

2024 구조물 내진설계 경진대회

구조물의 지진 피해 저감을 위한 탄성도르래 - 면진 복합 구조 설계제안서

제안 | 팀 이구동성

지도 | 김철구 교수

소속 | 이화여자대학교

이구동성 팀소개

이구동성은 구조공학에 관심 있는 학생들이 모여 결성한 동아리로, 이화여자대학교 건축도시시스템공학과만의 유일한 '건축구조 동아리'입니다. 전공 지식에서 한 발 더 나아가 학생들끼리 심화된 구조공학 지식을 공유하며 공부하고 있습니다. 이론으로 학습한 내용을 현실에서 구현해보고자 2024 내진설계 경진대회를 참가했습니다. 다양하고 새로운 시도를 통해 건축물의 구조적 성능을 확보하고, 동시에 효율을 극대화하는 창의적인 설계를 하고자 합니다.

지도교수 | 김철구 교수 (이화여자대학교 건축도시시스템공학과)

팀 구성

팀장 김민영

설계 아이디어 구상
상세 설계
설계 제안서 총괄

팀원 김민경

설계 아이디어 구상
물성치 분석
시공-원가 관리

팀원 나오영

설계 아이디어 구상
3D 모델링
CAD 설계도면 작성

팀원 윤채은

설계 아이디어 구상
지진파 분석
시공-공정 관리

CONTENTS

I 설계 개요

설계 조건	02
설계 응답스펙트럼	
설계 구상	03

II 구조성

설계 구현	04
구조 설계 개요 1	05
구조 설계 개요 2	06
탄성도르래 설계	07
면진 설계	08
설계 도면	

III 시공성

시공 관리	09
공정표	

IV 경제성

원가 관리	10
세부 단가표	

설계 요구 조건

설계 목적: 내진설계를 통한 구조물 지진 피해 저감

설계 목표

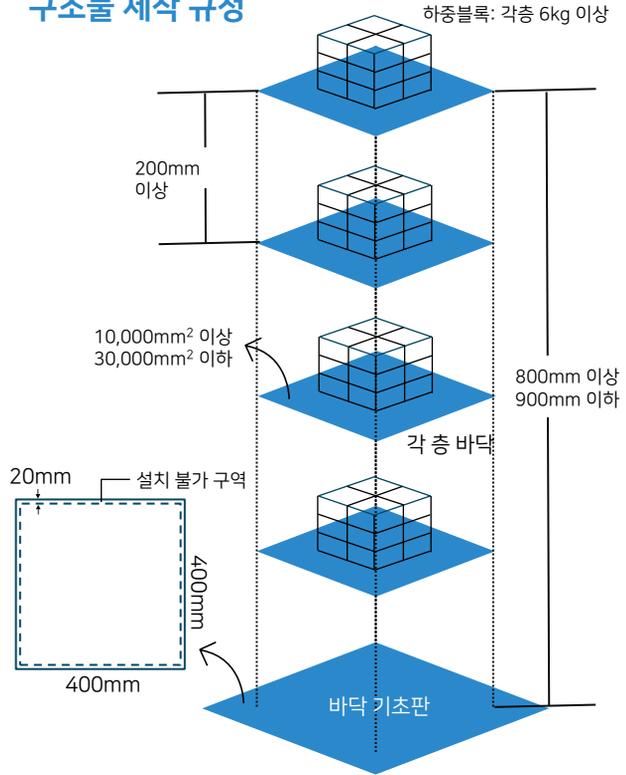
- 500년 빈도 지진 발생시, 기능수행 수준 내진설계
- 2400년 빈도 지진 발생시, 붕괴방지 수준 내진설계
- 설계지진 초과 시 파괴를 유도하는 정밀한 설계
- 시공성, 경제성, 심미성, 창의성을 추구하는 설계

재료 및 예산

재료명	규격 (mm)	단가 (백만원)	비고
MDF Base (기초판)	400*400*6	-	기본 제공
MDF Strip	600*4*6	10	
MDF Plate	200*200*6	100	
스트링 고무줄	600	40	
A4지	A4	10	
접착제	20g	200	록타이트 401
예산 범위	최대 2,400 백만원		

