

# 2025년 구조물 내진설계 경진대회



SEISMIC STRUCTURE DESIGN CONTEST 2025



KOUNKUK UNIVERSITY  
CIVIL & ENVIRONMENTAL ENGINEERING



지도 교수님: 하동호 교수님



팀명: B-BOLD

## 01 Intro

- ❖ 대회 규정 분석
- ❖ 지진파 분석
- ❖ 물성치 분석
- ❖ 내진설계 아이디어

## 02 Process

- ❖ 주요기술 분석
- ❖ 전산구조해석
- ❖ 실험 및 분석

## 03 Conclusion

- ❖ 최종 모델링
- ❖ 평면도 & 입면도
- ❖ 경제성 및 공정표

## About Us

### 지도 교수님

건국대학교  
사회환경공학부  
하동호 교수님

### 팀원

### 팀 소개: B-BOLD



**Be Bold. We'll Be a Bold mark in your life.**  
Be Bold' Me,il Be a Bold mark in your life'

저희는 제 1기 건국대학교 사회환경공학부 학술 동아리 B-BOLD 입니다. “Be bold”의 축약어로, “두려움 없이 도전하고, 한계를 넘어서라.”는 의미를 담고 있습니다. 도면 위의 선 하나, 구조물 속의 부재 하나에도 실용성과 창의성을 접목시켜, Bold한 태도로 이번 대회에 참가하는 것이 저희 팀의 목표입니다.

#### 박태영 (4학년)

- 지진파 분석
- 구조해석
- 구조물 제작

#### 고송호 (4학년)

- 모델링
- 구조해석
- 구조물 제작

#### 양은서 (4학년)

- 구조해석
- 경제성/시공성 분석
- 구조물 제작

#### 김서진 (4학년)

- 보고서 작성
- 물성치 분석
- 구조물 제작

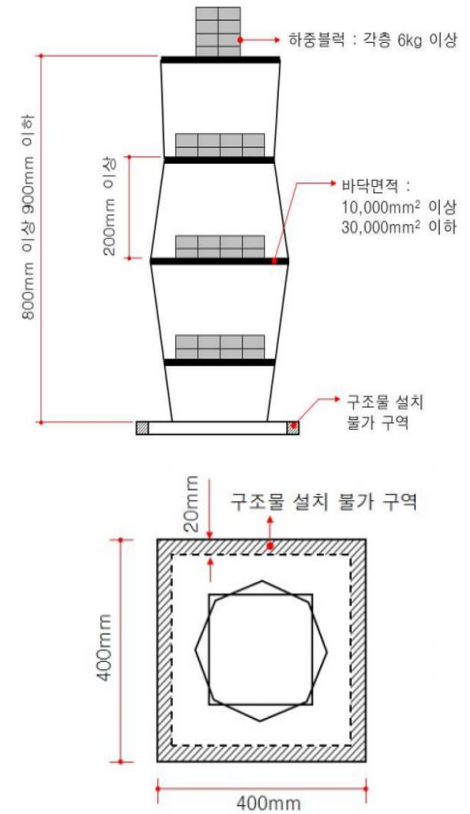
# 대회 규정 분석

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. 심미성과 창의성을 추구하는 **설계 시공성과 경제성**을 고려
7. 구조물의 구조해석 능력 외 도면화 수량산출 및 내역작성 기술

## ❖ 작품 재료 규정

재료명	단위	규격	단위수량 [개]	단가 [백만원]
MDF Base (기초판)	개	400mm × 400mm × 6mm	1	-
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	A4	1	10
접착제	개	20g	1	200

## ❖ 구조물 규정



# 지진파 분석

유효 수평 지반 가속도	
재현주기(년)	유효수평지반가속도(S)
500	0.3g
2400	0.6g

지반응답증폭계수	
단주기(F <sub>a</sub> )	1.5
1초 주기(F <sub>v</sub> )	1.5

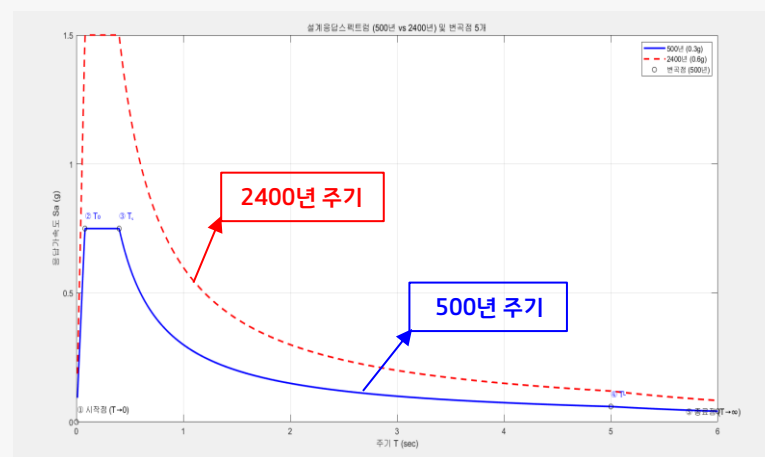
	500년	2400년
위험도 계수(I)	1	2
지진구역계수(Z)	0.3g	0.3g

