

2025 구조물 내진설계 경진대회

SEISMIC STRUCTURAL DESIGN CONTEST 2025

구조물 붕괴 방지를 위한 내진설계

TEAM

Y-POINT

지도교수

김준희

팀원

임다원(팀장)

고유진

홍정의

배채윤

목차

01 설계 개요

02 설계 CONCEPT

03 설계 상세

-기둥 단면 설계

-가새 분석

-구조물 고유주기 분석

-제진 장치 설계

-면진 장치 설계

04 진동대 실험 및 보완

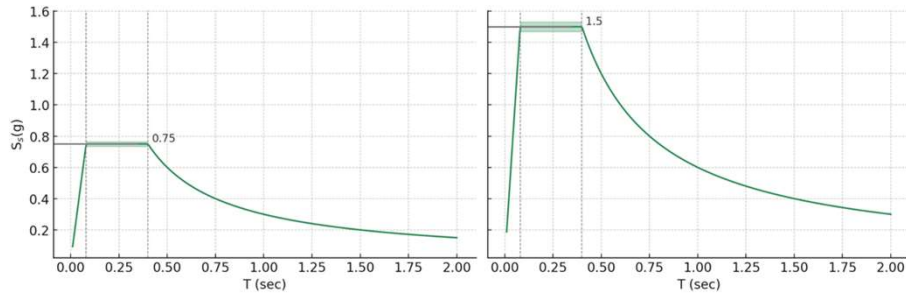
05 도면&원가 관리&공정표



설계 개요

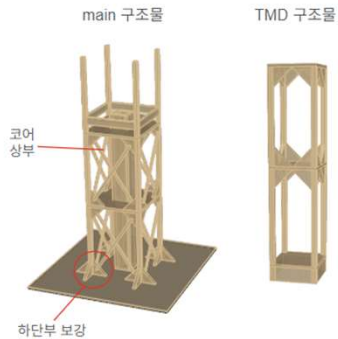
설계응답스펙트럼

y축 Sa x축 T(sec)



∴ 0.08~0.4sec에서 설계 스펙트럼 가속도가 최대가 된다.
 최대 설계 스펙트럼 가속도를 피해 고유주기 증가를 유도한다.
 지진 가속도 0.7g에서 파괴를 유도한다.

가새와 거셋플레이트를 활용하여 횡력에 저항한다. TMD 구조(Tuned Massed Damper)를 이용해 제진효과를 내고, 종이 댐퍼를 이용해 충격이 전달되는 시간을 늘려 충격력을 줄인다. 볼 베어링과 같은 면진장치를 두어 TMD 위쪽 구조물을 코어 상부와 떨어뜨려 놓아 자유롭게 거동하게 해 TMD의 역할을 하도록 한다. 슬라브 제작 후 남은 플레이트를 활용해 최하단부 기둥을 보강해 하단부 파단을 방지하고 밀면 전단력을 보강한다.



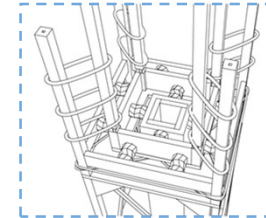
내진 구조: 각 부재가 지진력에 저항할 수 있도록 강성을 높이는 개념이다.
면진 구조: 건물과 지반을 분리하여 구조물이 받는 지진 에너지를 분산시키는 개념이다.
제진 구조: 제진장치를 활용해 지진에너지를 상쇄시키는 개념이다.

오른쪽 이미지 출처 http://rev.co.kr/h2_engineering/theory_view.asp?id=706&page=2&pagekey=352&search=&n=61

설계 CONCEPT

TMD (Tuned Mass Damper)

- 3, 4층 구조물을 TMD로 활용하여 지진에 의한 진동 상쇄
- main structure의 3층 기둥과 고무줄로 연결하여 수평 변위 제어
- TMD 하부의 면진층에는 고무줄의 인장력을 이용한 구조물 설치



종이 댐퍼 & 고무줄 제진 장치

- 종이 댐퍼의 탄성력을 활용하여 제진 효과 구현
- TMD와 main structure의 기둥을 고무줄로 연결
- > TMD의 수평 변위를 제어하고 제진 효과 구현

