보고서 요약서

<table>
<tr><td>과제 고유 번호</td><td>15TBIP-C096525-01-000000</td><td>해당 단계
연구 기간</td><td>2015.04.27.~
2017.04.26</td><td>단계구분</td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구사업명</td><td>중사업명</td><td colspan="4">국토교통기술사업화 지원사업</td></tr>
<tr><td>세부사업명</td><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구과제명</td><td>대과제명</td><td colspan="4">대형 구조물의 건전성 실시간 평가를 위한 통합 모니터링 시스템 개발</td></tr>
<tr><td>세부과제명</td><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구책임자</td><td rowspan="2">김 선 규</td><td>해당단계
참여
연구원 수</td><td>총: 명
내부: 명
외부: 명</td><td>해당단계
연구개발비</td><td>정부: 천원
기업: 천원
정부 외: 천원
계: 천원</td></tr>
<tr><td>총 연구기간
참여
연구원 수</td><td>총: 17 명
내부: 17 명
외부: 0 명</td><td>총 연구개발비</td><td>정부:719,000천원
기업:526,000천원
정부 외: 천원
계:1,245,000천원</td></tr>
<tr><td>연구기관명 및
소속 부서명</td><td colspan="3">(주)마이다스아이티 건축엔지니어링팀</td><td>참여기업명
(주)글로비즈, (주)포스코건설</td><td></td></tr>
<tr><td>국제공동연구</td><td colspan="3">상대국명:</td><td>상대국 연구기관명:</td><td></td></tr>
<tr><td>위탁연구</td><td colspan="3">연구기관명:</td><td>연구책임자:</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="4">요약</td><td>보고서 면수: 103</td><td></td></tr>
</table>

- 표준 SHM 시스템 제안
- SHM 상태평가시스템
- 국산화 장비 제작 및 목표성능 만족
- 모니터링 웹운영 프로그램
- 모니터링 장치 및 기법 특허출원
- 현장 적용 및 검증

<table>
<tr><td>연구의
목적 및 내용</td><td>▪ 구조물의 안전 확인이 가능한 상시 모니터링 시스템 개발.
▪ 상시 모니터링 시스템 중 플랫폼을 구성하는 정적 & 동적 장비와(Static & Dynamic Hardware) 소프트웨어의 국산화 개발.
▪ 계측데이터를 활용한 손상추적 및 강성저하 평가기법 개발.
▪ 실제 현장 적용을 통한 시스템 검증.</td></tr>
<tr><td>연구개발성과</td><td>▪ 표준 SHM 시스템 제안 (학술발표논문1건, 전문가평가)
▪ SHM 상태평가시스템 (SW 등록 1건, 학술발표논문1건)
▪ 국산화 장비 제작 및 목표성능 만족 (공인인증 등)
▪ 모니터링 웹운영 프로그램 (SW 등록 1건, 학술발표논문1건)
▪ 모니터링 장치 및 기법 특허출원 (특허출원 3건)
▪ 현장 적용 및 검증 (TEST BED 1건)</td></tr>
<tr><td>연구개발성과의
활용계획
(기대효과)</td><td>▪ SHM 시스템 기술 발전 및 품질 향상
▪ 모니터링 시스템 구축 방향 제시
▪ 수입에 의존하던 장비 국산화 및 성능 향상</td></tr>
<tr><td>핵심어
(5개 이내)</td><td>대형 구조물 | 구조 모니터링 | 상태평가 | 데이터로거 | 플랫폼</td></tr>
</table>

〈 SUMMARY 〉

Purpose & Contents	▪ Development of real-time Structural health monitoring system. ▪ Domestic production of static & dynamic hardware and software which form monitoring system platforms for structures. ▪ Development of evaluating methods using monitoring data. ▪ Field test and verification.				
Results	▪ Proposal of standard SHM system. ▪ Evaluating system with SHM. ▪ Domestic production of hardware and satisfying performance. ▪ SHM web program. ▪ Patent of shm hardware and method. ▪ Field test and verification.				
Expected Contribution	▪ Development of technology and quality improvement of SHM system. ▪ Proposal of SHM plan. ▪ Domestic production of shm hardware.				
Keywords	Large structure	SHM	Condition evaluation	Data Logger	Platform

〈 CONTENTS 〉

1. Introduction ····· 05
2. Technology Development Status ····· 07
3. Contents and Results ····· 16
4. Attainments ····· 94
5. Application ····· 95
6. Abroad Technologies Information ····· 96
7. Security level ····· 97
8. Equipment Status ····· 98
9. Safeguard ····· 99
10. Record of a research ····· 100
11. ETC. ····· 101
12. References ····· 102

〈 목 차 〉

1. 연구개발과제의 개요 ····· 05
2. 국내외 기술 개발 현황 ····· 07
3. 연구 수행 내용 및 성과 ····· 16
4. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도 ····· 94
5. 연구개발성과의 활용 계획 ····· 95
6. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보 ····· 96
7. 연구개발성과의 보안등급 ····· 97
8. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황 ····· 98
9. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적 ····· 99
10. 연구개발과제의 대표적 연구 실적 ····· 100
11. 기타 사항 ····· 101
12. 참고 문헌 ····· 102

제1장. 연구개발과제의 개요

1. 연구개발 목적

- 구조물의 안전 확인이 가능한 상시 모니터링 시스템 개발.
  - 무분별한 계측 시스템 적용이 아닌, 구조물 상태 및 성능을 정확히 이해할 수 있는 엔지니어 기반의 모니터링 시스템.
- 상시 모니터링 시스템 중 플랫폼을 구성하는 정적 & 동적 장비와(Static & Dynamic Hardware) 소프트웨어의 국산화 개발.
  - 지진 및 강풍 등의 노출을 장시간 받게 되는 빌딩의 구조안전성을 실시간으로 모니터링 하기 위해 장착된 각종 센서의 측정신호를 통합 분석하여 진단할 수 있는 하드웨어와 소프트웨어를 개발.
  - 동적신호 48채널 이상, 정적 100채널 이상의 신호를 실시간 통신으로 수신하여 모니터링 할 수 있는 성능 만족.
- 계측데이터를 활용한 손상추적 및 강성저하 평가기법 개발.
  - 이벤트 발생 시 구조물의 손상추정 알고리즘 개발.
  - 구조물의 성능평가를 통한 강성저하 평가 알고리즘 개발.
- 실제 현장 적용을 통한 시스템 검증.
  - 송도의 포스코사옥에 개발 제품의 적용을 통한 시스템 검증을 실시함.

2. 연구개발의 필요성

- 엔지니어 기반의 모니터링 시스템 적용 필요.
  - 초고층 및 지하연계 복합건축물 재난관리에 관한 특별법에 의해 해당되는 구조물은 구조물 계측설비 시스템을 적용해야 함. 하지만 적용 사례 및 관련 지식 및 경험의 한계로 인해 무분별한 계측 시스템을 적용함으로 인해 본래의 목적을 달성하지 못할 우려가 있기 때문에 구조물 상태 및 성능을 정확히 이해할 수 있는 엔지니어 기반의 모니터링 시스템 지침 제안 필요.
- 고성능 모니터링 장비 및 모니터링 소프트웨어의 국산화 필요.
  - 모니터링 시스템은 고성능의 장비성능을 요구로 하지만, 대부분 외산장비에 의존하고 있어서 가격이 높을 뿐만 아니라, 관련된 기술지원을 받기가 어려운 상황이기에 고성능 장비의 국산화 필요함.
  - 실시간으로 종합적인 분석이 가능한 웹기반 소프트웨어 개발을 통해 계측데이터를 효과적으로 활용.
  - 구조물의 변형시, 동일 조건에 의한 분석을 위하여 다수의 채널 신호를 분석할 수 있는 성능이 필요함.
- 구조물 상태 평가 기법 필요
  - 구조물 상태 평가 자동화를 위해 패턴인식 기법 등을 이용한 손상추정 알고리즘 필요함.
  - 손상추정 알고리즘의 보완을 위해 강성저하 평가 알고리즘 개발 필요.
- 장비 성능 검증 및 실무 적용확인.
  - 테스트 베드를 통한 시스템 검증 필요.

3. 연구개발 범위

- 표준 SHM 계측 시스템 제안.
  - 계측 센서의 종류 및 요구사양 제안.
  - 구조물 계측 수준 제안.
  - SHM 계측 최적 위치 선정 방법 제안.
  - SHM 계측 시스템 설정 제안.
- 표준 SHM 모니터링 시스템 제안.
  - 계측 데이터 분석 및 관리 시스템 개발 아이템 제안.
  - SHM 시스템 구축을 위한 엔지니어링 해석 및 분석 제안.
  - 계측 종류별 평가기준 제안.
  - 계측 데이터 분석 처리 기법 제안.
- 구조물 실시간 상태평가 시스템 개발.
  - 손상 추정 기법 개발 및 예제 구조물 적용.
  - 강성저하 추정기법 개발 및 예제 구조물 적용.
  - 상태 평가 시스템 지침 제안.
  - 상태 평가 프로그램 등록.
- 동적 / 정적 데이터 로거 제작.
  - 동적범위 130 dB.
  - 동시계측 10 ms
  - 계측채널수 동적 48ch, 정적 100ch
  - 내전자파 통과
- 모니터링 웹 프로그램.
  - 실시간 차트 처리 수 20.
  - 주파수 분석 라인수 300,000
  - 접근권한 제어 4class 이상
  - 원격 접근 및 경고 발생
- 현장 적용 및 시방서.
  - 현장 TEST BED실시.
  - 시방서 작성.

제2장. 국내외 기술 개발 현황

1. 모니터링 시스템

가. 고층건축물 구조안전성 및 사용성 장기계측시스템을 이용한 상시 안전진단기술 개발
- 박흥신, 김승진, 송동엽, 홍성걸, 김기수, 이충국 등, 한국시설안전기술공단, 2001

(1) 마이크로 측정치의 매크로 변환 가능성 확인
(2) St-Id체계 기반 계측계획 방법론 확립
(3) 매크로용 광섬유 센서 시스템 개발
(4) 저주파용 가속도 센서 시스템 개발
(5) 균열감지용 AE센서 시스템 개발

나. GPS를 이용한 고층 건물의 풍응답 모니터링
- 박효선, 손흥규, 김일수, 박재환, 대한건축학회, 2005

(1) 계측건축물은 66층 주상복합건축물이며, 횡력저항 시스템은 철근콘크리트 전단벽-아웃리거 시스템이다.
(2) 기지국 거리에 따른 오차범위를 정량적으로 분석하고 모형실험을 통하여 GPS를 이용한 변위 계측 및 모니터링 시스템의 가능성을 검증하고자 하였고, 그 검증된 변위 모니터링 시스템의 가능성을 시공된 초고층 주상복합 건물의 풍하중에 의한 3차원 변위 이력 모니터링에 적용하고 분석.
(3) 단층 자유진동 실험 모형에 GPS 수신기와 레이저 변위계를 설치하여 자유진동시 두 계측기에 의한 변위 이력을 비교

다. 상시진동을 이용한 강 구조물의 건전도 모니터링 시스템
- 허광희, 이규, 윤현도, 대한건축학회 학술발표 논문집, 2004

(1) 구조물의 장시간 건전도 모니터링 시스템의 구현에 적합하도록 상시진동을 이용하는 자연가진기법과 다중 입출력과 경감쇠를 갖는 구조물의 동적 특성 분석에 적합한 알고리즘인 고유계 구현기법을 조합하여 효율적인 감시 시스템을 구성하고자 하는 실험이다.
(2) 상시 진동에 의한 구조물의 손상 검출을 위해 일반적인 건물이 갖는 동적 특성을 반영할 수 있도록 3개의 고유 주파수가 10Hz 내외로 배치되도록 축소 규모로 제작되어 있다.
(3) 손상 검출 알고리즘인 고유 값의 변화량에 근거한 손상 검출 기법은 알고리즘의 적용이 간편하여 사전점검이나 약식에 의한 점검에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단하고 있다.

2. 동특성 관련

Chen (1995)에 따르면, 철골 실험체에 발생한 손상이 설계하중만으로도 파괴 될 수 있는 상태임에도, 고유진동수의 변화는 5% 미만으로 발생하였는데 이것은 구조물 손상 외, 다른 요인,

예를 들어 온도나 하중의 세기 등에 의한 진동수 변화와 명백하게 분리하기 어려운 점이 있다.

유은종(2012)에 따르면, 서귀포 2002 월드컵 경기장을 계측한 결과, 가속도의 RMS 값 변화에 따른 고유진동수를 나타내었다. 가속도 RMS값이 0.9 cm/sec2에서 5.39 cm/sec2로 증가할 때 1차와 2차 고유진동수는 각각 4.26%와 4.75%가 감소하였다.

또한 온도가 27.8도에서 0.6도로 27.2가 감소하는 동안 1차~4차 고유진동수는 2.5%, 4.3%, 5.0%, 4.9% 증가하였다.

3. 관련 기술 특허 동향

가. 국내특허 분석

국내 특허 출원은 4개의 키워드 군으로 검색을 실시하였음. 서로 중복을 허용하였음.

(1) “구조물*모니터링”은 3,546개의 등록특허가 검색되었음. 통합계측 기술을 활용하는 모니터링 장치에 관한 특허 출원 및 등록 빈도는 매우 낮은 것으로 판단

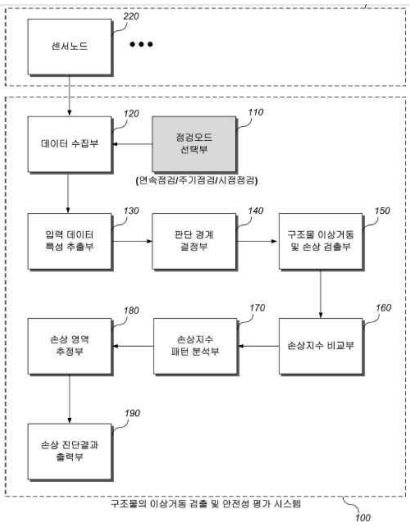
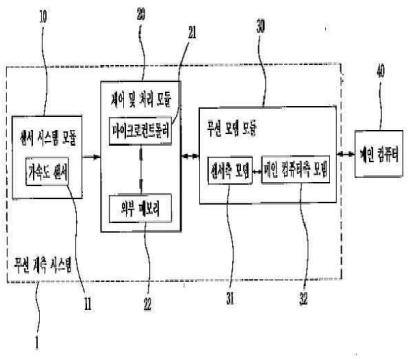
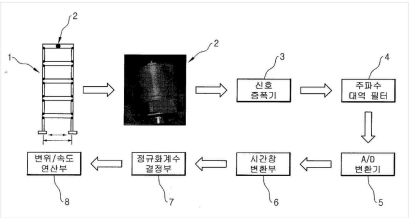
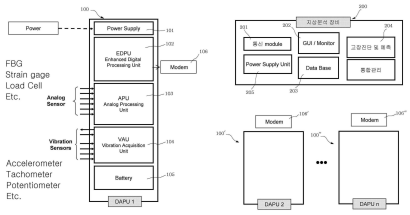
(2) “건전성*모니터링*시스템”에 의해 검색된 특허는 약 219개 정도임. 대부분 “구조물*모니터링”의 검색 결과와 상당히 많이 일치하고 있음. 구별이 되는 특허 가운데 무선 계측센서에 대한 특허가 많이 제시됨. 이 키워드에 의한 특허검색결과로부터 만찬가지로 통합계측기술과 데이터베이스 구축기술을 이용한 모니터링기술 특허출원은 매우 제한적임을 알 수 있음.

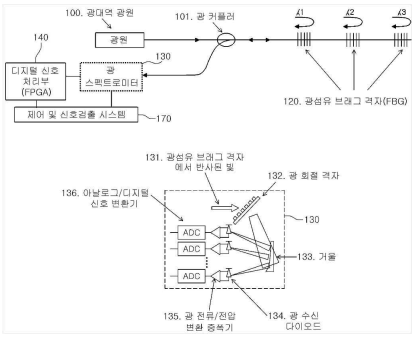
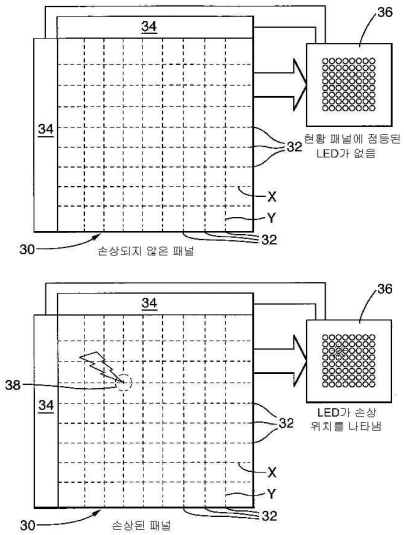
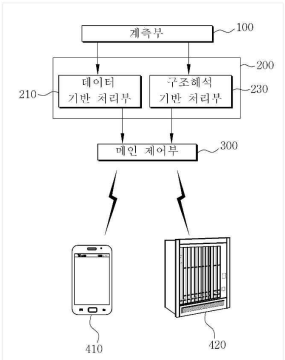
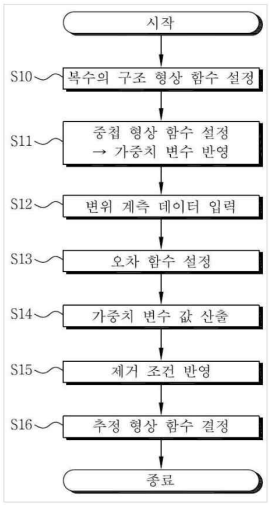
(3) “구조물*모니터링*데이터베이스”의 키워드에 의해 239개의 특허 출원이 검색됨. 데이터베이스가 구조물과 모니터링과 연관이 큰 단어인 관계로 역시 위 두 개의 키워드에 의한 검색 결과와 상당히 많은 부분이 일치하고 있음. 일반화한 특허출원이 많고 변위측정에 관한 특허들이 다수 출원 등록되었으나 이들 역시 통합계측에 의한 모니터링 특허로 활용하는데 청구항의 범위가 제한적으로 판단되었음.

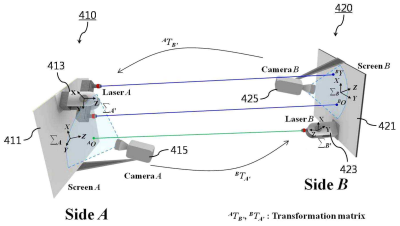
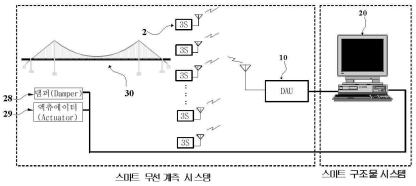
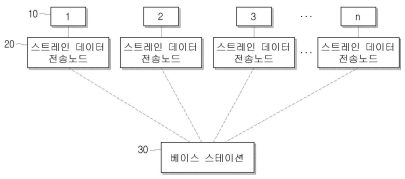
(4) “빌딩*구조물*건전성*모니터링”의 키워드로 81개의 특허가 검색되었음. 유지보수와 관련하여 부품 교체주기를 예측하는 방법 등을 제시하고 있음. 그런데 이러한 방법은 본 연구에서 개발하고자 하는 진단을 위한 고장모드의 데이터베이스라기보다는 신뢰성 해석을 통한 교체주기를 제안하기 위한 데이터베이스임.

키워드	구조물*모니터링	건전성*모니터링*시스템	구조물*모니터링*데이터베이스	빌딩*구조물*건전성*모니터링
특허 등록 수	312	126	239	446

- 주요특허 내용을 정리하면 다음과 같음

No.	출원명 및 출원정보	대표도면	주요내용 및 특징
1	구조물의 이상거동 검출 및 안전성 평가 시스템과 그 방법 한국건설기술연구원 /한국 10-1431237 2014-08-11		대형 사회기반시설물인 구조물의 고주파 진동 응답신호로부터 시간영역 및 주파수영역을 조합 분석하고, 자가 학습 및 패턴인식 기반의 알고리즘에 따라 구조물의 비정상 거동 평가를 수행함으로써 구조물의 연속적 이상거동 시점을 용이하게 추정할 수 있고, 또한, 구조물의 이상거동이 감지될 때마다 감지된 이상거동의 진위를 판별할 수 있고, 센서 노드를 중심으로 하여 손상 영역을 용이하게 추정할 수 있는, 구조물의 이상거동 검출 및 안전성 평가 시스템과 그 방법이 제공함. 입력 데이터 특성 추출부에서 시간영역 신호의 손상 특성 추출을 위해 웨이블릿 변환 및 힐버트 변환을 이용하며, 곡률도를 이용하여 손상지수를 도출하는 것을 특징으로 하는 구조물의 이상거동 검출 및 안전성 평가 시스템. 입력 데이터 특성 추출부에서 주파수영역 신호의 손상 특성 추출을 위해 주요소 분석법(Principal Component Analysis: PCA)을 이용하며, 확률론적 접근법에 기반한 상관계수(Correlation Coefficient: CC) 및 제곱평균 편차(Root Mean Squared Deviation: RMSD)를 이용하여 손상지수를 도출하고, 확률분포를 이용하여 의 사결정을 수행함.
2	멀티미디어부를 이용한 철도차량 또는 선로에 대한 점검장치 및 그 장치를 이용한 점검방법 건양대학교산학협력단 /한국 10-0669070 2009-01-07		멤스(MEMS) 타입의 가속도 센서인 것을 특징으로 하고, 제어 및 처리 모듈은 제반 기능을 수행하는 프로그램이 덤프되 플래시 메모리와 프로그램 실행시 생성 또는 필요한 데이터가 저장되는 데이터 메모리가 내장된 마이크로컨트롤러와 추가적인 데이터 저장 공간을 제공하는 외부 메모리를 포함하는 것을 특징으로 한 본 발명에 의하며 구조물의 모니터링을 위한 동적응답 측정용 무선 계측 시스템을 이용하여 구조물의 동적응답 측정을 위한 모니터링 구현에 있어서 종래 유선 전송시 발생되던 계측 데이터의 왜곡(Distortion)현상이 해소될 수 있고, 또한 초기 설치비용 및 유지관리비용의 절감과 편리한 시스템 관리가 가능해짐
3	구조물의 측정 진동가속도를 이용하여 동적 변위 및 속도이력을 측정하는 측정방법 및 측정장치 서울대학교산학협력단 /한국 10-0972278 2010-07-10		시간창 변화부에 의해 최적시간창 크기(N)로 분할하는 단계; 정규화계수 결정부를 통하여 최적정규화계수를 결정하는 단계; 변위/속도 연산부를 통하여, 현상함수와 상기 현상함수의 1,2 차 미분의 열벡터들을 이용하여 요소강성행렬, 요소질량행렬 및 요소하중벡터를 연산하는 단계; 변위/속도 연산부를 통하여, 상기 요소강성행렬, 요소질량행렬 및 요소하중벡터를 이용하여 하나의 시간창에 대해 측정 진동가속도로부터 동적변위 및 속도 이력의 벡터를 구하는 단계; 및 변위/속도 연산부를 통하여, 상기 구해진 동적 변위의 벡터에서 중앙값에 해당하는 동적 변위 값을 측정 동적 변위 값으로 제시하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는 구조물의 동적 변위 측정방법
4	진동파워를 이용한 구조물의 상탐지방법 한국기계연구원 /한국 10-0997810 2010-11-15		진동파워(vibratory power)를 이용한 구조물의 손상 탐지 방법에 관한 것임. 진동파워(vibratory power)를 이용한 조물의 손상 탐지 방법에 있어서, 계측된 구조물의 가속도 신호를 이용하여 진동파워를 추정하는 방법으로 손상된 부분을 예측하기 위한 새로운 손상지수를 제안함.

No.	출원명 및 출원정보	대표도면	주요내용 및 특징
5	광 스펙트로미터 및 그것을 사용한 구조물 물리량 고속 측정 시스템 국방과학연구원 /한국 10-0965554 2013-03-14		광 스펙트로미터를 사용한 구조물 물리량 고속 측정 시스템에 관한 것으로, 저자기파의 영향을 받지 않는 빛을 이용하여 구조물(터널, 교량, 건축물 등)의 온도, 스트레인 등과 같은 물리적 변화량을 고속 측정하여 실시간으로 구조물의 변화를 모니터링 하는 측정 시스템으로써 광대역 광원, 광커플러, 광섬유 브래그 격자들, 광 스펙트로미터, 디지털 신호처리부(FPGA), 제어 및 신호검출 시스템으로 구성된다. 광 스펙트로미터는 광 회절 격자와 복수개의 광 수신 다이오드 또는 다중파장부할장치와 다중파장 부할 장치의 각 채널에 광 수신 다이오드를 연결하여 구성함.
6	구조 건전성 모니터링 장치 배 시스템즈 피엘시 /영국 10-1286252 2013-07-08		전기적 경로를 구성하는 다수의 전기 전도성 섬유를 포함하는 섬유 강화 복합 재료로 형성되 부품과, 하나 이상의 전기 전도성 경로의 전기적 특성을 모니터링하는 검출기를 포함하며, 전기적 경로는 복합 재료를 통해 이어져 있으며, 검출기의 모니터링에 의해 부품의 구조적 상태를 파정하도록 구성되 구조 건전성 모니터링 장치를 제공함.
7	계측 변위 기반의 구조물 건전도 평가 시스템 고려대학교 산학협력단 /한국 10-1328889 2013-11-06		본 발명은 기존의 가속도계와 변형률계를 사용한 평가 시스템이 아니라 계측된 변위를 기반으로 구조물 건전도를 평가하는 시스템을 개발하는 것에 관한 것으로서, 보다 상세하게는 구조물 건전도를 평가하는데 있어 직접 계측된 변위를 기반으로 구조물의 변형을 추정하고 그로부터 내력 및 응력 등 구조물의 응답을 평가하여 구조물의 건전도를 평가하는 시스템 개발에 관한 것임
8	계측 변위를 이용한 구조물의 변형 형상 추정 방법 및 이를 수행하기 위한 프로그램이 기록된 기록매체 고려대학교 산학협력단 /한국 10-1404027 2014-05-29		최소한의 변위 계측 개수의 데이터를 이용하여 2차원, 3차원적인 구조물의 다양한 형상 변위를 추정하여, 변위 계측 개소 이외의 위치에서도 형상 변위를 추정하고 추정된 변위 모두를 구조적 거동 자료로 활용 가능한 계측 변위를 이용한 구조물의 변형 형상 추정 방법 및 이를 수행하기 위한 프로그램이 기록된 기록매체를 제공

No.	출원명 및 출원정보	대표도면	주요내용 및 특징
9	구조물 변위 측정 시스템 및 방법 한국과학기술원 /한국 10-1191458 2010-10-25		구조물 변위 측정을 위해 조사하는 레이저들의 방향을 제어하여 포인트 위치들을 스크린 내부로 조정할 수 있는 구조물 변위 측정 시스템 및 방법을 제공함. 추기 옵셋 규정에 의거 보다 정확한 구조물 변위 측정이 가능한 구조물 변위 측정 시스템 및 방법을 제공함
10	스마트 무선계측시스템을 이용한 구조물 모니터링 시스템 허광희 /한국 10-0512123 2003-05-27		스마트 무선계측시스템을 이용한 구조물 모니터링 시스템에 관한 것으로서 교량이나 건축물 등과 같은 각 구조물의 모니터링 기술에 사용되는 센서에 스마트 기술을 적용하여 계측기 자체의 계측 기능에 돌발상황의 문제를 보완할 수 있도록 자체 조정기능과 위급상황에서의 데이터 손실을 방지하기 위한 소형저장장치 및 CPU와 전원 보조기능을 구비하고 무선자가획득계측이 가능하며 또한 계측된 데이터가 기간 시설물의 구조적 특성에 적절하게 데이터를 분석하고 평가하여 구조물의 손상 또는 외부의 환경의 영향으로부터 구조물 자신을 보호하고 어떠 위급상황에 능동적인 대처를 하여피해를 최소화하고 인간의 생명을 안전하게 보전하는 구조물 모니터링 시스템으로서 기존의 기간시설물의 모니터링시스템 즉 시설물의 상태평가모니터링보다는 발전된 모니터링 시스템임.
11	기울기 센서를 이용한 구조물 안전 모니터링 시스템 및 모니터링 방법 국민대학교산학협력단 /한국 10-0957187 2008-11-12		구조물에 부착되고 부착된 위치에서의 기울기를 측정할 수 있는 둘 이상의 기울기 센서들; 및 상기 기울기 센서들로 측정한 기울기들로부터 상기 구조물의 상기 기울기 센서들이 부착된 각 위치에서의 응력을 계산할 수 있는 계산 수단을 포함하는 구조물 안전 모니터링 시스템 및 이를 이용한 모니터링 방법에 관한 것임. 본 발명의 구조물 안전 모니터링 시스템 및 모니터링 방법을 이용하면 부착 위치에 제한이 거의 없고 가격이 저렴하기 때문에 안전 여부를 실시간으로 충분히 감시할 수 있는 효과가 있다고 함.
12	연세대학교 산학협력단 하이버스 주식회사 /한국 10-0947042 2008-02-21		구조물 상시 모니터링 시스템을 이루는 구성수단은, 구조물 상시 모니터링 시스템에 있어서, 구조물의 주요 부분에 배치되어 구조물의 진동 또는 응력 신호를 센싱하여 출력하는 스트레인 게이지(strain gauge) 센서, 상기 스트레인 게이지 센서로부터 출력되는 신호를 스트레인 데이터로 변환한 후, 상기 스트레인 데이터를 복수 개의 패킷들로 구성된 라운드(round) 별로 나누어서 전송하는 스트레인 데이터 전송 노드, 상기 스트레인 데이터 전송 노드와 무선으로 연결되어, 상기 전송된 스트레인 데이터를 수집 및 분석하여 상기 구조물의 상태를 실시간으로 모니터링하는 베이스 스테이션을 포함하여 이루어진 것을 특징으로 함.