	500년	2400년
단주기 설계 스펙트럼 가속도(S <sub>DS</sub> )	0.75g	1.5g
1초주기 설계 스펙트럼 가속도(S <sub>D1</sub> )	0.3g	0.6g

$$S_{DS} = S \times 2.5 \times F_a \times \frac{2}{3}, S_{D1} = S \times F_v \times \frac{2}{3}$$

구조물의 고유주기 500년, 2400년	
T <sub>0</sub> = 0.2 × S <sub>D1</sub> /S <sub>DS</sub> (변곡점)	0.08 sec
T <sub>S</sub> = S <sub>D1</sub> /S <sub>DS</sub> (변곡점)	0.4 sec
T <sub>L</sub> (장주기)	5 sec

## ❖ 설계 응답 가속도 스펙트럼



- 500년 설계 스펙트럼
  - 평탄구간: T<sub>0</sub>=0.080 sec ~ T<sub>S</sub>=0.400 sec
  - 해당 구간의 응답 가속도(S<sub>DS</sub>): 0.75g
- 2400년 설계 스펙트럼
  - 평탄구간: T<sub>0</sub>=0.080 sec ~ T<sub>S</sub>=0.400 sec
  - 해당 구간의 응답 가속도(S<sub>DS</sub>): 1.5g

### <설계 목표>

- 구조물이 지진 가속도 0.3g에 기능 수행 수준 유지한다.
- 구조물이 지진 가속도 0.7g에 붕괴하도록 유도한다
- 0.08sec ~ 0.4sec에서 설계 응답 스펙트럼 가속도의 최대치를 갖도록 설계한다.

**“0.08~0.4 sec에서 설계 스펙트럼 가속도 최대”**

## 물성치 분석 (실험)

- MDF Strip 단일부재 & 기둥부재 **탄성계수**  
: 캔틸레버 보의 처짐식을 통해 탄성계수 산정

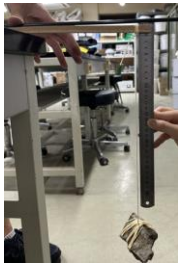
$$\delta = \frac{PL^3}{3EI} \rightarrow E = \frac{PL^3}{3\delta I}$$

- 단일부재 (4mm×6mm): 4mm 방향 굽힘 작용(약축 방향) ■



단일부재 (4mm×6mm)	
하중 P (N)	0.069×9.81= 0.68
경간거리 L (mm)	200
단면 2차 모멘트 (mm <sup>2</sup> )	32
평균 5회 처짐 (mm)	25
탄성계수 (MPa)	2266.7

- 기둥부재 (10mm×10mm): 굽힘이 10mm 방향으로 작용 ■



기둥부재 (10mm×10mm)	
하중 P (N)	0.328×9.81= 3.22 N
경간거리 L (mm)	200
단면 2차 모멘트 (mm <sup>2</sup> )	832
평균 5회 처짐 (mm)	4
탄성계수 (MPa)	2580.1

양방향의 동등한 단면2차모멘트와 탄성계수가 큰 단면을 확보할 수 있는, **10mm×10mm 단면 선택**

- MDF Strip 단일부재 & 기둥부재 **휨 강도**  
: 단순보의 처짐 측정 및 휨 강도 산정

$$M = \frac{PL}{4}$$

- 단일부재 (4mm×6mm): 처짐 및 휨 강도 계산 ■



단일부재 (4mm×6mm)	
하중 P (N)	0.069×9.81= 0.68
경간거리 L (mm)	400
평균 5회 처짐 (mm)	10
휨 강도 (Nmm)	68

- 기둥부재 (10mm×10mm): 처짐 및 휨 강도 계산



기둥부재 (10mm×10mm)	
하중 P (N)	0.328×9.81= 3.22
경간거리 L (mm)	400
평균 5회 처짐 (mm)	5
휨 강도 (Nmm)	322

점 하중에 따른 처짐의 변위가 작고, 휨 강도가 큰 단면을 확보하는 **10mm×10mm 단면 선택**  
∴ 강성이 큰 단면을 통해 시공성, 구조적 안정성을 확보한다.  
이로서 구조물의 내구성을 강화하고 변형을 최소화 한다.

## 내진설계 아이디어

- 구조 전략: 본 구조물은 KDS 41 17 00 내진설계기준에 기반하여, 실제 내진구조의 원리를 사모형에 효과적으로 적용하는 것을 핵심 설계 전략으로 삼았다

### 1. 현실 내진 솔루션을 구조모형에 구현한 전략

전략	효과	모방 사례
죽순형 메가칼럼 도입	<b>재료 효율화 달성</b> 강도/강성 최적화 관련 수식(휨강도 기준): $I(x) = \frac{1}{12}b(x)h(x)^3$ ∴ 보의 폭과 깊이는 점진적으로 조절 가능 → <b>응력 분포 최적화</b>	롯데타워 및 도쿄 스카이트리 등 고층 건물의 설계 전략 → 소형 모형에 적용
외부 와이어 감기(나선형 보강)	<b>에너지 소산 및 부재 일체화 유도</b>	프리스트레스트 콘크리트의 강선 감기 방식& 외부 브레이싱 구조
이력형 마찰 댐퍼 사용	상부층에 마찰력 기반으로 에너지 소산 가능 구조 적용 → <b>제진 효과 확보</b>	이력형 강재 댐퍼를 사용한 초고층 건물

