# Mass damper 설계를 통한 고층건물의 횡방향 변위 저감


팀 명 : ID(Inhan+Dongmin or Intelligent Design)

2011012238 김인한
2011012324 신동민

# Contents

1. Mass damper의 의미와 필요성
2. 배경 지식
3. Comsol을 이용한 시스템 모델링
4. Beam해석을 통한 Stiffness측정
5. Amesim을 이용한 Simulation
6. 결과 및 기대효과

# 1. Mass damper의 의미와 필요성

## Mass damper란?

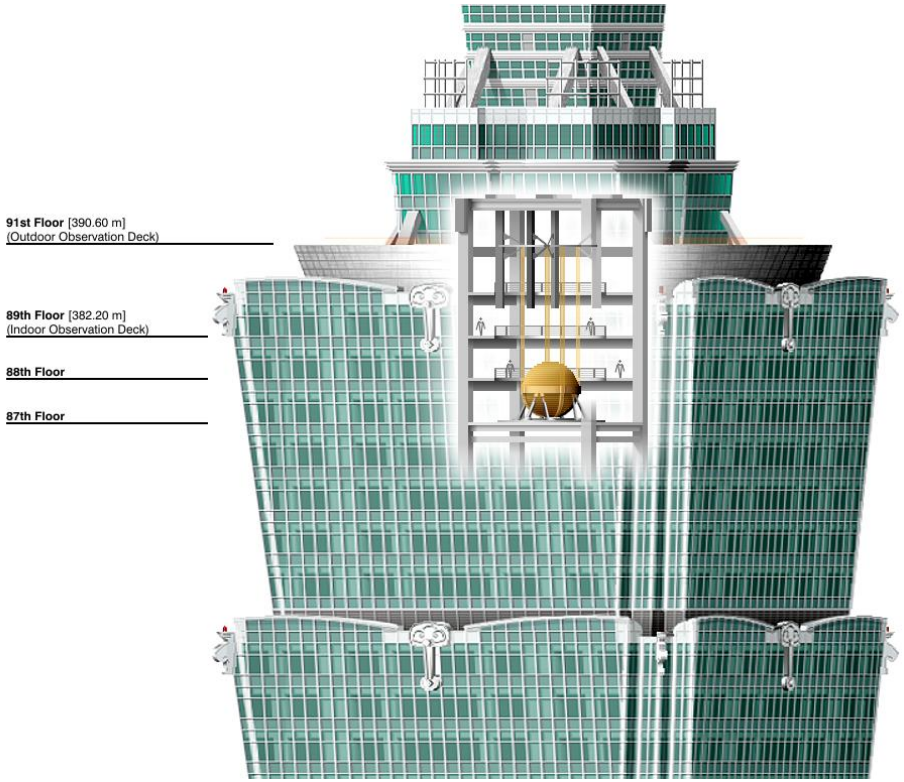
- System의 Critical한 진동수에서의 진동을 감소시키기 위하여 설치되는 장치.

- System의 질량에 비해서는 약 1~2%의 질량을 가짐.

## Mass damper가 설치된 사례

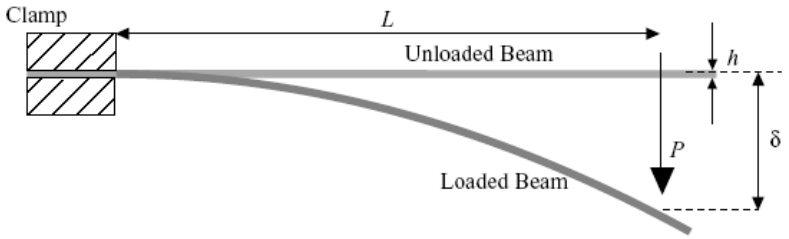
대만의 101 Tower

-> 건물 상층부에 Mass damper를 설치함으로써 고층건물의 바람에 대한 취약성을 개선



# 2. 배경 지식

## 1) Cantilever의 처짐량



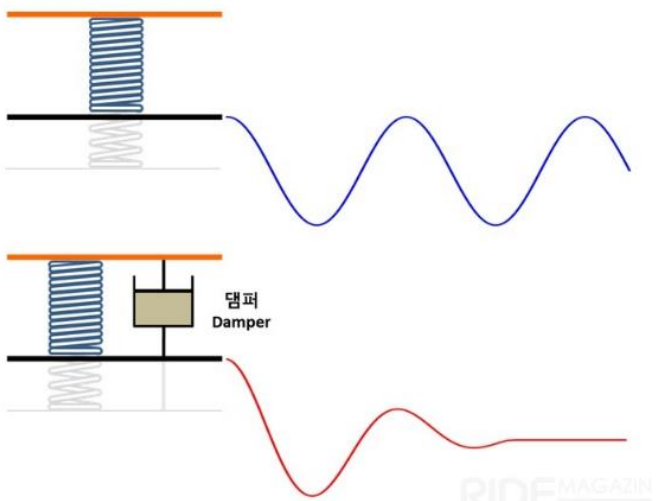

displacement가 P에 비례하는 양임을 이용하면
F= k*u 식을 활용하여 K-matrix를 구할 수 있다.

$$\delta = \frac{PL^3}{3EI} = \frac{\mathrm{P}}{\mathrm{k}} \quad \Longrightarrow \quad k = \frac{3EI}{L^3}$$

## 2) Beam의 고유진동수

질량 매트릭스를 M이라고 하고 Stiffness 매트릭스를 K라고 할 때, Beam 의 고유진동수와 고유벡터는 $M^{-1}K$의 eigenvalue 와 eigenvector를 이용하여 구할 수 있다. 이 때 eigenvector는 진동모드에서의 각 질량의 진동 형태를 나타낸다.

