

MIDAS SQUARE 공학 기술강연

# 테크노마트 건물 이상진동 현상 원인 규명 및 대책

정 란 | 단국대학교 건축공학과 석좌교수

# CONTENTS

---

## 01 사건 및 조사 개요

- 건축물 개요 - 사건 개요 - 추정 진동원

---

## 02 정밀안전진단

- 현장 안전진단 조사 - 해석모델을 통한 안전성 평가

---

## 03 진동 원인 규명을 위한 현장계측 및 분석

- 진동원 규명 - 공개시연 - 설문조사 결과 - 태풍시 풍진동 계측  
- 결과분석 및 진동모드 확인 - 풍직각방향 가속도 평가

---

## 04 진동원인의 이론적 해석

- 3차원 구조해석모델 구축 - 건물 고유진동모드 파악  
- 추정 가진원 하중 생성 - 시간이력해석을 통한 진동원 규명

---

## 05 결론 및 향후 대책

- 해외사례 - 연구내용 종합 결론 - 진동방지대책

---

# 1. 사건 및 조사 개요

- 건축물 개요
- 사건개요
- 추정 진동원

# 테크노마트 건축물 개요

1. 건물명 : 테크노마트21
2. 건물개요

구 분	내 용
대 지 면 적	25,260.38m <sup>2</sup>
연 면 적	259,730.85m <sup>2</sup> (사무동 76,398.84m <sup>2</sup> , 판매동 183,332.01m <sup>2</sup> )
규 모	지하 6층, <b>지상 39층</b> , 옥탑 4층 (판매동 지상 12층)
구 조 형 식	<b>철골구조</b>
주 용 도	업무시설, 판매시설, 공연시설, 운동시설
준 공 년 도	1998년 8월 18일 (준공 후, <b>약 13년 경과</b> )
관 리 주 체	프라임산업 주식회사

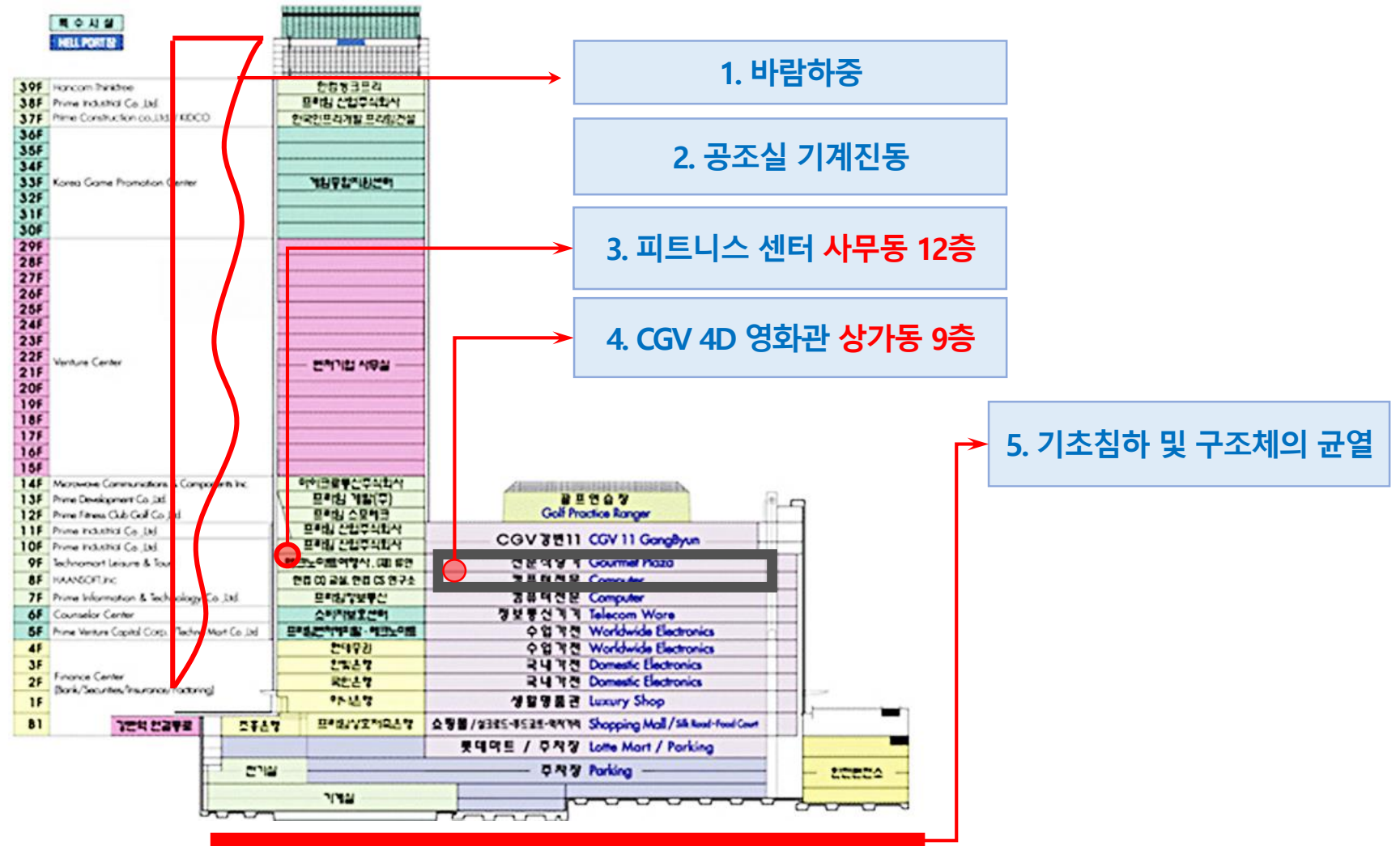
# 사건 개요



사건 발생 개요 (출처: 연합뉴스)

- 2011년 7월 5일
  - 오전 10시 10분경 10~15분간 지속 진동 발생, 119 신고접수
  - 오후 2시 건물 입주자에 대한 강제 퇴거 조치 (3일간)
  - 오후 9시 긴급 안전진단 철야 실시 (한국시설안전공단)
  - 긴급 전문가 회의 (1차)
- 2011년 7월 6일
  - 긴급 전문가 회의 (2차): 집단 리듬 운동에 의한 공진 현상으로 잠정 결론 후, 퇴거 조치 해제 결정 (12층 피트니스 센터 및 CGV 4D 상영관 제외)
- 2011년 7월 7일
  - 오전 9시 퇴거 조치 해제
- 2011년 7월 15일 계측 결과에 따른 4D 상영관 금지 해제
- 2011년 7월 19일 오후 3시 피트니스 센터 집단 리듬 운동 공개 시연 피트니스 센터 집단 리듬 운동실을 제외한 영업 재개 허가
- 2011년 8월 3일
  - 천정재 탈락
  - 조사 결과 천정 내부 정기 점검 중 석고 보드를 밟고 다닌 흔적 발견
- 2011년 8월 11일
  - 오전 11시경 집단 리듬 운동으로 2차 진동 발생 (1~2분간), 119 신고 접수
  - 오전 12시경 12층 G.X 룸 (집단 리듬 운동실) 폐쇄

# 추정 진동원



# 조사 연구진 구성

■ 조사 책임자 : 정 란 (단국대학교 건축공학과 교수)

■ 조사진

- 진동원인 규명 (대한건축학회) : 이동근(성균관대)

박홍근(서울대), 황재승(전남대), 김기철(서일대),  
이경구(단국대), 박태원(단국대), 우성식(단국대)

- 정밀안전진단 ((주) 센구조연구소) : 김정연(소장)

이원록(소장), 이승대(과장)

- 계측 및 실험결과 분석 ((주) 티이솔루션) : 김윤석(대표이사)

주석준(이사), 이성경(부장),  
황재승(전남대), 이상현(단국대)

# 조사 및 연구내용

## ■ 정밀안전진단

- 기초, 수평도, 접합부, 균열, 부재치수 등 시특법에서 정한 모든 정밀안전진단 항목 조사
- 구조해석 모델 수립 및 구조안전성 검토
- 별도 보고서 작성

## ■ 진동 실험

- 진동원 파악을 위한 계측 (2011.7.14-7.19 피트니스 센터, CGV 4D)
- 태풍에 따른 풍진동 계측 (2011.8.8 제9호 태풍 무이파)
- 풍직각방향 가속도 평가를 통한 안정성 검토
- 계측결과 분석을 통한 진동모드 확인

## ■ 진동 해석

- 구조도면에 기초한 해석 모델 수립
- 해석모델을 사용한 진동모드 파악
- 추정 가진원 하중생성 및 시간이력 해석



## 2. 정밀안전진단

- 현장 안전진단 조사
- 해석모델을 통한 안전성 평가

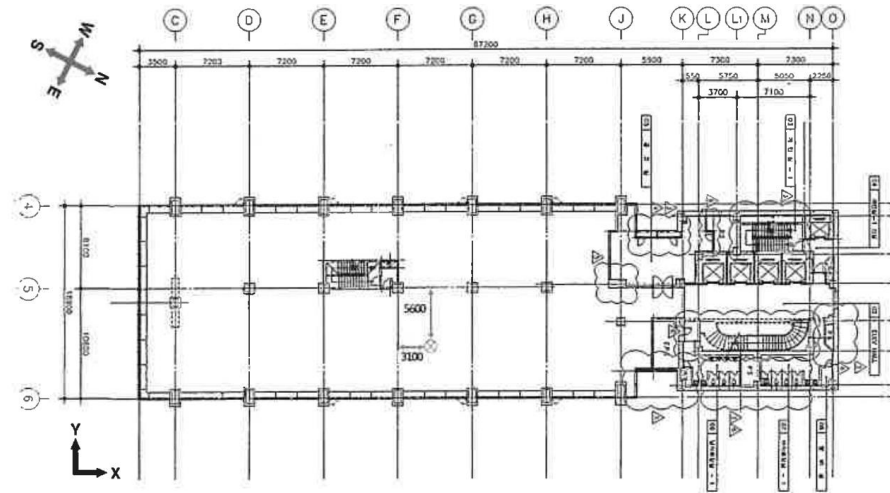
# 정밀안전진단

- 수행기관 : 센구조 연구소
- 진단기간 : 2011년 7월 15일 ~ 9월 6일 (54일간)
- 점검분야 : 한국시설안전공단 건축물 세부 지침  
(시설물의 안전관리에 관한 특별법)에 따른  
정밀진단 수행

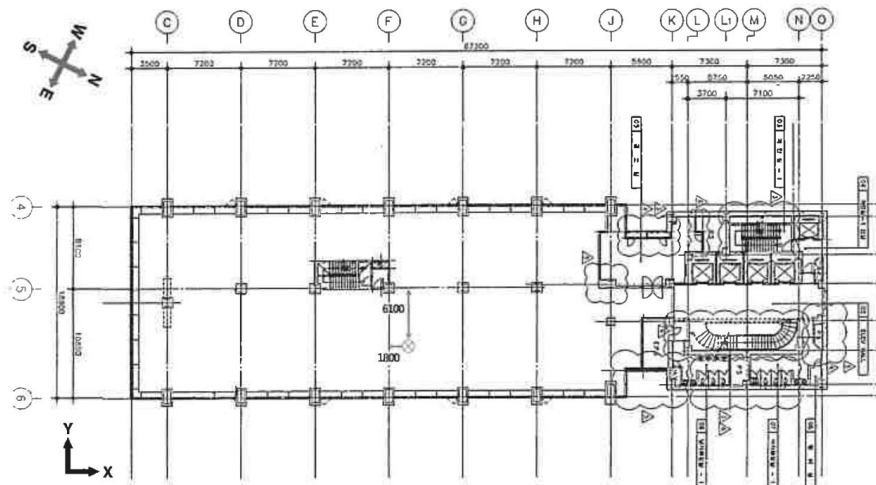
## ■ 정밀안전진단 업무 흐름도



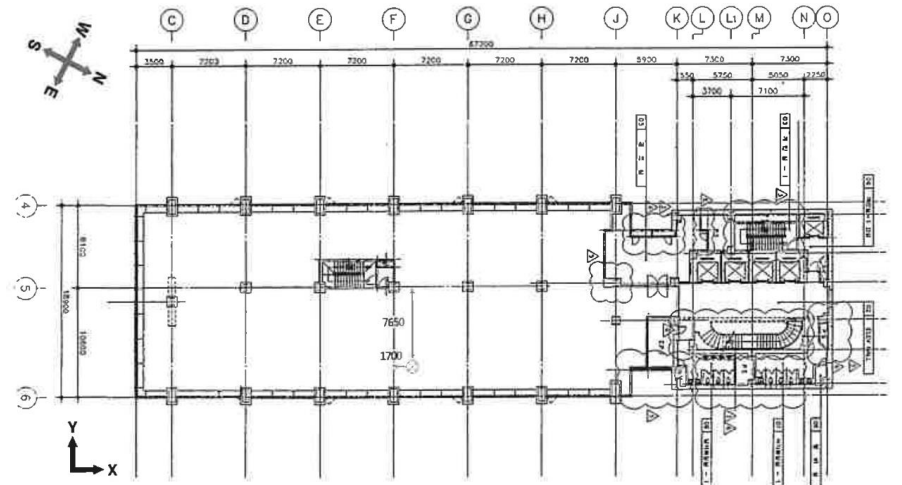
# 사무동 평면도



34층 (1~5회차 계층 위치)

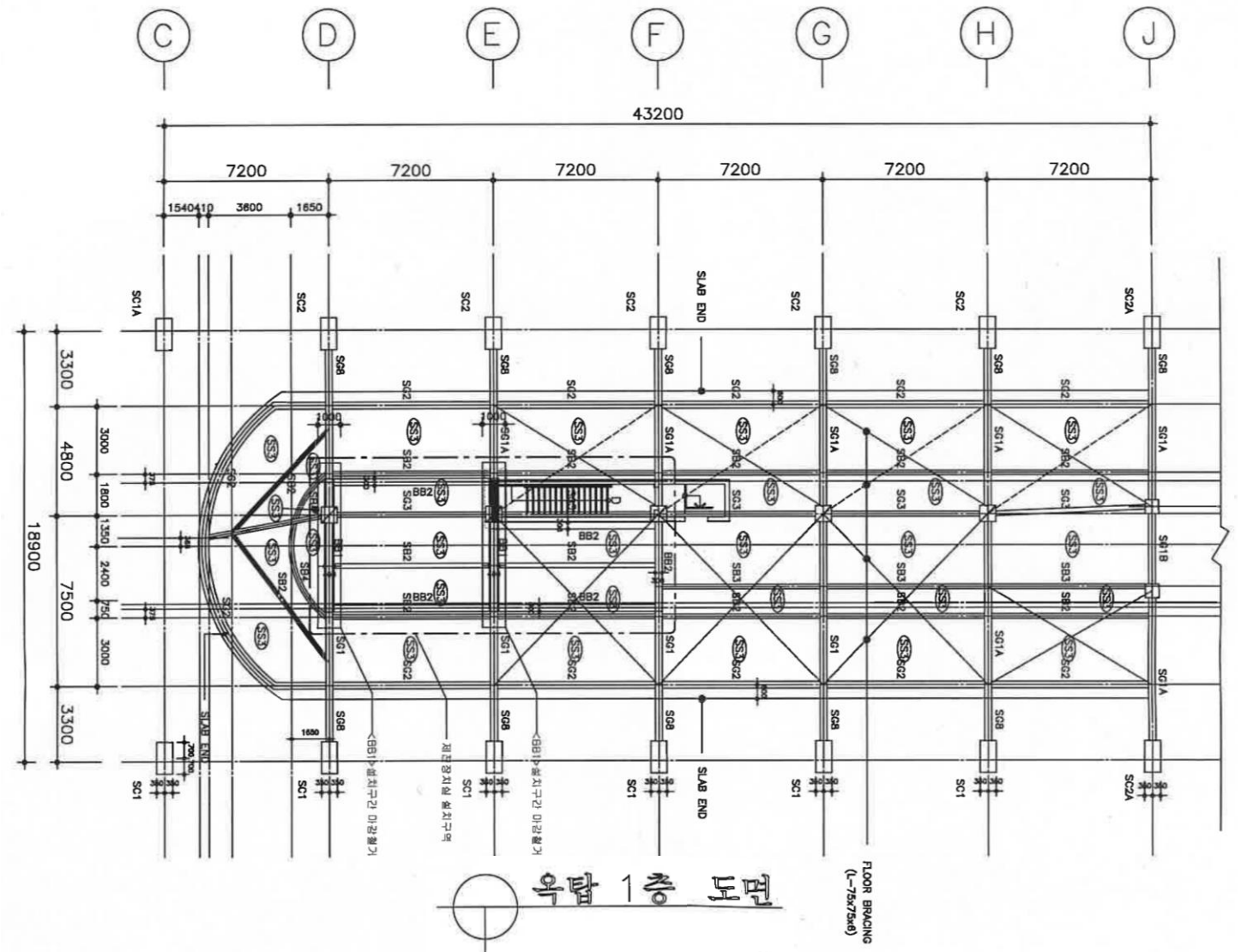


26층 (1~5회차 계층 위치)



14층 (1~5회차 계층 위치)

# 사무동 옥탑층



# 사무동 주기동 SC1~SC6

표 7.31 기둥 검토 결과 - 사무동  
SWS50( $F_y=3,300\text{kgf/cm}^2$ ) : 50H, 50□로표시

부재	단면크기 (mm)	P <sub>u</sub> (kN)		응력비	판정
		M <sub>ux</sub> (kN.m)	M <sub>uy</sub> (kN.m)		
SC1, SC2 (25F~38F)	50□ 1400×700×30×40	6560.5		0.28	O.K.
		331.1	79.9		
SC1, SC2 (19F~24F)	50□ 1400×700×30×50	7948.4		0.36	O.K.
		589.8	217.4		
SC1, SC2 (10F~18F)	50□ 1400×700×30×60	11484.0		0.47	O.K.
		862.9	252.3		
SC1, SC2 (4F~9F)	50□ 1400×700×30×70	14899.0		0.48	O.K.
		321.5	81.76		
SC1, SC2 (2F~3F)	50□ 1400×700×30×80	17306.0		0.66	O.K.
		2010.6	320.6		
SC1, SC2 (B6F~1F)	50□ 1400×700×30×80	17001.0		0.722	O.K.
		2495.7	625.0		
SC3 (31F~38F)	50H 700×700×20×30	1883.5		0.40	O.K.
		152.7	195.8		
SC3 (25F~30F)	50H 700×700×30×40	3221.8		0.43	O.K.
		489.6	133.5		
SC3 (19F~24F)	50H 700×700×40×50	4704.0		0.49	O.K.
		585.9	150.4		
SC3 (13F~18F)	50□ 700×700×40×50	6467.0		0.46	O.K.
		586.2	239.9		
SC3 (7F~12F)	50□ 700×700×60×60	13213.0		0.47	O.K.
		141.3	4.9		
SC3 (4F~6F)	50□ 700×700×70×70	16473.0		0.51	O.K.
		166.5	9.8		
SC3 (B6F~1F)	50□ 700×700×80×80	21347.0		0.60	O.K.
		80.3	71.4		
SC6 (31F~38F)	50H 600×450×20×30	1445.4		0.61	O.K.
		8.6	176.9		
SC6 (25F~30F)	50H 600×450×30×40	2051.1		0.57	O.K.
		8.2	206.6		
SC6 (19F~24F)	50H 600×450×30×50	3108.9		0.61	O.K.
		7.6	209.8		
SC6 (13F~18F)	50H 600×450×40×50	5389.0		0.70	O.K.
		66.16	135.3		
SC6 (7F~12F)	50□ 600×450×40×70	5824.5		0.43	O.K.
		65.9	229.7		
SC6 (2F~6F)	50□ 600×450×40×80	9593.4		0.53	O.K.
		115.2	27.5		
SC6 (B6F~1F)	50□ 600×450×50×80	9521.3		0.65	O.K.
		363.4	299.5		

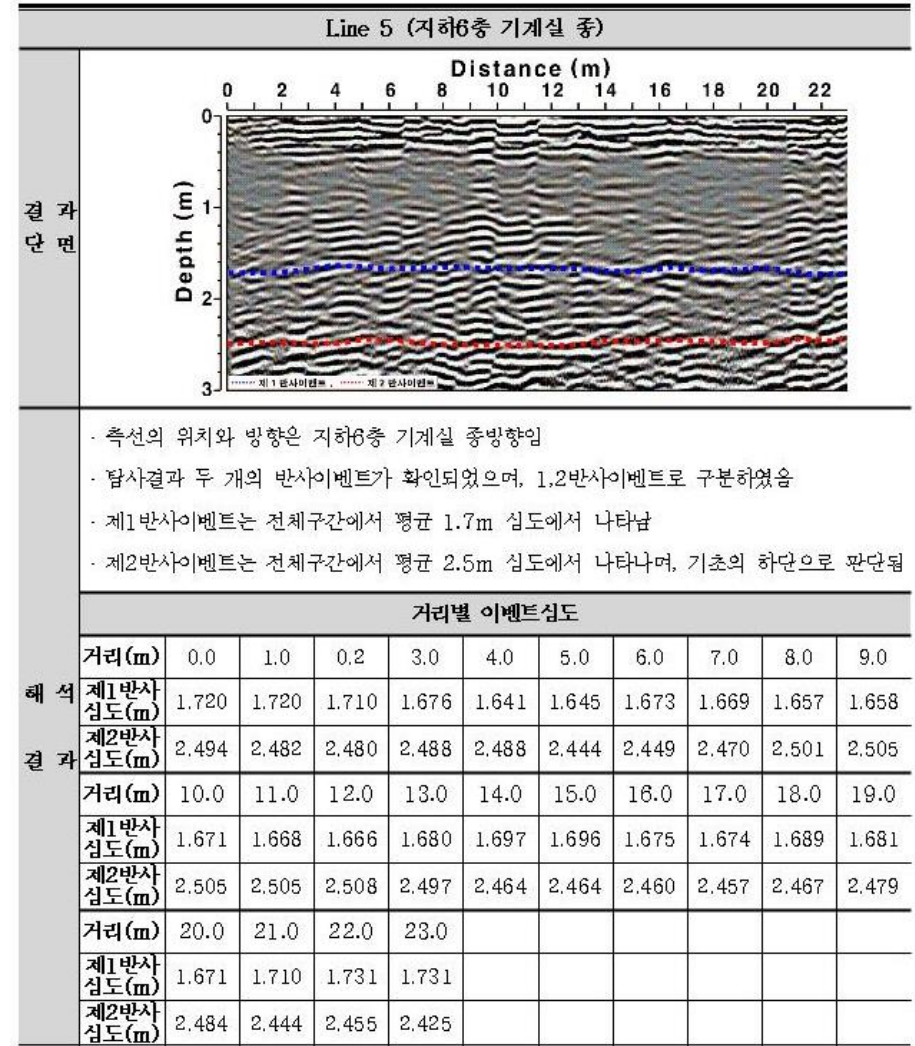
\* 현장조사 결과 및 제공된 구조 도면을 참고함.