### 2. 목조 재료 특성을 활용한 구조적 창의성

전략	효과	모방 사례
끼워 맞추기 방식	접합부를 기계적 연결 없이 마찰 및 끼움 → <b>연성, 강성 및 탄성 확보</b>	전통 목조 건축 방식
톱밥의 재활용	가공 과정에서 생성된 톱밥을 접합부 충진재로 활용 → <b>유격 보정 및 접합력 증가에 기여 + 구조적 일체화 및 시공성 향상</b>	모르타르/그라우트/패킹재

### 3. KDS 41 17 00 내진설계기준 기반 전략

전략	효과
내진구조계획 - 수직재 연속성 확보	절단부 교차 회전 → <b>접합면 약점 분산 및 연속성 확보</b>
비정형성 지양 & 정형 대형 평면 사용	질량 중심과 강성 중심이 일치하도록 설계 → <b>비틀림 최소화 + 지진력 방향과 무관하게 균등한 하중 전달</b>
수동 제어 기반의 내진 설계	P-Δ 효과 고려하여 불필요한 장치 축소 ∴ TMD 및 일부 면진 장치는 구조물의 변위 증폭 유발 우려 → <b>실효성 높은 감쇠 요소만 선택적 도입</b>

### 4. 시공성과 경제성의 균형 설계: 부재 치수 최적화

- 기둥 길이를 824mm 대신 825mm로 설정하여 **재단 낭비 방지**.
- 플레이트를 17×17mm로 설계하여 규정을 만족 + **시공성과 자재 효율**을 모두 확보
- 시공 오차 최소화를 위해 규격화된 치수로 제작
- 절단면 정밀 가공 및 오차 보정 기법 적용 → **접합 정확도 및 내진 일체성 확보**

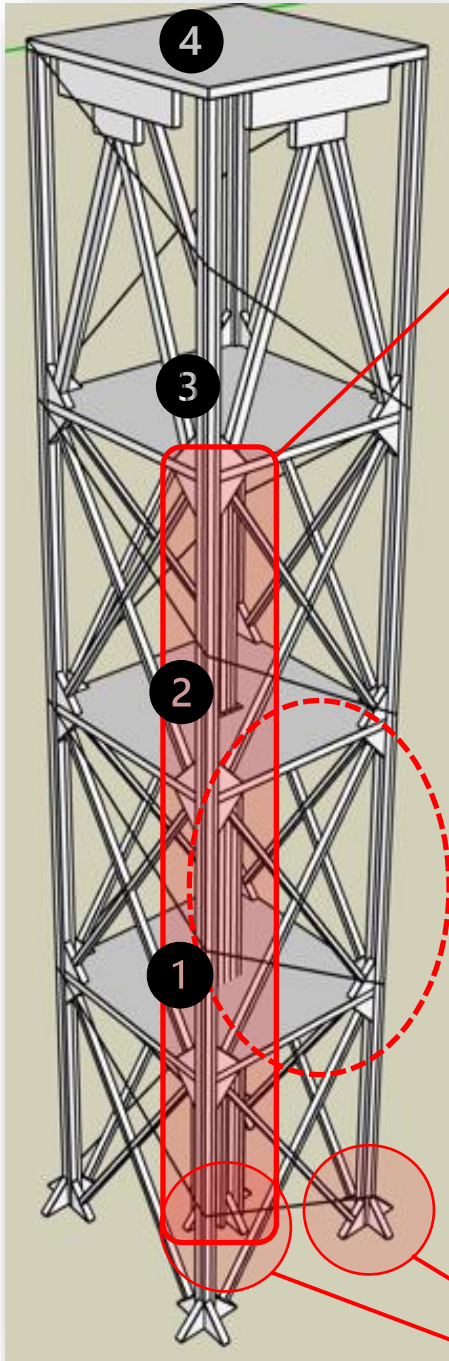
# 주요 기술 분석 (1)

## 상부

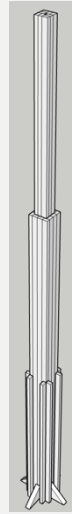
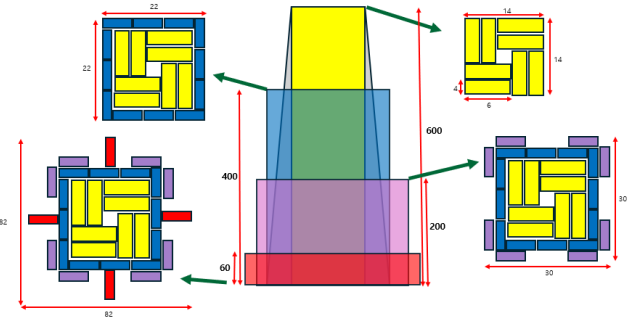
: 상층부의  
횡방향  
변위를 제진  
장치로 제어

