MIDAS SQUARE

MIDAS SQUARE 공학 기술강연

건축물 바닥진동 사용성평가

- 실제적용 프로젝트를 중심으로

이상현 | 단국대학교 건축공학과

© MIDAS IT Co,. Ltd

0. 서 론

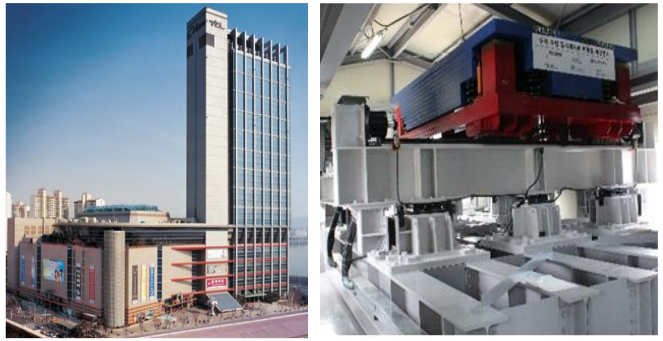
초고층구조물 진동제어

■ 높이 500m급 초고층건축물은 바람하중이 지진의 2배 이상으로, 바람에 의한 진동을 줄이는 제어장치 필요.

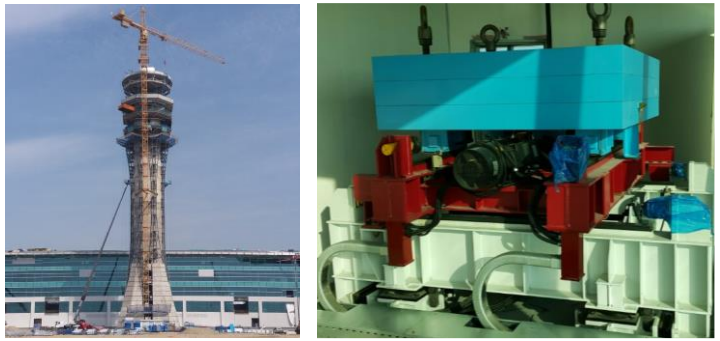
※ 높이 555m 잠실롯데월드타워 바람하중이 지진하중의 2배

■ 기존 초고층 설계연구단 R&D 연구지원(2009-2015)으로, 외국기술에 독점된 진동제어장치 기술 국산화 및 상용화 성공.

※ 테크노마트21 및 인천공항 관제탑 적용으로 외국기술적용 대비 프로젝트 당 20억~30억 절감



테크노마트21



인천공항 제2터미널 주관제탑

© MIDAS IT Co,. Ltd

CONTENTS

01 구조물 정적 및 동적 응답

02 진동제어 수행프로젝트

© MIDAS IT Co,. Ltd

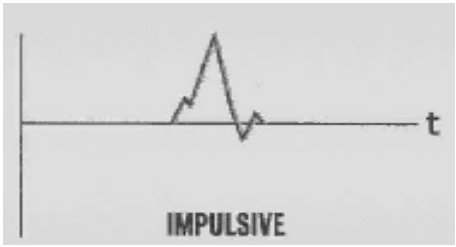
Part I. 구조물 정적 및 동적 응답

© MIDAS IT Co,. Ltd

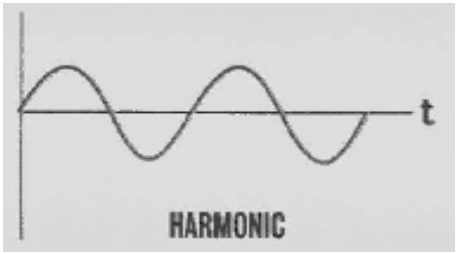
진동원

: 자중, 기계의 가동, 지진, 바람, 물체의 충돌. 사람의 움직임 등 구조물에 가해지는 힘

① **충격하중** : 폭발, 충돌 등 단발성 하중



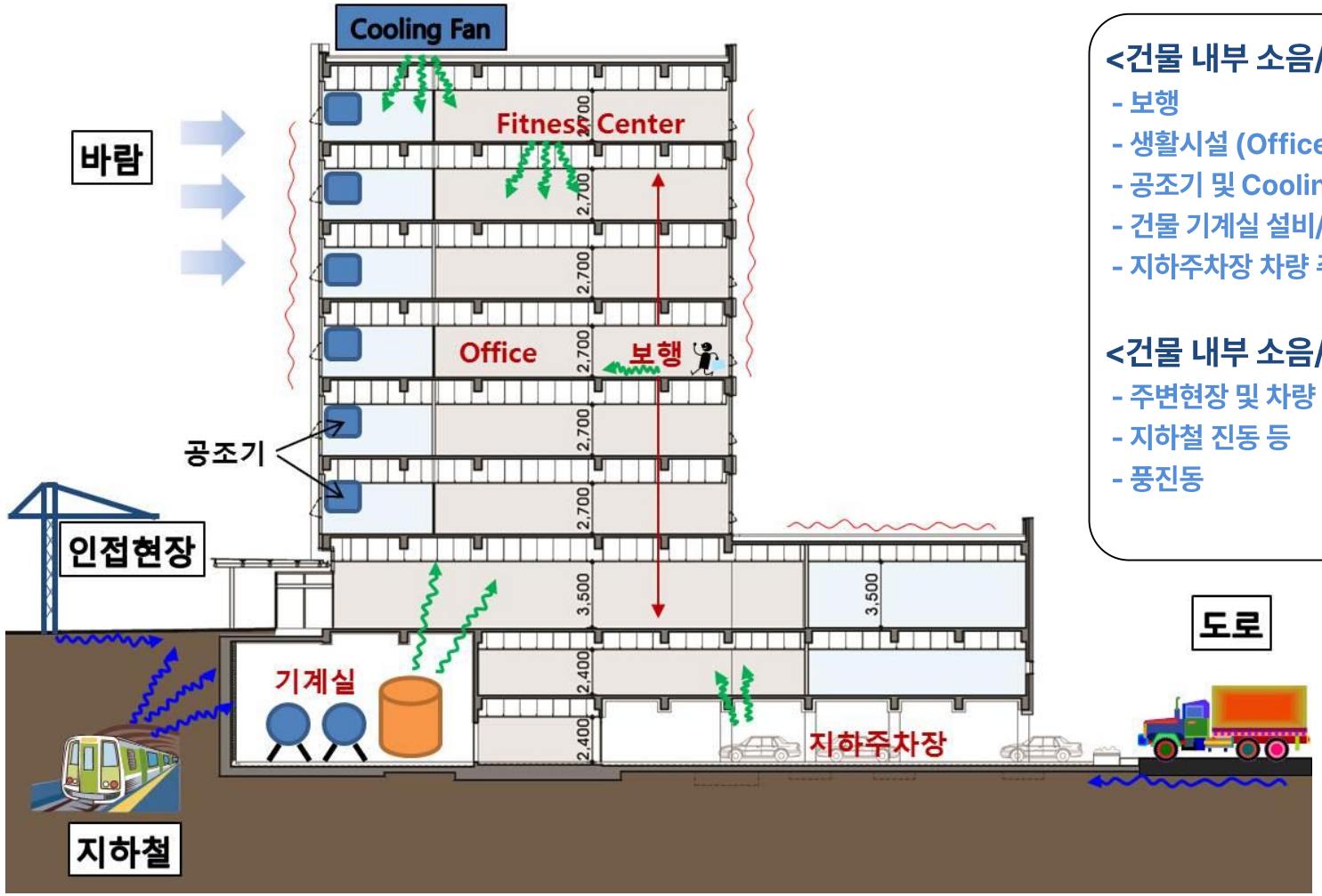
② **주기하중** : 기계의 가동, 집단응원, 단체보행 등의 주기적 가진하중



③ **불규칙하중** : 지진, 바람, 교통하중 등

© MIDAS IT Co,. Ltd

건물에서의 소음/진동원



<건물 내부 소음/진동원>

- 보행
- 생활시설 (Office 등)
- 공조기 및 Cooling Fan
- 건물 기계실 설비/덕트/배관
- 지하주차장 차량 주행

<건물 내부 소음/진동원>

- 주변현장 및 차량 이동 진동
- 지하철 진동 등
- 풍진동

© MIDAS IT Co,. Ltd

관련 기준

■ 법적 기준

환경정책기본법	소음진동규제법	국토해양부고시
옥외소음기준 제시	옥외 소음/진동 기준/평가법제시	바닥충격음, 세대간벽 차음성능, 친환경인증제도 등 제시

⇨ **건물 내부 실용도별 소음진동 관리에 관한 법적기준이 없음**

■ 관련 분야 소음/진동 기준

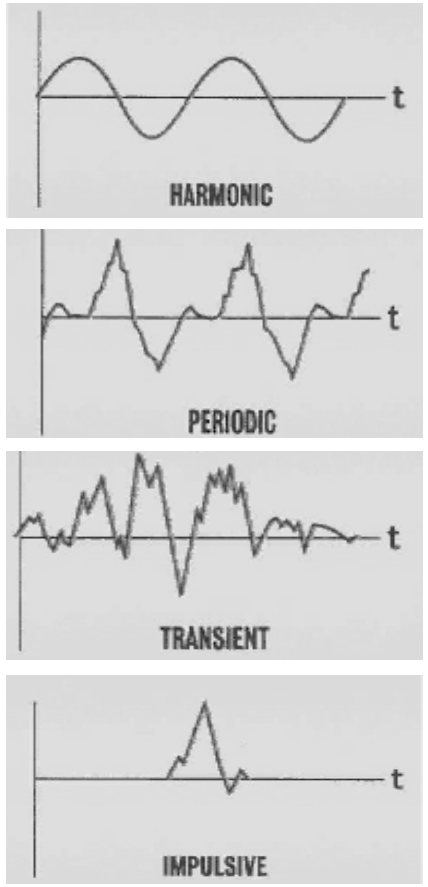
한국표준기구(KS)	국제표준기구(ISO)	독일표준기구(DIN)	미국냉난방공조학회 (ASHRAE)
소음/진동 관련 평가법 제시	실내소음/진동 관련 평가법 및 가이드 제시	실내소음/진동 관련 평가법 및 가이드 제시	실내소음/진동 관련 평가법 및 가이드 제시

소음 : 생활 소음/진동 규제 기준 적용

진동 : 국제 기준 (ISO, DIN 등) 적용

© MIDAS IT Co,. Ltd

I. 구조물 정적 및 동적 응답



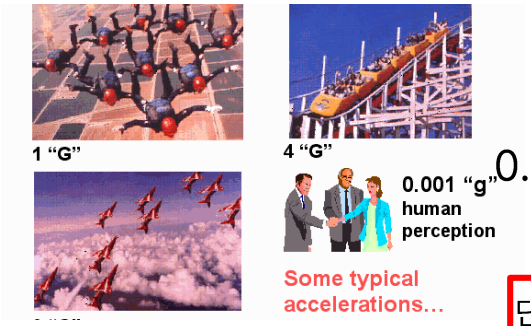
진동원

건축물

0.1 g ~ 1.0 g

안전성

안전성의 1% 수준



0.001 g ~ 0.01 g

사용성

단위
: 0.001 g ≒ 0.01 m/s^2 = 1 cm/s^2 = 1 gal

© MIDAS IT Co,. Ltd

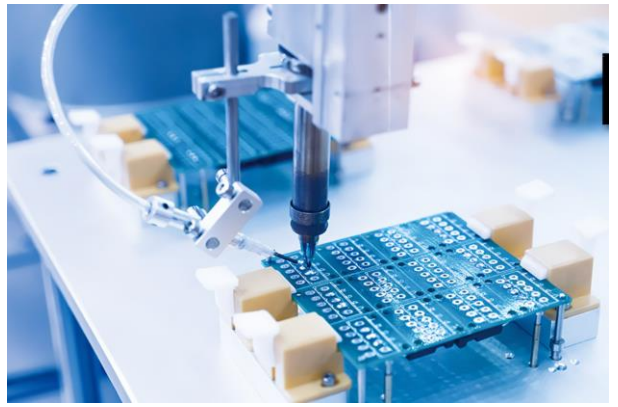
I. 구조물 정적 및 동적 응답

구조체

1/1000

인 간

1/1000



반도체

1.0 *g*

$1/10^3$ *g* = 1 *gal*

$1/10^6$ *g* = 0.001 *gal*

D타워 서울포레스트 진동계측결과 최대 약 5 gal → 안전성의 0.5% 수준

단위
: 0.001 $g \fallingdotseq 0.01\ m/s^2 = 1\ cm/s^2 = 1\ gal$

© MIDAS IT Co,. Ltd

I. 구조물 정적 및 동적 응답

■ 진동 레벨 [*gal*]

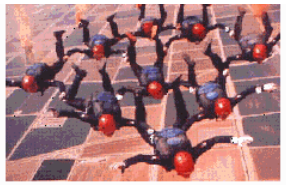
갈 (gal)_: 진동 크기 단위 (가속도)
※ 1 gal : 1 cm/초 비율로 빨라지는 가속도

▪ 안전성 (Safety)

1,000 Gal
~
25 Gal

▪ 사용성 (Serviceability)

※ 안전성의 0.1~1.0 % 수준



Some typical accelerations...

10 Gal
~
1 Gal

■ 진동 기준

구조물 안전성 : CEN 1.9.1, DIN 4150
구조물 사용성 : ISO 10137

분류	적용 기준	진동 레벨 (Gal)	내 용	비 고
안전성	CEN 1.9.1	1,000 ~ 50	▪ 진동에 의한 구조물의 안전성 평가 ▪ 구조물 응력 평가	
안전성	DIN 4150	50 ~ 25	▪ 마감 등의 작은 균열	
사용성	ISO 10137	8.0	▪ 작업장	
사용성	ISO 10137	2.0	▪ 오피스	
사용성	ISO 10137	1.0	▪ 주거 (밤)	
사용성	ISO 10137	0.7	▪ 주거 (낮)	
사용성	ISO 10137	0.5	▪ 인지 (Perception)	

© MIDAS IT Co,. Ltd

진동 기준 – ISO 10137:2007

- 진동 평가 기준곡선(Base Curve)를 기준으로 건물 용도별 가중계수(Multiplying factors_를 곱하여 진동 크기 제시
- 1/3 옥타브 필터링된 진동 가속도의 RMS 크기 사용
- 건축물 사용용도 및 주간/야간 시간대에 따라 '민감한 작업구역', '주거', '조용한 사무실', '일반사무실', '작업장' 에 대한 권장 기준 제시
- ISO 10137 에서 권장하는 '사무실' 수준의 진동 저감 목표 달성

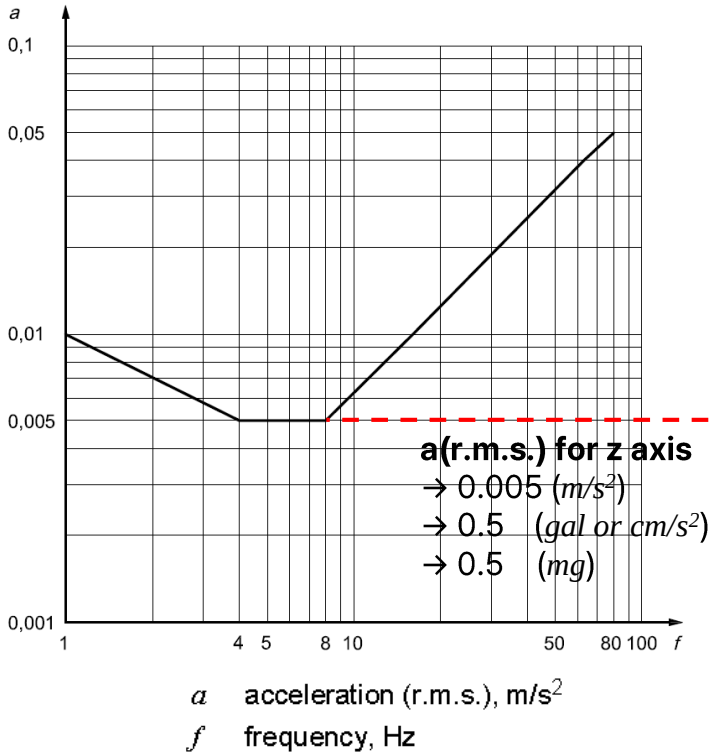


Figure C.1 — Building vibration z-axis base curve for acceleration (foot-to-head vibration direction)

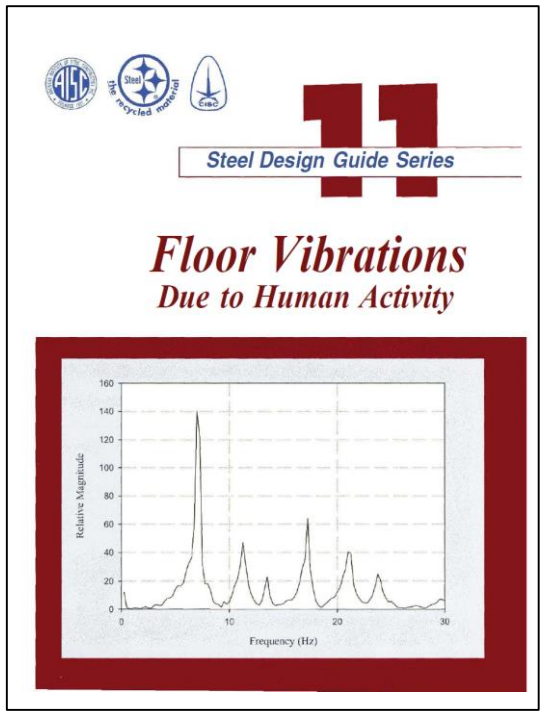
Table C.1 — Multiplying factors used in several countries to specify satisfactory magnitudes of building vibration with respect to human response

Place	Time	Multiplying factors to base curve (Figures C.1, C.2 and C.3) [a]	
		Continuous vibration and intermittent vibration [b]	Impulsive vibration excitation with several occurrences per day
Critical working areas (e.g. some hospital operating-theatres, some precision laboratories, etc.)	Day	1	1
	Night	1	1 [c]
Residential (e.g. flats, homes, hospitals)	Day	2 to 4 [d]	30 to 90 [d, e, f]
	Night	1,4	1,4 to 20
Quiet office, open plan	Day	2	60 to 128 [g]
	Night	2	60 to 128
General office (e.g. schools, offices)	Day	4	60 to 128 [g]
	Night	4	60 to 128
Workshops [h]	Day	8	90 to 128 [g]
	Night	8	90 to 128

© MIDAS

AISC design guide 11 – Floor vibrations due to human activity

- ISO Baseline curve 를 기준으로 Peak Acceleration (%gravity) 기준곡선 제시
- 바닥판 1차모드 공진에 의한 최대 진동가속도로 진동사용성 평가
- 진동 안전성에 대해서는 중력가속도의 50% 수준의 큰 가속도 제시



AISC steel design guide #11

$$\frac{a_p}{g} = \frac{1.3\alpha_i w_p / w_t}{\sqrt{\left[\left(\frac{f_n}{f}\right)^2 - 1\right]^2 + \left[\frac{2\beta f_n}{f}\right]^2}}$$

$$\frac{a_p}{g} = \frac{1.3}{2\beta} \cdot \frac{\alpha_i w_p}{w_t}$$

a_p / g = peak acceleration as a fraction of the acceleration due to gravity
α_i = dynamic coefficient (see Table 2.1)
w_p = effective weight per unit area of participants distributed over floor panel
w_t = effective distributed weight per unit area of floor panel, including occupants
f_n = natural frequency of floor structure
f = forcing frequency
$= i \cdot f_{step}$ where f_{step} is the step frequency
β = damping ratio

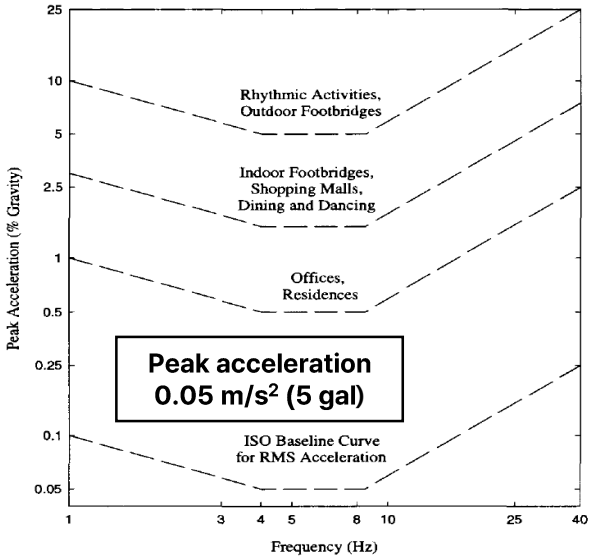


Fig. 2.1 Recommended peak acceleration for human comfort for vibrations due to human activities (Allen and Murray, 1993; ISO 2631-2: 1989).