# 정밀안전진단

## ■ 기초상태조사: 도면과 일치

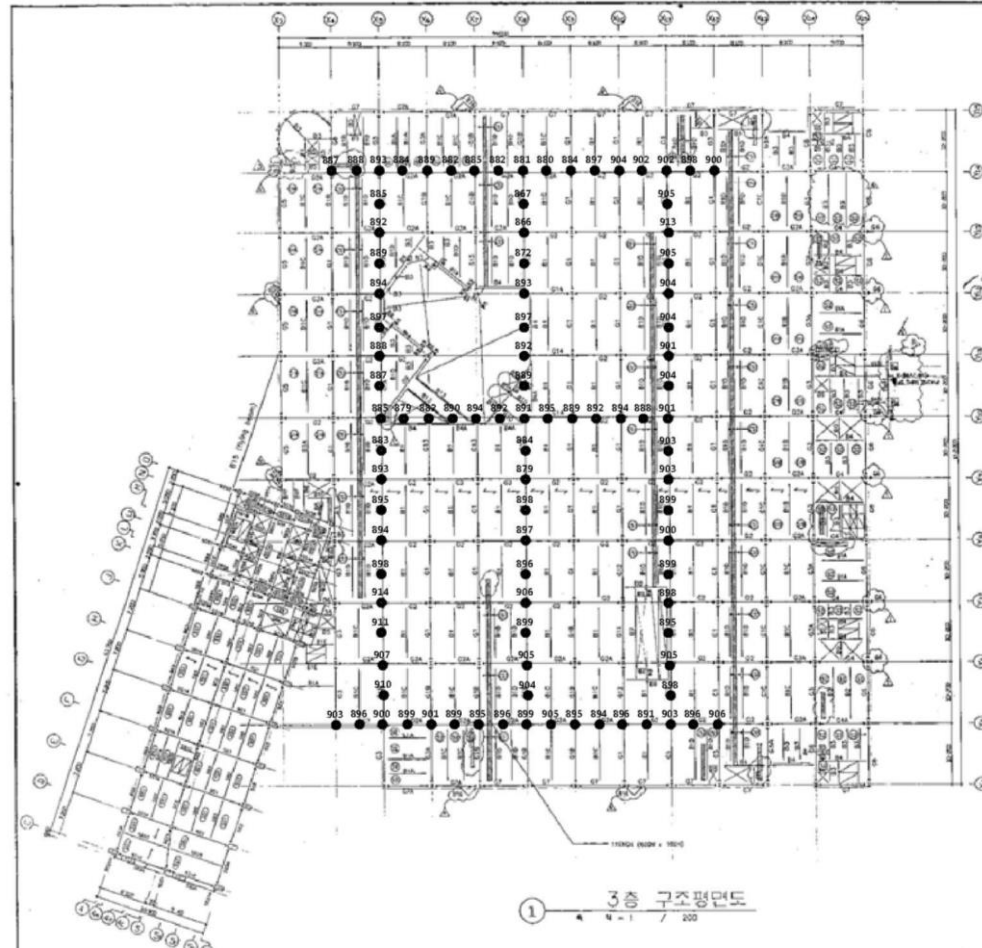


- G.P.R 탐사를 실시하여 기초 최하중 슬래브 두께 파악
- 6개소 측정하여 기초조사보고서 별도 첨부
- 기초 및 내수압판 두께 도면과 일치함
- 기초침하 및 변형 등 특이사항 없음



# 정밀안전진단

## ■ 건물 수평도 조사: 제한값 만족



- 보 및 슬래브의 수평도 측정
- 조사층 : 지하 4층, 지하2층, 지상3층  
지상15층, 지상27층, 지상30층,  
지상34층, 지상38층

# 정밀안전진단

## ■ 골조 접합부 검사(볼트): 도면과 일치



- 볼트접합부 : 36-M22(실측)  
36-M22(도면)
- Plate size : 320X685x15t(실측)  
315X680x15t(도면)

- 볼트접합부 볼트개수 및 접합 plate 실측결과  
도면과 일치함.
- TS볼트 pin tail의 정상적인 시공 상태 확인
- 토크렌치를 이용하여 볼트 축력 확인  
→ 표준볼트장력 이상임을 확인

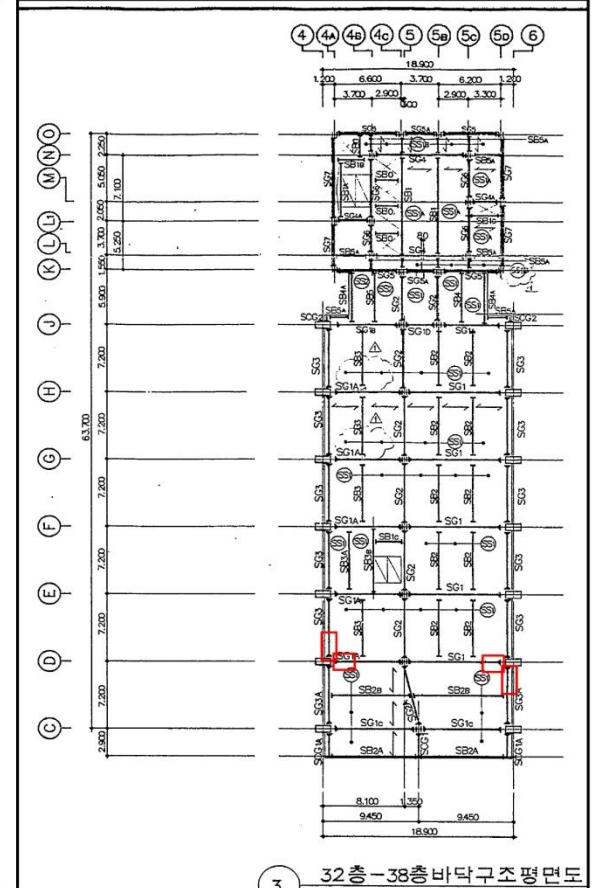
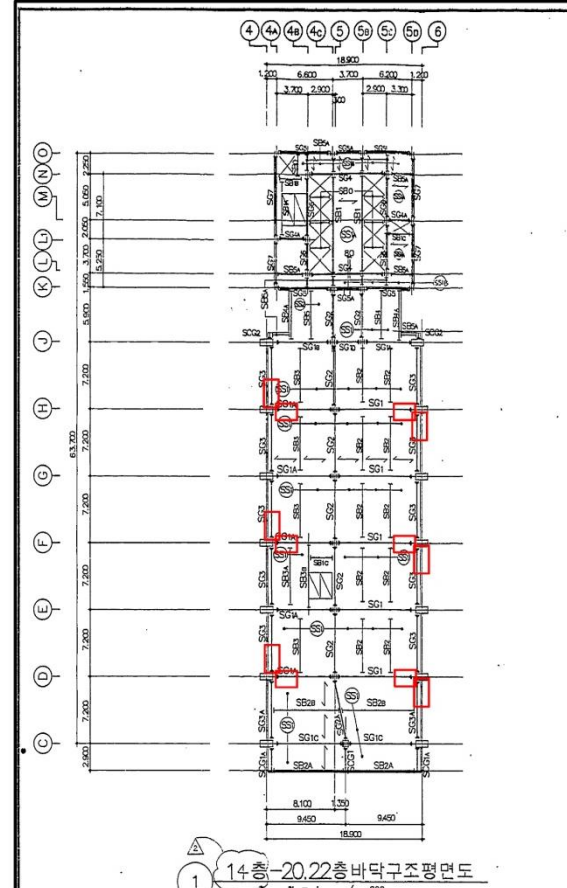
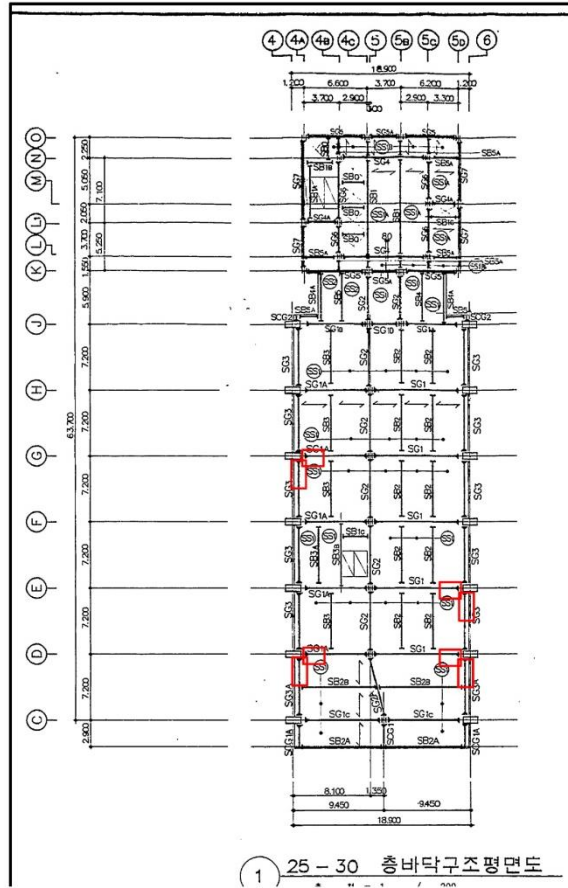


# 정밀안전진단

## ■ 골조 접합부 검사 (용접)

※ 지상층 48개소 용접부 검사

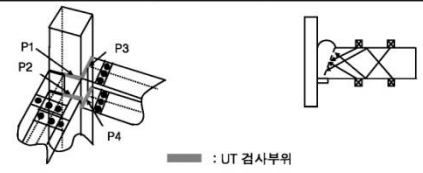
<용접부 조사 위치도>



# 정밀안전진단

## ● 골조 접합부 검사(용접) : 결함 없음

REPORT OF ULTRASONIC EXAMINATION  
초음파탐상검사보고서

<b>HK비파괴검사주식회사</b> KOREA PLANT NONDESTRUCTIVE TESTING 420-824 경기도 부천시 원미구 심곡1동 368-17 4F Tel : 032) 625-1346 Fax : 032) 625-1347		Report No. HK(GI)-UT-OND-01108-001 보고서번호 Date of Report 2011년 8월 11일 보고일자	
Owner/Customer 주문주/고객 有限구조연구소	Project Name/No. 공사명/공사번호 강변테크노마트 정밀안전진단(철골공사)	Dwg. No. 도면번호 S-029,S-30	Rev. 개정 0
Item Name/No. 제품명/제품번호 BRACKET-15TH,27TH,38TH	Surface Condition 표면상태 <input type="checkbox"/> As Casted주조 <input type="checkbox"/> As Machined가공 <input checked="" type="checkbox"/> As Welded용접 <input type="checkbox"/> As Ground연마	Joint Configuration 용접 모양 <input checked="" type="checkbox"/> V <input type="checkbox"/> X <input type="checkbox"/> I <input type="checkbox"/> K	App. Code 적용 규격 KS - B - 0896
Material/Thick. 재질/두께 SM490/17,25,30	App. Procedure No. 적용 절차서번호 N/A	Rev. 개정 0	Exam. Method 검사 방법 <input checked="" type="checkbox"/> Contact 직접접촉 <input type="checkbox"/> Immerse수침법 <input checked="" type="checkbox"/> Straight Beam 수직 <input checked="" type="checkbox"/> Angle Beam 사각
Weld Method 용접 방법 <input type="checkbox"/> SMAW <input type="checkbox"/> SAW <input type="checkbox"/> GTAW <input checked="" type="checkbox"/> FCAW	Transducer 탐촉자 Freq. (Mhz) 주파수 S / N 비연번호 Angle 각도(°) Size 크기 Range (mm) 거리	4 NEEA047 0 910 100 4 AEMC119 70 8x9 200	Screen Height Linearity 스크린 높이 직선성 within ± 5% FSH 전스크린높이 Deflector Level 검출 레벨 M 레벨
Testing Equipment 검사장비 Maker 제조사 SONA TEST Model 모델 SS-150 S/N 일련번호 1003835	Amplitude Control Linearity 동력 직선성 within ± 20% FSH 전스크린높이 Couplant 접촉매질 <input checked="" type="checkbox"/> Glycerine <input type="checkbox"/> Oil <input type="checkbox"/> Water <input checked="" type="checkbox"/> C.M.C <input type="checkbox"/> Grease <input type="checkbox"/> Ultragei	Test Block 시험편 <input checked="" type="checkbox"/> 교정시험편 Calibration Block IW BLOCK A1, A2 Reference Level 기준값도 <input type="checkbox"/> SDH 축공 <input checked="" type="checkbox"/> FBH 링 자공 <input type="checkbox"/> 모 재 Base Material N/A 80% <input type="checkbox"/> NOTCH 노치 <input type="checkbox"/> B/REF. 지연반사	Exam. Temperature 검사 온도 25 °C Calibration Angle 교정 각도 0, 69,5 Degree
Scanning Sketch  : UT 검사부위			
Examiner/Interpreter 시험자/판독자 장필성 LEVEL 기사 Date of Examination 2011년 8월 11일 검사일자 APPROVER BY 승인자 장필성 LEVEL 기사 Witnesser/Reviewer 임희자/감독자			

QAP-UT-01-01 (Rev.0) A4(210x297mm) HK비파괴검사(주) Page 1 of 3

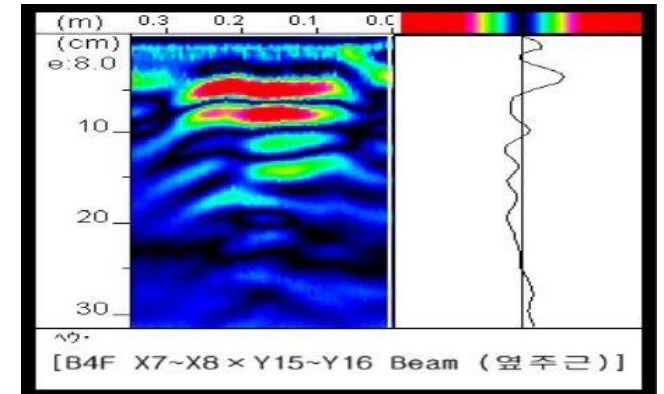
REPORT OF ULTRASONIC EXAMINATION  
초음파탐상검사보고서

