

## 2015 구조물 내진설계 경진대회, 참가 팀 '제 2공학관 8층' (UNIST)

**Myongsu (James) Shin, Ph.D., P.E. Associate Professor**

Track Chair, Urban Infrastructure Engineering Track Group Leader, Urban Infrastructure Systems Research Group School of Urban and Environmental Engineering in Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST)

**한성호 (팀장)**

구조해석 및 총괄

**유지정**

자료수집 및 발표

**이재범**

신뢰성 해석

**신대용**

유한요소 해석

저희는 봄, 여름, 가을, 겨울... 밤, 낮, 새벽 할 것 없이 항상 UNIST 제 2공학관 8층에서 먹고 자고 씻으며 그렇게 지내는

**TEAM. 제 2공학관 8층** 입니다!

# 요강 분석

## 2015 구조물 내진설계 경진대회 요강

- 2015년 대회 주제 : 초고층 건물은 지진에 과연 안전한가?  
부제 : 대한민국의 랜드마크를 지켜라

전 세계적으로 초고층 빌딩 경쟁이 치열하다.

기술이 고도화 되면서 초고층 빌딩이 국가나 도시의 위상을 의미하는  
랜드마크(Land Mark)적 요소가 되었기 때문이다.

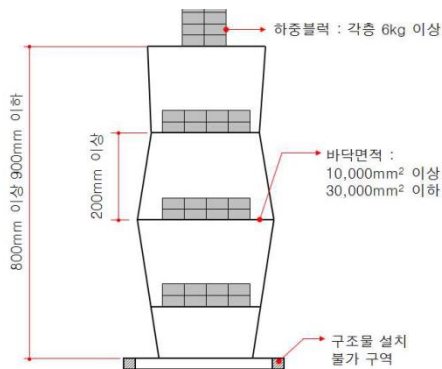
우리나라도 서울 한강 일대, 부산 해운대, 인천 송도 지역 등에 초고층 빌딩이 밀집해 있으며,  
이들은 하나의 관광자원이자, 그 지역의 랜드마크로서의 역할을 톡톡히 해내고 있다.

그런데, 이런 초고층 건물들은 과연 지진에 안전한 걸까?

2005년 3월 20일, 부산 전역과 경남 일부지역 사람들은 난대없는 지진소동을 겪었다.  
일본 후쿠오카 현 서쪽 해역에서 발생한 지진의 지진파가 국내로 전달되면서  
부산 지역의 고층 건물들이 심하게 흔들린 것.

국내 내진설계 기준보다 더 큰 지진이나 여진이 인근 국가에서 발생해 전달되어 온다면,  
또는 전달된 지진파가 연약지반에서 증폭되어 장주기화 된다면,  
과연 우리의 랜드마크들은 안전할까?

여러분들이 각 지역에서 지진에 대비한 구조물을 설계, 시공, 관리할 미래의 전문가라 하자.  
이제, 연약지반에 신축될 국내 최고층 건물에 장주기 지진파가 도달할 것을 대비하여  
안전하고 멋진 랜드마크를 설계하고 시공하라.



### 1. 장주기성 구조물(High slenderness structure)을 설계하라

→ 구조 특성상 장주기성 진동 특성을 가지는 초고층 빌딩

### 2. 장주기성 지진을 대비하라

→ 연약 지반층에서의 증폭으로 인한 지진파의 장주기화

### 3. 랜드마크의 심미성을 살려라

→ 국가와 도시의 위상을 의미하는 랜드마크적 요소의 빌딩

- 안정성(Capacity)와 심미성(Aesthetic)을 갖춘 초고층 랜드마크 건설  
→ 랜드마크의 특성 상 경제성(Economic feasibility)보다는 안정성을 우선적으로!

# 물성치 해석

## 캔틸레버보의 처짐 실험

$$\text{처짐량 } \delta_{max} = \frac{PL^3}{3EI}$$

$$\text{Elastic modulus } E = \frac{PL^3}{3E\delta_{max}}$$



	하중[N]	처짐량[m]	탄성계수[Mpa]
1	0.19	0.005	3487.81
2	0.31	0.011	2526.93
3	0.51	0.019	2422.74
4	0.70	0.029	2188.66
5	0.97	0.046	1912.87
			2507.80