고무줄 면진 장치

- 고무줄의 탄성과 인장력을 이용해 TMD가 진동에 탄력적으로 응답하도록함

CORE

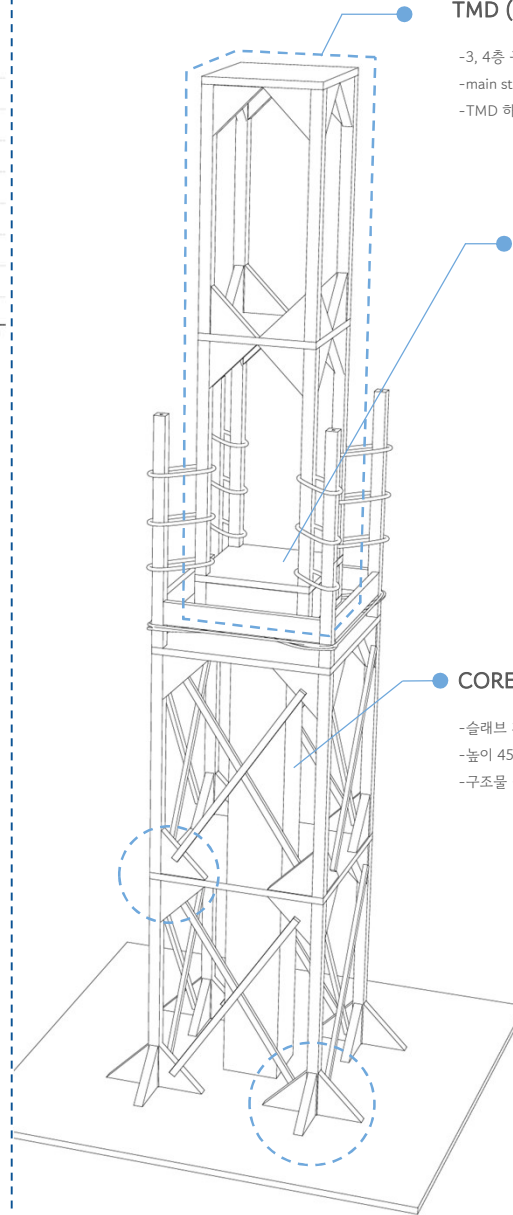
- 슬라브 제작 후 남은 MDF를 활용해 50mm x 50mm의 CORE 구성
- 높이 450mm로 TMD를 일부 관통하고 접합은 X -> TMD가 자유롭게 거동 가능
- 구조물 중심에 위치하여 수평하중에 의한 비틀림 억제

X자 가새

- 마이다스 분석 결과 변위가 가장 작은 X자 가새 설치
- 다른 가새에 비해 시공성이 유리한 형태 채택
- 구조물의 수평변위를 제어하여 안정성 강화

거셋 플레이트(GUSSET PLATE)

- 구조물의 지점과 점점에 설치하여 점접면적 확보
- 지진하중에 의한 응력 분산
- 전단력과 인장력에 저항하여 구조물 강도 보강
- 남는 MDF plate를 활용하여 TMD의 절점 보강



설계 상세

재료 물성치 분석 & 기둥 단면 설계

MDF Strip 탄성계수 $E = \frac{PL^3}{3\delta I}$

strip 1개 (4mm X 6mm) : 하중 3.1N 에 대한 평균 변위 6.8mm 일 때 탄성계수 $E = 2110.57 \text{ Mpa}$

단면 case 분류

1) $I_x = 12 \times \frac{4^3}{12} = 64\text{mm}^4$ $I_y = 4 \times \frac{12^3}{12} = 576\text{mm}^4$

2) $I_x = 10 \times \frac{10^3}{12} - 2 \times \frac{2^3}{12} = 832\text{mm}^4 = I_y$

3) $I_x = 6 \times \frac{8^3}{12} = 256\text{mm}^4$ $I_y = 8 \times \frac{6^3}{12} = 144\text{mm}^4$

4) $I_x = 12 \times \frac{8^3}{12} = 512\text{mm}^4$ $I_y = 8 \times \frac{12^3}{12} = 1152\text{mm}^4$

1: 12mm X 4mm 3: 6mm X 8mm
2: 10mm X 10mm 4: 12mm X 8mm

∴ case 2번과 4번이 1,3번보다 강성이 큼.
다만 x,y축이 동일한 힘으로 저항할 수 있도록 균등한 단면성능을 갖는
2번의 단면을 기둥단면으로 결정

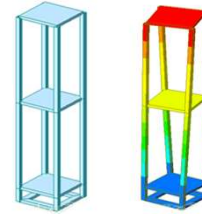
가새 선정 마이다는 분석

형태	X자 가새	s자 가새	v자 가새	별모양 가새	복합 X자 가새
변위	18mm	22.5mm	38mm	18mm	21.6mm

- 가새 형태별 변위 분석 결과 변위가 가장 작은 **X자 가새**로 선정
- X자 가새와 별모양 가새의 변위가 크게 차이 나지 않지만 경제성과 시공성을 고려하여 X자 가새를 선택함