## 하부

: 아래로  
갈수록 높은  
강성 확보를  
위한 메가  
칼럼과 삼각  
헌치

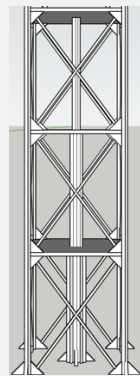


### ❖ 죽순형 메가 칼럼



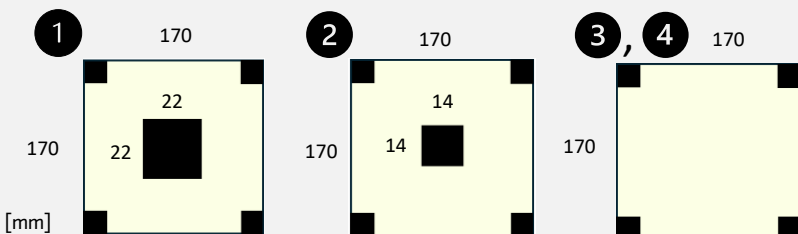
- 3층까지 이어지는 코어 기둥
- **테이퍼드 빔(Tapered Beam)**의 형태
- 최상부: 14×14 → 하부: 22×22
- 중앙에 위치하며 상부에서 하부로 갈수록 단면 폭이 증가 (죽순형)
- **점진적 단면 축소를 통한 효과적인 층별 응력 분포 유도**
- 좌굴 방지 효과, 큰 압축력/모멘트에 대응
- 풍하중, 지진하중 효과적 흡수 및 전달
- 건물의 휨 강성 증가
- 재료의 효율성과 미관 우수성

### ❖ X자 가새 & 거셋 플레이트 (30\*30)



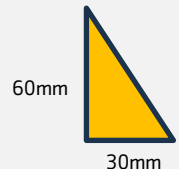
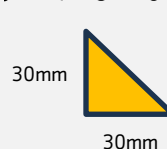
- X자형은 가장 기본적, 효율적인 방식
- 강성과 연성의 균형이 우수
- **양방향 지진하중 대응 우수**
- 대각선 2개 → 에너지 이중 분산
- **응력 분산 효과** → 좌굴/인장/파단 감소
- 휨 강성 및 전단 저항 극대화
- **구조적 대칭성** → 비틀림 억제

### ❖ 바닥 판 (170\*170)



### ❖ 헌치

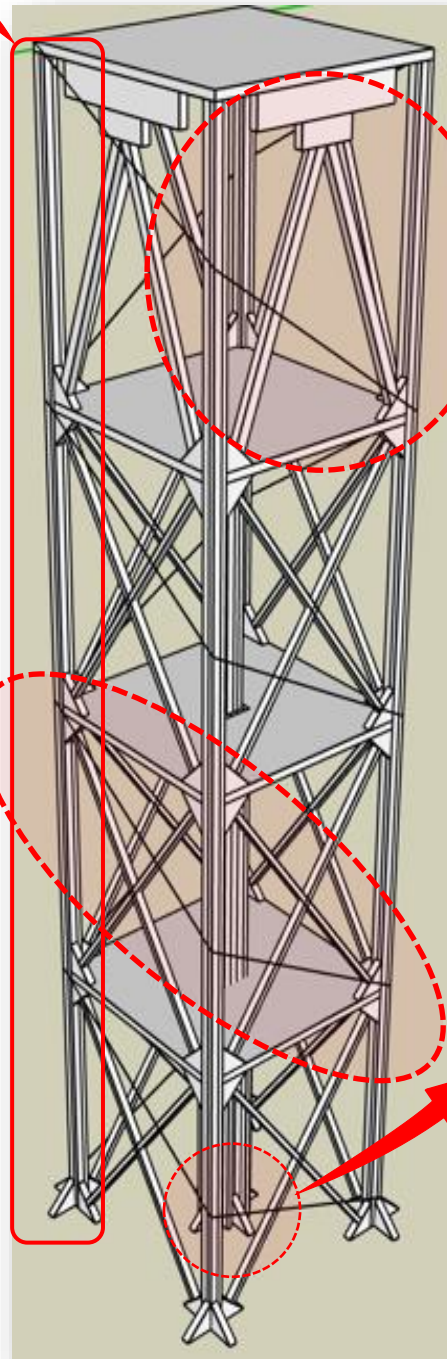
: 응력 집중 완화 & 처짐 감소 & 전단/휨 저항력 증대  
1) 외곽기둥 고정용 헌치    2) 메가칼럼 고정용 헌치



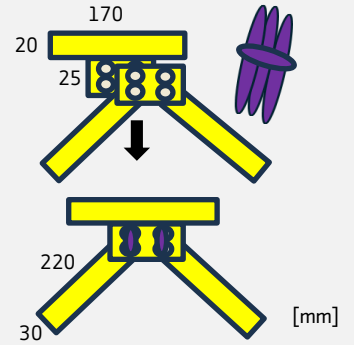
## 주요 기술 분석 (2)

### ❖ 외곽 기둥 일체화 (10\*10)

- 구조물 전체적 일체화 & 연속성
- 전체구조가 하나의 통합된 시스템
- 기둥을 구성하는 4개의 부재의 접합부를 분산시켜, 연속성 확보 및 접합 시공 오차 감소
- 외곽 기둥 부재 최대 사용 (600mm)
- KDS 41규정에 따라, 가급적 수직재는 연속성 & 급격한 변화 없도록 설계
- 기둥의 접합부 취약성 대비

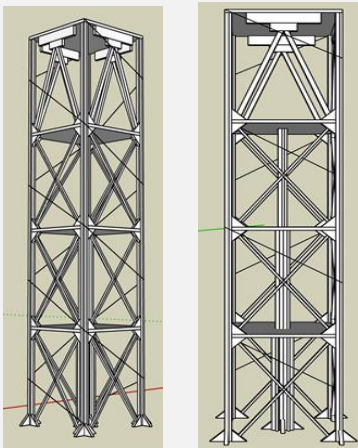


### ❖ 이력형 댐퍼 + A자 가새



- 4층 이력형 댐퍼 + A자 가새 + 면줄 사용
- 최상층 횡방향 진동 제어
- 0.7g 이상의 가속도에서 구조물의 붕괴 메커니즘 유도
- 지진에 대해 소성변형을 유도 + 에너지 흡수
- 댐퍼만 교체 가능 → 피해 부위 최소화
- 각 방향 지진 하중에 대해 충분한 여유도를 가질 수 있도록 하는 횡력 저항 시스템