단면모멘트[I] = 9E-11 & 길이[m] = 0.29

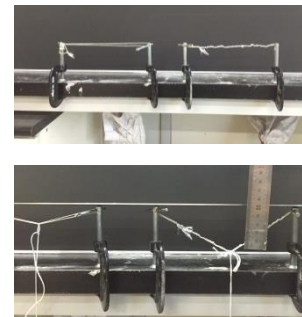
## MDF strip 파괴 실험



	파괴하중[N]	파괴응력[Mpa]
일반	22.3	0.927
톱밥보강	41.2	1.715

단면적[m<sup>2</sup>] = 2.40E-05

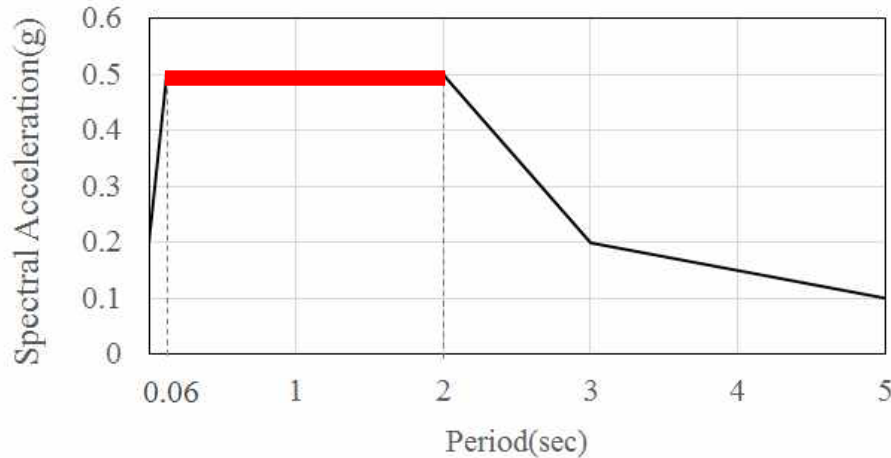
## 면실 변형량 및 탄성 측정 실험



	변형량[mm]
일반실	27
보강실	55

# 지진파 및 기본구조 고유주기 해석

Design Spectrum



고유 주기 [sec]

Modal 1 : 0.762  
 Modal 2 : 0.762  
 Modal 3 : 0.175

(High Slenderness)

주기 0.06~2초 사이에서 **공진 현상** 발생 가능 + 규정상의 구조물 고유주기는 0.06~2초 사이

→ “주어진 지진하중 설계 스펙트럼에 취약한 구조물이 제작될 가능성이 크다. 따라서”

내 진의 관점에서는

강한 지진 하중에 대해 잘 버틸 수 있는 구조물을,

면 진의 관점에서는

공진 현상을 피하도록 하는 고유 주기의 구조물을,

제 진의 관점에서는

지진파로부터 받는 힘을 최대한 줄일 수 있는 구조물을

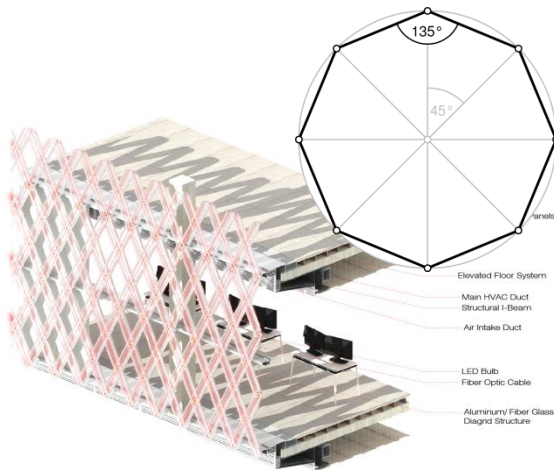
설계하는 것이 관건!