<b>HK비파괴검사주식회사</b> KOREA PLANT NONDESTRUCTIVE TESTING 420-824 경기도 부천시 원미구 심곡1동 368-17 4F Tel : 032) 625-1346 Fax : 032) 625-1347		Report No. HK(GI)-UT-OND-01108-001 보고서번호 Date of Report 2011년 8월 11일 보고일자						
Identification No.	Accept	Reject	Grade	Location 위 치	Defect Length(mm)	Depth(mm)	DAC(Max.%)	Remarks
확인번호	합 격	불합격	등급	From "X"	From "Y"	결 함 길이	깊 이	보상극선 최 대
15TH-D-4 + SG1A - P1	v		1					Non Relevant Indication
15TH-D-4 + SG1A - P2	v		1					Non Relevant Indication
15TH-D-4 + SG3 - P3	v		1					Non Relevant Indication
15TH-D-4 + SG3 - P4	v		1					Non Relevant Indication
15TH-D-6 + SG1 - P1	v		1					Non Relevant Indication
15TH-D-6 + SG1 - P2	v		1					Non Relevant Indication
15TH-D-6 + SG3A - P3	v		1					Non Relevant Indication
15TH-D-6 + SG3A - P4	v		1					Non Relevant Indication
15TH-F-4 + SG1A - P1	v		1					Non Relevant Indication
15TH-F-4 + SG1A - P2	v		1					Non Relevant Indication
15TH-F-4 + SG3 - P3	v		1					Non Relevant Indication
38TH-H-4 + SG1A - P1	v		1					Non Relevant Indication
38TH-H-4 + SG1A - P2	v		1					Non Relevant Indication
38TH-H-4 + SG3 - P3	v		1					Non Relevant Indication
38TH-H-4 + SG3 - P4	v		1					Non Relevant Indication
38TH-H-6 + SG1 - P1	v		1					Non Relevant Indication
38TH-H-6 + SG1 - P2	v		1					Non Relevant Indication
38TH-H-6 + SG3A - P3	v		1					Non Relevant Indication
38TH-H-6 + SG3A - P4	v		1					Non Relevant Indication
~~~~~ BLANKS ~~~~~								
Total : 48개소								

# 정밀안전진단

## ■ 철근배근 상태: 대체로 일치하며, 안전성 확보

층	부재	위 치	설계치수(mm)		측정치수(mm)			비고
			주근(하단) 개수/단수	스터럽 (단부)	주근(하단) 개수/단수	스터럽 (단부)	피복 두께	
B4F	RG5	X7~X8 x Y12	9/2	150	9/2	150	45	
B4F	RB3	X7~X8 x Y12~Y13	8/2	200	8/2	186	45	
B4F	RB3B	X7~X8 x Y15~Y16	8/2	200	8/2	200	45	
B4F	RG5	X7~X8 x Y16	9/2	150	9/2	173	40	
B4F	RB3B	X10~X11 x Y2~Y3	8/2	200	8/2	156	35	
B4F	RG2	X11 x Y2~Y3	8/1	200	8/1	183	35	
B4F	RB3	X11~X12 x Y7~Y8	8/2	200	8/2	170	40	
B4F	RG6A	X11~X12 x Y8	10/2	200	10/2	270	40	
B4F	RG3	X14 x Y12~13	8/2	200	8/2	195	45	




지하 2~ 4층에 대한 조사결과 대체로 도면과 일치, 구조안전성 검토 결과 안전성을 확보하고 있는 것으로 파악됨.

# 정밀안전진단

## ■ 강재강도 및 강종: 도면과 일치

### <지하2층 강재시편 2EA 채취 후 강도시험>



YOUR PARTNER FOR THE BEST QUALITY

### TEST REPORT

우 150-038 서울특별시 영등포구 영등포동6가 88-2 TEL. (02)2164-0011 FAX. (02)2634-1008

상적서번호 : TAK-00949 접수 일자 : 2011년 08월 23일  
 대표자 : 이항남 시험완료일자 : 2011년 08월 29일  
 업체명 : (주)선구조연구조  
 주소 : 서울 영등포구 당산동 121-74

시료명 : 급속시편(1)

시험결과					
시험항목	단위	시료구분	결과치	기준	시험방법
인장강도	N/mm <sup>2</sup>		445	KS B 0802 : 2000(10호 시험편)	
항복강도	N/mm <sup>2</sup>		291	KS B 0802 : 2000(10호 시험편)	

용도 : 품질관리용

비고 : 1. 이 성적서는 의뢰자가 제시한 시료 및 시료명의로 시험한 결과로서 전체 제품에 대한 품질을 보증하지는 않습니다.  
 2. 이 성적서는 홍보, 선전, 광고 및 소송용 등으로 사용될 수 없으며, 용도 이외의 사용을 금합니다.

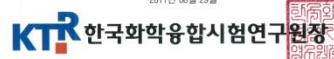
*Byoung H Cho*

시험원 : 조병익  
Tel : 02)570-9667


*Bok-Ki Kim*

기술책임자 : 김복기  
E-mail : kbk@ktr.or.kr


2011년 08월 29일




한국화학융합시험연구원장



Page : 1 of 1





KTR KOREA TESTING & RESEARCH INSTITUTE

### <지상층 강종 확인>



: SS41과 SWS50 사용 확인 → 도면표기사항과 일치

# 정밀안전진단

## ■ 콘크리트 중성화: A등급

<콘크리트 중성화 - 페놀프탈레인 법>

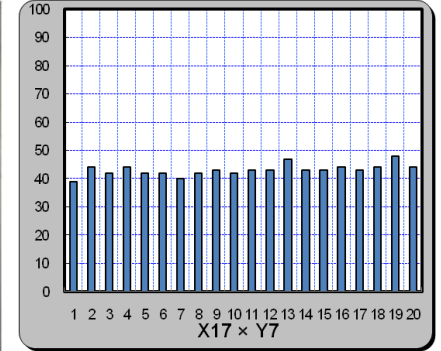


콘크리트 중성화(mm)					
구 분	부재1		부재2		계산 중성화 깊이
지하5층 기둥	3mm	A등급	3mm	A등급	약 13년 경과 → 13.3mm