*예산 1,200백만원 이하일 경우 최고점

구조물 제작 규정



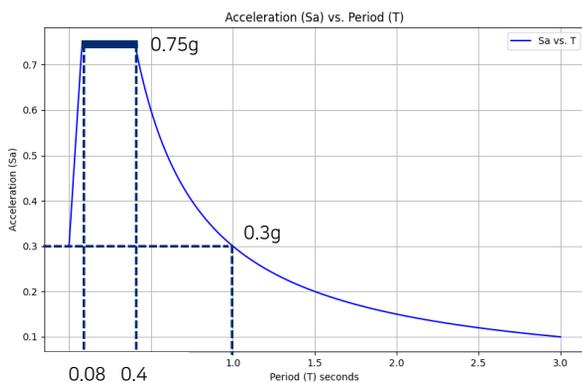
내진설계목표 및 성능 수준

재현주기	유효수평지반가속도
500	0.3g
2400	0.6g

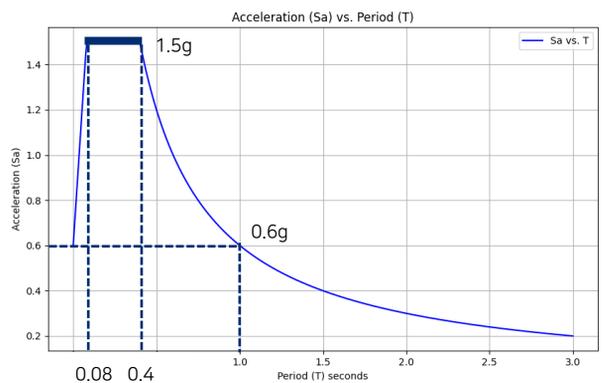
성능 목표	500년	기능수행	장기복구	즉시복구/인명보호
	2400년	붕괴방지		

설계 응답스펙트럼

500년 재현주기



2400년 재현주기



재현주기	최대 설계 응답스펙트럼	최대 가속도	1주기 가속도
500	0.08sec ~ 0.4sec	0.75g	0.3g
2400		1.5g	0.6g



1주기 가속도 0.6g까지 붕괴방지

1주기 가속도 0.7g 일 때 구조물이 파괴되도록 설계

내진설계 아이디어 구상

1. 선행 지식 학습

- 동역학 기초, 내진설계 이론 학습
- 일반 물리학, 구조역학, 재료역학 등 전공기초 복습
- 건축 시공 공법(부재 접합 종류, 시공 방법, 타워크레인의 원리 ... 등) 학습

2. 재료 물성치 파악

* 2024 내진설계 경진대회 공고에 제시된 고무줄 사진과 같은 고무줄로 구입했으나, 실제 대회 현장에서 제공되는 고무줄의 물성치는 다를 수 있음



고무줄 물성치 분석				
단면 2차 모멘트 (I _r)	하중(P)	평균 변형량(δ)	탄성계수 (E)	스프링 상수 (k)
1.92 x 10 ⁻³ mm ⁴	4.905N	32.5 cm (*3회 기준)	1.306696 MPa	15.09 N/m

MDF 물성치 분석					
단면	I _x	I _y	하중 (P)	변위(δ)	탄성계수 (E)
10*10 mm	832 mm ⁴	832 mm ⁴	9.81N	0.0195 mm	1508.80 MPa
14*12 mm	2016 mm ⁴	2744 mm ⁴	9.81N	0.0081 mm	1499.04 MPa
24*26 mm	29952 mm ⁴	35152 mm ⁴	9.81N	0.00055 mm	1485.94 MPa

3. 내진설계 공법 실증 시험

기존 내진 설계 공법 구현 후 실증 실험		
내진(Seismic Resistance)	제진(Vibration Control)	면진(Base Isolation)
 <p>강한 진동에서도 잘 견디나, 구조물 일체 거동으로 1층 기둥에 응력이 집중되어 1층 기둥 파단. 구조물 붕괴 시 피해 발생 정도가 심각</p>	 <p>설계 변경 시 건축물의 고유 진동수 재산정, 제진 설계의 핵심인 진동을 예측한 후 제어하는 과정에 여러 문제점 발생</p>	 <p>구조물 중간층에 면진 시스템 적용으로 구조물 분리거동 유도. 관성으로 인한 지진 하중과 상층부 변위 감소. 지진 피해 저감</p>

4. 설계 아이디어 구상

- 기존 내진 설계 공법인 면진 구조에 물리학, 건축 시공 공법을 융합하여 설계 아이디어 구상
 - 용수철의 원리, 도르래의 원리를 활용하여 **탄성도르래 - 면진 복합 구조**
 - 고장력 볼트에서 착안한 **플레이트와 기둥의 탄성 에너지 접합**

내진설계 구현 과정

도출한 설계 아이디어를 구현하기 위해 설계 요구 조건을 준수하여 상세 설계를 실시하였다. 시공성과 경제성도 반영해야 하기 때문에 상세 설계도서를 작성하고 이를 바탕으로 구조물을 제작한 뒤, 진동 시험을 진행하였다. 진동 시험 결과를 반영하여 다시 설계안을 수정하고 구조물을 제작한 뒤 시험하는 과정을 반복하여 최종 설계안을 도출하였다.