# 기본 내진 개념에 의거한 주요 설계 요소

## 내진

구조물의 **내력**으로 지진력을 감당  
해내자는 개념

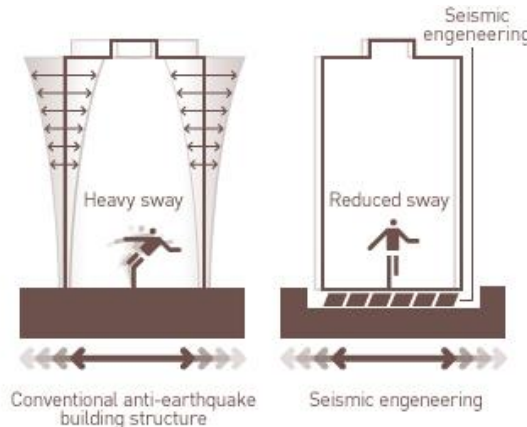
팔각형 구조  
and  
그리드 시스템



## 면진

공진을 일으키는 주기를 벗어나,  
지진력의 전달을 줄이자는 개념

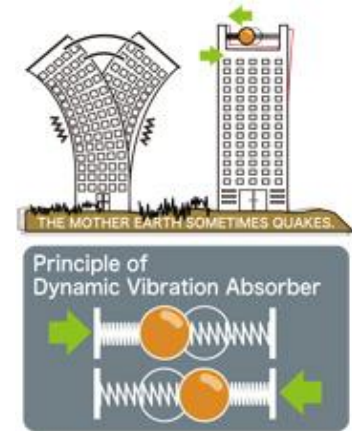
면진 시스템  
or  
구조물 강성 조정



## 제진

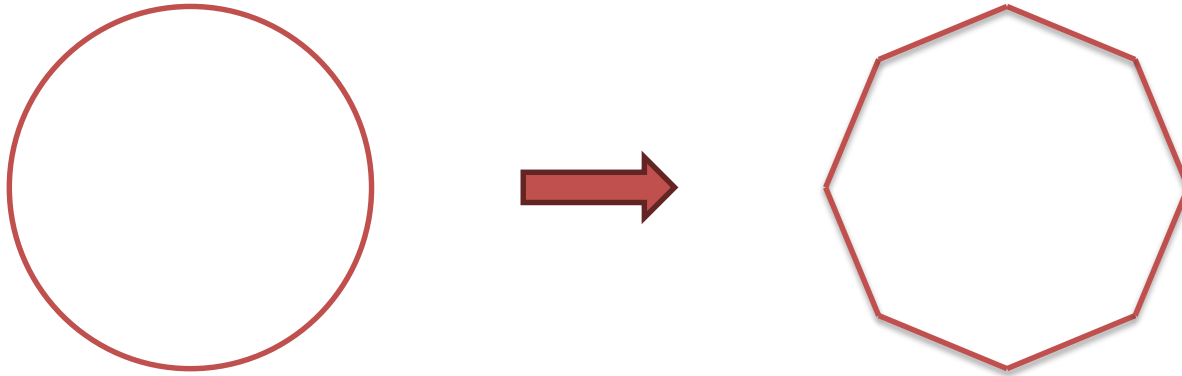
지진력에 맞대응 하자는 개념

(동조)질량 댐퍼  
or  
마찰 댐퍼



## 주요 설계 요소에 대한 평가

### 팔각형 구조



- 지진하중은 **수평력**으로 **모든 방면**에서 작용한다.
- 모든 방향에서 수평력을 고르게 받을 수 있는 **원형**이 적합
- 하지만! 원형 구조는 시공성이 떨어짐 (만들기가 어려움)
- 시공성을 고려하여, 기본적인 평면 구조는 원형에 가장 가까운 **정팔각형**으로 결정

## 주요 설계 요소에 대한 평가

### 그리드 시스템

### 유한요소모델을 이용한 신뢰성 해석



설계 구조물 모델에는 다음과 같은 **불확실성(Uncertainty)**이 존재한다.

1. 재료 물성치의 불확실성
  - Elastic modulus
  - Mass density, etc.
2. 지진파로부터 받는 힘의 불확실성
  - Input force

“결국, 경우에 따라, 파괴가 될 수도 안전할 수도 있다.”

파괴 확률 계산을 위한

한계 상태 함수(Limit state function)

$G$  = 파괴를 일으키는 스트레스 - 구조물의 max(Von Mises Stress)

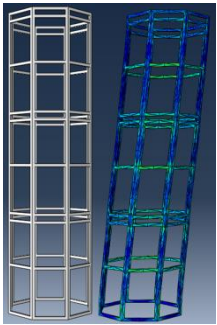
When,  $G < 0$   $\longrightarrow$  “파괴(Failure)!!”