지하4층 기둥	3mm	A등급	4mm	A등급	
지하3층 기둥	2mm	A등급	1mm	A등급	
지하2층 기둥	5mm	A등급	3mm	A등급	

중성화깊이가 피복두께(40mm)의 0.25배 이하로 콘크리트 성능저하등급은 A등급

# 정밀안전진단

## ■ 콘크리트 강도 실험: 설계기준강도 상회



<콘크리트 압축강도 측정 - 반발경도법>

콘크리트 강도(MPa)					
표본층	기둥	보	슬래브	평균	설계기준강도
지하5층	28.5	-	-	28.5	24.0
지하4층	28.4	30.2	30.8	29.8	
지하3층	27.3	28.9	29.5	28.6	
지하2층	29.6	28.6	30.9	29.7	
지하1층	30.5	-	-	30.5	

- 비파괴검사를 통한 콘크리트압축강도는 각 부재별로 설계강도를 초과함

➔ 콘크리트 강도에 대한 상태평가등급은 A등급 (일부 균열이 발생한 부재는 B등급)

# 정밀안전진단

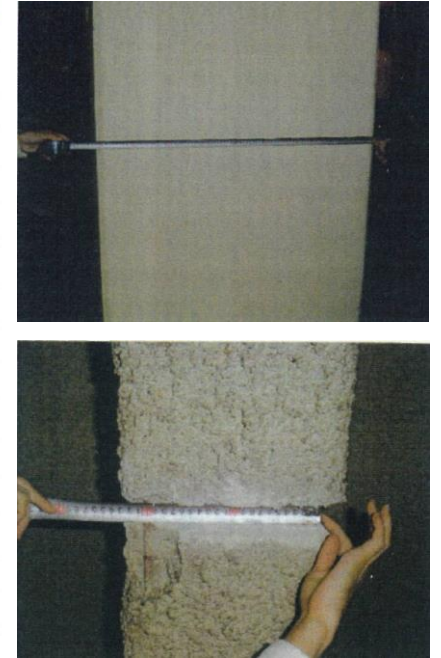
## ■ 부재실측 : 도면과 대체로 일치

조사층 : 지하3층~지하5층, 지상3층, 지상7층, 지상11층,  
지상14층, 지상29층, 지상33층, 지상34층, 지상39층

(Unit : mm)

구분	부재	위치	도면치수	실측치수	특기사항	비고
B3F	RG5	X11~X12 x Y12	800 x 600	800 x 380	슬래브제외	
B3F	RB3	X11~X12 x Y12~Y13	700 x 600	700 x 380	슬래브제외	
B3F	C2	X14 x Y5	700 x 700	700 x 700	마감포함	
B3F	RB3	X14~X15 x Y7~Y8	700 x 600	700 x 400	슬래브제외	
B3F	RG5A	X14~X15 x Y8	700 x 600	800 x 400	슬래브제외	
B3F	RB3	X15~X16 x Y4~Y5	700 x 600	700 x 400	슬래브제외	
B3F	RG3	X16 x Y4~Y5	700 x 600	800 x 400	슬래브제외	
B3F	C11	X16 x Y8	700 x 700	700 x 700	마감포함	
3F	B1D	X7 x Y5~Y6	500 x 200 x 10 x 16	500 x 200 x - x 16		
3F	G1	X5 x Y6~Y7	600 x 200 x 11 x 17	600 x 200 x - x 17		
3F	G13	X8 x Y9~Y10	700 x 350 x 18 x 28	700 x 350 x - x 28		
3F	G1	X11 x Y10~Y11	600 x 200 x 11 x 17	600 x 200 x - x 17		
3F	G1	X9 x Y11~Y12	600 x 200 x 11 x 17	600 x 200 x - x 17		
3F	B1D	X4~X5 x Y11~Y12	500 x 200 x 10 x 16	500 x 200 x - x 16		
3F	B1C	X5~x6 x Y13~Y14	488 x 300 x 11 x 18	488 x 300 x - x 18		
3F	B1D	X12~X13 x Y13~Y14	500 x 200 x 10 x 16	500 x 200 x - x 16		
7F	B1C	X5~X6 x Y5~Y6	488 x 300 x 11 x 18	488 x 300 x - x 18		
7F	B1D	X7~X8 x Y5~Y6	500 x 200 x 10 x 16	500 x 200 x - x 16		
7F	G1	X5 x Y6~Y7	600 x 200 x 11 x 17	600 x 200 x - x 17		
7F	B1C	X13~X14 x Y6~Y7	488 x 300 x 11 x 18	488 x 300 x - x 18		
7F	B1D	X4~X5 x Y7~Y8	500 x 200 x 10 x 16	500 x 200 x - x 16		
7F	B1D	X10~X11 x Y8~Y9	500 x 200 x 10 x 16	500 x 200 x - x 16		
7F	B1A	X3~X4 x Y9~Y10	600 x 200 x 11 x 17	600 x 200 x - x 17		

구분	부재	위치	도면치수	실측치수	특기사항	비고
29F	SG1	4C~6xD	1100x300x150x30	1100x300x150x30		
29F	SB2	5C~5DxD~E	250x175x7x11	250x175x7x11		
29F	SG3	5D~6xD~E	582x300x12x17	582x300x12x17		
29F	SG1	4C~6xF	1100x300x15x30	1100x300x15x30		
29F	SG2	4CxF~G	600x200x11x17	600x200x11x17		
33F	SB2A	4A~6xC	400x200x8x13	400x200x-x13		
33F	SB2B	4A~6xC~D	500x200x10x16	500x200x-x16		
33F	SG1A	4A~4CxD	1100x300x15x30	1100x300x-x30		
33F	SG1	4C~6xD	1100x300x15x30	1100x300x-x30		
33F	SB2	5CxD~E	350x175x7x11	350x175x-x11		
33F	SG3	6xD~E	582x300x12x17	582x300x-x17		
33F	SG1	4C~6xF	1100x300x15x30	1100x300x-x30		
33F	SG2	4CxF~G	600x200x11x17	600x200x-x17		
34F	SB2B	4A~4CxC~D	500x200x10x16	500x200x-x16		
34F	SG1A	4A~4CxD	1100x300x15x30	1100x300x-x30		
34F	SG1	4C~6xD	1100x300x15x30	1100x300x-x30		
34F	SB2	5CxD~E	350x175x7x11	350x175x-x11		
34F	SG3	6xD~E	582x300x12x17	582x300x-x17		
34F	SB2	5BxE~F	350x175x7x11	350x175x-x11		
34F	SG1	4C~6xF	1100x300x15x30	1100x300x-x30		
34F	SG2	4CxF~G	600x200x11x17	600x200x-x17		



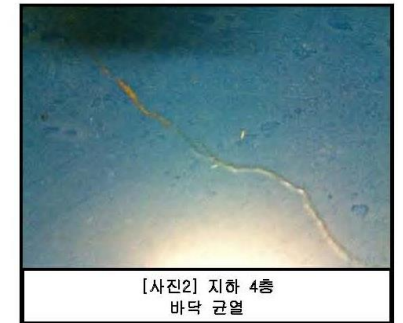
# 정밀안전진단

## ■ 균열조사: 구조안전성에 문제가 없는 미세균열 발생

번호	구분	조사내용	균열폭 (mm)	사진번호	비고(mm)
1	B4F	바닥 마감균열	0.3	1	3.0