- 국내 특허는 센싱 방법, 대상부품, 데이터베이스 항목 등에 있어서 본 연구 개발의 대상이 되는 통합계측에 의한 모니터링 부합하는 것은 거의 검색이 되지 않았음. 기본적으로 단일 센서를 활용하는 모니터링 방법에 관한 특허를 출원하고 있으나 복합적인 센서 구성과 이를 활용한 모니터링 방안에 관한 연구결과가 거의 없음. 또한 장기간 계측신호의 데이터베이스 관리나 경향분석을 이용하는 방안에 관한 특허는 매우 부족하다는 것이 검색을 통해 나타났음. 따라서 본 연구를 통해 이 분야의 특허 출원을 활성화하여 지적재산권의 확보하는 것이 매우 시급하다 할 수 있음.

나. 국외특허 분석

국외 특허 검색에서는 구조물*모니터링으로 검색하는 경우 너무 많은 건수가 검색되고 많은 경우 본 과제와 상관이 없는 특허가 검색되어 결과 내에서 다음과 같은 키워드로 특허 검색을 실시하였음. 다음은 전 세계에 출원 등록된 특허 현황임

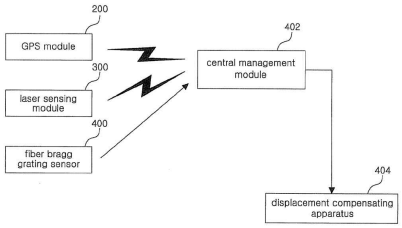
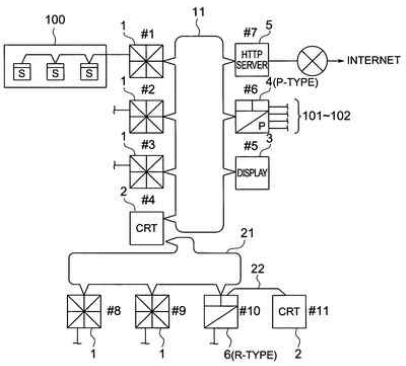
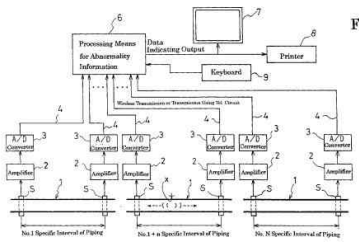
키워드	building*disaster*prevent	skyscraper*monitoring	building*structural*health*monitoring	building*disaster*prevent*database
특허 등록 수	8,592	816	50,079	4,260

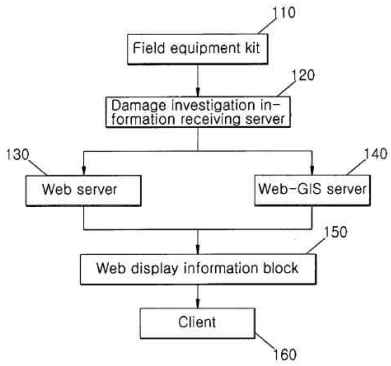
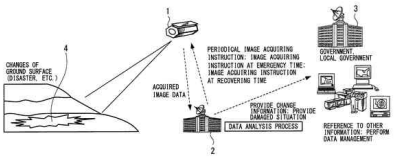
- 주요 국가별 관련 특허 출원 현황은 다음과 같음

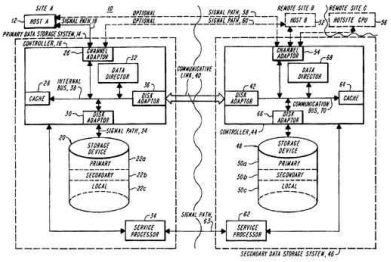
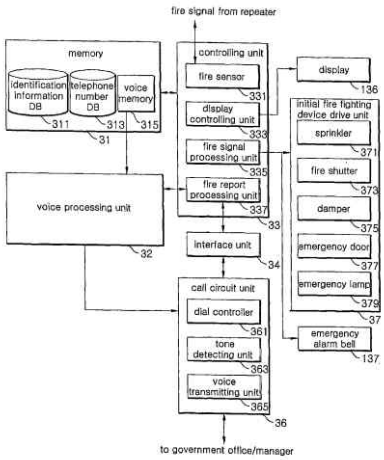
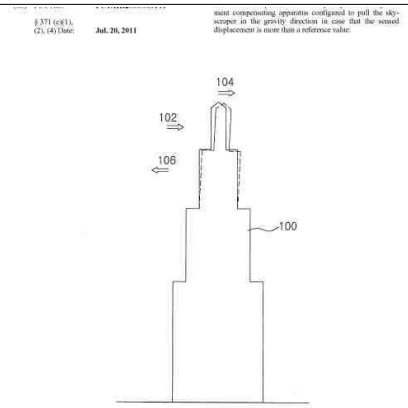
국가	미국	EU	일본	중국
특허 등록 수	58,753	5,754	177	65

특이한 것은 독일, 영국과 프랑스는 등록이 매우 작았는데 없는 것은 EU로 출원한 것으로 판단됨. 해외 특허 출원의 경우 주로 화재감지 및 엘리베이터 구조에 대한 특허 출원이 상당히 활발히 진행되고 있음. 요소기술로서는 데이터 저장의 분산이나 Mirroring에 관한 연구가 활발하였음. 구체적인 통합계측에 의한 구조건전성 모니터링 기술은 크게 이루어지지 않고 있는 것으로 파악됨. 그러나 본 연구를 통해 주요 해외 특허출원 내용에 대한 면밀한 분석과 회피전략 및 선점 특허를 출원하는 방안을 확보할 필요가 있음.

- 다음은 해외 주요특허에 대한 분석 내용임.

No.	출원명 및 출원정보	대표도면	주요내용 및 특징
1	INSPECTING APPARATUS FOR MEASURING SENSORS MOUNTED ON TRAIN MITSUBISHI/JAPAN 4,817,019 1989-03-28		부착한 센서를 Transmission Terminal과 Transmission Center를 이용하여 메모리에 저장 및 초기값과 비교하여 출력하여 준다. 측정센서를 탈착하지 않고 지속적으로 모니터링 할 수 있게 해주는 것을 특징으로 함.
2	DISASTER PREVENT SYSTEM NOHMI BOSAI LTD. / 일본 EP 1 808 836 B1 2007.01.10		방재 시스템은 LAN을 경유하는 서로에 연결된 다수의 단자 부품을 포함함. 메인 컨트롤 부분이 동작 제어 수단을 행하고, 전송 장치는 전송에 관한 송신 제어 및 방재 정보의 리셉션을 수행함.
3	A method and a system for detecting, monitoring and/or localizing hazard as changes of environmental conditions underground or in a building structure Kurata, Sakuji /일본 EP00942274 1999.03.11		지하 환경 조건의 또는 빌딩에서 변화를 탐지하고/또는 관찰하고/또는 한 지방에 제한하기 위한 방법과 시스템 그리고을 위해 따라서 디텍팅과 로컬라이징 소스의 미래 위험 또는 위험의 현존한 확장된 센서와 검파 수단으로 기존 파이프 라인 또는 파이프 라인 네트워크를 사용한다. 파이프 라인이 파라미터의 모든 또는 부분을 포함하는 다수의 파라미터를 측정하는 복합 센서를 가진 그것의 길이를 따라 다수의 위치를 따라 구비된다 : 사운드, 방사, 열, 기계적인 스트레인, 전기, 자기 및 진동. 센서로부터의 측정 신호는 수신에 적절하게는 무선 전송에 의해 전송하고 측정된 매개 변수의 비정상적 변화를 탐지하기 위한 처리 수단을 갖는 스테이션을 분석한다. 파라미터의 비정상적 변화를 측정하는 센서 사이의 파이프 라인의 길이 간격을 확인함으로써, 임박 위험의 기존의 손상 또는 소스는 확인하고 한 지방에 제한된다

4	Real time automatic update system and method for disaster damage investigation using wireless communication and web-gis I N H A - I N D U S T R Y PARTNERSHIP INSTITUTE / United States US20080208962 2010-11-02		무선 통신과 web-GIS (지아이에스)을 이용하는 재앙 손상 조사를 위한 실시간윈 자동 갱신 시스템과 방법이 기술되며, 그것이 효과적으로 재앙 조사에 있는 재앙구역과 관련된 다양한 데이터를 획득함으로써 재앙 리커런스를 방지하고, 빨리 재앙 레지스터를 수립하고 웹에 상응하는 데이터를 로딩함으로써 쉬운 탐색을 가능하게 할 수 있다. 시스템은 다양한 종류의 피해 지역, 손상 원인 정보, 손상 이미지와 동영상과 음성 정보의 위치를 캡쳐하고 그들을 서버에 송신하기 위한 장비의 포함하는 필드 장비 키트를 포함한다 ; 필드 장비 키트에서 생성되고 무선 통신을 통하여 그로부터 전송하는 데이터를 수신하는 손상 조사 정보 수신 서버는 큰 실패 데이터를 분석하거나 저장하고, 큰 실패 데이터를 분류하거나 가공처리한다 ; 적당히 홈페이지, 재앙 레지스터, web-GIS 기타 등등을 위해 분류된 데이터를 수신하고, 재앙 레지스터 DB와 웹 DB를 수립하는 웹 서버 ; 웹 서버로 링크된 지역 정보와 지리적 특성 정보를 개정하고 저장하는 web-GIS 서버 ; 그리고 재해 정보의 검색 신호를 생성하기 위한 웹 서버와 web-GIS 서버와 연결되고, 스크린에 정보를 나타내는 클라이언트 단말기
5	D i s a s t e r countermeasure support method Pasco Corporation / United States US07898458 2007.08.03		이미지 획득 물체로서의 그라운드 표면은 재앙의 발생 앞에 일반적 시간에 있는 인공 위성에 장착된 SAR에 의해 획득되고 따라서 레이더상 데이터는 획득된다. 재앙의 발생 뒤에, 이미지 획득 물체가 초기 해보기 위해 일반적 시간에 획득되는 것으로 수많은 궤도 리턴성 일보다 더 짧게 일 내에 그리고 이 레이더상 데이터를 레이더상 데이터와 비교함으로써 획득되기 때문에 그라운드 표면의 이미지는 손상 상황을 파지한다. 재앙의 발생 뒤에 있는 회복 그리고 rebuilding 타임에, 이미지 획득 물체의 이미지는 회복 그리고 rebuilding 계획을 준비하고 2 차 재해를 방지하기 위해 정기적으로 획득된다

6	Remote data mirroring EMC Corporation / United States US06052797 1998.08.20		데이터 기억 장치 시스템은 데이터의 원격 부분 거울링을 위한 데이터 링크에 의해 서로 연결된다. 데이터의 각각의 부피가 지역적인 것으로 구성된다, 1차 원격 조작으로 반사된 양 쌍에서, 또는 원격 조작으로 반사된 양 쌍에서 2차적이다. 정상적으로, 호스트 컴퓨터는 직접적으로 지역 또는 1차 부피에 또하나의 접근하고, 일차 부피에 쓰여진 데이터는 상응하는 2차 볼륨에 자동적으로 링크를 전송된다. 각각 원격 조작으로 반사된 양 쌍이 동시성의, 준-동기화, 적합한 copy－remote 기록 대기 및 적합한 copy－disk를 포함하는 선택된 동기화 모드에서 수행할 수 있다. 2차 부피에 대한 직접적인 기입 액세스가 부정되면 “sync required” ; 속성은 부피와 부피가 동시에발생하지 않기 때문에 셋팅된다
7	Disaster preventing system using digital radio communication Han-Gyu Yang/한국 US20060152356 2004.06.25		무선 디지털 통신을 이용하는 방재 시스템은 기술된다. 본 발명의 목적은 화재가 발생할 때 화재 경보기를 출력하고, 화재의 위치를 디스플레이하고, 또한 화재가 그것의 초기 단계에서 움직이지 않는 반면에 빨리 억제될 수 있도록 화재의 위치에 설치한 초기의 소방력 장치를 구동시키는 것을 할 수 있다. 구축 비용을 구성의 편의를 제공하고 축소할 수있는 무선 통신을 사용하여 방재 시스템을 제공하는 것이 본 발명의 또 다른 물질이다. 그것이 가능한 무선 통신을 사용하여 방재 시스템을 제공하기 위해 본 발명의 다른 목적 이고의 안정하게 운영상이 외부 교류 전원 장치가 거기에 공급되지 않을지라도. 화재가 발생할 때 상응하는 오피스와 상응하는 오피스와 상응하는 관리자를 자동적으로 그리고 빨리 콜링할수있는 무선 통신을 사용하여 방재 시스템을 제공하는 것이 본 발명의 또 하나의 물체이다
8	SYSTEM AND METHOD OF PREVENTING DISASTER FOR A SKYSCRAPER Golden Wheels Defense Fire Co., Ltd./한국 US20110271606 2009.02.11		풍압에 따른 시스템과 고층빌딩의 변위를 보상함으로써 재앙을 방지하는 방법은 기술된다. 감지된 변위가 기준값보다 더이다면 고층빌딩의 재앙을 방지하기 위한 시스템은 고층빌딩의 감지 변위에 구성된 변위 감지 모듈 및 중력 방향을 고층빌딩을 체포하기 위해 구성된 변위 보상용 장치를 포함한다

제3장. 연구 수행 내용 및 성과

1. 표준 SHM 시스템 제안

가. 표준 SHM 계측 시스템

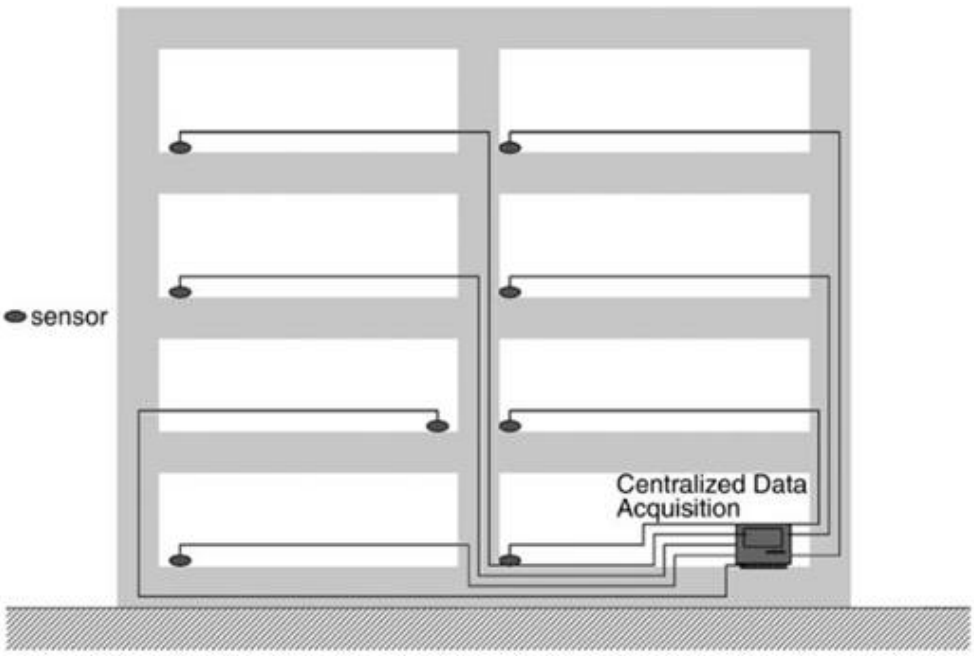
(1) 계측 시스템 최적화

- 구조물의 설계 정보를 정확하게 파악하여 합리적인 계측 시스템을 계획함
- 사전 해석을 통해 구조물의 주요 손상 위치를 정확하게 파악하여 계획함
- 계측값을 신뢰할 수 있도록 정밀하고 인증된 센서로 계획함
- 계측종류의 최대&최소값을 파악하고 그에 맞는 성능을 충족시키는 센서와 장비로 계획함
- 계측값을 처리함에 있어 필요한 성능을 충분히 만족시키는 장비로 계획함
- 데이터 처리를 수행하는 서버의 성능 및 용량을 SHM 규모 및 종류에 따라 적절하게 계획함
- 구조물의 용도와 계측 시스템 시공성을 고려하여 센서 위치를 계획함
- 센서의 유지보수를 고려하여 센서 위치를 계획함
- 실제 구조물을 대변할 수 있는 충분히 정확한 모델링과 고성능의 해석프로그램 등을 통해 해석을 수행함
- 계측값에 노이즈를 최소화 할 수 있도록 계획함
- 계측에 영향을 주는 환경(온도, 습도 등)을 충분히 고려하여 계획함

(2) 데이터 전송방식 결정

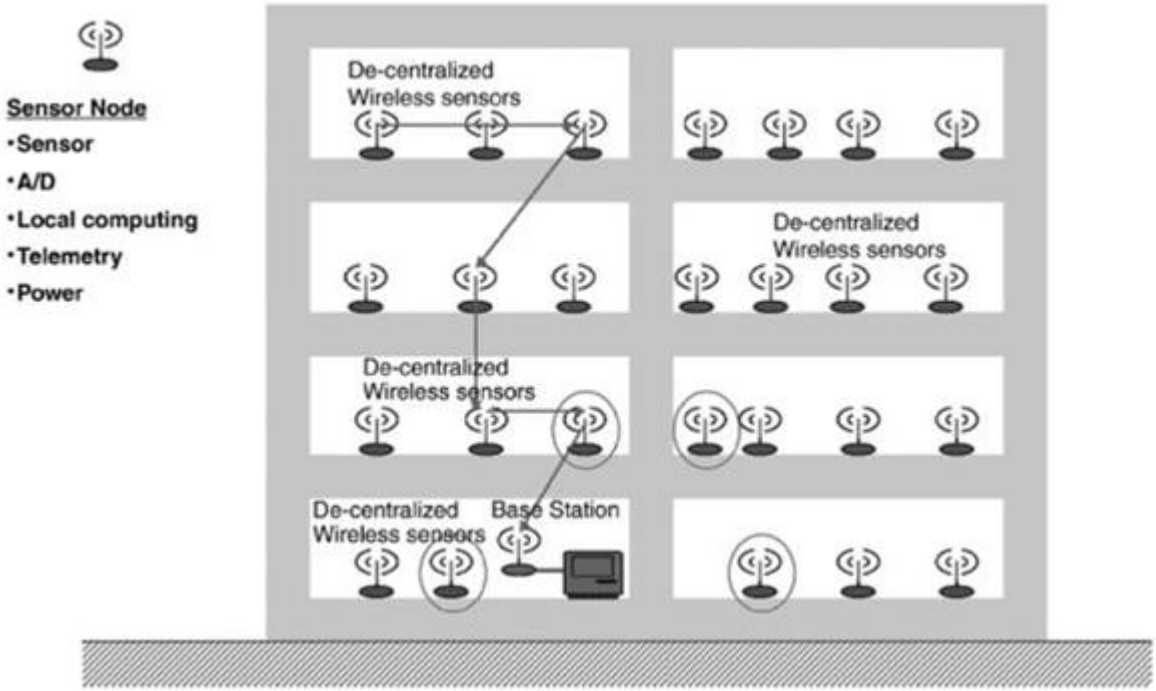
(가) 유선 시스템

- 비교적 안정적인 데이터 전송 가능함 (통신장애가 상대적으로 적음)
- 데이터 케이블 전송으로 인한 노이즈 대책 필요함
- 시공 공정에 맞춰서 케이블 시공 필요함
- 비교적 저렴함



유선 시스템 개념도

(나) 무선 시스템
- 통신 장애 대책 필요
- 시공 공정에 보다 자유로운 장점
- 비교적 고가임
- 센서 노드에 대한 전원장치 계획 필요함



무선 시스템 개념도

(3) 센서 종류 및 사양 결정시 고려사항

(가) 계측범위
- 계측 가능한 최소값, 최대값 범위를 의미함
- 계측 범위의 변화에 따른 해상력 확인

(나) 분해능
- 측정값을 분별할 수 있는 최소 증가량을 의미함.
- 분해능은 최소 눈금 증가량 또는 출력 계기판의 최소 카운트로 정량화됨.

(다) 정확성과 오차
- 참값과 측정값이 얼마나 가깝게 일치하는 지를 의미함.
- 오차 = 측정값 - 참값

(라) 히스테리시스오차
- 순차적 테스트에 의해 값을 증가시키면서 측정한 결과와 감소시키면서 측정한 결과 사이의 차이를 의미함.

(마) 선형오차
- 계측기들은 정적 입력과 이에 대한 출력이 선형적인 관계를 갖도록 설계되지만 실제 시스템에서 완벽한 선형적 거동은 근사적으로만 얻어짐.
- 선형오차는 대개 예상 선형오차 최대값의 전 계측범위에 대한 백분율로 표시함.

(바) 계측환경

- 계측가능한 온도, 습도에 대한 사양을 의미
- 실외 환경 등에 설치되는 경우, 센서 및 로거의 온도 작동 범위 확인

(사) 동적 범위

- 다이내믹 영역이라고도 함
- 허용출력 왜곡으로 제한된 최대신호 진폭과 잡음·드리프트가 허용되는 최소신호 진폭의 비로서 증폭기가 유효하게 작동하는 진폭범위를 뜻하는 것임

(아) 계측 주기

- 계측 센서 및 장비는 계측 용도에 따라 정적인 계측과 동적인 계측이 있음. 그러므로 용도에 따라 적절한 계측 주기, 즉, sampling rate를 확인

(4) 센서 종류별 선정 가이드

(가) 수평/수직가속도 : 동적계측

① 센서 설치 목적

- 구조물의 수평 가속도 레벨 및 비틀림 계측
- 기계 운동에 따른 바닥 진동 계측
- 구조물의 고유진동수, 감쇠 등의 동특성 분석 → 구조물 모드형상 및 구조물 상태 분석의 기반 자료
- 구조물의 사용성 및 안전성 평가

② 센서의 선정

• 추천 요구성능

- 극 저주파 측정용 (0.05~100Hz 측정 가능)
- 계측범위: 0.0001 ~ 1g
- 측정빈도: 최고 100 Hz 이상
- 내구성이 좋은 센서 사용
- 동적범위 120dB이상

• 센서 선택 조건

- 극 저주파 측정이 가능한 가속도계를 선정
- 제품의 내구성 및 신뢰도가 높은 제품의 선정 필요.

③ 센서의 종류

• 서보성 가속도계

- 진자의 변화를 전류로 검출하여 가속도를 계측
- 높은 감도와 고해상력을 가지고 있어서 토목, 건축구조물에 적합함.
- 상대적으로 고가임.



서보형 가속도계 예시

• 압전형 가속도계

- 압전소자에 힘이 가해졌을 때 발생하는 전하를 검출하여 가속도를 계측
- 일반적으로 사용가능한 최소 진동수가 있음.



압전형 가속도계 예시

④ 기타

- 가속도계는 1축, 3축 등 종류가 구분되고 단가도 차이가 있기 때문에 용도에 따라 센서를 선택하도록 한다.
- 계측 필요한 최대가속도 산정 후, 센서 계측범위 확인하여 선정 및 세팅한다.

(나) 경사계 : 동적 or 정적계측

① 센서 설치 목적

- 건물의 수직 및 수평하중의 영향으로 발생할 수 있는 수직 부재의 경사 및 층간 변위 모니터링
- 건물의 수직하중으로 인해 발생할 수 있는 수평부재의 경사 모니터링

② 센서의 선정

• 추천 요구성능

- 해상도: 0.002 mrad 이하
- 계측범위: ± 1.5 mrad 이상
- 정확도: ± 0.00125 Deg.
- 내구성이 좋은 센서 사용

• 센서 선택 조건

- 제품의 내구성 및 신뢰도가 높은 제품의 선정 필요.

③ 기타

- 경사계는 측정범위에 따라 오차 및 측정빈도 한계치가 달라질 수 있기 때문에 용도에 따라 적합한 센서를 선택하도록 한다.
- 계측 필요한 최대경사 산정 후, 센서 계측범위 확인하여 선정한다.



경사계 예시

(다) 변형률계 : 정적계측

① 센서 설치 목적

- 구조물의 주요부재 응력 계측
- 주요부재의 안전성 평가
- 장기변형으로 인한 변형률 계측

② 센서의 선정

- 추천 요구성능
- 계측범위: 5000 με
- Resolution: 1.0 με
- 내구성이 좋은 센서 사용
- 센서 선택 조건
- 제품의 내구성 및 신뢰도가 높은 제품의 선정 필요.
- 매립용, 용접용 등 다양한 센서 종류가 있으니 구조물 부재 설치위치에 따라 적합한 종류의 센서를 선택하도록 한다.
- 압축범위와 인장범위가 다른 센서가 존재하므로, 구조 반응에 따라 달리 고려해야함
- 항복변형률까지 계측 가능한지 검토 필요

③ 기타

- 계측 필요한 최대변형률 산정 후, 센서 계측범위 확인하여 선정한다.



변형률계 예시

(라) 풍향풍속계/풍압계 : 동적계측

① 센서 설치 목적

- 구조물에 대한 바람의 영향(외력)을 측정하기 위한 기반 자료 제공
- 최상층 및 중간층의 풍속, 풍향, 풍압 계측

② 센서의 선정

- 추천 요구성능
- 해상도: 풍향 1 degree 풍속 0.1 m/s
- 내구성이 좋은 센서 사용
- 센서 선택 조건
- 제품의 내구성 및 신뢰도가 높은 제품의 선정 필요.

③ 기타

- 계측 필요한 최대풍속, 풍압 산정 후, 센서 계측범위 확인하여 선정한다.



풍향풍속계 예시

(마) 축응력계측 : 정적계측

① 센서 설치 목적

- 구조물에 작용하는 축응력 측정
- 동특성 파악을 위한 구조물의 질량 측정

② 센서의 선정

• 추천 요구성능

- 해상도: 10 kPa
- 내구성이 좋은 센서 사용

• 센서 선택 조건

- 제품의 내구성 및 신뢰도가 높은 제품의 선정 필요

③ 기타

- 계측 필요한 최대응력 산정 후, 센서 계측범위 확인하여 선정한다.



축응력계 예시

(바) GPS 변위계측 : 동적계측

① 센서 설치 목적

- 구조물의 최상층 변위 및 거동 모니터링
- 대상 건물 변형에 따른 구조물 안전성 및 사용성 검토

② 센서의 선정

• 추천 요구성능

- 실시간 기선해석 가능
- 정확도: 수평 10 ㎜
- 내구성이 좋은 센서 사용
- 수신주기 1초 이내

• 센서 선택 조건

- 제품의 내구성 및 신뢰도가 높은 제품의 선정 필요



GPS 예시

(5) 배선 및 장비 설치

(가) 센서케이블 배선

① 설치 구간

- 센서가 설치된 구조물로부터 계측 장비까지 연결

② 배선 시공 계획

- 배선 길이는 가능한 최소화 할 수 있도록 계획
- 강전 케이블을 피해서 계획
- 노이즈를 최소화 할 수 있도록 계획
- 센서 및 장비에 호환되는 커넥터 사용
- 센서케이블에 따라 명확한 주기를 하여 혼란 방지
- 보호관 등 설치를 통해 케이블 보호 계획
- 슬래브 등에 매립시 시공 공정에 따라 긴밀한 협의 필요함
- 유지관리가 수월할 수 있도록 계획
- 트레이 사용 계획

(나) 통신케이블 배선

① 설치 구간

- 계측 장비로부터 메인서버까지 연결

② 배선 시공 계획

- 유무선 통신 계획
- 케이블 종류에 따라 통신 가능 길이 체크
- 케이블에 따라 명확한 주기를 하여 혼란 방지
- 유지관리가 수월할 수 있도록 계획
- 통신 장애 대책 수립
- 트레이 사용 계획

(다) 장비설치

① 설치 장소

- 구조물에 설치된 센서의 위치 및 수량에 따라 TPS실 등에 DAQ 설치
- 방재실 등 서버 설치장소 협의

② 장비 선정 및 설치 계획

- 센서 종류에 따라 호환 장비 선정
- 설치된 센서 채널 수에 대하여 수용 가능하도록 계획
- 노이즈 최소화 계획
- 설치 환경에 적합한 보호함 계획
- 무정전 전원 장치 계획
- 데이터 규모에 대해 충분한 성능을 갖춘 서버 계획
- 유지관리가 수월할 수 있도록 계획

(6) 동기화

(가) 센서별 시간동기화

- 구조물이 대형화되면서 센서들 사이의 거리가 멀어지고 필요한 데이터 로거의 수량이 많아지면서 데이터 전송시 발생하는 각 종 지연요소들이 발생하게 된다. 그러므로 계측 항목 중 시간동기화가 필요한 항목에 대하여 시간동기화를 수행해야 한다.