# 주요 설계 요소에 대한 평가

## 그리드 시스템

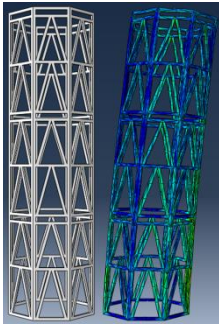


### 유한요소모델을 이용한 신뢰성 해석



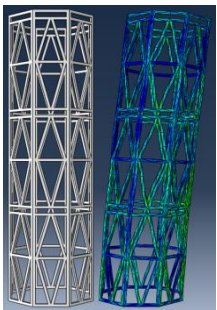
Model 1

'No grid'



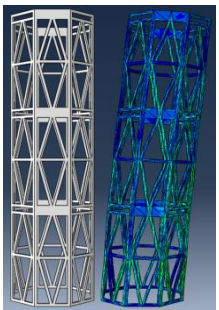
Model 2

'人 grid'



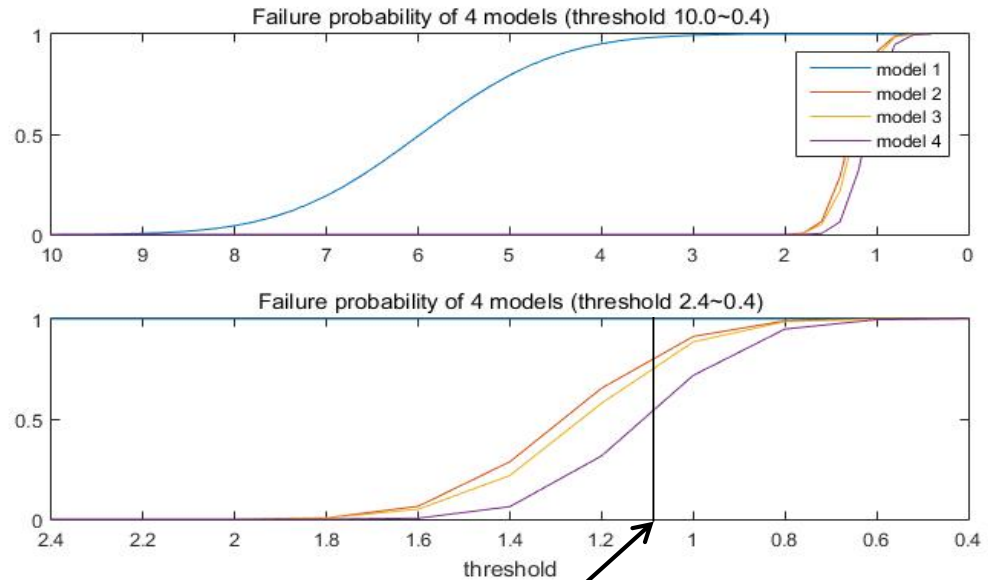
Model 3

'Diagrid'



Model 4

'Strengthened  
diagrid'



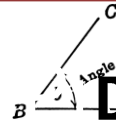
→ 접합부 파괴 응력(실험 평균치)인 1.08 Mpa에서 각 모델의 파괴확률은 Model1: 100% / Model2: 78.3% / Model3: 73.2 / Model4: 51.7% 로

## 4번째 설계안(강화 다이아그리드) 채택

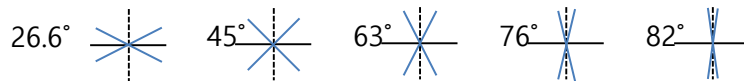
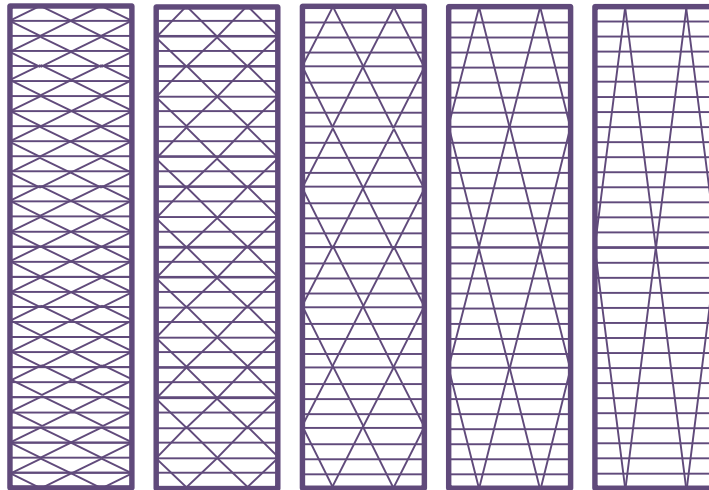


## 주요 설계 요소에 대한 평가

### 그리드 시스템



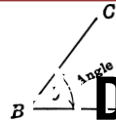
### Diagrid 각도의 영향



여러 각도의 diagrid 중,  
**휨력지지가 가장 우수한**  
 각도를 찾기 위해 모델링!

