

"구조물 붕괴방지를 위한 내진설계"

2025 구조물 내진설계 경진대회

Seismic Structural Design Contest 2025



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

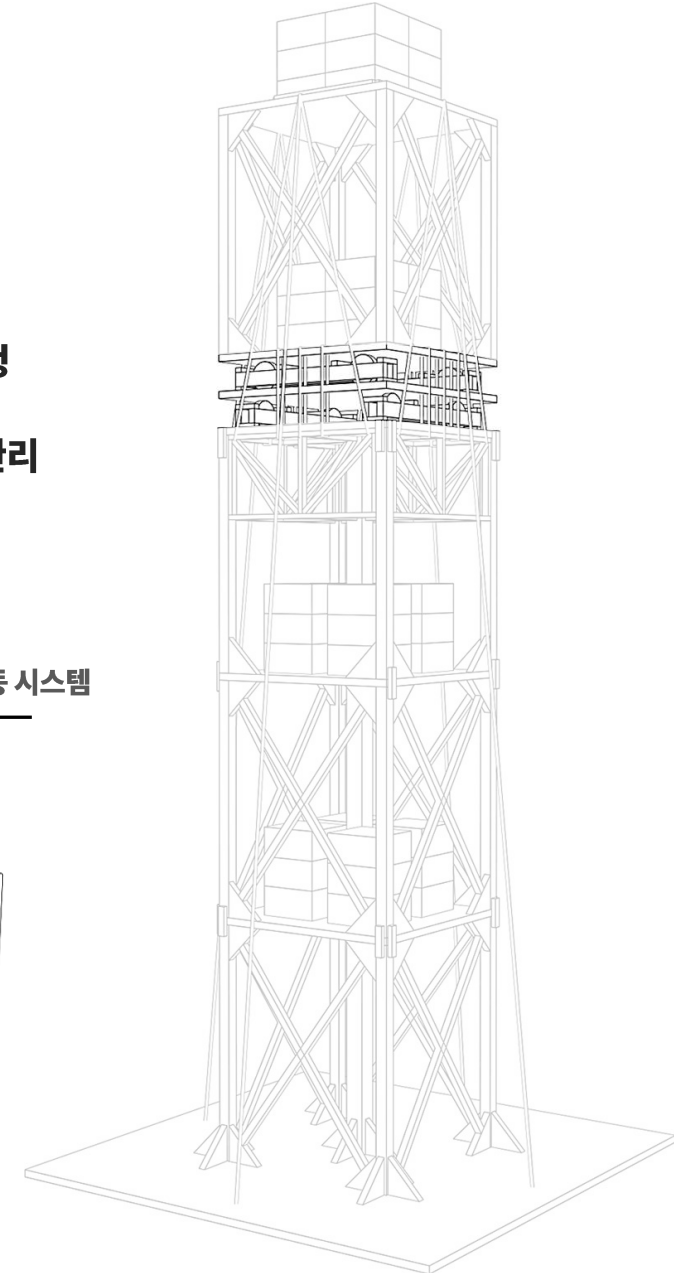
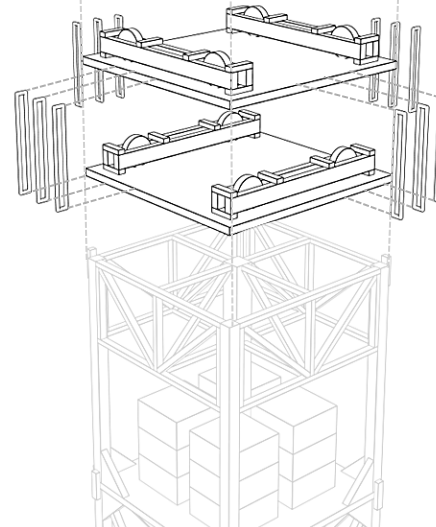
- 물성치 분석
- 경제성 분석
- 시공성 분석
- 구조물 제작