예를 들면 다수의 층에 설치된 가속도계에 대하여 시간동기화를 수행한다.

(나) 동기화 계획

- 동기화 기법은 GPS clock을 이용하는 방법 외에도 여러가지 기법이 존재하기 때문에 장비에 따라 적절한 동기화 기법을 선택하여 동기화를 계획한다.

(7) 표준 SHM 계측시스템 제안

(가) SHM 계측 수준 선정

① 최소 법적 기준 만족

'초고층 및 지하연계 복합건축물 재난관리에 관한 특별법'에 나와있는 사전재난성검토 내용의 계측설비 설치계획을 협의하기 위해 '사전재난영향성검토협의 지침'을 참고한다.

- 지진 계측 및 모니터링
  - 고층건물의 지진계 설치의 경우 3곳(저층부, 중층부 상층부) 이상의 가속도응답 계측 및 모니터링 권장
- 옥상층에 풍향 풍속계를 설치하여 바람의 모니터링 가능
- 초고층건물 옥상층에 GPS를 설치, 건물 최상층의 변위 응답 모니터링 시스템구축 (권장)
- 초고층건물의 경우 응력이 집중되는 주요 구조부위에 변형률계 또는 응력계를 설치하여 구조적변형의 모니터링 시스템 구축 (권장)

정리하면, 최소 법적 기준은

- 최상층 1축 가속도계 3ea (X, Y+Y)
- 중간층 1축 가속도계 3ea (X, Y+Y)
- 최하층 1축 가속도계 3ea (X, Y, Z)
- 최상층 풍향풍속계 1ea
- 최상층 GPS 1set
- 응력 집중 구조부위 변위 및 경사계이다.

② 구조물 상태평가를 위한 계측 수준 제안

㉮ 초고층 구조물

- 지진 계측 및 모니터링 시스템

구조물 상태평가를 위한 평가요소 중 구조물의 강성 및 전체거동을 나타내는 고유진동수와 모드형상은 매우 중요한 요소이다. 구조물의 병진방향 3차 모드형상을 계측을 위해서는 최소 4개층에 가속도계가 설치되어야 한다. 그러므로 초고층건물일 경우, 가속도 계측시스템 최소 수준은

- 최상층 1축 가속도계 3ea (X, Y+Y)
- 중간 2개층 1축 가속도계 3ea (X, Y+Y)
- 최하층 1축 가속도계 3ea (X, Y, Z)이며, 필요시 중간층 설치를 추가한다.

- 바람의 모니터링 시스템
  - 최소 법정 기준과 같이 옥상층에 풍향 풍속계를 설치하여 바람의 모니터링을 수행하고 엔지니어의 판단으로 중간층 풍향 풍속계측이 필요할 경우, 추가로 설치한다.
- 최상층의 변위 응답 모니터링 시스템
  - 옥상층에 GPS를 설치, 건물 최상층의 변위 응답 모니터링을 수행한다. 이때, GPS는

실시간 기선해석이 가능한 옵션을 포함하고, 이동국과 기준국을 한 set로 구성한다. 필요시 추가적인 이동국을 설치한다.

- 주요구조부위 모니터링 시스템
  - 엔지니어의 판단에 따라 응력이 집중되어 관리가 필요하다고 요구되는 주요 구조부위, 구조물 전체 안전성에 영향을 주는 구조부위 등에 변형률계 또는 응력계를 설치하여 구조적변형의 모니터링을 수행한다.
  - 초고층건물의 경우, 기둥 축소량으로 인한 영향을 모니터링하여 부등축소로 인한 구조부재의 안정성 검토와 각종 사용성 검토를 수행한다.
  - 초고층건물의 경우, 지반 및 기초구조에 대한 모니터링을 수행한다.
  - 구조 강성이 급격하게 변화하는 곳에 변위 또는 경사계를 설치하여 모니터링을 수행한다.
- 사용성 평가 모니터링 시스템
  - 진동 등 사용성이 우려되는 곳(장스팬 보 또는 슬래브 등)에 가속도계를 설치하여 모니터링을 수행한다.

㉯ 초고층 외 구조물

- 지진 계측 및 모니터링 시스템

  가속도 계측시스템 최소 수준은
  - 최하층 1축 가속도계 3ea (X, Y, Z)이며, 필요시 최상층 설치를 추가한다.
- 바람의 모니터링 시스템
  - 구조물 횡하중이 풍하중에 의해 지배되는 경우 풍하중 계측
- 주요구조부위 모니터링 시스템
  - 엔지니어의 판단에 따라 응력이 집중되어 관리가 필요하다고 요구되는 주요 구조부위, 구조물 전체 안전성에 영향을 주는 구조부위 등에 변형률계 또는 응력계를 설치하여 구조적변형의 모니터링을 수행한다.
  - 구조 강성이 급격하게 변화하는 곳에 변위 또는 경사계를 설치하여 모니터링을 수행한다.
- 사용성 평가 모니터링 시스템
  - 진동 등 사용성이 우려되는 곳(장스팬 보 또는 슬래브 등)에 가속도계를 설치하여 모니터링을 수행한다.

(나) SHM 계측 최적 위치 선정

① 엔지니어의 해석 및 판단을 통한 최적 위치 선정

- 동특성 파악을 위한 해석을 통해 가속도계 위치 선정
  - 건물의 질량과 강성을 실제환경과 유사하게 가정하여 모드해석을 수행하면 실제구조물의 동특성을 추정할 수 있다. 엔지니어링 해석을 통해 모드형상을 추출하여 모드차수에 따라 최대응답이 예상되는 지점에 가속도계 위치를 선정한다. 또한 평면상의 위치는 강심의 위치와 편심으로 인한 최대응답이 발생되는 지점으로 한다. 그리하여 병진방향과 회전방향의 가속도를 계측하기 위한 최적 위치를 선정한다.
- 풍향풍속계 최적 위치 선정
  - 건물의 최대 풍향풍속을 대표할 수 있도록 적절한 위치에 지지대 등을 이용하여 장애물의 간섭을 최소화 한다.
- GPS 최적 위치 선정
  - 건물의 최상층 변위를 대표할 수 있도록 적절한 위치에 설치하며, 장애물로 인한 다중경로가 발생하면 계측값 정확도에 영향을 미치기 때문에 다중경로의 영향을 최소화 하도록 한다.

• 주요구조부위 센서 위치 선정

- 푸쉬오버해석, 비선형 시간이력해석, 변위기여도 해석 등을 통해 주요구조의 모니터링 최적위치를 선정한다. 또한 축소량으로 인한 영향이 가장 큰 곳, 지반 및 기초의 모니터링 최적위치를 판단하여 선정한다.

② 유지관리를 위한 위치 선정

• 유지관리 용이한 위치 선정

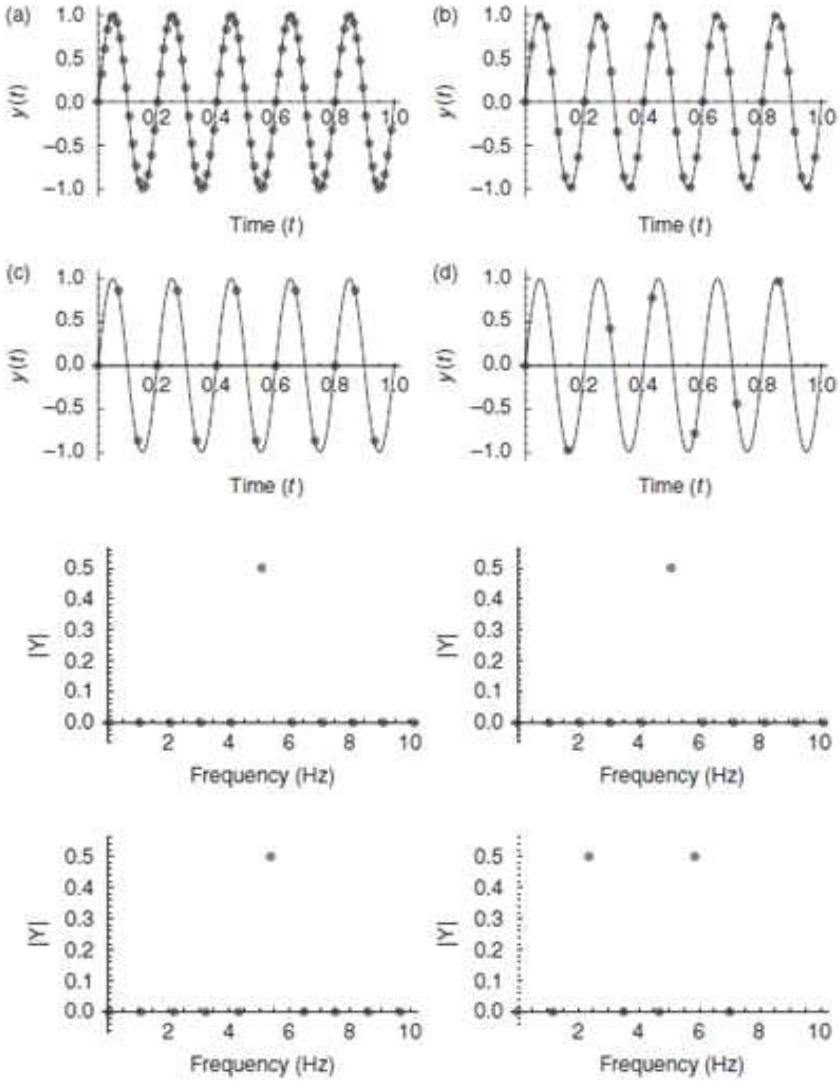
- 계측기는 콘크리트 안에 매립되어 교체가 불가능한 종류도 있지만 가속도계, 풍향풍속계 등 수리, 교체가 가능하도록 외부면에 설치되기도 한다. 계측기의 위치는 엔지니어의 판단에 따라 계측값을 가장 잘 나타내는 곳에 설치하는 것이 최우선사항이지만 더불어 유지관리가 가능하도록 기계실이나 피난층 등에 설치하는 것이 유리하다.

(다) SHM 계측 설정 제안

① 동적센서 계측 설정 제안

• Sampling rate 설정

- 센서를 통해 전해지는 계측값은 아날로그 신호로 전해지게 되며, 이 값을 디지털 신호로 변환시키는 과정이 필요하다. 즉 아날로그-디지털 변환기(ADC)에 의해 아날로그 신호가 이산화 된다. 아날로그 신호를 시간에 대해 이산화하는 샘플링 과정에서 샘플링 진동수를 너무 작게 하면, 원래 신호의 진동수가 왜곡될 수 있으며, 이러한 현상을 aliasing(앨리어싱)이라 한다. 앨리어싱 현상을 피하기 위해서 샘플링 진동수를 최대 관심 진동수의 2배 이상으로 해야 한다.



Aliasing 현상

• 동특성 분석을 위한 계측 길이 설정

- 동특성 분석을 위해 가속도계를 사용하여 계측할 때, 적절한 계측 길이를 설정해야 한다. 미진동에 의한 계측값은 상대적으로 매우 작기 때문에 충분한 시간동안 계측되지 않으면 원하는 분석값을 얻어내지 못할 수 있다. 그러므로 구조물 응답을 분석할 때, 사용하는 OMA 기법에 의한 결과값이 안정화될 수 있는 충분한 계측시간을 확보한다.

② 정적센서 계측 설정 제안

• 초기값 설정

- 센서에 따라 초기값을 설정하는 종류가 있다. 변형의 방향이 압축과 인장 양방향으로 발생하는 위치를 계측한다면 전체 계측 범위 중에서 중간에 위치하도록 하며 한 방향으로 변형이 발생한다면 그에 맞도록 설정하여 변형이 계측 범위를 넘지 않도록 한다.

나. 표준 SHM 모니터링 시스템

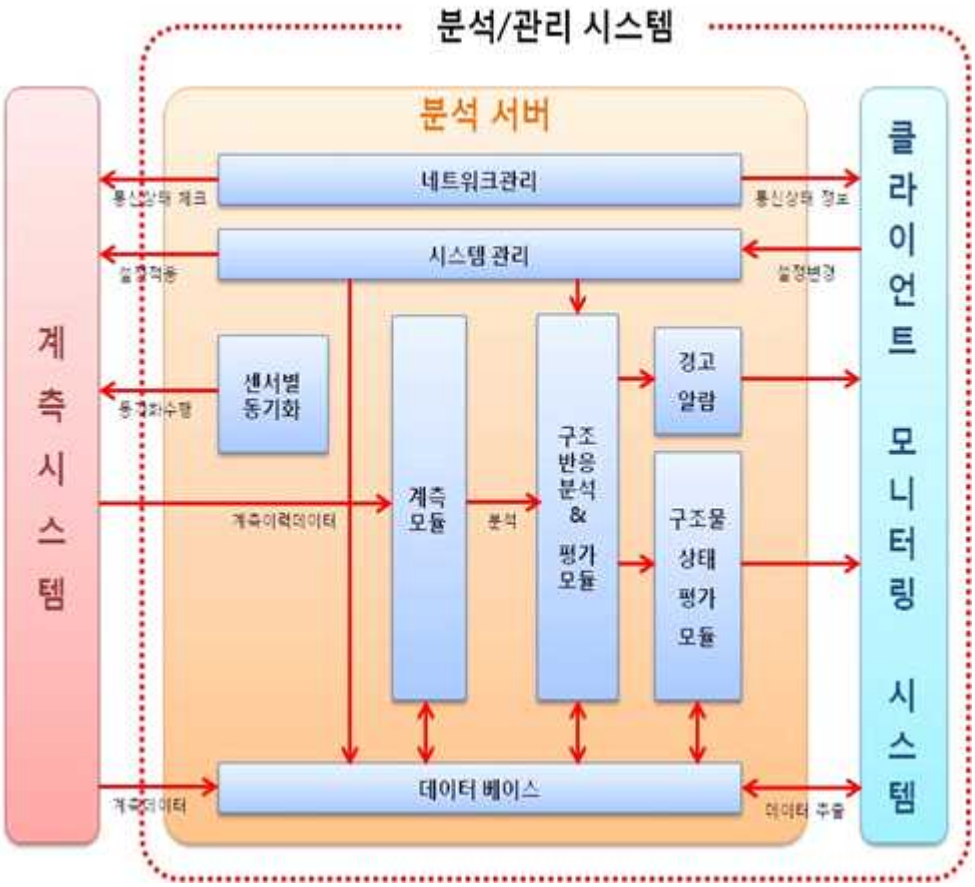
(1) SHM 모니터링 시스템 구성

(가) 개요

통합 모니터링 시스템은 기능적으로 크게 정보를 수집하는 계측 시스템과 분석 및 관리 시스템으로 구분할 수 있다.

계측 시스템은 건축물에 발생하는 내외적인 상황 데이터를 사용자가 사전에 지정한 조건에 따라 실시간으로 검출하고 통신을 이용하여 데이터를 모니터링 시스템까지 전송하는 단계까지로 정의할 수 있다.

분석 및 관리 시스템은 데이터 수집 조건을 관리하고 전송된 계측 데이터를 저장은 물론 분석 가능한 데이터로 가공한다. 또한, 상세 해석 시뮬레이션을 통해 사전에 마련된 구조물 해석결과와 계측 데이터 간 상호 분석를 통해 건물의 현 상태를 진단하고 각각의 검토 결과를 사용자 요구에 맞춰 적절하게 제공한다. 또한, 계측데이터 및 각종 분석 데이터를 데이터베이스에 저장한다.



SHM 모니터링 시스템 개념도

(나) 분석/관리 시스템 아이템

① 계측 모듈 : 구조물의 계측을 담당하는 부분

- 최상층 횡변위 계측 (GPS) : 구조물 최상층의 수평 및 수직 변위를 모니터링 하는 기능
  - 센서 계측데이터 ACQ 모듈
  - 최상층 변위 시간 이력 그래프
- 건물의 동특성 파악을 위한 계측 (가속도계) : 구조물의 가속도 및 동특성(고유진동수, 모드형상, 감쇠비)을 모니터링 하는 기능
  - 계측된 값을 가속도로 변환
  - 가속도 시간 이력 그래프
  - 직류 오프셋(DC offset)제거 기능

- 풍향, 풍속을 파악하기 위한 계측 (풍향풍속계): 구조물에 작용하는 풍하중의 세기와 방향을 모니터링 하는 기능
  - 계측된 값을 풍향풍속으로 변환
  - 풍향 시간 이력 그래프
  - 풍속 시간 이력 그래프
- 층간변위 추정을 위한 계측 (경사계): 구조물 층간 변위의 상태를 모니터링 하는 기능
  - 센서 계측데이터 ACQ 모듈
  - 변형 정도(경사, 각도)를 그래프로 표현
- 변형률 파악을 위한 계측 (변형률계): 구조물의 주요부재 등의 변형률을 모니터링 하는 기능
  - 센서 계측데이터 ACQ 모듈
  - 계측된 값을 변형률로 변환
  - 변형률 시간 이력 그래프
  - 온도 그래프
- 축응력 파악을 위한 계측 (축응력계): 구조물의 주요부재 등의 축응력을 모니터링 하는 기능
  - 센서 계측데이터 ACQ 모듈
  - 계측된 값을 축응력으로 변환
  - 시간 이력 그래프
- 지진가속도 계측 (지진 가속도계): 구조물의 작용하는 지진하중을 모니터링하는 기능
  - 계측된 값을 가속도로 변환
  - 지진가속도 시간 이력 그래프
  - 직류 오프셋(DC offset)제거 기능

② 센서별 동기화 : 계측데이터의 시각 동기화를 담당하는 부분

- 계측장비 시간 동기화
  - IEEE 1588에 의한 Time 동기화(LAN 선을 이용하는 방법)
  - 서버시트템에서 ADC 스타트 Command 발생(별도의 연결선 신설 필요)
  - 각 시스템에서 ADC 동시진행

③ 구조 반응분석 & 평가 모듈 : 계측데이터를 분석하고 기준치 등을 통해 평가하는 부분

- 최상층 횡변위 분석 및 평가
  - 최상층 변위 사용성 평가
  - 최상층 변위 안전성 평가
- 건물의 가속도 분석 및 평가
  - 가속도 RMS 변환
  - 로우패스 필터 적용
  - 가속도 사용성 평가
- 풍향, 풍속 분석 및 평가
  - 1분 평균 풍향 풍속 변환
  - 10분 평균 풍향 풍속 변환
  - 풍하중 사용성 평가
  - 풍하중 안전성 평가
- 층간변위 분석 및 평가
  - 변형 정도(경사, 각도) 안전성 평가
- 변형률 분석

- 부재 안전성 평가
• 축응력 분석
- 부재 안전성 평가
• 지진가속도 분석
- 가속도 RMS 변환
- 지진하중 안전성 평가

④ 구조물 상태평가 모듈 : 구조물의 종합적인 평가를 수행하는 부분
• 건물의 동특성 분석 (OMA)
- Window function 적용
- Averaging 수행
- FDD법 수행
- 커브피팅을 통한 고유 진동수 추출
- 감쇠비 추출
- 모드형상 추출 및 그래프로 표현
• 강성변화 분석 및 평가
- 사전해석을 바탕으로 DB생성
- 구조물 강성 평가
- 구조물 균열 상태 평가
• 구조물 안전성 분석 및 평가
- 계측 데이터 및 사전해석을 바탕으로 구조물 안전성 종합 평가
- FE Model building & 모델동기화
- 이상 하중 or 변형 발생 평가
- 계측 요소별 최대값 정리 및 보고

⑤ 경고 & 알람 : 관리기준치 등에 의한 알람을 수행하는 부분
• 현재 상태 레벨 표현
• 이상 감지 파악 및 해당 내용 경고 기능
• 위급상황 시 알람 기능
• false alarm 파악

⑥ 데이터 베이스 : 데이터를 저장하고 관리하는 부분
• 계측 이벤트 관리
- 이벤트 트리거 수행 : 설정한 기준을 초과하는 이벤트 발생시 관련 데이터를 자동 저장하는 기능
- 강제 트리거 수행 : 유저 설정에 의해 일정시간마다 주기적으로 저장하는 기능
- 이벤트 내역 저장 : 이벤트 발생 내역을 리스트업 하는 기능
• DB storage 관리
- Storage 상태 정보 표현
- 데이터 자동 삭제 : 데이터가 일정부분 이상 용량을 차지할 경우 순차적으로 삭제하는 기능
• Data 저장
- 계측 Data 저장 : 설정한 기간까지의 데이터를 저장하고 이전 데이터를 순차적으로 삭제하는 기능
- 구조반응 분석 및 평가 저장
- 구조물 상태평가 저장

⑦ 네트워크관리 : 통신상태를 모니터링 하는 부분

- 데이터 통신 관리
  - 통신상태 정보 표현
  - 통신망 오류시 Local PC에 데이터를 임시 저장장소에 저장

⑧ 시스템 관리 : 프로그램의 설정 및 권한을 담당하는 부분

- 사용자별 권한 관리
  - 사용자별 접근 권한 설정
- 시스템 설정 관리
  - 센서 설정 관리
  - 계측기기 설정 관리
  - 관리기준치 설정 관리
  - 트리거 설정 관리
  - Data 저장 설정 관리

⑨ 건물관리시스템 연동 : 모니터링 시스템과 건물관리시스템 연계

- 표준 프로토콜을 통한 계측 데이터 전송 기능
  - OPC DA, OPC UA등 프로토콜 통일 협의
- SI와 eSOP에 종합적 판단 결과를 전송하는 기능
- 통신 장애 등 오류를 파악할 수 있는 기능

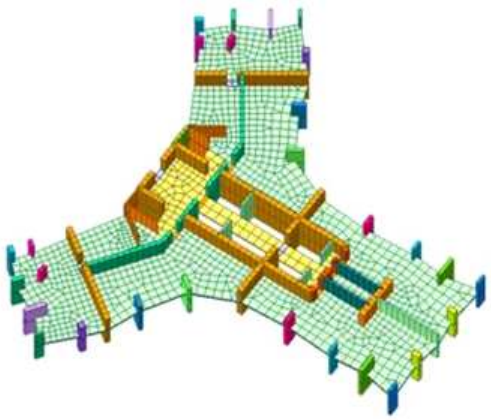
(2) SHM 모니터링 시스템 구축을 위한 해석 및 분석

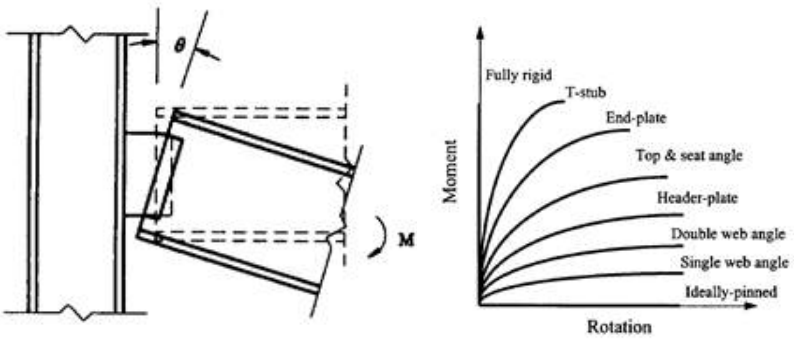
(가) 모델 업데이팅을 위한 동특성 분석

① 민감도 해석

- 일반사항
  - 설계를 위한 해석 모델링은 실제 구조물과 질량 및 강성에 차이가 존재한다. 그렇기 때문에 실제 구조물과 해석 모델링과의 동특성 차이를 줄이기 위해서는 동특성에 영향을 주는 요소들을 파악하여 분석한다.

- 결과물
  - 재료특성에 따른 동특성 변화량 파악
  - 접합부 강성에 의한 횡력 기여도 파악
  - 슬래브, 비구조체의 강성 기여도 파악

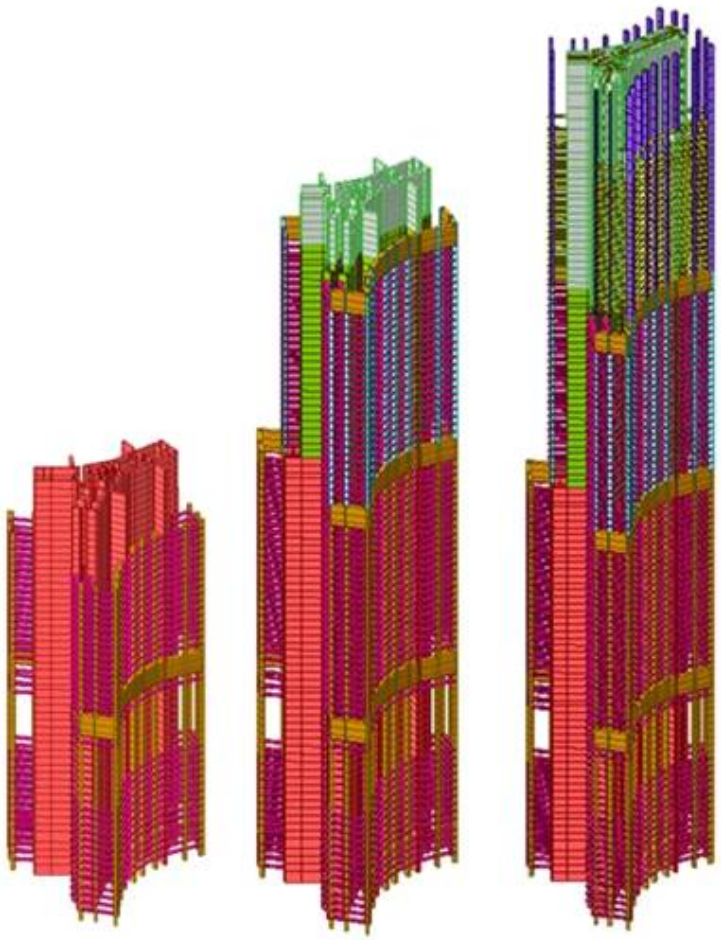



θ
M
Moment
Fully rigid
T-stub
End-plate
Top & seat angle
Header-plate
Double web angle
Single web angle
Ideally-pinned
Rotation

동특성 영향 요소들 예시

② 시공중 동특성 평가

- 일반사항
  - 실제 구조물의 동특성을 해석만으로 예상하는 것은 매우 어려운 일이다. 그렇기 때문에 구조물의 시공 중 실험을 통해 구조물의 동특성을 확인한다면 해석모델과의 차이를 줄일 수 있다. 따라서 시공 공기에 따라 주요 강성 변화가 예상되는 기간에 동특성 시험을 진행하여 실제 구조물의 고유진동수를 파악한다. 그 결과를 통해 해석모델의 개선을 수행한다.
- 결과물
  - 시공 중 구조물 고유진동수 파악
  - 시공 중 구조물 모드형상 파악

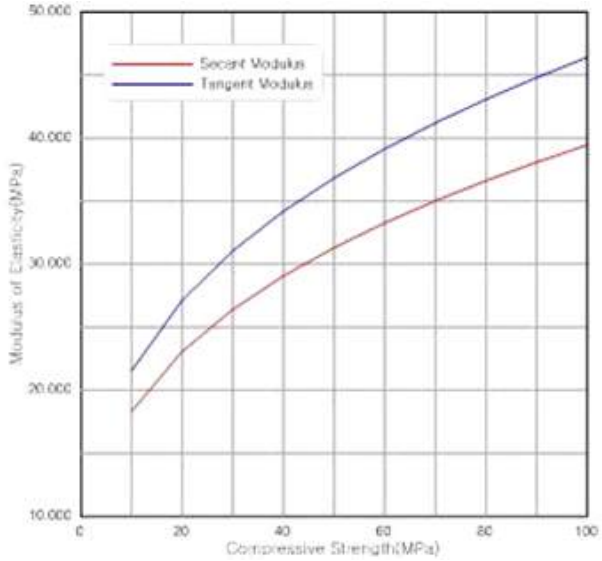


시공중 동특성 평가를 위한 시험 공정 예시

③ 재료시험 및 분석

- 일반사항
  - 실제 구조물은 설계시 가정한 재료 특성과 차이가 있다. 탄성계수의 차이로 강성의 차이가 발생할 수 있으며, 크리프 및 건조수축값의 차이로 인해 예상한 변형률과 차이가 발생할 수 있기 때문에 재료시험 및 분석을 통해 구조물의 특성을 보다 정확하게 예측한다.
- 결과물
  - 탄성계수 산정을 위한 근거
  - 크리프 및 건조수축 예측값 제시





재료시험 예시

(나) 구조물 성능평가

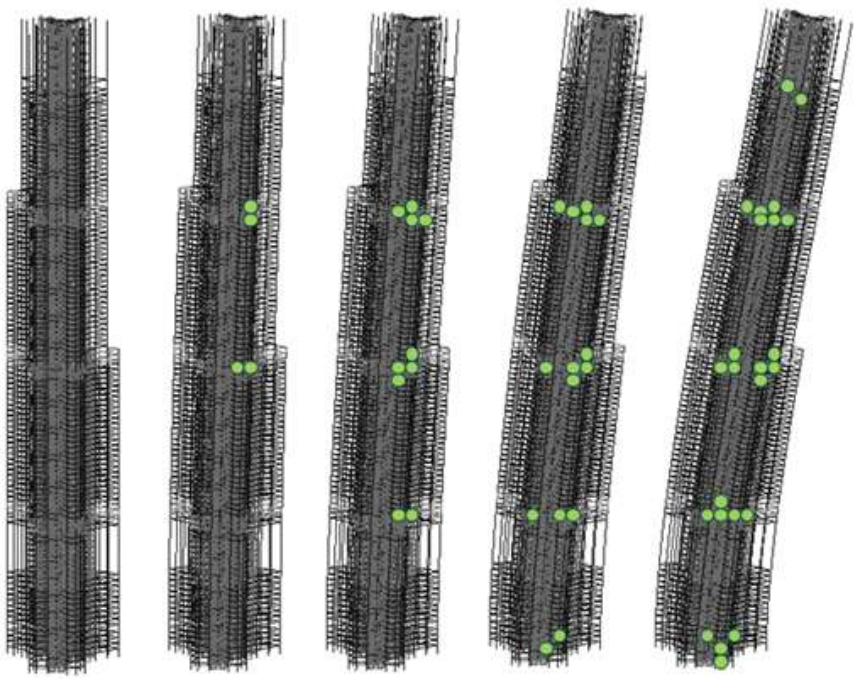
① 푸시오버 해석

- 일반사항

- 대상 구조물의 성능을 정확히 평가하고 예상되는 하중에 의하여 발생할 수 있는 피해의 정도를 최대한 정밀히 예측하는데 그 목적이 있다. 개별 부재의 재료비선형 거동특성을 정의한 후 횡변위를 증가시키면서 구조물의 상태를 평가한다.