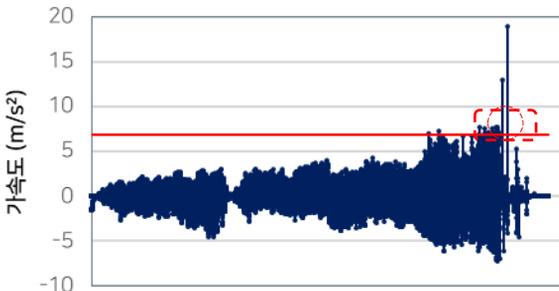
구조물 피해 최소화 및 0.7g 붕괴 유도 과정

초기 설계안	중간 설계안	최종 설계안
0.4g 붕괴	1.1g 붕괴	0.7g 붕괴
<ul style="list-style-type: none"> 1~4층 코어 일체화 1~2층 - 코어 - 옥상 슬래브 고정 3~4층 기둥 - 옥상 슬래브 분리 	<ul style="list-style-type: none"> 1~2층, 3~4층 코어 분리 3~4층 기둥 - 옥상 슬래브 일체화 3~4층 내진 보강 	<ul style="list-style-type: none"> 면진 장치 수정 도르래 설계 수정 3~4층 가새 수정
<p>→ 옥상에 하중이 가해지면서 옥상 플레이트와 3~4층 기둥 접합, 마찰로 인해 기둥 상부 xy축 자유 거동 x</p> <p>→ 옥상 슬래브와 3~4층 기둥의 일체 거동으로 인해 뒤틀림 변위 발생</p>	<p>→ 면진 구슬이 중심으로 이동하여 단차 발생, 3~4층이 곡선으로 흔들림</p> <p>→ 분담 하중이 커 도르래가 하중 분산 시스템으로 역할 x</p> <p>→ 1.1g 붕괴로 과설계 상태</p>	<p>→ 면진판, 3~4층 수평 변위 유도</p> <p>→ 탄성도르래의 3층 하중 분산</p> <p>→ 0.7g에서 상부 구조물 붕괴</p> <p>→ 0.6g까지는 구조부재의 손상이 발생하지 않아 지진 피해 최소화</p>

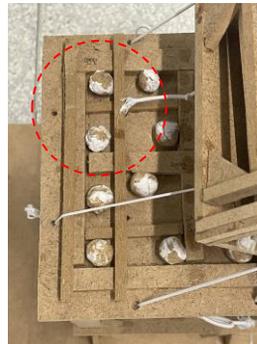
* 진동 시험 방법: 카트에 구조물을 고정된 뒤 카트를 흔들며 30초 간격으로 진동 강도를 증가시키고, 카드에 가속도계를 부착하여 가속도를 측정하였다.

최종 설계안 내진성능 실험결과

진동 시험 결과



고무줄 탈락



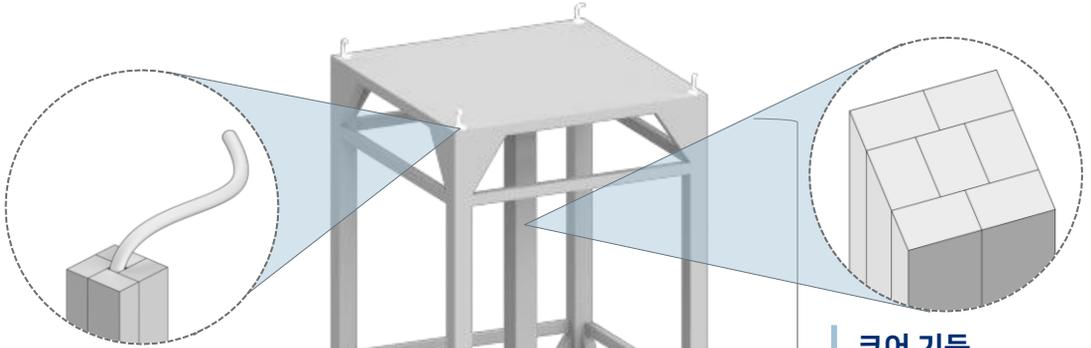
상부 붕괴



➤ 진동 실험 결과 0.6g까지는 구조 부재 탈락 또는 손상이 발생하지 않음. 약 0.7g에서 상부 구조물이 수평 방향으로 크게 움직임. 하부 구조물과 위상차가 커지면서 2, 3층을 연결하는 고무줄이 빠져 붕괴 발생. 최종 설계안 확정