## 3)Damper의 역할



# 3. 시스템 모델링

**1) 구조물의 크기 :** 10m X 10m X 20m (1층당 4m**)**

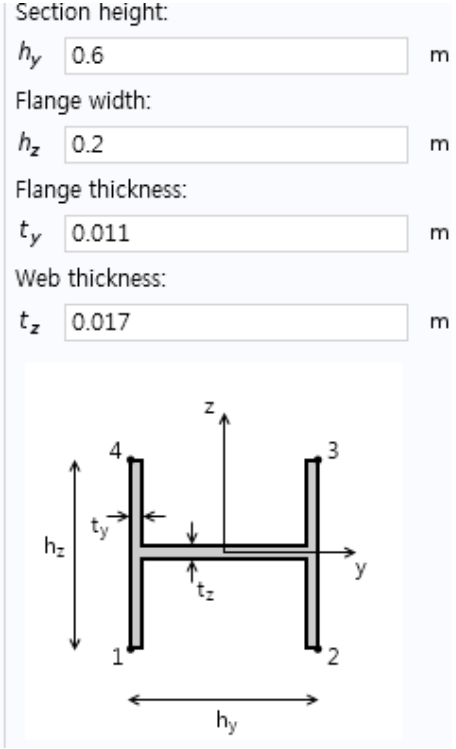
**2) Steel 물성치**

E = 210Gpa (Steel)
v = 0.3
$\rho = 7850kg/m^3$

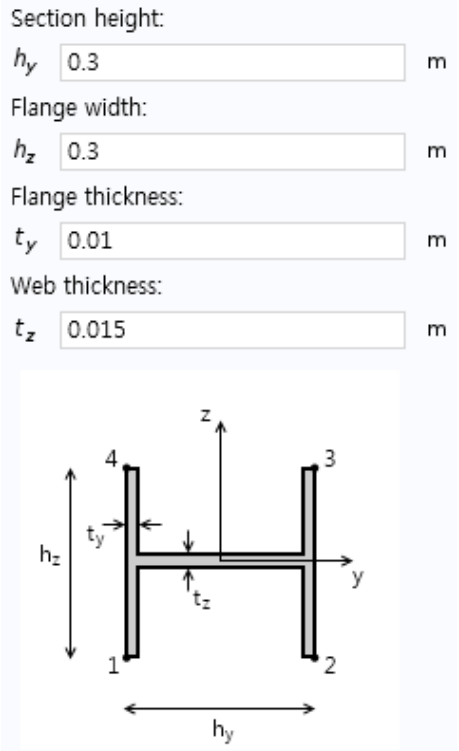
**3) 철골 구조**

기둥 (vertical) : H - 300 x300 x10 x15
보 (lateral) : H – 600 x200 x11 x17

가정1) 지지대는 콘크리트가 아닌 철골구조
가정2) 2d 빔 모델로 해석




< 철골 – 보 >




< 철골 – 기둥 >

# 3. 시스템 모델링

### 4) 바람의 영향 및 구속조건

공기 저항에 의한 외력

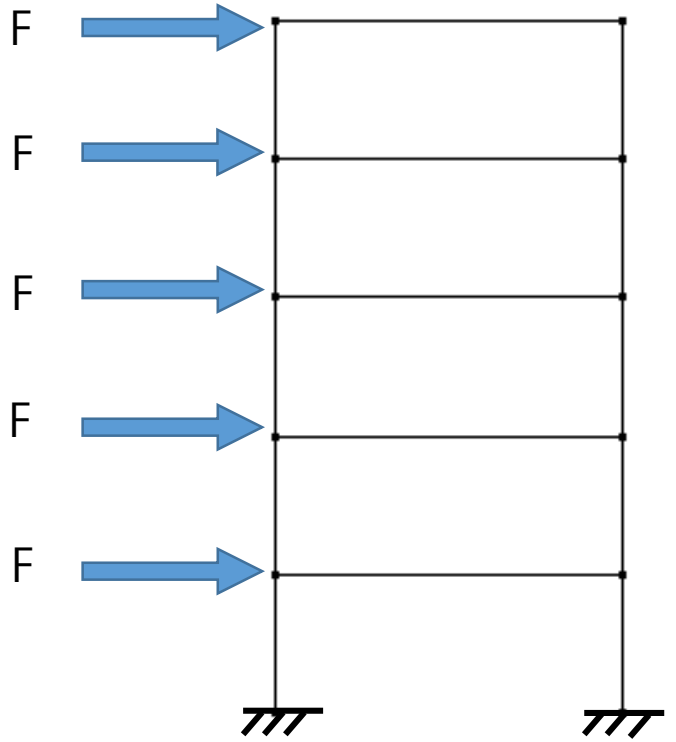
$$F_{air} = \frac{1}{2} * C_D * A * \rho * V^2 = 2450\text{N}$$