- 결과물

- 최상층 횡변위 기준선정을 위한 근거
- 구조물 손상발생 위치를 파악하여 최적 계측위치 제시



푸시오버 해석 예시

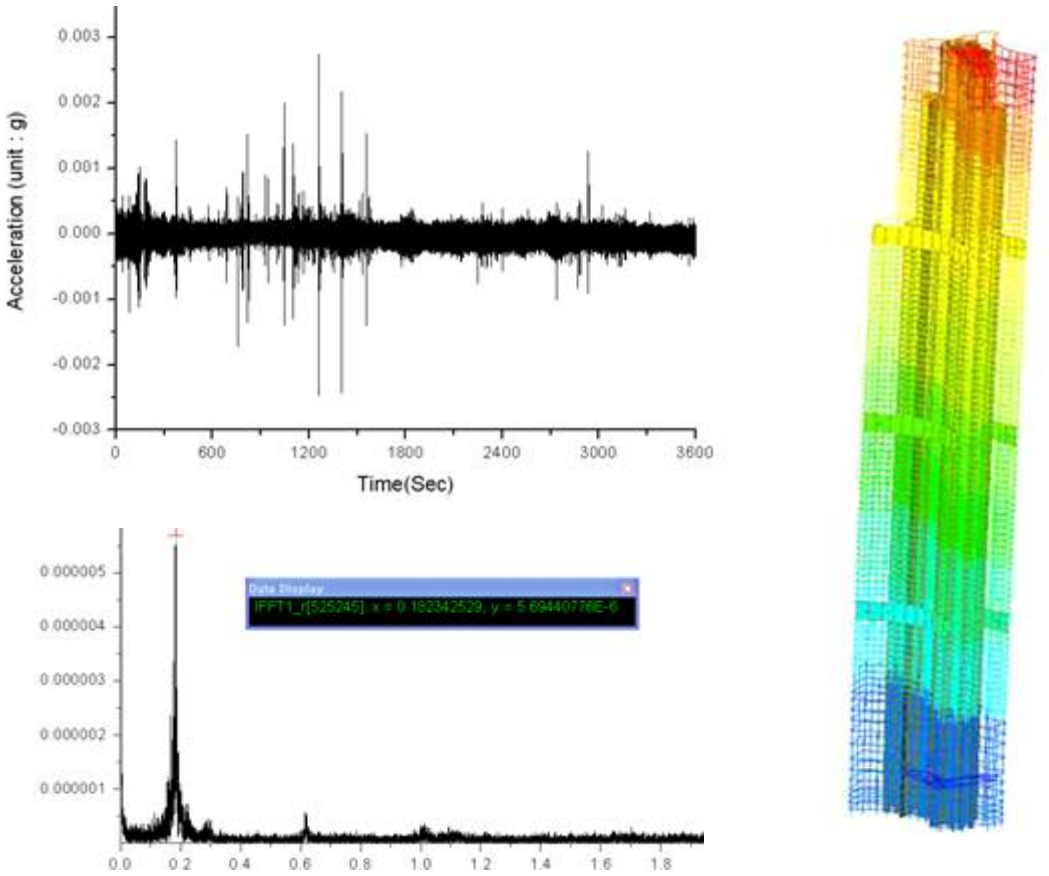
② 비선형 시간이력 해석

- 일반사항

- 초고층 건물은 일반적인 중저층 건물과 비교하여 고차모드의 영향이 큰 동적특성을 가지고 있기 때문에, 비선형 시간이력 해석을 통하여 구조물의 동적 응답을 보다 정확하게 예측한다.

• 결과물

- 가속도 응답 기준선정을 위한 근거
- 구조물 손상발생 위치를 파악하여 최적 계측위치 제시



비선형 시간이력 해석 예시

(다) 축소량 분석

① 개요

건물이 고층화 됨에 따라 수직 부재에 작용하는 높은 하중은 수직 부재의 축소를 유발하고 이는 건물의 높이가 설계 레벨에서 벗어나게 하는 요인이 된다. 더욱이 각 수직 부재에 작용하는 연직 하중의 차이에 따른 부등축소량은 바닥의 경사 발생과 같은 사용성 문제나 구조체에 부가 응력과 같은 안전성의 문제를 유발 할 수 있기 때문에 초고층 건물 시공 시에는 이러한 축소량의 영향이 사전에 반드시 고려되어야 한다.
수직 부재 축소는 다음과 같은 크게 두 가지로 분류된다.

- 탄성축소량(Elastic Shortening): 시간과 관계없이 작용 하중에 대하여 발생
- 비탄성 축소량(Inelastic Shortening): 환경, 재료 물성치 차이에 의해 장시간에 걸쳐 발생

먼저 탄성 축소량은 초고층 건물의 수직 부재인 코어 벽체나 기둥 부재에서 그 부재가 부담하고 있는 하중과 부재의 축강성에 따라 발생하게 된다. 탄성계수가 고정되어 있는 철골 부재와는 달리 콘크리트의 탄성계수는 배합 및 재령일에 따라 달라지기 때문에 정확한 탄성 축소량의 예측을 위해서는 부재의 재료 특성 및 재하 시점 등이 매우 중요한 정보가 된다.

또한 시간에 따라 발생하는 비탄성 축소량의 경우 건조수축(Shrinkage)과 크리프(Creep)로 다시 구분시킬 수 있으며, 반영구적으로 증가하는 특성을 지닌다. 건조수축이란 습윤상태에 있는 콘크리트가 수분의 건조에 따라 수축하는 현상을 말하며, 크리프

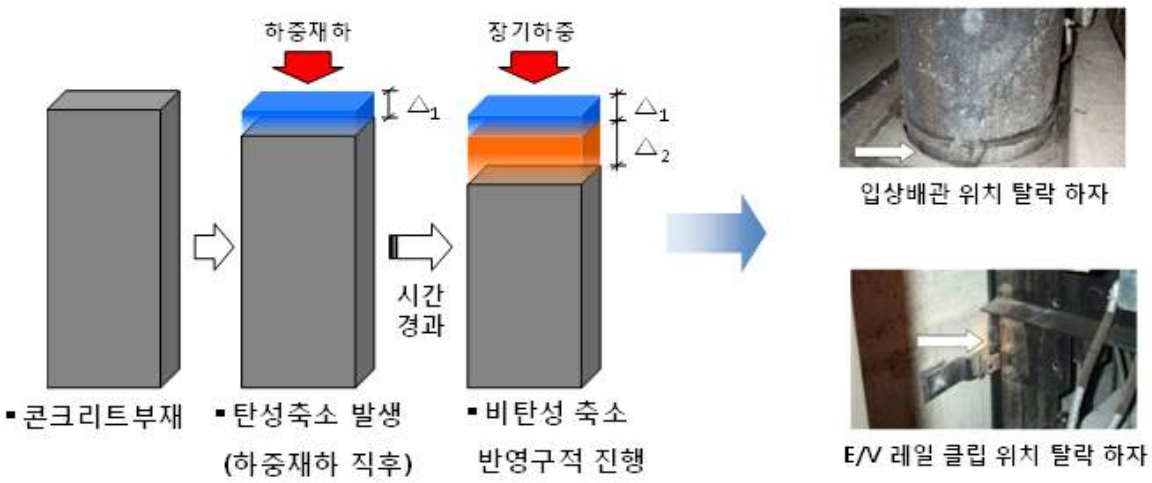
는 일정한 하중을 지속적으로 받을 때, 하중의 특별한 증가 없이도 시간의 경과에 따라 변형이 계속 증대되는 현상을 말한다. 비탄성 축소량은 재료의 특성, 부재의 단면크기, 하중조건 및 온도, 습도와 같은 환경조건에 따라서도 그 발생량이 차이가 날 수 있으며, 현장 공정 및 시공 하중 등 다양한 원인으로 그 결과가 변동할 수 있다.

이러한 탄성 변형 및 비탄성 변형에 의해 각 수직 부재에는 절대 축소량이 발생하게 되며, 인접 부재간의 절대 축소량이 상이할 경우, 상대적인 축소량의 차이에 의하여 부등 축소량이 발생하게 된다. 이러한 수직 부재의 절대 축소량 및 부등 축소량은 사용성 또는 구조 안전성 측면에서 다음과 같이 다양한 문제를 야기할 수 있다.

초고층 건물의 수직부재 축소는 바닥 레벨, 칸막이벽, 외부 마감재, 설비덕트 등에 변형을 유발하여 공사 후 하자를 일으킬 수 있다. 이러한 하자가 반드시 구조적인 문제를 동반하는 것은 아니지만 초고층 건물의 사용자들에게 시공 및 구조적 안정성에 대한 불안감을 조성할 수 있다.

또한 수직 부재간의 부등축소량 (Differential Column Shortening)은 이들 부재를 연결하는 수평 부재에 추가적인 응력을 유발하게 된다.

이러한 변형이 건물에 미치는 영향을 최소화하기 위해 초고층 구조물의 설계에서부터 사용 시점까지 수직 부재 축소량을 고려하여 안전성 및 사용성을 확보하여야 한다.



탄성 축소량과 비탄성 축소량

② 시공단계 해석

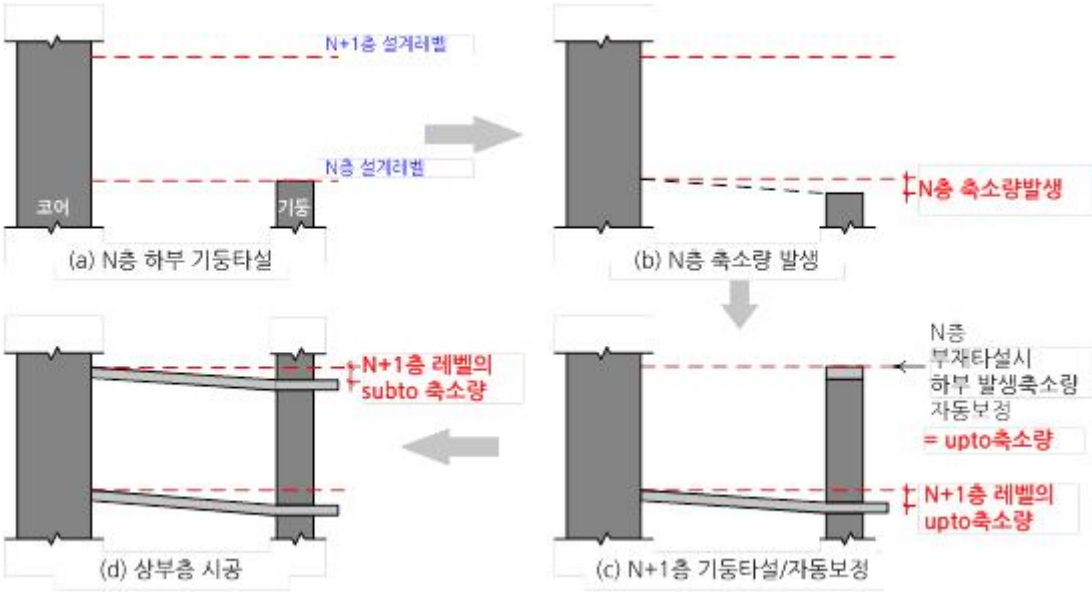
• 일반사항

일반적으로 수직 부재의 축소량은 슬래브 타설 전 축소량(Up to slab installation shortening)과 슬래브 타설 이후의 축소량(Subsequent to slab installation shortening)으로 구분하여 산정한다. 슬래브 타설 전 축소량은 어떤 층이 타설되기 이전 아래층 수직 부재에서 발생한 축소량의 합으로 철근 콘크리트 구조물의 경우 슬래브 타설시 레벨을 맞추는 과정에서 자동적으로 보정이 이루어지므로 사용성에 전혀 문제가 되지 않으며 부가 응력도 유발되지 않는다. 그러나 슬래브 타설 이후의 축소량은 그 층 타설 후 계속되는 하중의 증가와 시간에 따른 크리프와 건조수축의 진행에 따라 발생하는 축소량으로서 슬래브의 기울어짐 등의 원인이 되므로 반드시 보정하여야 한다.

슬래브를 타설하는 시점은 다음과 같이 두 종류의 축소량에 대한 분기점이 된다.

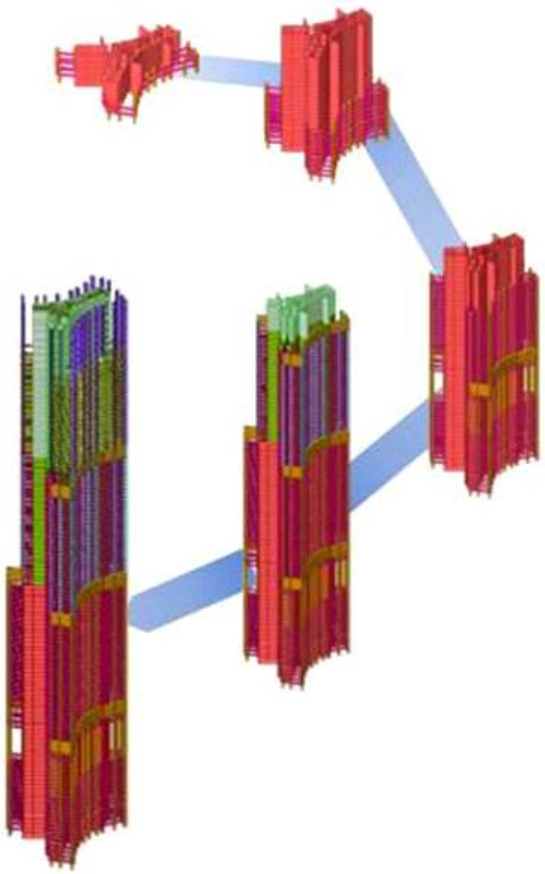
- 슬래브 타설 전에 발생한 축소량(Up to Slab installation shortening) : 슬래브 타설 전에 발생한 축소량은 수평 부재에 부가 하중을 유발하지 않으며 시공 시 슬래브 레벨을 맞추는 과정에서 저절로 보정이 이루어진다. 철근 콘크리트 공사의 경우 슬래브 타설 시 거푸집의 높이를 설계 위치까지 조절하면 보정할 수 있다.
- 슬래브 타설 후에 발생한 축소량(Subsequent to Slab installation shortening) :

슬래브 타설 후에 발생하는 축소량은 슬래브 설치 이후의 추가 하중과 콘크리트의 비탄성축소에 의하여 발생하는 것으로서, 수평 부재에 부가 응력을 발생시키므로 구조설계 시 이에 대한 영향을 반영하여야 한다. 또한 이 축소량은 슬래브 타설 전에 발생한 축소량과 달리 미리 예측하여 거푸집을 반대 방향으로 경사지도록 제작하여 수평 부재가 바른 위치를 확보하도록 보정하는데 사용된다.



슬래브타설전(upto) / 슬래브타설후(subto) 축소량 개념도

- 해석 결과물
  - 축소량 변형률 기준선정을 위한 근거
  - 축소량 보정량 및 조치사항 제시
  - 주요부재 시공 중 변형률 예측값 제시



시공단계 해석 예시

(3) 표준 SHM 모니터링 시스템 제안

(가) 관리기준치 제안

① 초고층 구조물

- 풍하중

초고층 구조물은 중요도가 높고 거주인원이 매우 많기 때문에 통상적인 건축물보다 높은 안전도를 요구한다. 그러므로 구조물 설계시 300년 재현주기 풍하중으로 설계되고 있으며, 관리기준치 또한 위험단계를 300년 재현주기를 통해 구한다.

구분	관리기준치				비고
	안전	주의	경고	위험	
풍속 (m/s)	100 년 이하	300 년 이하	극한 풍속 이하	극한 풍속 초과	

- 지진하중

초고층 구조물의 지진가속도는 중요도를 특으로 할 때, 2400년 재현주기의 2/3배에 중요도 계수 1.5를 고려하면, 2400년 재현주기의 설계유효지반가속도를 관리기준치로 산정할 수 있다.

구분	관리기준치				비고
	안전	주의	경고	위험	
지반 가속도 (g)	2400년 재현주기 이하	2400년 재현주기 x (2/3) 이하	2400년 재현주기 이하	2400년 재현주기 초과	

- 횡변위

초고층 구조물의 횡변위는 풍하중에 지배되기 때문에, 풍하중에 의해 산정된 해석 변위를 관리기준치로 산정할 수 있다.

구분	관리기준치				비고
	안전	주의	경고	위험	
횡변위 (m)	100 년 풍속 변위 이하	300 년 풍속 변위 이하	극한 풍속 변위 이하	극한풍속 변위 초과	

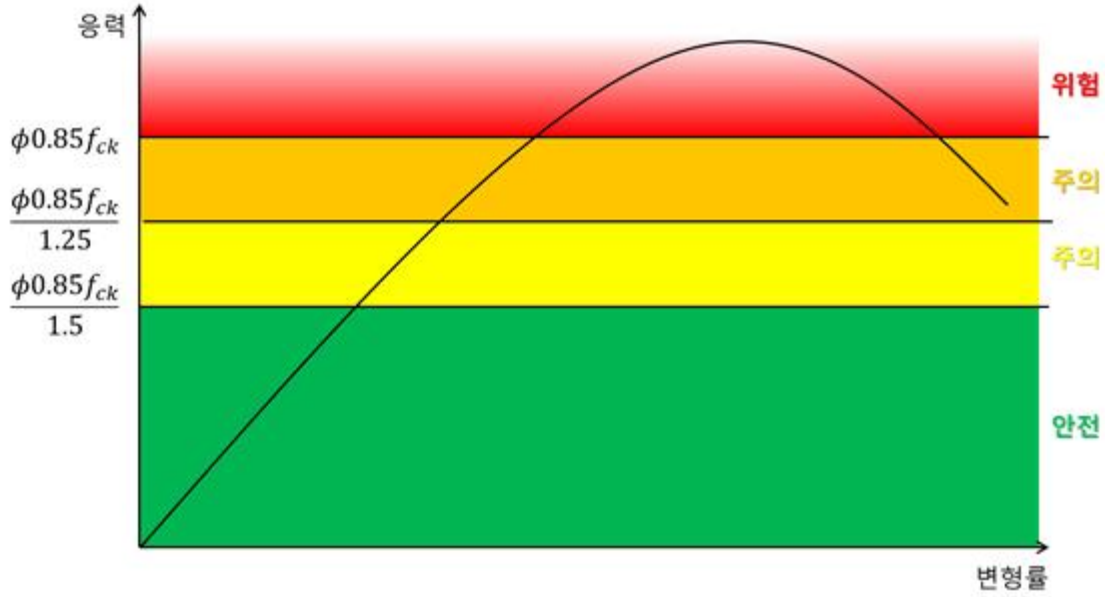
- 층간 변위비

건물의 과도한 경사의 발생은 외장재, 칸막이벽의 하자 및 출입구, 창문틀의 일그러짐에 대한 원인이 된다. 관리기준치는 다음과 같다.

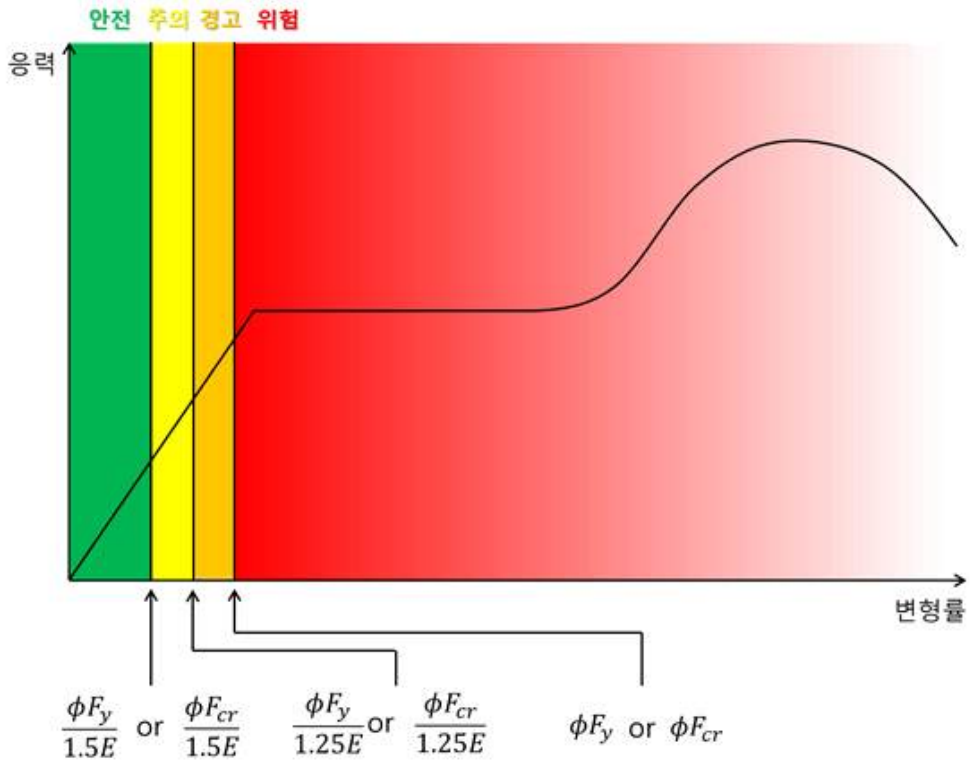
구분	관리기준치				비고
	안전	주의	경고	위험	
층간 변위비	< 0.2% +/-	< 0.5% +/-	< 1.5% +/-	>= 1.5% +/-	

- 주요부재 응력

주요부재는 재료 특성에 따라 철근콘크리트, 철골로 나뉘어진다. 재료 별 관리기준치는 다음과 같다.



철근 콘크리트 관리기준치



철골 관리기준치

② 초고층 외 구조물

- 풍하중

구조물 설계시 100년 재현주기 풍하중으로 설계되고 있으며, 관리기준치 또한 위험단계를 100년 재현주기를 통해 구한다.

구분	관리기준치				비고
	안전	주의	경고	위험	
풍속 (m/s)	50 년 이하	100 년 이하	극한 풍속 이하	극한 풍속 초과	

- 지진하중

초고층 구조물의 지진가속도는 중요도를 1로 할 때, 2400년 재현주기의 2/3배에 중요도 계수 1.2를 고려하면, 관리기준치를 산정할 수 있다.

구분	관리기준치				비고
	안전	주의	경고	위험	
지반 가속도 (g)	200년 재현주기 이하	2400년 재현주기 x (2/3) 이하	2400년 재현주기 x(2/3)x1.2 이하	2400년 재현주기 x(2/3)x1.2 초과	

- 횡변위

구조물의 횡력이 풍하중에 지배될 경우, 풍하중에 의해 산정된 해석 변위를 관리기준치로 산정할 수 있다.

구분	관리기준치				비고
	안전	주의	경고	위험	
횡변위 (m)	50 년 풍속 변위 이하	100 년 풍속 변위 이하	극한 풍속 변위 이하	극한풍속 변위 초과	

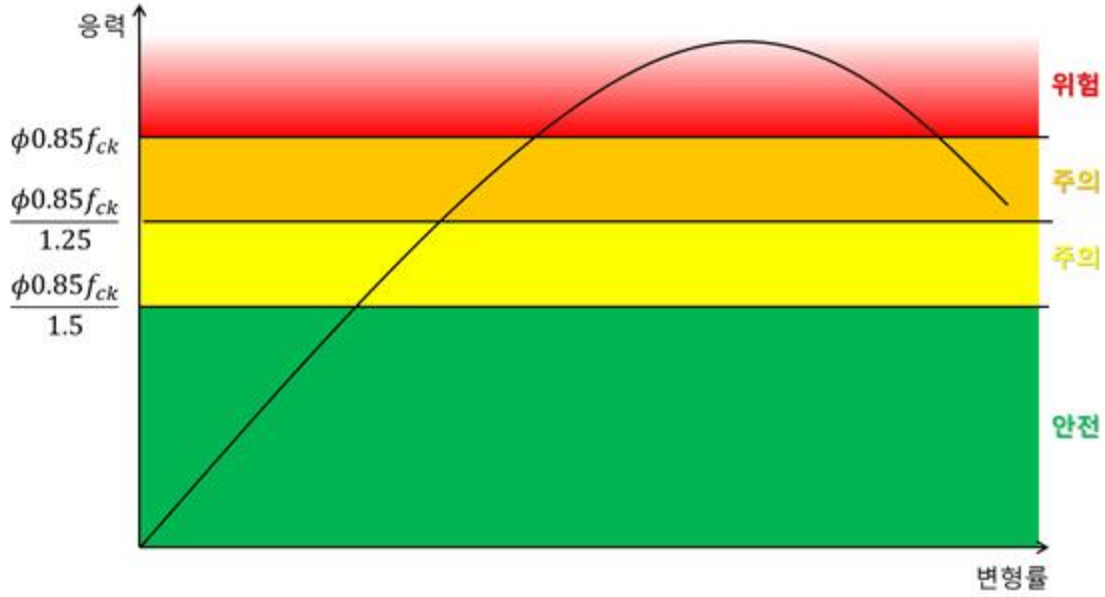
- 층간 변위비

건물의 과도한 경사의 발생은 외장재, 칸막이벽의 하자 및 출입구, 창문틀의 일그러짐에 대한 원인이 된다. 관리기준치는 다음과 같다.

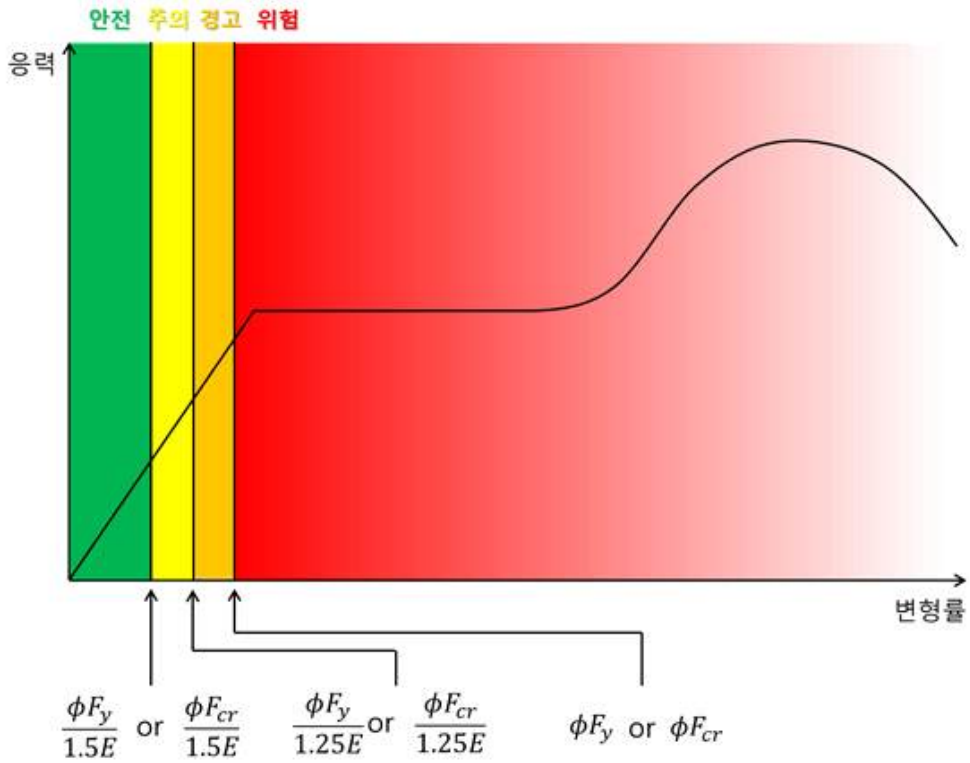
구분	관리기준치				비고
	안전	주의	경고	위험	
추가 변위비	< 0.2% +/-	< 0.5% +/-	< 1.5% +/-	>= 1.5% +/-	

- 주요부재 응력

주요부재는 재료 특성에 따라 철근콘크리트, 철골로 나뉘어 진다. 재료 별 관리기준치는 다음과 같다.