2		바닥 마감균열	0.4	2	1.5
3		바닥 마감균열	0.3	3	6.0
4		바닥 마감균열	0.3	4	5.0
5		바닥 마감균열	0.3	5	1.5
6		바닥 마감균열	0.3	6	1.5
7		바닥 마감균열	0.3	7	1.5
8		바닥 마감균열	0.3	8	2.0
9		바닥 마감균열	0.3	9	4.0
10		바닥 마감균열	0.3	10	8.0
11		바닥 마감균열	0.3	11	7.0
12		바닥 마감균열	0.3	12	4.0



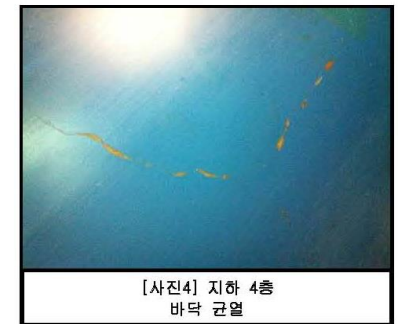
[사진1] 지하 4층  
바닥 균열



[사진2] 지하 4층  
바닥 균열



[사진3] 지하 4층  
바닥 균열



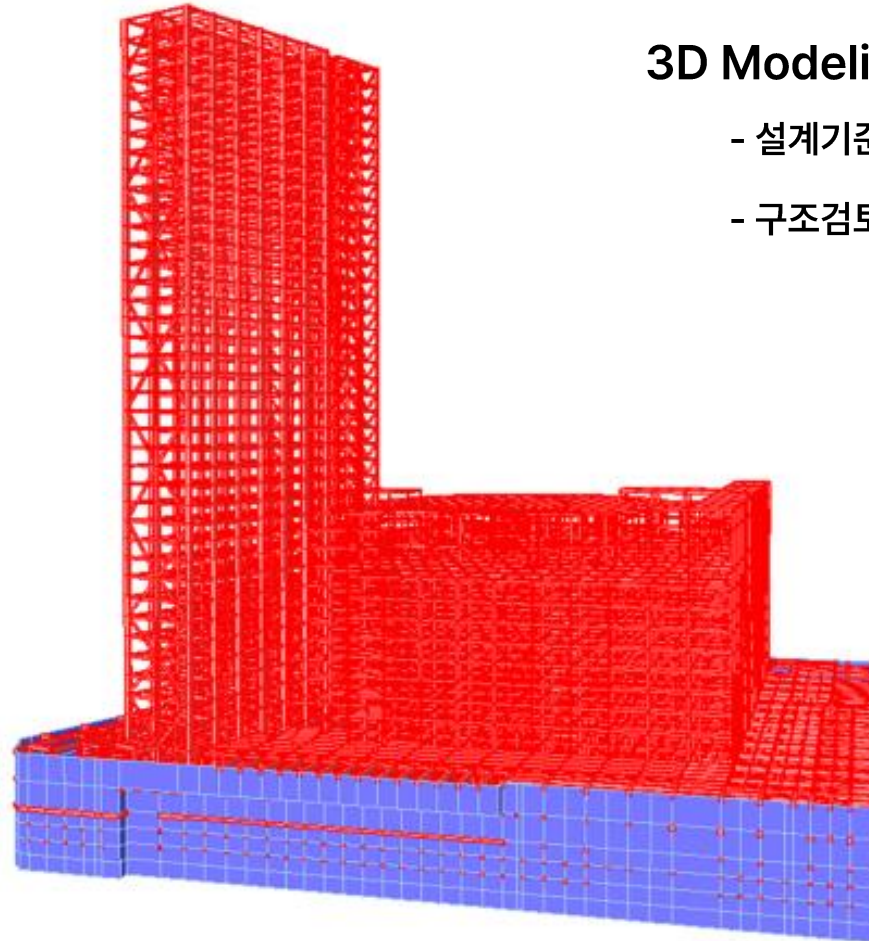
[사진4] 지하 4층  
바닥 균열

조사층 : 지하1층~지하6층 (바닥, 보, 슬래브 균열)

지상 1층~지상4층, 지상7층, 지상8층, 지상12층 (마감균열)

일부 부재에 마감균열이 발생하였으나 구조안전성에는 문제가 없음.





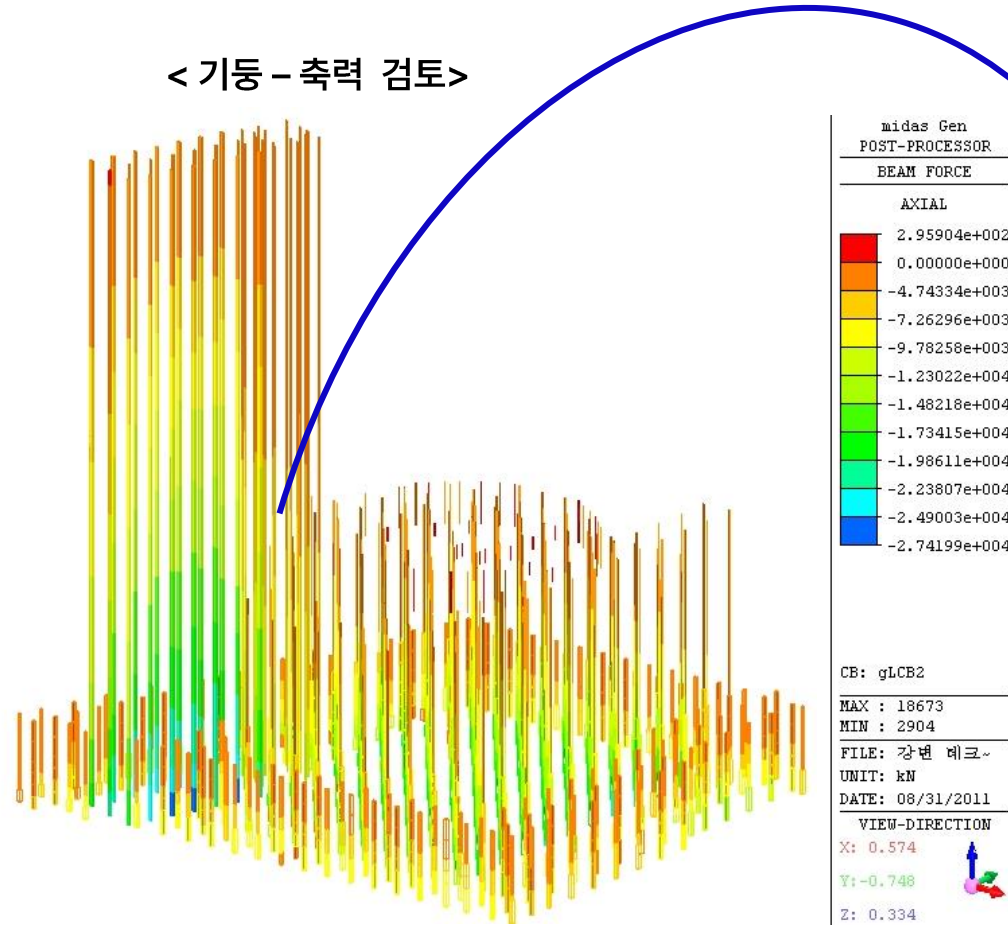
### 3D Modeling을 통한 구조해석

- 설계기준 : 건축물의구조기준에 관한 규칙(건설부)
- 구조검토 : 테크노마트 구조설계 당시 기준을 적용하여 검토

# 정밀안전진단

## ■ 안전성 평가

< 기둥 - 축력 검토 >



< 대표부재 13F SC6 응력검토 결과 >

midas Gen Steel Checking Result

Company: MIDAS, Project Title: E:\\_ple\_내력검토\_20110905-12.mgb

1. Design Information

Design Code	AJK ASD83
Unit System	kN, m
Member No	10441
Material	SWS50 (No.6200)
Section Name	50H-600X450X40X50 (No.2054)
Member Length	4.2000

2. Member Forces

Axial Force	Fxx = -6820.4 (LCB: 2, POS:1)
Bending Moments	My = 78.2904, Mz = -137.88
End Moments	My1 = 78.2904, My2 = -6.1547 (For Ly), Mz1 = -137.88, Mz2 = 118.067 (For Lz)
Shear Forces	Fyy = -72.009 (LCB: 3, POS:1), Fzz = 20.1000 (LCB: 2, POS:1)

3. Design Parameters

Unbraced Lengths	Ly = 4.20000, Lz = 4.20000, Lb = 4.20000
Effective Length Factors	Ky = 1.00, Kz = 1.00
Bending Coefficient	Cb = 1.00

4. Checking Results

Slenderness Ratio:  $\lambda_c/r_x = 38.8 < 200.0$  (Web:10441, LCB: 2) ..... 0.K

Axial Stress:  $f_c/F_c = 101853/175678 = 0.580 < 1.000$  ..... 0.K

Bending Stresses:  $f_{by}/F_{by} = 6134/196133 = 0.031 < 1.000$  ..... 0.K  
 $f_{bz}/F_{bz} = 40709/196133 = 0.208 < 1.000$  ..... 0.K

Combined Stress (Compression+Bending):  
 $r_{max1} = f_c/F_c + f_{by}/F_{by} + f_{bz}/F_{bz}$   
 $r_{max2} = \sqrt{[f_c/F_c + 3 \cdot f_{tau_y}/F_{tau_y}]^2 + f_{tau_z}^2}/F_t$   
 $r_{max} = \max[r_{max1}, r_{max2}] = 0.819 < 1.000$  ..... 0.K

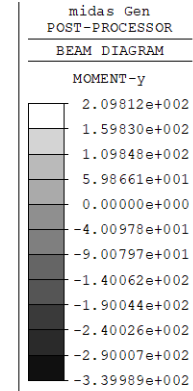
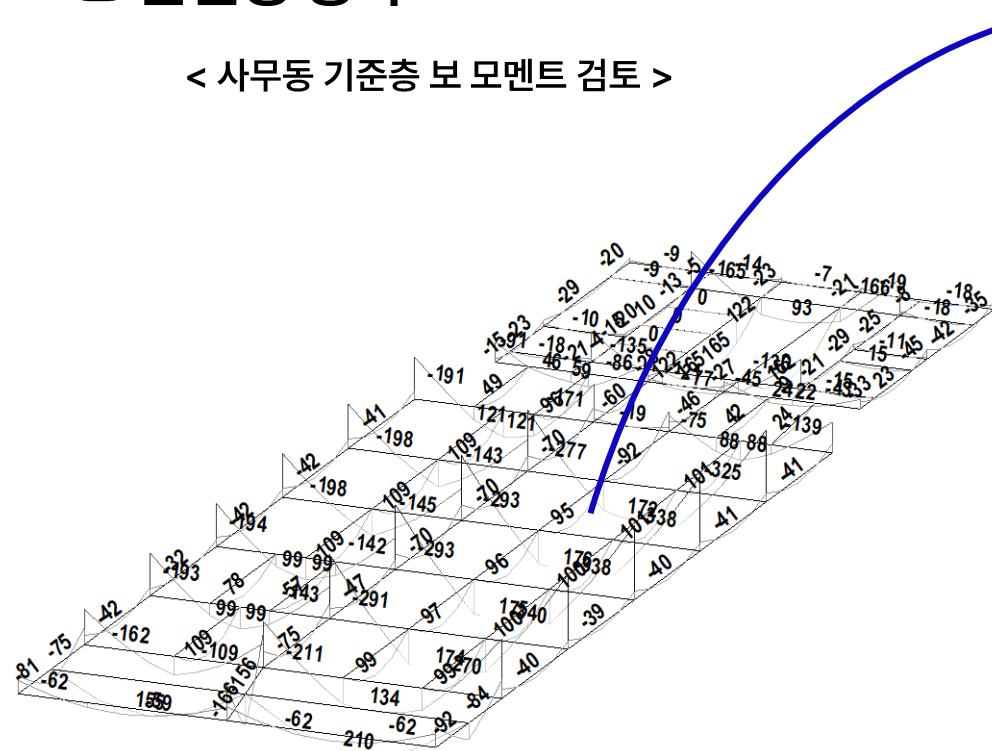
Shear Stresses:  $f_{vy}/F_{vy} = 0.021 < 1.000$  ..... 0.K  
 $f_{vz}/F_{vz} = 0.007 < 1.000$  ..... 0.K

- 3D Modeling에 의한 기둥 부재력 확인 결과 안전률 100% 이상 확보

# 정밀안전진단

## ■ 안전성 평가

< 사무동 기준층 보 모멘트 검토 >



ST : DL  
 MAX : 2749  
 MIN : 4731  
 FILE: 1231231231  
 UNIT: kN·m  
 DATE: 09/06/2011  
 VIEW-DIRECTION  
 X: 0.050  
 Y: -0.950  
 Z: 0.309

대표부재 : SG1

### midas Gen Steel Checking Result

Company: E.A. ple\_내역검토\_20110905-12.mgb

1. Design Information  
 Design Code : AIK-ASD83  
 Unit System : kN, m  
 Member No : 2510  
 Material : SS41 (No.6000)  
 Section Name : H 400x200x8/13 (No.6406)  
 Member Length : 9.44972

2. Member Forces  
 Axial Force : Fxx = 0.00000 (LCB: 1, POS: J)  
 Bending Moments : My = -151.03, Mz = 0.00000  
 End Moments : My1 = -129.88, My2 = -151.03 (for Lb)  
 Shear Forces : Fyy = 0.00000 (LCB: 16, POS: I)  
 Fzz = 83.4615 (LCB: 1, POS: J)

3. Design Parameters  
 Unbraced Lengths : Ly = 9.44972, Lz = 9.44972, Lb = 0.00000  
 Effective Length Factors : Ky = 1.00, Kz = 1.00  