### ❖ 외부 나선형 와이어



- 외부에서 나선형으로 감아, 나선형 줄이 기둥 외곽을 지지 → 횡력/좌굴 저항 강화
- 전단력 경로를 분산시켜, 전단 보강에 기여
- 줄을 장력 상태로 감아, 구조물 전체에 가압 → 균열 억제 및 연성 확보 (= 프리 스트레싱 효과)
- 줄이 늘어나며 진동 에너지 일부 흡수 및 분산 → 간접적 감쇠기 역할 수행
- 일본 전통 목조 건축에서 기둥에 줄을 감아 '충격 분산 & 연결 보강'에서 착안함
- DNA 구조에서 착안한 Double Helix Curve

### ❖ 톱밥 활용 구조 공법



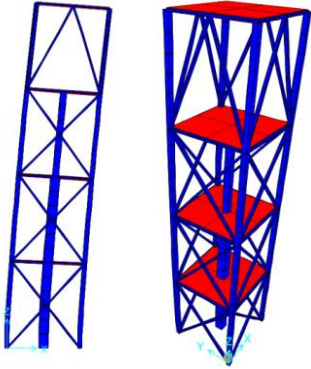
- 톱밥 충전형 감쇠 시스템을 적용한 친환경 내진 구조물
- 충진형 감쇠재 방식: 구조물의 기초 또는 접합부에 톱밥을 충전 → 마찰 감쇠 및 에너지 흡수 가능
- 복합 소재와의 결합: 접착제와 함께 압축하여, 내구성과 밀도 보완
- 비용 절감 및 시공/복구 용이성
- 지속가능한 자재 사용
- 시공 오차 줄임에 기여

# 전산구조해석 (SAP 2000 & Matlab)

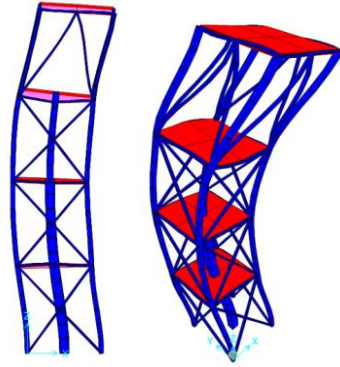
## 1. 모드 해석 & 설계 응답 스펙트럼

: 설계 구조물이 지진 등 외력을 받을 때 어떤 진동 양상(모드)으로 반응하고, 그 진동의 주기(고유진동수)가 얼마인지 분석한다. 따라서, 고유치 해석을 통해 공진 위험, 질량 참여율, 응답 스펙트럼 해석 등을 수행한다.

### • 1차, 2차 모드 (Mode 1&2)

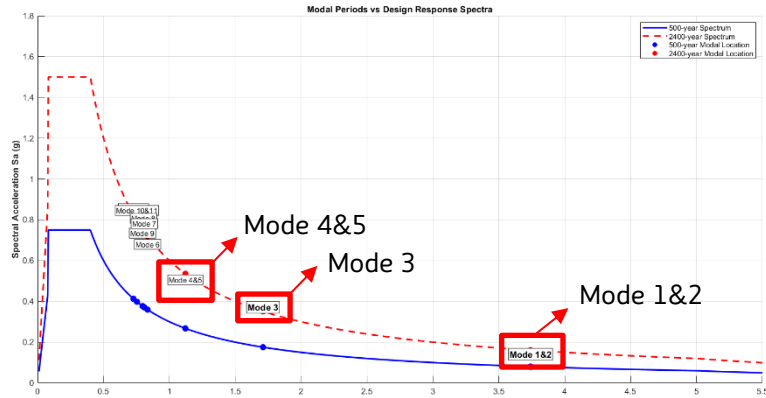


### • 4차, 5차 모드 (Mode 4&5)



EIGENVALUE ANALYSIS

Mode No.	Period (sec)	Frequency (Hz)	주요 의미
1	3.740	0.267	가장 큰 질량 참여율로 예상되는, 주요 모드
2	3.740	0.267	Mode 1과 동일, 대칭 변형 가능성
3	1.710	0.585	고차 횡 모드 가능성
4~5	1.121	0.892	더 높은 횡/비틀림 모드 가능성
6~12	0.727~0.834	1.2~1.37	고차모드로 세부 진동 거동 조절



### < 분석 결과 >

- Mode 1~5은 전체 거동을 지배한다.
- 특히, Mode 1&2는 대칭적 변형 가능성이 있다. 따라서 x, y 랜덤 가진에 동일하게 대응할 수 있다.
- 주요 고유주기: Mode 1&2는 3.74초이고, 이후 점차 감소하며 고차모드로 전이
- 설계 응답 스펙트럼 500년, 2400년 비교
  - a) 0.08~0.4초의 스펙트럼 최대영역을 모두 회피함.
  - b) 구조물의 주 주기대는 스펙트럼의 고응답대역 밖에 있음. 따라서, 공진 위험성이 낮다.