철근 콘크리트 관리기준치



철골 관리기준치

(나) 대처 시나리오 제안

모니터링 시스템 운영에 따른 대처 시나리오는 구조물이나 발주처에 따라 약간 상이할 수 있으나, 기본적인 운영철학은 공유할 수 있다. 다음은 SHM 시스템 대처 시나리오 제안 예시이다.

구분	안전	주의	경고	위험
주요 부재 손상 시	• 모든 부재가 설계 하중에 의한 응답보다 작은 응답을 나타내는 상태 . ⇒ 조치 불필요 .	• 부재 일부가 설계 하중에 의한 응답보다 큰 응답을 나타내지만 재료의 강도를 초과하지는 않은 상태 . ⇒ 전문가에 의한 원인 분석 .	• 주요부재가 설계 하중에 의한 응답보다 큰 응답을 나타내지만 재료의 강도를 초과하지는 않은 상태 . ⇒ 거주민 대상 경고 방송 . ⇒ 전문가에 의한 분석 및 대책 수립 .	• 주요부재가 설계 시 고려한 재료의 항복 강도를 초과한 상태 . 갑작스러운 처짐이나 부재의 파단이 발생할 가능성이 있음 . ⇒ 거주민 대상 대피 방송 . ⇒ 전문가에 의한 대책 수립
태풍 시	• 일부 상층부에서 사용성 관리기준을 초과할 수 있으나 부재에는 손상이 발생하지 않음 . ⇒ 조치 불필요 .	• 사용성 관리기준이 초과되는 층이 확대되나 부재에는 손상이 발생하지 않음 . ⇒불안 해소를 위한 거주민 대상 안전 안내 방송 .	• 사용성 관리기준이 초과되는 층이 더욱 확대되나 부재에는 손상이 발생하지 않음 . ⇒ 주민 대상 경고 방송 . ⇒ 전문가에 의한 분석 및 대책 수립 .	• 극한 풍속을 초과하였으니 주요부재 손상 가능 . ⇒ 거주민 대상 대피방송 . (설계 풍속을 초과할 가능성있음) ⇒ 전문가에 의한 대책 수립
지진 시	• 부재에서는 어떠한 손상도 발생하지 않음 . ⇒ 조치 불필요 .	• 부재에서는 어떠한 손상도 발생하지 않음 . ⇒ 불안 해소를 위한 거주민 대상 안전 안내 방송 .	• 일부 부재에서 손상이 발생하지만 주요 구조 부재에는 어떠한 손상도 발생하지 않음 ⇒ 거주민 대상 경고 방송 . ⇒ 전문가에 의한 분석 및 대책 수립 .	• 설계하중을 초과하였으니 주요부재 손상 가능 . ⇒ 거주민 대상 대피 방송 . ⇒ 전문가에 의한 대책 수립

2. 구조물 실시간 상태평가 시스템 개발

가. 손상 추정 기법

(1) 개요

구조물의 손상을 추정하는 기법은 다양하다. 구조물 손상시 변화하는 양상으로 분류를 한다면, 동특성, 즉, 고유주기, 모드형상 등의 변화를 관찰하여 손상을 추정할 수 있는 기법이 있으며, 구조물의 응력 또는 변형률의 변화를 관찰하여 추정할 수 있는 기법이 있다.

데이터를 분석하는 방법에 관련하여 분류를 한다면, 엔지니어가 직접 데이터를 분석하여 구조물 상태평가를 수행하는 방법, 패턴인식 기법을 이용하는 방법, 관리기준치를 활용하는 기법이 있다.

구조물 손상을 추정하는 여러가지 기법은 각기 장단점이 있기 때문에, 효과적인 구조물상태평가를 수행하기 위해서, 필요시 기법의 장점을 조합하여, 모니터링을 수행하는 것이 적절할 것으로 판단된다. 또한, 구조물의 상태평가 성능을 향상시키기 위해서는 적절한 위치에 예상되는 응답을 효과적으로 수집할 수 있도록 모니터링 시스템을 최적화 시켜야 하며, 수집된 데이터를 효과적인 손상 추적 기법을 사용하여 상태평가를 수행할 때, 좀 더 발전된 결과물을 기대할 수 있을 것이다.

(2) 구조물 손상시 변화 양상 파악

(가) 동특성 변화

① 고유진동수

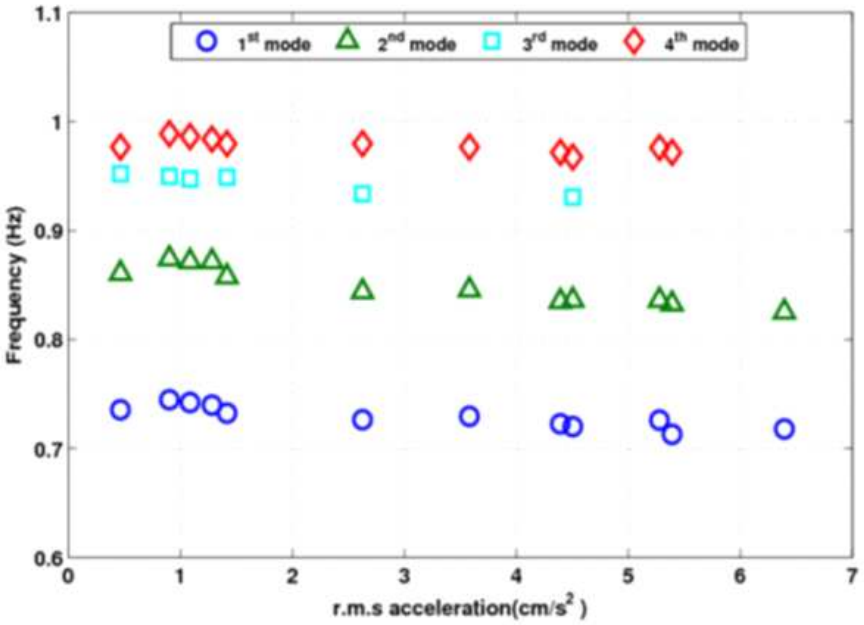
구조물의 고유진동수는 상대적으로 계측을 통해 그 값을 식별하기가 쉽고, 계측값을 분석하는 기법도 많은 연구가 진행되어왔다.

하지만 Chen (1995)에 따르면, 철골 실험체에 발생한 손상이 설계하중만으로도 파괴될 수 있는 상태임에도, 고유진동수의 변화는 5% 미만으로 발생하였는데 이것은 구조물 손상 외, 다른 요인, 예를 들어 온도나 하중의 세기 등에 의한 진동수 변화와 명백하게 분리하기 어려운 점이 있다.

그밖에도 구조물의 고유진동수는 마감재, 조적벽체 등 비구조체의 영향, 적재하중 변화의 영향, 비구조균열에 의한 영향으로 변화할 수 있기 때문에 고유진동수의 변화만으로 구조물의 손상을 파악하는 것은 한계가 있다.

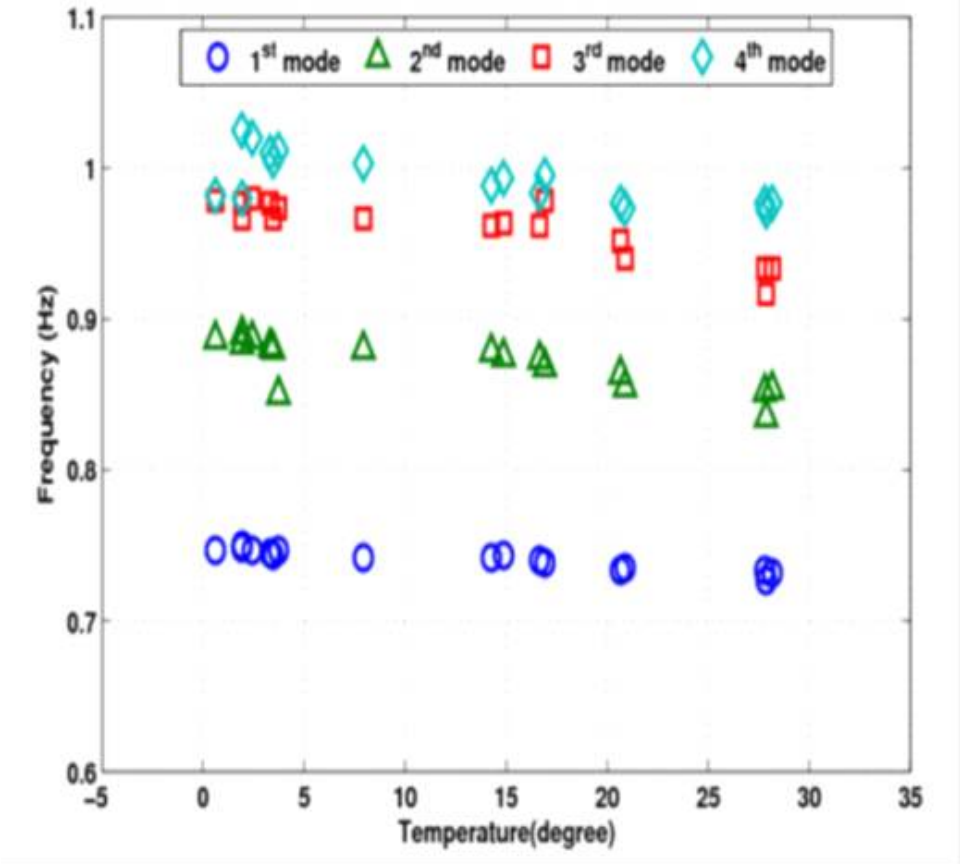
이처럼 구조물 고유진동수에 변화는 많은 변수를 가지고 있기 때문에 다른 방법과 조합하여 고유 진동수 변화의 변수를 줄이는 것이 중요하다. 예를 들어 구조물의 특정한 이벤트가 발생했다면, 이벤트 전후의 비슷한 환경의 계측데이터를 가지고 분석하면 정확도를 높일 수 있을 것이다. 또는 장기간 데이터를 수집하여, 주변환경 변화에 따른 고유진동수 변화의 양상을 파악할 수 있다면, 예를 들어 여름과 겨울의 온도차에 의한 고유진동수 변화, 바람 세기의 차이에 의한 고유진동수 변화 등, 특정 건물에 고유적인 특징을 분석할 수 있다면 구조물의 상태를 파악하는 데 많은 도움이 될 것이다.

유은종(2012)에 따르면, 서귀포 2002 월드컵 경기장을 계측한 결과, 가속도의 RMS 값 변화에 따른 고유진동수를 나타내었다. 가속도 RMS값이 0.9 cm/sec2에서 5.39 cm/sec2로 증가할 때 1차와 2차 고유진동수는 각각 4.26%와 4.75%가 감소하였다.



하중 세기에 따른 고유진동수 변화 예시

또한 온도가 27.8도에서 0.6도로 27.2가 감소하는 동안 1차~4차 고유진동수는 2.5%, 4.3%, 5.0%, 4.9% 증가하였다.



온도 변화에 따른 고유진동수 변화 예시

서귀포 2002 월드컵 경기장의 하중 세기 및 온도에 따른 고유진동수의 변화 양상은 고유적 특성이기 때문에 다른 구조물에 그대로 사용하는 것은 바람직하지 않다. 구조물마다 하중 및 온도에 대한 고유진동수의 변화는 아직 명확한 규정을 하기 어렵게 때문에 구조물의 모니터링을 수행할 경우, 계측시스템 설치를 완료 후, 데이터를 확보하여 구조물의 특성을 파악하는 것은 매우 중요할 것으로 판단된다.

윤성원(2009)에 따르면 육안으로 관찰되는 손상 발생 시 구조물의 강성 변화율은 약 66%이며, 고유진동수 변화율을 약 20%를 나타낸다고 하여, 국립재난안전연구원(2014)은 구조물의 고유진동수 변화율에 대한 관리기준을 20%로 설정하였다.

그러나 구조물의 강성 변화율에 대한 관리기준은 일괄적으로 관리하기에는 구조물마다 고유특성의 차이가 너무 크다. 그렇기 때문에 특정구조물마다 가지고 있는 강성특성을 파악하기 위해 상세해석 등이 수행되야한다. 예를 들어 푸시오버 해석에 의한 결과 또는 비선형 시간이력 해석에 의한 결과를 사용하는 방법이 있다.

② 모드형상

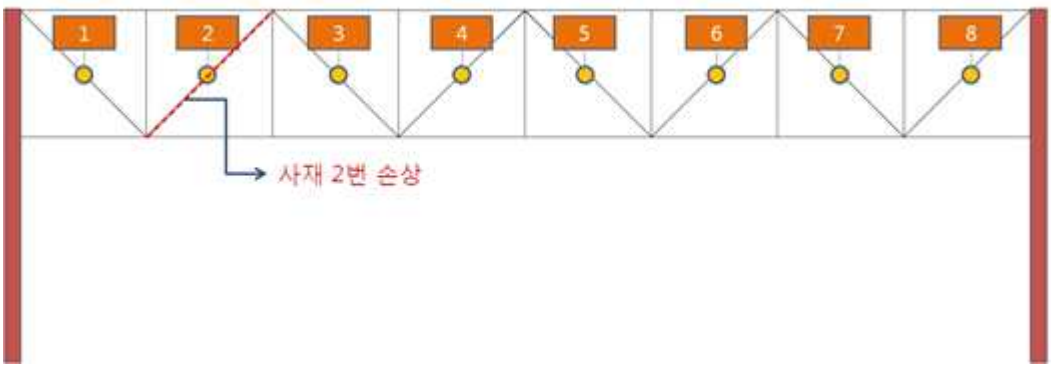
구조물의 모드형상을 구하기 위해서는 목표하는 모드수에 따라 다소 많은 숫자의 센서가 설치되어야 한다. 손상 전, 후 구조물의 모드 형상 변화에 따라 구조물 손상을 추정하는 것인데, 고유진동수와 마찬가지로 구조물 손상 외 다른요인에 의한 영향과 명백하게 분리하기 어려운 점이 있다. 구조물 상태평가를 위해 고유진동수 및 다른 특성들과 조합하여 사용한다면, 구조물의 손상을 파악하는 데 도움이 될 수 있다.

(나) 동특성 변화구조물 주요부재 응력 및 변형률 변화

구조물 손상시, 예를 들어 특정 기둥 또는 보가 파괴된다면, 손상 후 해당 부재의 응력 및 변형률이 변화할 뿐만 아니라, 주변 부재의 응력 및 변형률 양상 또한 함께 변화할 것이다. 대형 구조물 모니터링 시스템을 구축할 때, 모든 부재에 계측센서를 부착하는 것은 현실적으로 어렵기 때문에 제한된 개수의 계측데이터를 이용하여 주변 부재의 영향까지 예측할 수 있다면 매우 유용할 것이다. Se Woon Choi(2013)에 따르면, 주변 센서의 양상변화를 통하여, 손상되거나 설치되지 않은 부재의 변형률을 예측하였다.

구조물의 하중은 항상 변화한다. 매시간 변화하는 풍하중 뿐만 아니라, 수직 적재하중도 변화하고 온도 등에 의해서도 변형이나 응력이 발생할 수 있다. 그런 영향이 있음에도 불구하고 정상적인 상태에서 부재에 예상되는 최대 응력 및 최대 변형률은 예상할 수 있으며, 부재 파괴 등에 의한 영향이 일반적인 하중에 의해 예상된 최대 응력 및 변형률 양상보다 상대적으로 크다면, 손상을 파악할 수 있을 것이다.

초고층 구조물 같은 대형 구조물은 건물을 지지하는 주요부재의 손상이 발생하더라도 동특성의 변화는 미미할 수 있다. 이러한 경우 주요부재의 모니터링이 수행되지 않는다면 적절한 상태평가를 수행할 수 없다. 그렇기 때문에 구조물 동특성 변화와 구조물 주요부재 응력 및 변형률의 변화는 종합적으로 판단될 필요가 있다.



주요부재 손상 예시

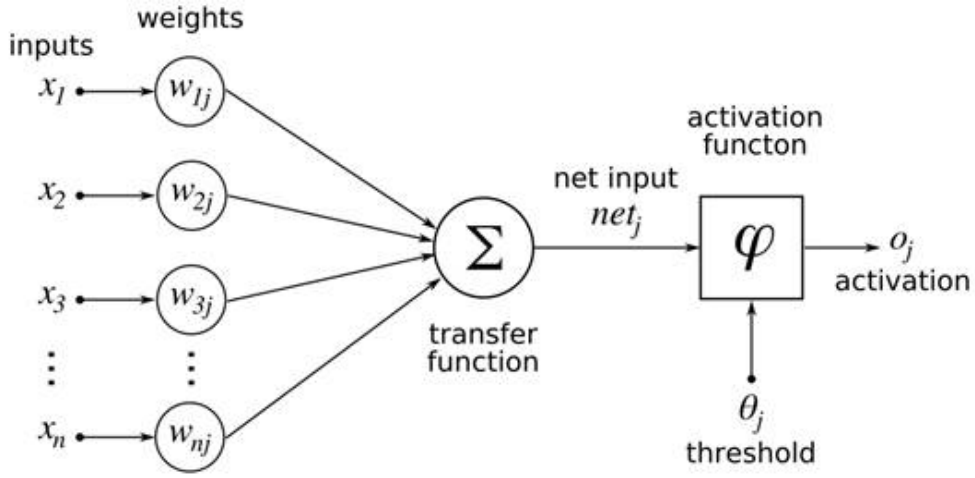
(3) 계측 데이터 분석 방법

(가) 패턴인식

패턴인식(Patter Recognition)은 인지과학(Cognitive Science)과 인공지능(Artificial intelligence)분야에 속하는 문제 중 하나이다. 인지과학은 심리학, 컴퓨터 과학, 인공지능, 신경생물학과 언어학, 철학을 이용하여 지능과 인식의 문제를 다루는 포괄적인 분야를 말하며, 인공지능은 인간의 학습능력과 추론능력을 인공적으로 모델링하여 외부 대상을 지각하는 능력, 나아가 자연어 처리 능력을 컴퓨터 프로그램으로 구현하는 것을 말한다. 이러한 기술은 수많은 빅데이터를 적절히 가공하고 처리하여 금융, 제조, 스포츠, 서비스분야 등 여러 부문에 널리 이용되고 있다.

① 인공신경망

인공신경망(Artificial Neural Network, ANN)은 시냅스의 결합으로 네트워크를 형성한 인공 뉴런(노드)이 학습을 통해 시냅스의 결합 세기를 변화시켜, 문제 해결 능력을 가지는 모델 전반을 나타낸다.



인공신경망 개념도

워런 맥컬록(Warren McCulloch)과 월터 피츠(Walter Pitts)는 (1943) 수학과 임계 논리(threshold logic)라 불리는 알고리즘을 바탕으로 신경망을 위한 계산학 모델을 만들었다. 이 모델은 신경망 연구의 두 가지 다른 접근법에 대한 초석을 닦았다. 하나의 접근법은 뇌의 신경학적 처리에 집중하는 것이고 다른 하나는 인공 신경망의 활용에 집중하는 것이다.

1940년 후반에 심리학자 도널드 헤비안(Donald Hebb)는 헤비안 학습(Hebbian learning)이라 불리는 신경가소성의 원리에 근거한 학습의 기본 가정을 만들었다. 헤비안 학습은 전형적인 자율학습으로 이것의 변형들은 장기강화(long term potentiation)의 초기 모델이 된다. 이러한 아이디어는 1948년 튜링의 B-type 기계에 계산학 모델을 적용하는데서 출발하였다.

팔리(Farley)와 웨슬리 클라크(Wesley A. Clark)는(1954) MIT에서 헤비안 네트워크를 모의 실험하기 위해 처음으로 계산학 모델(후에 계산기라 불리는)을 사용하였다. 다른 신경망 계산학 기계들은 로체스터(Rochester), 홀랜드(Holland), 하빗(Habit), 두다(Duda)에 의해 만들어졌다. (1956)

프랑크 로젠블라트(Frank Rosenblatt)는 (1958) 퍼셉트론 즉, 간단한 덧셈과 뺄셈을 하는 이층구조의 학습 컴퓨터 망에 근거한 패턴 인식을 위한 알고리즘을 만들었다. 계산학 표기법과 함께 로벤블라트는 또한 기본적인 퍼셉트론에 대한 회로가 아닌예를 들

면 배타적 논리합 회로(exclusive-or circuit)와 같은 회로를 표기하였다. 해당 회로의 수학 계산은 폴 웨어보스(Paul Werbos)에 의해 오차역전파법이 만들어진 후에 가능하였다. (1975)

마빈 민스키(Marvin Minsky)와 시모어 페퍼트(Seymour Papert)에 의해 기계학습 논문이 발표된 후에 (1969) 신경망 연구는 침체되었다. 그들은 인공신경망에서 두 가지 문제점을 찾아내었다. 첫 번째로는 단층 신경망은 배타적 논리합 회로를 처리하지 못한다는 것이다. 두 번째 중요한 문제는 거대한 신경망에 의해 처리되는 긴 시간을 컴퓨터가 충분히 효과적으로 처리할 만큼 정교하지 않다는 것이다. 신경망 연구는 컴퓨터가 충분히 빨라지고, 배타적 논리합 문제를 효율적으로 처리하는 오차역전파법이 만들어지기까지 더디게 진행되었다.

1980년대 중반 병렬 분산 처리는 연결주의(connectionism)라는 이름으로 각광을 받았다. 데이비드 럼멜하트(David E. Rumelhart)와 제임스 맥클레랜드(James McClelland)가 쓴 교과서는 (1986) 연결주의를 이용해 신경 처리를 컴퓨터에서 모의 실험하기 위한 모든 것을 설명하였다.

인공신경망이 어느정도 뇌의 기능을 반영하는지 불분명하기 때문에 뇌 신경 처리의 간단한 모델과 뇌 생물학적 구조간의 상관관계에 대해 논란 중에 있으나 인공지능에서 사용되는 신경망은 전통적으로 뇌 신경 처리의 간단한 모델로 간주된다.

인공신경망은 SVM과 같은 다른 기계학습 방법들의 인기를 점차적으로 추월하고 있다. 2000년대 이후 딥 러닝의 출현이후 신경 집합의 새로운 관심은 다시 조명받고 있다.

인공신경망을 이용한 구조물 손상추정은 많은 연구사례가 있다. Hojjat Adeli, Hyo Seon Park(1995)은 반대방향 전파 인공신경망 기법 (Counter-Propagation Neural Network, CPNN)을 이용하여 콘크리트 보 및 철골보의 손상 탐지를 연구하였으며, Zhao 등 (1998)은 반대방향 전파 인공신경망 기법 (Counter-Propagation Neural Network, CPNN)을 이용하여 3경간 보와 평면 골조 구조물의 강성 변화를 탐지하였다. Bani-Hani 등(1999)은 지진하중을 받는 3층 골조 구조물의 실험 데이터를 이용해 다층 전방향 인공신경망기법 (Multilayer Feedforward Neural Network, MFNN) 을 학습시켜 손상 탐지를 수행하였다. Zang과 Imregun (2001)은 역전파 인공신경망기법 (Backpropagation Neural Network, BPNN)을 이용해 철골보의 균열을 탐지하였다. Hung과 Kao(2002)는 5층 전단 구조물의 강성과 감쇠비 변화를 탐지하였다. Huang 등(2003)은 진동대 실험으로 5층 철골조에 발생한 손상을 탐지하였다. Pandey와 Barai (1995)는 다층 인식자(Multilayer perceptron)와 BPNN을 이용해 철골 트러스 교량의 강성감소를 식별하였으며, Huang과 Loh(2001)는 다층 Levenberg - Marquardt BPNN을 이용해 5경간 프리스트레스 콘크리트 교량의 손상을 추정하였다.

② 유전자 알고리즘

유전 알고리즘은 자연계의 생물 유전학에 기본 이론을 두며, 병렬적이고 전역적인 탐색 알고리즘으로서, 다윈의 적자생존 이론을 기본 개념으로 한다. 유전 알고리즘은 풀고자 하는 문제에 대한 가능한 해들을 정해진 형태의 자료구조로 표현한 다음, 이들을 점차적으로 변형함으로써 점점 더 좋은 해들을 만들어 낸다. 여기에서 해들을 나타내는 자료구조는 유전자, 이들을 변형함으로써 점점 더 좋은 해를 만들어 내는 과정은 진화로 표현할 수 있다.

달리 표현하면, 유전 알고리즘은 어떤 미지의 함수 Y = f(x)를 최적화하는 해 x를 찾기 위해, 진화를 모방한(Simulated evolution) 탐색 알고리즘이라고 말할 수 있다.

유전 알고리즘은 특정한 문제를 풀기 위한 알고리즘이라기 보다는 문제를 풀기 위한 접근방법에 가까우며, 문제를 유전 알고리즘에서 사용할 수 있는 형식으로 바꾸어 표현

할 수 있는 모든 문제에 대해서 적용할 수 있다. 일반적으로 문제가 계산 불가능할 정도로 지나치게 복잡할 경우 유전 알고리즘을 통하여, 실제 최적해를 구하지는 못하더라도 최적해에 가까운 답을 얻기 위한 방안으로써 접근할 수 있다. 이 경우 해당 문제를 푸는 데 최적화되어 있는 알고리즘보다 좋은 성능을 보여주지는 못하지만, 대부분 받아들일 수 있는 수준의 해를 보여줄 수 있다.

이러한 생물의 진화 과정, 즉 자연 선택과 유전 법칙 등을 모방한 알고리즘들로 진화 전략(Evolutionary strategies), 유전 프로그래밍(Genetic programming) 등 여러 형태의 이론과 기법들이 최근에 활발히 연구되고 있다. 유전 알고리즘은 이 중에서 가장 기본이 되고 대표적인 알고리즘으로, 자연과학/공학 및 인문 사회 과학 분야에서 비선형 또는 계산 불가능한 복잡한 문제를 해결하는 데 널리 응용되고 있다.

Chiang과 Lai(1999), Moslem과 Nafaspour(2002) 등은 Residual Force Vector를 이용하여 손상 위치를 먼저 식별하고 그 다음, GA를 이용해 손상 정도를 추정하는 2단계 손상탐지 기법을 제안하였다.

Ostachowiez 등 (2002)은 처음 4개의 고유진동수 변화를 계측하여 사각형 플레이트 수치모델에 추가된 질량의 추가 위치와 크기를 식별하였다. 또한 목적함수에 여러 피크가 나타나는 문제를 해결하기 위해 GA를 사용하였다.

Raich와 Liszhai (2007)는 3층 3경간 철골 구조물의 손상탐지를 위해 GA를 사용하였으며 Hao와 Xia (2002)는 유전자 알고리즘을 이용해 캔틸레버 보의 단면적이 감소한 부분을 탐지하였다.

Perry등 (2006)은 20자유도와 2차원 골조구조물의 대한 손상탐지를 수행하였으며, Jafarkhani와 Masri (2011)는 1/4 규모의 2경간 철근콘크리트 교량에 대한 손상탐지를 수행하였다.

(나) 전문 엔지니어 직접 분석

계측 데이터는 노이즈나 센서, 장비 고장, 기타 원인으로 인하여 기대하지 않는 이상 데이터를 나타내는 경우가 있다. 그렇기 때문에 모든 모니터링 절차를 자동화하기는 현실적으로 어려운 부분이 많다. 그래서 구조물 유지관리를 수행하는 관리자 또는 관리자가 지정한 엔지니어에 의한 데이터 분석이 필요하다. 데이터 분석을 위해서는 동역학, 센서, 장비, 모니터링 시스템, 구조엔지니어링에 대한 전반적인 지식과 경험을 필요로 하기 때문에 일반 방재실 근무자가 아닌 전문가를 필요로 한다.

평상시 운영은 모니터링 시스템 구축시 기본적인 매뉴얼을 작성하고 교육을 수행하여, 관련 전문가가 아니더라도 수행할 수 있도록 하며, 이벤트 발생시, 예를 들어 큰 태풍이 발생하거나, 지진 발생시, 또는 건물 이상징후 발견시 전문가가 계측데이터를 활용하여 종합적인 분석을 수행할 수 있도록 해야 할 것이다. 하지만 이러한 분석은 후처리 작업이며, 시간을 많이 소요하기 때문에 건물상태가 위험한 경우, 유력한 시나리오 분석에 의한 자동 알람 및 대피가 반드시 필요하다.

그러므로 자동 분석 및 엔지니어 후속 분석은 적절한 조합으로 수행되어야 한다.