Index 목차

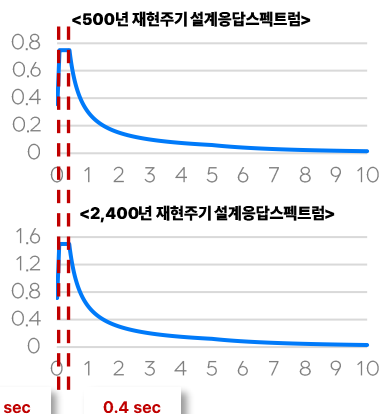
01. 설계 개요
02. 구조 설계
03. 실험 및 분석
04. 구조 해석 및 붕괴메커니즘 선정
05. 평면&입면도 / 공정표 / 원가 관리

Main Concept 핵심 아이디어

Bi-Track-Isolator를 활용한 2축 면진 거동 시스템



구조개요



0.08 ~ 0.4 sec 에서 설계 스펙트럼 가속도 최대

구조물의 고유 주기가 0.40sec 이상이 되도록 **면진층 도입**

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 제안

면진층 구성요소 선정

<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
- ✓ 공의 강도 확보
- ✓ 제작 정밀도 저하
- ✓ 제작 시간 증가

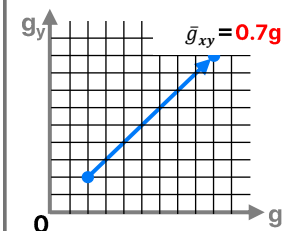
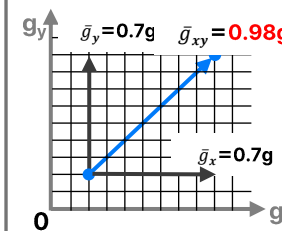
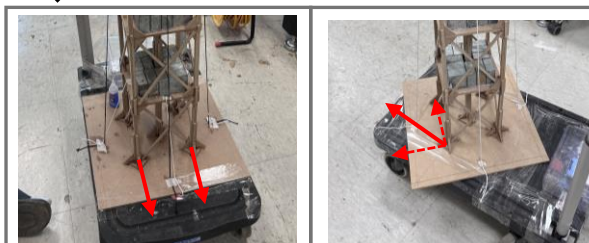


나무바퀴 면진

- ✓ 마찰력 3.9N
- ✓ 바퀴 강도 및 회전력 확보
- ✓ 2축을 고려하여 1/2층 구분
- ✓ 면진 성능 우수

실험 및 설계 수행 주안점

◆ 핸드카트의 이동방향

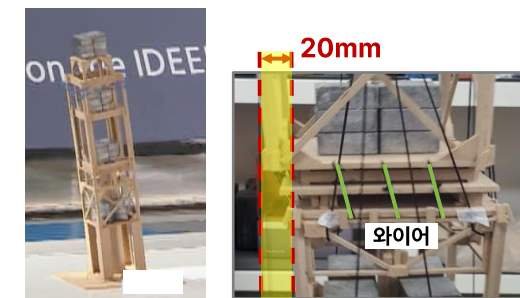
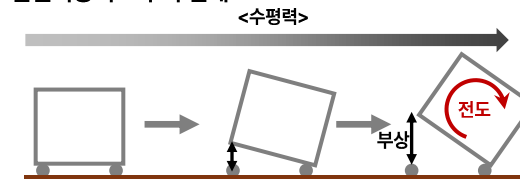


< 1축 실험 >

- 1축 진동으로 실험을 진행한 경우 2축 진동대 실험과 비교에 어려움이 존재
- 구조물을 핸드카트의 대각 방향으로 설치하여 진동대 실험과 유사한 결과를 얻고자 함