구조 설계 개요

구조물의 지진 피해 저감을 위한 탄성도르래 - 면진 복합 구조



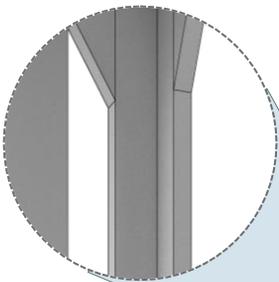
접합부 설계

- 기둥에 부착된 고무줄에 인장력을 가해 옥상층 하중판과 탄성 접합
- 고장력 볼트에서 착안

코어 기둥

- MDF Strip 7개를 부착해 코어 기둥 제작
- 옥상층과 3층 하중 부담

$I_x = 2,016\text{mm}^4$
 $I_y = 2,744\text{mm}^4$

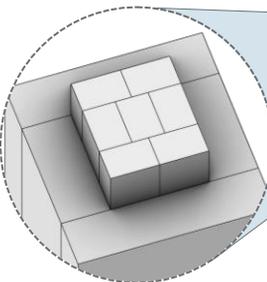


ㄱ자 기둥

- MDF Plate 부재를 ㄱ자 모양으로 배치해 만든 기둥
- 횡력에 대한 저항성 높임

코어 분리

- 면진 장치를 설치하기 위해 상부 하부 코어 분리
- 상·하부 구조물 분리로 지진 발생 시 관성력으로 인한 상부구조물 힘 감소



코어 기둥

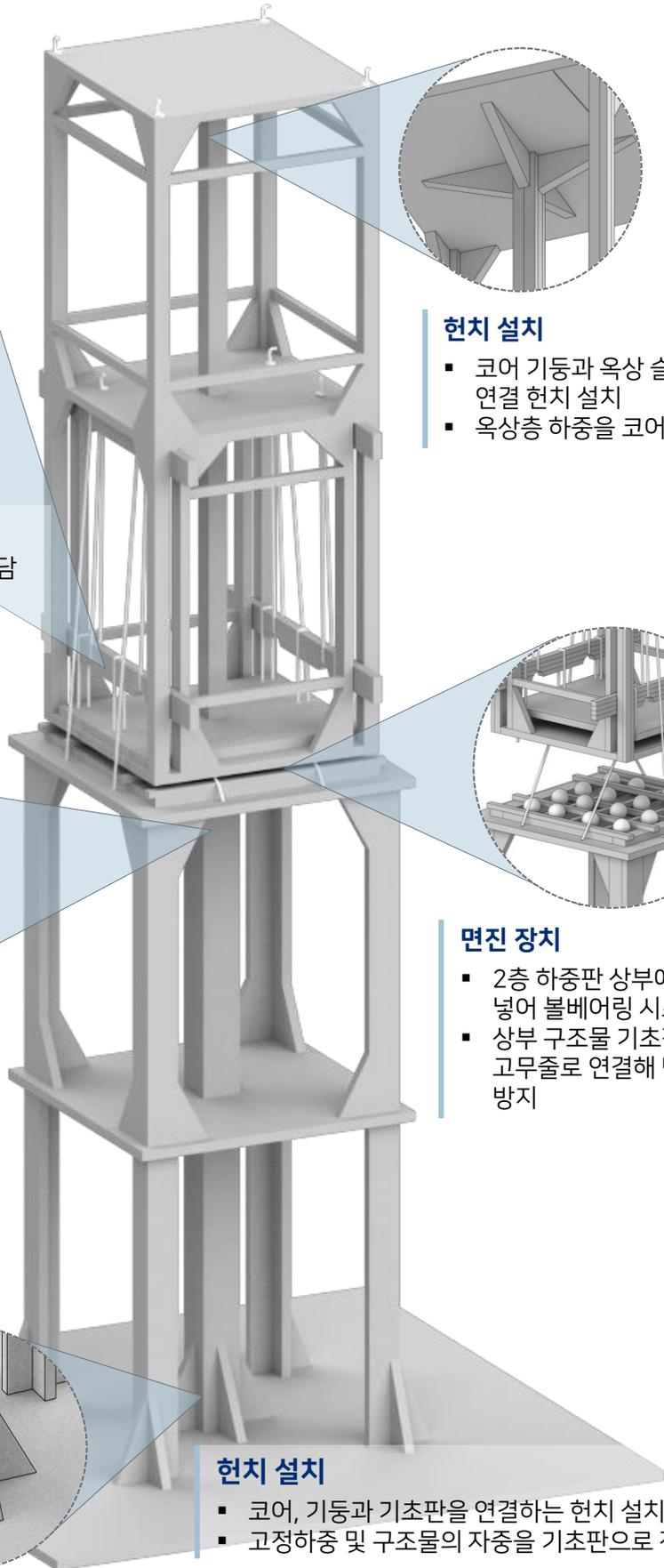
- MDF Strip 7개로 만든 코어 기둥 4면에 플레이트 부재를 붙여 제작
- 상부에서 전달되는 하중 부담
- 코어 기둥 강성 증가시켜 구조적 안정성 높임