AISC vibration crieria

© MIDAS IT Co,. Ltd

DIN 4150-3

- 진동 최대 속도 (PPV)를 기준으로 long term 과 short term 진동 크기를 기준으로 진동 사용성 및 안전성 평가 기준 제시

- 보수적인 기준 적용 시 Line 3 또는 5 mm/s PPV 기준 적용

3.4 Short-term vibration

Vibration which does not occur often enough to cause structural fatigue and which does not produce resonance in the structure being evaluated.

3.5 Long-term vibration

All types of vibration not covered by the definition of 'short-term vibration' in subclause 3.4.

5.2 Effects on floors

Where short-term vibration causes floors to vibrate, if v_z is no greater than 20 mm/s when measured at the point of maximum velocity (which is usually at the centre of the floor), a reduction in the serviceability of the floor is not to be expected. In the case of buildings as in line 3 of table 1, it may be necessary to lower this value to prevent minor damage.

Floor vibration

Table 3: Guideline values for vibration velocity to be used when evaluating the effects of long-term vibration on structures

Line	Type of structure	Guideline values for velocity, v_i, in mm/s, of vibration in horizontal plane of highest floor, at all frequencies
1	Buildings used for commercial purposes, industrial buildings, and buildings of similar design	10
2	Dwellings and buildings of similar design and/or occupancy	5
3	Structures that, because of their particular sensitivity to vibration, cannot be classified under lines 1 and 2 and are of great intrinsic value (e.g. listed buildings under preservation order)	2,5

Long-term vibration Criteria

Table 1: Guideline values for vibration velocity to be used when evaluating the effects of short-term vibration on structures

Line	Type of structure	Guideline values for velocity, v_i, in mm/s			
		Vibration at the foundation at a frequency of			Vibration at horizontal plane of highest floor at all frequencies
		1 Hz to 10 Hz	10 Hz to 50 Hz	50 Hz to 100 Hz*)	
1	Buildings used for commercial purposes, industrial buildings, and buildings of similar design	20	20 to 40	40 to 50	40
2	Dwellings and buildings of similar design and/or occupancy	5	5 to 15	15 to 20	15
3	Structures that, because of their particular sensitivity to vibration, cannot be classified under lines 1 and 2 and are of great intrinsic value (e.g. listed buildings under preservation order)	3	3 to 8	8 to 10	8

*) At frequencies above 100 Hz, the values given in this column may be used as minimum values.

Short-term vibration Criteria at Foundation

Table 2: Guideline values for vibration velocity to be used when evaluating the effects of short-term vibration on buried pipework

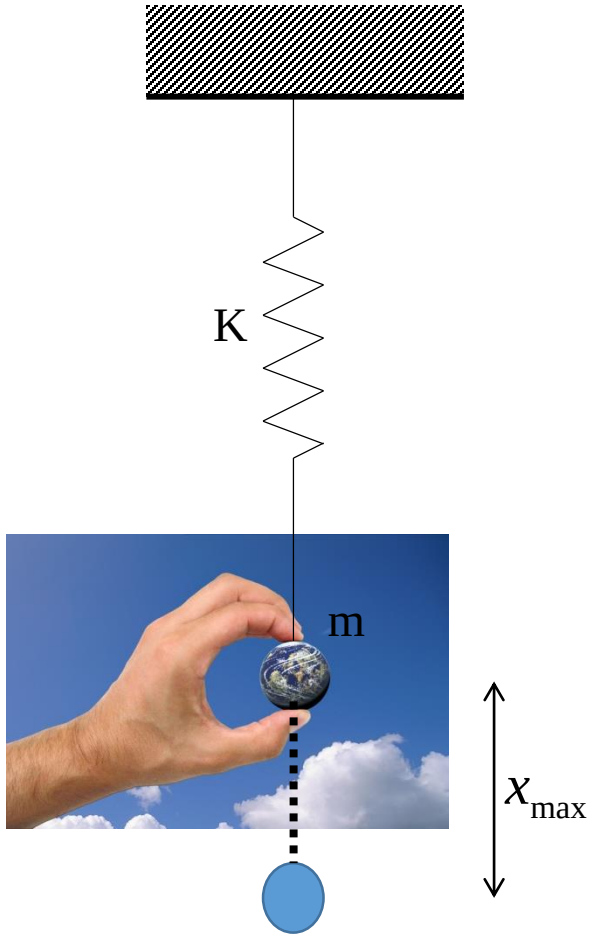
Line	Pipe material	Guideline values for velocity measured on the pipe, v_i, in mm/s
1	Steel (including welded pipes)	100
2	Clay, concrete, reinforced concrete, pre-stressed concrete, metal (with or without flange)	80
3	Masonry, plastic	50

Vibration Criteria for Pipeline

© MIDAS IT Co,. Ltd

Static/Dynamic Responses

■ Response Amplification by Dynamic Effect



Question) 공을 놓는다면 최대 늘어나는 스프링의 변위 ?

Case 1) 살며시 놓을 때

$$kx = mg \rightarrow x_{max} = x_{st} = k^{-1}mg$$

Case 2) 갑자기 놓을 때

: 질량의 위치에너지 → 스프링의 복원에너지

$$mgx_{\max} = \frac{1}{2}kx_{max}^2 \rightarrow x_{\max} = x_d = 2k^{-1}mg$$

동적증폭효과 = 동적최대변위 / 정적최대변위 = 2

© MIDAS IT Co,. Ltd

Static/Dynamic Responses

■ Static Response

$$ku = f \Rightarrow u_{st} = k^{-1} f$$

Load and displacement have identical phase
No load No Displacement

■ Dynamic Response

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = 0 \Rightarrow u_d = u_c$$

Free Vibration, No load but responses occur

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = f \Rightarrow u_d = u_c + u_p$$

Forced Vibration but Response has Free vibration term
Load and displacement have different phase

Response Amplification by Dynamic Effect $R_d = \dfrac{u_d}{u_{st}}$ $R_d > 1$ *or* $R_d \leq 1$

© MIDAS IT Co,. Ltd

Static/Dynamic Responses

■ 구조물의 동적 응답에 영향을 주는 3가지 요소

1) Natural Period (Natural Frequency)

2) Damping Ratio

3) Loading Characteristics

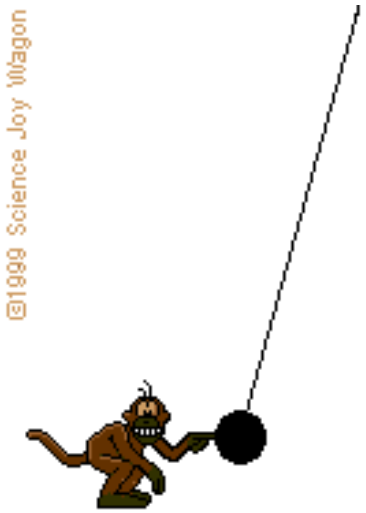
■ Key Issue : 원 구조물의 주기 및 감쇠에 대한 평가방법

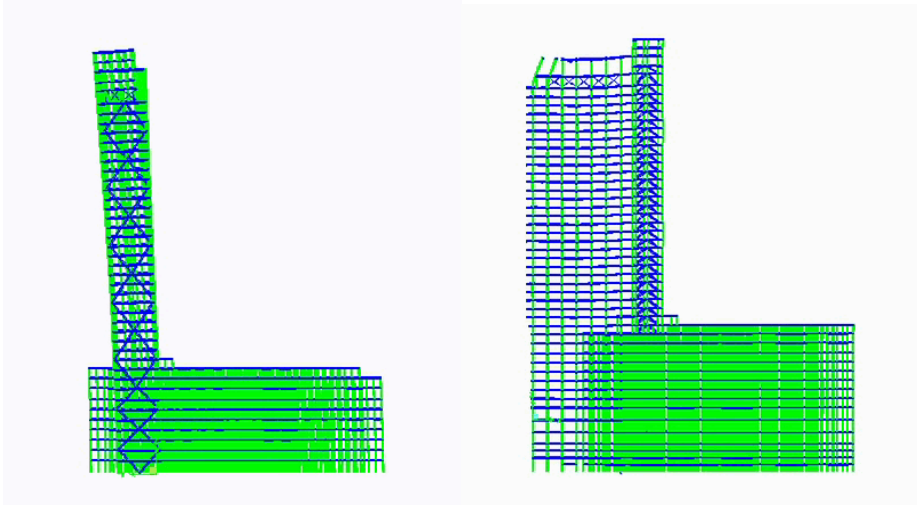
→ Amplitude Dependent Period and Damping

© MIDAS IT Co,. Ltd

Static/Dynamic Responses

■ 주기



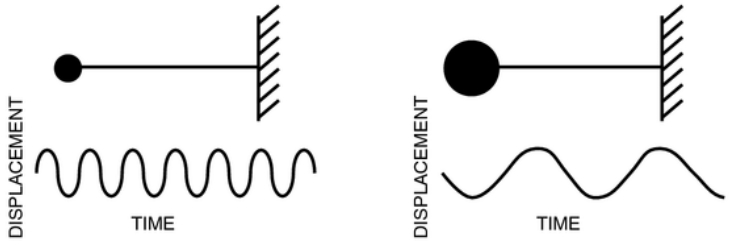


Natural Frequency
Natural Period

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

$$T_n = \frac{2\pi}{\omega_n} = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$$

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



© MIDAS IT Co,. Ltd

Static/Dynamic Responses

■ 감쇠

$$f = m\ddot{u} + c\dot{u}$$

→ 속도가 발생하면 관성력의 크기가 감소함. 움직임의 변화가 줄어듬

© MIDAS IT Co,. Ltd

I. 구조물 정적 및 동적 응답 Static/Dynamic Responses

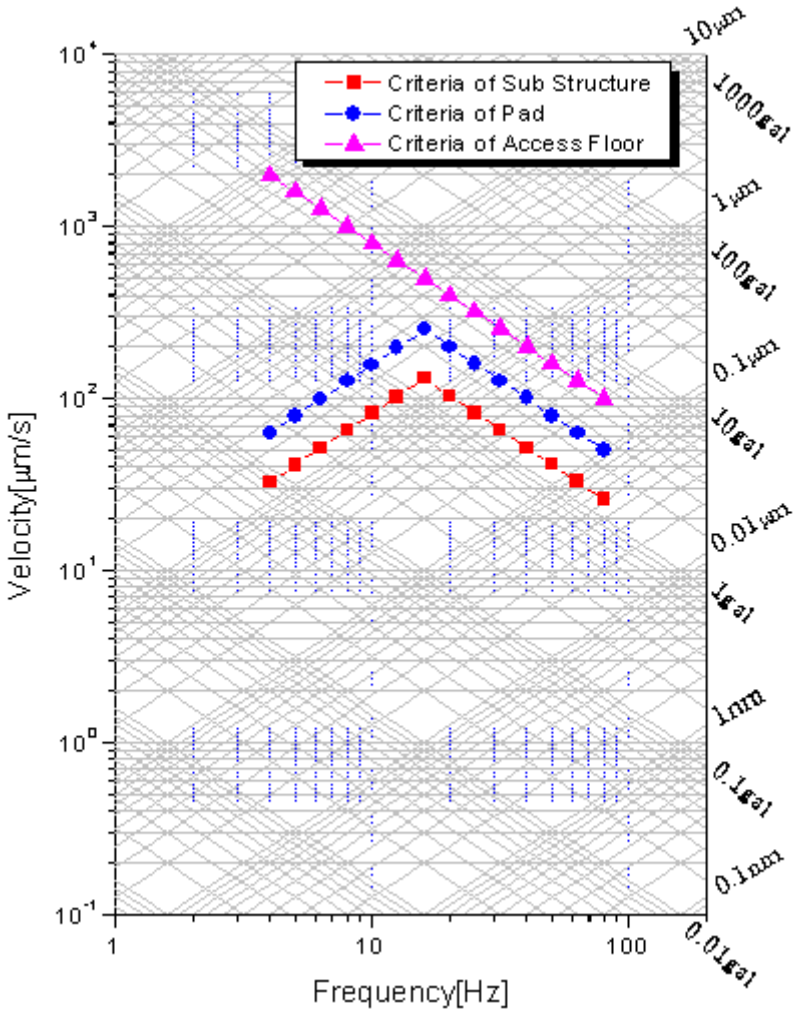
$$u = \sin \omega_n t$$

$$\dot{u} = \omega_n \cos \omega_n t$$

$$\ddot{u} = -\omega_n^2 \sin \omega_n t$$

<P7, P8(격자보 안) 공장 구조물 내 C/R 위치별 진동설계목표치>

Description / 위치	변위 (㎛)	가속도 (㎝/s²)	주파수범위 (Hz)
제진대 (일반형)	2.5	2.5	● 변위 : 4~16Hz ● 가속도 : 16~80Hz
격자보	1.3	1.3	● 변위 : 4~16Hz ● 가속도 : 16~80Hz
Access Floor		5	4~80Hz
● 진동측정방향 : 0-p value(3축) ● 주파수 범위: 4~80Hz ● 측정/분석 방법 : DC~100Hz, 800 Line, Peak Hold			

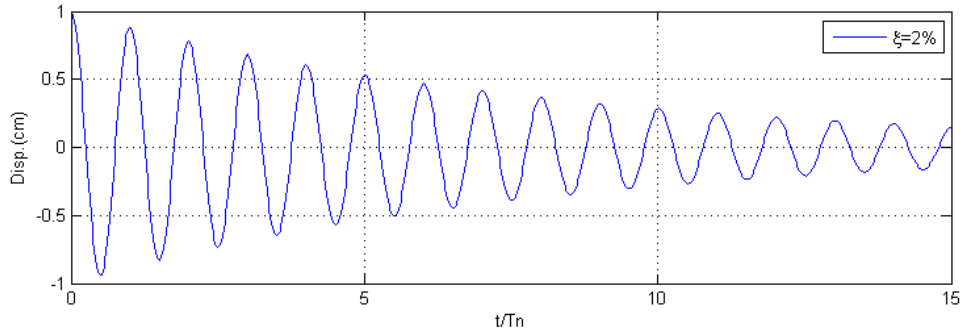


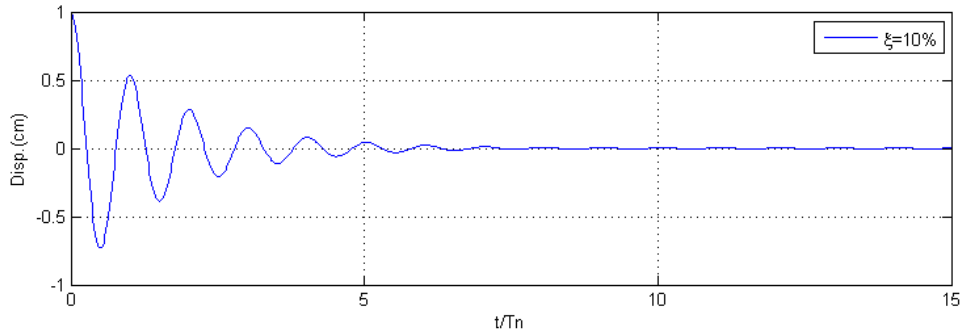
© MIDAS IT Co,. Ltd

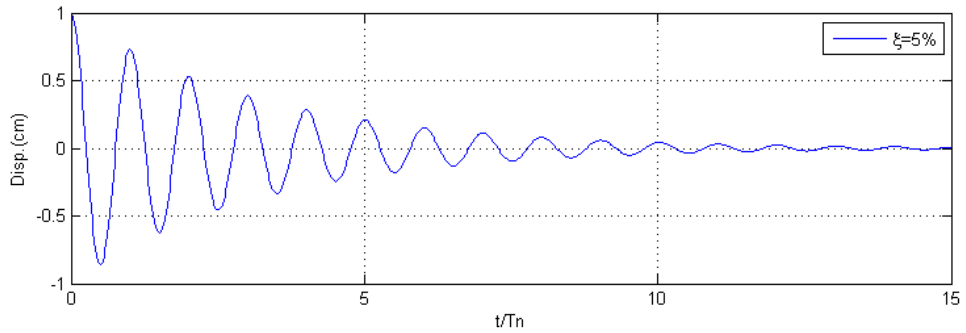
Static/Dynamic Responses

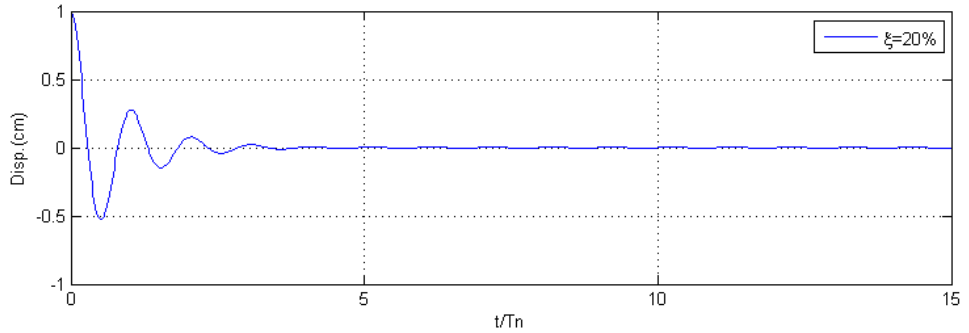
Free Vibration

$$j_{50\%} = \frac{0.11}{\zeta}$$



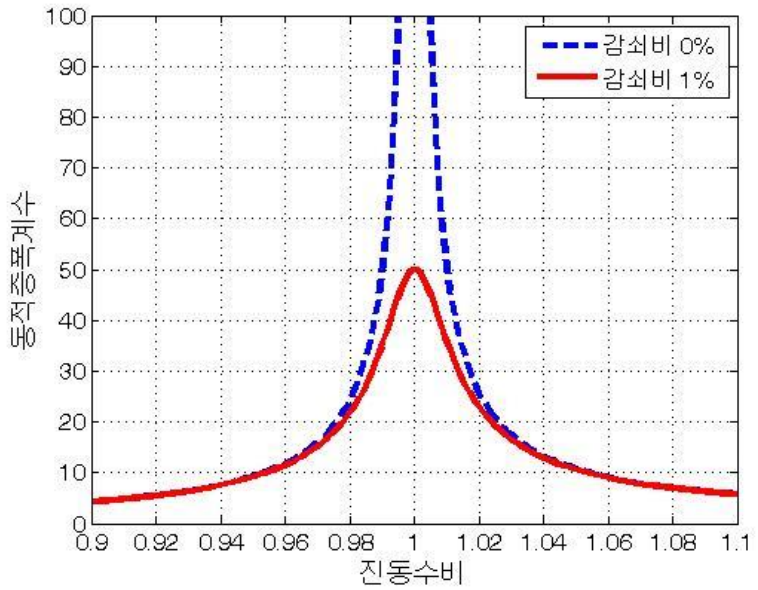






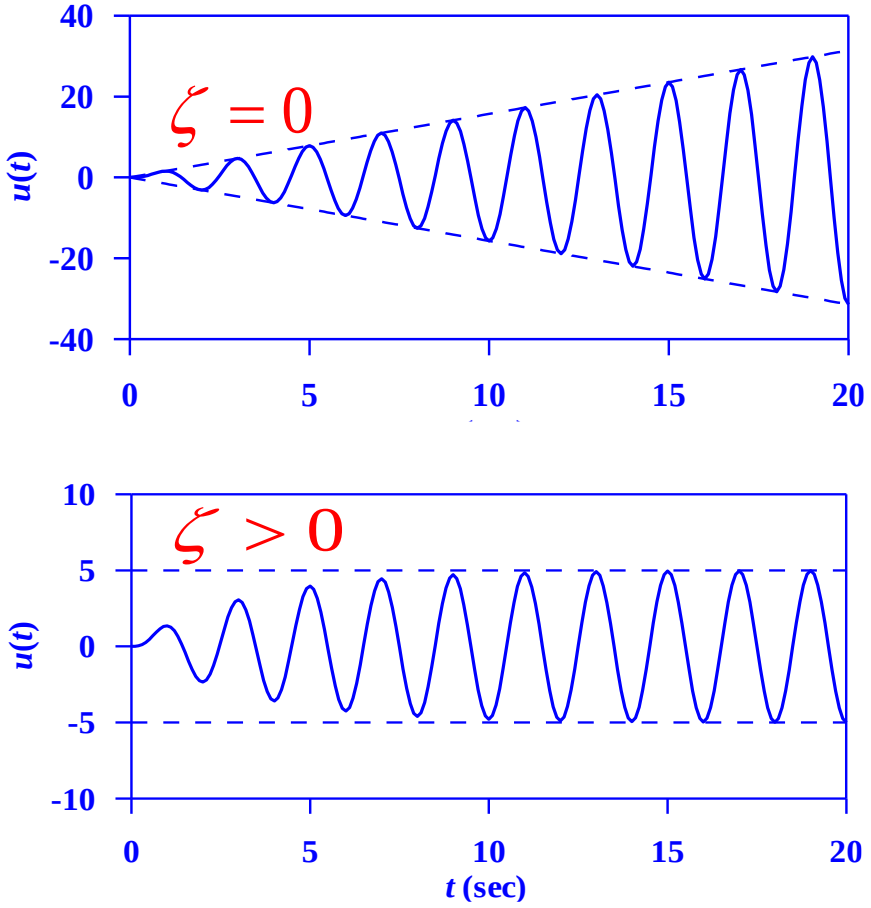
© MIDAS IT Co,. Ltd

I. 구조물 정적 및 동적 응답 Static/Dynamic Responses



동적증폭계수 (Dynamic Magnification Factor)

$$R_d = \max\left|\frac{u(t)}{u_{static}}\right| = \frac{1}{\sqrt{\left[1-(\omega_f/\omega_n)^2\right]^2+\left[2\zeta(\omega_f/\omega_n)\right]^2}}$$