< 2축 실험 >

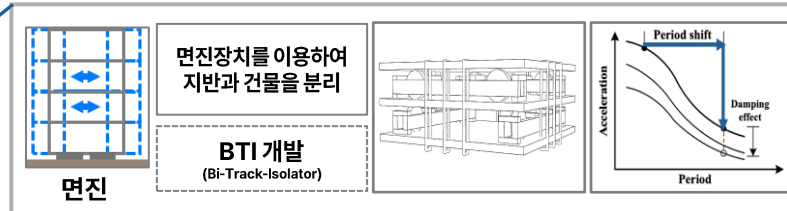
◆ 면진거동의 보수적 설계



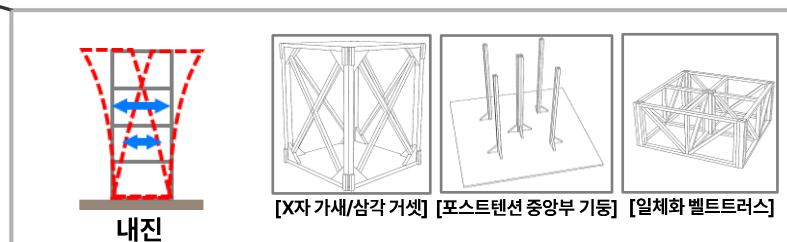
< 작년 작품 중 >

- 작년 현장 영상을 참고 하였을 때 면진 설계된 구조물의 **전도 현상**이 두드러지는 것을 고려
- 면진층 **고무줄**을 통해 **관성에 의한 부상을 방지**하여 **전도현상 제거**

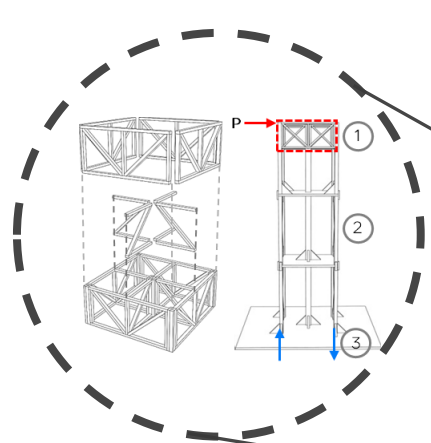
고층부 - 면진을 통한 주기 연장



저층부 - 내진을 통한 강도·강성 증가

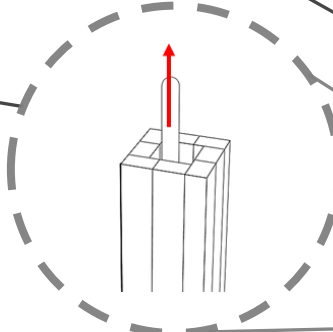


건물의 강도·강성을 높여 구조물 자체의 내력으로 지진에 저항



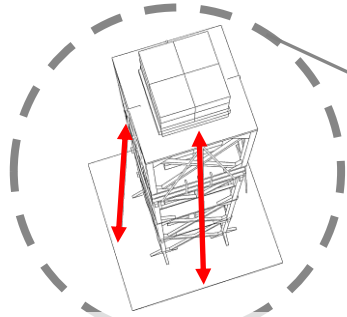
[Integrated-Belt Truss System]

- ① 코어에 발생하는 모멘트를 기둥에 전달
 - ② 중력+횡력에 저항
 - ③ 코어와 기둥이 전도 모멘트를 분담하여 저항
- 전단력에 비해 **전도 모멘트**가 큰 세장한 건축물이므로 면진층 아래에 **아웃리거**를 적용하여 건축물의 강성 증대
 - 기둥끼리 **벨트트러스**로 연결하여 일체화
 - 부재 최대길이 150mm 이하로 제작되어, 수평방향으로 긴 부재 제작 후 **남은 부재**로 제작되어 경제성 증대