$(C_D = 1,\ A = 40m^2\ ,\ \rho = 1.225\ \text{kg}/m^3,\ V = 10\text{m/s})$

*$\rho$는 도로교설 설계기준의 공기밀도

| | 이름 | 풍속(M/S) | 상태 |
|---|---|---|---|
| 0 | 고요 | 0.1~0.2 | 연기가 흔들림없이 똑바로 올라감. |
| 1 | 실바람 | 0.3~1.5 | 아주 약한 바람에 연기가 날림. |
| 2 | 남실바람 | 1.6~3.3 | 바람이 얼굴에 느껴짐. 나뭇가지 흔들림. |
| 3 | 산들바람 | 3.4~5.4 | 나뭇잎과 가는 가지가 계속 흔들림. |
| 4 | 건들바람 | 5.5~7.9 | 먼지가 일고 종이 조각이 날림. |
| 5 | 흔들바람 | 8.0~10.7 | 호수에 물결이 일고 잎이 무성한 작은나무 전체 흔들림. |
| 6 | 된바람 | 10.8~13.8 | 큰 나뭇가지가 흔들리고 우산을 받치기 힘듦. |
| 7 | 센바람 | 13.9~17.1 | 걷기 힘들고 큰 나무 전체가 흔들림. |
| 8 | 큰바람 | 17.2~20.7 | 작은 나무가 꺾이고 걸어 갈 수가 없음. |
| 9 | 큰센바람 | 20.8~24.4 | 건물에 피해가 조금씩 생김. 기와가 벗겨지는 등 |
| 10 | 노대바람 | 24.5~28.4 | 큰나무가 쓰러지고, 건물이 무너짐. |
| 11 | 왕바람 | 28.5~32.6 | 큰나무가 뿌리째 뽑히고 차가 넘어짐. |
| 12 | 싹쓸바람 | 32.7이상 | 말그대로 다 쓸어갈 정도로 엄청난 피해. |

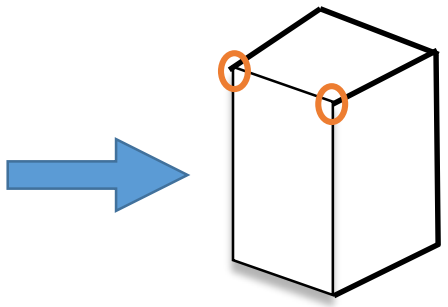
<보퍼트 풍력 계급표>




표면과 철골의 구속조건 : Fixed constraint

### 5) 구조 2개가 앞뒤로 나열 되어있는 형태임

$F_{air}$을 좌우로 분산 → F = $F_{air}/2$

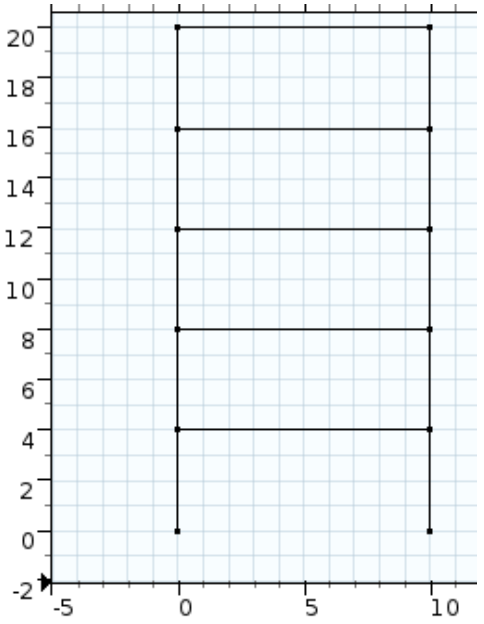


# 4. Beam해석을 통한 부분 Stiffness측정

## COMSOL의 2d beam 해석

### 1) Geometry

Bezier Polygon을 이용하여 구조물의 형상을 표현함




- Bézier Polygon 1 *(b1)*
- Bézier Polygon 2 *(b2)*
- Bézier Polygon 3 *(b3)*
- Bézier Polygon 4 *(b4)*
- Bézier Polygon 5 *(b5)*
- Bézier Polygon 6 *(b6)*
- Bézier Polygon 7 *(b7)*
- Bézier Polygon 8 *(b8)*
- Bézier Polygon 9 *(b9)*
- Bézier Polygon 10 *(b10)*
- Bézier Polygon 11 *(b11)*
- Bézier Polygon 12 *(b12)*
- Bézier Polygon 14 *(b14)*
- Bézier Polygon 15 *(b15)*
- Bézier Polygon 16 *(b16)*

### 2) Material & Cross section Specification

Young's modulus and Poisson's ratio

$G = G(E, \nu)$

Young's modulus:

$E$ User defined

210e9 Pa

Poisson's ratio:

$\nu$ User defined

0.3 1

Density:

$\rho$ User defined

7850 kg/m$^3$

Section height:

$h_y$ 0.6 m

Flange width:

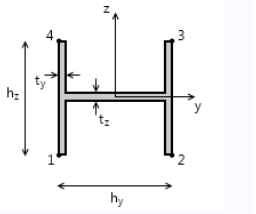
$h_z$ 0.2 m

Flange thickness:

$t_y$ 0.011 m

Web thickness:

$t_z$ 0.017 m




Section height:

$h_y$ 0.3 m

Flange width:

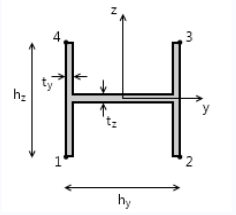
$h_z$ 0.3 m

Flange thickness:

$t_y$ 0.01 m

Web thickness:

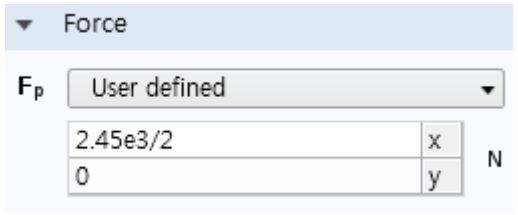
$t_z$ 0.015 m

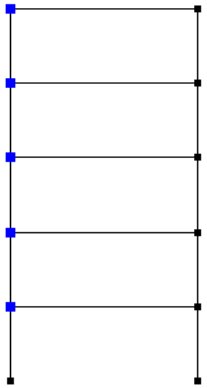


# 4. Beam해석을 통한 부분 Stiffness측정

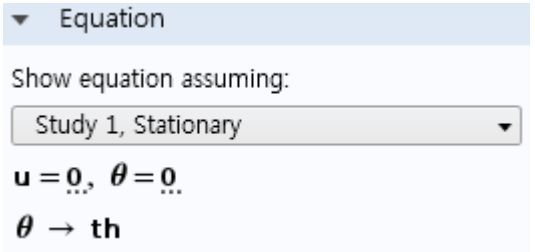
## 3)Point Load & 경계조건

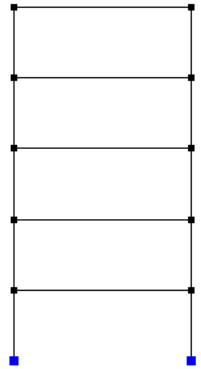
각 층에 $F_{air}$/2만큼의 힘을 가함



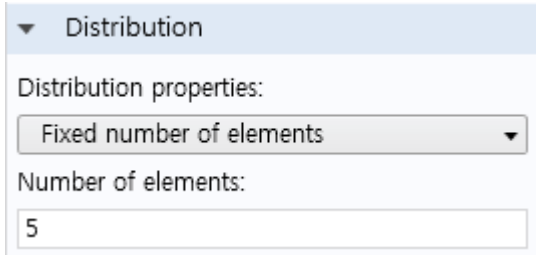
아래부분에 Fixed Constraint 설정

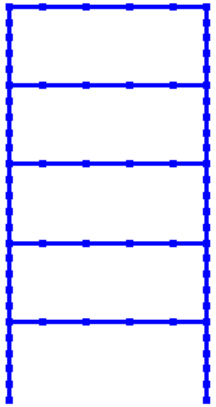


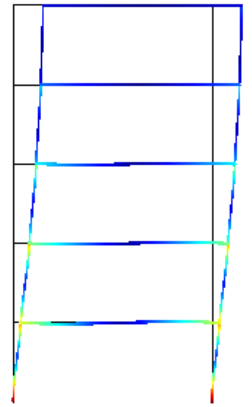
## 4)Mesh 및 Study

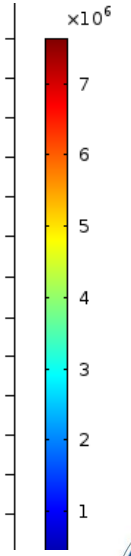
각 선마다 5개의 절점 생성



Study 실행





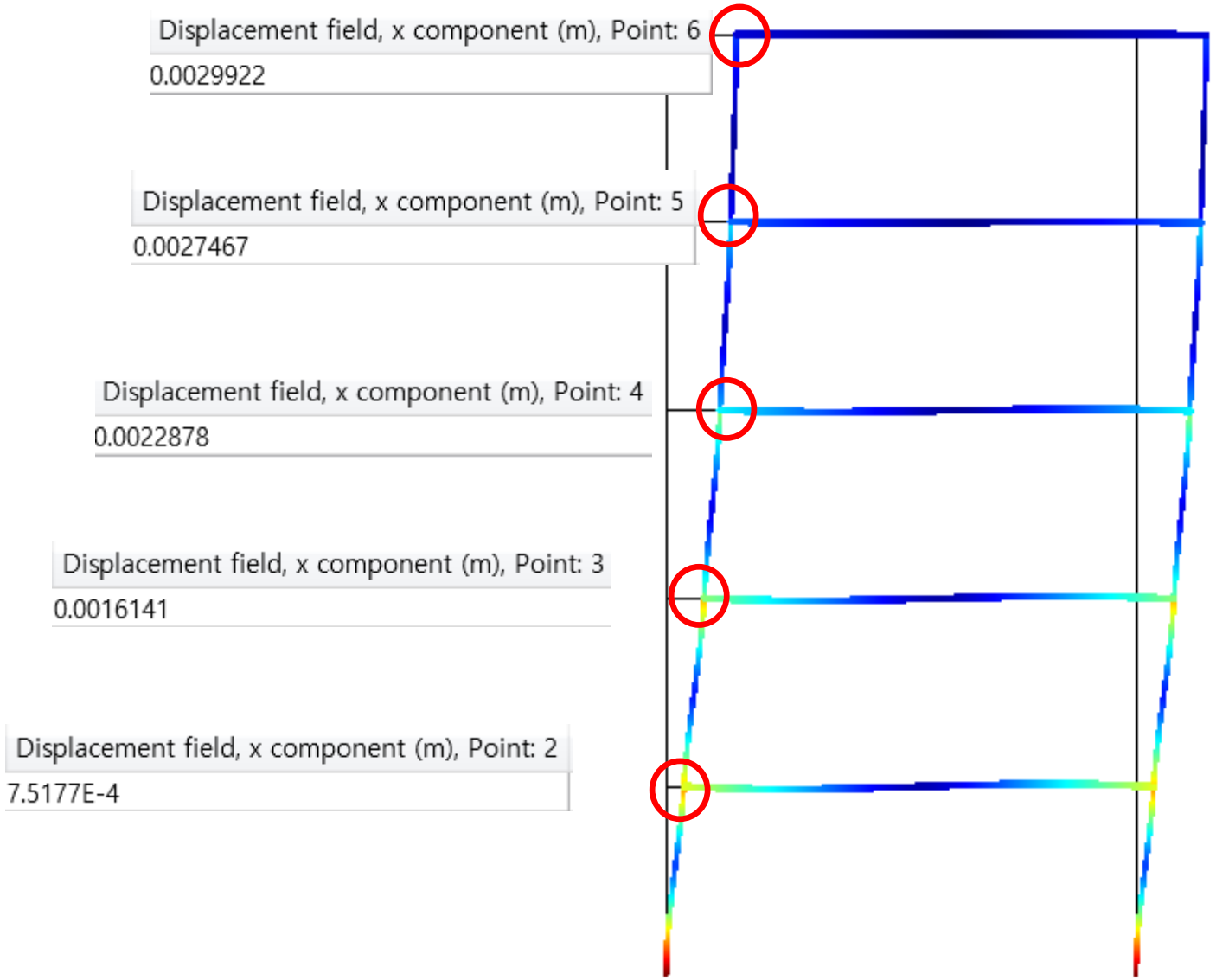
# 4. Beam해석을 통한 부분 Stiffness측정

## 5)해석 결과

Point Evaluation을 이용해 각 층의 x방향의 변위를 구함

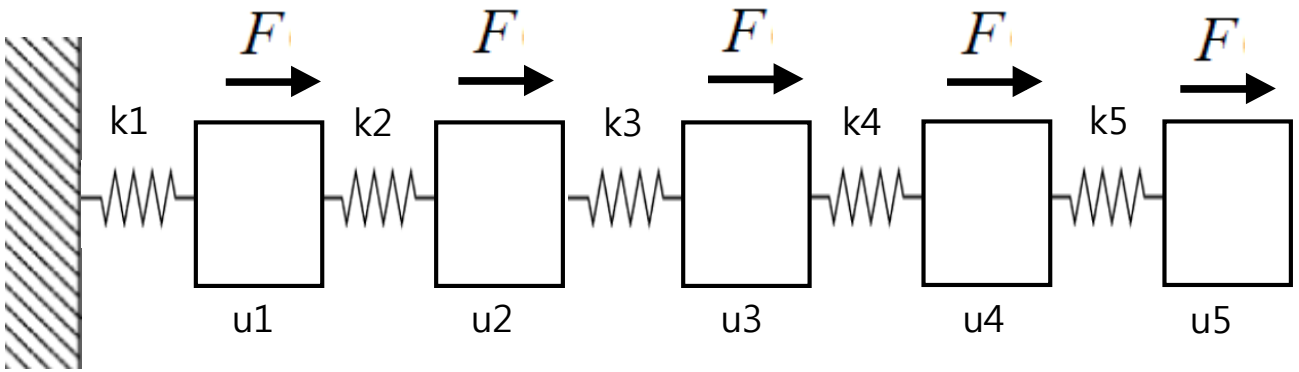
- Derived Values
  - Point Evaluation 1
  - Point Evaluation 2
  - Point Evaluation 3
  - Point Evaluation 4
  - Point Evaluation 5

변위 값과 힘의 값을 이용하여 K값을 구할 수 있음



# 4. Beam해석을 통한 부분 Stiffness측정

### 6) K값의 도출




$u1 = 7.51 \times 10^{-4}\ m$ $u4 = 2.74 \times 10^{-3}\ m$

$u2 = 1.61 \times 10^{-3}\ m$ $u5 = 2.99 \times 10^{-3}\ m$

$u3 = 2.28 \times 10^{-3}\ m$ $F = 2450 / 2\ N$

$F - k1 \cdot u1 + k2 \cdot (u2-u1) = 0$

$F - k2 \cdot (u2-u1) + k3 \cdot (u2-u3) = 0$

$F - k3 \cdot (u3-u2) + k4 \cdot (u3-u4) = 0$

$F - k4 \cdot (u4-u3) + k5 \cdot (u4-u5) = 0$

$F - k5 \cdot (u5-u4) = 0$