Equivalent Static Load

$$R_d\, f = \frac{1}{2\zeta} f$$

만약 $f_n \approx f_p$ 이면, → 공진(Resonance)발생

f_n = 구조물의 고유진동수
f_p = 외력의 가진 진동수

© MIDAS IT Co,. Ltd

Static/Dynamic Responses

■ 동하중

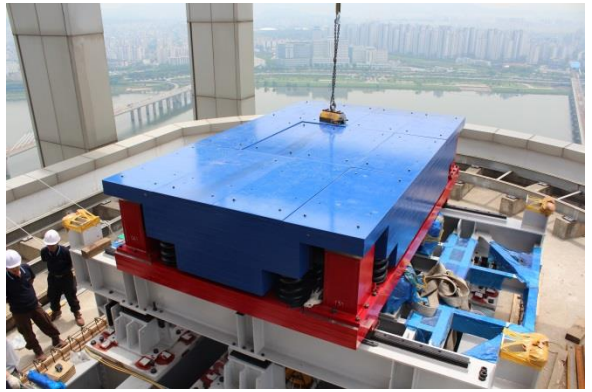
© MIDAS IT Co,. Ltd

I. 구조물 정적 및 동적 응답

Static/Dynamic Responses

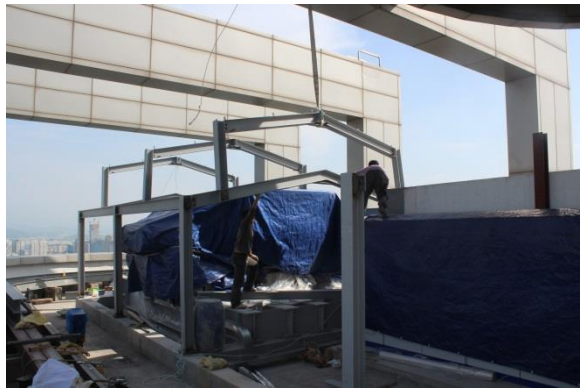
Crane Installation

Support Beam



Damper Mass Installation

Controller Installation

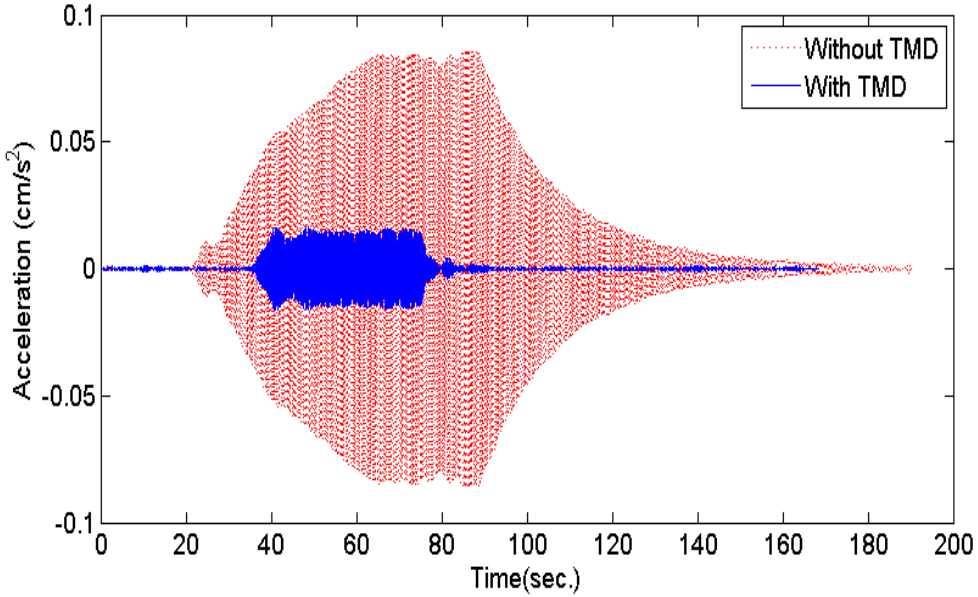


Control Room Frame

Control Room

© MIDAS IT Co,. Ltd

Static/Dynamic Responses



Damping Increase

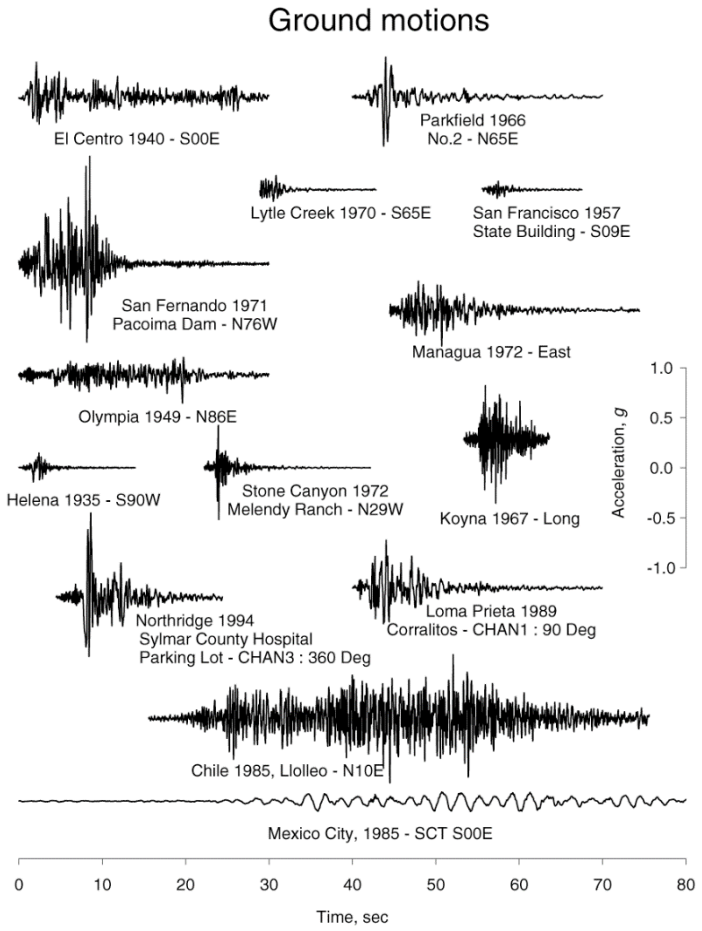
0.3% → 2.7%

8.5 *gal* → 1.5 *gal*

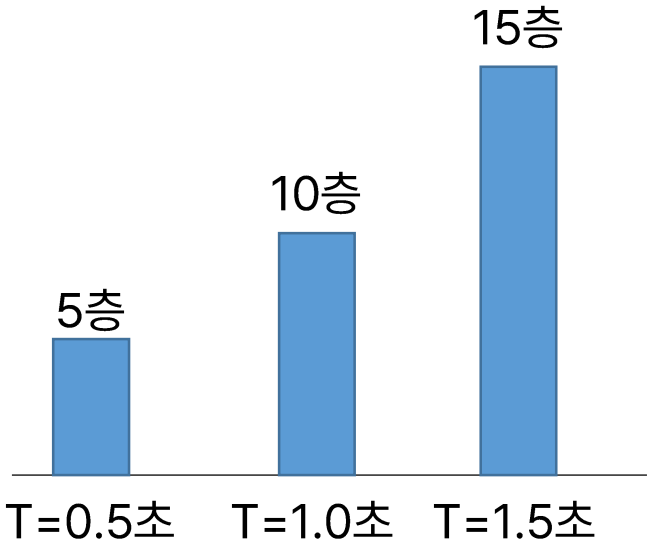
© MIDAS IT Co,. Ltd

I. 구조물 정적 및 동적 응답

Static/Dynamic Responses



(A.K. Chopra, 2007)



Q1) 각 구조물에 가장 위험한 지진은 ?

Q2) 가장 쉽게 판단하는 방법은 ?

Q3) 퓨리에(Fourier) 시리즈 or 변환은 ?

© MIDAS IT Co,. Ltd

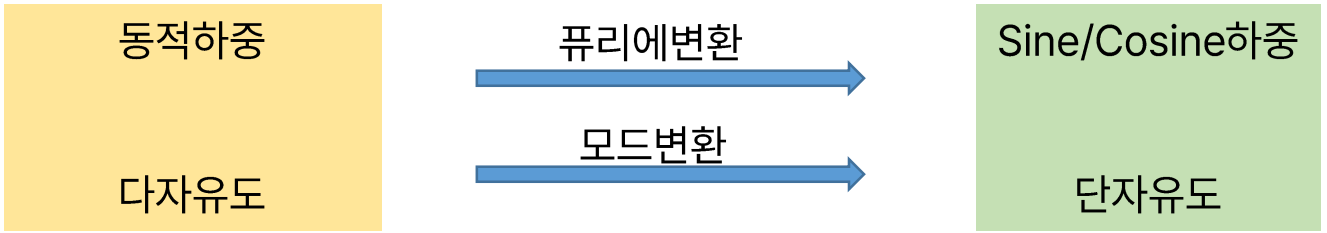
Static/Dynamic Responses

■ 퓨리에 시리즈

: "임의의 주기함수는 sin 함수와 cos 함수의 합으로 표현할 수 있다"

$$f_T = a_o + a_1 \cos \omega_1 t + b_1 \sin \omega_1 t + a_2 \cos \omega_2 t + b_2 \sin \omega_2 t + \ldots$$

Jean-Baptiste-Joseph Fourier
(1768-1830)

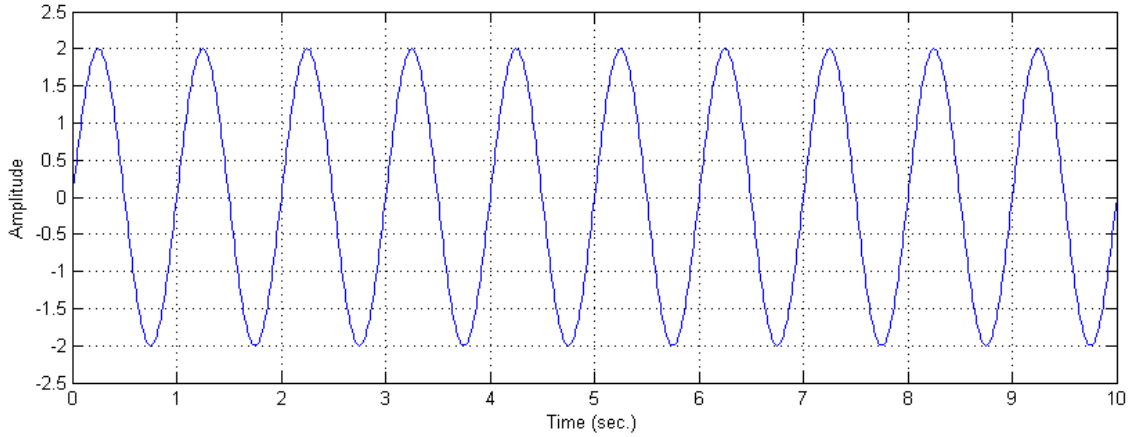


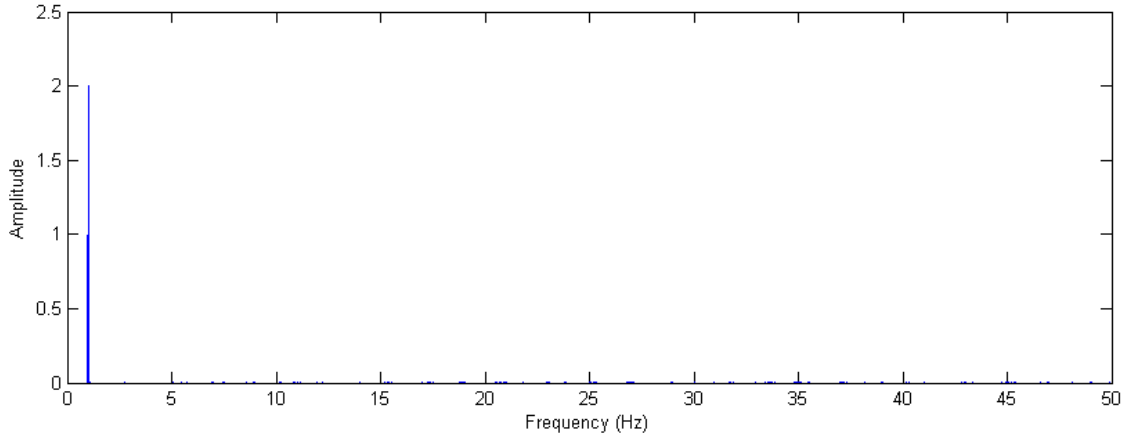
→ 동적하중을 받는 다자유도 시스템의 응답은 Sine/Cosine 하중을 받는 단자유도 시스템으로 치환할 수 있다.