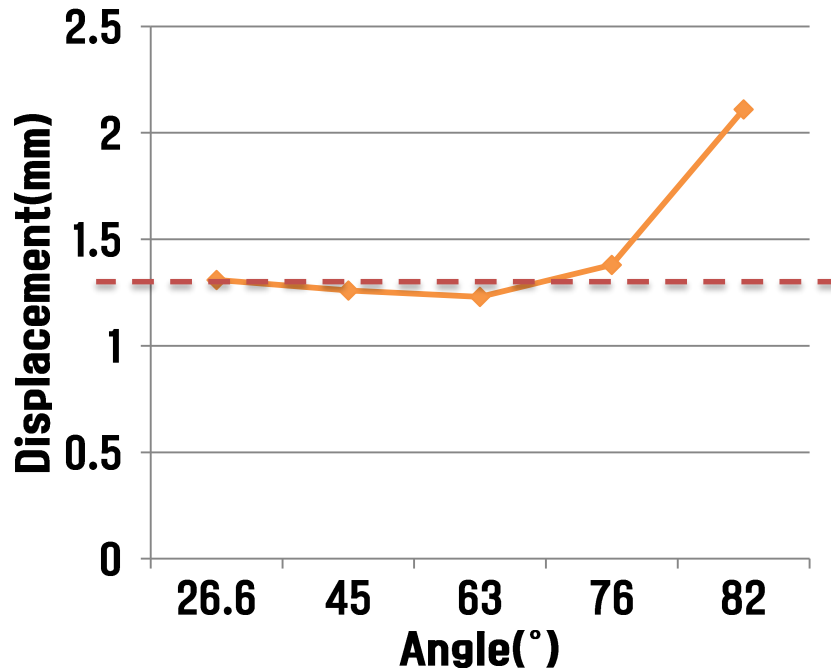
## 주요 설계 요소에 대한 평가

### 그리드 시스템



### Diagrid 각도의 영향

#### Horizontal Disp.@top



#### 모델링 결과

(horizontal 방향으로 top에서 4000kgf 가함)

63°에서 횡력 지지가 가장 우수하지만  
시공성을 고려하면

**30° 이상 76° 이하**의 각도가 이상적

Diagrid Angle (°)	Horizontal Disp@top (mm)	Vertical Disp@top (mm)
26.6	1.31	1.09
45	1.26	1.09
63	1.23	1.09
76	1.38	0.97
82	2.11	0.42

## 주요 설계 요소에 대한 평가

### 구조물 강성 조정

고유 진동수:  $f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$

Where:

$f_n$  = natural frequency in hertz (cycles/second)

$k$  = stiffness of the spring (Newtons/meter or N/m)

$m$  = mass(kg)

#### 관점 1. 주기 감소 (단주기 구조물)

$$\uparrow f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \uparrow$$

강성이 높아지는 대신,  
지진파에 의한 입력 에너지가 커진다.

#### 관점 2. 주기 증폭 (장주기 구조물)

$$\downarrow f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \downarrow$$

지진파에 의한 입력 에너지가 작아지는 대신,  
강성 확보가 힘들며 큰 변위가 발생한다.

관점 3. 바닥에 면진 시스템 설치 : 면진 장치의 허용 변위 이상 흔들릴 경우(허용범위 이상의 장주기) 위험

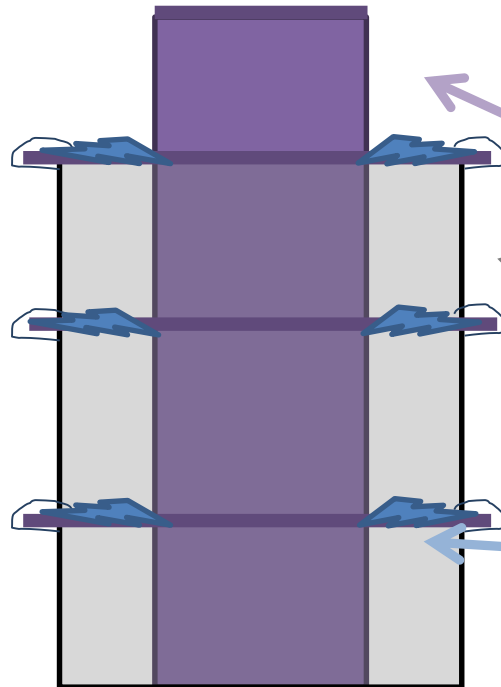
→ (구조 해석 결과) 공진 현상을 피하는 고유주기의 구조물 제작은 힘든 것으로 판단. 따라서...