$$\Rightarrow \begin{bmatrix} u1 & u2-u1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & u2-u1 & u2-u3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & u3-u2 & u3-u4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & u4-u3 & u4-u5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & u5-u4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k1 \\ k2 \\ k3 \\ k4 \\ k5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F \\ F \\ F \\ F \\ F \end{bmatrix}$$

$\Rightarrow$

$k1 = 8.15 \times 10^{6}\ N/m$ $k4 = 5.34 \times 10^{6}\ N/m$

$k2 = 5.68 \times 10^{6}\ N/m$ $k5 = 4.99 \times 10^{6}\ N/m$

$k3 = 5.46 \times 10^{6}\ N/m$

# 5. Amesim을 이용한 Simulation

## 1) K matrix와 M matrix의 결정

$k1 = 8.15 \times 10^6\ N/m$ $k2 = 5.68 \times 10^6\ N/m$ $k3 = 5.45 \times 10^6\ N/m$ $k4 = 6.44 \times 10^6\ N/m$ $k5 = 3.78 \times 10^6\ N/m$

Stiffness matrix = **2 ***

$$\begin{bmatrix} -k1-k2 & k2 & 0 & 0 & 0 \\ k2 & -k2-k3 & k3 & 0 & 0 \\ 0 & k3 & -k3-k4 & k4 & 0 \\ 0 & 0 & k4 & -k4-k5 & k5 \\ 0 & 0 & 0 & k5 & -k5 \end{bmatrix} =$$

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | -2.7659e+07 | 1.1365e+07 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 1.1365e+07 | -2.2274e+07 | 1.0910e+07 | 0 | 0 |
| 3 | 0 | 1.0910e+07 | -2.1588e+07 | 1.0678e+07 | 0 |
| 4 | 0 | 0 | 1.0678e+07 | -2.0657e+07 | 9.9796e+06 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 9.9796e+06 | -9.9796e+06 |

COMSOL에서 해석한 구조가 두 개 있다고 할 수 있으므로 Stiffness를 두 배로 설정한다.