© MIDAS IT Co,. Ltd

Static/Dynamic Responses

$$x = 2\sin(2\pi t)$$

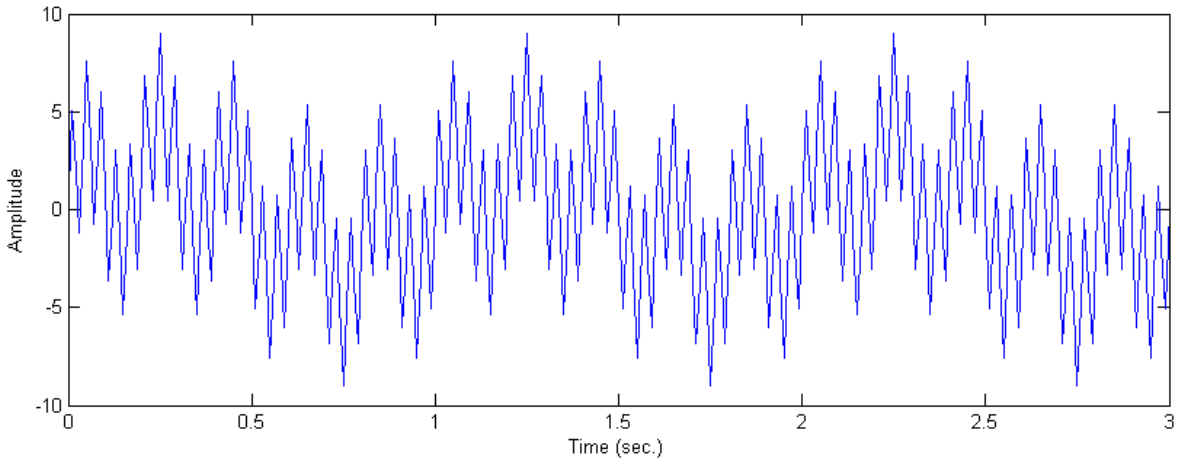


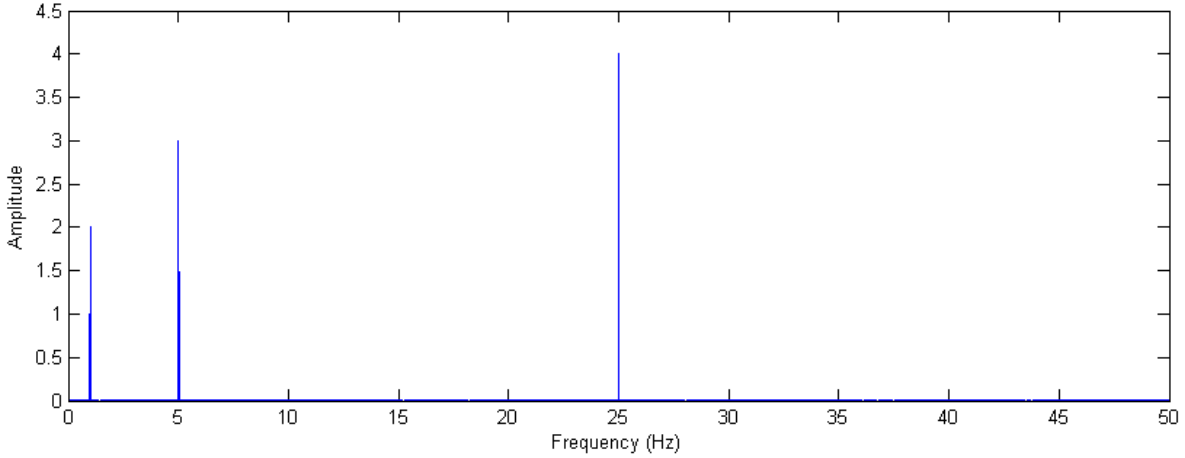


© MIDAS IT Co,. Ltd

Static/Dynamic Responses

$$x = 2\sin(2\pi t) + 3\sin(10\pi t) + 4\sin(50\pi t)$$

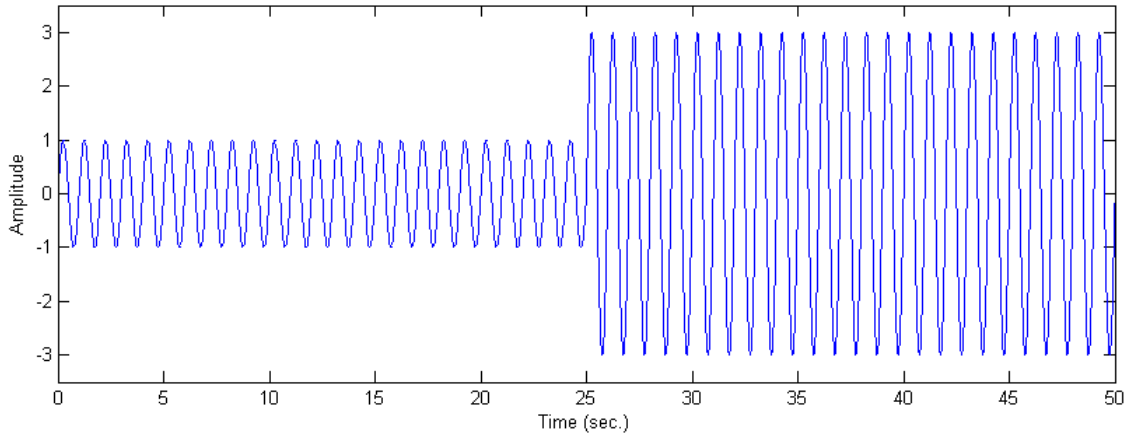


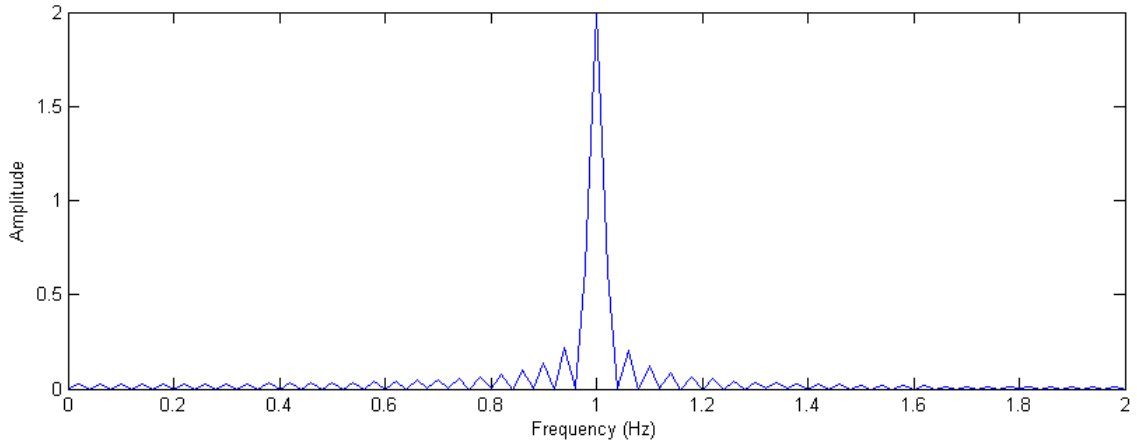


© MIDAS IT Co,. Ltd

Static/Dynamic Responses

FFT의 단점





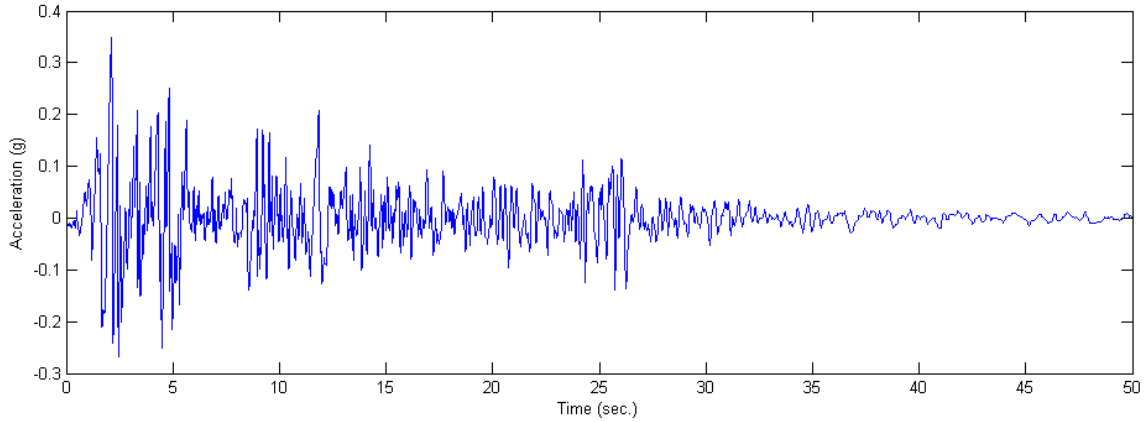
© MIDAS IT Co,. Ltd

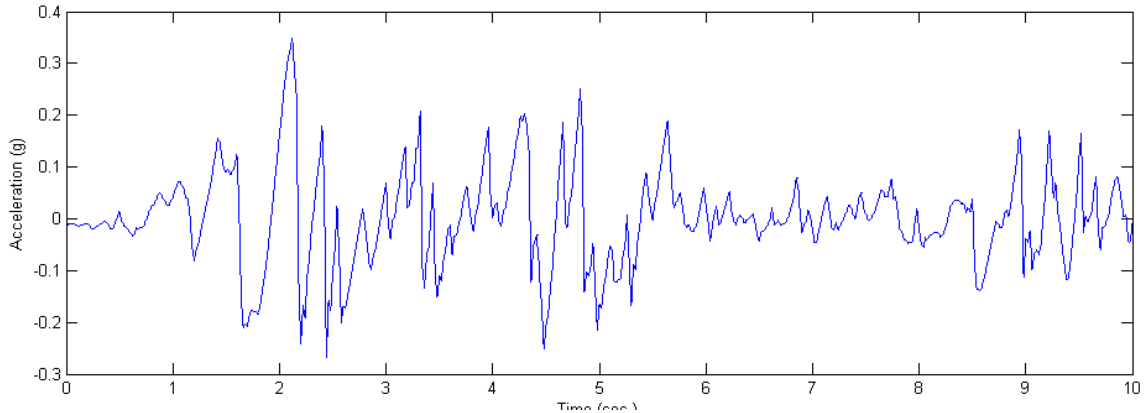
Static/Dynamic Responses

El Centro Earthquake (1940, NS) or Imperial Valley Eq.

1940 El Centro earthquake

Date	May 18, 1940
Origin time	21:35 PST
Magnitude	6.9 M_w [1]
Depth	16 km (9.9 mi) [1]
Epicenter	32.733°N 115.5°W [1]
Type	Strike-slip
Areas affected	United States, Mexico
Total damage	$ 6 million [2]
Max. intensity	X (*Extreme*) [1]
Casualties	9 dead [2] 20 injured [3]

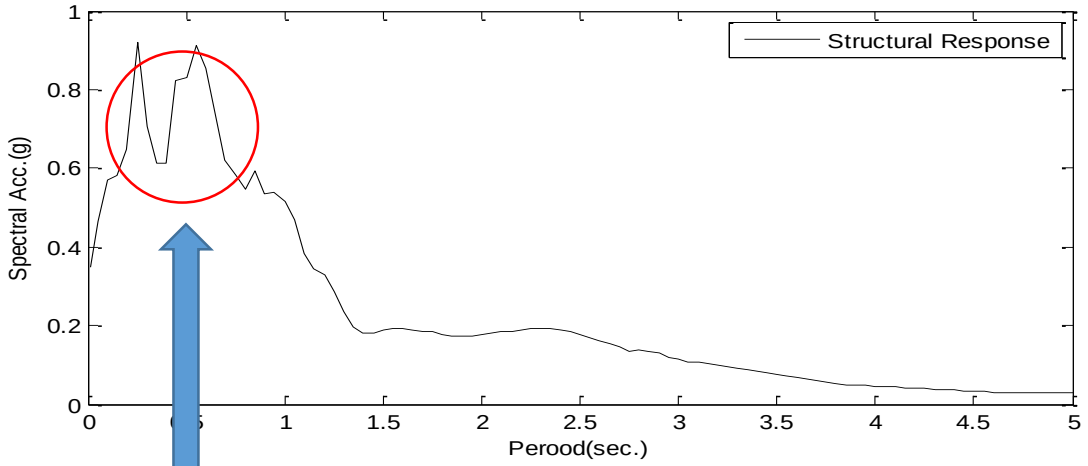




© MIDAS IT Co,. Ltd

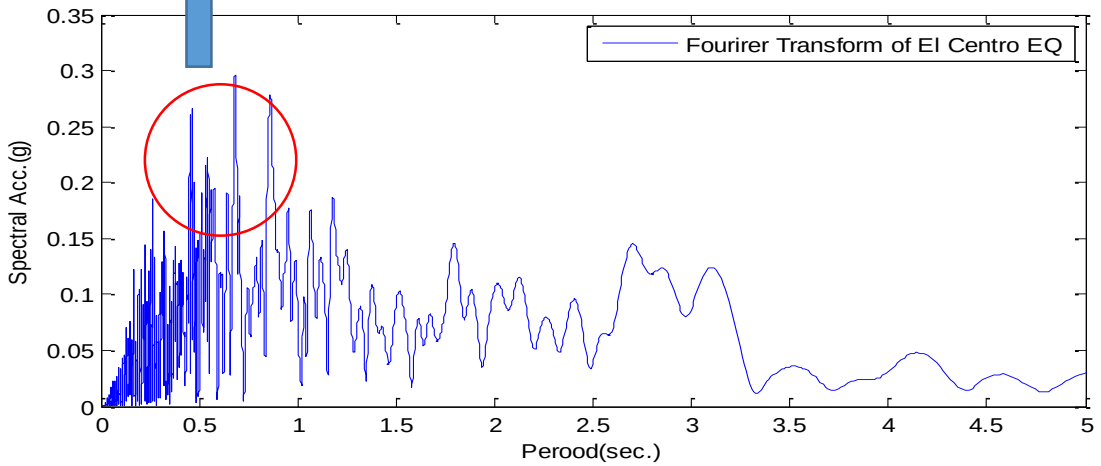
Static/Dynamic Responses

Response Spectrum



하중의 주기성분에 해당하는 주기 구조물 응답증폭

Fourier Transform



© MIDAS IT Co,. Ltd

Part 2. 진동제어 수행 프로젝트

© MIDAS IT Co,. Ltd

II. 진동제어 수행 프로젝트

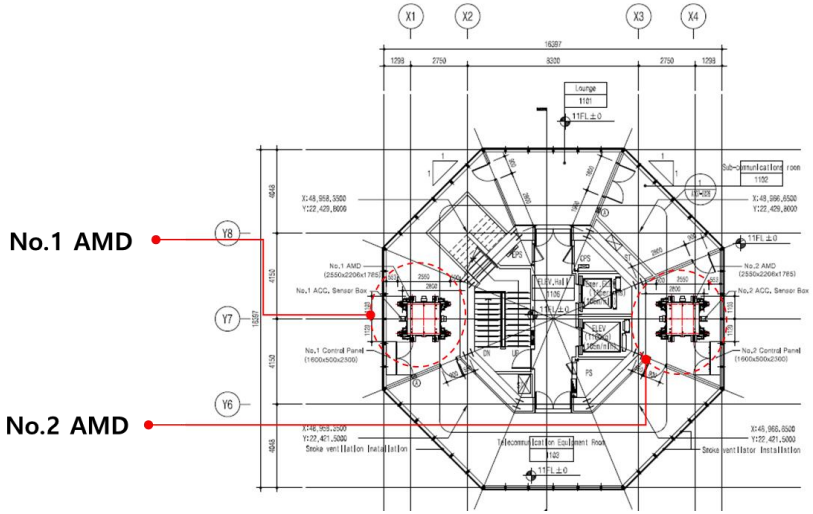
인천공항 제2계류장 관제탑 풍진동 제어

인천공항 제2관제탑 진동제어장치 설치

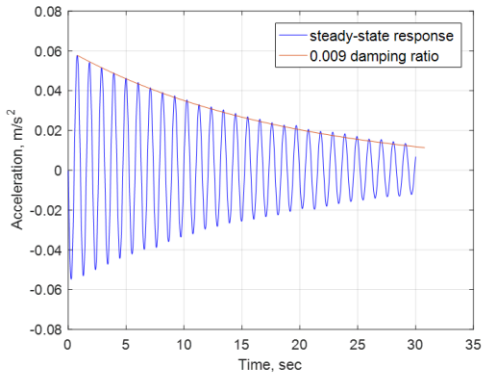
■ 인천공항 관제탑 진동제어장치 설계 (2016)

- 용역 개요
  ① 인천국제공항 제2계류장 관제탑 진동제어장치 설치
  ② 능동형 진동제어장치 진동제어 알고리즘 설계

- 결과 요약
  ① 인천국제공항 제2계류장 관제탑 진동제어장치 설치
  ② 능동형 진동제어장치 진동제어 알고리즘 설계
  ③ 제어장치 운영을 통한 수평진동 허용 기준 만족

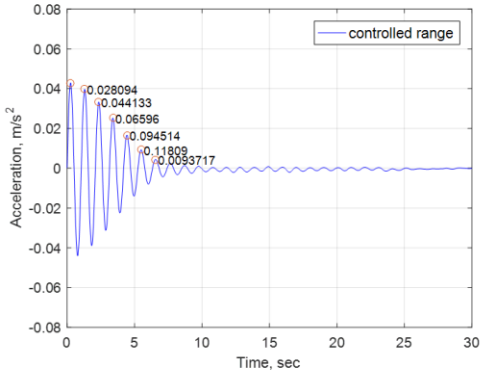


2방향 진동제어장치 설치 위치



X방향 자유진동 실험

(감쇠비 : 0.009)



X방향 제진 실험

(감쇠비 : 0.11)

12배 증가

2방향 진동제어장치 설치 후 진동 제어 성능 검증

© MIDAS IT Co,. Ltd

II. 진동제어 수행 프로젝트

디타워 서울포레스트

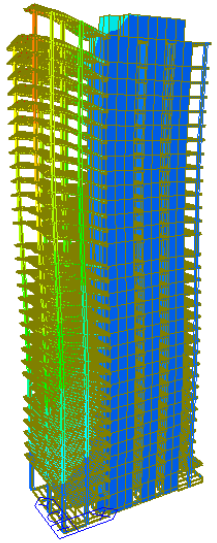
디타워 서울 포레스트 진동 원인 규명

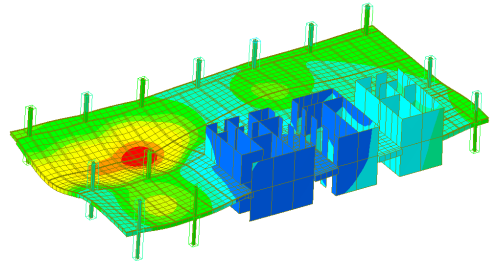
■ 디타워 서울 포레스트 진동 원인 규명 (2022)

- 2022년 1월 20일 진동 민원 발생
- 지진, 바람, 발파 공사 등 다양한 외부 진동원 확인
- 건물 전 층 진동 모니터링
- 진동 발생 원인 규명
- 진동 저감을 위한 방안 제시 : 바닥 진동 제어장치 적용

바닥진동 제어장치 진동 저감

외부 진동원 조사





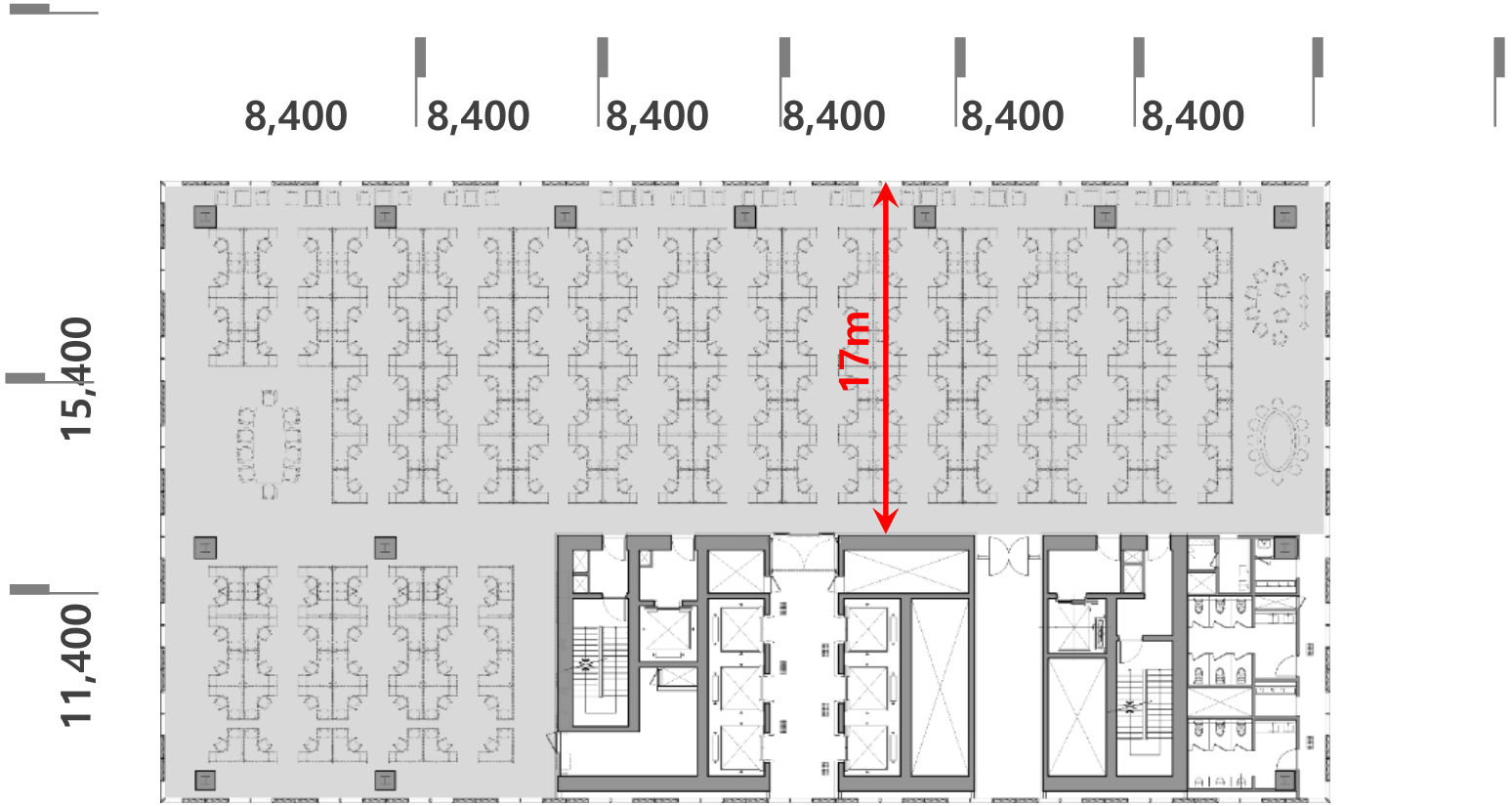
건물 진동 모드 분석

© MIDAS IT Co,. Ltd

디타워 서울 포레스트 진동 원인 규명

■ 전용공간 구성

- 장스팬 무주공간



기준층 면적

바닥면적 : 1,488.58m² (450평)

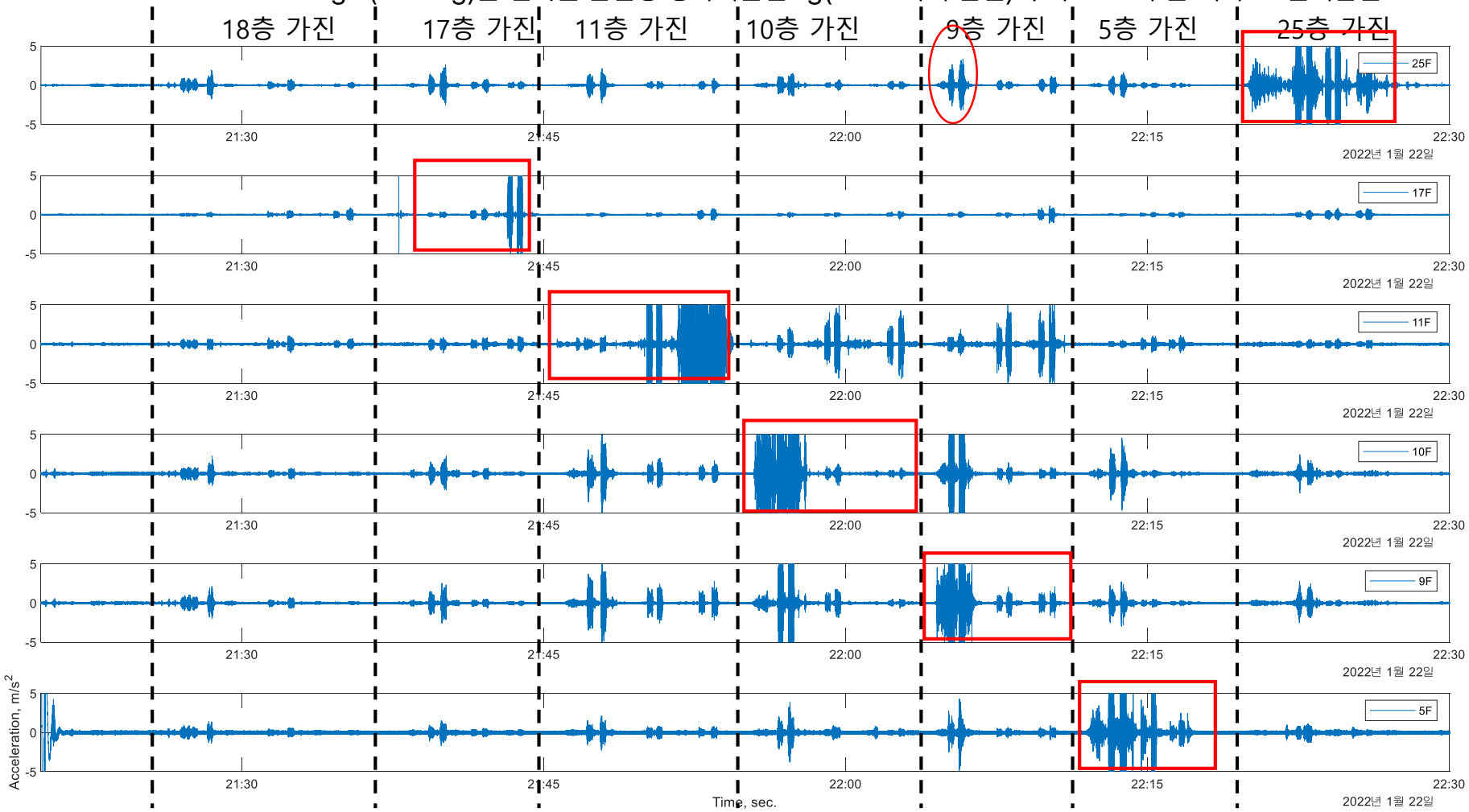
전용면적 : 1,245.89m² (377평)