## 주요 설계 요소에 대한 평가

### 이중 구조 + 댐퍼

고강성의 외부구조 + 장주기성 내부구조  
(상호보완적 관계의 이중 구조)

사이에 두 가지의 댐퍼 설치



큰 고유주기(약한 강성) + 하중 블록의 수직력 전담


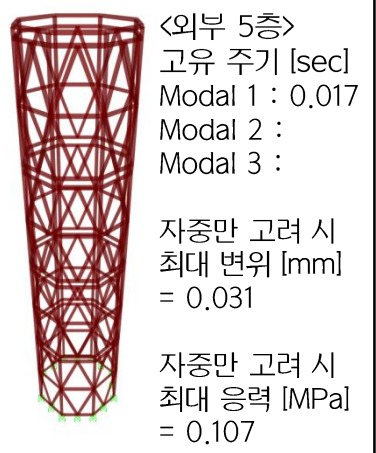
작은 고유주기(강한 강성) + 지진력의 수평력 전담

댐퍼 1 (Main) :  
실의 장력을 이용한, 내부 구조물 이탈 방지용 댐퍼

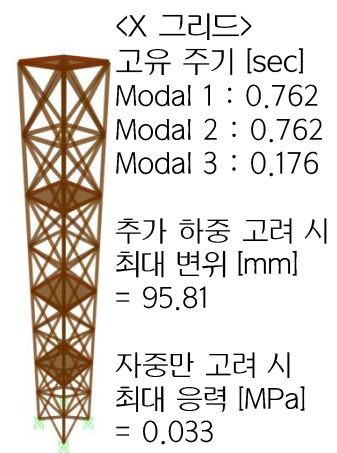
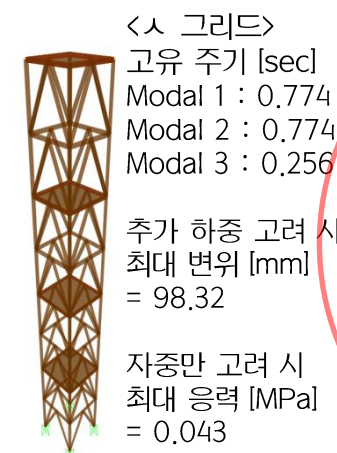
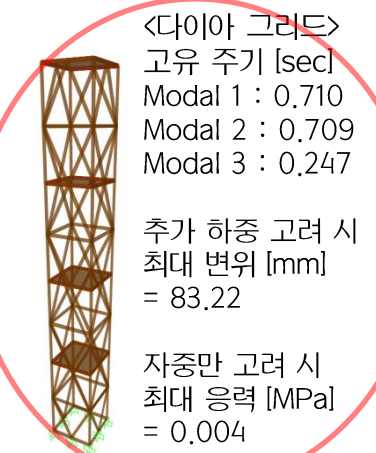
댐퍼 2 :  
지진력에 의한 수평하중을 손실시킴, 마찰 댐퍼

# 최종 디자인



## 고강성의 팔각-강화 다이아그리드 외부 구조

 <p>〈외부 4층〉        고유 주기 [sec]        Modal 1 : 0.013        Modal 2 : 0.013        Modal 3 : 0.012</p> <p>자중만 고려 시        최대 변위 [mm]        = 0.012</p> <p>자중만 고려 시        최대 응력 [MPa]        = 0.038</p>	 <p>〈외부 5층〉        고유 주기 [sec]        Modal 1 : 0.017        Modal 2 :        Modal 3 :</p> <p>자중만 고려 시        최대 변위 [mm]        = 0.031</p> <p>자중만 고려 시        최대 응력 [MPa]        = 0.107</p>
--	---

