰가새와 고무줄의 역할이 비슷하다고 판단
- 결론: **비좌굴 마찰 가새 적용이 어려움**

- 특징: 면진층을 아래에 두어 경제성 향상 기대
- 파괴원인: 면진층이 아래에 있어 면진층이 버티는 하중이 크고 이에 따른 모멘트로 인한 전도를 막지 못함, 가새를 한 쪽 방향으로 불힘
- 확인: 2층부 면진제작, 종이멤퍼의 무의미함, 전도방지를 위해 고무줄로 보강 → **4층 파괴**

- 대책: 2차 실험에서의 파괴원인이었던 무거운 하중을 덜기 위해 하중판과 면진층을 따로두어 18kg→12kg의 무게만 견디게 해보았음
- 파괴원인: 면진층이 아래에 있어 **전도모멘트가 크게 발생함**에 따라 면진층 상부가 파괴됨

## 4차 모델 제작 및 실험 →

파괴 시 가속도: 0.43g



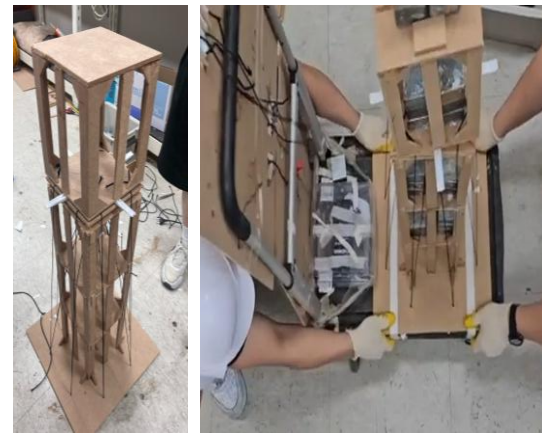
## 5차 모델 제작 및 실험 →

파괴 시 가속도: 0.54g



## 6차 모델 제작 및 실험

파괴 시 가속도: 0.61g



- 수정: (3차→4차) 면진층을 사각뿔 형상으로 기하학적 성질에 의한 복원력 증대와 마찰력으로 인한 에너지 소산 유도, 메가코어 사용, **면진층(2층→3층) 이동**
- 파괴원인: 면진층의 상,하부에 붙인 종이 가 찢겨 단차 발생 및 4층의 강성 부족으로 인한 파괴
- 대책: 단차가 발생 예방, 4층의 강성 증대

- 수정: 단차 발생 방지를 위한 MDF와 A4가 맞게 채설계, 면진층의 각도를 16도에서 4.57도로 수정, 1-4층 모두 전단벽 설치
- 파괴원인: 4층 강성 부족으로 인한 파괴, 고무줄을 타이트하게 묶어 면진효과 감소
- 대책: 4층 강성을 높일 방법, 고무줄 개수 고안

- 수정: 고무줄 갯수를 줄임, 면진층의 단면 중심부터 기초판까지 이어지는 고무줄 설치
- 파괴원인: 마찰력으로 인해 기하학적 성질을 이용한 면진층의 복원력이 부족함, 4층부가 흔들리면서 모멘트를 견디지 못하고 전도
- 대책: 면진층의 마찰력 감소, 전도 방지 방법 고안

# 실험 및 분석

## 최종 모델 제작 및 실험

- 파괴모드 : 0.703g에서 파괴, 면진층의 가동이 유의미했기에 1-3층의 단면이 똑같아 1층 파괴를 유도하는 것이 가능했음
- 결론 : 1층 전단벽의 이탈 방지를 위해 접착부위에 추가적인 부재를 덧붙임. 시공정확도의 향상이 필요함을 느낌