➤ **결론**: 구조물의 주요 고유주기는 설계 스펙트럼의 최대 응답구간(0.08~0.4초)을 명확히 벗어났으므로 공진 위험이 낮다. 따라서 해당 구조물은 공진을 피할 수 있도록 주기가 길게 설계됐다.

## 2. 외곽기둥 및 메가칼럼의 변위

### 1) 외곽기둥 변위

Joint Displacements of Exterior Column			
Joint No.	U1	U2 (X축 방향)	U3
10 (최상부)	0.000103	0.204752	0.020108
9	0.000149	0.138665	0.019981
8	0.000192	0.084846	0.016228
7	0.000298	0.035647	0.009725
6 (최하부)	0	0	0

### 2) 메가칼럼 변위

Joint Displacements of Mega Column			
Joint No.	U1	U2 (X축 방향)	U3
24 (최상부)	0.000099	0.138796	0.001182
23	0.00000596	0.085036	0.000731
22	0.000058	0.035823	0.000401
21 (최하부)	0	0	0

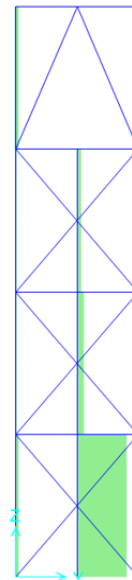
### < 분석 결과 >

- 외곽기둥 (Joint 10~6): 최상부에서 최대 변위 발생 (변위: 0.2047 m, U2 방향, 0.7g 기준)
- 메가칼럼 (Joint 24~21): 외곽기둥과 유사한 변위 분포 양상 → 일체 거동 유효하다.
- 외곽기둥과 메가칼럼이 공동으로 횡하중에 저항하며 에너지를 분산함.

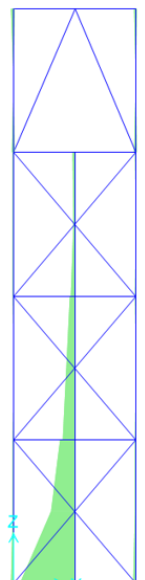
➤ **결론**: 기둥-메가칼럼 연계 설계가 잘 이루어짐 → 변형 집중 없이 에너지가 잘 분산됨

## 3. 응력 및 전단력 분포

### • 전단력도



### • 모멘트도



### < 분석 결과 >

- 전단력: 기초부 하단에서 집중 + 그래프상 분포 확인
- 모멘트: 대부분 메가칼럼에서 집중 (해석상 최대 횡 모멘트 M2 발생지점도 메가칼럼 하단에 있음)
- 이로 인해 붕괴 메커니즘은 하단부 가새 항복 및 파괴로 유도된다.

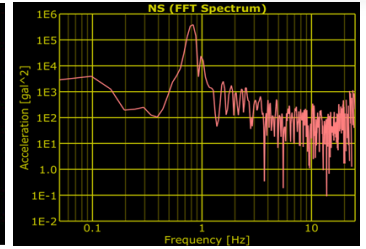
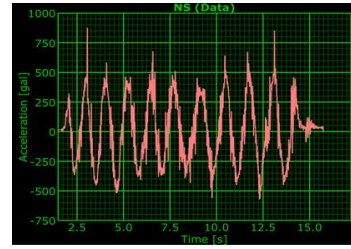
➤ **결론**: 구조 전체는 메가칼럼이 축 하중을 주로 부담하고, 하단부 가새는 횡방향 하중에 대해 저항한다.

# 실험 및 분석

## ❖ MDF 모형 구조의 내진 성능 평가

### 1) 입력 지진파 정보

- 입력 파형: 1축 최대 0.7g 진폭의 정현파(sine파) 기반 **인공지진파**
- 진동대 가진 범위: 0.3g~0.7g
- 주에너지 주파수 대역: 약 0.5~30.0 Hz



### 2) 모델 제작 및 실험

#### 1. 모델 제작



#### 2. 하중 블록 배치 후 와이어 설치



#### 3. 진동대 실험 진행



#### 4. 하부 가새부터 파괴되면서, 0.7g에서 뿔뿔히 부서짐 + 상부층 이력형 댐퍼 기능 상실



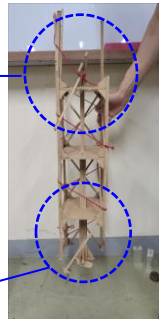
### 3) 실험 결과

인공 지진파	구조 응답	주요 관찰 사항
0.3g	비탄성거동 시작	하부 가새에서 최초 변형 발생, 에너지 집중 확인됨
0.7g	구조물 붕괴	하부 가새 이탈 및 파단 발생, 구조물 전체 파괴 진행

### 4) 구조물 파괴 양상

#### 1. 상부 이력형 댐퍼

- 상부 붕괴를 유도하며 에너지 소산 및 연성 제공
- 상부 이력형 댐퍼의 **A자 가새 파괴까지 붕괴 시나리오에 적합** (실험 결과에서 의도한 성능 확인)
- 이력형 댐퍼의 기능 상실로 인한 상부 구조물 파괴



#### 2. 하부 X자 가새

- 가장 먼저 손상 발생
- 에너지 집중에 의한 국부 좌굴 및 연성 파괴
- **구조 해석과 일치하는 예측된 붕괴 시나리오**
- 최하단부 가새의 파괴로 인한 뿔뿔히 부서짐