 Bending Coefficient : Cm = 1.00

4. Checking Results  
 Slenderness Ratio : L/r = 208.2 < 300.0 (Memb: 911, LCB: 1) ..... 0.K  
 Axial Stress : f1/F1 = 0/156906 = 0.000 < 1.000 ..... 0.K  
 Bending Stresses : fby/Fby = 127451/156906 = 0.812 < 1.000 ..... 0.K  
 Combined Stress (Tension-Bending) : Rmax1 = fby/Fby + fbz/Fbz  
 Rmax2 = SQRT(Sigma\_x^2 + 3\*tau\_xy^2)/F1  
 Rmax = Max[Rmax1, Rmax2] = 0.882 < 1.000 ..... 0.K  
 Shear Stresses : fvy/Fvy = 0.000 < 1.000 ..... 0.K  
 fvz/Fvz = 0.288 < 1.000 ..... 0.K

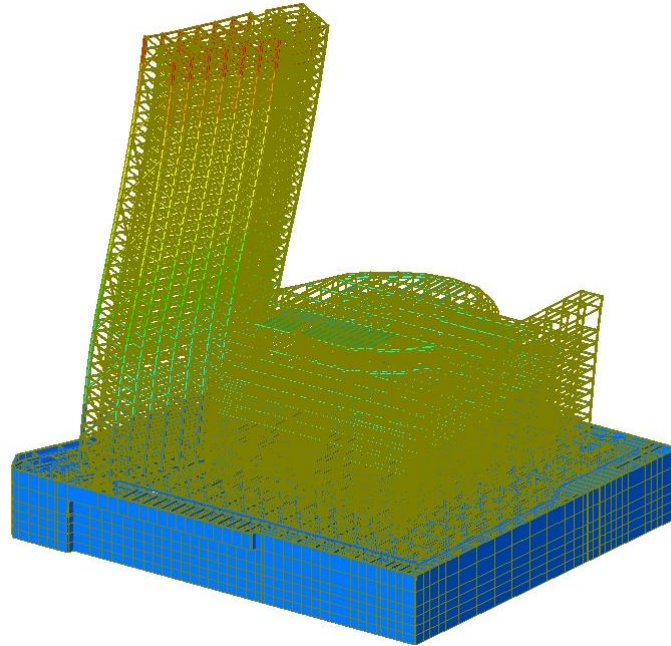
- 3D Modeling에 의한 보 부재력 확인 결과 안전률 100% 이상 확보

# 정밀안전진단

## ■ 수평하중에 의한 안전성 평가

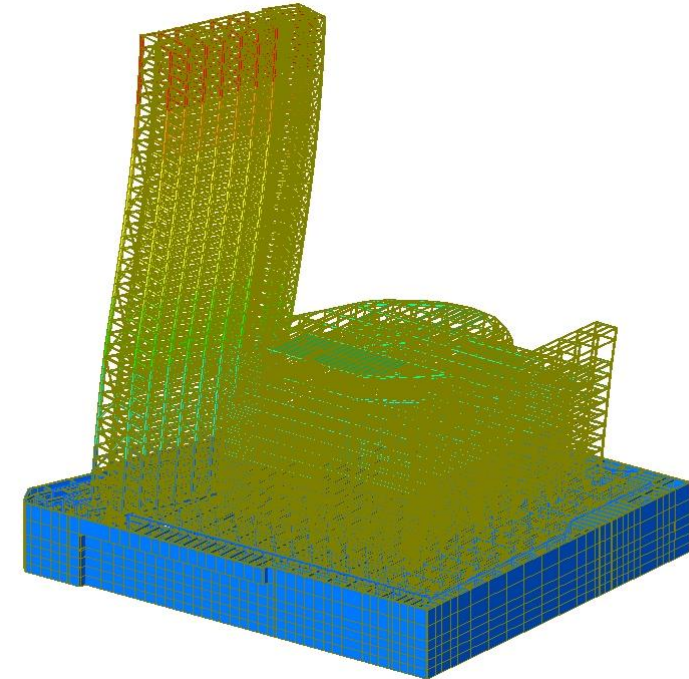
- 건축물의 구조기준에 대한 규칙에 의한 수평하중 적용

<풍하중 수평변위>



- $W_x$  : 풍하중 수평변위  $l/350$  이하
  - $W_y$  : 풍하중 수평변위  $l/350$  이하
- 업무시설로서의 **사용성 만족**

<지진하중 층간변위>



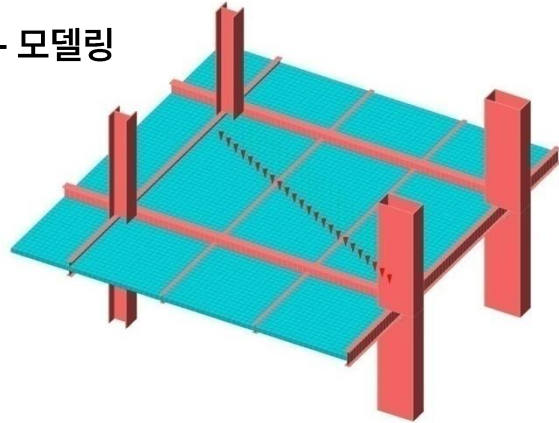
- X-dir : 층간변위 25.8mm(0.005h)
  - Y-dir : 층간변위 14.2mm(0.003h)
- 층간변위 제한값 **0.015h** 만족

# 정밀안전진단

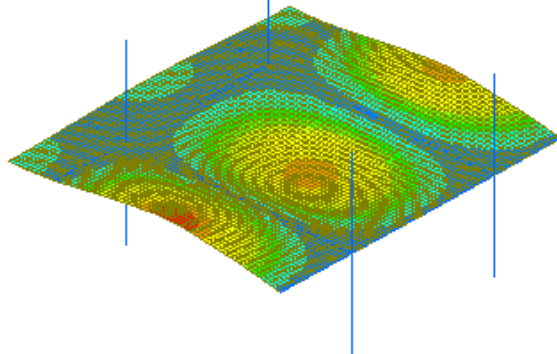
## 진동검토: **사용성 만족**

### <시간이력 해석>

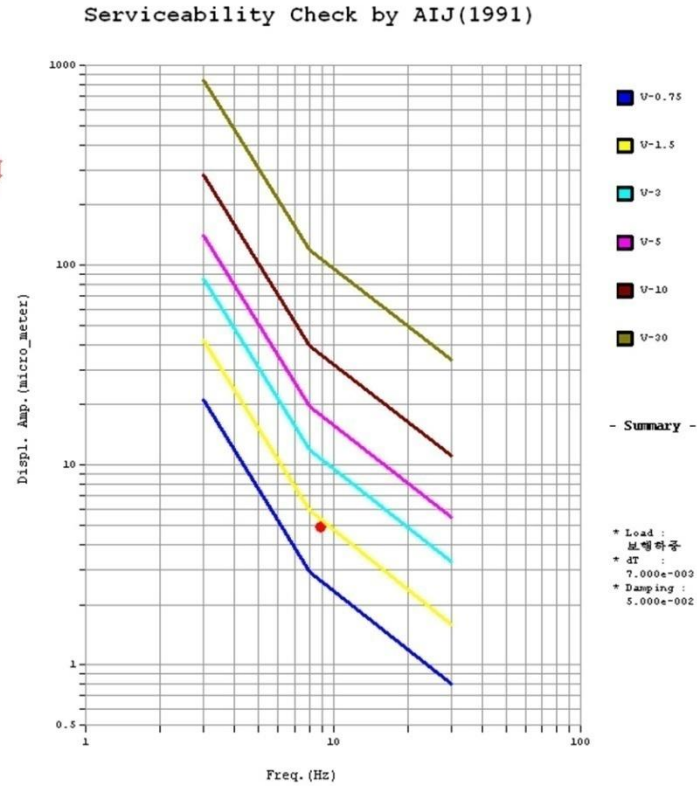
- 모델링



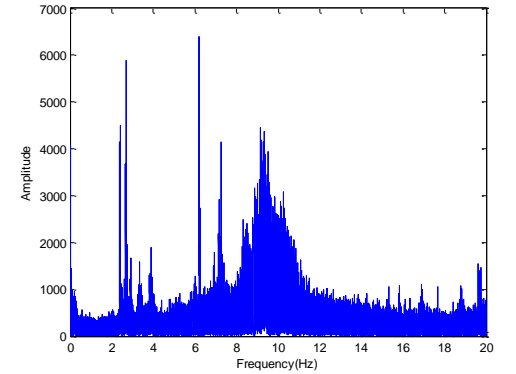
- MODE 1



### <최대 변위진폭 검토>



### <진동수 실측 Data>



- 시간이력해석결과 실측고유진동수와 유사한 9Hz 정도의 값을 나타냄
- ➔ 일본 거주성능평가기준에 따른 **사용성 만족**

# 정밀안전진단

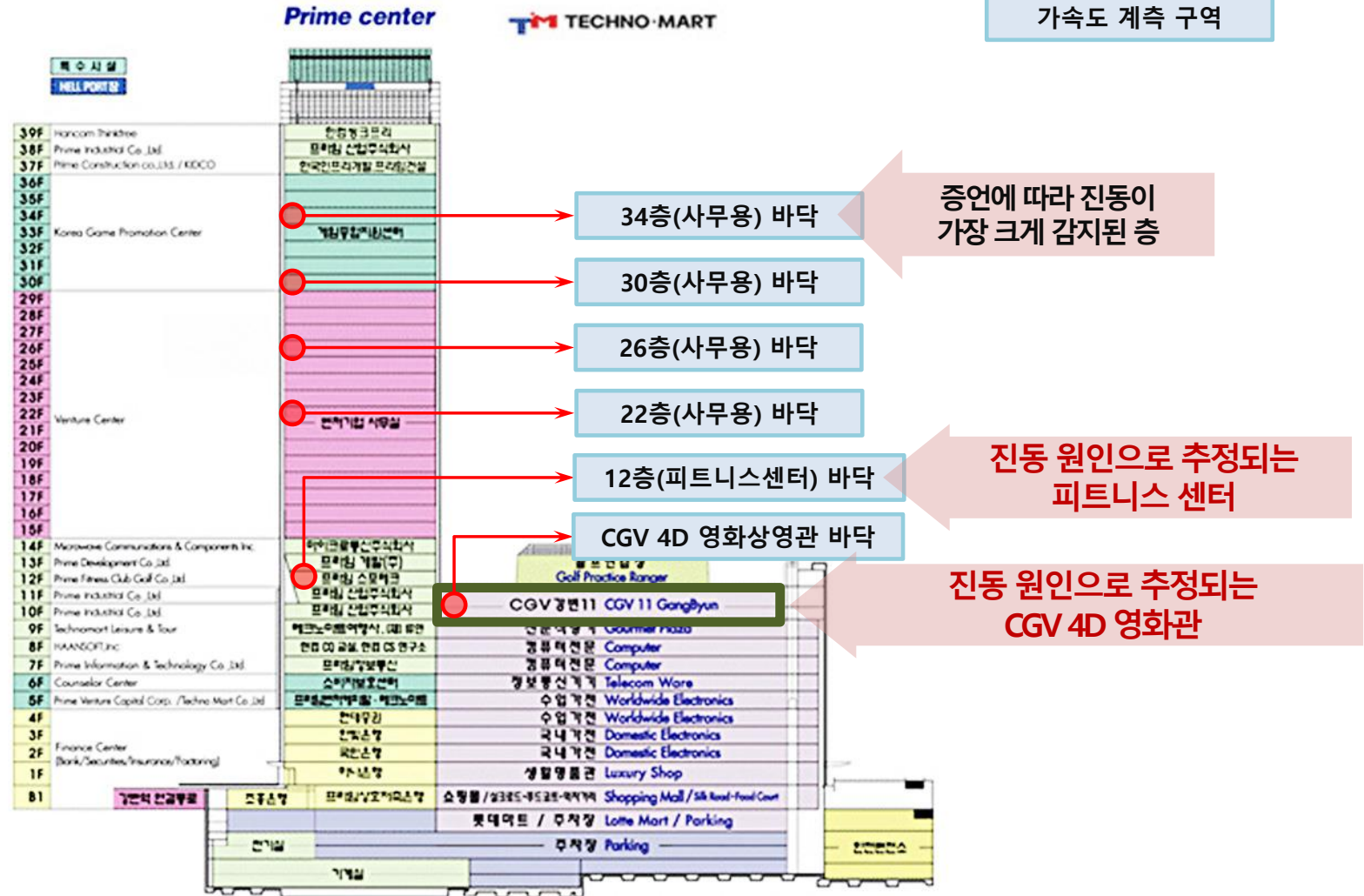
## 정밀안전진단 결과 종합

항목	진단 결과	종합평가	비고
기초지반조사	설계도면과 일치	<b>B 등급</b> ('98~'08 : A등급, '08~현재 : B등급)	· 여의도 63빌딩 → B 등급  · 잠실 롯데월드 → B 등급  · 삼성동 무역센터 → B 등급  · A등급 거의 없음.
수평도 조사	제한값 만족 (보, 슬래브)		
접합부 검사	설계도면과 일치 (표준장력유지)		
철근배근 상태 검사	설계도면과 일치		
강재 강도 및 강종시험	설계도면과 일치		
콘크리트 중성화 검사	A 등급(중성화 깊이 5mm 이하)	<b>등급기준</b> A : 문제점이 없는 최상의 상태 B : 보조부재에 결함은 있으나, 건축구조기능 범위에 지장 없는 상태 C : 주요 부재에 결함이 있으나, 건축물 안전에 지장없는 상태 D : 주요 부재에 결함이 발생하여 전체적인 보수/보강이 필요한 상태 E : 주요부재에 심각한 결함으로 즉각 사용중지 하여야 하는 상태	
콘크리트 강도시험	양 호 (설계기준 24.0MPa 상회)		
부재 실측	설계 도면과 일치		
균열조사	안전성 확보 (미세한 마감규열 부분 보수 필요)		
안전성 평가	안전율(S.F) 100%이상 확보		
사용성 평가	ISO 진동 기준 만족		

### 3. 진동원인 규명을 위한 현장계측 및 분석

- 진동원인 규명  
(풍하중, 공조실, 4D 상영관, 피트니스 센터)
- 공개시연 (딥단 뽀뽀기)
- 결과분석 및 진동모드 확인
- 풍직각방향 가속도 평가

# 추정 진동원인 및 진동 계측 위치





# 진동원인 규명 4D 상영관

7월 5일 (화요일) 사고 당일  
4D(체험)영화 상영 시간표

영화제목	상영시간
(디지털4D)트랜스포머3	10:30 13:45 - -

## 진동 사건 발생

오전 10시 08분에서 17분까지 민원 발생  
약 3~4분 정도의 진동이 1분 정도의 간격으로 3회 가량 10~15분에 걸쳐 발생한 것으로 증언

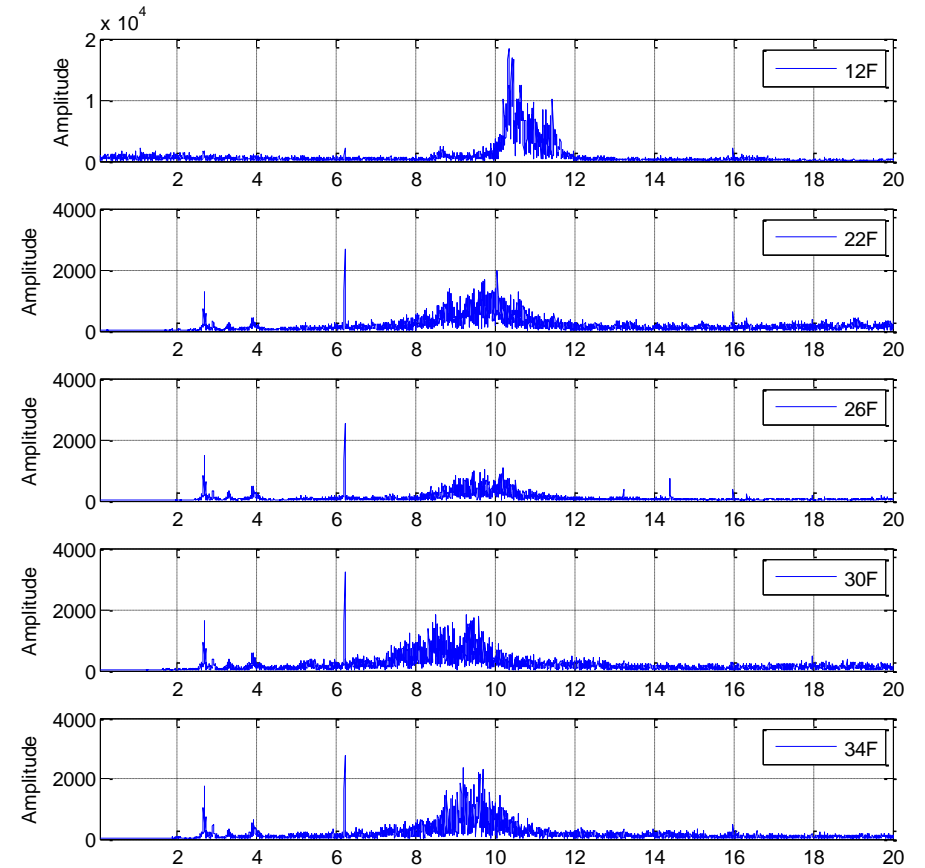
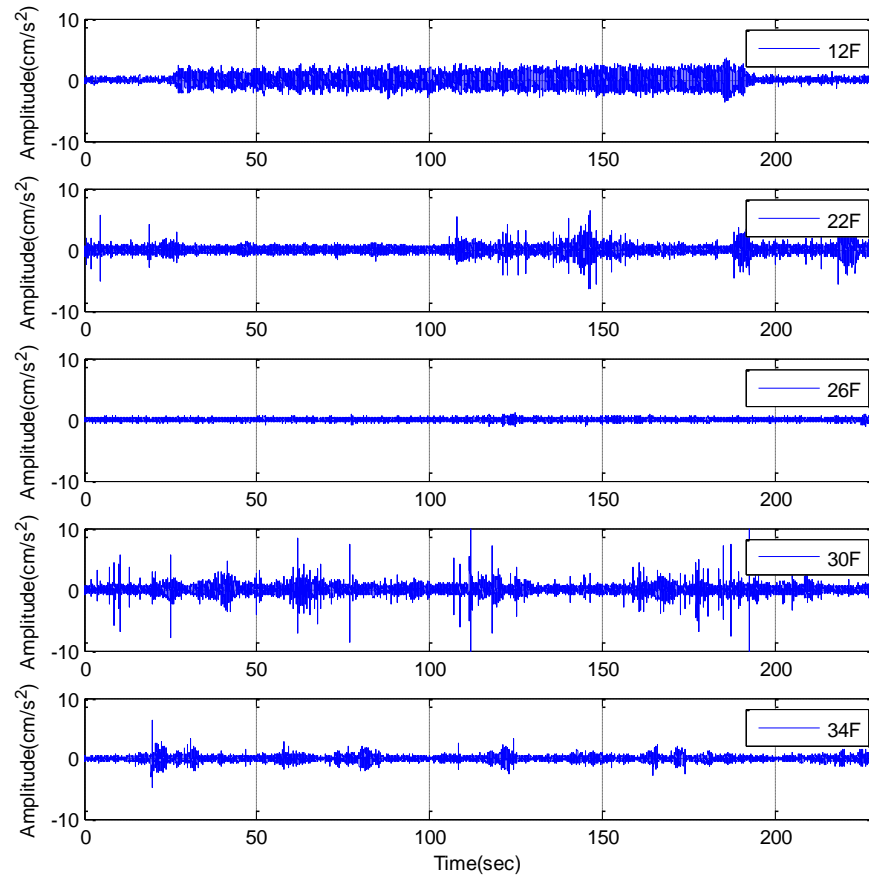
# 진동원인 규명 피트니스센터 (스피닝)



스피닝실 3회 시연

# 진동원인 규명 피트니스센터 (스피닝)

스피닝실 운영에 따른 고층부 가속도 응답 변화 특성 관측되지 않음



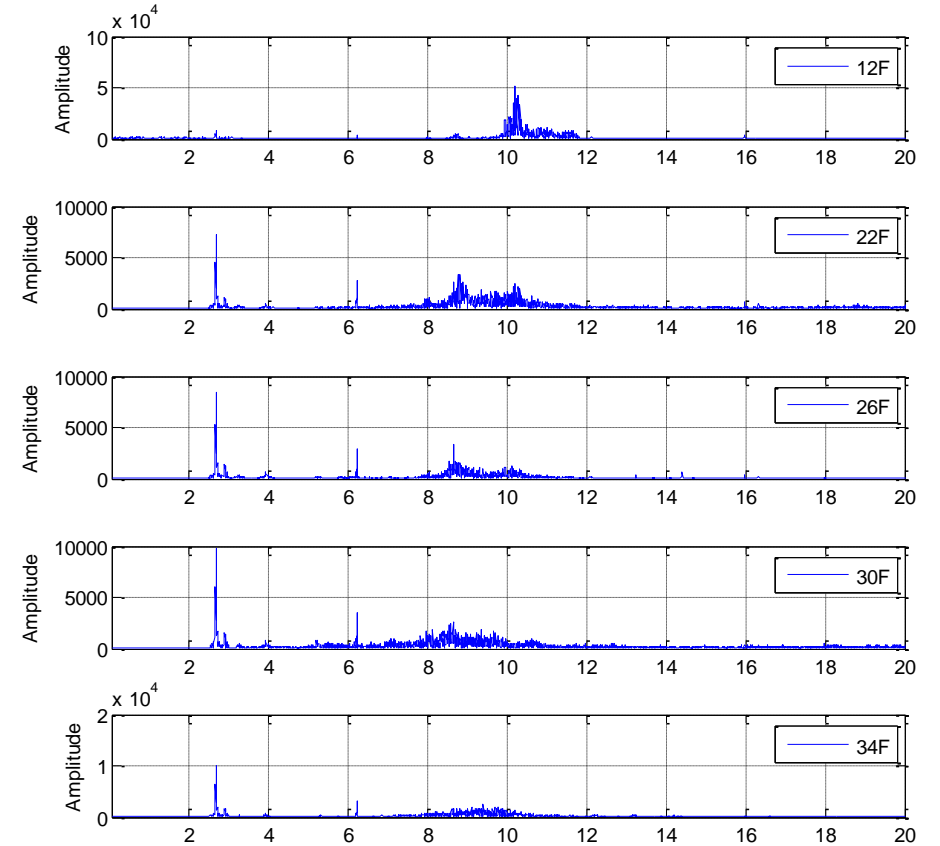
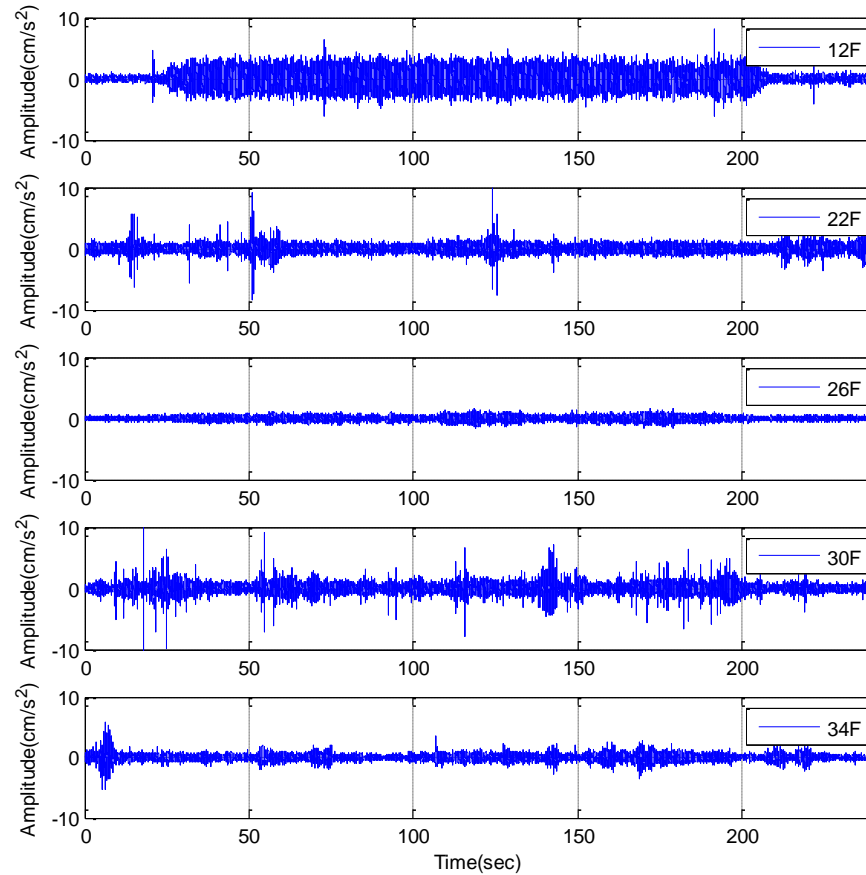
# 진동원인 규명 피트니스센터 (러닝머신)



러닝머신 3회 시연

# 진동원인 규명 피트니스센터 (런닝머신)

런닝머신 운영에 따른 고층부 가속도응답 변화특성 관측되지 않음

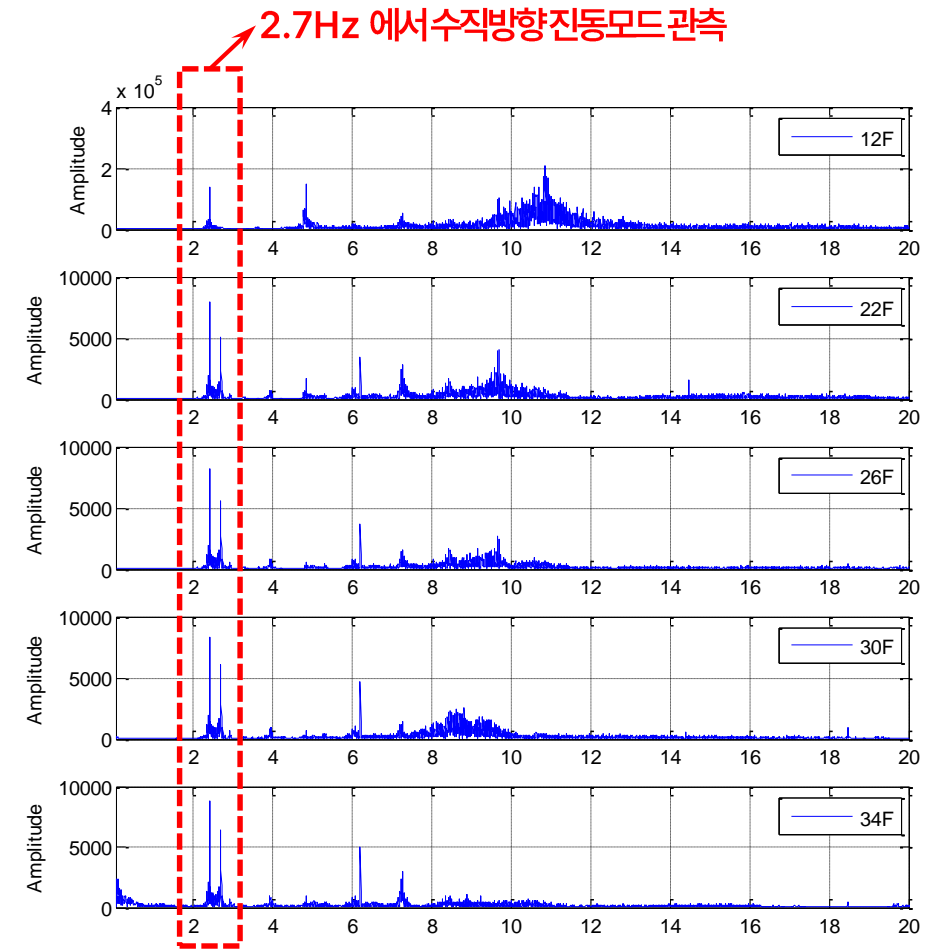
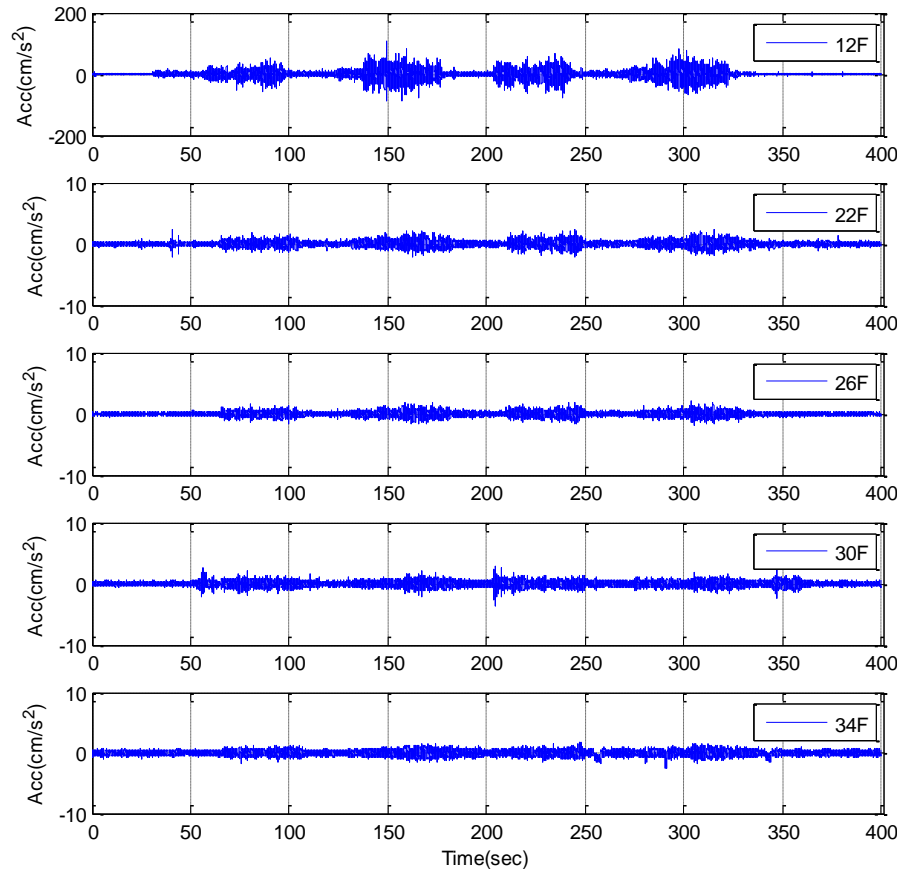


# 진동원인 규명 피트니스센터 (집단리듬운동 1)



# 진동원인 규명 피트니스센터 (집단리듬운동 1)

집단리듬운동시연1:12층 바닥판 응답 크기에 따라 고층부 가속도 응답도 동일하게 증폭



# 진동원인 규명 피트니스센터 (집단군무 1)

## ■ 피트니스센터 집단리듬운동 참여자 설문 내용

- 1) 2011년 7월 5일 10시경 사건 당시 새로 온 강사에 의하여 평상시 운동보다 매우 큰 강도로 약 20분간 운동하였음.
- 2) 평상시의 운동프로세스가 아닌 바닥판을 강하게 가력하는 동작 3가지 정도를 지속적으로 반복하였음.



# 진동원인 규명 피트니스센터 (공개시연)

일반적인 움직임 (1)



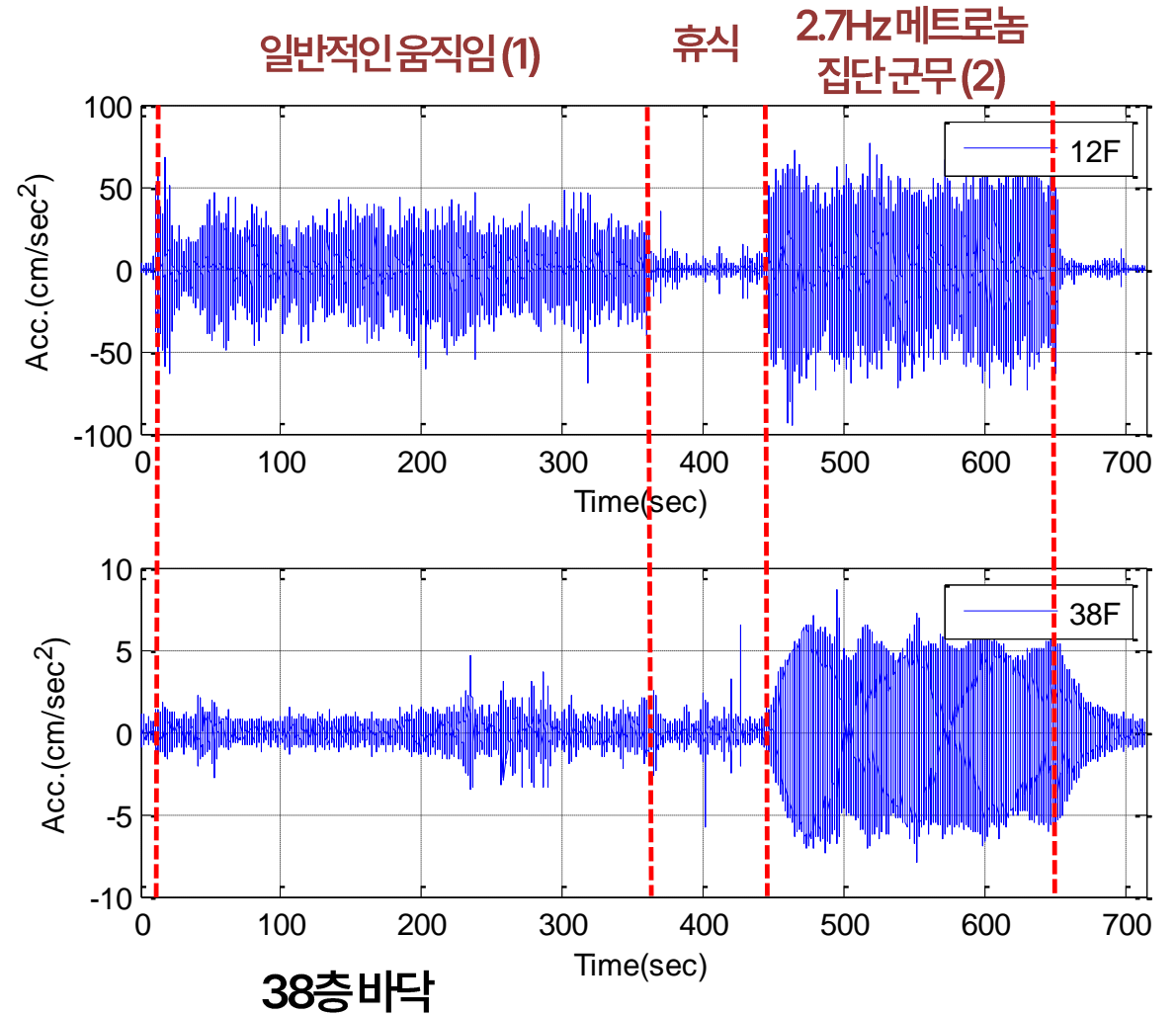