구조물 고유주기 분석 마이다는 분석

TMD의 고유주기



Mode No	Frequency		Period	Tolerance
	(rad/sec)	(cycle/sec)	(sec)	
1	7.2924	1.1606	0.8616	1.6017e-070
2	7.3012	1.1620	0.8606	1.0125e-061
3	7.3012	1.1620	0.8606	4.3704e-061
4	20.5796	3.2753	0.3053	9.2683e-055
5	20.5796	3.2753	0.3053	4.1907e-055

수평하중으로 인한 구조물의 진동과 질량 참여율을 고려하여 모드1의 결과를 선택

→ 0.8616 sec

main structure 고유주기

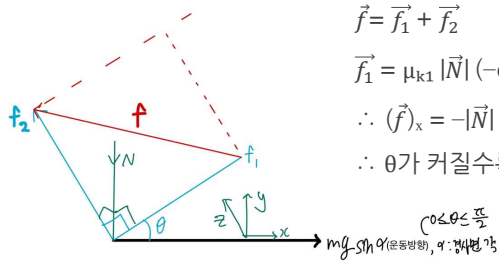
X자 가새를 추가하며 TMD와 가장 유사한 고유주기를 갖는 구조물을 선택

2.1090 sec 1.4369 sec **0.8641 sec**

Node	Mode	UX	UY	UZ	RX
		EIGENVALUE ANALYSIS			
Mode No	Frequency		Period	Tolerance	
	(rad/sec)	(cycle/sec)	(sec)		
1	7.2712	1.1572	0.8641	8.6182e-057	
2	7.2775	1.1582	0.8634	1.2093e-056	
3	8.7397	1.3910	0.7189	1.8054e-051	
4	9.7839	1.5572	0.6422	5.5590e-049	
5	9.7839	1.5572	0.6422	4.4962e-032	

<1, 2층 모두 가새가 있는 경우의 고유 주기>

마찰계수 실험



$$\vec{f} = \vec{f}_1 + \vec{f}_2$$

$$\vec{f}_1 = \mu_{k1} |\vec{N}| (-\cos \theta, -\sin \theta), \vec{f}_2 = \mu_{k2} |\vec{N}| (-\sin \theta, \cos \theta)$$

$$\therefore (\vec{f})_x = -|\vec{N}| (\mu_{k1} \cos \theta + \mu_{k2} \sin \theta)$$

$$\therefore \theta \text{가 커질수록 마찰력 감소, } \mu_{k1} > \mu_{k2}$$

$$\theta = \tan^{-1}(y/x)$$

$$\sum F = 0 \Rightarrow mg \sin \theta - \mu_k mg \cos \theta, \sin \theta = \mu_k \cos \theta$$

$$\mu_k = \tan \theta = y/x$$

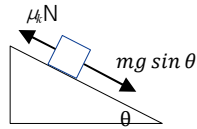
MDF-string

(1) $w=0, y=10.6\text{cm}, x=16.85\text{cm} : \theta = \tan^{-1}(y/x) = 32.17^\circ$

$$\mu_k = \tan \theta = y/x = 0.63$$

(2) $w=\frac{\pi}{2}, y=8.55\text{cm}, x=18\text{cm}$

$$: \mu_k = y/x = 0.48$$

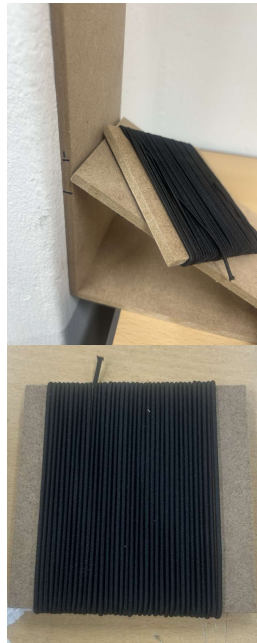


PAPER-string

(1) $w=0, y=6.48\text{cm}, x=18.85\text{cm} : \mu_k = y/x = 0.34 = \mu_{k1}$

(2) $w=\frac{\pi}{2}, y=5.6\text{cm}, x=19.2\text{cm} : \mu_k = y/x = 0.29 = \mu_{k2}$

\therefore 마찰력을 줄이기 위해 종이를 사용한다.