△ 최종 모델 사진

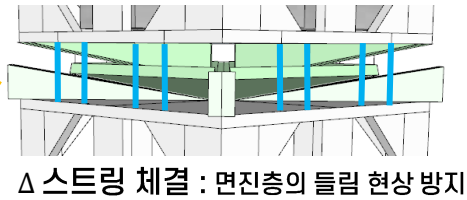
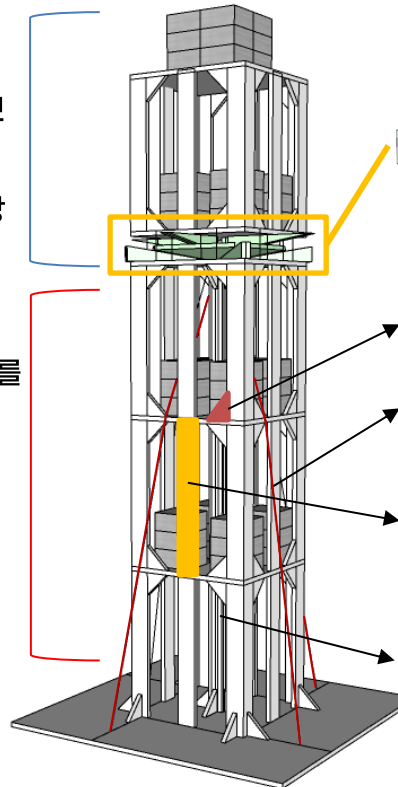
### <경사형 면진 시스템을 이용한 구조체>

**면진층 상부 :**  
코어 X → 경제성 확보

하나의 강체로 거동할 수 있도록 접합부 보강

**면진층 하부 :**  
면진층과의 강성 차이를 주기위해 강성을 높임

면진층의 거동을 안정감있게 지지하기 위해 충분한 내진설계



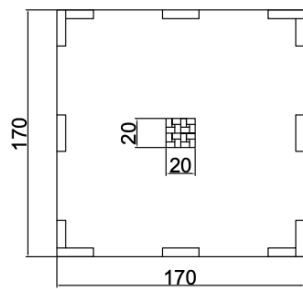
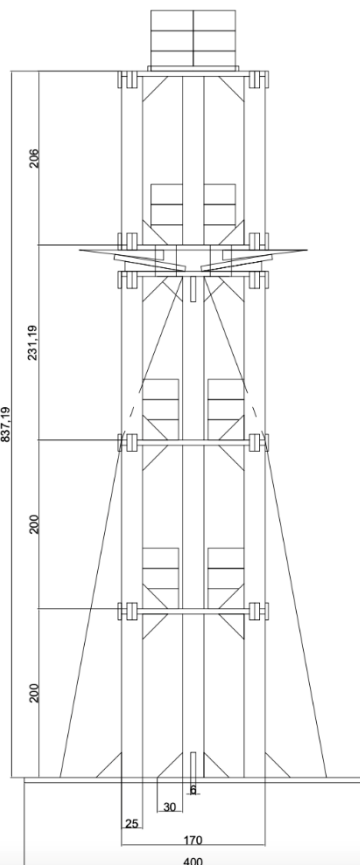
거셋 플레이트 : 접합부의 강성 증대