2.7Hz 메트로놈  
집단군무 (2)



# 진동원인 규명 피트니스센터 (공개시연)

**진동시연 순서**

- 1분간 **몸 풀기**
- 3분간 **일반적인 운동**
- 2분간 **휴식**
- 3분간 **2.7Hz 메트로놈  
집단 군무**



# 진동원인 규명 진동평가 기준

## ■ 수직진동에 대한 ISO 기준 평가

상하 수평진동에 대한 전  
신폭로 권고기준  
ISO 2631-1(1997)

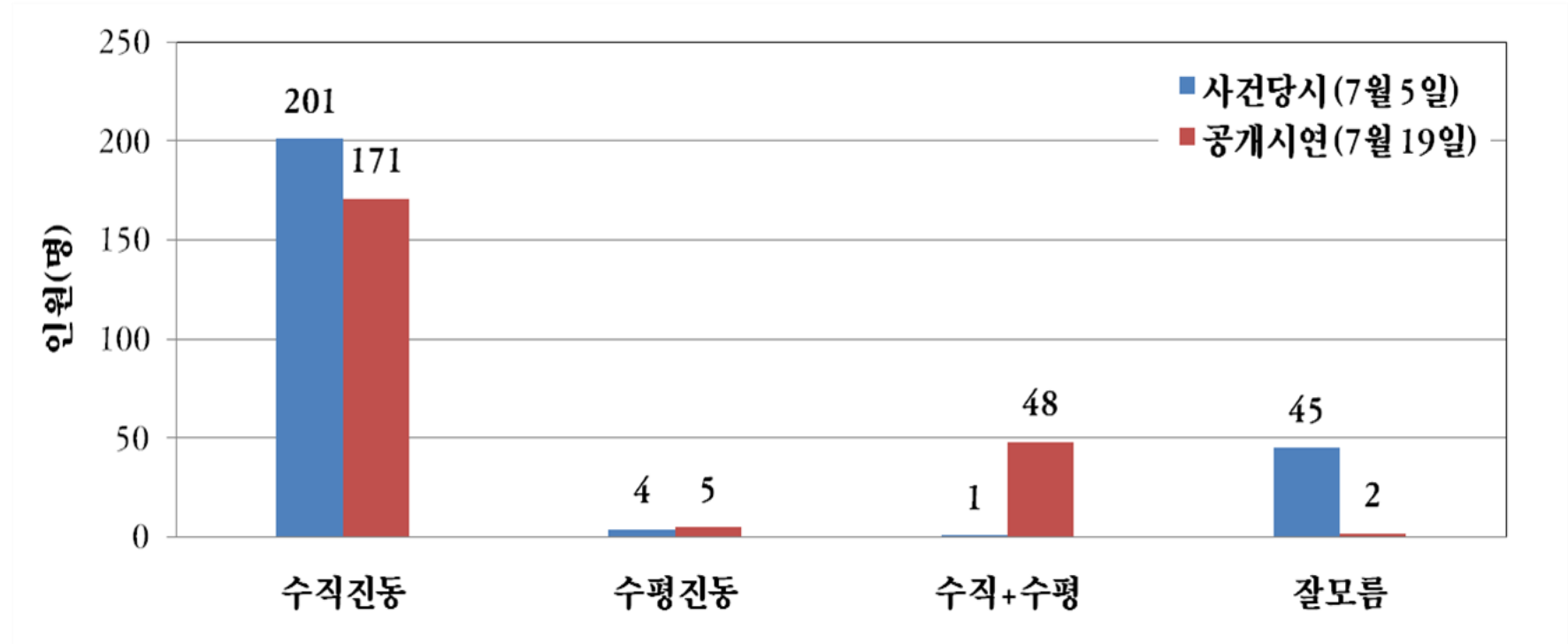
진도계	지진명칭	가속도피크치 (cm/s <sup>2</sup> )	가속도레벨(dB) [ref.10 <sup>-5</sup> m/s <sup>2</sup> ]	물적 피해의 예
0	무진(無震)	0.8 이하	55 이하	진동의 감각역치
I	미진(微震)	0.8~2.5	60±5	약간 느낄 수 있을 정도
II	경진(輕震)	2.5~8.0	70±5	대부분 느끼며, 창문이 약간 흔들림
III	약진(弱震)	8.0~25	80±5	창문·미닫이 등이 떨어뜨림
IV	중진(中震)	25~80	90±5	기물이 넘어지고 물이 넘침
V	강진(強震)	80~250	100±5	벽의 균열이나 돌담이 무너짐
VI	열진(烈震)	250~400	105±5	목조가옥 파괴 30% 이하
VII	격진(激震)	400 이상	110 이상	목조가옥 파괴 30% 이상, 산사태

용도별 진동평가기준  
ISO 2631-2 (2009)

구 분	시간	연속 혹은 간헐진동		충격진동(3회 이하/1일)	
		보정 가속도 실효치 (m/s <sup>2</sup> )	진동레벨 (dB)	보정 가속도 실효치 (m/s <sup>2</sup> )	진동레벨 (dB)
수술실, 정밀작업실	작업시	0.005	54	0.005	54
	휴지시	주거용의 기준 정도			
주 거	주 간	0.01~0.02	60~66	0.15~0.45	83.5~93
	야 간	0.007	57	0.007~0.45	57~80
사 무 실	상시	0.02	66	0.3~0.64	89.5~96
공장, 작업장	상시	0.04	72	0.45~0.64	93~96

# 진동원 규명을 위한 설문조사

## ●사건당시와 공개시연 진동비교 : 진동의 방향



대부분 수직진동으로 감지함

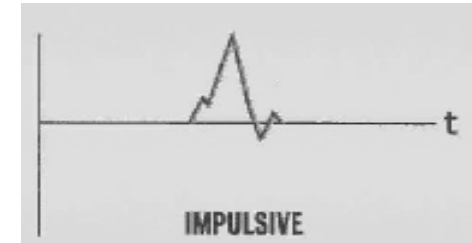
## 4. 진동원의 이론적 해석

- 3차원 구조해석모델 구축
- 건물 고유진동모드 파악
- 추정 가진원 하중 생성
- 시간이력해석을 통한 진동원 규명

# 진동의 원인

진동원 - 기계의 가동, 지진, 물체의 충돌, 사람의 움직임 등  
구조물에 가해지는 힘

**충격하중** - 폭발, 충돌 등 단발성 하중



**주기하중** - 기계의 가동, 집단응원,  
단체보행 등의 주기적 가진하중



**불규칙하중** - 지진, 바람, 교통하중 등



# 공진현상

## 구조물과 가진하중의 주기가 일치할 때 나타나는 진폭증가

타코마교량(Tacoma Bridge)

- 1940년 7월 1일 개통, 11월 7일 붕괴

영국 맨체스터 브로스턴교

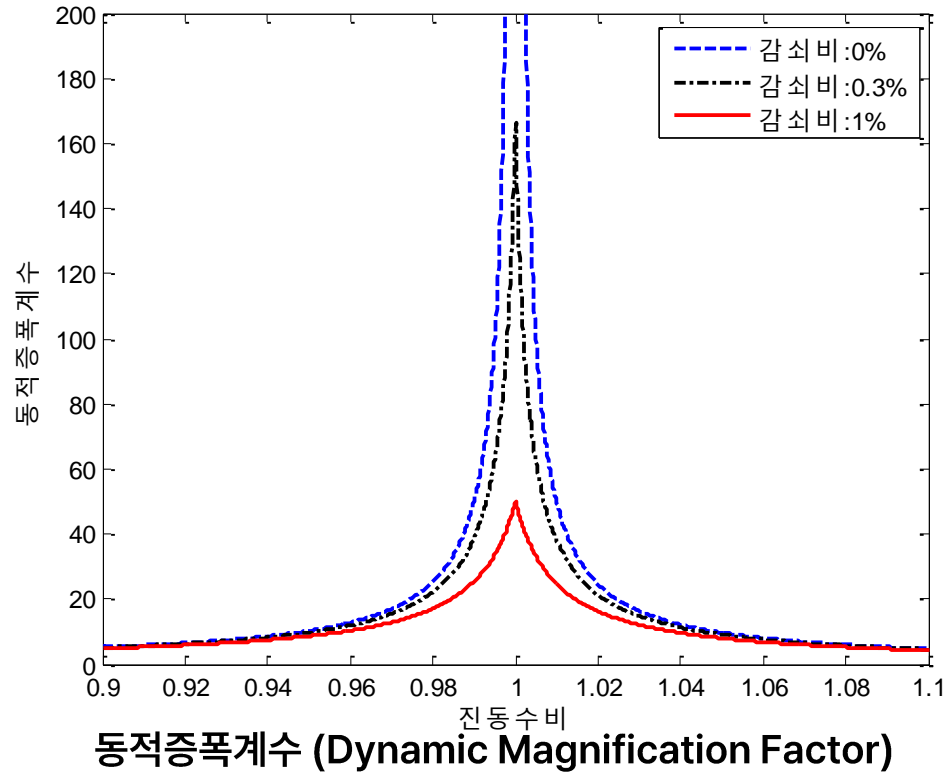
- 1831년 군대가 행군할 때 갑자기 붕괴

소리로 유리잔 깨는 "마술"

밀레니엄 교량

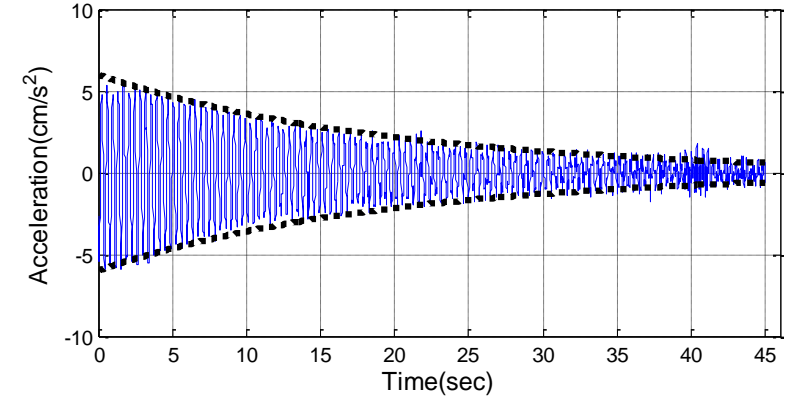
- 2000년 6월 10일 개통식 집단 보행에 의해 흔들림

# 공진에 의한 건축물 진동

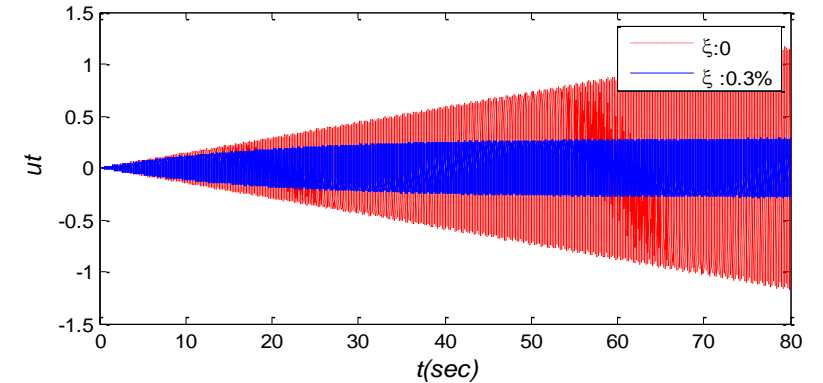


동적증폭계수 (Dynamic Magnification Factor)

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



공진 이후 자유진동 구간 감쇠비 추정



감쇠비에 따른 공진 증폭현상

$f_n$  = 구조물의 고유진동수

$f_p$  = 외력의 가진 진동수

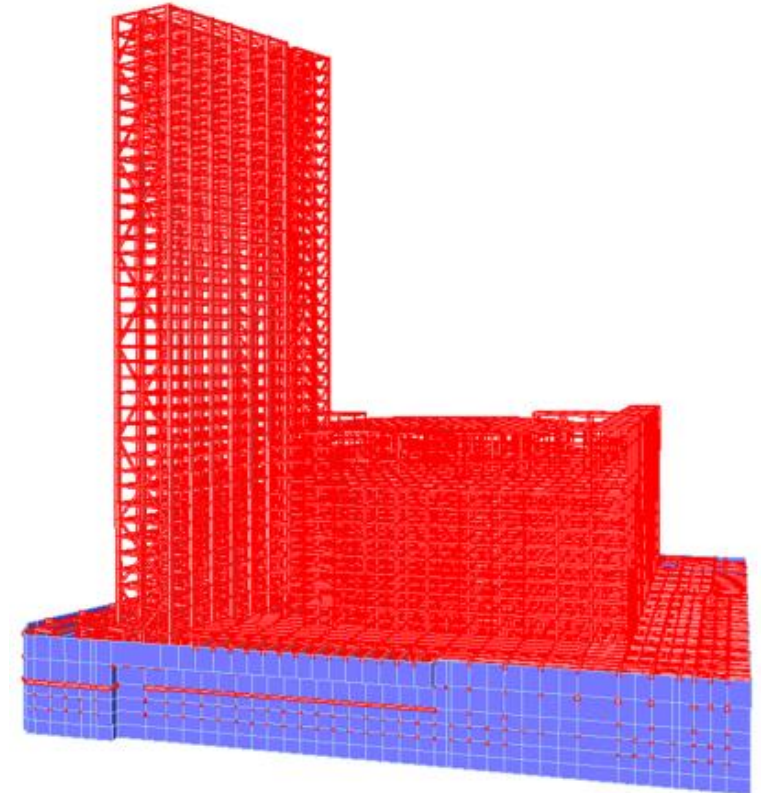
만약  $f_n \approx f_p$  이면,  $\Rightarrow$  공진(Resonance)발생



# 진동 해석

## ■ 3차원 구조해석 모델

- 사무동과 판매동 모델링
- 질량: 고정하중 + 0.25x적재하중
- 진동모드 파악을 위한 모드해석 수행
- 태보 추정 가진원 하중 생성
- 시간이력해석: 12층 태보실에 하중 적용

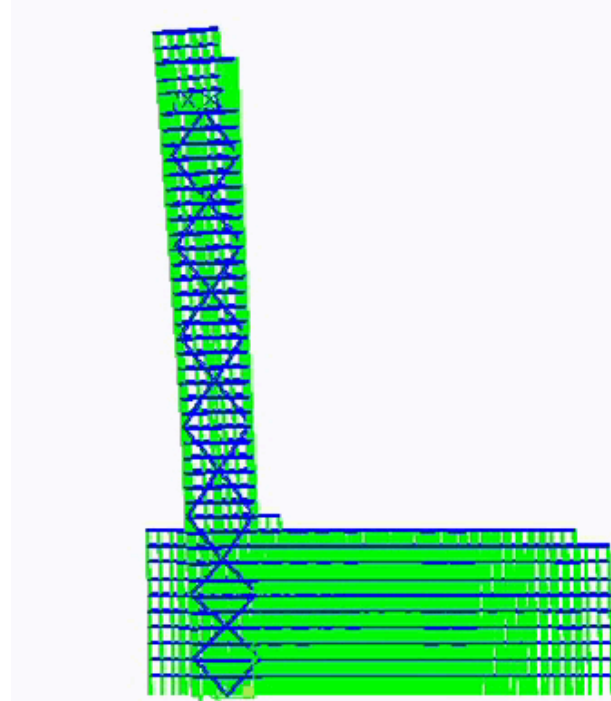


# 진동 해석

## ■ 모드 해석

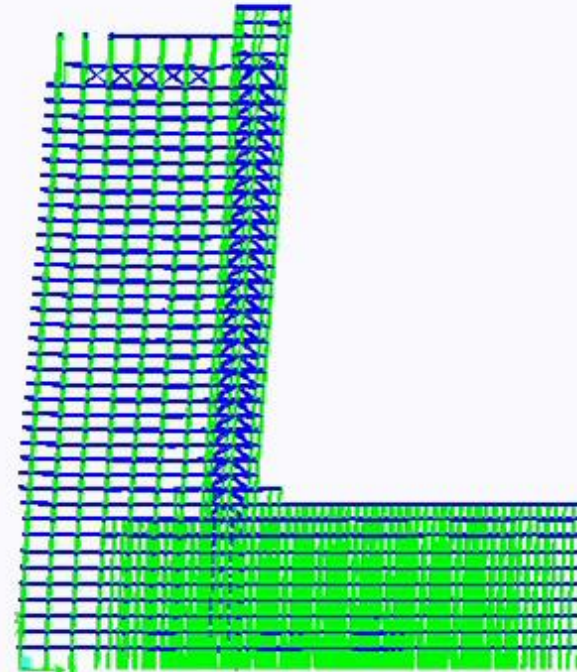
※ 진동의 크기는 이해를 돕기 위해 최대한 증폭시켰음.

Mode 1



period = 5.240 sec  
frequency = 0.19 Hz

Mode 2



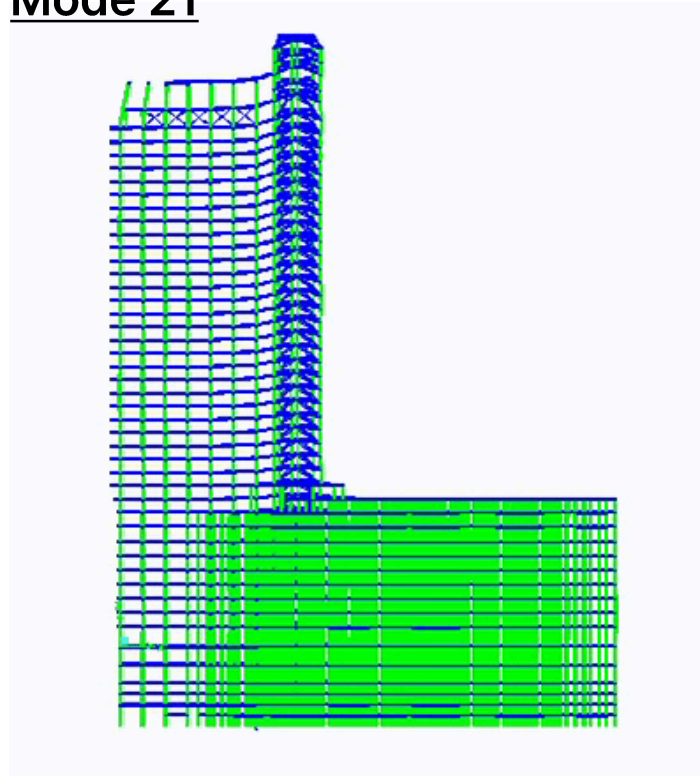
period = 4.632 sec  
frequency = 0.22 Hz

# 진동 해석

## ■ 모드 해석

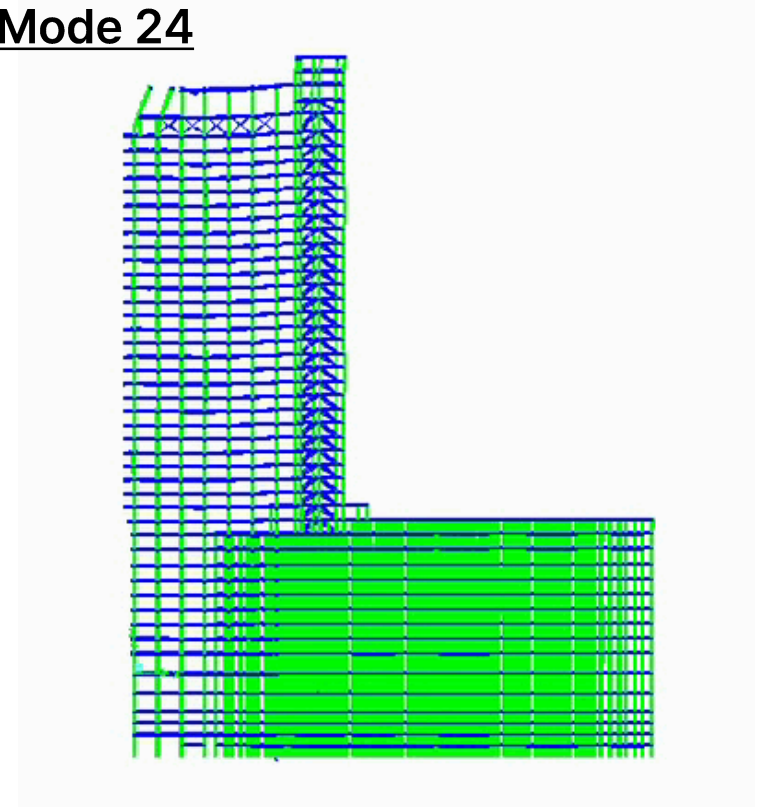
\* 진동의 크기는 이해를 돕기 위해 최대한 증폭시켰음.

Mode 21



period = 0.414 sec  
frequency = 2.42 Hz

Mode 24



period = 0.370 sec  
frequency = 2.70 Hz

# 해석 모델 분석결과 수직진동 해석 (하중생성)

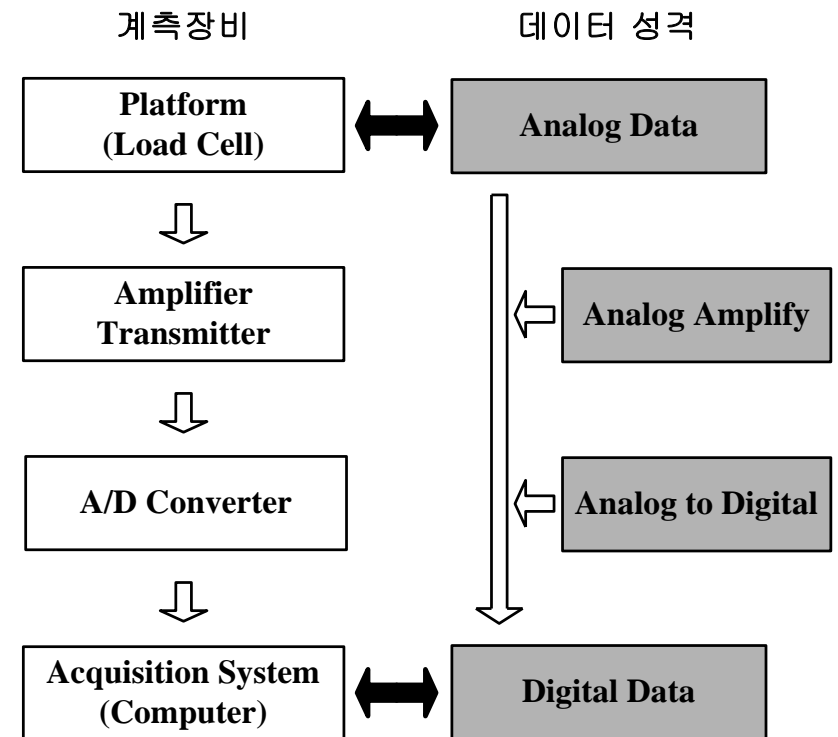
- 태보 동작 구분 - 기마자세, 팔 뻗기, 무릎 차기, 발 차기, 제자리 뛰기, 다리 벌려 뛰기 등으로 구분



# 해석 모델 분석결과 수직진동 해석 (하중생성)

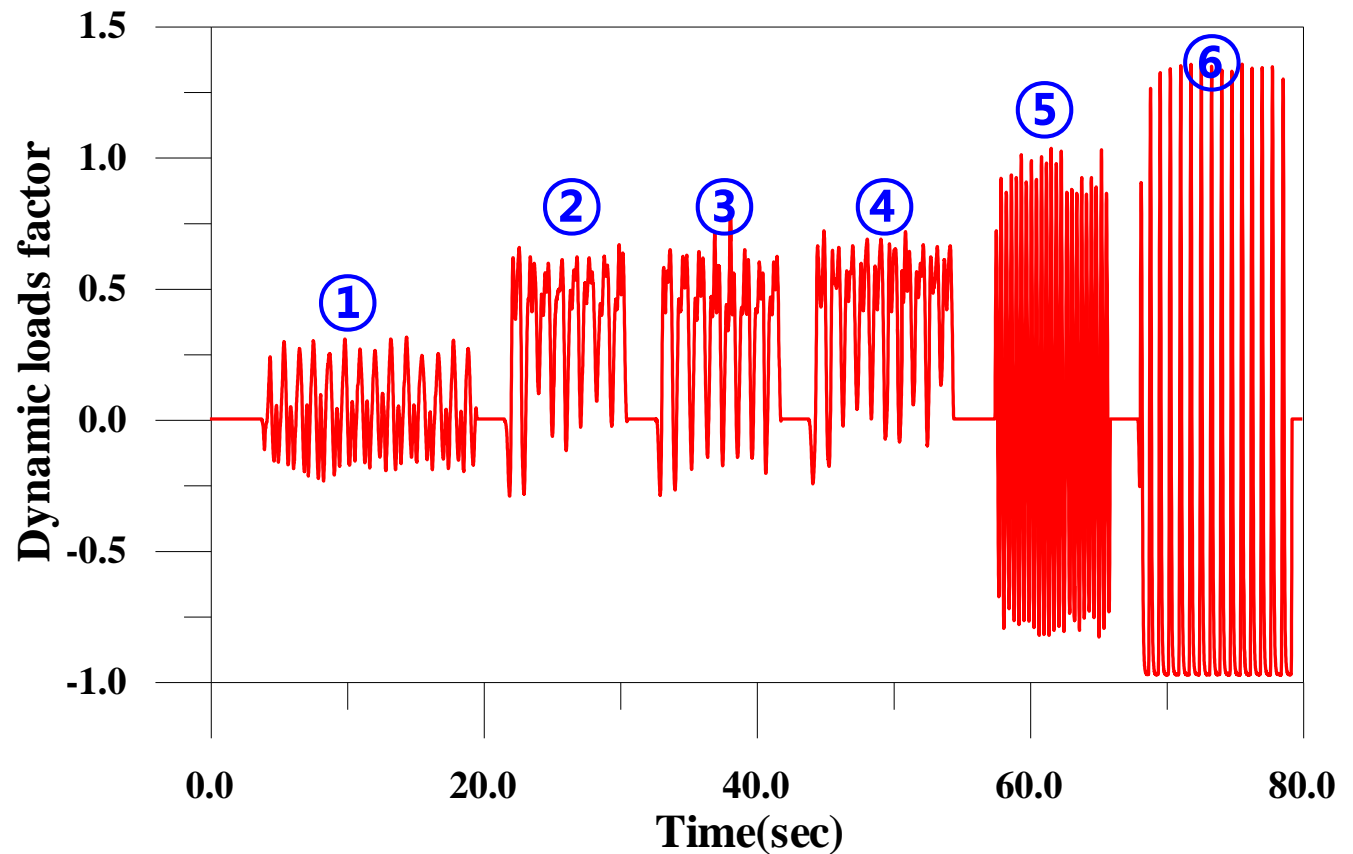
## ■ 계측장비 및 계측 프로세스

로드셀, Transmitter, CB 68LP, A/D 변환기 등

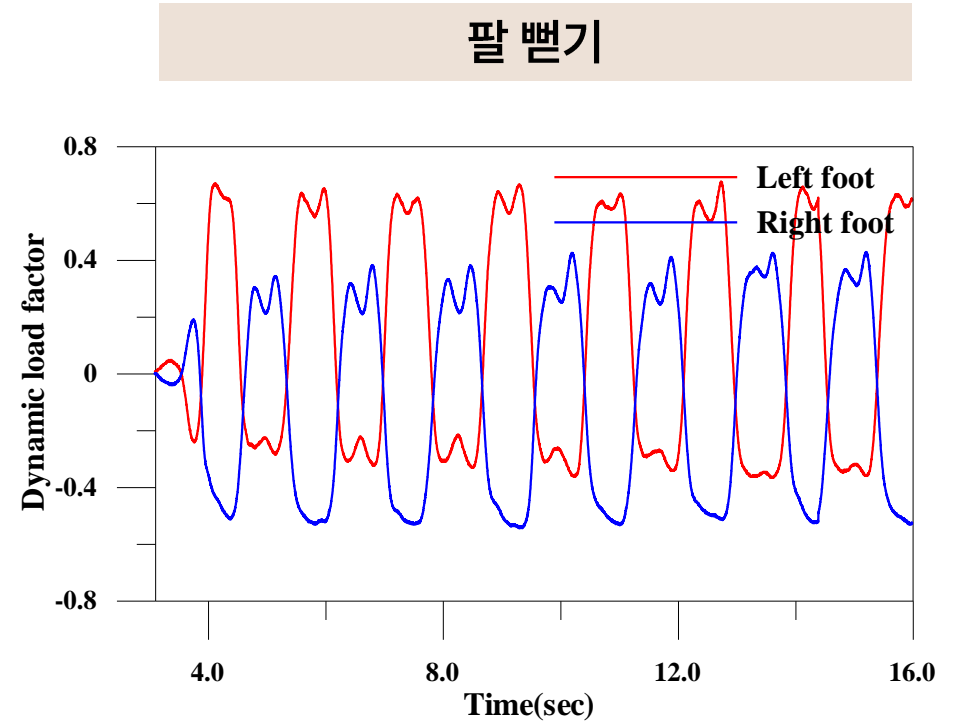
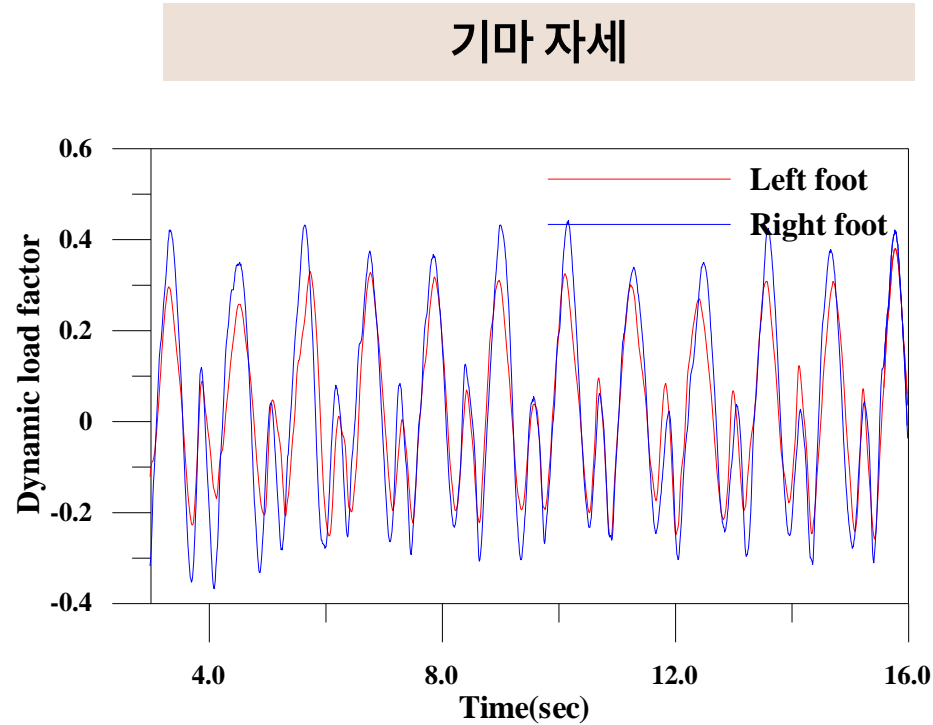


# 해석 모델 분석결과 수직진동 해석 (하중생성)

- ① 기마 자세
- ② 팔 뻗기
- ③ 무릎 차기
- ④ 앞으로 발차기
- ⑤ 제자리 뛰기
- ⑥ 좌우로 다리 벌려 뛰기