#### 3. 축순형 메가칼럼

- **큰 손상 없이 하중 전달 성공**
- 점진적 단면 축소를 통한 응력 분산 효과 입증
- 구조적 안전성 + 하중 중심 역할 효과적



#### 4. 외부 나선형 와이어

- 부재 일체화 + 에너지 소산 기능 수행
- **충분한 연성 확보에 기여**

### 5) 추가 고려 사항 (시공 및 실험 조건)

#### 1. 시공 오차 최소화

: 특히 와이어 고정 위치, 가새 각도, 댐퍼 체결부 정밀 시공 필요

#### 2. 하중 블록 배치 유의

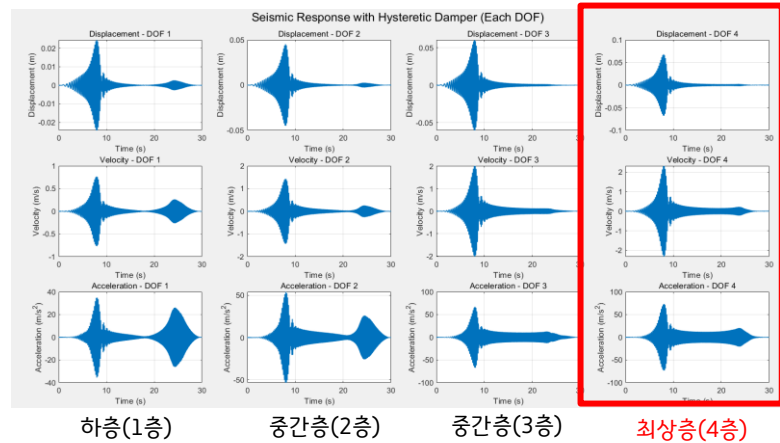
- **자중보다 상대적으로 큰 하중 블록이 편심되지 않도록 정확히 배치할 것**
- 편심은 구조 응답 왜곡 및 비대칭 파괴를 유발할 수 있음

#### 3. 남은 스트립 활용

: 줄기초(띠기초) 또는 보강용 스트럿으로 **재활용 가능성 고려**

## ❖ 이력형 마찰 댐퍼의 성능 평가

### 1) 댐퍼 설치 구조물이 지진하중을 받을 때, 각 층의 자유도 해석

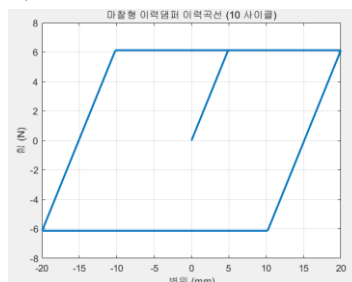


하층(1층)      중간층(2층)      중간층(3층)      최상층(4층)

#### < 최상층 분석 결과 >

- 최상층(DOF 4)은 이력형 마찰 댐퍼가 설치되는 층임.
- 위 그래프를 통해, 변위, 속도, 가속도의 진폭이 모두 초기에 가장 크지만, 빠르게 감소함을 알 수 있음.
- 최상층(DOF 4)의 안정 → 상부 하중 탈락 방지 + 구조 붕괴 방지에 기여 ∴ **최상층에 이력형 마찰 댐퍼 배치하는 전략은 효과적임.**

### 2) 이력형 마찰 댐퍼의 이력 곡선

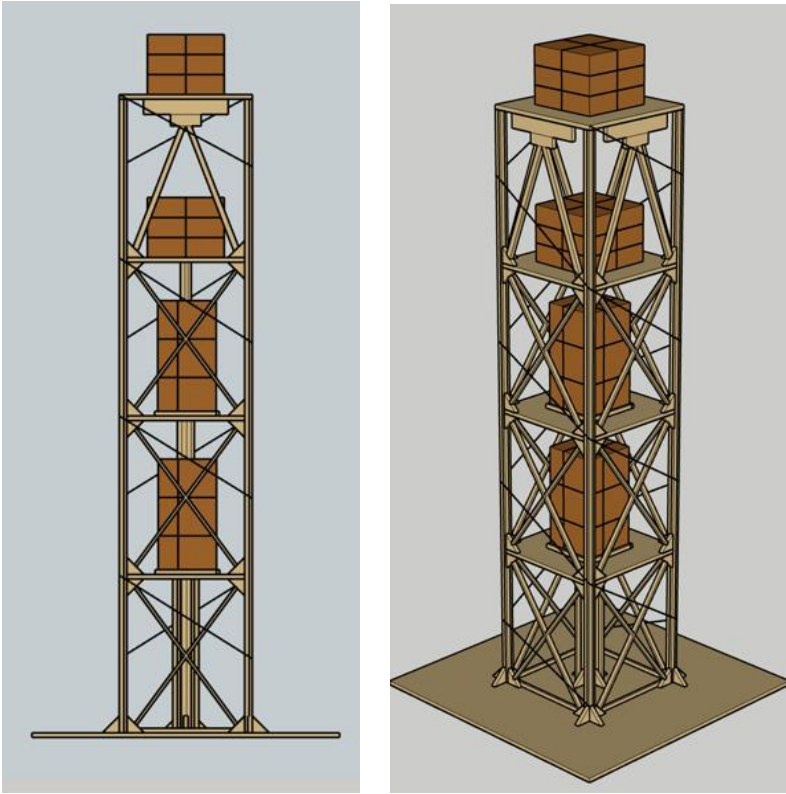


한계 마찰력	6.13 N
사이클당 에너지 소산량	0.369 N·m
전체 에너지 소산량 (10회)	0.369×10=3.687 N·m
4방향 중 1방향으로만 작동 시, 10회 에너지 소산량 (X축 방향)	0.369×10×2=7.374 N·m