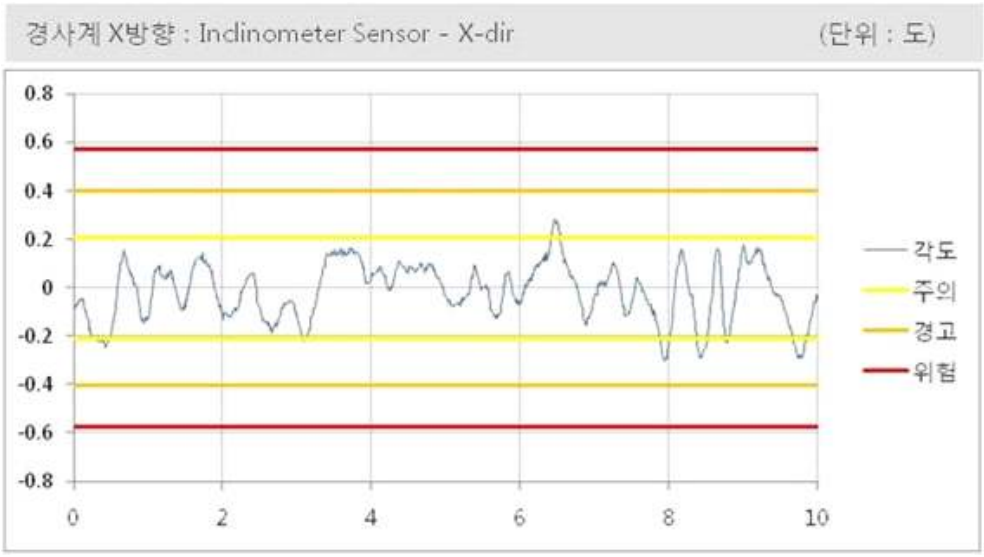
(다) 관리기준치 활용 분석

구조물의 손상은 외력을 예상할 수 있는 경우와 예상할 수 없는 경우로 나눌 수 있다. 외력을 예상할 수 있는 경우는 태풍이나 지진, 수직하중을 의미한다. 외력을 예상할 수 없는 경우는 테러 등에 의한 폭발, 비행기나 자동차의 충돌, 화재나 시공결함 등을 의미한다.

외력을 예상할 수 있는 경우, 설계코드(예를 들어 건축구조기준)나 원설계된 건물의

성능을 바탕으로 구조물 성능을 초과하는 하중 발생시 손상을 예측할 수 있다. 이를 위해서는 관련 하중을 모니터링 할 수 있도록 계측시스템을 구축해야 하며, 관리기준치를 설정하여 상태를 평가한다.

관리기준치를 설정하기 위해서는 시공된 건물을 최대한 정확하게 반영할 수 있는 구조해석 모델링을 작성하도록 하며, 설계하중을 초과하는 과하중 발생시 손상하는 부재를 사전에 분석한다.



관리기준치 개념도

(4) 손상 추정 기법 예시

(가) 변형률 변화 & 패턴인식

구조물을 구조해석 시뮬레이션을 통해 손상시켜 변경되는 구조물 동특성, 즉, 고유진동수와 모드형상의 변화를 DB로 학습시켜 패턴인식 기법을 적용한 연구사례는 비교적 수행된 사례가 많다. 하지만, 초고층 건물의 경우 주요부재의 손상이 구조물 동특성의 명확한 변화를 나타내지 않는 경우도 있기 때문에 이러한 한계점을 보완하기 위해 주요부재 손상에 대한 변형률 변화를 DB로 학습시키는 방법을 수행하였다.

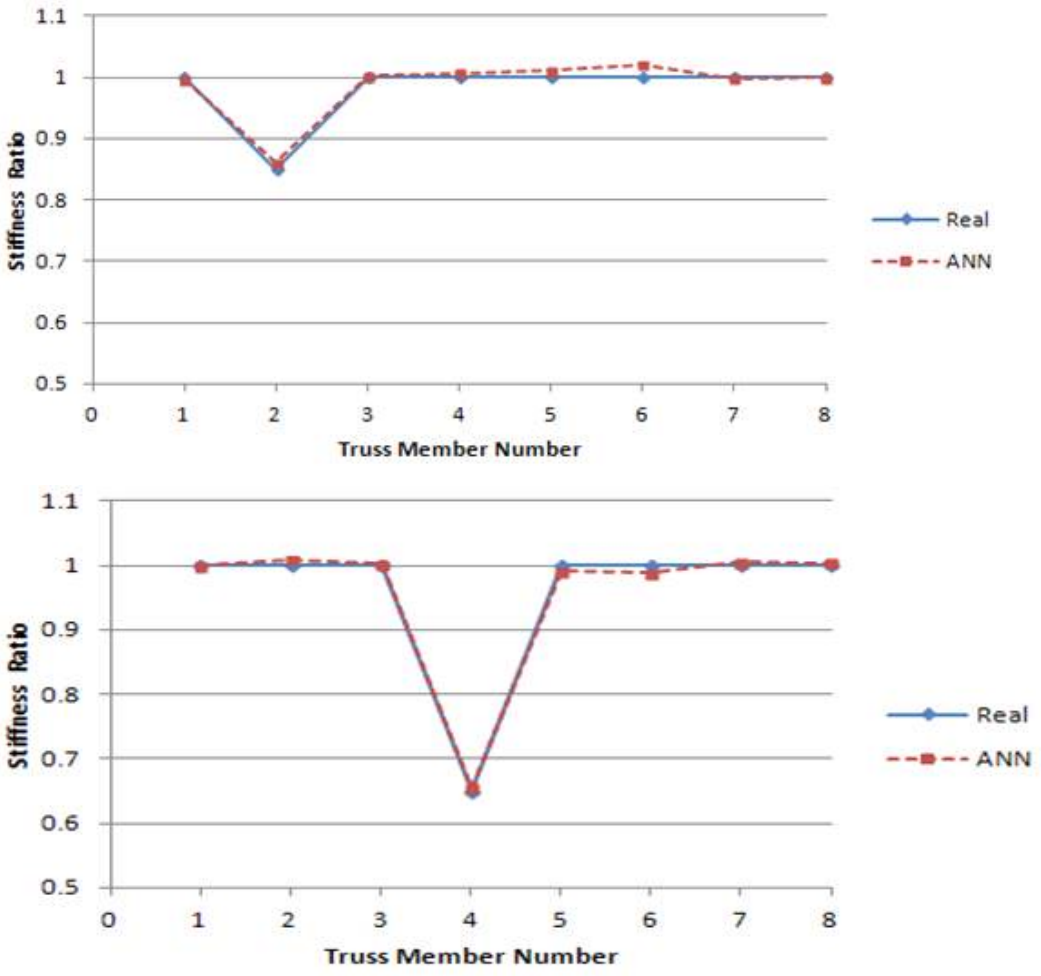
(나) 해석 및 분석

트러스 구조물 손상 해석은 유한요소 프로그램 Midas Gen을 통해 수행되었다. 손상정도는 10%에서 50%까지 10%간격으로 수행되었으며, 인공신경망 알고리즘 검증을 위해 15%, 35% 손상을 추가로 수행하였다. 트러스 구조물 사재8개(1번~8번) 부재에 대하여 손상을 적용하여 해석 후 데이터를 축적하였다. 학습을 위해 사용된 데이터는 사재손상 케이스에 대한 사재와 수직재의 변형률 변화량을 사용하였다.

(다) 테스트 및 결과

인공신경망에는 여러 가지 모델이 존재하는 데, 이번 예제에서는 Radial Basis Neural Network를 사용하여 알고리즘을 구축하였다. Radial Basis Neural Network는 많은 변수에 대하여 학습을 수행할 경우, 다른 모델과 비교하여 상대적으로 안정적인 결과도출이 가능한 것으로 확인하였다.

손상 예측의 최대 오차는 사재2번의 경우 약 2%, 사재 4번의 경우 약 1%로 충분히 정확한 결과값을 나타내었다. 실제 계측에서는 예측하기 어려운 노이즈가 포함되어 오차가 약간 늘어날 수 있으나, 실무적인 측면에서 충분히 효과적인 방법인 것을 확인하였다.



트러스 부재 손상 예측 결과

나. 강성저하 추정 기법

(1) 개요

구조물의 계측 동특성 응답값만을 가지고 손상 추적을 수행하는 것은 앞장에서 설명한 것처럼 많은 한계점을 가지고 있다. 한계점을 보완하기 위해 외력을 예상할 수 있는 경우에 대해서 정밀 해석 및 분석을 수행한다면, 강성저하에 대한 구조물 상태파악을 보다 정확하게 수행할 수 있을 것이다. 정밀해석을 수행하는 방법은 최근 많은 개선과 발전을 하고 있는 구조물 성능평가를 기반으로 한다. 즉, Pushover 해석 및 비선형 시간이력 해석을 기본으로 하며, 필요시 별도 해석을 수행한다.

(2) 푸쉬오버 해석

(가) 일반사항

지진하중 및 풍하중은 건물의 횡변위를 발생하게 하며, 대부분 최상층에서 최대 횡변위가 발생한다. 푸시오버해석은 이러한 내용을 바탕으로 목표변위까지 구조물을 변형시켜 구조물의 성능을 평가한다. 목표 변위까지 변형시키는 과정에서 부재의 항복이 발생하면 구조물 강성을 저하시키며, 이러한 강성 저하를 사전에 분석한다면, 계측에 의한 강성저하 발견시, 부재손상 위치를 파악하는데 큰 도움이 될 것이다.

(나) 분석방법

구조물의 강성저하를 파악하기 위해서는 기본적으로 실제 동특성과 최대한 오차가 적은 해석 모델을 필요로 한다. 일반적으로 설계를 위한 해석 모델은 재료 강도를 보수적으로 평가하고, 비구조체의 영향을 고려하기 어려우며, 슬래브 등의 영향을 고려하기 어려운 것이 현실이다. 그렇기 때문에 실제 계측을 통한 구조물 동특성을 파악하여, 모

델링을 개선하여야 한다.

초고층 건물 등은 매우 복잡하며, 구조물 강성에 기여하는 요소가 수많은 요소로 구성되어있기때문에 정확한 파악을 위해서는 준공후 계측만으로는 어려울 수 있다. 그렇기 때문에 주요 공정을 파악하여 사전에 구조물 동특성 계측을 계획해야 하며, 계측 데이터를 근거로 모델을 개선하면 최대한 오차가 줄어들 수 있다.

일반적으로 구조물 고유진동수에 큰 영향을 주는 요소는 재료 탄성계수, 슬래브 등의 영향, 접합부 강성, 저층부 구조물의 존재 여부 및 영향정도, 모델링 하중 정확도 등이 있다.

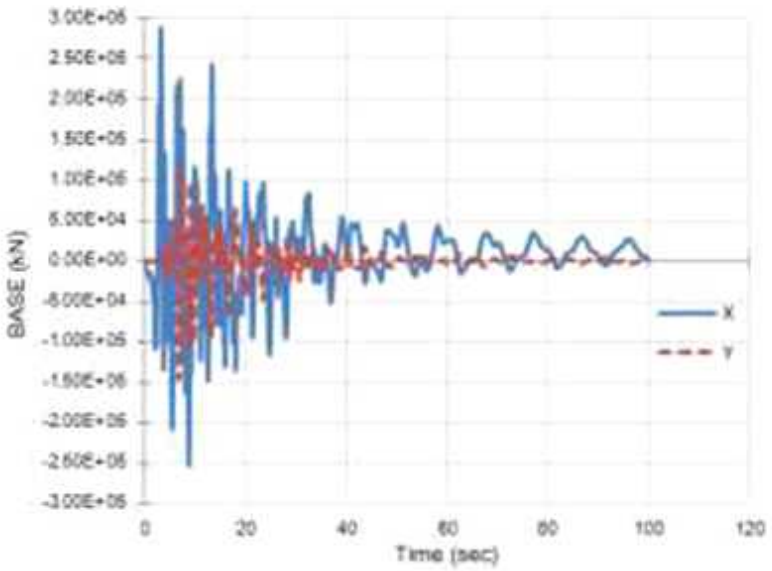
지진하중 또는 풍하중에 의한 건물의 횡변위가 발생하면, 콘크리트 부재의 인장응력을 초과할 경우, 균열이 발생하게 된다. 구조물을 설계하는 구조설계 엔지니어는 이러한 사실은 바탕으로 균열강성 등을 적용하여 부재의 강성이 실제보다 작게 될 수 있는 상황을 반영한다. 하지만, 실제 구조물을 모니터링 하기 위해서는 어느부재에 부재균열이 발생하며, 이러한 결과가 전체강성에 미치는 영향을 파악할 수 있어야 할 것이다. 그렇기 때문에 해석을 수행할 때, 횡하중으로 인해 발생되는 균열위치 및 강성저하 비율을 파악할 수 있도록 고려한다.

(3) 시간이력 해석

(가) 일반사항

실제 발생한 지진하중 시간이력 데이터나 풍하중 시간이력 데이터가 존재하고, 완공된 구조물의 특성을 잘 반영한 해석 모델이 있다면, 발생한 하중에 대하여 정밀한 해석을 수행할 수 있다. 지진하중과 풍하중을 예측하는 것은 매우 어려운 것이기 때문에 건축구조기준 등에서는 많은 조건을 가정한다. 물론 안전율을 포함하고 있기 때문에 발생할 수 있는 상황에 대하여 안전하게 설계하지만, 실제 발생한 하중에 대하여 응답을 추정하기는 어렵다고 할 수 있다.

그러나 구조물의 지진하중과 풍하중을 계측을 통해 기록하고 그것을 해석에 하중으로 반영한다면, 더 정밀한 해석을 수행할 수 있을 뿐만 아니라, 더나아가 설계코드를 발전시키는 데 큰 도움이 될 것이다.



시간이력 해석 결과 예시

(나) 분석방법

푸시오버 해석과 마찬가지로 실제 동특성과 최대한 오차가 적은 해석 모델을 필요로 한다. 모델링 질량과 강성을 실제 구조물에 최대한 가깝게 개선한다. 역사 지진파를 이

용한 비선형 시간이력 해석을 통해 구조물이 견딜 수 있는 수준의 지진 하중을 산정 할 수 있다. 지진파는 해당 구조물의 지반 특성을 잘 반영할 수 있고, 주요 모드 진동수 범위를 잘 고려하여 적용하도록 한다. 내진 성능평가를 수행할 때는 해당 지역 및 조건에 따라 설계기준에 부합하는 지진 하중을 스케일팩터 등을 통해 적용한다.

건물을 모니터링하는 관점에 따라, 설계하중을 만족하더라도 그 이상의 성능점을 확인하여 관리기준치를 설정할 수 있다. 시간이력해석은 지진파 특성에 따라 결과의 차이가 있을 수 있기 때문에 7개 이상의 지진파를 권장한다.

(4) 강성저하 추정 기법 예시

(가) 강성저하 추정 기법 & 패턴인식

초고층 구조물의 경우 진동수 변화와 모드형상 변화만으로 손상을 추정하는 것은 매우 어려운 일이다. 왜냐하면 진동수를 변화시키는 변수가 수많은 부재로 형성되어있으며, 앞에서 거론된 바와 같이 고유진동수는 환경 등에 의해서도 변화되기 때문이다.

그렇기 때문에 풍하중이나 지진하중에 의해 건물 횡변위가 발생하고 그것을 통해 구조물에 손상이 발생되는 시나리오를 분석한다면, 보다 정확한 상태평가가 가능할 것이다. 구조물의 횡변위는 초고층 구조물일 경우 고차모드도 포함될 수 있도록 고려하여 산정한다.

(나) 해석 및 분석

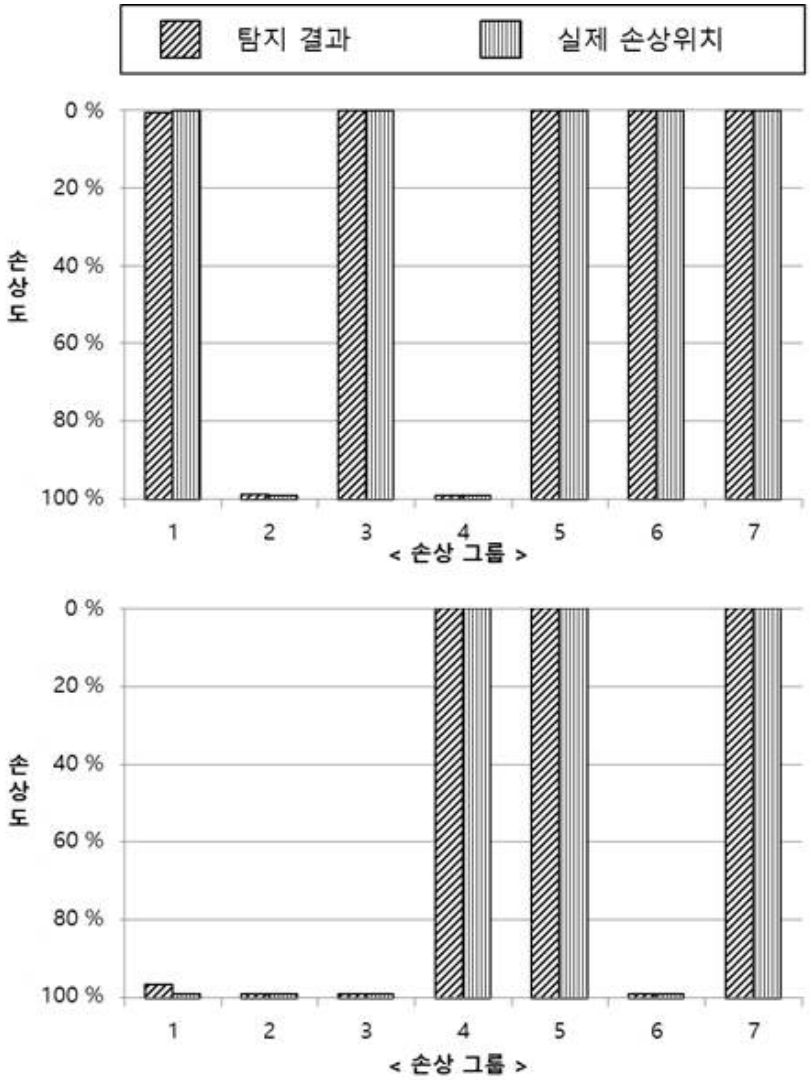
구조물 손상이 발생되는 시나리오 분석을 위해 푸시오버 해석 및 비선형 시간이력 해석을 수행하였다. 푸시오버 해석 결과 가장먼저 링크빔에 손상이 발생하였고, 추가로 벽체, 메가기둥, 밸트트러스 등이 손상되었다.

해석 결과 발생확률이 가장 높은 하중 범위에서 손상이 발생된 부재는 링크빔으로 나타났다. 그러므로, 링크빔을 층별로 일정 부분 그룹을 정하여, 손상 시에 대한 동특성 변화 양상을 해석을 통해 DB를 축적하였다.

(다) 테스트 및 결과

대상 구조물은 총 7개의 부재그룹을 대상으로 손상이 있는가 없는가를 구분하여 학습데이터를 구축하였다. 해석프로그램은 마이다스 gen을 사용하였으며, 손상 시뮬레이션을 위해 부재그룹의 강성을 수정하고 동기화 모델을 해석해 이로부터 고유진동수와 모드형상을 구했다.

무작위로 손상시키는 방법과 비교하여, 손상 시나리오에 따라 변수 범위를 줄이는 것은 정확성을 향상 시킬 뿐만 아니라, 학습 시간도 단축시키기 때문에 실무적용에 효과적인 방법인 것을 확인하였다.



손상 그룹 탐지 결과

다. 상태평가 시스템 지침 제안

(1) 개요

구조물 손상시 변화하는 양상과 데이터를 분석하는 방법을 적절하게 조합하여 상태평가를 수행하는 것이 정확도를 높일 것으로 예상된다.

구조물을 상태평가할 때는 자동으로 분석하는 부분과 엔지니어 판단에 의한 부분을 상황에 따라 적절하게 조합하는 것이 효과적이다.

(2) 지침 제안

(가) 자동분석 방법

구조물 전체의 안전이 위협받는 경우, 빠른 조치와 대피가 최우선이다. 신뢰할만한 시나리오와 여러 계측값의 조합이 전체 구조물의 위험상태를 명백하게 나타낸다면, 자동으로 알람 및 대피를 신속하게 알려야 한다. 다음은 상태평가 자동분석에 대한 가이드이다.

① 동특성 시험을 통해 취득한 해당 구조물의 동특성으로 최적화된 해석 모델링을 작성한다.

: 동특성 시험은 구조물 완공 후, 관련 적재하중이 부과된 시점에서 최종적으로 수행하며, 민감도 분석을 위해 시공중 주요시점에 중간시험을 수행하면 더 정확한 분석이 가능하다.

② 최적화된 해석모델링으로 구조물 성능평가를 수행하여 구조물 손상 시나리오 데이터베이스를 확보한다.

: 재료 특성 및 민감도를 분석하여 최적화시킨 해석 모델링을 통해, 푸시오버 및 비선형시간이력해석을 수행하여 구조물의 손상 시나리오를 작성한다. 손상순서 및 진동수 변화율 등 관련 데이터 베이스를 확보한다.

③ 확보된 손상 시나리오를 기반으로 패턴인식 기법을 사용하여 학습시켜 정확도 높은 알고리즘을 개발한다.

: 다양한 패턴인식 기법 중, 정확도가 높은 방법을 선택하여 작성된 데이터 베이스를 통해 학습시켜 손상 추적 알고리즘을 작성한다.

④ 계측 데이터 종류마다 구조물이 받을 수 있는 위험단계 관리기준치를 관심, 주의, 경계, 심각 4단계로 일관성있게 정의한다.

: 유력한 하중에 대해서는 손상시나리오를 통해 관리가 가능하지만, 예측이 어려운 하중, 예를 들어 테러나 충돌 등에 의한 손상시 구조물 상태를 파악할 수 있기 위해 설치된 계측 데이터 종류마다 관리기준치를 일관성 있게 정의하여 관리한다. 재난단계 관심, 주의, 경계, 심각에 대한 대처 시나리오를 작성한다.

⑤ 계측데이터는 다양한 데이터 분석 방법을 통해 노이즈 및 계측오류를 최소화한다.

: 필터링, 에버리징, 멀티윈도우 등 다양한 방법을 통해 계측 데이터를 가공하여 노이즈 및 오류를 최소화 한다.

⑥ 사전 정의된 관리기준치에 의한 계측데이터 분석과 패턴인식 알고리즘의 종합적인 판단을 통해 구조물 상태를 파악한다.

: 지진이나 태풍은 구조물에 횡하중을 작용시킨다. 그로 인해 구조물은 GPS 등으로 계측된 횡변위를 나타내게 되며, 가속도계로 계측된 횡가속도, 경사계로 계측된 층간변위 증가를 동반한다. 뿐만 아니라, 계측 종류에 따라 횡하중에 의한 부재응력을 가능케 한 시스템을 적용했다면 (예를 들어, 횡변위 저항요소의 동적 변형률 계측) 관련 계측값도 증가한다.

다시말해, 하중과 그에 해당하는 응답이 예상된 거동을 나타내며, 위험을 나타내는 관리기준치를 초과한다면, 구조물 위험상태로 분류할 수 있다.

또한, 위험 응답이 발생한 이후, 구조물 동특성이 변화된 것을 감지했다면, 구조물 손상시나리오에 기반하여 학습된 고유진동수와 모드형상 변화 패턴인식을 통해 손상 위치를 파악할 수 있다.

또한 수직하중이 위험 응답을 초과하면, 해당하는 부분의 변형률 및 응력 계측 응답은 전체적으로 크게 발생할 것이다. 또는 주요한 수직부재가 손상될 경우, 부담 하중이 분배되어 주변부재의 변형률 및 응력 계측 응답은 크게 발생할 것이다.

(나) 엔지니어 판단에 의한 방법

구조물이 위험한 상태에 이르는 경우, 많은 사례를 참고해보면, 명확한 징후를 나타내는 경우가 많다. 그렇기 때문에 평소에 구조물을 모니터링하며, 이상징후 발생시, 엔지니어에 의한 현장파악 및 판단은 매우 중요하다고 할 수 있다. 따라서 중요 구조물의 경우, 일반 관리자 뿐만 아니라, 전문 엔지니어가 모니터링을 수행하는 것이 바람직하다.

현실적으로 계측에 의한 모니터링 유리관리 사례를 보면, 계측 오류 및 센서 이상으로 인한 이벤트 발생의 빈도가 상대적으로 높은 편이다. 모니터링 시스템을 구축할 때, 최대한 계측오류를 줄이기 위해 노력하지만, 완벽한 시스템을 만든다는 것은 현실적으로 어려운 부분이 많다. 그렇기 때문에 데이터를 전문가가 주기적으로 분석하고, 특히

이상징후 발생시에 신속하게 해당 전문가의 판단이 이루어지는 조직 구조 및 시스템을 만드는 것이 매우 중요하다.

① 구조물을 관리하는 전문가를 설정한다.

② 정기적인 보고서 및 이벤트 발생시 신속한 보고 체계를 만든다.

구조물의 응답을 분석하는 것은 매우 복합적인 상황을 고려해야 한다. 예를 들어 계절 등에 의한 온도차에 의해 구조물 변형이 발생할 수 있기 때문에, 관련 양상을 파악하는 것이 중요하다. 또한 건물 노후화 및 구조부재 외 균열로 인한 강성저하도 정기적으로 관리되어야 할 것이다. 데이터는 용량의 한계로 인해 무한대로 저장하는 것은 현실적으로 어렵기 때문에 정기적으로 별도 저장장치에 백업 또는 보고서 정리 후 일반 데이터 삭제 등 상황에 맞게 관리하도록 한다.

태풍이나 지진발생시, 계측 데이터 분석을 통해 설계시 고려했던 사항들(횡변위, 가속도, 응력, 층간변위 등)의 정확성 및 타당성을 검토해 볼 수 있을 것이다.

③ 기상예보를 통해 큰 하중이 예상될 시, 상시 대기 및 데이터 분석을 수행한다.

태풍 등은 사전에 기상예보를 통해 어느정도 시기를 예측할 수 있다. 그렇기 때문에 태풍이 발생하는 동안 구조물을 관리하는 관리자는 실시간으로 데이터를 확인하여, 상황종료시까지 주의깊게 관찰한다. 안전에는 문제가 없지만, 진동 등이 발생할 경우 입주자에게 안내방송 등을 통해 불안감을 해소시킨다.