Mass matrix =

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 28000 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 0 | 28000 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 0 | 0 | 28000 | 0 | 0 |
| 4 | 0 | 0 | 0 | 28000 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 28000 |

$$M = 280\frac{kg}{m^2} * 10m * 10m = 280kg$$

(층 면적 당 질량을 $280 kg/m^2$ 라 가정)

# 5. Amesim을 이용한 Simulation

## 2) 고유진동수와 모드 벡터 결정

$$[M]\{\ddot{x}\} + [K]\{x\} = 0$$

$$[[M]^{-1}[K] - \omega^2[M]^{-1}[M]]\{X\} = 0$$

$$[[A] - \lambda[I]]\{X\} = 0$$

$[M]^{-1}[K] = [A]$ and $\lambda = \omega^2$

MATLAB 'eig' 함수를 이용 `[egvec_mat,egval_mat] = eig(mat_A)`

Eigen value =

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 35.9547 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 0 | 292.8853 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 0 | 0 | 706.7623 | 0 | 0 |
| 4 | 0 | 0 | 0 | 1.1449e+03 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1.4680e+03 |

Eigen vector =

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | -0.1266 | 0.3546 | -0.5162 | -0.5747 | -0.5115 |
| 2 | -0.2968 | 0.6071 | -0.3574 | 0.2224 | 0.6051 |
| 3 | -0.4468 | 0.4138 | 0.4562 | 0.3992 | -0.5115 |
| 4 | -0.5579 | -0.1015 | 0.4421 | -0.6187 | 0.3167 |
| 5 | -0.6205 | -0.5694 | -0.4497 | 0.2796 | -0.1015 |

고유 진동수 =

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 5.9962 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 0 | 17.1139 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 0 | 0 | 26.5850 | 0 | 0 |
| 4 | 0 | 0 | 0 | 33.8367 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 38.3144 |

# 5. Amesim을 이용한 Simulation

### 3) 1차모드에서 작동하는 mass damper 설계

$$M_i = m_1\left(\frac{\phi_1}{\phi_i}\right)^2 + m_2\left(\frac{\phi_2}{\phi_i}\right)^2 + \ldots m_i(1) \ldots + m_n\left(\frac{\phi_n}{\phi_i}\right)^2$$

위 식을 이용하면 1차모드에서의 모드질량을 구할 수 있으며 i값은 damper가 설치되는 위치와 일치한다. 따라서 i=5이며 1차모드의 eigen vector는 오른쪽과 같다. 따라서 5번째 고유벡터인 -0.6205로 이 벡터를 정규화 하면 [ 0.2040; 0.4784; 0.7201; 0.8991; 1]이다. 이를 이용하여 모드 질량을 구하면 72,726kg이다. 질량비$\mu$를 0.01로 하면 mass damper의 질량은 727.26kg이고 아래의 최적화 조건식에 의하여 K값은 26673.79 c값은 532.02로 정해진다.

| 1 |
|---|
| -0.1266 |
| -0.2968 |
| -0.4468 |
| -0.5579 |
| -0.6205 |

$$\alpha_{opt} = \frac{\sqrt{(k/m)}}{\sqrt{(K/M)}} = \frac{1}{1+\mu}$$

$$\zeta_{opt} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1+\mu)}} = \frac{c}{2m\sqrt{k/m}}$$

| | |
|---|---|
| M | 727.26[kg] |
| K | 26673.79[N/m] |
| c | 532.02[N/(m/s)] |

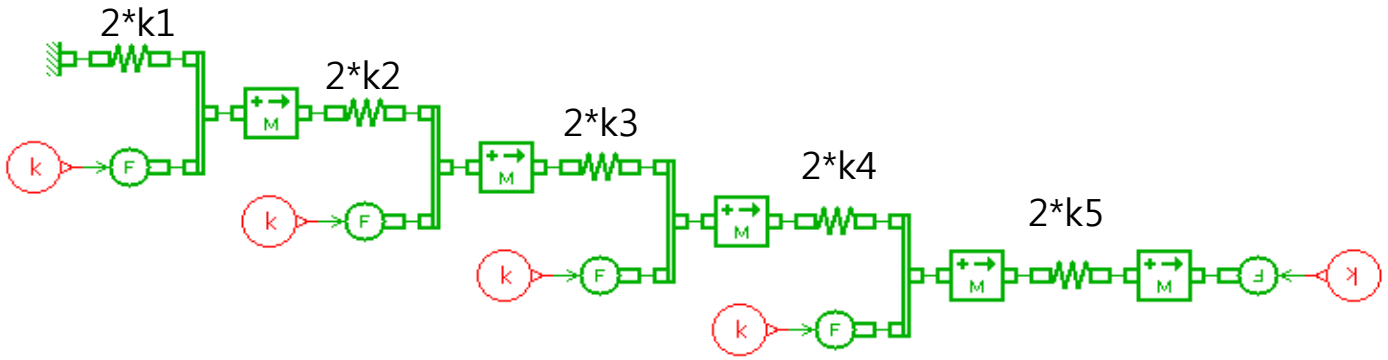

**참고 논문**

1. Tuned Mass Damper를 이용한 Linear Quadratic Gaussian 하이브리드 제진(최요섭, 2015, 대한건축학회지회연합회 학술발표대회논문집)
2. 구조물의 모드 질량 산정에 관한 연구(황재승 이상현, 2004, 대한건축학회 논문집)