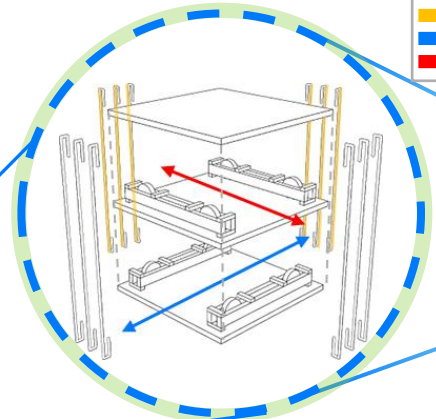
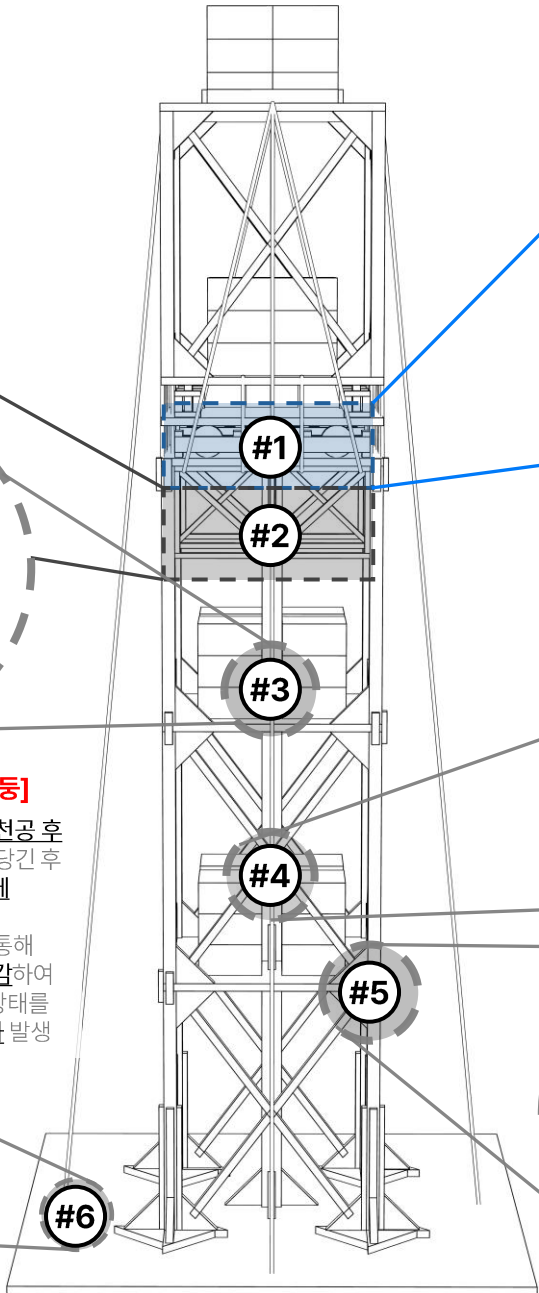
[Post-Tension 중앙부 기둥]

- 완성된 중앙부 기둥을 **기초판** 천공 후 고정하고 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



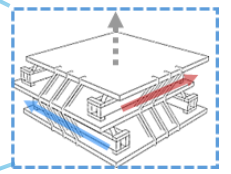
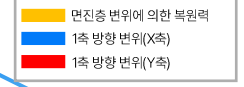
[와이어]

- 기초판과 지붕을 연결시켜 **면진층 변위에 의한 전도 방지**

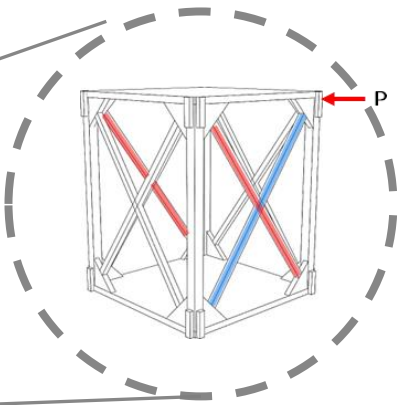


[Bi-Track-Isolator]

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

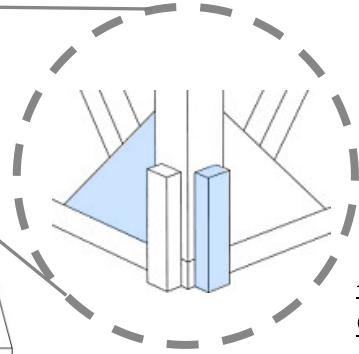


- 주거동 방향이 아닌 방향에 대한 마찰을 줄이기 위해 종이를 부착하여 **대각선방향으로 원활한 거동** 가능



[X가새]

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



[JOINT DETAIL]