$I_x = 29,952\text{mm}^4$
 $I_y = 35,152\text{mm}^4$



구조 설계 개요

구조물의 지진 피해 저감을 위한 탄성도르래 - 면진 복합 구조



탄성도르래

- 복합 도르래로, 3층의 고정하중 부담
- 고무줄을 강하게 당겨 고정해 횡력 작용 시, 하중판 들어올림

헌치 설치

- 하중을 코어 기둥으로 전달
- 코어 기둥과 2층 상부 슬래브 연결성 강화

헌치 설치

- 코어 기둥과 옥상 슬래브 연결 헌치 설치
- 옥상층 하중을 코어로 전달

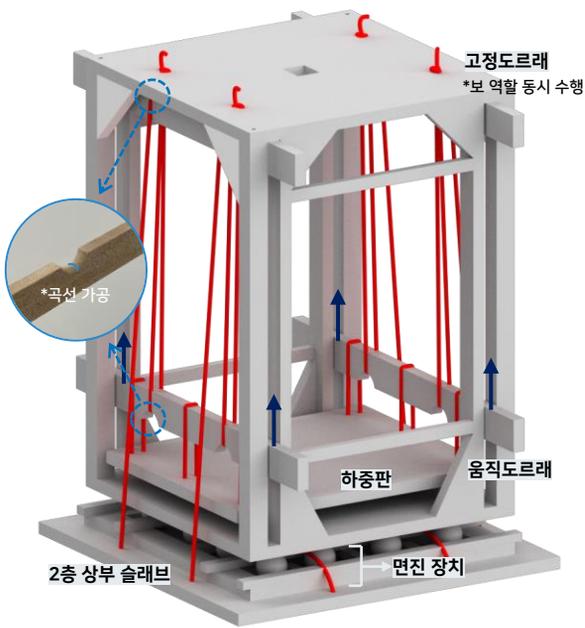
면진 장치

- 2층 하중판 상부에 면진 구슬을 넣어 볼베어링 시스템 구현
- 상부 구조물 기초판과 면진판을 고무줄로 연결해 면진판 탈락 방지

헌치 설치

- 코어, 기둥과 기초판을 연결하는 헌치 설치
- 고정하중 및 구조물의 자중을 기초판으로 전달

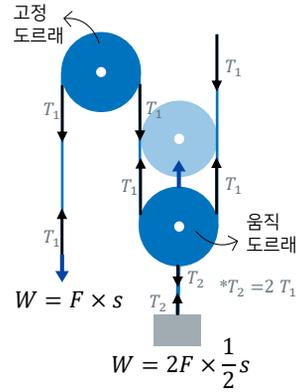
탄성도르래 설계



도르래 구현

- 하나의 하중판과 연결되는 4개의 복합 도르래 설치
- 3층 상부와 2층 상부에 도르래줄 연결

고정도르래 설치)
플레이트와 기둥에 접합하여 고정
움직도르래 설치)
레일을 따라 움직이도록 비고정 설치



▶ 도르래의 원리 개념도

탄성에너지 활용

- 도르래줄로 고무줄을 팽팽하게 당겨 매우 긴장한 상태로 연결
→ 고무줄의 탄성에너지가 하중판을 잡아 당기는 힘으로 작용

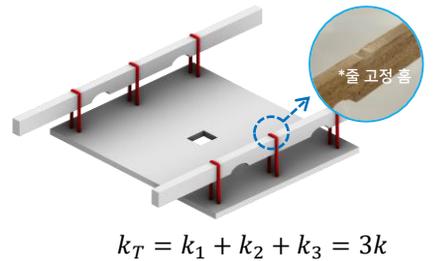
$$F = -kx \quad W = \frac{1}{2}kx^2$$

▶▶ 면진 장치와 하부 구조물에 직접적으로 전달되던 3층의 고정하중을 탄성도르래가 상부로 잡아당기며 부담

움직도르래-하중판 연결

- 도르래-하중판 연결 고무줄을 병렬로 설치하여 강성 증가