## + 장주기의 사각 다이아그리드 내부구조

 <p>〈X 그리드〉        고유 주기 [sec]        Modal 1 : 0.762        Modal 2 : 0.762        Modal 3 : 0.176</p> <p>추가 하중 고려 시        최대 변위 [mm]        = 95.81</p> <p>자중만 고려 시        최대 응력 [MPa]        = 0.033</p>	 <p>〈S 그리드〉        고유 주기 [sec]        Modal 1 : 0.774        Modal 2 : 0.774        Modal 3 : 0.256</p> <p>추가 하중 고려 시        최대 변위 [mm]        = 98.32</p> <p>자중만 고려 시        최대 응력 [MPa]        = 0.043</p>	 <p>〈다이아 그리드〉        고유 주기 [sec]        Modal 1 : 0.710        Modal 2 : 0.709        Modal 3 : 0.247</p> <p>추가 하중 고려 시        최대 변위 [mm]        = 83.22</p> <p>자중만 고려 시        최대 응력 [MPa]        = 0.004</p>
--	---	---

## + 내부구조물 이탈 방지용 면실 댐퍼

레슬링 로프 반동과 같은 모습으로, 진동하는 내부 구조물의 이탈을 실의 장력으로 방지

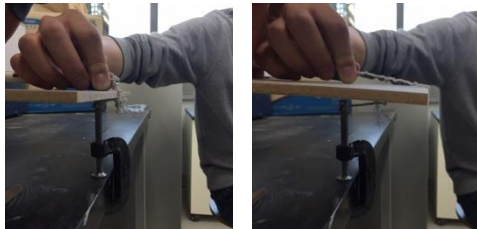
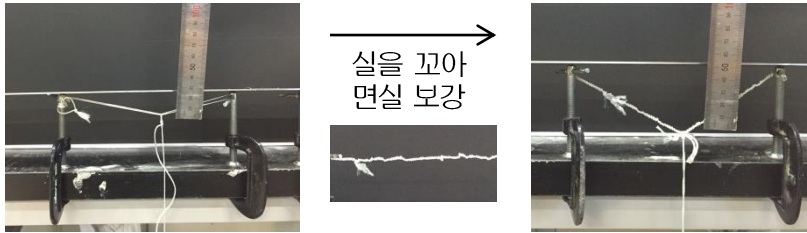
## + 지진력 감소용 MDF Strip 마찰 댐퍼



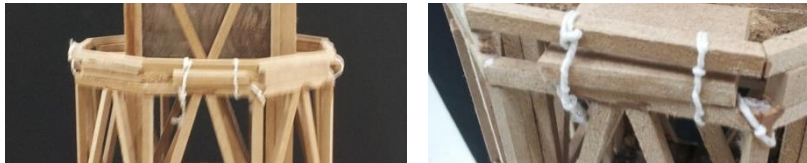

MDF 면과 면 사이의 마찰력 이용

## 최종 디자인

## 내부구조물 이탈 방지용 면실 댐퍼



Plate가 수평력에 의해  
큰 변위로 움직일 때,  
보강면실이  
Plate의 이탈을 방지



## 지진력 감소용 MDF 마찰 댐퍼

댐퍼 마찰계수



30회 평균 치: 556.5g

$$F_{\text{fric}} = \mu \times m \times g$$

$$\mu = 556.5 / 1152.8 = 0.482$$

내부구조물, 한 주기 당 마찰 소산 에너지

$$F = \text{마찰계수}(\mu) \times \text{진동수} \times \text{최대 변위} \times \text{무게} \times \text{중력 가속도}$$

$$= 0.482 \times (1/0.71) \times 0.083 \times 6 \times 9.8 = 3.31 \text{ J}$$

$$\xi = \frac{E_D}{2\pi E_{so}} = \frac{E_{\text{friction}}}{2\pi(E_{\text{fric}} + E_{\text{stopper}})} = \frac{4.8}{2 * \pi * (4.8 + 3.31)} = 0.094$$