삼각거셋: 응력 집중부보강
이음재: MDF 슬래브의 층상균열 방지



1차 실험



2차 실험

<파괴 원인>

- 면진층 상부의 하중이 커 면진성능 부족
- 종이댐퍼 성능 부족
- 면진층과 댐퍼 성능 부족에 의한 **접합부 파단**

1차 실험 : 0.03g 파괴 / 2차 실험 : 0.04g 파괴

<보완점>

1. 면진층 2층 -> 3층으로 변경

2. 면진층 강성 조정 (2.5차 실험)

<최적의 면진층 조건>

- 주 거동방향 3줄
- 전단방향 1줄
- 고무줄댐퍼 4방향 2줄
- 마찰면 종이처리
- 가이드 레일 보강

3. 고무줄 댐퍼

중앙부 기둥과 면진층 상부를 고무줄로 연결하여 최상층의 전도 억제



3차 실험

<파괴 원인>

- 면진층 강성이 커 최상층 전도
- 최상층 기둥 파손

3차 실험 : 0.16g 파괴 / 4차 실험 : 0.34g 파괴 / 5차 실험 : 0.51g 파괴 / 6차 실험 : 0.69g 파괴

<면진층 강성 약화>

면진층 고무줄 일부 제거

면진 거동 증가

전도현상 증가

최상층 기둥 부재 파단

<면진층 강성 강화>

면진층 고무줄 일부 추가

면진 거동 감소

전체 구조물 일체화

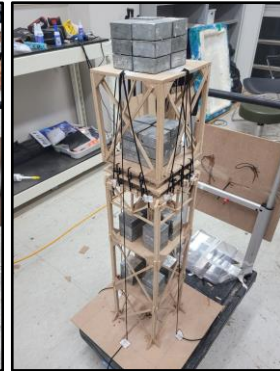
저층 기둥 부재 파단

면진층 및 기둥 부재의 강성 반복 조절실험을 통해 0.7g에서 상대적 불확실성이 큰 부재 파괴 현상 제거

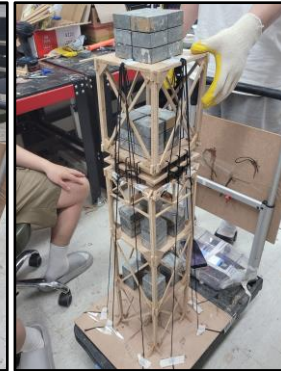
0.7g에서 부재파괴가 아닌 바퀴 탈락으로 인한 붕괴가 일어나도록 레일 가이드 설치



4차 실험



5차 실험

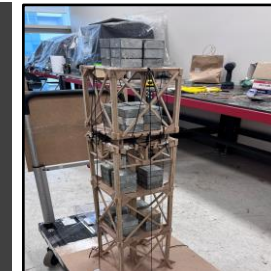


6차 실험

<파괴 원인>

- 면진층 강성이 약해 수평 변위 과다 발생
- 과다 수평 변위 발생에 따라 최상층 전도 발생
- 나무 바퀴가 레일 가이드를 벗어나 **바퀴 탈락**

1 축



7차 실험

<실험 조건>

- 6차 실험에서 고무줄 추가 설치

파괴지점: 0.72g

<파괴 원인>

- 면진 거동 저하로 최상층 기둥 파단



9차 실험

<실험 조건>

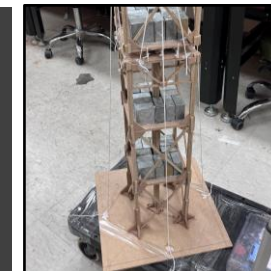
- 1층 기둥 보강
- 각 층 접합부 보강

파괴지점: 0.94g

<파괴 원인>

- 면진층 나무바퀴 탈락

2 축

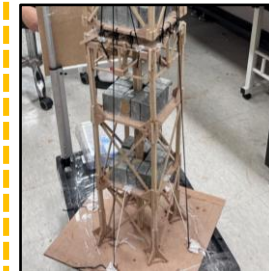


8차 실험 (2축)