→ 고무줄 변형 감소로 하중판을 들어올리기 위해 필요한 요구 성능 감소
- 경제성 · 구조성 측면에서 3층의 고정하중(6kg)을 부담할 수 있는 수준으로 고무줄 개수 선정
- 하중판에 병렬 연결된 고무줄의 개수 차이에 따른 하중 부담 실험으로 검증

* 연결 고무줄의 개수는 현장에서 제공되는 고무줄의 강성에 따라 대회 당일에 변경될 수 있음



탄성도르래-면진 복합 구조의 지진 피해 저감 메커니즘

[지진 발생 시 면진 구조에 의한 도르래의 탄성 에너지 증가]

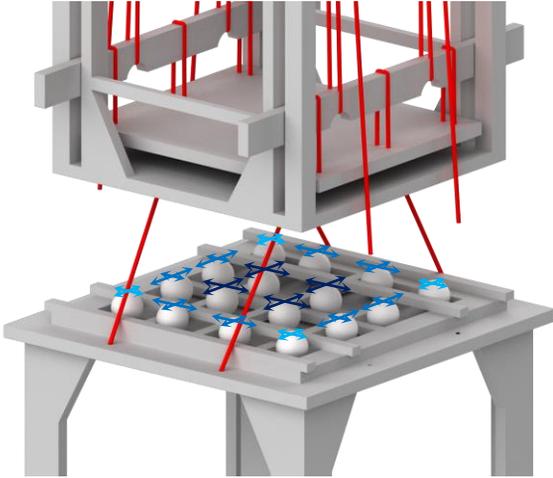
- 1~2층과 3~4층 구조물의 위상 차가 발생하여 도르래 줄이 늘어나며 줄에 걸리는 탄성위치에너지 증가

▶▶ 고무줄에 걸리는 탄성에너지가 증가하면서 고무줄이 하중판을 당기는 힘이 증가하여 상부 구조물이 흔들리며 아래층으로 전달되던 충격 하중을 위로 분산, 구조물 지진 피해 저감

탄성도르래 작동

하중블록 설치 x	하중블록 6개 설치 (3kg)	하중블록 12개 설치 (6kg=3층 고정하중)	에너지 증가(진동 시험) 하중판 상승

면진 설계



면진 장치 설계

- 2층과 3층 사이에 면진 장치 설치
- 2층 상부 슬래브에 16개의 면진 구슬 배치
- 지진동에 의한 xy 축 자유 이동으로 면진판의 수평 변위 유도

위치 선정 이유

- 지면과 구조물 사이에 면진 장치를 설치하면 장치가 견뎌야 하는 수직 하중 증가
- 주어진 재료를 사용해서 구조물 전체의 수직하중을 부담할 수 있는 면진 장치를 제작하기에 시공성, 경제성 측면에서 한계 발생



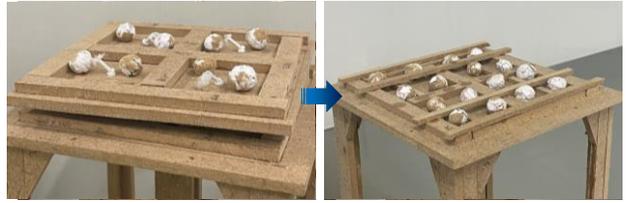
면진 장치를 중간에 설치하여 **4층·옥상층 고정하중과 3~4층 구조물 자중만 저항하도록 설계** (3층 고정하중은 탄성도르래 부담)