$x=19.45\text{cm}, y=3.7\text{cm}$, 접착제 20g (공칭질량)
스프링 원형 12cm, 스프링 최대 압축 길이 1.1cm

$F_{spring} - F_{접착제} = 0$ 이 되는 스프링 길이 5.6cm

$$k(12 - 5.6)\text{cm} - \mu_k \times 20\text{g} \times \frac{9.8\text{m}}{\text{s}^2} = 0,$$

$$k = 5.82583\text{g} \cdot \text{m/s}^2 \cdot \text{cm} = 5.8\text{g} \cdot \text{m/s}^2 \cdot \text{cm}$$

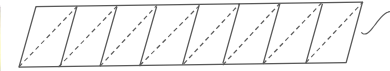
※ 모든 실험은 경사각을 조정하며 진행하였다.



제진 장치 설계 종이 댐퍼 & 고무줄 탄성 활용



<종이 댐퍼>



TMD의 운동에 따라 발생하는 진동 에너지를 종이 댐퍼의 마찰력을 통해 감쇠시키고 탄성을 이용하여 제진 장치로 거동하도록 설계

기존 스프링 댐퍼 대신 비선형 거동을 유도하는 사선 접힘 패턴의 댐퍼 제작
↓
하중에 따라 면 간 상호작용이 변화하여 에너지 소산과 복원력 확보



<종이 댐퍼 & 고무줄 장치 설치>

TMD의 하부 기둥을 main structure의 3층 기둥과 고무줄로 연결해 고무줄의 인장력이 복원력으로 작용하도록 유도 이를 통해 TMD의 수평 변위 제어

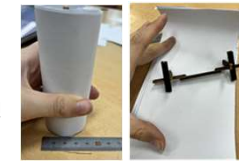
면진 장치 설계 고무줄 탄성 활용

TMD 하부에 위치할 면진 장치로 고무줄 탄성 활용안을 채택

1차 시도 : 볼 베어링

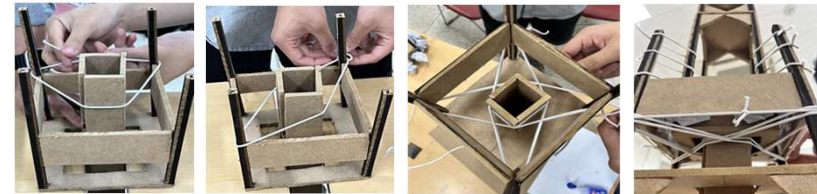
2차 시도 : 롤러

종이를 뭉쳐 볼베어링을 만들고 접착제를 이용해 마찰을 줄이려고 하였으나 모의실험 결과, 단면 플레이트 폭을 고려했을 때 볼 지름이 15mm이하가 되어야 했기 때문에 높이가 적절하지 않아 실제 거동이 면진 효과를 내기 어렵다고 판단하여 롤러를 이용하는 방안을 고려했다.



TMD 구조물을 코어와 위로 락을 만큼의 지름(40mm)을 갖는 롤러를 만들기 위해 남은 MDF strip으로 모양을 잡고 종이를 여러 겹 돌려서 만들었다. 그러나 면진효과를 충분히 낼 만큼 제대로 굴러가지 않고, 경제성 측면에서도 부적절했기에 다른 방법을 고려하게 됨.

3차 시도 : 고무줄 탄성을 활용한 면진 장치(최종 채택)



TMD 구조물이 코어와 닿지 않도록 슬래브 구멍을 더 크게 내고, 구조물이 자유롭게 거동할 수 있도록 고무줄을 이용한 면진장치를 적용하였다. TMD가 너무 자유롭게 움직이면 구조물에서 이탈하거나 불안정해질 수 있기 때문에, 이를 방지하면서도 진동 에너지를 잘 흡수할 수 있도록 하는 연결 방식을 고민했다.

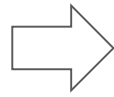
그 결과, 고무줄로 코어와 TMD 기둥을 여러 방향에서 단단히 묶는 방식으로 구조를 만들었다. 일종의 받침 역할을 하는 고무줄은 탄성이 충분해 TMD가 어느 정도 자유롭게 흔들릴 수 있도록 하고, 동시에 과도하게 움직이지 않도록 한다. 이 방법으로 TMD가 구조물의 고유주기에 맞춰 응답하여 전체 구조의 안정성도 확보할 수 있다.