파괴지점: 0.5g

<파괴 원인>

- 응력집중으로 인해 1층 접합부 파단



10차 실험 (2축)

파괴지점: 0.68g

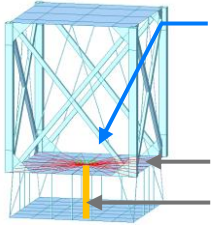
<파괴 원인>

- 면진층 나무바퀴 탈락

구분	1차 실험	2차 실험	2.5차 실험	3차 실험	4차 실험	5차 실험	6차 실험	7차 실험 (1축)	8차 실험 (2축)	9차 실험 (1축)	10차 실험 (2축)
파괴지점	0.03g	0.04g	-	0.16g	0.34g	0.51g	0.69g	0.72g	0.5g	0.94g	0.68g
특이사항	• 면진층 2층 • 종이 댐퍼	• 면진층 3층 • 고무줄댐퍼	• 고무줄 수량조정	• 중앙부기둥 높이 조정	• 면진층 강성/레일 보강	• 면진층 강성 강화	• 면진층 강성 약화	• 면진층 강성 강화	-	• 각 층 접합부 보강 • 1층 기둥 보강	-

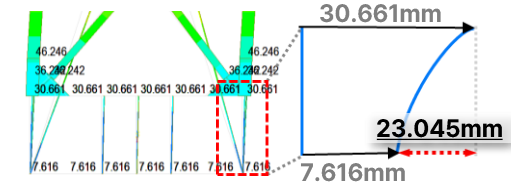
구조해석 프로그램 분석

마찰거동 적용을 위한 방법



- Rigid Link로 구속 후, 상하부층을 Isolator로 설정한 General Link로 연결
 - 면진층 마찰실험을 통해 측정된 마찰력 적용
- Rigid Link
General Link

면진층의 거동 확인



면진층 거동을 확인하기위해 면진층 상하부의 상대변위를 확인
 $30.661 - 7.616 = 23.045\text{mm}$ 이므로, 면진층 거동 확인

X자 가새, 일체화 벨트트러스 선정 (1차 실험 개선)

[2400년 주기 2축 지진하중]

변형 형태				
위치	2층 벨트트러스	3층 벨트트러스	전층 X가새	전층 벨트트러스
변위	7.7mm	2.58mm	2.5mm 40(백만원) 절약	15mm
층당 가격	80(백만원)	80(백만원)	120(백만원)	60(백만원)

전층 X가새 사용시 2.5mm로 최저 변위 발생

3층 벨트트러스 사용시와 전층 X가새 사용시 변위 발생량 유사 (0.08mm)

벨트트러스 제작은 중앙부 기둥 제작 후의 잔여부재 사용
 → 층당 strip 4개 절약 가능 (=40백만원)

구조적 안전성/경제성을 복합적으로 고려하여
 1/2층 X가새, 3층 벨트트러스로 선정

응답스펙트럼 및 고유치 해석

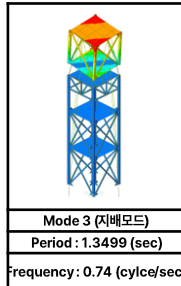
[응답스펙트럼해석]

500년 재현주기 최대 변위량 109mm	2,400년 재현주기 최대 변위량 210mm

지진 하중에 대한 구조물의 응답(변위, 전단력 등)을 구하기 위한 방법. 구조물의 고유진동수, 감쇠비, 질량, 스펙트럼 응답값을 이용.

모드별 응답을 구한 후, 조합법(SRSS, CQC)으로 전체 응답을 구함.

[고유치해석]



구조물의 진동 특성을 분석하기 위한 수학적 도구. 구조나 시스템이 자연스럽게(외력 없이) 진동할 수 있는 주기와 모양을 구하는 과정.

건물의 고유주기(T), 고유진동수(ω), 모드형상(ϕ) 등을 계산.