기준층전용률 : 83.69%

© MIDAS IT Co,. Ltd

디타워 서울 포레스트 진동 원인 규명

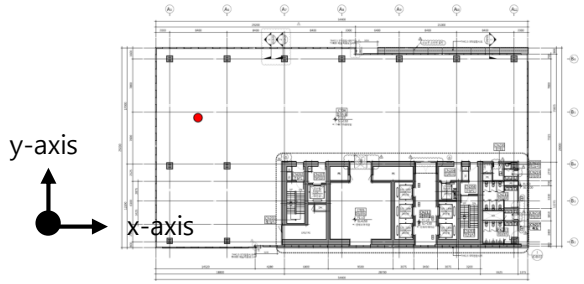
- 특정층 가진응답이 건물 전체로 동조화되어 전달됨. 9층(SM) 가진시, 5층(소카) 및 25층(현대 글로비스) 사무실 진동수준 최대이며, 약 3.3gal ~ 4.9gal 발생
- 5gal(0.005g)은 건축물 안전성 평가기준인 1g(100%까지 안전)의 약 0.5%수준 이하 → 절대안전

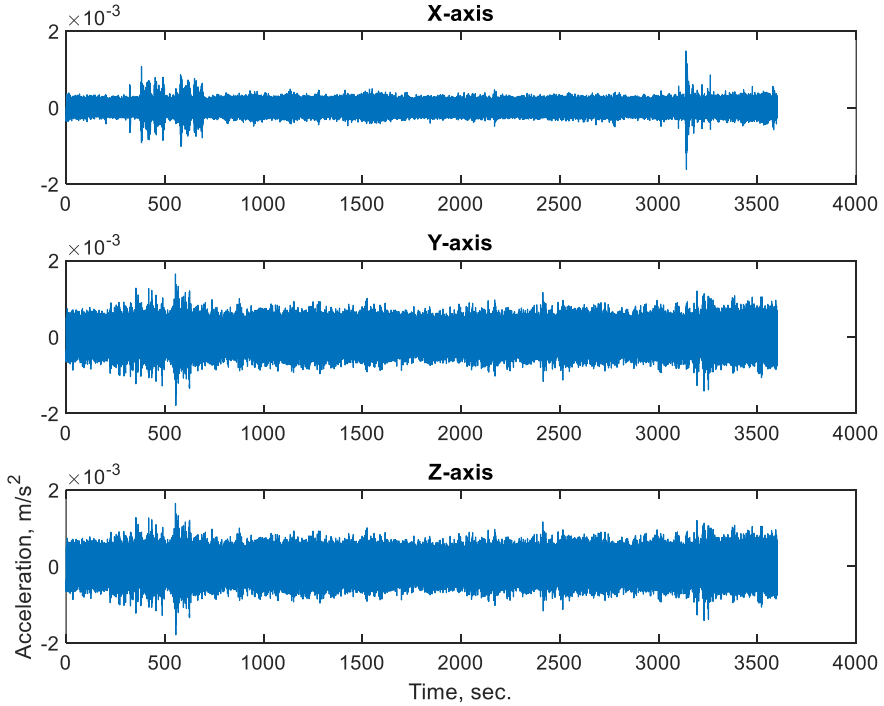


© MIDAS IT Co,. Ltd

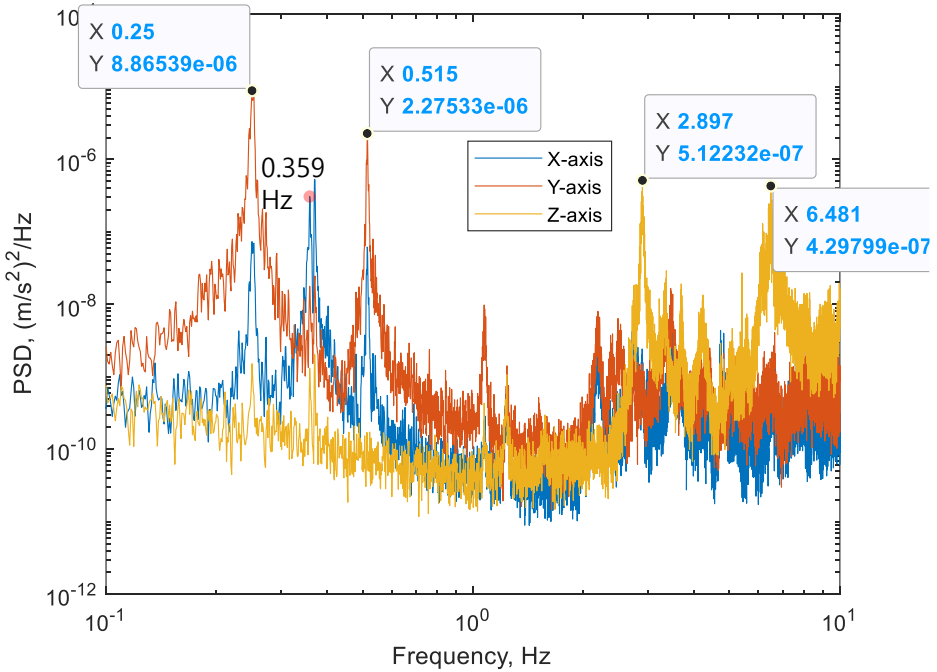
디타워 서울 포레스트 진동 원인 규명

- 조용한 새벽시간대 25층 진동 모니터링 가속도 1시간 데이터에 대해 PSD 스펙트럼 분석
- 1차 모드 : 0.25 Hz (xy방향 병진)
- 2차 모드 : 0.359, 0.370 Hz (xy방향 병진)
- 3차 모드 : 0.515 Hz (비틀림 모드 추정)
- 4차 모드 : 2.897 Hz (건물 수직방향 진동모드)
- 5차 모드 : 6.481 Hz (바닥판 수직방향 진동모드)





분석 대상 진동가속도 파형

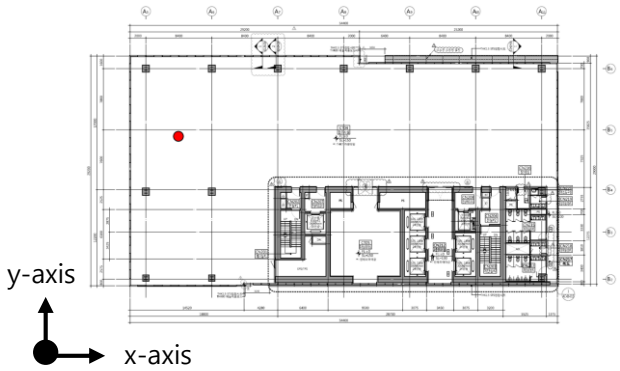


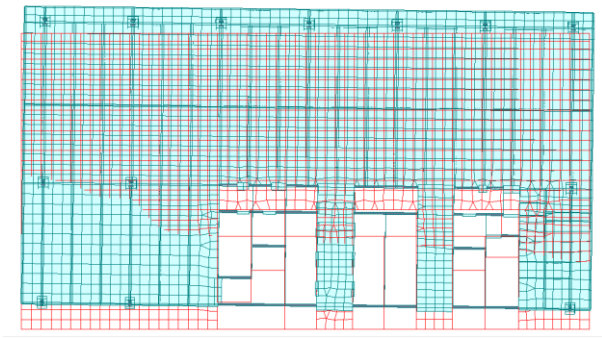
PSD 스펙트럼 주파수 분석

© MIDAS IT Co,. Ltd

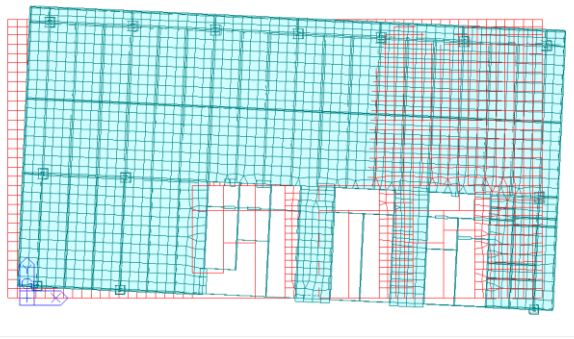
디타워 서울 포레스트 진동 원인 규명

모드차수	방향	주파수 (Hz)	
		해석	계측
1차	수평 Y	0.26	0.25
2차	수평 X	0.41	0.36
3차	수평 비틀림	0.56	0.52

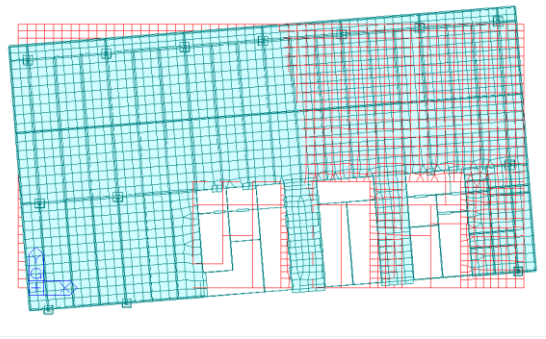




1차 모드



2차 모드

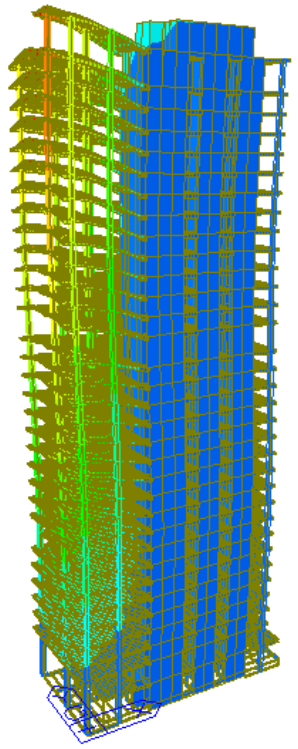


3차 모드

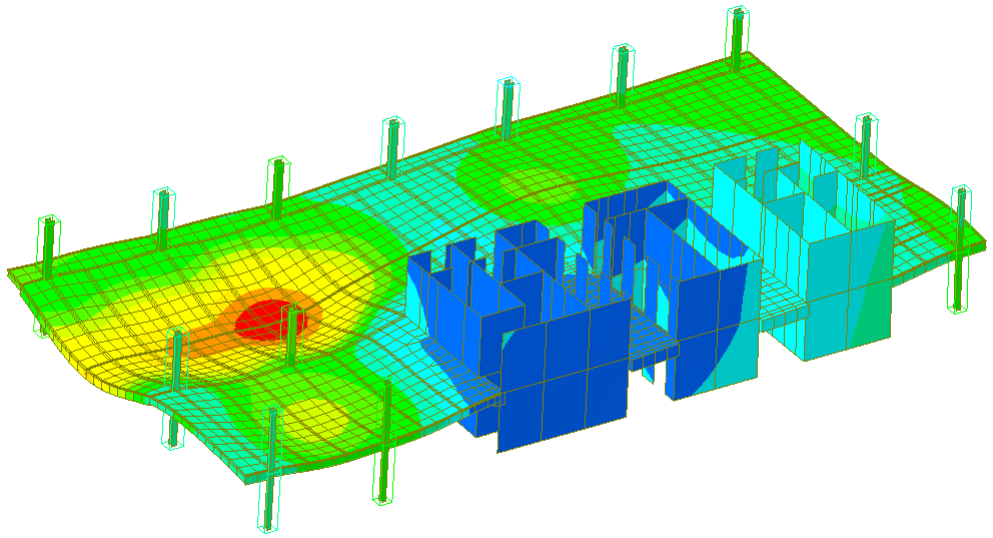
© MIDAS IT Co,. Ltd

디타워 서울 포레스트 진동 원인 규명

		주파수 (Hz)	
모드차수	방향	해석	계측
8차	수직 글로벌	2.89	2.89
42차	18층 바닥판 로컬	6.87	6.48



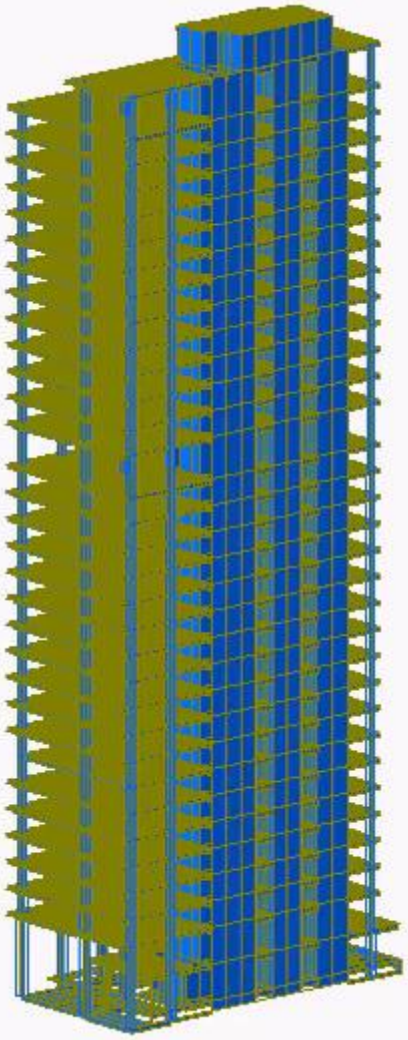
8차 모드



42차 모드

© MIDAS IT Co,. Ltd

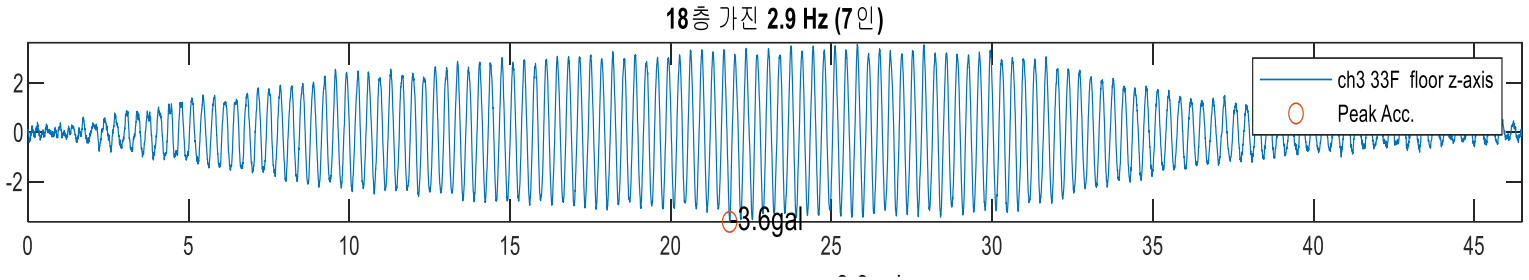
디타워 서울 포레스트 진동 원인 규명



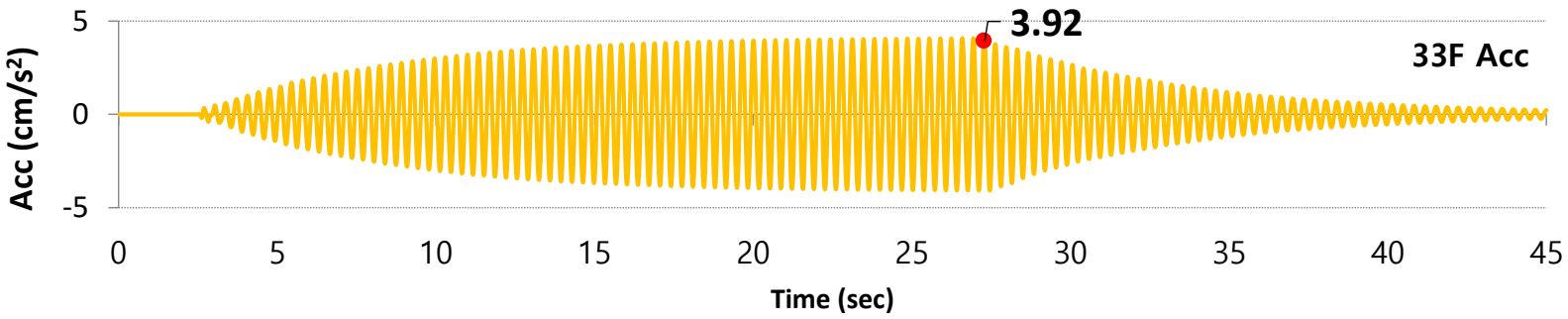
© MIDAS IT Co,. Ltd

디타워 서울 포레스트 진동 원인 규명

실험



해석



© MIDAS IT Co,. Ltd

II. 진동제어 수행 프로젝트

디타워 서울 포레스트 진동 원인 규명

기준층 슬래브 제원

- 질량 : 1840.6톤
- 진동수 : 6.2 Hz
- 감쇠비 : 0.87%

기준층 TMD 제원

- 질량

  6.8Hz 모드질량, 100톤에 대한 질량비 0.5% - 1.0% : 0.5 - 1.0ton

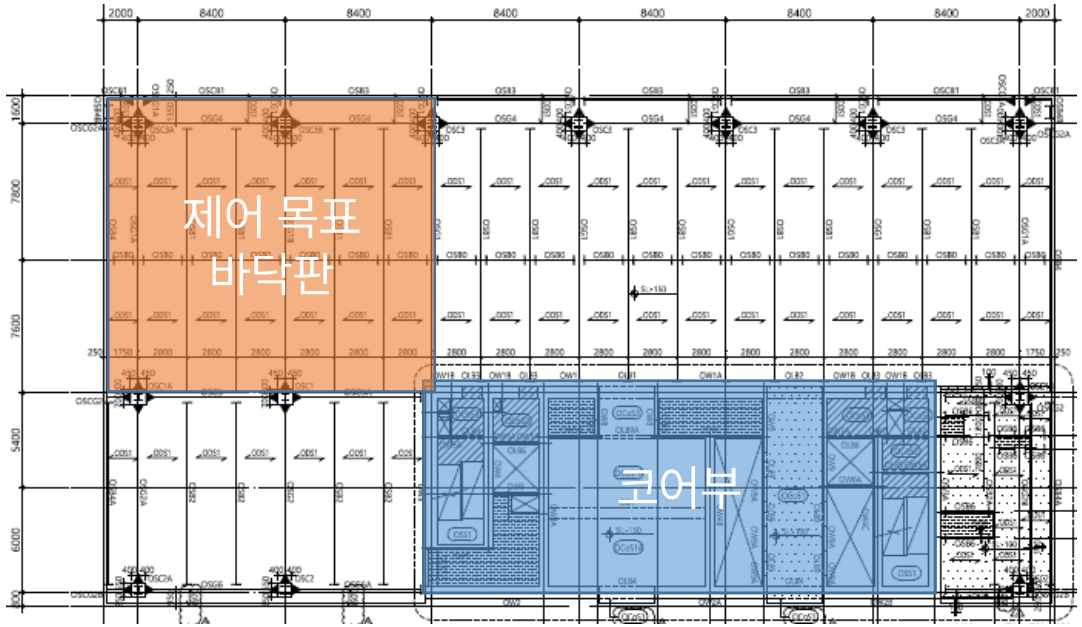
  (ex: 50-100kg TMD 10개설치)

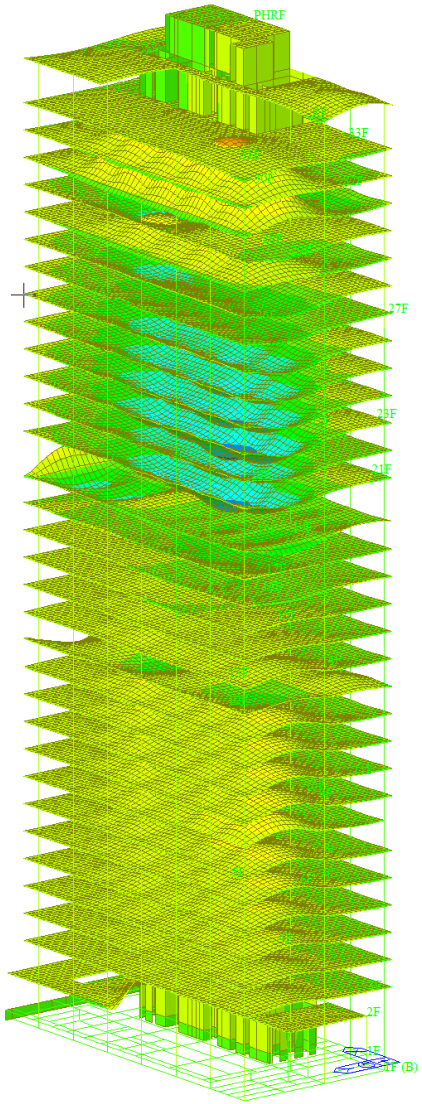
- 강성

  k = 1,980.9 kN/m (설계 진동수 : 6.17Hz, 진동수비 : 99.5%)

- 감쇠

  c = 4.41 kN·sec/m (설계 감쇠비 : 4.3%)