스트링 와이어 : 면진층의 전도 방지

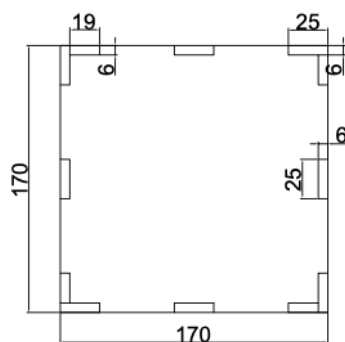
전단벽 : 단면2차 모멘트 상승의 역할 강성 증대

메가코어 : 1-3층부까지 하나의 기둥(높이:600mm)으로 연결시켜 경제성, 시공성 향상

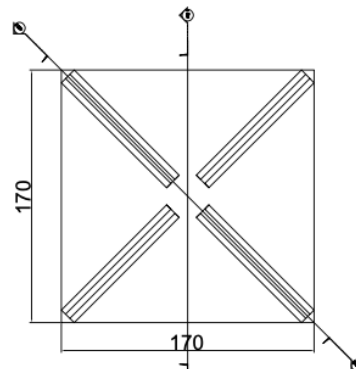
## 평면도 & 입면도



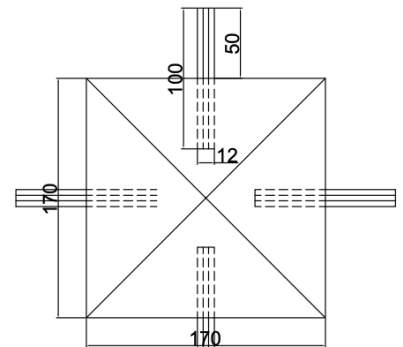
1-3층 평면도



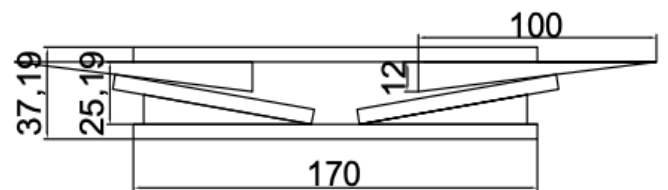
4층 평면도



면진층 평면도 ①

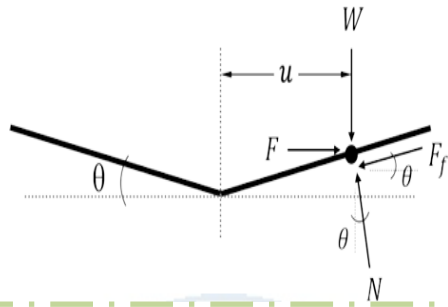


면진층 평면도 ②



면진층 단면도

# 경사형 마찰 면진장치의 이론적 고찰



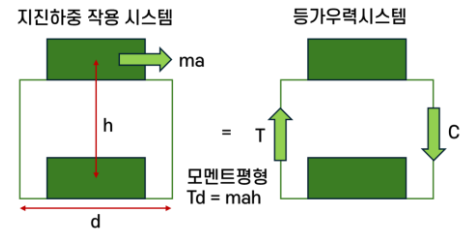
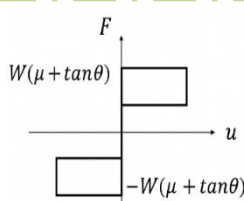
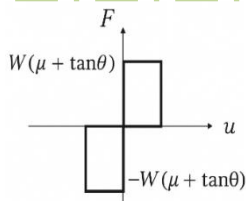
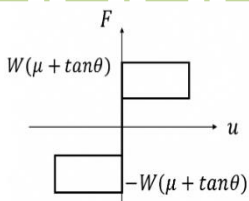
- 경사형 시스템은 경사면의 기울기에 의해 중력 방향으로 자연스러운 복원력이 생성
- 복원력은 구조물의 수평 변위가 발생할수록 점진적으로 커지며, 이는 전형적인 비선형 거동을 유도됨

수직 방향 힘 평형 (법선 방향):  $W \cos \theta + F \sin \theta = N$

수평 방향 힘 평형 (접선 방향):  $W \sin \theta - F \cos \theta + F_f = 0$

수평 변위  $\mu$ 가 곡률반경 R의 0.2배보다 작다면  $\sin \theta \approx 1, \cos \theta \approx 1$ 로 근사하므로 복원력  $F_r$ 과 마찰력  $F_f$ 로 구분

$$F = W \tan \theta + \mu W \left( \frac{1 + \tan^2 \theta}{1 - \mu \tan \theta} \right) \quad F = F_r + F_f \approx W \tan \theta + W \mu = W (\tan \theta + \mu)$$