▶ 30hz 기준으로 30초 가진 → 사이클 횟수: 10회  
 ▶ 지진이 X축 방향으로만 작용할 경우, X축 방향의 댐퍼 2개만 작동한다. ∴ 한 방향(=X축 방향) 작동 시 전체 소산 에너지는 1개당 소산량 X2  
 ▶ 이력 곡선의 면적 = 한 사이클 에너지 소산량

➤ **결론**: 에너지 소산량 이상의 에너지가 가해지면, 이력형 댐퍼의 기능 상실로 인해 A자 가새 파단.

## 최종 모델링



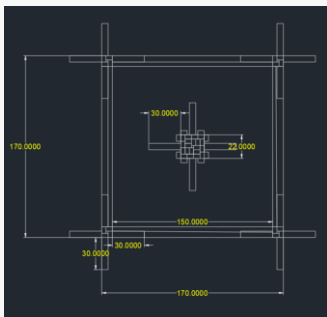
### < 붕괴 메커니즘 >

- 전략 1: 하단부 가새에서 전단력과 모멘트에 의한, 부재 차원의 파단 유도
- 전략 2: 최상층 이력형 댐퍼의 기능 상실로 인한 A자 가새 파단 유도

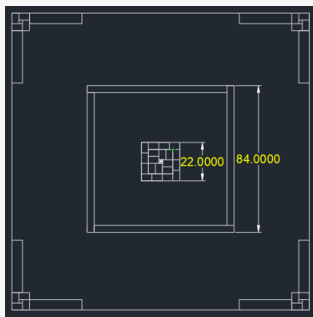
## 평면도 & 입면도

### ❖ 평면도

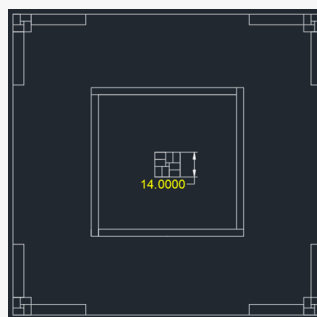
#### • 1층 평면도



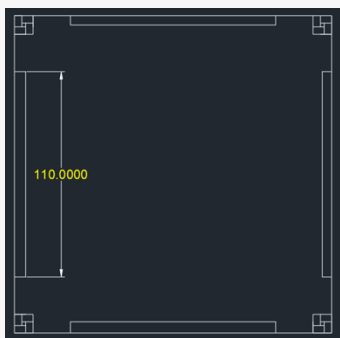
#### • 2층 평면도



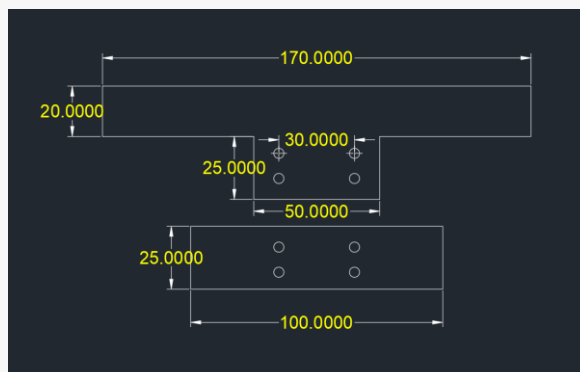
#### • 3층 평면도



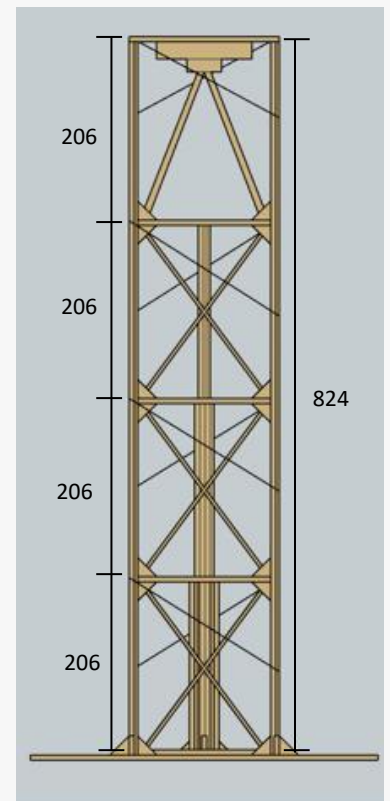
#### • 4층 평면도



### ❖ 이력형 댐퍼



### ❖ 입면도



## 경제성 분석 (총 예산안)

종류	부재규격	단가(백만원)	개수	금액(백만원)
MDF Base	400mm*400mm*6mm	-	1	0
MDF Plate	200mm*200mm*6mm	100	6	600
MDF Strip	600mm*4mm*6mm	10	60	600
고무줄	600mm	40	7	280
접착제	20g	200	2	400
종이	1장	10	2	20
<b>총 합계(백만원)</b>				<b>1900</b>

## 공정표 작성