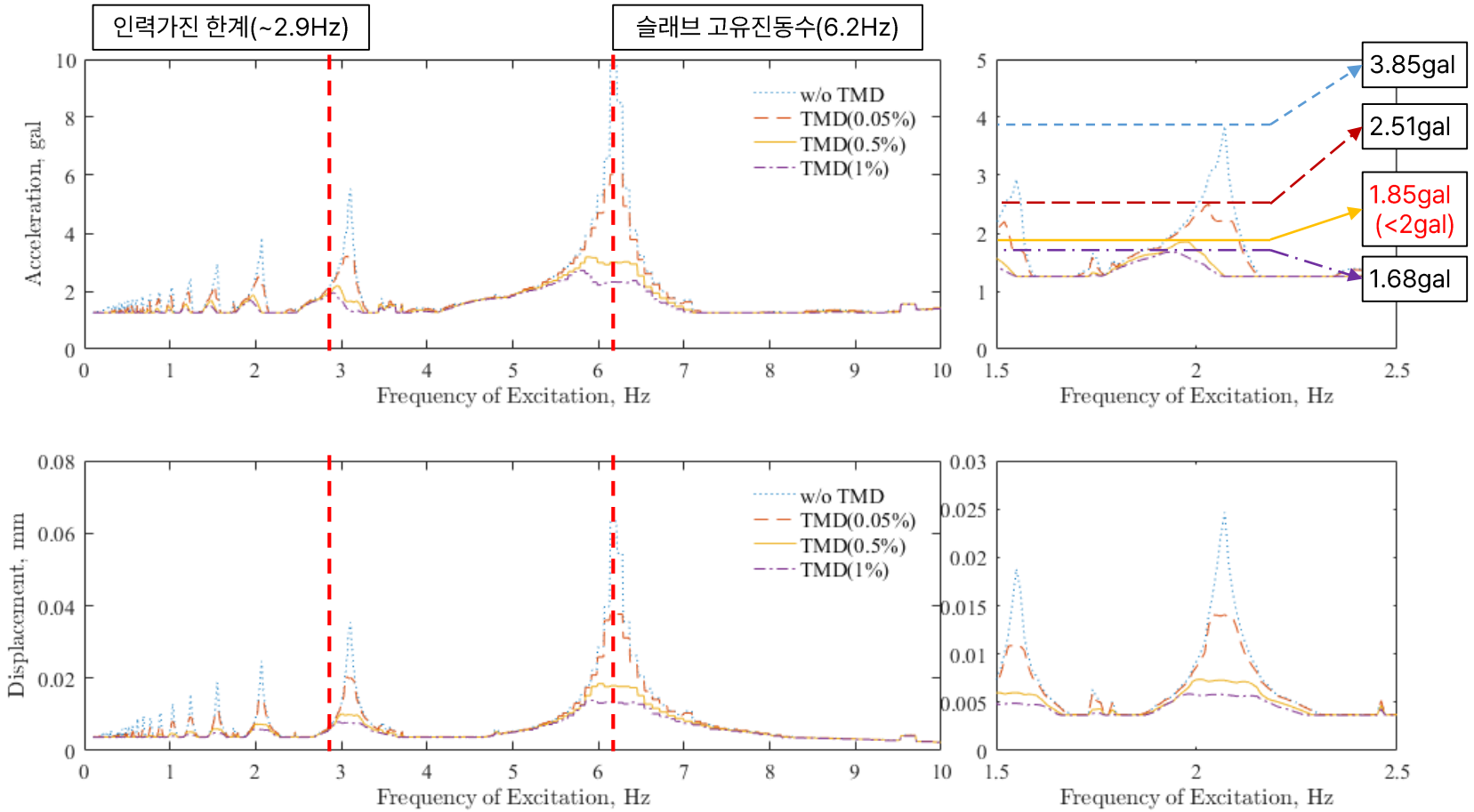




42차 모드 (6.8~6.9Hz)

© MIDAS IT Co,. Ltd

디타워 서울 포레스트 진동 원인 규명



TMD 보강 전후 슬래브의 최대 가속도 및 변위응답

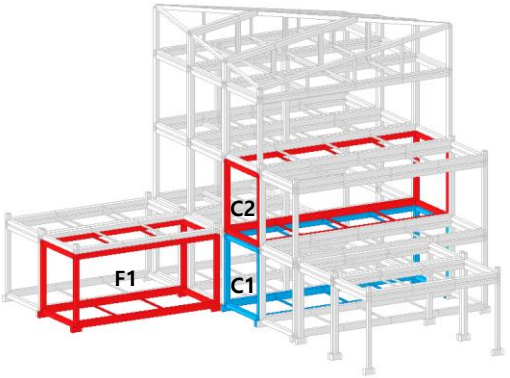
© MIDAS IT Co,. Ltd

II. 진동제어 수행 프로젝트

삼성전자 Ex-Home

■ Ex-Home 설계 개요

- 수원1단지 후문 기숙사/로지텍동 등 총 2,405평 중 주차장 부지1,087평
- 지상3층, 연면적 102평 단독주택 (관제실 16평 별도)
- 구성 – 침실 3 + 화장실 3 + 거실, 주방, 홈짐, 홈오피스 등
- 실제 고객의 Home 환경에서 스마트솔루션과 MDE 시나리오 체험 가능



■ Ex-Home 진동측정 개요

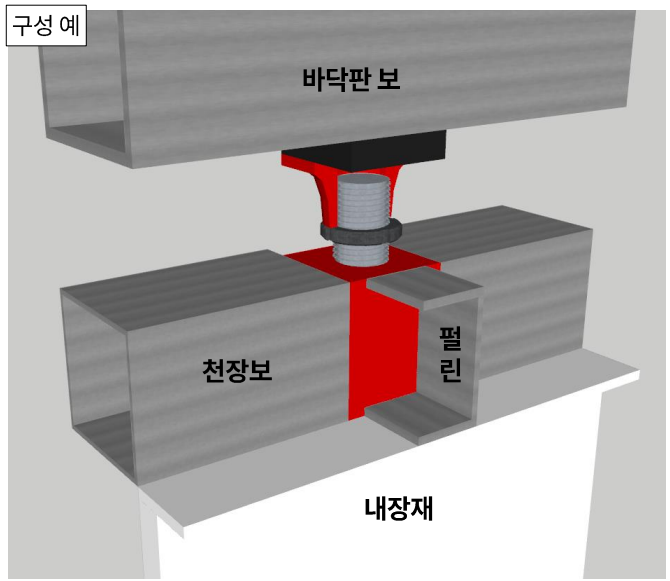
- F1, C1, C2, C3, D3 모듈 진동 실험
- Heel-drop 고유진동수 분석 및 감쇠비 분석
- 임팩트 해머 FRF 측정 실험
- 1, 2, 3인 보행진동 실험 – 비공진 및 공진 보행

© MIDAS IT Co,. Ltd

II. 진동제어 수행 프로젝트

삼성전자 Ex-Home

■ 샛기둥-상부 모듈 접합장치 1안

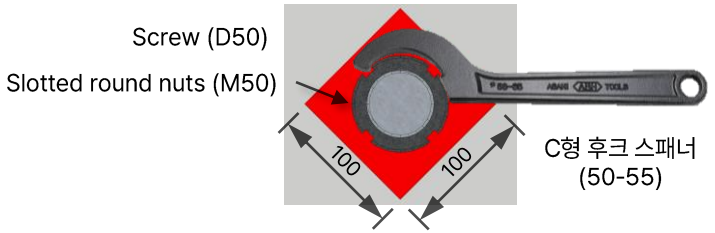


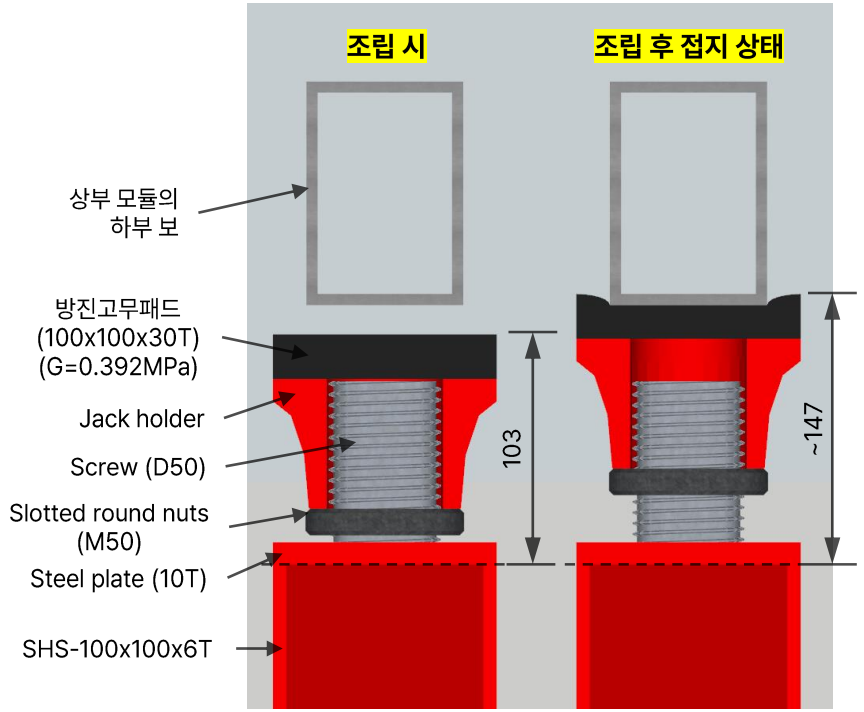
장점

- 구성이 간단하여 내구성이 좋음.
- 축강도가 큼.

단점

- 소형화, 모듈화 가능.
- 높낮이 조절을 위해 내장재에 opening(120x30 min)이 요구됨.



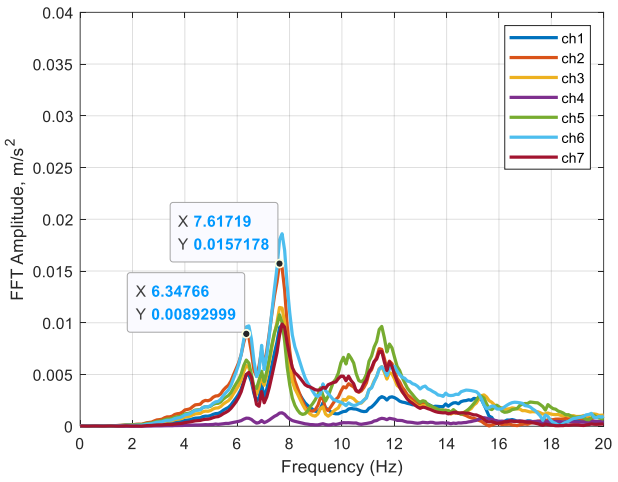


© MIDAS IT Co,. Ltd

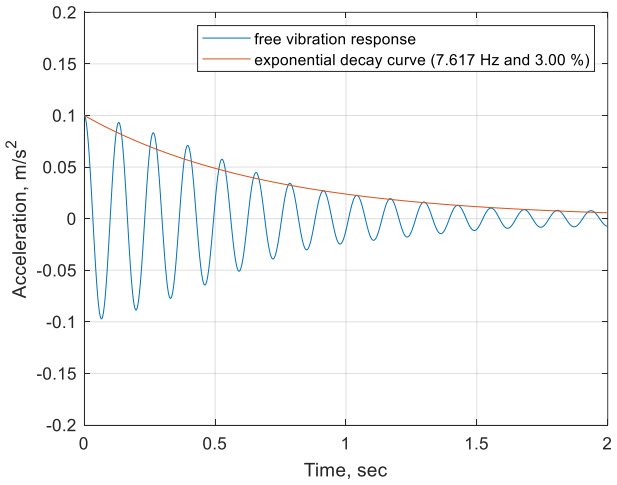
삼성전자 Ex-Home

■ Ex-Home 현장 조립 단계 : 보강 전

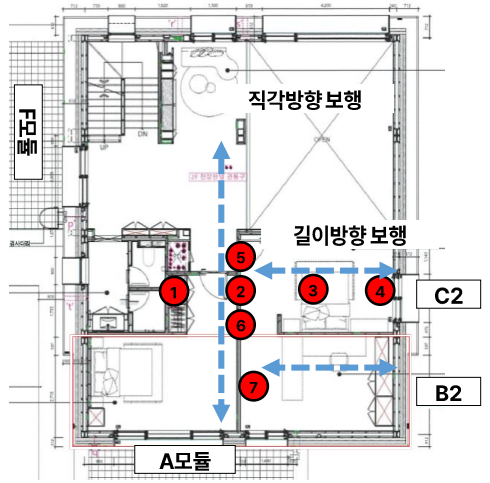
- 고유진동수 및 감쇠비
  - Heel drop test를 이용한 모달 파라메터 추정.
  - 슬래브 단차와 B2-C2-D2 모듈과 연결되면서 2개의 진동모드 형성.
  - 7.6 Hz에서 가장 큰 진동 응답 발생.



FFT spectrum – Heel drop test



Time history – Heel drop test



Modal parameters

구분	Heel drop	Half-power
Frequency [Hz]	6.3/7.6	7.6
Damping [%]	3.0	3.4

© MIDAS IT Co,. Ltd

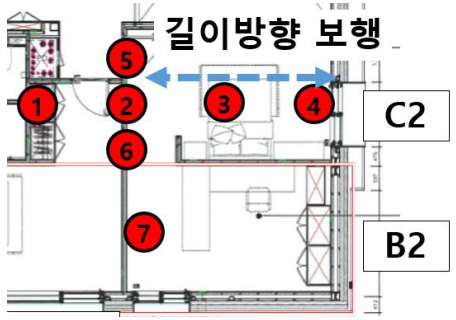
II. 진동제어 수행 프로젝트

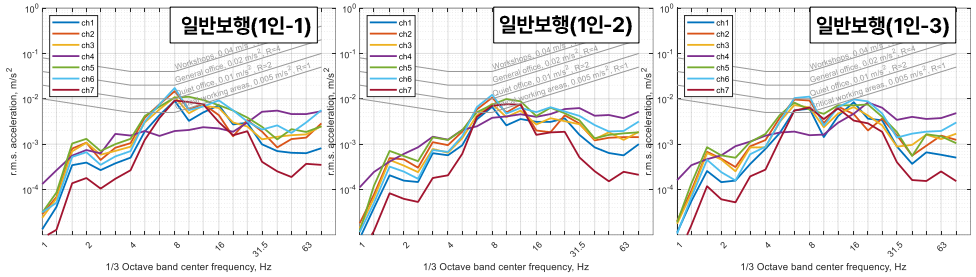
삼성전자 Ex-Home

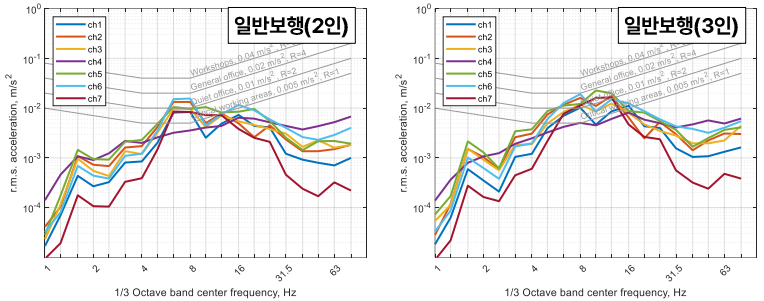
■ Ex-Home 현장 조립 단계 : 보강 전

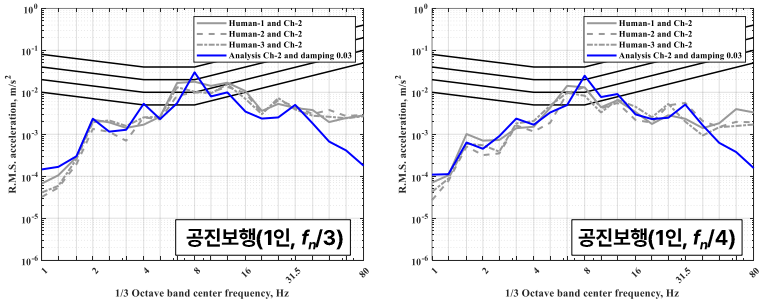
• C2모듈(f_n :6.3/7.6Hz) - 길이방향보행

평가항목 (Ch2, 기준가속도:1gal)				측정 가속도 [gal]	중심 주파수 [Hz]	결과
길이방향	일반보행 (비공진)	성인1인	1	1.47	8	불만족
			2	1.06	8	불만족
			3	0.96	8	만족
		성인2인		1.33	6.3	불만족
		성인3인		1.60	8	불만족
	공진보행 (f_n/3)	성인1인	1	1.78	8	불만족
			2	0.98	8	만족
			3	1.03	8	불만족
	공진보행 (f_n/4)	성인1인	1	1.42	6.3	불만족
			2	1.35	8	불만족
			3	0.97	6.3	만족









© MIDAS IT Co,. Ltd

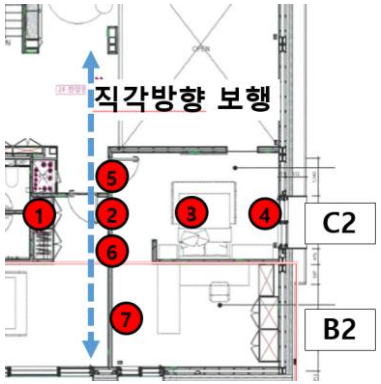
II. 진동제어 수행 프로젝트

삼성전자 Ex-Home

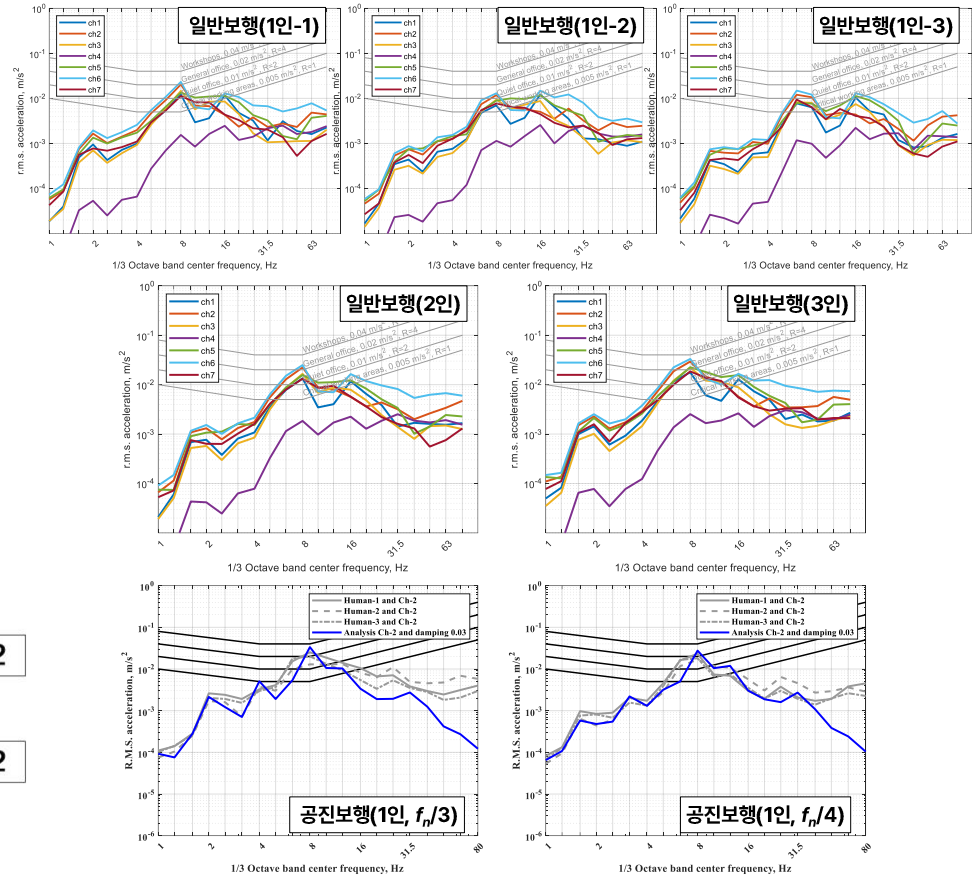
■ Ex-Home 현장 조립 단계 : 보강 전

• C2모듈(f_n :6.3/7.6Hz) - 직각방향보행

평가항목 (Ch2, 기준가속도:1gal)				측정 가속도 [gal]	중심 주파수 [Hz]	결과
직각방향	일반보행 (비공진)	성인1인	1	2.03	8	불만족
			2	1.18	8	불만족
			3	1.06	8	불만족
		성인2인		2.22	8	불만족
		성인3인		2.93	8	불만족
	공진보행 (f_n/3)	성인1인	1	2.52	8	불만족
			2	1.29	8	불만족
			3	2.00	8	불만족
	공진보행 (f_n/4)	성인1인	1	2.33	8	불만족
			2	1.67	8	불만족
			3	1.81	8	불만족