# 5. Amesim을 이용한 Simulation

## 4) Amesim modeling

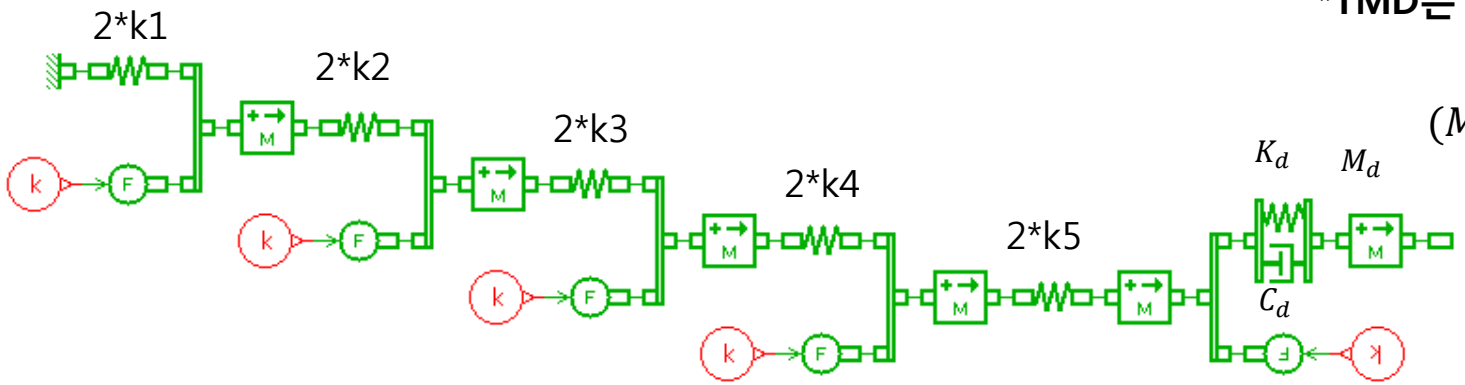
Stiffness, Mass, Force 값을 활용한 Amesim model 구현 (입력은 편의상 constant로 표현하였음)




Mass Damper가 없는 model

***TMD는 건물 꼭대기에 설치되어 1차모드에서 감쇠역할을 함**

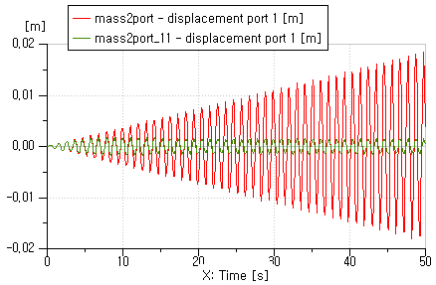
($M_d$: 댐퍼 질량, $K_d$: 댐퍼 Stiffness $C_d$: 댐핑 계수 )



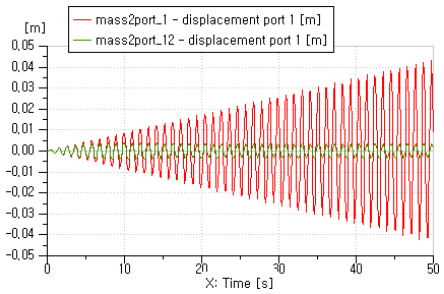

Mass Damper을 설치한 model

# 6. 결과 및 기대효과

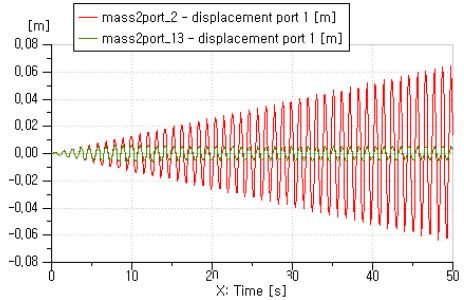
## 1) 입력이 1차모드 고유진동수($w_n$ = 5.9962 rad/s)일 때의 감쇠효과