붕괴메커니즘

"하중에 의한 면진층 파괴 검토"

[지진하중 산정]	[면진층의 강도]
1. 각 층별 단위 변형당 하중 측정	1. 나무바퀴에 의한 마찰력 산정 12kg 하중을 올리체로 마찰력 측정 면진층 마찰력: 14.7N
2. 각 층의 강성 도출 1층: 66.7kN/m, 2층: 28.5kN/m, 3층: 1.3kN/m, 4층: 24.5kN/m	2. 고무줄에 의한 인장력 산정 각 고무줄의 최대인장하중 측정 각 고무줄 평균 인장력: 30N 층 고무줄의 인장력: 30*24 = 720N
3. 건물의 고유주기 산정 MATLAB의 eigen value 해석을 통해 건물의 주기 산출 건물의 주기: 0.629초 ($T=2\pi\sqrt{m/k}$, 건물의 고유강성: $1/k_{eq}=\sum_{i=1}^n \frac{1}{k_i}$)	*p-델타 효과로 인해 정확한 강도 산출 불가
4. 면진층의 지진하중 산정 2400년 주기에서 건물의 주기 0.63초일때의 설계스펙트럼 가속도 X 면진층의 하중: 0.952381 g x 12kg = 112.06N	3. 면진층의 강도 실제 면진층의 고무줄이 끊어지는 시점까지의 하중 측정 251.86N
면진층의 지진하중 112.06N	면진층의 강도 251.86N
고무줄의 파단에 의한 면진층의 파괴는 발생하지 않음 → 나무바퀴 변형에 의한 면진층 파괴 검토 필요	

"변형에 의한 면진층 파괴 검토"

등가정적해석법을 활용한 변형에 의한 파괴 검토
1. 밀면 전단력 계산 $\text{밀면 전단력 } V = \left(\frac{S_{DS} \cdot I_E}{R} \right) \omega$ 0.6g 밀면 전단력: 25.4N 0.7g 밀면 전단력: 35.4N
2. X층의 횡하중 계산 $\text{X층 횡하중 } F_x = \left(\frac{\omega_x \cdot h_x^k}{\sum_{i=1}^n \omega_i \cdot h_i^k} \right) \cdot V$ 0.6g 면진층 횡하중: 10.63N 0.7g 면진층 횡하중: 12.2N
3. X층의 수평변위 계산 $\text{X층 수평변위 } \delta_x = \frac{C_d \delta_{xe}}{I_E}$ 0.6g 면진층 수평변위: 30.75mm 0.7g 면진층 수평변위: 35.25mm
"0.6g에서의 면진층 수평변위 < 면진층 허용 수평변위 < 0.7g에서의 면진층 수평변위"가 되도록 레일 가이드를 33mm로 설치하여 0.7g 가질시 바퀴 탈락 유도

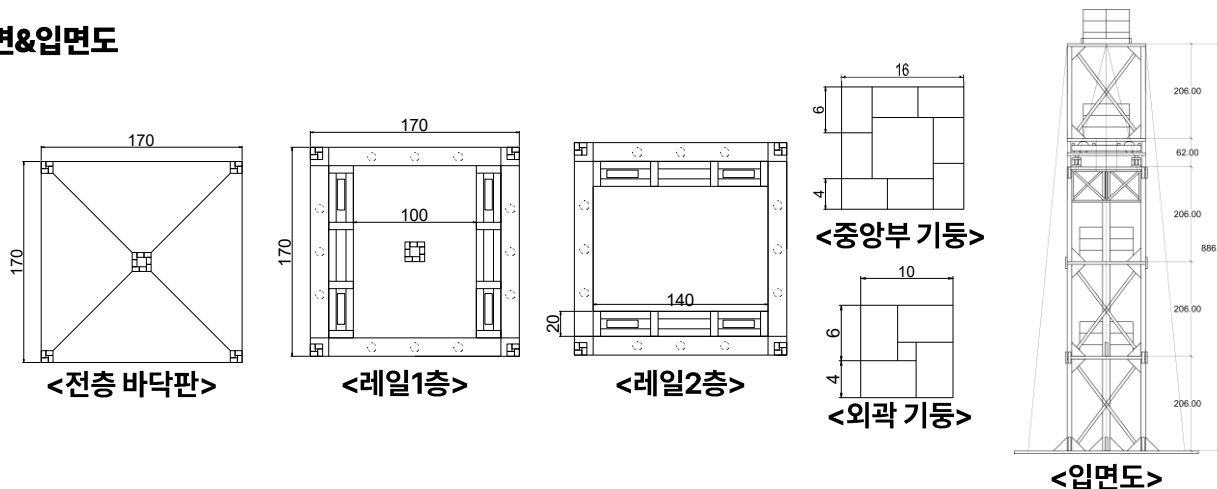
"실험을 통한 구조물 파괴 검토"