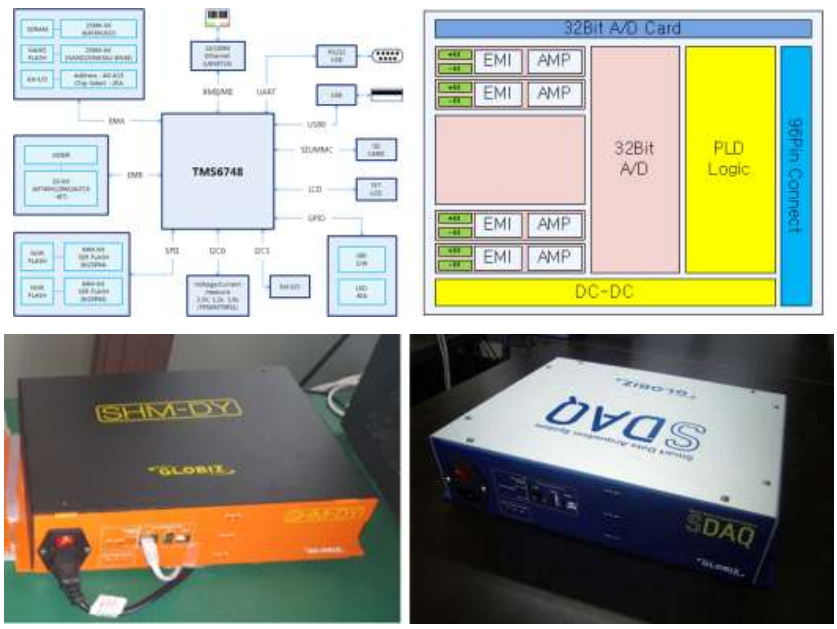
3. 모니터링 시스템 플랫폼

가. 동적 / 정적 데이터 로거 제작

(1) 핵심 요소기술

(가) 건물 구조건전성 모니터링용 저잡음 다채널 동적데이터로거 기술

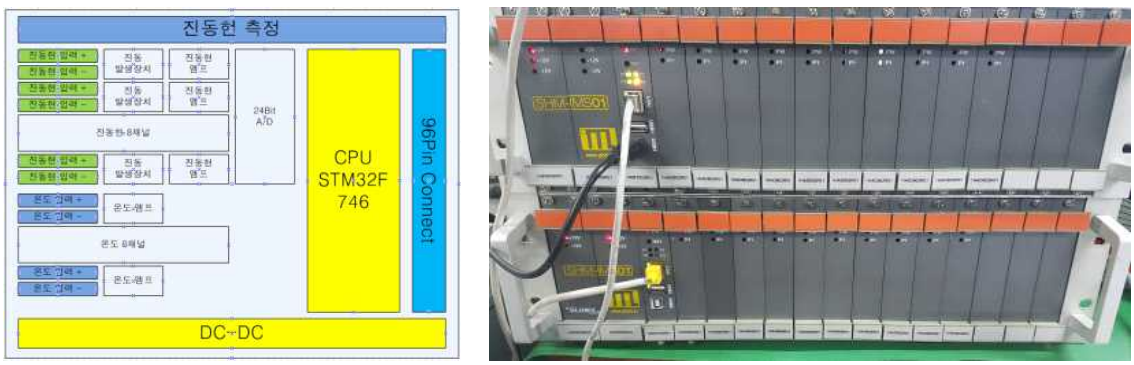
- 초고층빌딩 및 장대형 토목구조물의 구조건전성을 모니터링하기 위한 통합시스템의 핵심 구성요소로서 으로 구조물의 미세한 진동을 감지하여 이를 디지털 신호로 변환해서 통신으로 데이터를 전송하는 저잡음인 동시에 36ch 이상의 다채널 동적데이터로거(그림3)를 세계최초로 국산화 개발하였음
- 건물의 진동 특성은 초저주파이면서 진동이 기계장치와는 달이 아주 미세하여 일반적인 동적데이터로거로는 계측이 불가능한 경우가 많아, 동적범위가 120dB이상인 초저잡음 동적데이터로거가 필요함.
- 초고층이나 장대형 토목 구조물의 경우 많은 센서의 장착이 불가피한데, 현재까지 개발된 초 저잡음 동적데이터로거는 채널수가 최대 10ch내외 밖에 개발이 안되어 있음. 참고로 세계최고 수준의 건물 구조건전성 모니터링시스템에 채택된 동적데이터로거의 가장 많이 사용된 ch수는 24ch임.
- 모듈화 형태이면서 동적범위가 130dB 이상의 초 저잡음 동적데이터로거을 개발하여 현재는 36ch로 사용하고 있으나 필요에 따라 계속 확장할 수 있는 동적데이터로거를 세계최초로 개발함.
- 동적데이터로거의 모든 채널을 동기화하는 것은 물론 다수의 동적데이터로거를 장착할 경우 각각의 동적데이터로거의 시간을 서버시스템에 동기화하여 다수의 동적데이터로거 전체를 동기화하는 기술로 Network Time Protocol(NTP)를 세계최초로 적용하였음.
- 이와같이 전체 동적시스템을 동기화하여 건전성 모니터링에 핵심 인디케이터인 고유주파수 및 댐핑을 도출할 수 있는 기술과 연계가 가능하도록 함.
- 통신선 단락 시 전송데이터 자동 내부저장 후 통신선 복구시 데이터 자동 전송을 통한 데이터 손실 최소화
- 동적데이터로거의 독자개발을 통해 가격 경쟁력을 확보하는 동시에 펌웨어를 직접 핸들링 함으로써 세계최고 수준의 모니터링시스템을 위한 최적화된 기술을 제공함



동적데이터로거 구성도

(나) 건물 구조건전성 모니터링용 진동현타입 스트레인센서 동시계측 데이터로거 기술

- 고 내구성 정적 신호 센서인 진동현식 스트레인 센서를 이용한 다채널 스트레인을 동시 계측할 수 있는 정적데이터로거와 동적데이터로거를 통합한 통합데이터로거(그림4)를 세계최초로 국산화 개발하였음.
- 대형 구조물의 주요부재의 변형량을 직접 측정하기 위해 진동현방식(Vibration Type, VW)의 센서를 가장 많이 채택하고 있는데, 내구성이 뛰어나고 상대적으로 가격이 저렴한 것으로 알려져 있음
- VW 센서는 센서관 내부에 현을 장착하고 현의 양 끝단을 대상부재에 부착하여 스트레인이 발생하는 경우 현의 고유진동수가 변하는 것을 측정하는 것으로 온도의 변화를 보상하기 위해 일반적으로 온도센서가 같이 장착되어 있음
- 일반적인 데이터로거는 수동적으로 입력되는 신호를 계측하고 디지털로 변환하는 기능을 하는 것이데 반해, 진동현센서는 먼저 계측기에서 진동현을 정현파로 스위핑을 하여 공진주파수를 찾아내는 구조이므로 정현파스위핑 신호를 보내주는 동시에 측정되는 진동 신호를 주파수분석을 하여 공진주파수를 찾고 온도로 보상을 할 수 있는 신호변환 기능을 가진 데이터로거가 필요함
- 이러한 신호변환 때문에 종래의 시스템에서는 정적데이터로거, 신호변환기 와 멀티플랙스로 구성하여 신호변환기에서 멀티플랙스를 통해 순차적적으로 데이터를 처리하여 정적데이터로거에 데이터를 보내주는 시스템으로 멀티플랙스를 써야하므로 정적센서의 동시계측이 불가능하며 많은 센서를 순차적으로 측정하는 경우 오랜시간이 걸리는 단점이 있음.
- 본 기술에서는 모듈화 형태로 동시에 신호변환이 가능한 정적데이터로거를 세계최초로 개발함.
- VW 센서에 대해 동기화 가능한 정적데이터로거의 개발을 통해 실시간 구조건전성 모니터링이 가능하며, 초고층 건물의 경우 건물의 스웨이 주기와 동기화가 가능하여 최종적으로 최대 스트레인 발생조건에서 데이터를 측정할 수 있어 정확한 구조건정성을 진단할 수 있음
- 모든 하드웨어와 펌웨어를 자체개발함으로써 기존의 동적데이터로거와 연계가 가능하여 이들을 통합한 통합데이터로거를 세계최초로 개발함.
- 국산화와 통합화를 통해 세계최고의 동기화 기능과 가격 경쟁력을 확보할 수 있음



진동형 센서타입 정적데이터로거와 동적데이터로거 통합시스템 구성도

(2) 기존 기술과의 차별성

(가) 건물 구조건전성 모니터링용 저잡음 다채널 동적데이터로거 기술

- 초고층빌딩과 같은 대형 구조물은 진동이 매우 미세하기 때문에 매우 성능이 좋은 저 잡음 동적데이터로거가 요구되는데 현재 수입되는 대부분의 동적데이터로거는 기계구조물을 대상으로 사용되므로 요구되는 저 잡음 사양이 충족되지 못하고 있음.

- 지질탐사 등에 쓰이는 초고성능 동적데이터로거는 기본적으로 제공되는 채널수가 10ch 내외이며 가격이 너무 고가로 대형 구조물에 적용하기 어려운 실정임.
- 본 개발 기술의 동적데이터로거는 32bit ADC(Analog to Digital Convert)를 통해 초저잡음 특성을 구현하는 동시에 모듈화를 통해 36ch 이상의 동적데이터로거의 기능을 가지고 있어 초 고층 빌딩이나 장 대형 토모구조물의 동적데이터로거에 최적화된 시스템임.
- 지질탐사 등에 쓰이는 초고성능 동적데이터로거는 기본적으로 제공되는 채널수가 10ch 내외이며 가격이 너무 고가로 대형 구조물에 적용하기 어려운 실정임.
- 특히 구조건전성 모니터링시스템용 데이터로거는 장기간 연속사용이 요구되는데, 일반적인 계측기 개념의 시스템이 가지지 못하는 자체 데이터저장장치를 가지고 통신선 결함 발생시 자동 저장 및 자동 전송기술 등의 기능을 가지고 있음
- 본 기술에 의한 동적데이터로거와 기존의 동적데이터로거 가운데 세계에서 매출이 제일 큰 NI사와 가장 성능이 우수한 Kinematrics사의 제품과의 특징 및 장단점을 비교하면 아래표와 같음

	동적데이터로거 시제품	NI사(미국) 제품	Kinematrics사(미국)사 제품
개념도			
특징	모듈화를 통한 ch수 확장 동적범위 130dB이상 최대 1kHz 샘플링 레이트 초 고층빌딩 및 대형 구조물 건전성 모니터링 전용 데이터로거 가격: 1000만원대/24ch	모듈화를 통한 ch수 확장 동적범위 최대 119dB 최대204kHz 샘플링 레이트 가격: 3000만원대/24ch	채널수 9ch 고정 동적범위 145dB이상 최대 200Hz 샘플링 레이트 가격: 3000만원대/9ch
장점	통신선 단락 시 데이터 자동 저장기능 펌웨어 소스 보유를 통한 운영시스템과 통합이 용이함 가격 경쟁력이 최고 높음 초고층빌딩 모니터링에 적합	세계 최대의 계측기업체 많은 판매를 통한 계측기 신뢰성 확보. 기계시스템의 모니터링과 같이 고주파 데이터로거로 적합함.	지질탐사 등의 고 성능 데이터로거로 적합함 특정분야에 최고의 지명도를 가지고 있음
단점	브랜드 파워가 약함	기계시스템 대상의 단시간 계측용으로 적합 저 잡음 및 저주파 성능이 상대적으로 낮음 빌딩용 모니터링에 부적합 추가적으로 전용 SW의 구매가 필요함 가격이 매우 비쌈	채널수의 확장이 안 됨 초고층 빌딩 모니터링에 적용하는데 한계가 있음 가격이 지나치게 높음

(나) 건물 구조건전성 모니터링용 진동현타입 스트레인센서 동시계측 데이터로거 기술

- 내구성이 높고 가격이 상대적으로 저렴하여 건물의 구조물의 스트레인을 측정하는데 가장 늘리 사용되는 진동현식 스트레인 센서를 동시에 계측하는 시스템은 아직 개발된 사례가 없음

- 기존의 대부분의 동시계측 시스템은 동적데이터 로거와 같이 대부분 센서로 부터 오는 신호를 받기만 하는 구조로 되어 진동현식 센서와 같이 같은 신호에 가진과 동시에 센서로부터 신호를 측정하는 방식의 동시 측정 데이터로거는 아직 개발된 것이 없음
- 그리고 초 고층 빌딩의 경우 수백채널의 진동현식 스트레인 센서를 장착하게 되는데 지금까지 상용화된 정적 데이터로거는 1개 혹은 2개 채널로 구성된 신호변환 장치와 멀티플렉스를 통해 순차적으로 데이터를 취득하게 되어 동시계측이 불가능할 뿐만 아니라 전체를 측정하는데 걸리는 시간이 길어 실시간 모니터링이 불가능함.
- 다수의 센서를 사용하는 경우 가진 신호를 생성하고 보낸 후 측정된 신호를 분석하여 공진 주파수분석을 통해 계산된 스트레인 값을 측정하는 신호변환기를 채널 수만큼 늘리는 경우 또한 비용이 너무 과다하게 되어 적용할 수 없음
- 당사의 진동현식 스트레인을 동시에 측정하는 시스템을 세계 최초로 개발하고 특허를 출원 중에 있음
- 동시 가진 및 측정을 수행할 수 있는 ADC보드를 서브랙 타입으로 개발하여 수백 채널의 진동현 스트레인 센서를 측정할 수 있음
- 이 경우 정적 데이터의 측정 주기가 충분히 짧아 고층빌딩이나 장대형 토목구조물에 적용하는 경우 진동모드 고유주파수의 1차 하모닉 성분에 대한 커브피팅 기술을 적용하여 모우드 분석 및 최대 스트레인 값을 도출할 수 있어 매우 정확한 구조 건전성 모니터링이 가능함.
- 그리고 정적 데이터로거를 위한 프로세서의 부하가 높지 않아 기존의 동적 데이터로거와 일체로 제작이 가능함

	정적/동적 통합 데이터로거 시제품	Campbell사
개념도		
특징	모듈화를 통한 ch수 확장 정적데이터 동시 계측 가능함(세계최초) 정적데이터기반 실시간 모니터링 가능함 초 고층빌딩 및 대형 구조물의 거동과 연계한 극한 스트레인 동시계측 가능 가격: 1000만원대/24ch	데이터로거+신호변환기+멀티플랙스의 구성임. 멀티플랙스의 확장을 통한 ch수 확장 순차적 측정만 가능 실시간 모니터링 불가능 가격: 800만원대/16ch
장점	동시계측 및 건물 스웨이 주기와 연계한 극한 조건의 스트레인 측정 가능 초 고층빌딩 및 대형 구조물의 실시간 모니터링 시스템에 적합 동적데이터로거의 CPU를 공동활용을 통한 동적/정적 통합 데이터로거 구성가능	많은 판매실적 높은 브랜드 파워 판매 대리점의 지원용이
단점	브랜드 파워 약함	동시계측이 불가능하여 실시간 모니터링이 안됨 저주파 거동을 나타내는 초고층 빌딩의 스웨이 주기 동기화 불가능. 지진 등의 이벤트 발생시 즉각적인 데이터 취득이 어려움

(3) 적용제품에 대한 성능 및 기능 향상 내용

(가) 건물 구조건전성 모니터링용 저잡음 다채널 동적데이터로거 기술

① 동적데이터로거 핵심 ADC 보드 개발

특징:

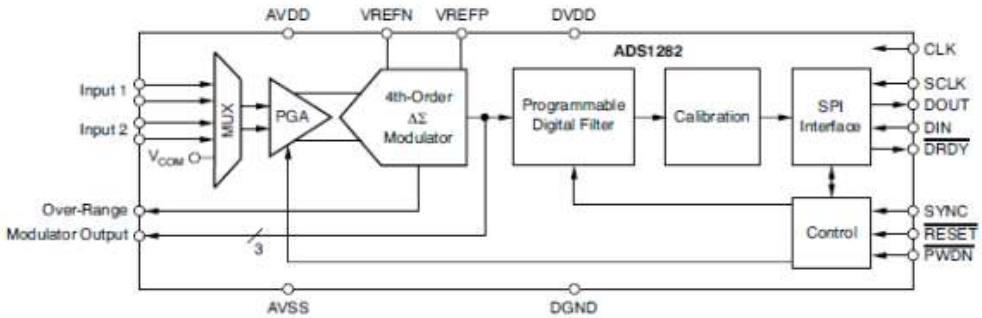
- 최대 속도 1000 SPS, 130dB이상 SNR.
- 차동 입력 및 싱글 입력 대응.
- +/-10V 입력 범위.
- PLD 로직을 사용해서 정확한 샘플링속도 구현.
- 8단계 샘플링 속도 변경 가능.
- Simultaneously Measure 6 Channels & Mux 12 Channels.
- 단일 전원 사용으로 노이즈 최소화.

보드별 채널구성 및 측정 채널 확장성:

- 12ch 차동 입력/Card
- Rack Type 으로 채널 확장 가능.
- 동기화 Trig입력.

입력 사양:

- +/-10V 입력 범위.
- INL: 0.5ppm.
- 250SPS, 130dB SNR.
- Linear Phase Digital Filter 내장.
- delta-sigma analog-to-digital converters.
- 입력 저항 : 10kΩ
- 사용온도 : -55° ~ +85°.
- A/D 내부 로직은 32bit A/D 칩에 2ch의 데이터를 처리함



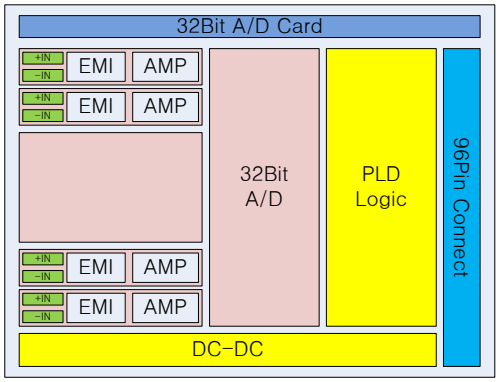
A/D 컨버터의 내부 로직

옵션:

- STM32F407 Micro Process 추가로 카드 단독으로 실행가능.
- USB 연결 지원으로 고속으로 상위 제어기와 통신.
- 실시간 FFT 처리 및 독립된 제어기 구성.
- BackUp 메모리 내장.

② ADC 보드모듈 구성도

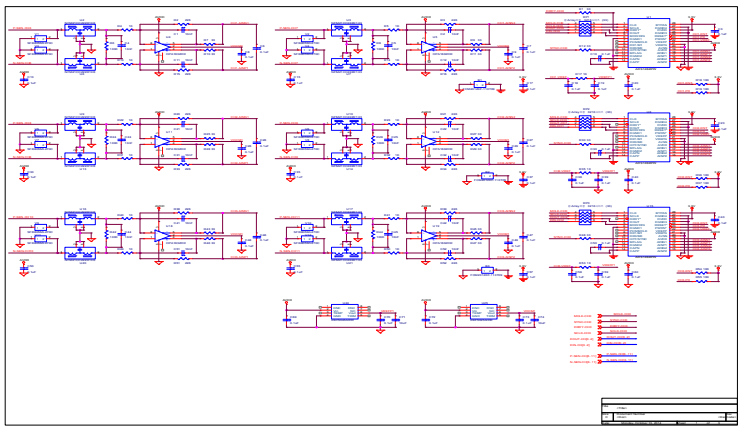
- 각 입력채널에 EMI필터가 내장되어 있으며 미세한 센서신호를 증폭하는 모듈이 앞단에 위치함
- 32bit A/D 컨버터와 이를 제어하기 위한 PLD logic이 있음



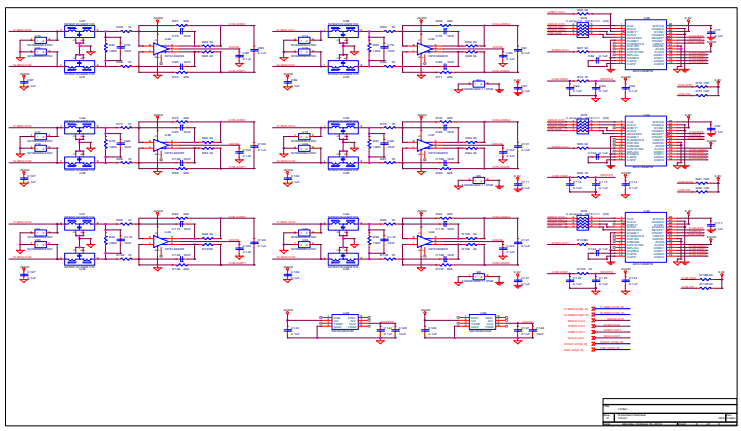
ADC 보드모듈 구성도

③ ADC 보드모듈 회로도

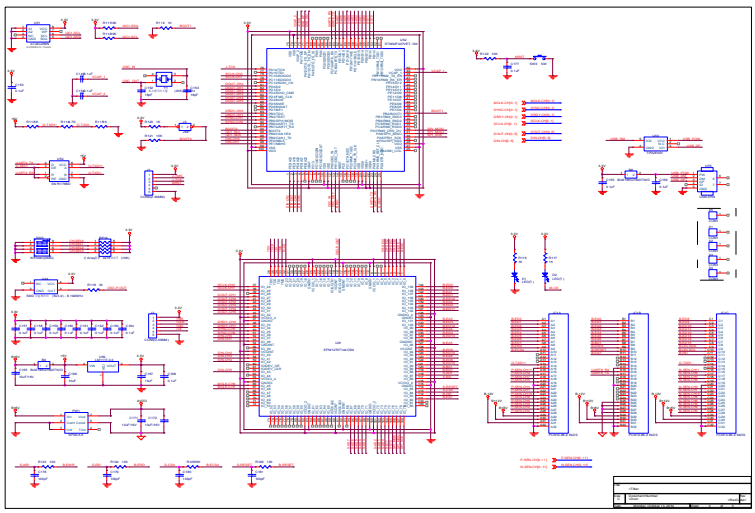
- MUX, EMI 필터 및 Amp 모듈 1 회로도



- MUX, EMI 필터 및 Amp 모듈 2 회로도

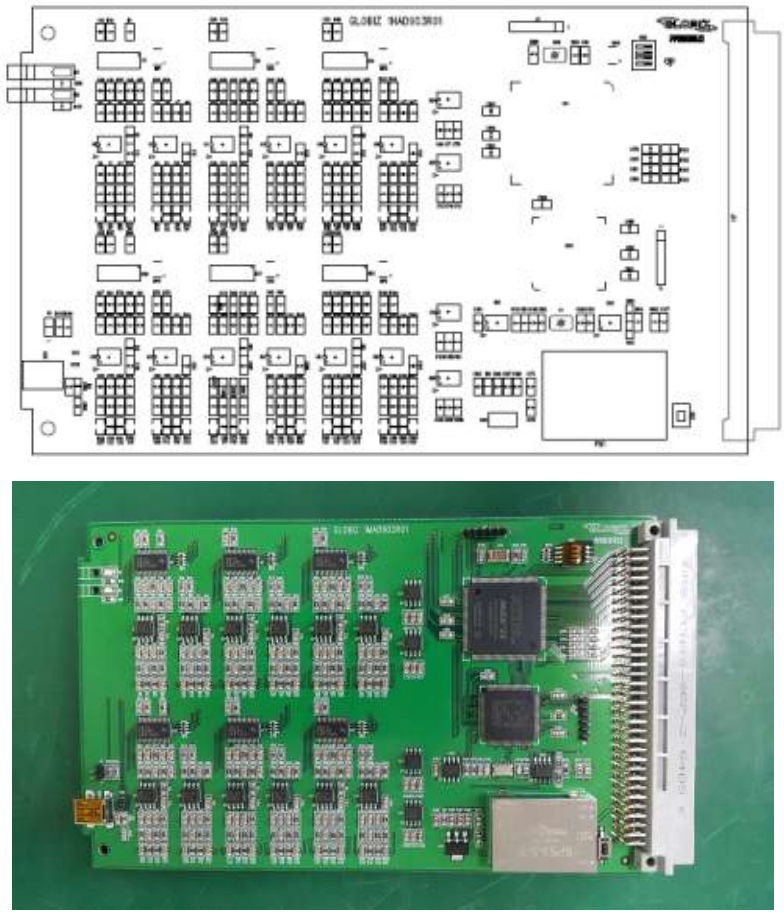


- -PLD Logic 모듈 회로도



④ PCB 부품 배치 및 보드 개발품(그림 13)

- 보드당 12ch로서 서브랙 타입으로 확장이 가능함



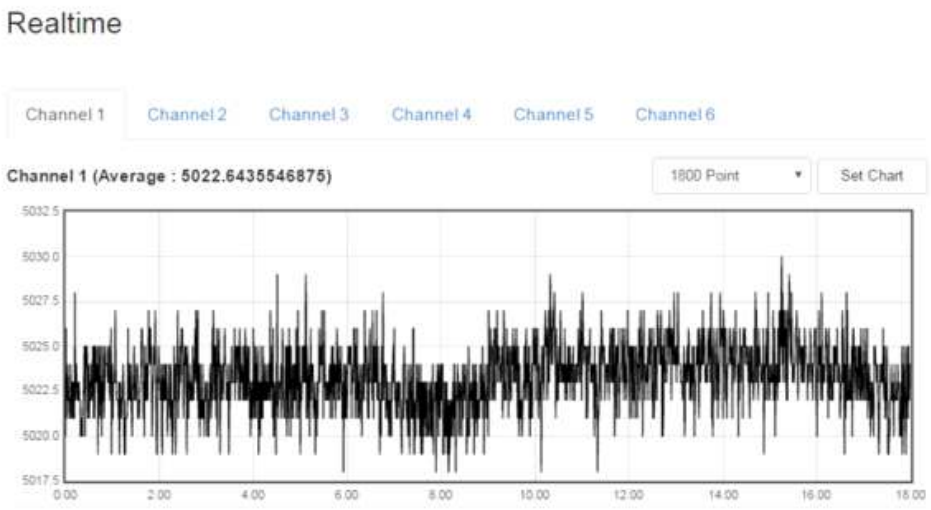
PCB 부품 배치 및 보드 개발품

⑤ 동적데이터로거 동적범위 측정(KTL 통합 플랫폼 공인인증 시험)

- 동적범위(Dynamic Range)는 계측기기의 측정범위를 내부적으로 가지고 있는 노이즈의 크기로 나눈 비를 dB단위로 나타내는 것임. 즉 내부적으로 가지고 있는 노이즈란 입력신호가 0인 경우에 자체 전기회로의 영향으로 측정되는 내부 노이즈를 뜻하는 것으로 이것과 측정범위의 비를 dB단위로 나타내어 계측기의 자체 노이즈의 크기를 계량화 하는 것임
- 동적범위는 일반적으로 실험을 통해 구하게 되는데, 우선 입력신호를 0로 만드는 방법은 계측기 센서 입력신호단의 +단자와 -단자를 쇼트(전선으로 직접연결)시키면 됨. 즉 +단자와 -단자를 전선으로 연결해버리면 입력신호는 0이 될 수밖에 없는데 이 때 계측기에서 이상적인 경우에는 0으로 측정되어지지만, 실제로는 전기적 회로의 영향으로 아주 작은 노이즈로 신호 파형이 측정됨
- 이러한 노이즈 신호파형의 크기를 나타내는 RMS값을 구해서 전체 측정범위와 비교하여 다음의 식으로 정의되는 동적범위를 구할 수 있음

동적범위=20 * log(최대측정범위/노이즈 RMS)

- 여기서 최대측정범위=최대측정값-최소측정값을 의미한다. 예를 들어 +10V~10V의 경우 최대측정범위는 20V가 됨
- 20* log(X)는 X값을 dB단위로 표현한 것으로 결국 동적범위는 최대측정범위와 노이즈의 RMS 비를 나타내고, 이것이 클수록 내부노이즈가 작다고 하는 것을 나타냄.
- 통합데이터로거를 통한 동적신호의 내부노이즈 파형은 다음과 같음



동적데이터로거 내부노이즈 파형(Calibrarion 전)

- 이 측정신호에 대한 동적 범위의 계산은 다음과 같이 요약할 수 있음

$$\text{- 동적 범위 dB} = 20\log_{10}\frac{\text{최대입력전압}}{\text{잡음전압의}RMS}$$

- 최대 입력 전압 : 20V

- 잡음 전압의 RMS : 2.21608E-06

- 동적 범위 dB : 139.1088861

동적데이터로거의 동적범위 측정결과

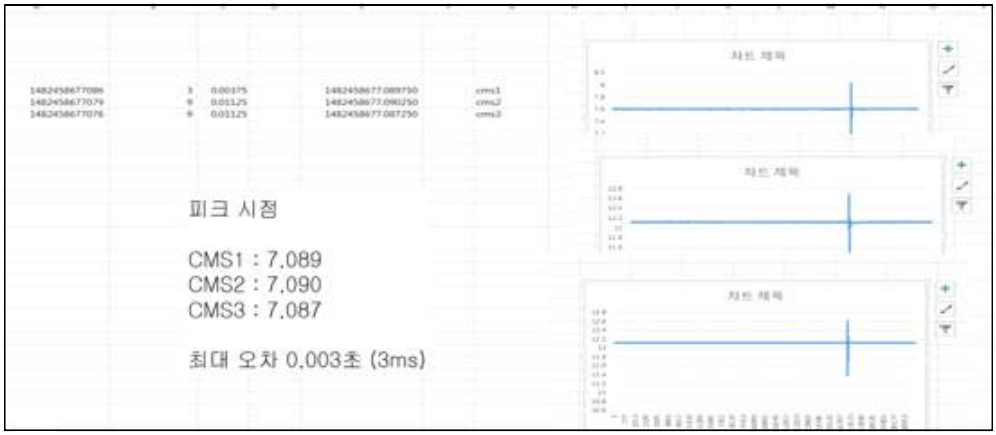
⑥ 동적데이터로거 시스템간 동기화 성능시험(KTL 통합 플랫폼 공인인증 시험)

- 동적데이터로거에 3개를 설치하여(그림 16) 각각의 시스템에 한 개씩 가속도센서를 장착하고 임팩트 시험을 실시하여 서버시스템에 통신으로 수집된 데이터의 time tag를 비교하여 동기화 성능을 측정함



동적데이터로거 시스템간 동기화 시험장치

- 시험결과 최대 동기화 시각오차가 3ms로서 매우 정확한 동기화가 이루어 졌다고 판단함



동적데이터로그 시스템간 동기화 시험결과

⑦ 동적데이터로거 공인인증 시험결과

- 동적데이터로거에 대해 3가지의 공인인증시험을 실시하여 전부 통과함.
- 내환경시험(고온 및 저온 환경시험) : IEC 60068-2-1
- 내진동시험 : IEC 60068-2-6
- 전자파시험 : IEC Standard

(가) 건물 구조건전성 모니터링용 진동현타입 스트레인센서 동시계측 데이터로거 기술

① 정적데이터로거 핵심 ADC 보드 개발

측정속도:

- 진동와이어 측정 온도 보상을 위한 서미스터 사용.
- 진동현의 진동을 2초간 측정. 온도는 20mS 동안 측정해서 평균

측정 채널:

- 진동현 8ch/Card
- 온도 8ch/Card

진동현 입력:

- 진동현 센서 코일을 구동하기 위한 차동 출력, 출력 전압은 +/-2.5V(5V 피크-피크) 또는 +/-6V(12V 피크-피크),
- 파형 종류 : logarithmic sine wave frequency.
- 파형 주파수 : 100Hz - 6.5KHz 프로그램 변경 가능.
- A/D 분해능 : 24Bit
- 입력 전압 범위 : +/-250mV 차동.
- 측정 정도 : 0.01KHz RMS
- 측정 선형성 : +/-0.13%
- 입력 저항 : 4.75kΩ
- 사용온도 : -55° ~ +85°

온도 입력:

- half-bridge 입력

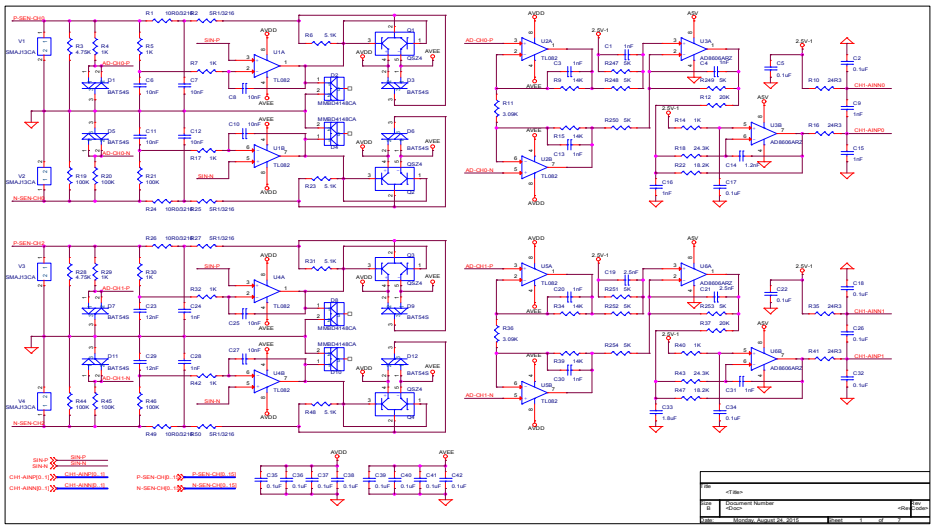
- 측정 정도 : 0.01Ω RMS
- 입력 저항 : 5KΩ
- 측정 선형성 : +/-0.25%
- 측정 범위 : -55° to +85°C

통신 사양:
- RS422 Non Isolated
- 통신 속도 : 1200bps - 38.4 kbps, 1 stop, 8bit Data, no parity.
- 32개 어드레스 설정 가능(Dip SW)
- 총 사용가능한 채널 256채널 사용가능

USB통신:
- USB 메모리스틱 사용가능, 독립적으로 저장

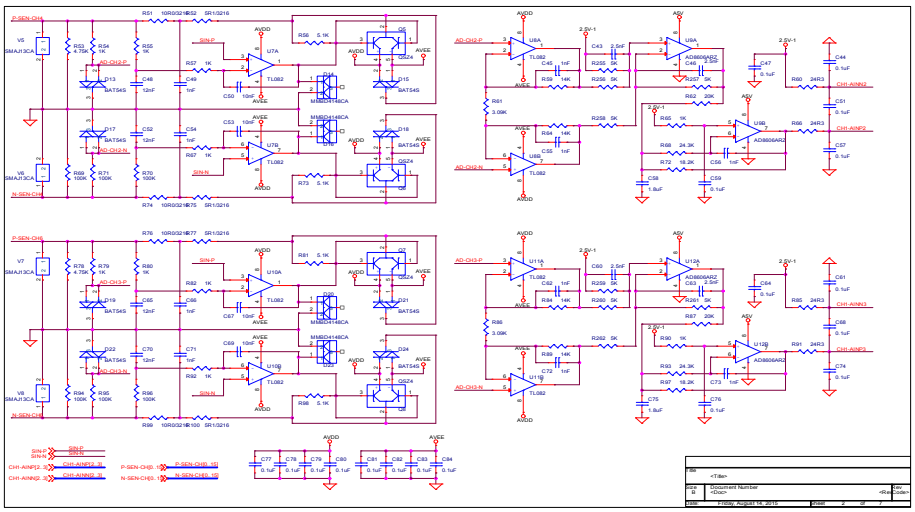
CPU:
- Arm M6 Core(STM32F647VET)
- 내부 메모리 : 320K SRam, 1M Flash 메모리.
- 4KB data cache and 4KB instruction cache.