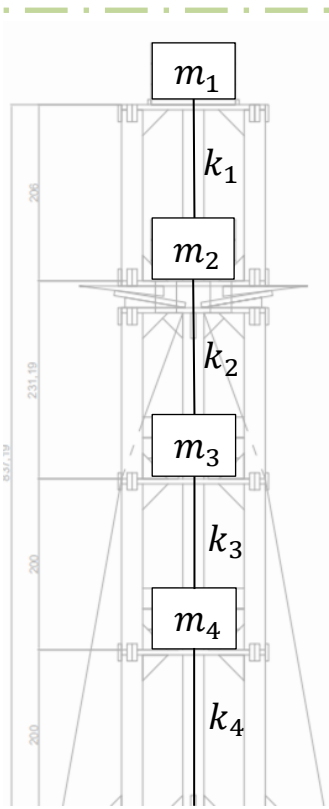


면진층의 들림(힘 T) 제어하기 위한 장치(고무줄) 추가

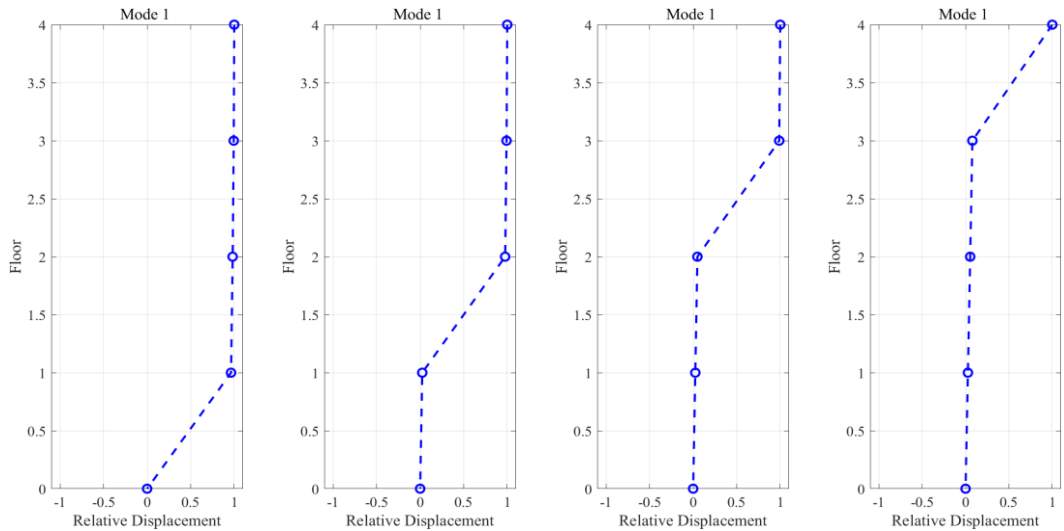
- 경사각과 마찰계수의 관계에 따른 경사형 면진장치의 이력 특성 -

# 면진층효과와 발휘를 검토하기 위한 변수해석

## 고유치해석



## [면진층의 위치에 따른 1차모드 변화]



## [면진층을 제외한 층의 강성 변화에 따른 주기 변화]

면진층의 강성: 0.14kg/mm

층강성	3kg/mm	6kg/mm	9kg/mm
주기	0.6179s	0.603s	0.599s

주기 0.6s 이상과 면진 상부층과 하부층의 변위차가 3배이상 되는 구조물 제작을 위해

층강성과 면진층 강성 분석

## 경제성 분석

종류	부재명	개수	단가 (백만 원)	비용 (백만 원)	합계 (백만 원)
Strip	코어	12	10	120	170
	면진구조	4		8	
	옥상가이드	1		10	
Plate	슬라브	5	100	500	1200
	기둥,전단벽	6		600	
	면진구조,거셋	1		100	
스트링고무줄	스트링고무줄	3	40	120	120
A4지	면진구조	1	10	10	10
접착제	접착제	2	200	400	400
총합	$170+1200+120+10+400=1900$ (백만 원)				

## 시공성 분석

구분		소요시간														
		1시간					2시간					2시간30분				
		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
재료제작	부재작도	■	■													
	기둥 및 전단벽		■	■												
	바닥판				■											
	거셋플레이트					■										
	면진시스템			■	■	■	■									
구조물 시공	기둥 및 바닥판							■	■							
	전단벽 설치									■						
	거셋 플레이트									■						
	면진층 설치										■	■				
	고무줄 설치												■	■		
마감	하중블럭설치														■	
	기초판연결															■