[수평 2방향(X축, Y축) 동시 가진 지진파 반영을 위한 2축 실험 진행]			
0.6g 가진 시 최대가속도 = 0.85g	1축 실험 (정방향)	2축 실험 (45° 회전)	0.7g 가진 시 최대가속도 = 0.98g
• 목표성능: 0.85g ≤ S _a ≤ 0.98g • 파괴지점: 0.94g		• 목표성능: 0.6g ≤ S _a ≤ 0.7g • 파괴지점: 0.68g	
1축 실험 목표성능: 최대가속도 범위 내에서 붕괴 1축 가진 실험에서도 구조물이 최대가속도까지 견딜 수 있도록 설계		2축 실험 목표성능: 0.6g 이상 0.7g 이하에서 붕괴 인공지진파 방향을 고려해 회전 부착 실험에서도 성능수준을 만족하도록 설계	

공정표

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							██████			
마감	와이어 설치								██████		
	하중블럭 설치								██████		
	마무리 작업								██████		
총 공정시간									2시간 30분		

평면&입면도



원가 관리

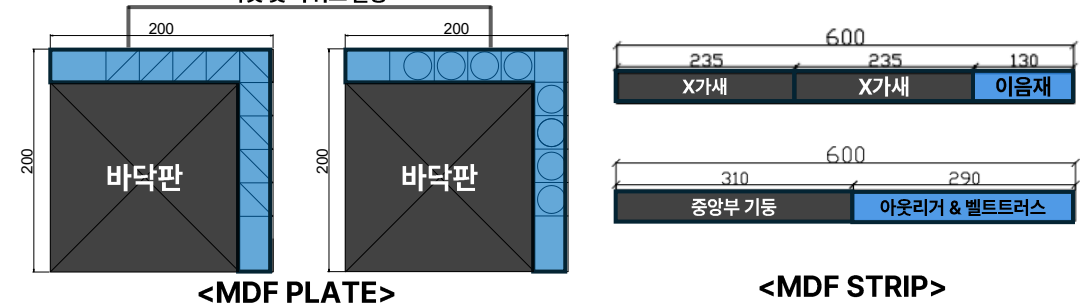
재료명	단위	규격	부재명	수량	단가 [백만원]	합계 [백만원]
MDF Base	개	400mm x 400mm x 6mm	기초판	-	-	-
MDF Strip	개	600mm x 4mm x 6mm	기둥	57	10	570
			X자 가새			
			레일			
MDF Plate	개	200mm x 200mm x 6mm	바닥판	6	100	600
스트링 고무줄	식	600mm	와이어	7	40	280
A4지	장	210mm x 297mm	마찰판	2	10	20
접착제	개	20g	-	2	200	400

총액 1870

부재명	부재 규격(가로 x 세로 x 높이)	수량	부재명	부재 규격(가로 x 세로 x 높이)	수량
중앙부 기둥	16 x 16 x 320	1	X 가새	235 x 6 x 4	24
	16 x 16 x 310	1			
외곽 기둥	10 x 10 x 200	16	면진층 고무줄	100	12
				150	8
바닥판	170 x 170 x 6	6		450	4
아웃 리거	69 x 6 x 4	8	벨트 트러스	150 x 6 x 4	8
	82 x 6 x 4	4		88 x 6 x 4	8

원가 절감 방법

거셋 및 바퀴로 활용



PLATE와 STRIP을 최대 활용하여 원가 절감