※ Ch 6 마감몰탈 영향으로 진동응답 크게 나타남



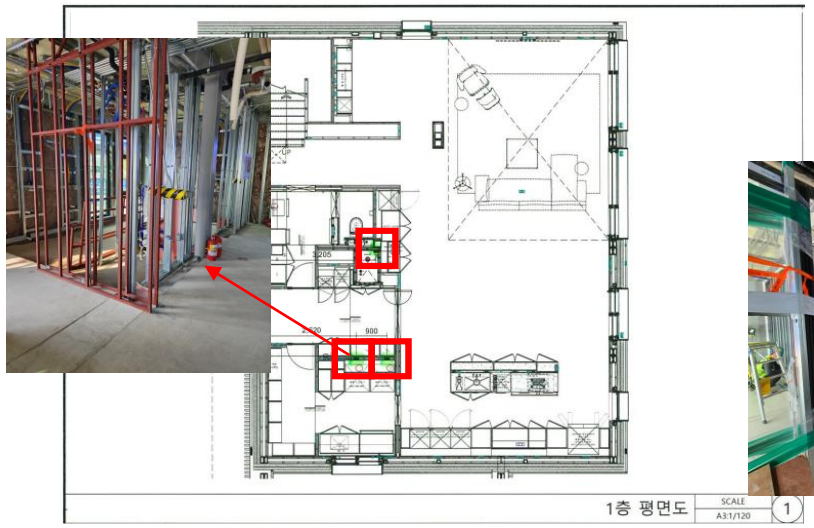
© MIDAS IT Co,. Ltd

II. 진동제어 수행 프로젝트

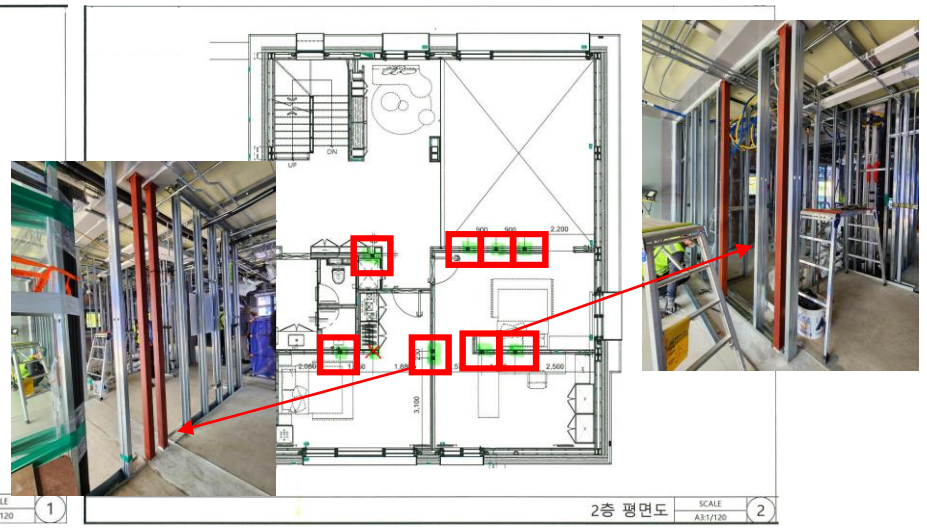
삼성전자 Ex-Home

■ Ex-Home 현장 조립 단계 : 보강 후

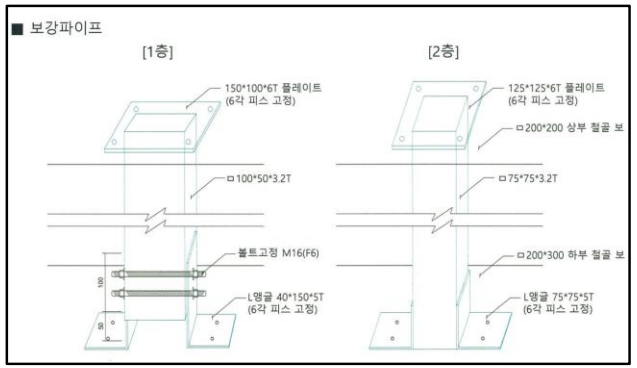
- 보강개요
  - C2 모듈의 진동성능이 주거수준을 만족하지 못하여 보강 수행
  - 1층 3개소, 2층 9개소의 샛기둥 추가 설치



1층 - 3개소



2층 - 9개소



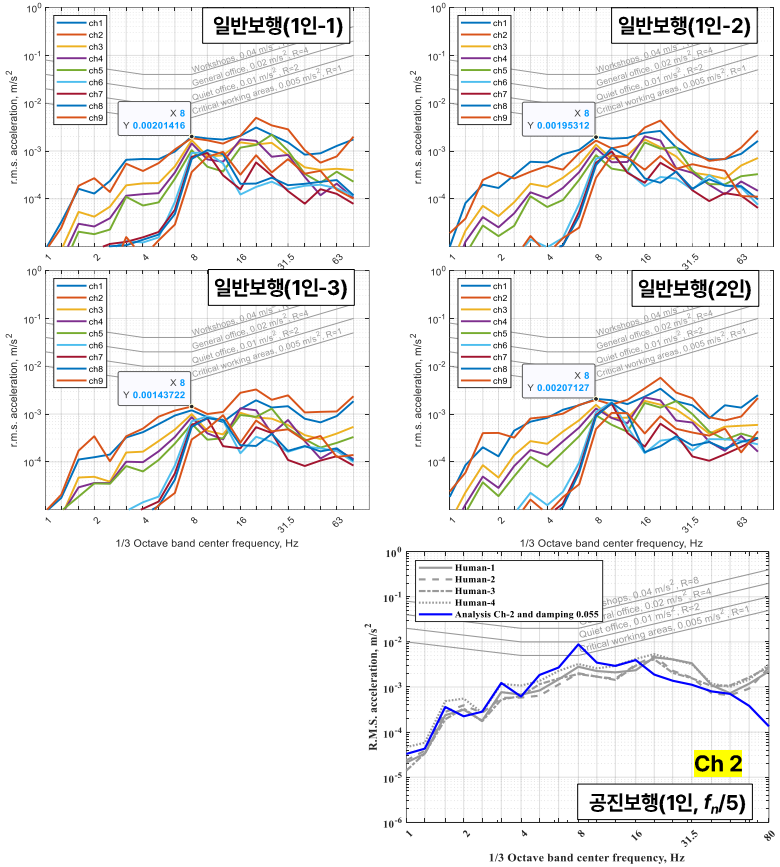
층별 샛기둥 상세

© MIDAS IT Co,. Ltd

삼성전자 Ex-Home

■ Ex-Home 현장 조립 단계 : 보강 후
- C2모듈(f_n :6.3/7.6Hz → 8.3Hz) - 길이방향보행

평가항목 (기준가속도:1gal)				측정가속도 [gal]			중심 주파수 [Hz]	결과
				보강전		보강후		
길이방향	일반보행 (비공진, Ch1)	성인1인	1	1.47		0.20	8.0	만족
			2	1.06		0.19	8.0	만족
			3 (Ch2)	0.96		0.14	8.0	만족
			평균	1.16		0.18	(약 15%로 감소)	
		성인2인		1.33		0.20	6.3	만족
	공진보행 (Ch2)	성인1인		f_n/3	f_n/4	f_n/5		
			1	1.78	1.42	0.28	8.0	만족
			2	0.98	1.35	0.2	8.0	만족
			3	1.03	0.97	0.19	8.0	만족
			4	-	-	0.32	8.0	만족



샛기둥 보강으로 인하여 크게 줄어,
가속도 기준을 모두 만족하게 됨.

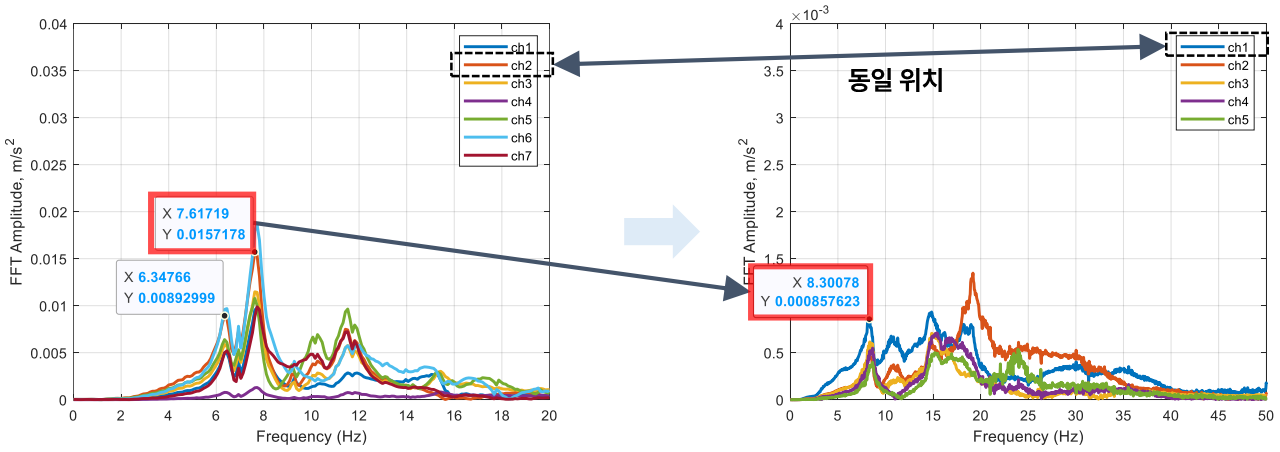
© MIDAS IT Co,. Ltd

II. 진동제어 수행 프로젝트

삼성전자 Ex-Home

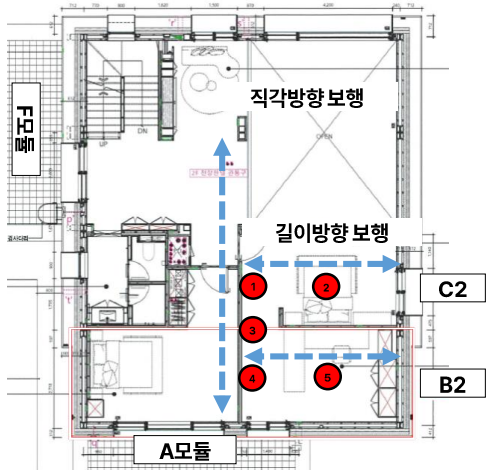
■ Ex-Home 현장 조립 단계 : 보강 후

- 고유진동수 및 감쇠비
  - Heel drop test를 이용한 모달 파라메터 추정
  - 보강에 따른 고유진동수 증가(6.3/7.6 → 8.3Hz) 및 가속도 크기 감소



진동 보강 전(6.3, 7.6Hz)

진동 보강 후(8.3Hz)



Modal parameters

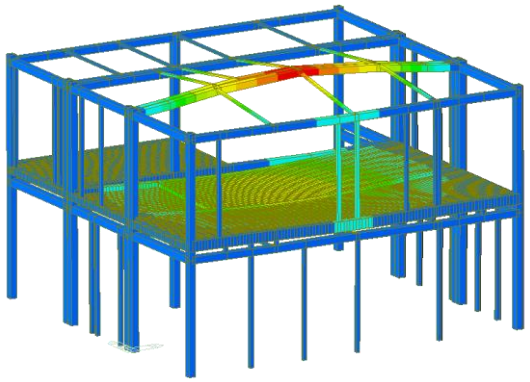
구분 (Heel drop)	보강 전	보강 후
Frequency [Hz]	6.3/7.6	8.3
Damping [%]	3.0	5.5

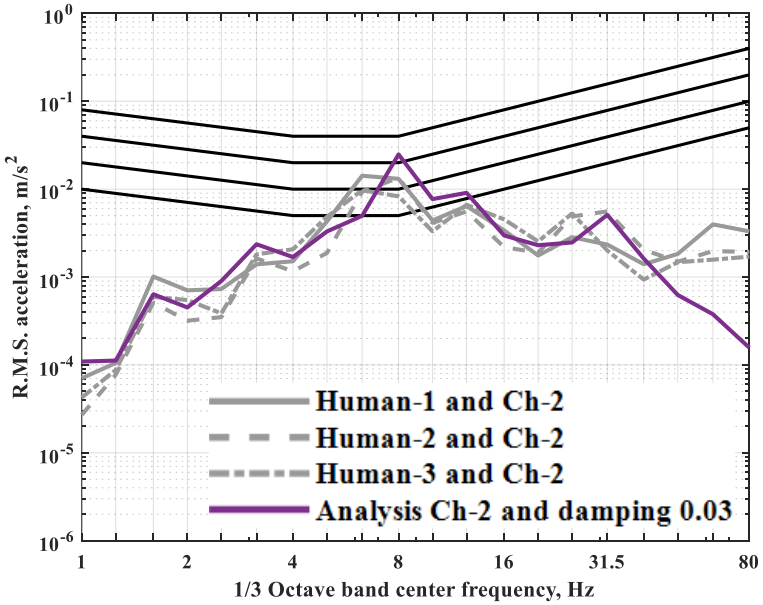
© MIDAS IT Co,. Ltd

삼성전자 Ex-Home

■ 인접 모듈 결합에 따른 진동성능 개선 효과

- 수평방향 모듈 접합
  - 실제 수평방향 모듈이 접합된 Ex-Home의 C 모듈을 예시로 하였음
  - 그래프 회색라인: 실제 측정 결과, 그래프 보라색라인: 접합 여부에 따른 해석결과





Ex-Home C 모듈 수평방향 접합 여부에 따른 고유진동수 변화

미 접합	접합
6.8 Hz	8.3 Hz

Ex-Home C 모듈 수평방향 접합 여부에 따른 질량참여율 변화

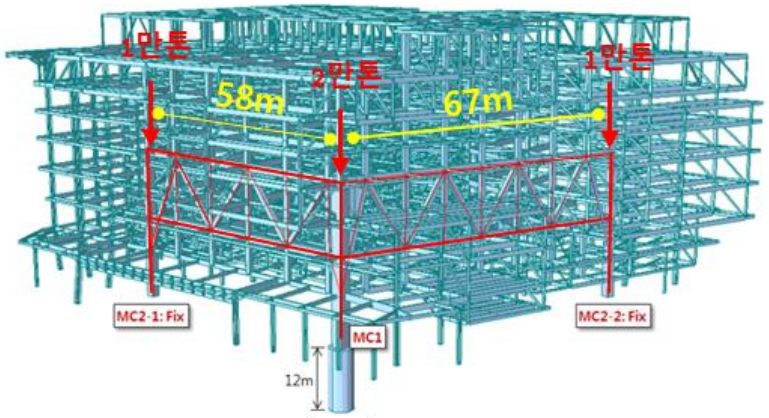
미 접합	접합
25.3%	32.8%

© MIDAS IT Co,. Ltd

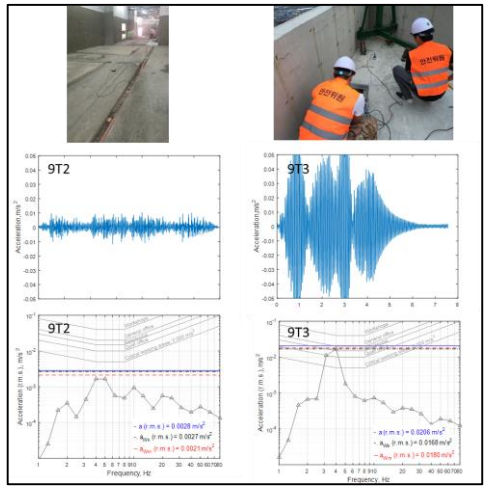
동대구 역사(지하철, 수족관, 테마파크) 진동 영향 검토 (2016)

- 용역 개요
  - 동대구 역사 서편 진동 영향 검토
  - 지하철 및 KTX 운행에 따른 진동 영향 검토
  - 수족관 진동 사용성 평가
  - 진동으로 인한 구조물 안전성 평가
- 결과 요약
  - KTX 및 지하철 운행에 따른 진동 영향 없음
  - 수족관 모든 부분 ISO 진동 권장 기준 만족
  - 테마파크 켄틸레버부 진동 허용 기준 초과

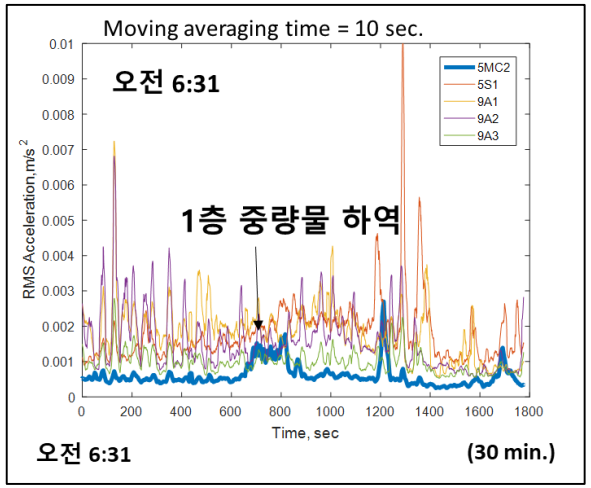
    → 조경 처리를 통해 관람객 접근 배제



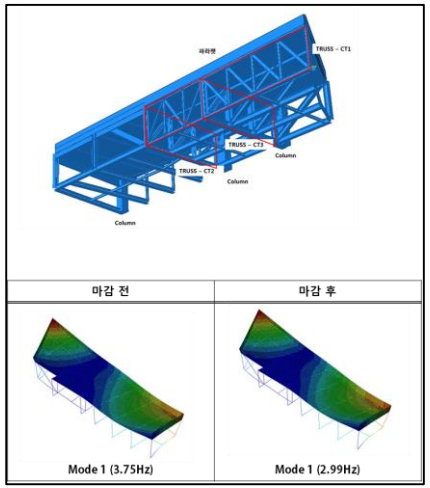
주요 부재 구조 안선성 평가



수족관 및 테마파크 진동 영향평가



KTX 등 외부 가진원에 진동 영향 평가



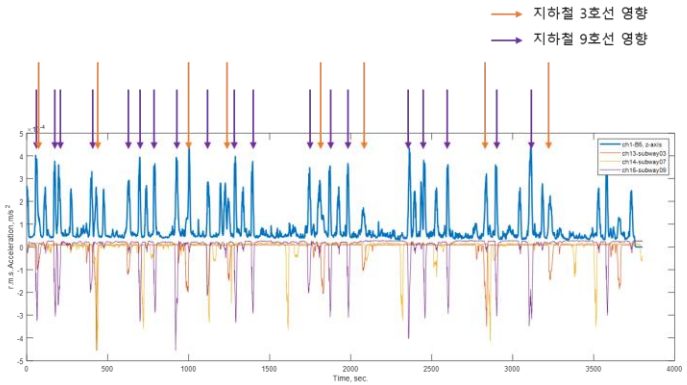
주요부재 구조안선성 평가

© MIDAS IT Co,. Ltd

신세계 반포단지(백화점, 호텔, 고속터미널) 지하철 진동 영향 평가 (2021)

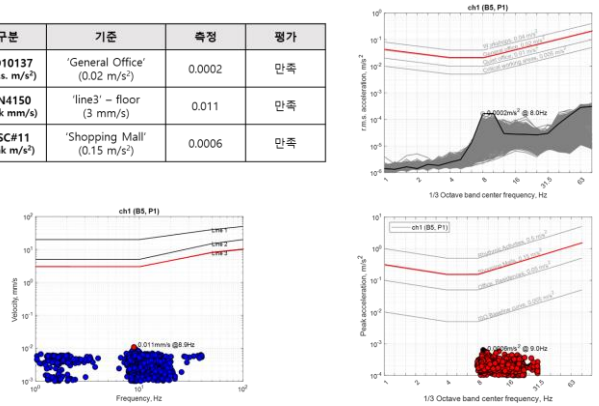
- 용역 개요
  - 반포단지 지하철 진동 영향 평가
- 결과 요약
  - 지하철 운행시 건물 진동 전달 영향 분석
  - 지하철 플랫폼 및 건축물 진동 상관성 분석
  - 건물 진동 발생 구역별 진동 모니터링 (100개소 이상)
  - ISO10137, DIN4150, AISC #11 등 국제 기준을 적용한 건축물 진동 사용성 및 안전성 평가

반포 단지 매장 진동 모니터링



지하철 진동 전달 영향 분석

구분	기준	측정	평가
ISO10137 (r.m.s. m/s²)	'General Office' (0.02 m/s²)	0.0002	만족
DIN4150 (Peak mm/s)	'line3' – floor (3 mm/s)	0.011	만족
AISC#11 (Peak m/s²)	'Shopping Mall' (0.15 m/s²)	0.0006	만족