- $E_D / 2\pi$  : 한 주기당 소산되는 마찰 에너지
- $E_{so}$  : 구조물의 변형에너지

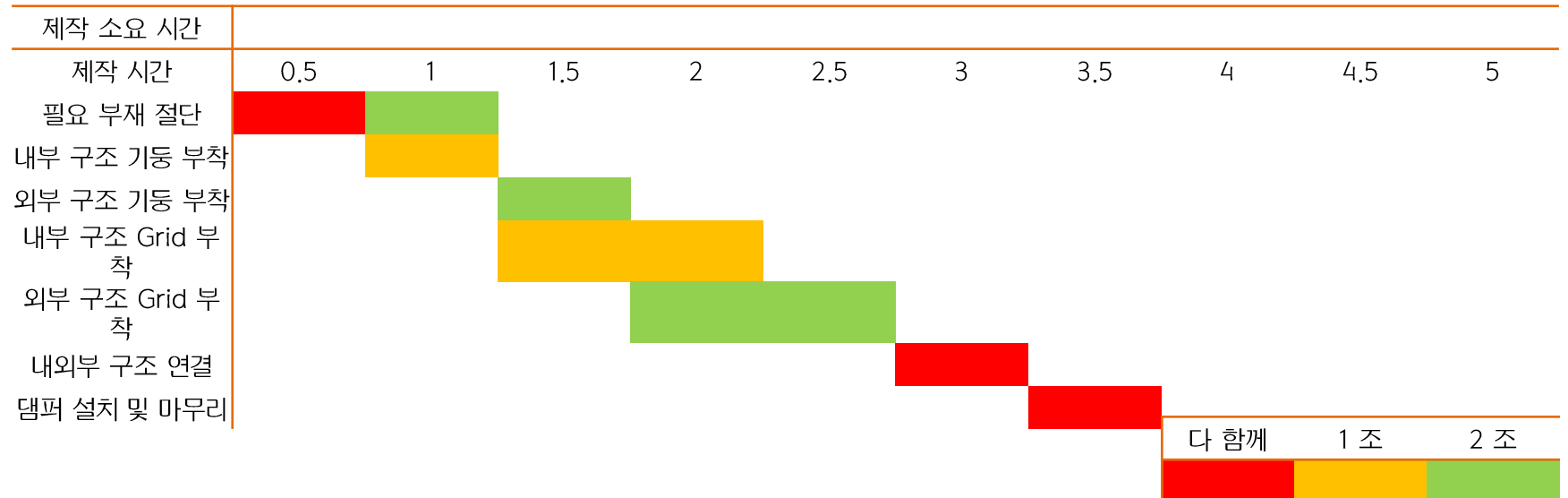
9.4 %의 댐핑 효과!

“고강성의 외부 구조 + 장주기성 내부 구조 + 면실 & 마찰 댐퍼”

## 최종 디자인

## 소요 비용 산정 및 제작 소요 시간

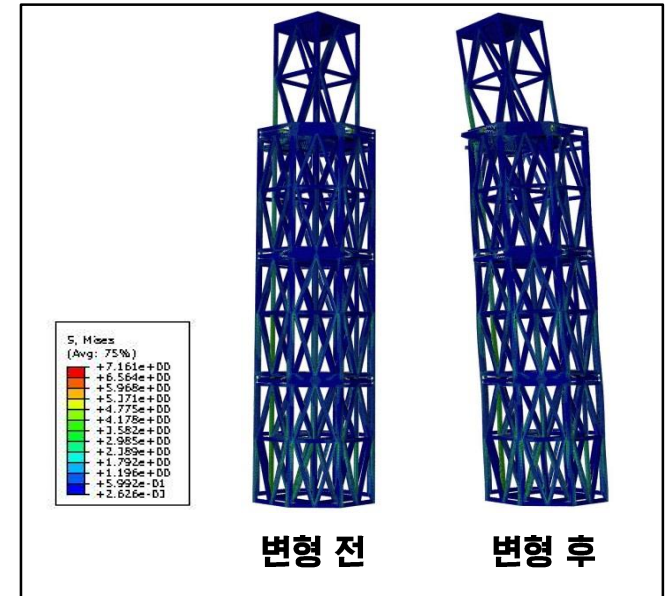
재료명	단위	규격	수량개	단개백만원	총 소요비용
MDF Strip	개	6mm x 4mm x 600mm	50	10	500
MDF Plate	개	200mm x 200mm x 6mm	4	100	400
면줄	식	600mm	2	10	20
A4용지	장	A4	0	10	0
접착제	개	20g	3	200	600
				총합	1520





## 최종 디자인

## 실제 모형 제작 및 유한요소해석



## Feedback after Mock up test



1. 시공순서의 최적합성 파악
2. 접합부(바닥 면과 구조물, 각 가새 간의 이음새) 내구성 증가를 위한 시공 방법
3. 효과적인 이탈 방지용 면실 댐퍼 제작 방법
4. 여러 번의 추가 진동대 시험을 통해 구조물의 고유 진동수 및 각 조인트의 각 가속도, 댐핑 효과 파악

에 대한 추가적인 고민이 필요할 것으로 판단 됨.