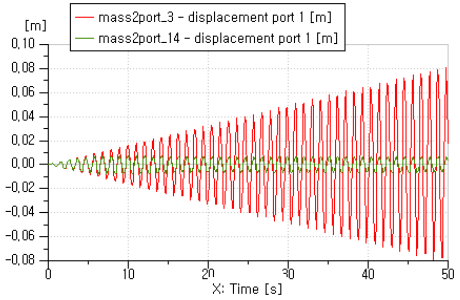

<1층>



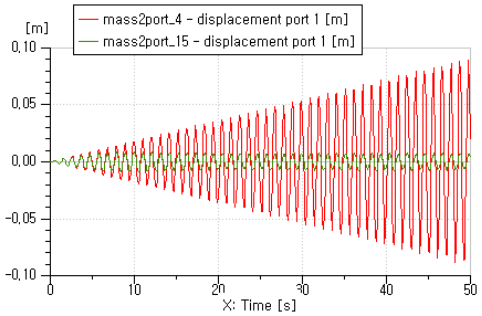

<2층>




<3층>

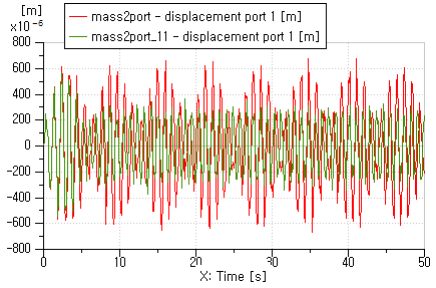



<4층>

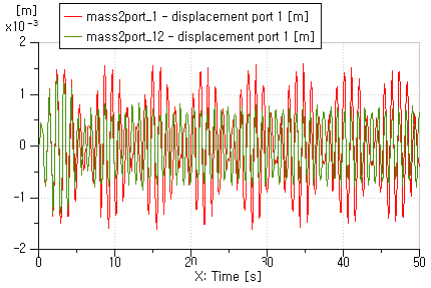



<5층>

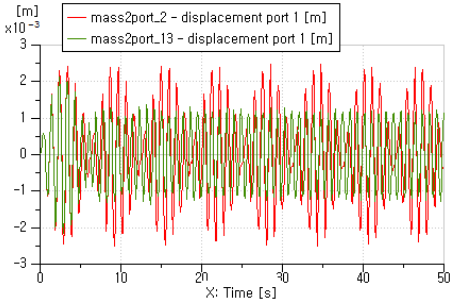
## 2) 입력이 1차모드 고유진동수가 아닐 때 ($w_n$ = 7 rad/s)일 때의 감쇠효과



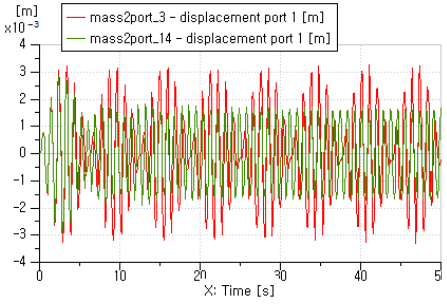

<1층>



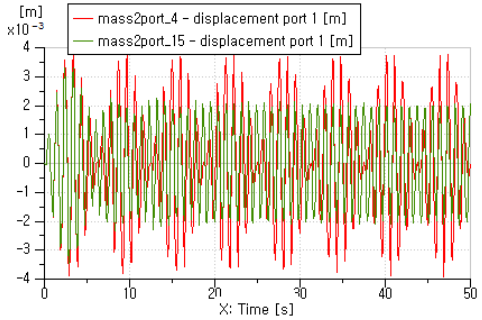

<2층>




<3층>



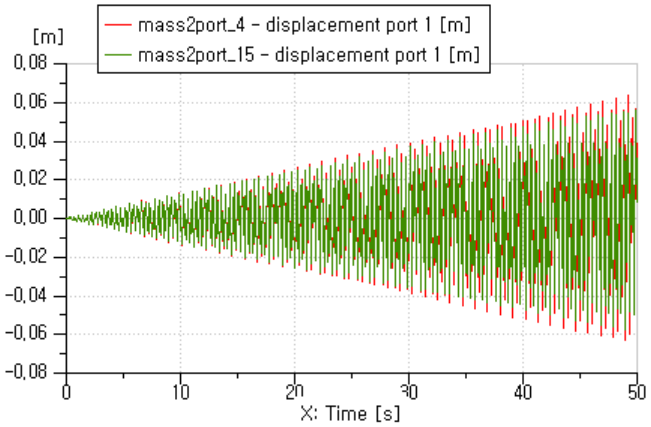

<4층>




<5층>

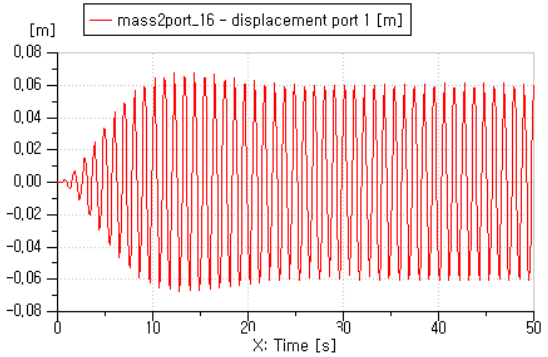
# 6. 결과 및 기대효과

### 3) 입력이 2차모드 고유진동수($w_n$ = 17.1139 rad/s)일 때 5층에서의 감쇠효과

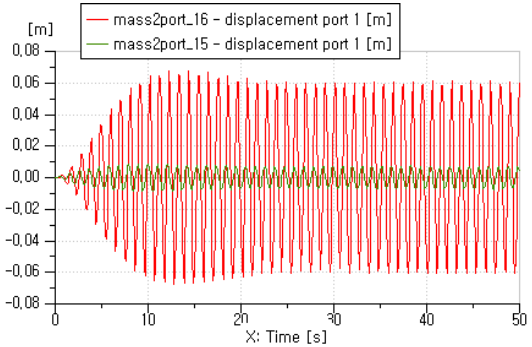



1차모드에 맞게 설계된 Mass damper는 2차모드의 공진을 해결하지 못하는 한계가 있음

### 4) 입력이 1차모드 고유진동수 일 때 ($w_n$ = 5.9962 rad/s)일 때 mass damper의 거동




<Mass damper의 거동>




<Mass damper거동과 5층 거동의 비교>

# 6. 결과 및 기대효과

## 5) 의미 및 기대효과

1. 빔 자체의 damping은 고려하지 않은 모델이며 건물의 구조를 단순화하여 해석함(콘크리트는 고려되지 않음)

2. 단순화한 건물의 구조로부터 고유진동수를 찾음

3. 가장 Critical한 1차모드의 진동 및 공명현상을 Mass damper를 이용하여 해결함

4. 능동형 mass damper를 이용할 경우 다른 진동모드의 진동을 저감할 수 있음

# Q n A

감사합니다.