면진 구슬 제작 방법



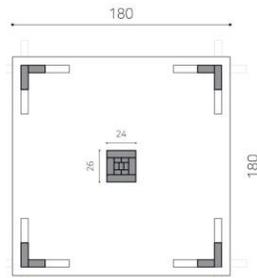
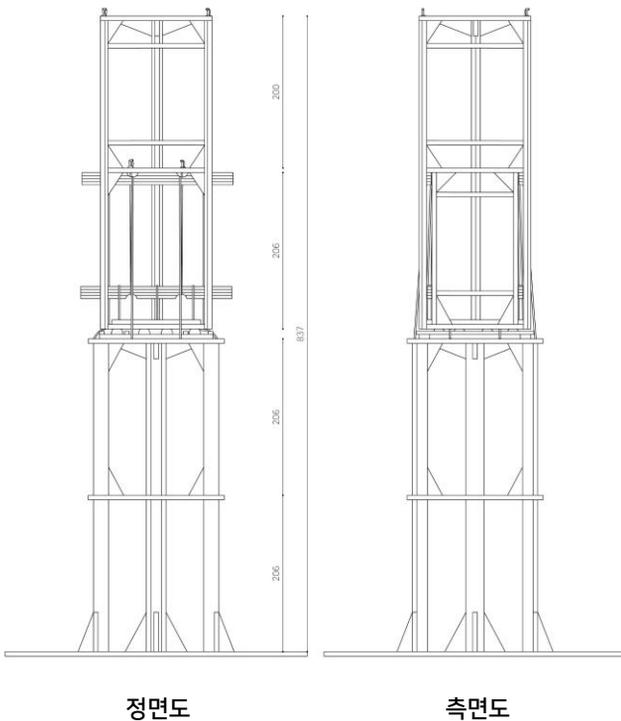
- 지름 12mm의 원형으로 제작
- 톱밥과 록타이트를 섞고 종이로 감싸 원형으로 성형
- 울퉁불퉁한 부분을 톱밥으로 매끈하게 마감

면진 장치 수정 과정

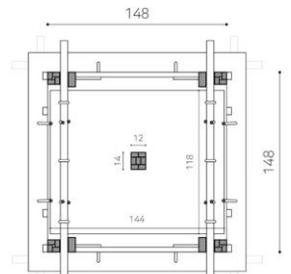


수평변위 유도를 위해 이중 볼베어링 구조로 설계했으나 수직 변위가 함께 발생하여 면진 장치 설계 수정
→ **최종 설계안 진동 시험에서 수평 변위 확인**

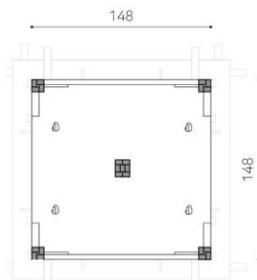
설계 도면



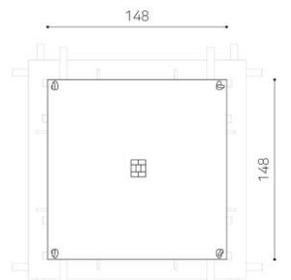
2층 평면도



3층 평면도



4층 평면도

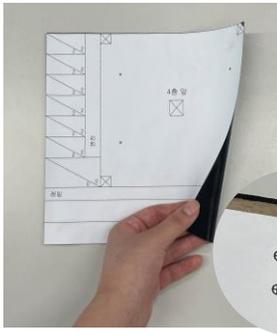


옥상 평면도

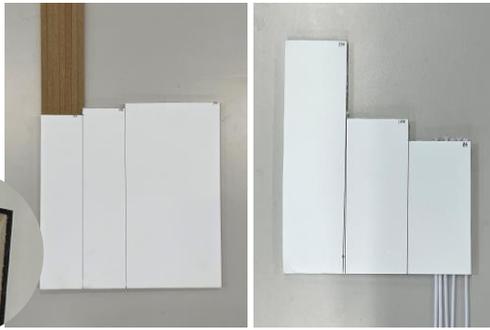
시공 관리

사전 준비 단계

설계 도면 준비



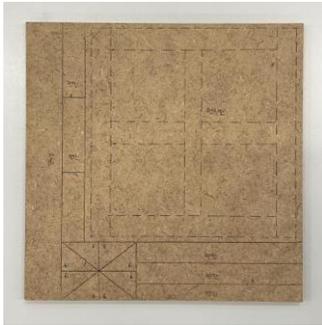
스트립, 고무줄 절단



- 절단(실선), 부착(점선), 부재종류 및 번호 등을 표시한 플레이트 가공용 도면을 먹지에 붙여 사전 준비
- 플레이트 앞뒤 도면 방향이 헛갈리지 않도록 컬러 마킹
- 스트립, 고무줄을 빠르게 절단하기 위해 설계된 치수에 맞춰 길이를 표시해둔 자를 자체제작

구조물 제작 단계

도면 먹매김



시간을 절약하면서 정확하게 도면 작도, 절단, 시공하기 위해 먹지 활용

- 마스킹 테이프를 활용해 미리 준비한 먹지 도면을 플레이트에 부착
- 도면에 표시된 실선, 점선, 구멍, 도면 종류, 번호 작도 및 표시
- 작도 후, 구조물 제작 재료인 A4 용지와 헛갈리지 않도록 지퍼백에 보관