진동대 실험 및 보완

[기존 모델 실험]



0.5g에서 가새와 거셋플레이트 부근 파단
+
TMD의 과도한 거동 방지를 위한 방안 필요



[구조물 보강]

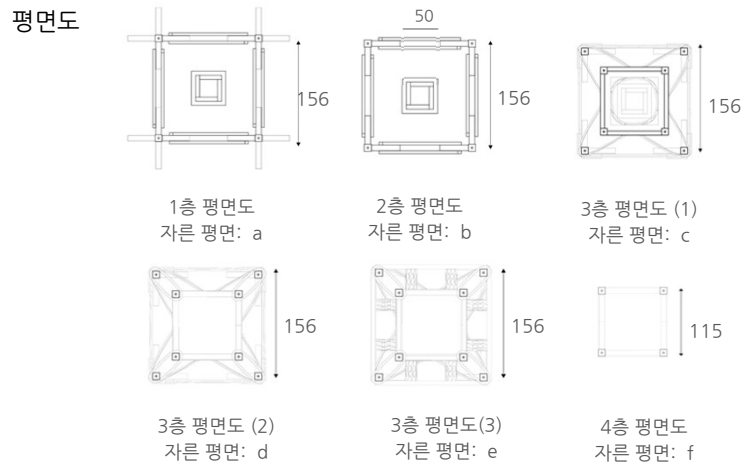
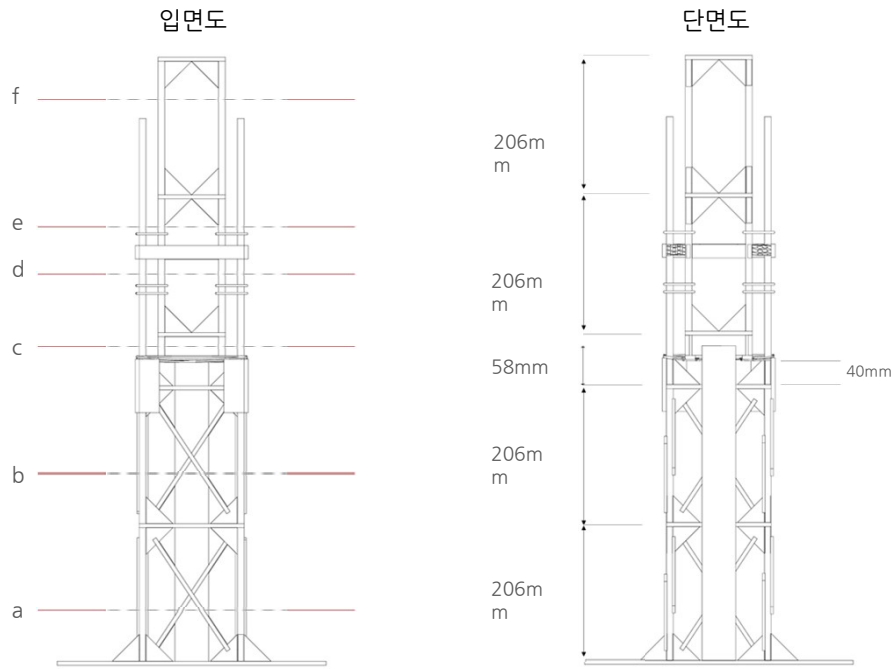


3층 외곽 기둥의 길이 연장
가이드 벽 & 종이 댐퍼 위치 조정
고무줄 댐퍼 위치 조정
기둥 연결부 플레이트로 보강



최종 설계안

도면 & 원가 관리 & 공정표



재료명	개수	단가(백만원)	합계(백만원)	비고(규격)
MDF base	1	-	-	400mm×400mm×6mm
MDF strip	46	10	460	600mm×4mm×6mm
MDF plate	10	100	1000	200mm×200mm×6mm
스트링 고무줄	5	40	200	600mm
A4	9	10	90	210mm×297mm
접착제	1	200	200	20g
총액(백만원)			1950	

구분	소요 시간								
	1시간			2시간			3시간		
	20분	40분	60분	80분	100분	120분	140분	160분	180분
부재 제작	바닥판 제작 및 천공	■							
	코어 및 기둥 제작	■							
	가새 제작		■						
	중이댐퍼 제작			■					
	거셋 플레이트 제작				■				
시공	코어 및 기둥 조립				■				
	바닥과 수직부재 조립					■			
	거셋 플레이트 조립						■		
	중이댐퍼 설치							■	
	고무줄 연진장치 설치							■	
마감	기둥과 TMD 연결						■		
	하중블록 설치							■	
	최종 보강							■	
총 공정 시간								2시간 30분	