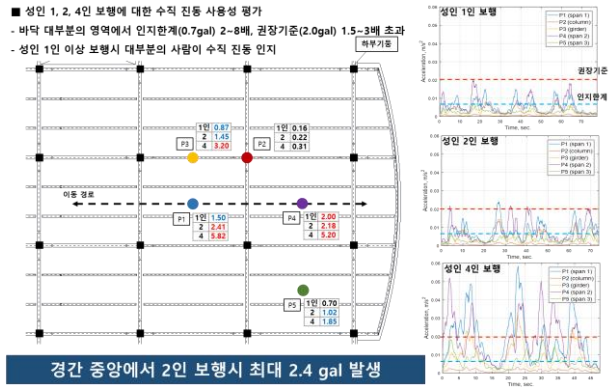
진동 안전성 및 사용성 평가

© MIDAS IT Co,. Ltd

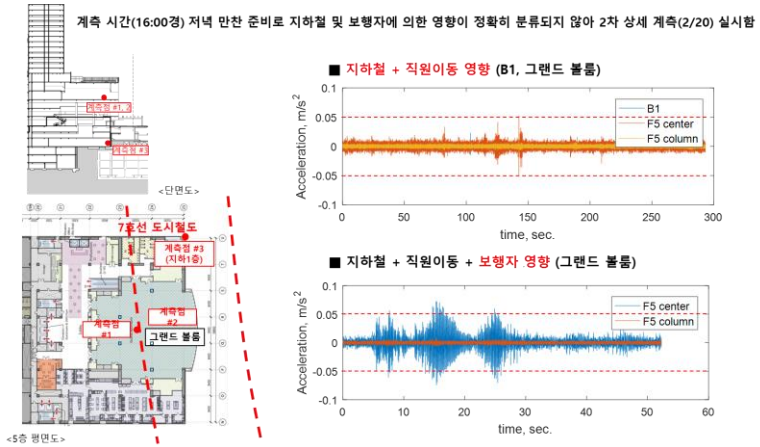
II. 진동제어 수행 프로젝트

메리어트 호텔 바닥 사용성 평가 및 보강 (2018)

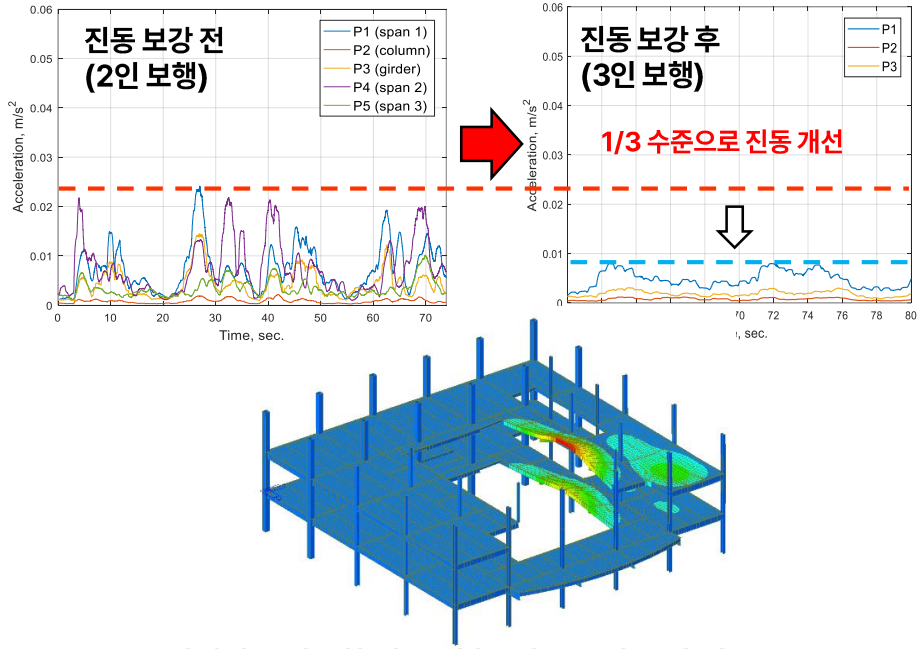
- 용역 개요
  - 센트럴시티 메리어트 호텔 진동원인 규명
  - 메리어트 호텔 리모델링 전/후 진동 안전성 및 사용성 평가
- 결과 요약
  - 호텔 하부 지하철운행에 따른 진동 영향 없음
  - 그랜드볼룸 바닥 구조 보강을 통한 진동 저감
  - 중층 진동 검토
  - 기타 진동 취약 부이 진동 검토 및 보강 설계
  - 진동 보강 후 50% 이상 진동 개선



수직 진동 사용성 평가



그랜드볼룸 진동원인 규명

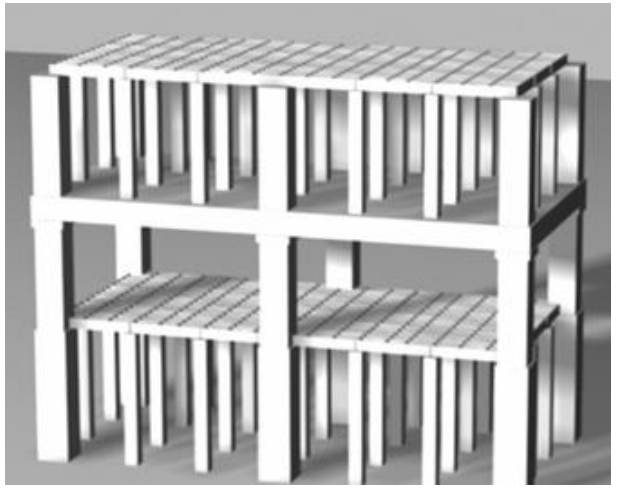


수치해석을 이용한 진동 예측/ 진동 보강 효과 검증

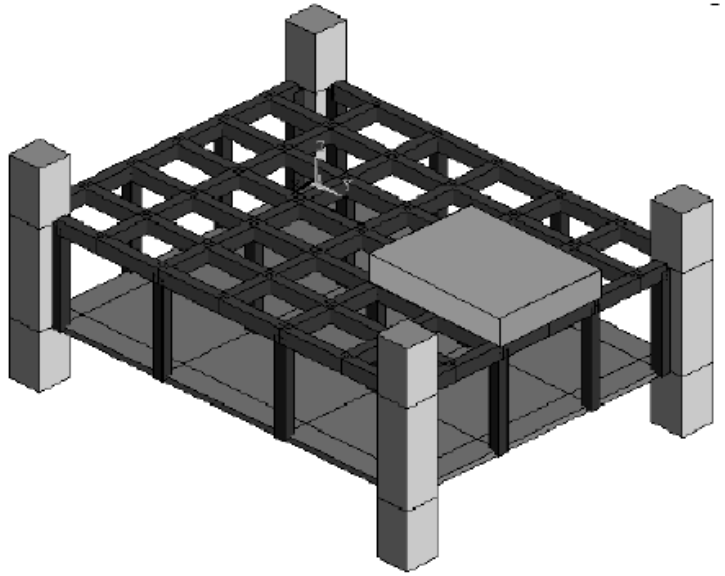
© MIDAS IT Co,. Ltd

반도체/Display 공장 개요

PC복합화 공법 시공현황



Unit 단위공장생산 부재 조립

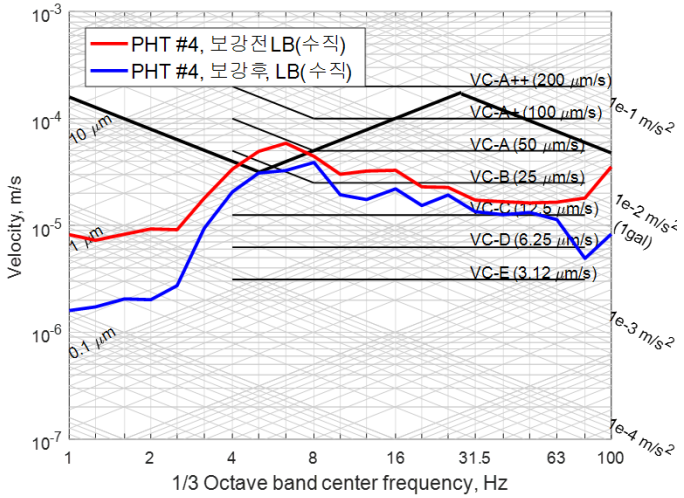


© MIDAS IT Co,. Ltd

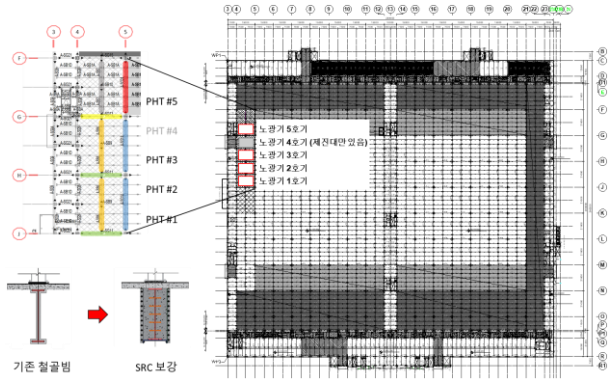
II. 진동제어 수행 프로젝트

파주 LG Display공장 노광존 진동 보강

- 용역 개요
  - 디스플레이 공장 노광기 설치 구역 진동 허용 기준 초과
  - 진동 허용기준 초과원인 조사 및 진동 보강안 제시
- 결과 요약
  - 디스플레이 공장 Main-Structure 강성 부족
  - 메인 구조 시스템 변경을 통해 진동 허용 기준만족
    (기존 철골 빔 → SRC 보강)

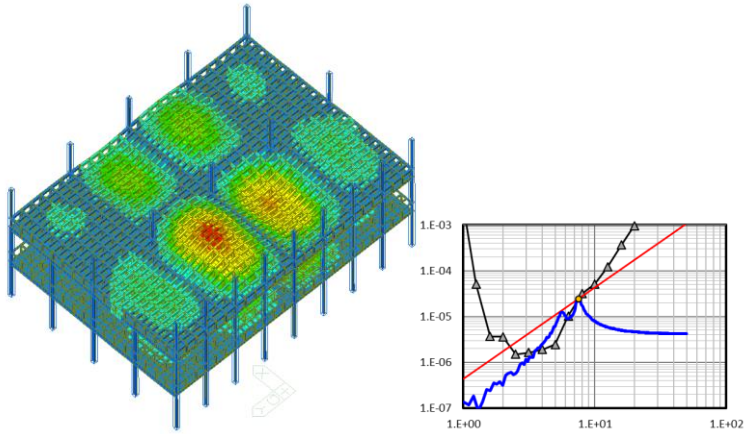


진동 보강 후 현장 검증
(최대 33% 진동 저감)



노광존 진동 보강 구역

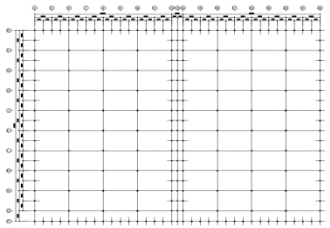
SRC 보강공사 (센코어테크)



수치해석을 이용한 진동 보강안 시뮬레이션

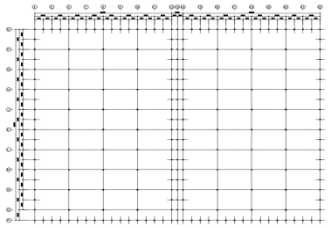
© MIDAS IT Co,. Ltd

Main Structure의 설계 (기존 설계사안)



노광존 변경

- 일반존 M/S 유지
- S/S만 보강



기존

RC보 : 400X700

RC기둥 : 400X400

SRC보 : BH-1600X460/700X35X60/40
CON'C -700X1780

I_{SRC} =8,366,588 cm^4

변경

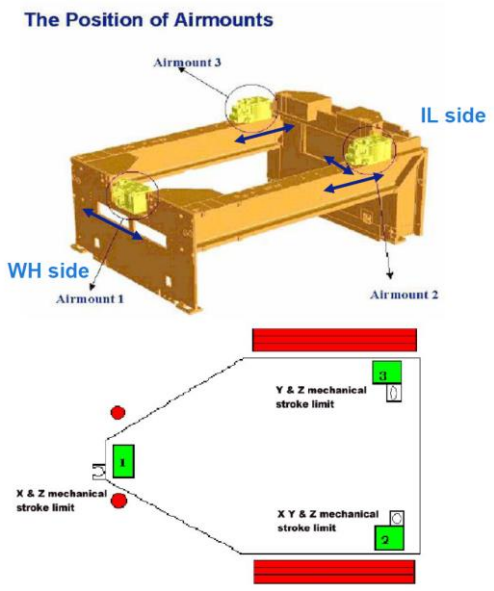
TSC보 : 900X450X6X9

CFT기둥 : 450X450X9

BH-1600X400X35X40

I_{BH} =3,655,200 cm^4

© MIDAS IT Co,. Ltd

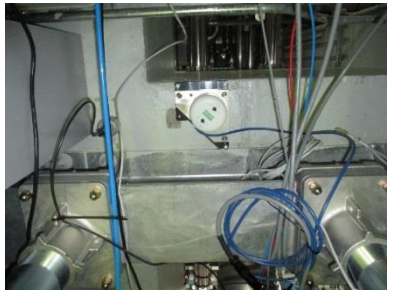


노광장비 기울어짐에 따른 Air mount force 분석

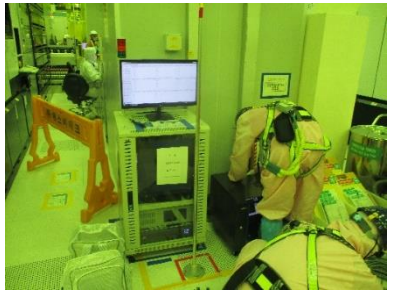
SK 반도체 공장 노광장비 Tilt 현상 분석 (2021)

- 노광장비 구조 분석을 통한 Air mount 수평력 발생 특성 분석
- 반도체 공장 구조체 변형 정밀 모니터링 (1년)
  - 노광장비 frame, 제진대, 기초 매트의 기울기 (1 μ radian) 모니터링
  - 기둥 변형률 (1 μ strain) 및 변위 (0.1 μ meter) 모니터링
  - 온도
  - 기초레벨 정기 계측 (0.2 mm/m 정밀 레벨 계측)
- 노광장비 기울어짐 현상 원인 규명 및 사용성 관리 방안 제시

기초매트 기울기 모니터링



격자보 기울기 모니터링



모니터링 시스템 설치

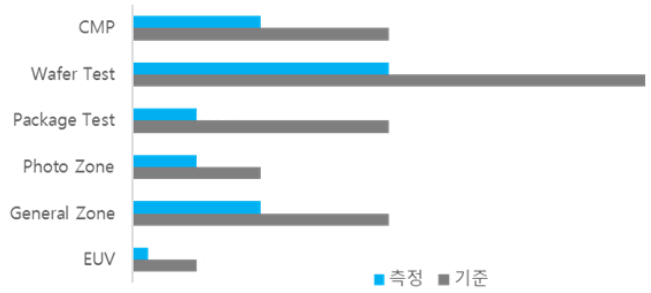
기둥 수축 변형 모니터링

© MIDAS IT Co,. Ltd

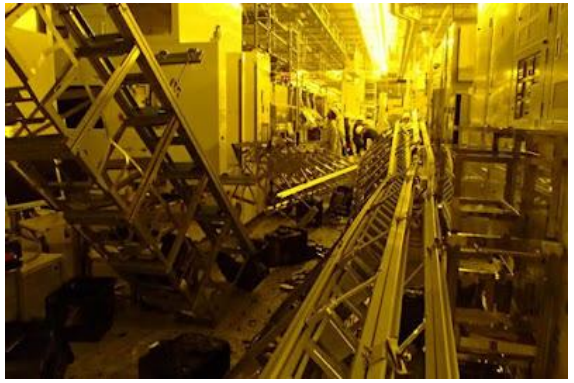
SK 반도체공장 진동 및 구조/비구조재 설계 제 3자검토 (2021)

- 재난분야 3자검토
  - 국내외 재난사례 분석
  - 합성 및 PC구조 시스템 설계안 적절성 검토
  - 내진설계 적절성 검토
  - 비구조재 내진설계 적절성 검토
  - 내풍설계 적절성 검토
  - 지진, 폭설, 폭우 등 극한 재난에 대한 안전성 검토
- 진동분야 3자검토
  - 다양한 생산존에 대한 미진동 설계 검토
  - 준공 후 진동 적합성 평가
  - 진동원 영향성 평가

하이닉스 M16 Project 시공사진



설계 기준대비 우수한 진동 성능 확인



해외 반도체 공장 지진 피해 분석
(비구조요소 설계 필요성 확인)

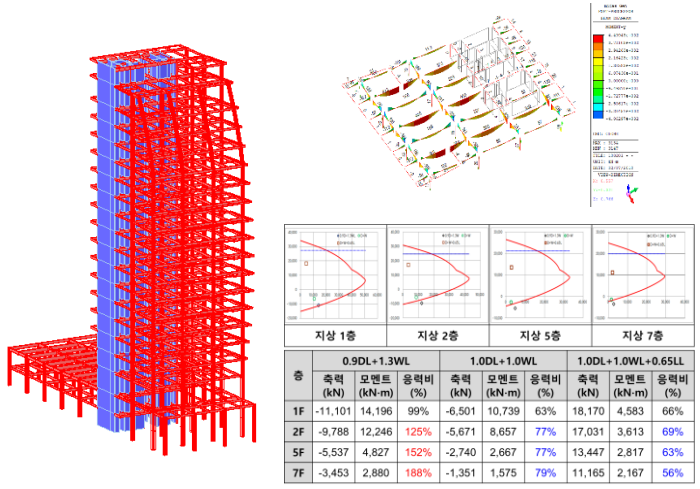
© MIDAS IT Co,. Ltd

여수항만공사 풍진동 안전성 평가 (2020)

- 용역 개요
  - 여수항만공사 월드마린센터 풍진동 안전성 평가
- 결과 요약
  - 풍동실험을 통한 설계 풍하중 산정
  - 현장 진동 계측을 통한 모달파라메터 추출
  - 수치해석 모델 구축
  - 수평진동 허용기준 초과
  - 일부 코어벽체 설계 풍하중조건에서 N.G. 발생
  - 일부 벽체 파괴 후 하중 재분배 조건에서 안전성 문제 없음
  - 진동 제어를 통한 유효감쇠비 증가 → 풍하중 저감

풍동 실험 전경

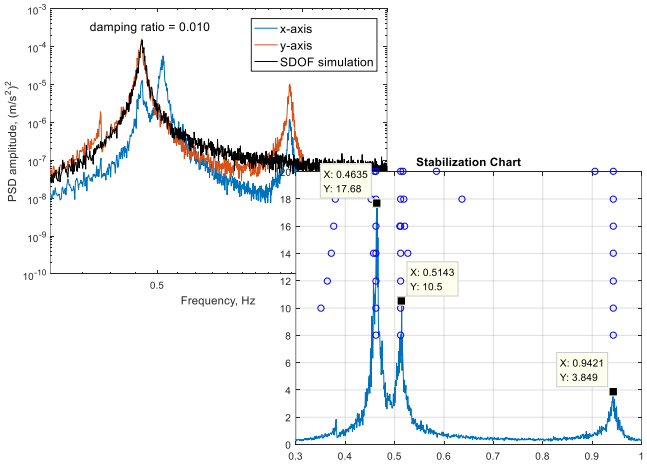
건 물 명	월드마린센터
위 치	전라남도 광양시 황길동 1390번지
준공년월	2007. 05.
대지면적	20,748 m²
연 면 적	18,244 m²
건축면적	2,453 m²
규 모	지하1층 ~ 지상 19층
구 조	철골철근콘크리트조, 철근콘크리트조
건물용도	항만지원시설(업무용시설)



지상 1층 / 지상 2층 / 지상 5층 / 지상 7층

층	0.9DL+1.3WL			1.0DL+1.0WL			1.0DL+1.0WL+0.65LL		
	축력 (kN)	모멘트 (kN-m)	응력비 (%)	축력 (kN)	모멘트 (kN-m)	응력비 (%)	축력 (kN)	모멘트 (kN-m)	응력비 (%)
1F	-11,101	14,196	99%	-6,501	10,739	63%	18,170	4,583	66%
2F	-9,788	12,246	125%	-5,671	8,657	77%	17,031	3,613	69%
5F	-5,537	4,827	152%	-2,740	2,667	77%	13,447	2,817	63%
7F	-3,453	2,880	188%	-1,351	1,575	79%	11,165	2,167	56%

수치해석을 이용한 풍하중 안전성 평가



현장 진동 계측을 통한 시스템 식별

© MIDAS IT Co,. Ltd