숙련도 관리

전동공구 활용, 헌치 절단 등 숙련도가 필요한 작업은 담당자를 정해 시간 단축

- 민경: 플레이트 절단, 면진 구슬 제작
- 민영: 플레이트 천공, 도르래 제작
- 오영: 스트립 절단, 기둥 제작
- 채은: 헌치 절단, 구조물 조립

공정표

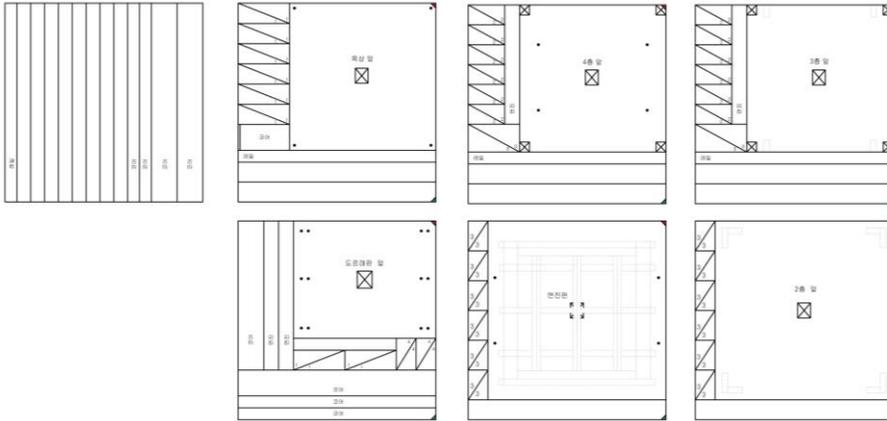
구분		소요시간														
		1시간						2시간					3시간			
		10분	20분	30분	40분	50분	60분	70분	80분	90분	100분	110분	120분	130분	140분	150분
준비	작도	■	■	■												
부재 가공	기둥		■	■	■											
	슬래브		■	■	■	■										
	헌치			■	■	■	■	■								
	도르래				■	■	■	■	■							
구조물 시공	면진 장치					■	■	■	■	■						
	가새									■						
	구조물 조립					■	■	■	■	■	■					
	헌치 설치								■	■	■	■				
마감	도르래 시공							■	■	■	■	■				
	면진 장치 시공										■	■	■	■	■	
	하중블록 설치													■	■	
	가새 설치														■	

총 2시간 30분 소요(예정)

원가 관리

부재 설계

- MDF 플레이트 최적효율 가공으로 경제성 확보
- 플레이트 가공 후 나온 톱밥을 활용해 면진 구슬 제작



재료 원가		
재료	단가 (백만원)	물량
MDF Base	0	1개
MDF Strip	10	32개
MDF Plate	100	7개
스트링 고무줄	40	5개
A4지	10	1개
접착제	200	2개
총합		1,630

세부 단가표

분류	부재	상세	수량	가격 (백만원)	분류	부재	상세	수량	가격 (백만원)	
1-2층	슬래브	Plate (180*180*6)	2	162	3-4층	슬래브	Plate (150*150*6)	3	168.8	
	기둥	Plate (20*200*6) 1개	8	136		기둥	Strip (400*6*4) 4개	4	106.7	
		Plate (14*200*6) 1개					고무줄 8.5cm 1개			22.7
	코어	Strip (418*6*4) 7개	1	49.2		코어	Strip (406*6*4) 7개	1	47.4	
		Plate (26*200*6) 4개, (12*200*6) 4개								
	헌치	중		24		22.2	헌치	작은	4	3
			대	12		15.6		작중	24	19.2
대대			4	7.3	대	4		5.2		
도르래	고정도르래	Strip (182*6*4) 4개	2	24.3	가새	Strip (102*6*4)	4	6.8		
	움직도르래	Strip (188*6*4) 4개	2	25.1		Strip (128*6*4)	8	17.1		
	레일	Plate (13*194*6)	4	25.2	면진층	면진판	Plate (150*150*60)	2	112.5	
						섹션	Strip (157*6*4)	5	13.1	
	하중판	Plate (118*144*6)	1	42.5			면진 구슬	톱밥, 록타이트, 종이	16	0.1
줄	고무줄 40cm	4	106.7	기타	접착제	록타이트 401	2	400		
		고무줄 15cm	6						60	

총 1,630,000,000 원