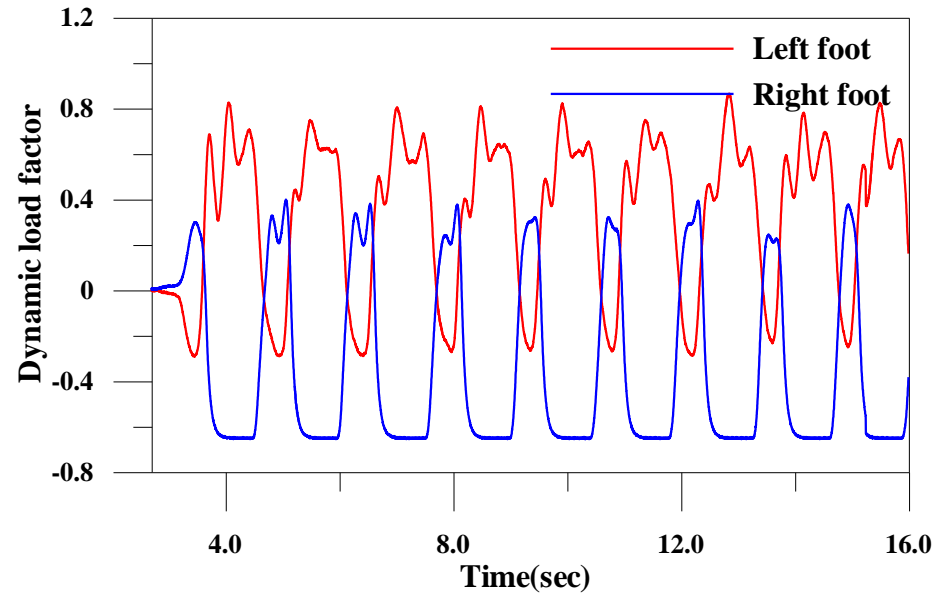
# 해석 모델 분석결과 수직진동 해석 (하중생성)



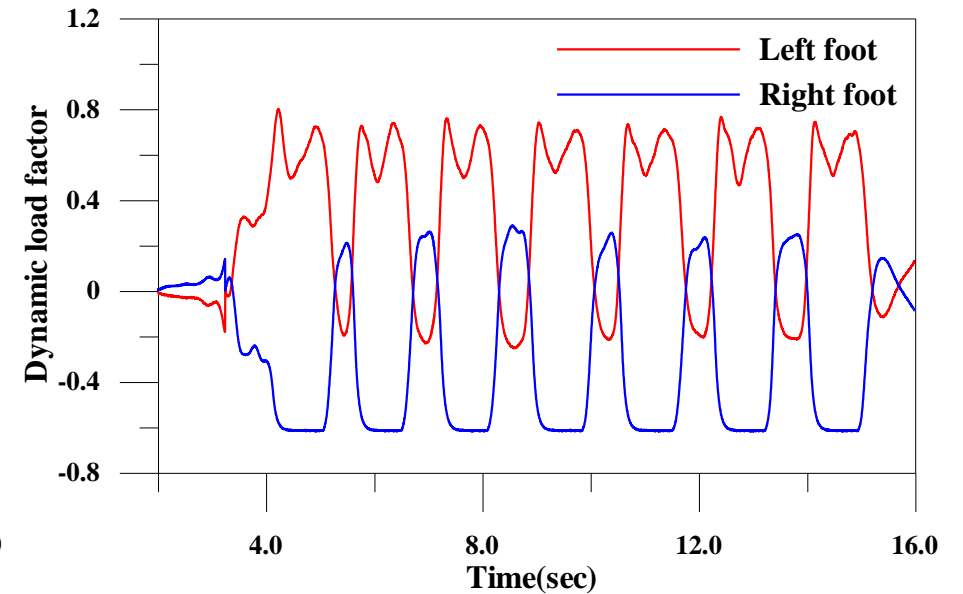
- 기마 자세- 비교적 동등하게 몸무게가 좌/우측 발에 지지
- 팔 뺀기- 좌측 발에 몸을 지지하면서 오른팔을 뺀는 동작

# 해석 모델 분석결과 수직진동 해석 (하중생성)

무릎 차기



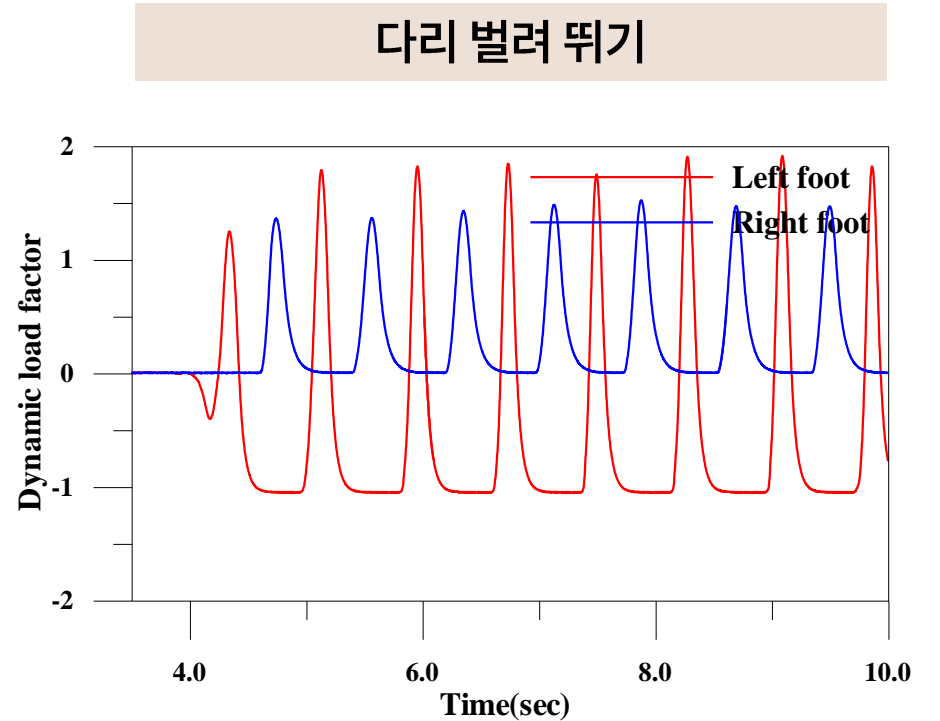
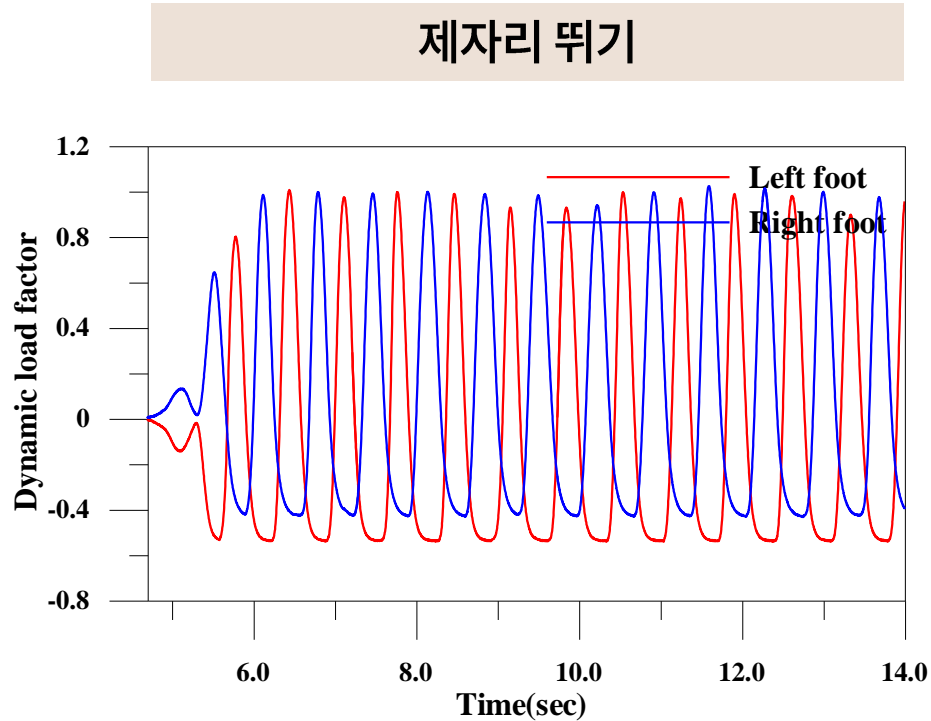
발 차기



- 무릎 차기- 좌측 발에 몸을 지지하면서 앞으로 무릎 차기
- 발차기-좌측 발에 몸을 지지하면서 앞으로 발 차기



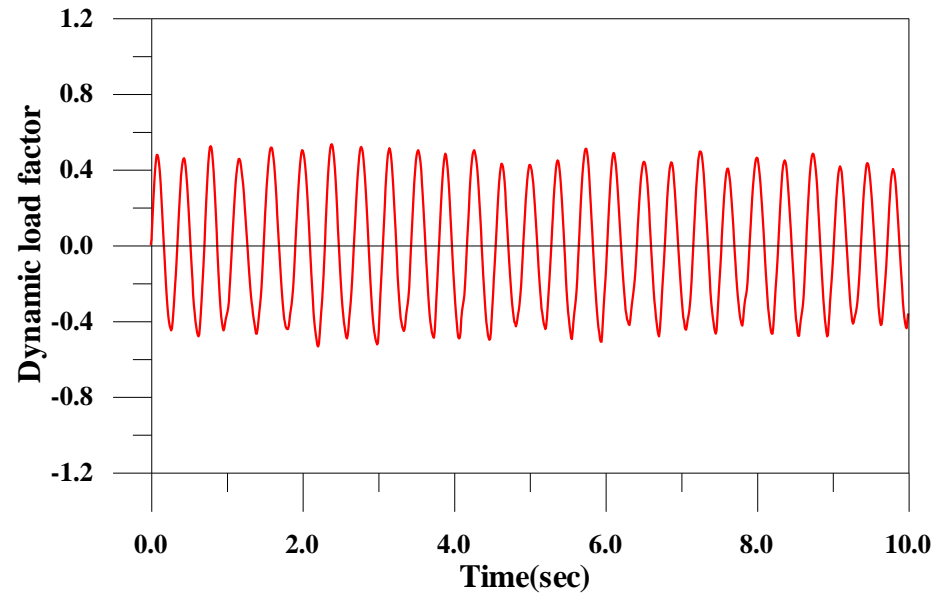
# 해석 모델 분석결과 수직진동 해석 (하중생성)



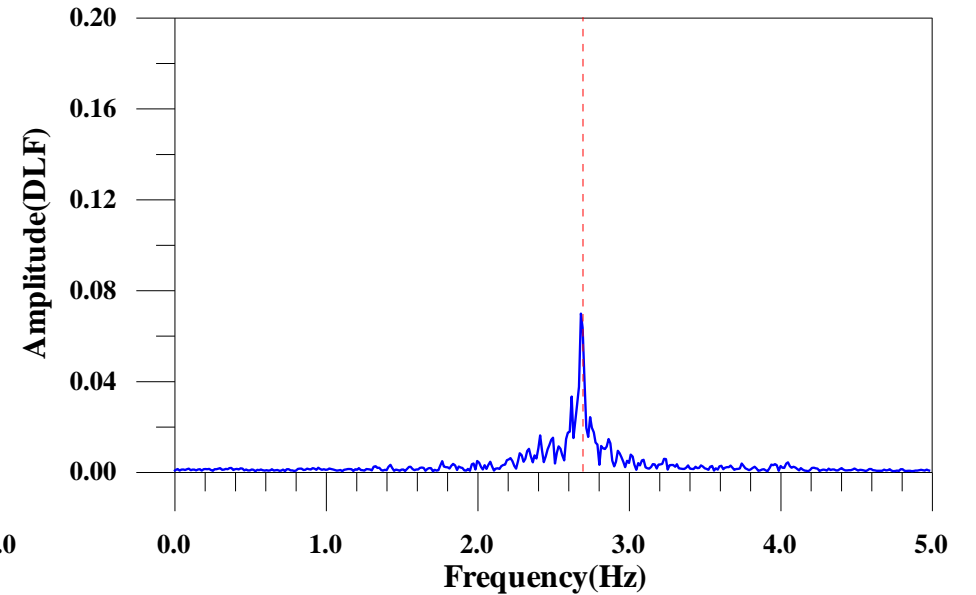
- 제자리 뛰기- 좌측과 우측 발을 번갈아 가며 제자리 뛰기
- 다리 벌려 뛰기- 좌우로 다리를 벌렸다 오므렸다 하며 뛰기

# 해석 모델 분석결과 수직진동 해석 (하중생성)

제자리 뛰기-약하게



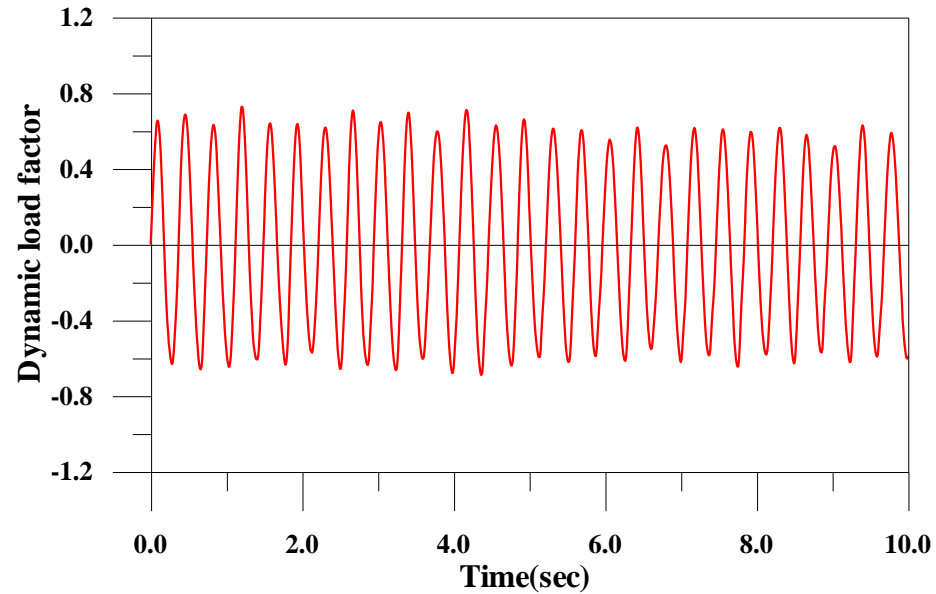
제자리 뛰기 진동수-2.7Hz



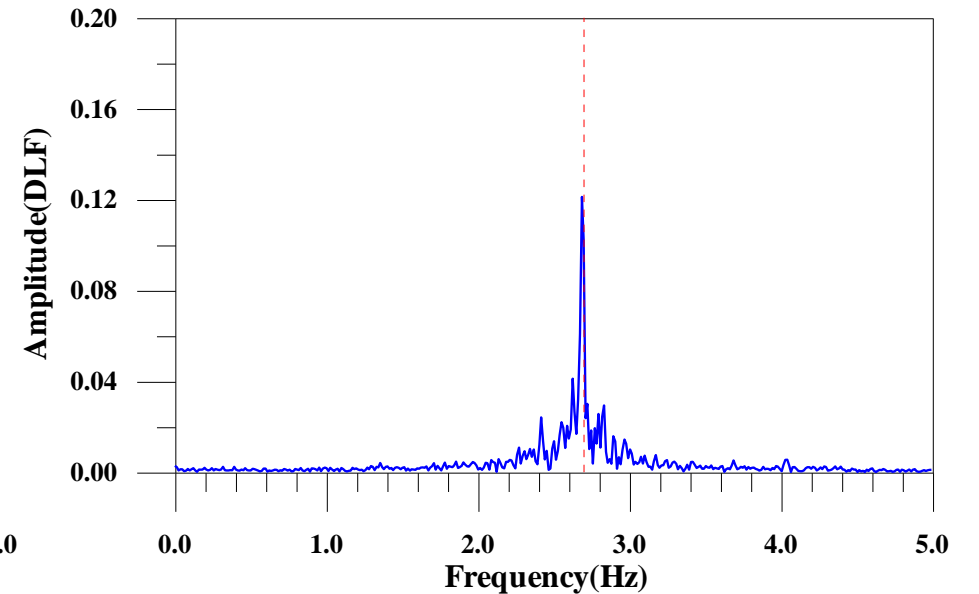
- 약하게 제자리 뛸 경우에 D.L.F 0.4 정도 나타남

# 해석 모델 분석결과 수직진동 해석 (하중생성)

제자리 뛰기-중간



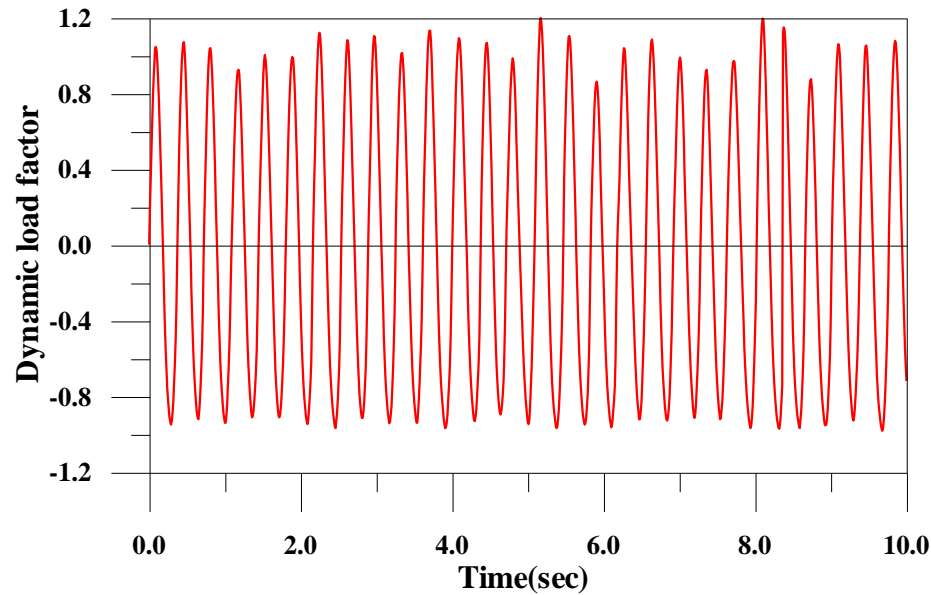
제자리 뛰기 진동수-2.7Hz



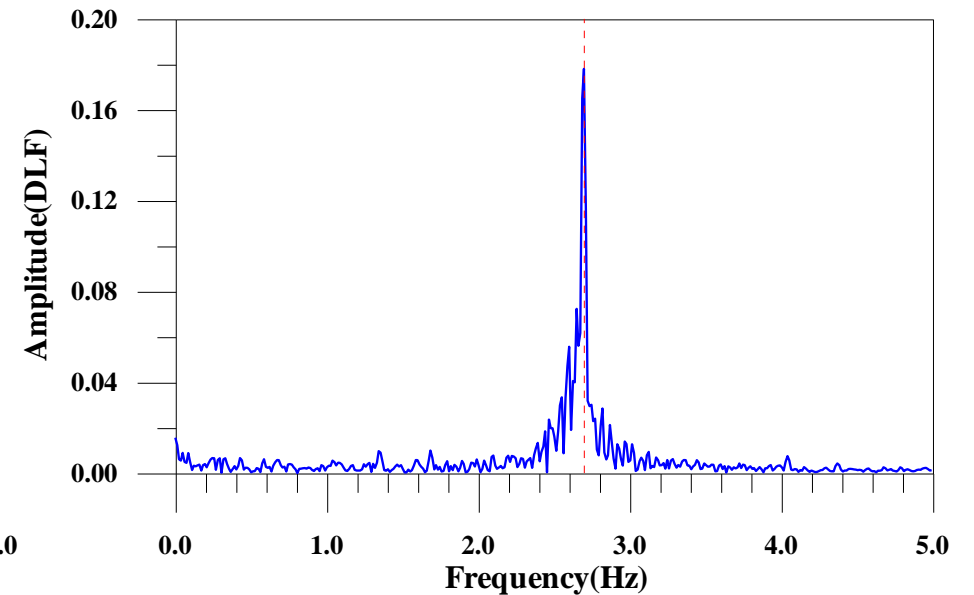
- 중간정도로 제자리 뛸 경우에 D.L.F 0.6 정도 나타남

# 해석 모델 분석결과 수직진동 해석 (하중생성)

제자리 뛰기-강하게



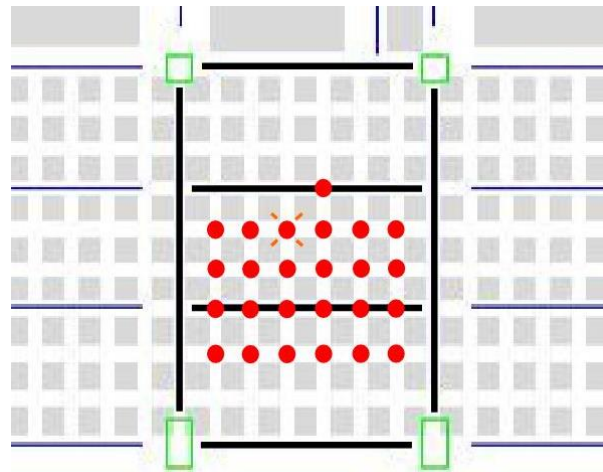
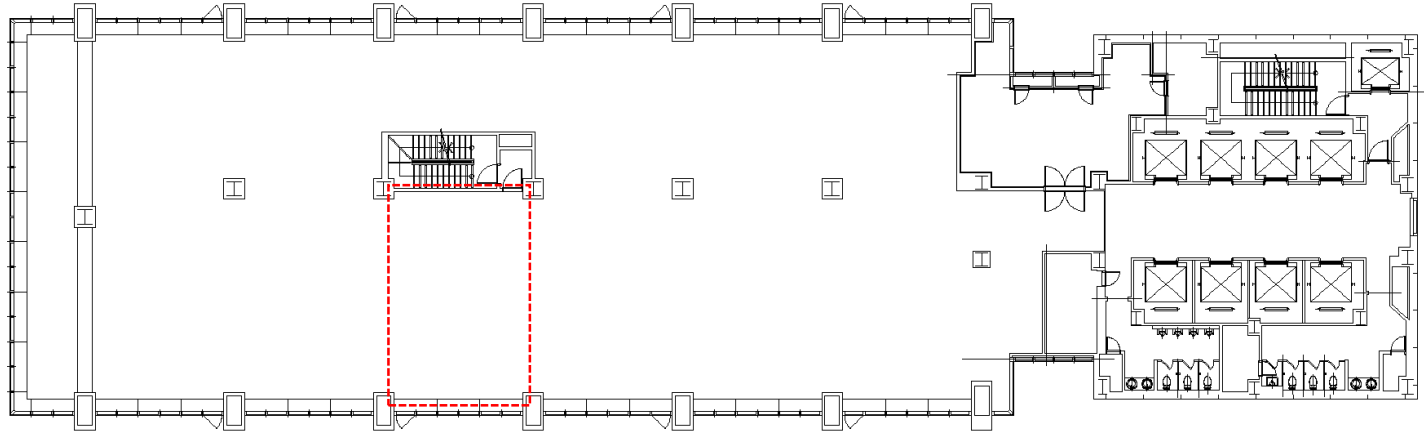
제자리 뛰기 진동수-2.7Hz



- 강하게 제자리 뛸 경우에 D.L.F 1.0 이상 나타남

# 진동 해석

## ■ 시간이력해석 - 하중적용 방법



### 12층 화이트니스 센타

- 태보실
- 24명(25명)이 약 200초 동안 운동 가정
- 사람 1명 무게 = 60kg 가정
- 약하게/중간/강하게 제자리 뛰기 하중 적용

# 진동 해석

## ■ 시간이력해석 - 하중변수

하중 1. - 진동수 2.7Hz 약하게 제자리뛰기

하중 2. - 진동수 2.7Hz 중간세기로 제자리뛰기

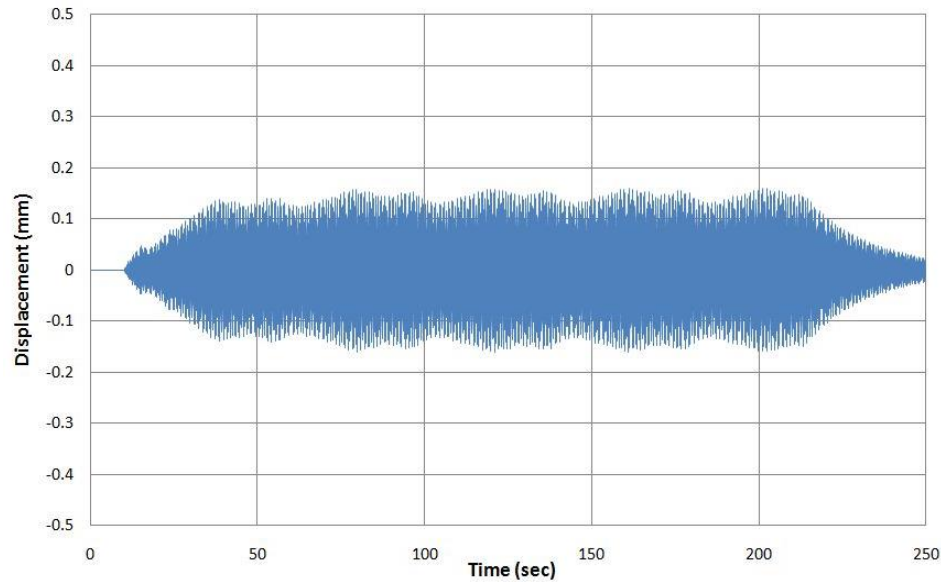
하중 3. - 진동수 2.7Hz 강하게 제자리뛰기

하중 4. - 진동수 2.4Hz 중간세기로 제자리뛰기

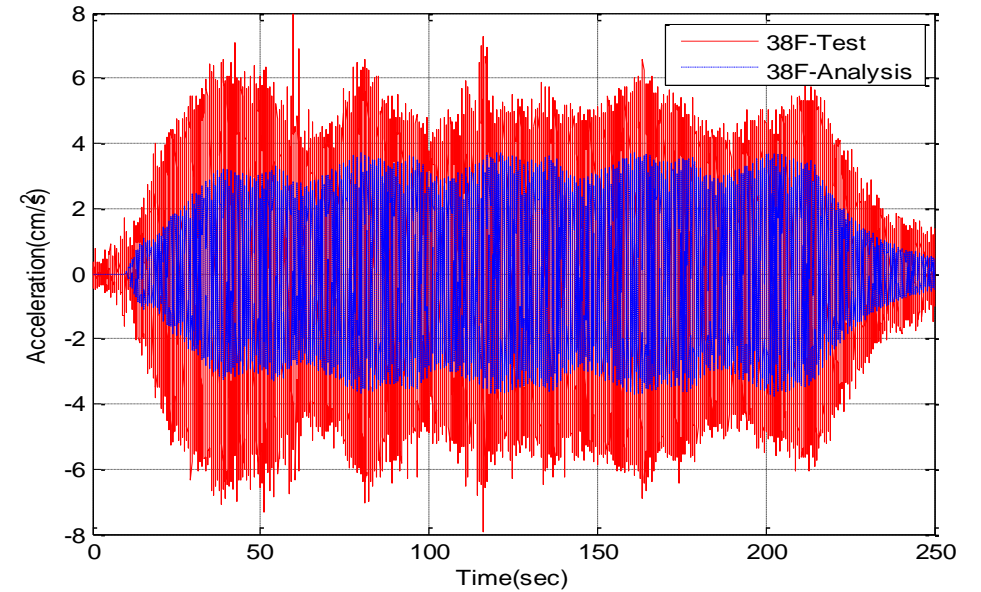
# 진동 해석

## ■ 38층 변위/가속도 검토

### 하중 1. 진동수 2.7Hz 약하게 제자리뛰기



해석결과: 최대변위 = 0.15 mm



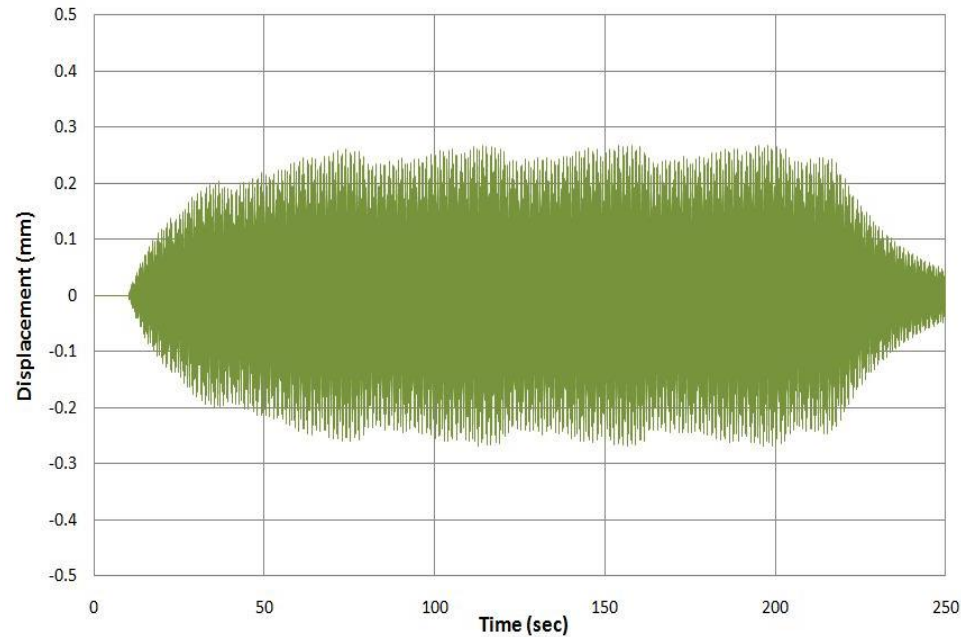
해석결과: 최대가속도 = 3.77cm/s<sup>2</sup>

공개시연 때 계측결과: 최대가속도 = 6.86 cm/s<sup>2</sup>

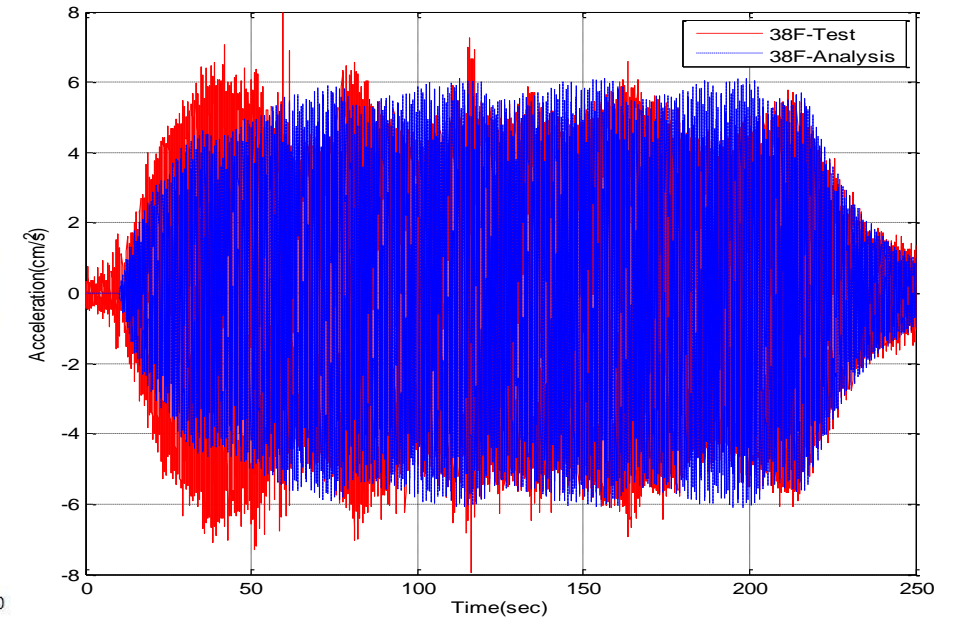
# 진동 해석

## ■ 38층 변위/가속도 검토

### 하중 2. 진동수 2.7Hz 중간세기로 제자리뛰기



해석결과: 최대변위 = 0.27mm



해석결과: 최대가속도 = 6.11cm/s<sup>2</sup>

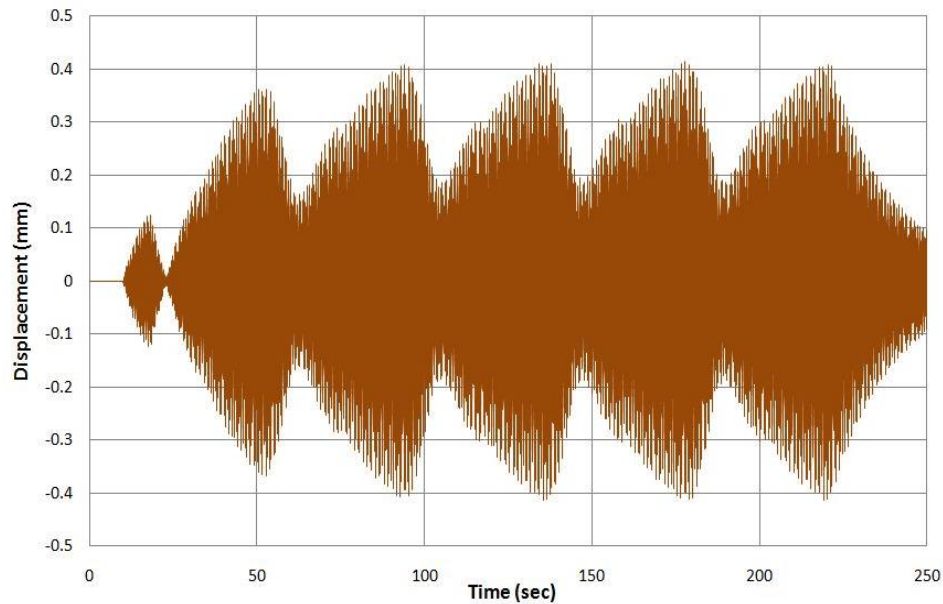
공개시연 때 계측결과: 최대가속도 = 6.86 cm/s<sup>2</sup>



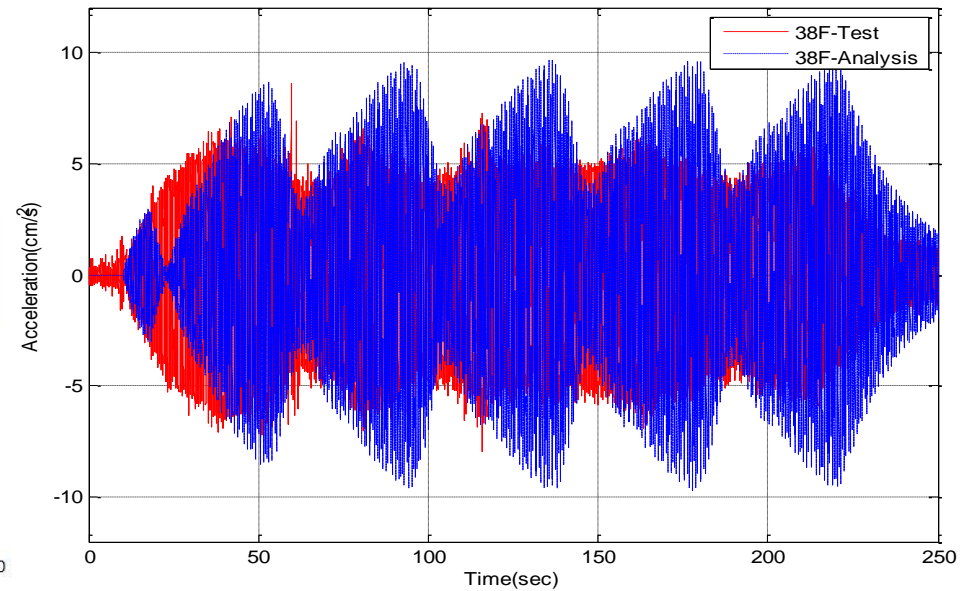
# 진동 해석

## ■ 38층 변위/가속도 검토

### 하중 3. 진동수 2.7Hz 강하게 제자리뛰기



해석결과: 최대변위 = 0.41mm



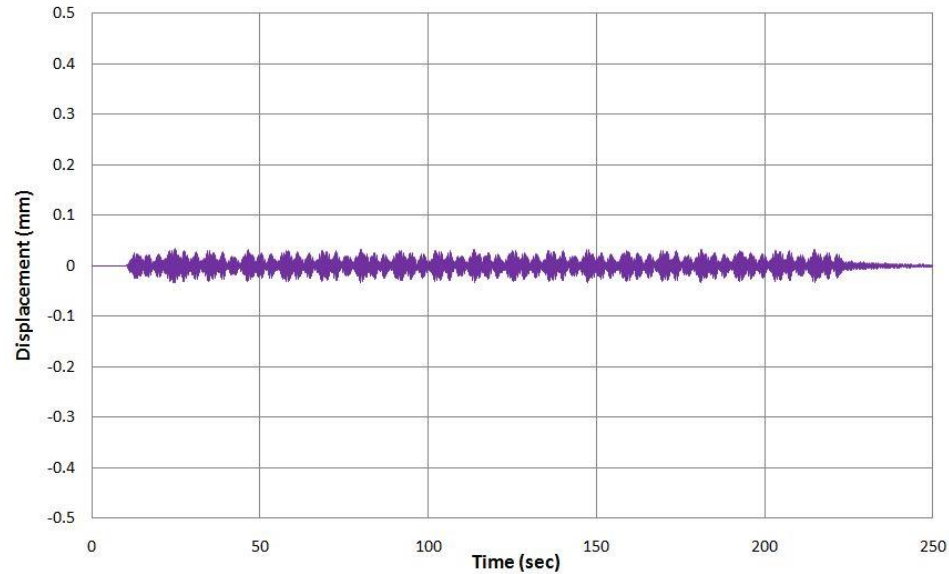
해석결과: 최대가속도 = 9.71cm/s<sup>2</sup>

공개시연 때 계측결과: 최대가속도 = 6.86 cm/s<sup>2</sup>

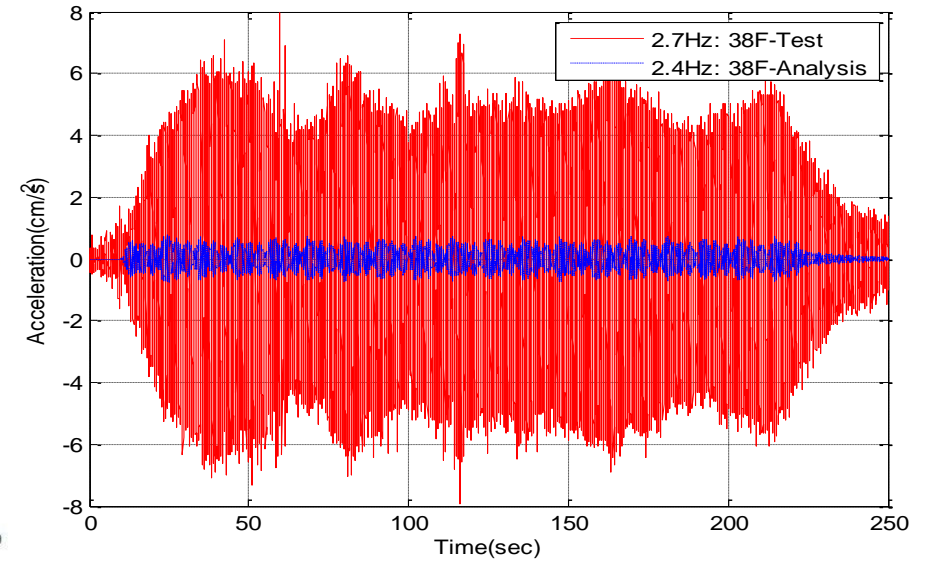
# 진동 해석

## ■ 38층 변위/가속도 검토

### 하중 4. 진동수 2.4Hz 중간세기로 제자리뛰기



해석결과: 최대변위 = 0.03mm



해석결과: 최대가속도 = 0.76cm/s<sup>2</sup>

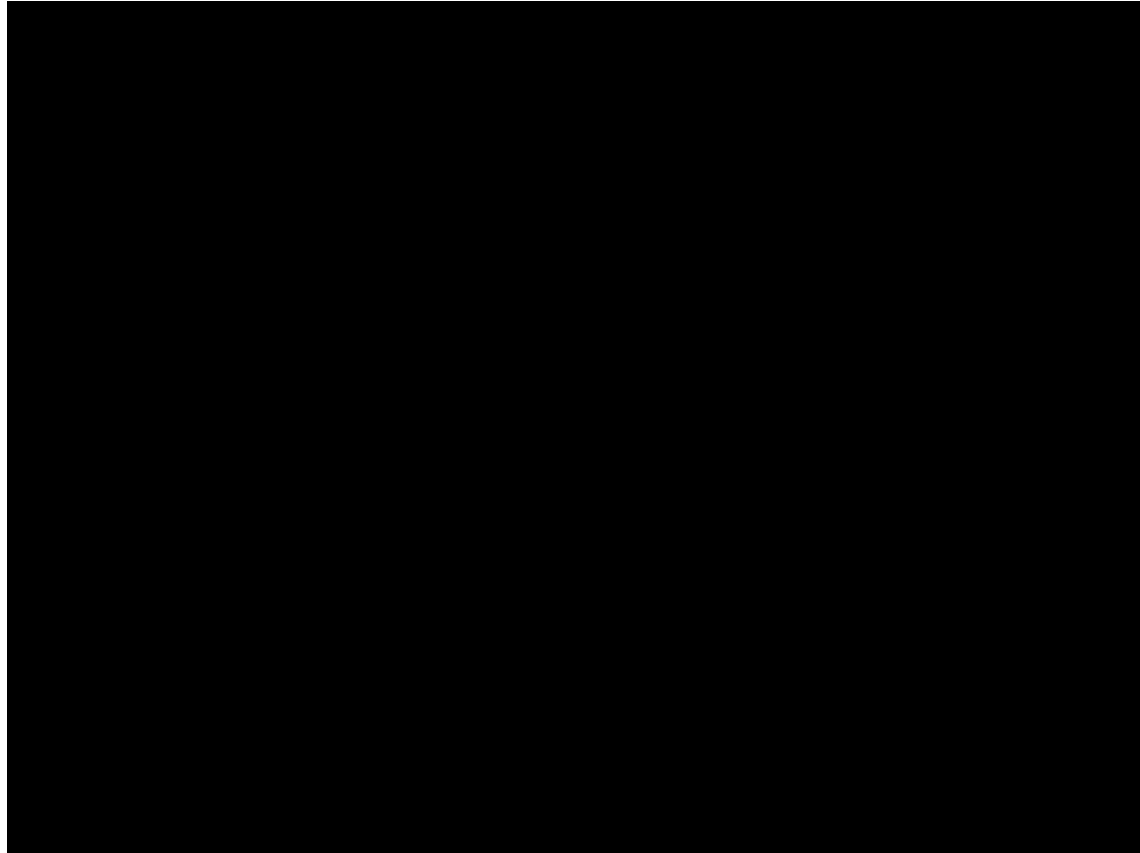
공개시연 때 계측결과: 최대가속도 = 6.86 cm/s<sup>2</sup>

# 5. 결론 및 대책수립

- 해외사례
- 연구내용 종합 결론
- 진동방지 대책

# 해외사례

## Milenium Bridge Opening Event



# 연구내용 종합 결론

## ■ 정밀안전진단 결과

- 시설물의 안전에 관한 특별법의 세부 지침에 따라 구조적 안전성을 검토한 결과, **진동사고에 따른 구조적 결함은 전혀 발생하지 않아 안전함. (B 등급)**

## ■ 진동원인 및 대책

(1) 진동 원인 : 12층 피트니스 센터에서 수행된 집단 리듬운동이 테크노마트의 수직 고유진동수인 2.7Hz와 공진 현상을 발생시켜 수직 진동을 증폭시킴. (최대진폭 0.5 mm 이하)

(2) 향후 대책

- 진동저감장치 활용
  - Hybrid 제진장치
- 12층 바닥판 방진공사
- 수평진동 : 능동형 제진장치(AMD)  
수직진동 : 수동형 제진장치(TMD)

# 진동방지대책 Hybrid 제진장치의 개념



# 진동방지대책 Hybrid 제진장치의 개념



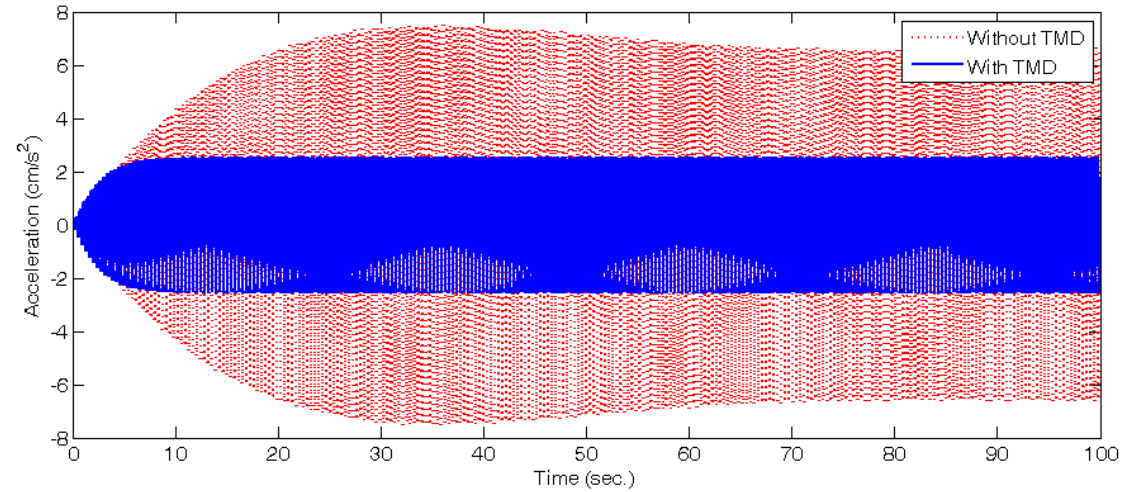
# 진동방지대책 Hybrid 제진장치의 개념



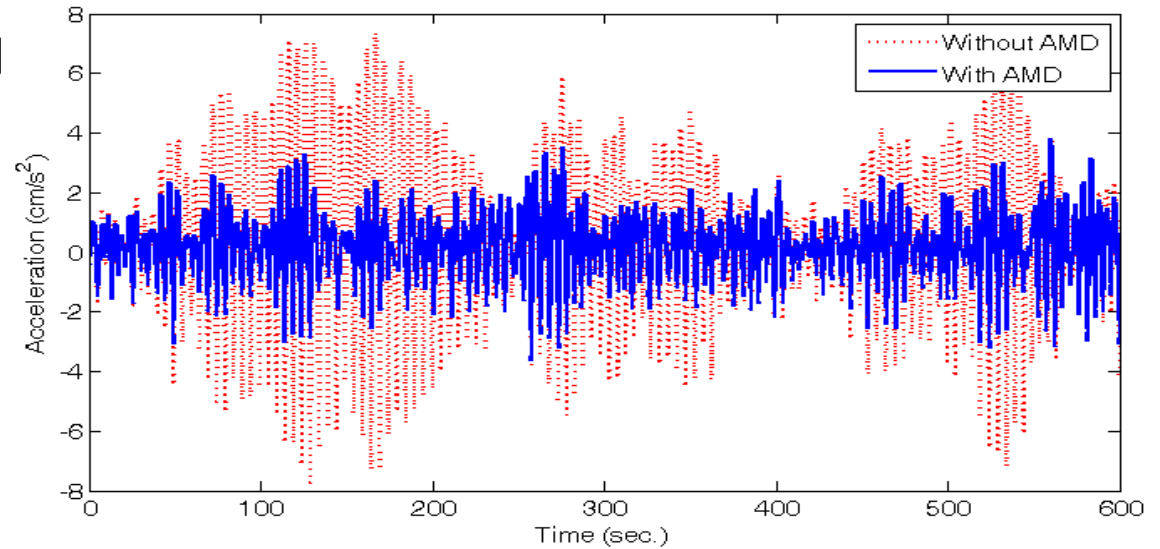


# 진동방지대책 Hybrid 제진장치의 개념

수직방향 제어 시



수평방향 제어 시



감사합니다.