② 회로도 7pcs(그림 18~24)
- 8Ch Card #1



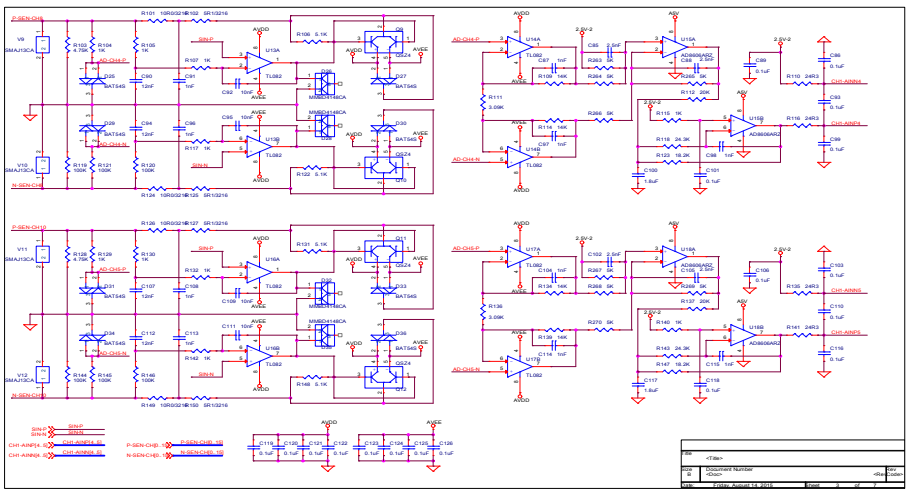
정적데이터로거 회로도 1

- 8Ch Card #2



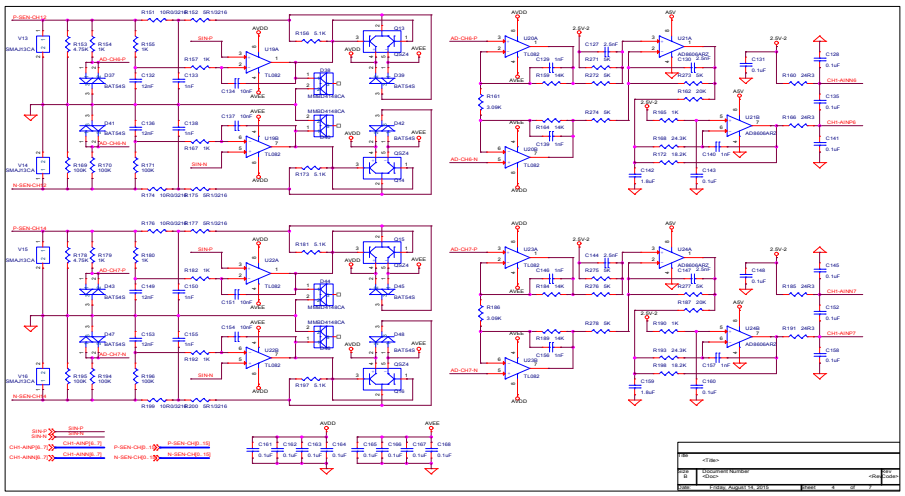
정적데이터로거 회로도 2

- 8Ch Card #3



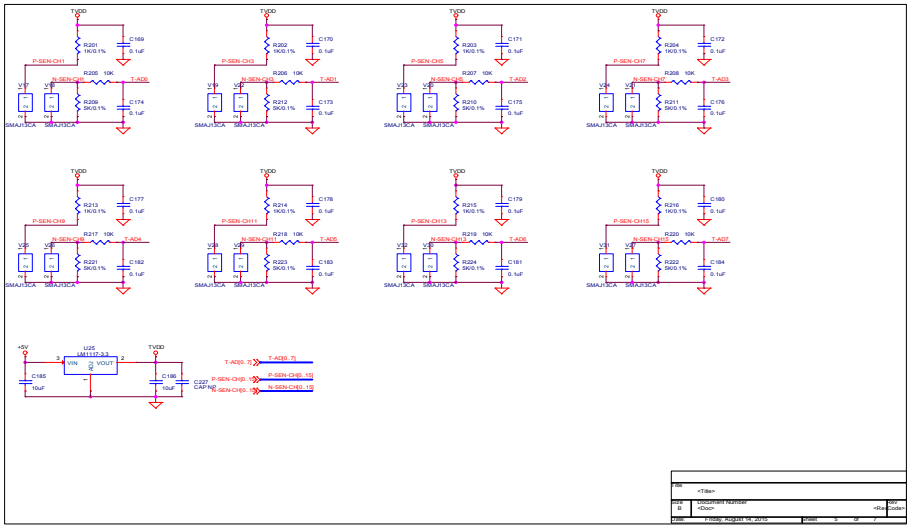
정적데이터로거 회로도 3

- 8Ch Card #4



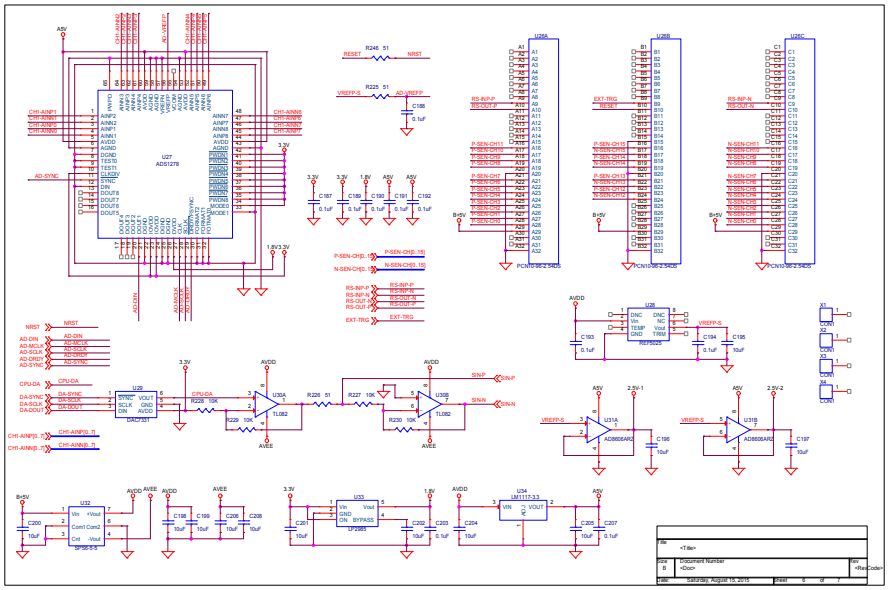
정적데이터로거 회로도 4

- 8Ch Card #5



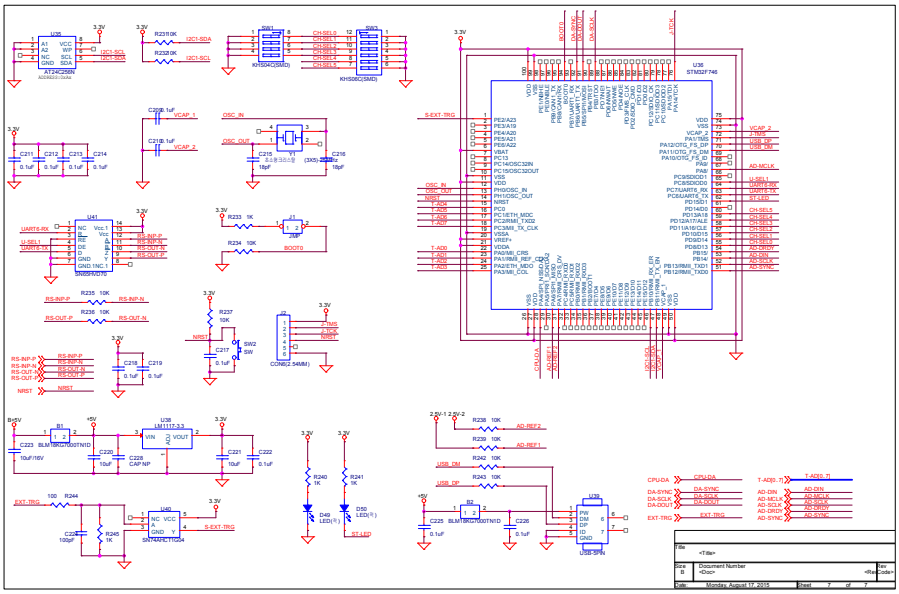
정적데이터로거 회로도 5

- 8Ch Card #6



정적데이터로거 회로도 6

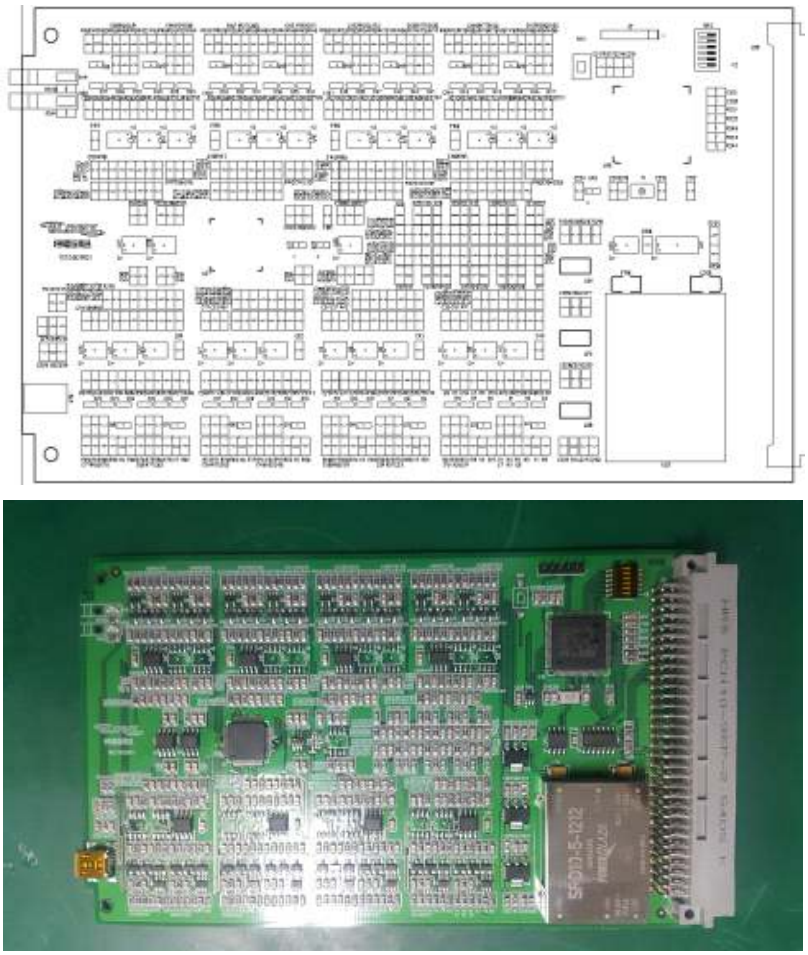
- 8Ch Card #7



정적데이터로거 회로도 7

③ 보드 구성 및 보드개발

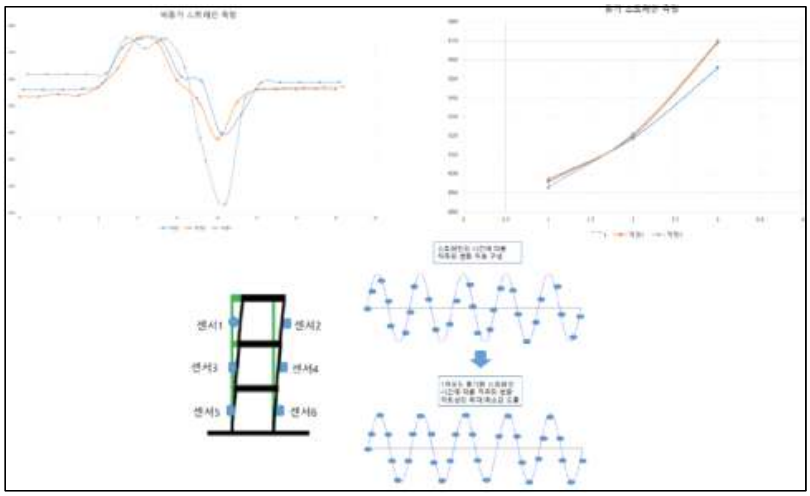
- 8Ch Card PCB 부품 배치도 및 개발품



정적데이터로거 핵심보드 부품 배치도 및 보드 개발품

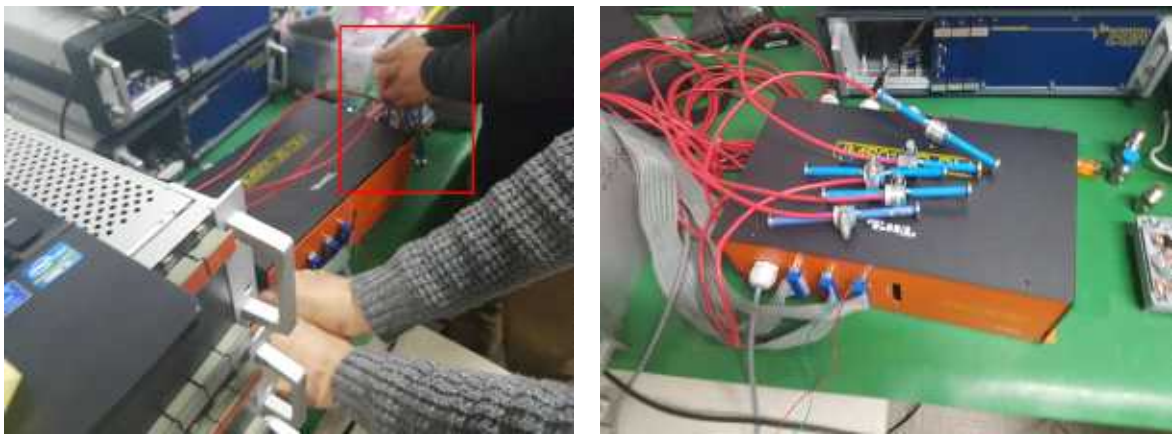
④ 정적 데이터로거 동시 측정시험(KTL 통합 플랫폼 공인인증 시험)

- 개발한 정적데이터로거에 3개의 VW 센서를 설치하여 측정한 것과 기존 시스템인 CR1000 으로 3개의 VW 센서를 측정한 것(그림 26)을 비교한 결과 개발한 정적데이터로거의 측정신호가 동기화 된 반면에 CR1000은 순차적 측정이 되고 있는 것을 나타냄.
- 동기화 측정이 가능한 정적데이터로거를 이용하는 경우 빌딩의 스웨이 주파수와 시점을 동기화하면 최대 스트레인의 측정이 가능함



정적데이터로거의 측정신호 동기화 비교

- 동적/정적 통합 데이터로거를 사용하고 5개의 VW타입 스트레인 센서를 이용한 시험을 실시한 결과 정확히 동기화된 신호를 측정할 수 있었음



동기화 시험용 VW타입 스트레인 센서



5개 VW타입 스트레인 센서를 이용한 정적데이터로거 동기화 시험결과

⑤ 정적/동적 통합데이터로거 공인인증 시험결과

- 통합데이터로거에 대해 3가지의 공인인증시험을 실시하여 전부 통과함.
- 내환경시험(고온 및 저온 환경시험) : IEC 60068-2-1
- 내진동시험 : IEC 60068-2-6
- 전자파시험 : IEC Standard

나. 모니터링 웹 프로그램

(1) 핵심 요소기술

(가) 건물 구조건전성 모니터링 웹기반 GUI 개발

- 세계최초로 웹기반으로 구조물의 건전성에 대해 실시간으로 모니터링 가능한 운영프로그램을 개발함.
- 모바일폰 및 iPAD 등 웹브라우저를 사용하는 어떠한 기기에서도 사용이 가능하여 시간과 공간 제약없이 실시간으로 상태 모니터링시스템 접근이 가능하며, 문제 발생시 즉각적인 인지가 가능하여 신속한 대응이 가능함
- 서버시스템의 업그레이드로 전체 사용자가 업데이터가 가능함
- Client의 사용 환경을 개별적으로 설정할 수 있음
- 화면의 접근 권한을 다르게 설정하여 정보제공의 단계 및 정보보호를 실시할 수 있음



웹기반 운영프로그램 예(테스트베드 동특성 모니터링 운영프로그램)

(나) 건물 구조건전성 모니터링 통합플랫폼 기술

- 동적데이터로거, 정적데이터로거 및 웹기반 운영프로그램을 연계한 통합 플랫폼(그림6)을 세계 최초로 개발하였음.
- 센서와 데이터로거의 단락을 감시할 수 있는 센서선 단락 Watch-dog을 장착하여 대상시스템의 모니터링 이전에 통합플랫폼의 상태를 모니터링하여 문제 발생시 즉시 관계자에게 통보하여 시스템의 안정성을 확보할 수 있는 기능을 구축함.
- 데이터로거와 서버시스템간의 통신선의 단락을 자체적으로 감시하여 자체 문제발생시 즉각적인 유지보수가 가능하게 하고, 통신선 단락 시에 데이터로거 내부에 데이터를 저장하고 있다가 통신선이 복구되면 현재 계측되는 데이터와 같이 저장된 이전의 데이터를 같이 전송하여 데이터의 손실을 최소화하는 기술을 세계최초로 구현하였음
- 이와같이 신호선 및 통신선을 자체 감시하는 기능은 데이터로거의 자체 개발을 통한 펌웨어의 소스코드 및 웹운영프그램의 소스코드를 확보하고 있어 개발이 가능한 것임
- 장시간 데이터베이스(DB) 구축을 통한 경향 분석 등을 통해 상태변화를 모니터링하여 이상 발견 시 후처리에 의한 정밀 데이터분석이 가능하도록 함
- 안정적인 OS인 Linux기반으로 통합플랫폼을 구성하여 개발비용을 절감하는 동시에

보안을 강화하였음

- 외부와의 데이터 통신기능을 구축하여 빌딩 자동화시스템과 연계가 용이하도록 하였음.
- 정밀 후처리 및 보고서 작성을 위한 DB의 자료를 다운하거나 일정한 기간동안의 보고서를 자동으로 만드는 기능을 구축하였음
- 테스트베드로 포스코건물사옥의 구조거동을 모니터링하는 시스템 개발에 선 적용하여 구조물의 모드 및 고유주파수를 도출하여 구조물의 동적 건전성을 실시간 모니터링하고 주요 강도의 건전성에 대한 모니터링을 동시에 실시하고 있음

(2) 기존 기술과의 차별성

(가) 건물 구조건전성 모니터링 웹기반 GUI 개발

- 세계최초로 웹기반으로 실시간 측정데이터의 그래프 차트를 웹브라우즈 상에서 제공할 수 있게 됨
- URL에 의한 시스템 접근이 가능하게 한 획기적인 기술로 인터넷이 지원되는 모든 기기의 사용이 가능함

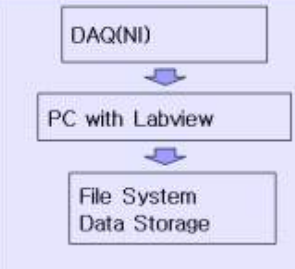


웹기반 실시간 측정데이터 그래프 차트

- CPU 및 메모리 누출 방지를 통한 장기간 모니터링용 웹기반 GUI 개발
- 서버시스템의 OS를 LINUX로 하여 시스템보안 성능을 높이는 동시에 개발비용을 절감함
- DB 메니저먼트를 실시하여 데이터 탐색 및 후처리 해석 기술을 용이하게 적용함

표 . 건물 구조건전성 모니터링용 웹기반 GUI 서버시스템 차별성

▣ 시스템 구성 개선 기술

항목	기존 시스템	개선 시스템
시스템 구성		
	주용도: 단시간 계측시험 Window OS 기반 File Storage Normal DAQ(일반적인 신호획득)	주용도: 모니터링시스템 Unix, Linux, 서버기반 DBMS(Oracle, MySQL) Intelliegnt DAQ (고품질 신호획득)

(나) 건물 구조건전성 모니터링 통합플랫폼 기술

- 동적로거와 정적로거 통합형으로 HW 및 펌웨어를 개발하고 이들 시스템과 유기적으로 연계하여 운영할 수 있는 웹기반 통합운영 SW를 세계최초로 개발함
- 센서와 통신선의 단락을 자체 감시하며 통신선의 단락 시 데이터를 데이터로거에 저장하고 통신선 복구 시 데이터를 추가로 전송하는 시스템을 세계최초로 개발
- DB로부터 후처리 해석으로 경향분석을 실시할 수 있어 구조건전성의 시간에 따른 노후화를 모니터링함
- 사용자의 접근 권한 등급을 차등화하여 정보의 열람과 데이터의 다운기능을 제한하여 시스템 보안기능을 높임

표. 건물 구조건전성 모니터링 통합플랫폼 신호선 및 통신선 감시 기술 차별성

▣ Watch-dog 및 데이터복구 시스템 개선 기술 확보

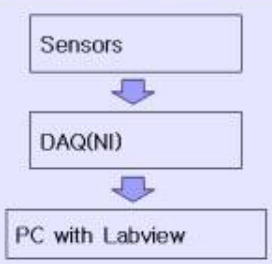
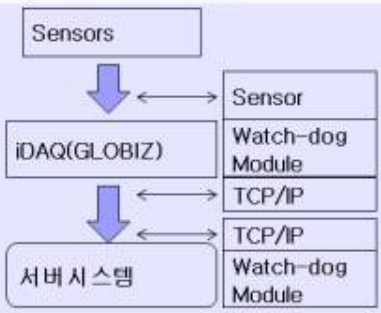
항목	기존시스템	개선 시스템
Watch-dog 구성 및 데이터 복구 시스템		
	Watch-dog 없음 Local Storage 없음 통신선 문제 발생시 데이터 손실발생	신호품질 Criterion 설정, Socket 통신 감시기능 로컬 데이터베이스 사용 통신선 문제 발생시 데이터 저장 후 복구 시 메인 데이터베이스로 전송

표 . 건물 구조건전성 모니터링 통합플랫폼 DB구축 및 경향분석 기술 차별성

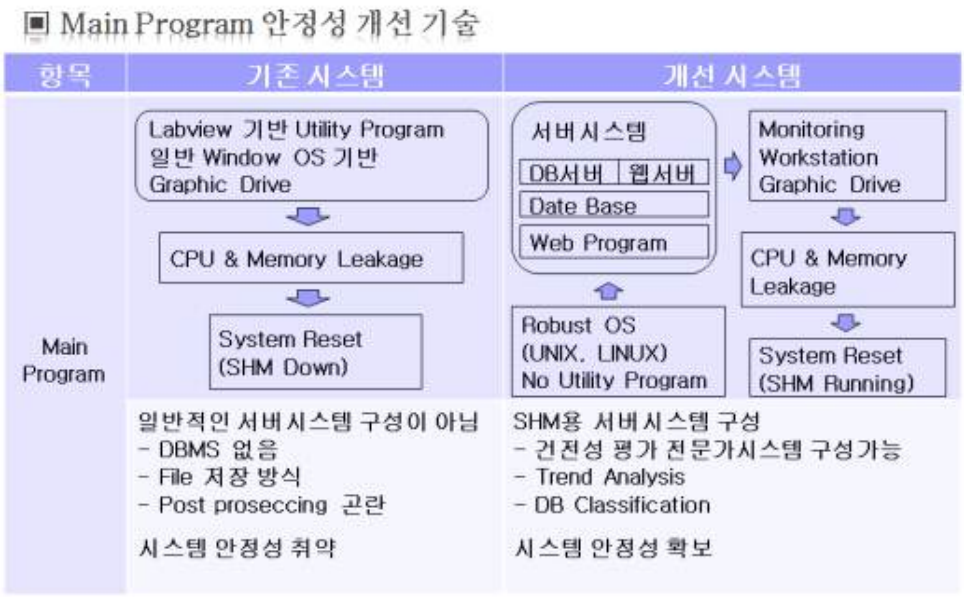
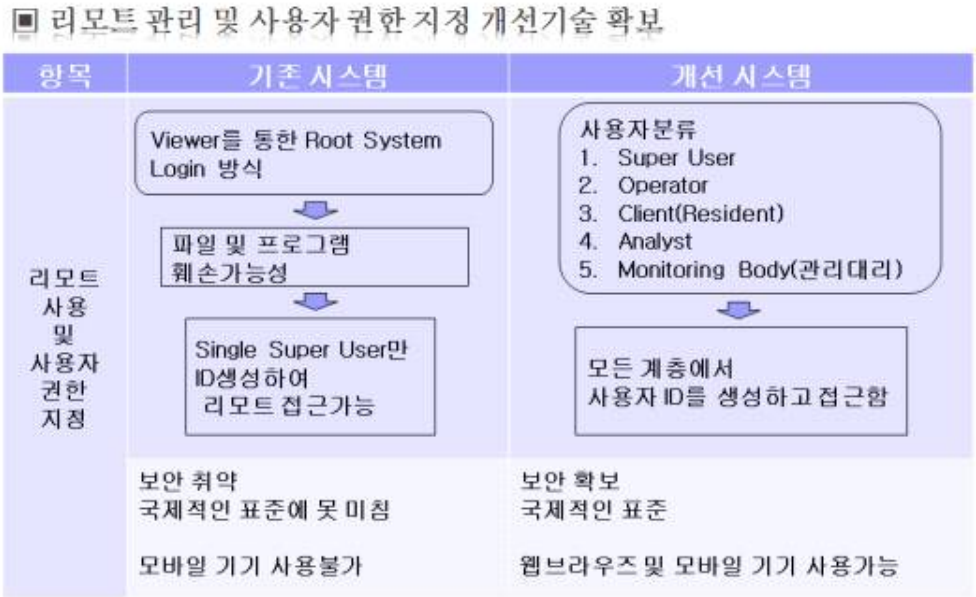


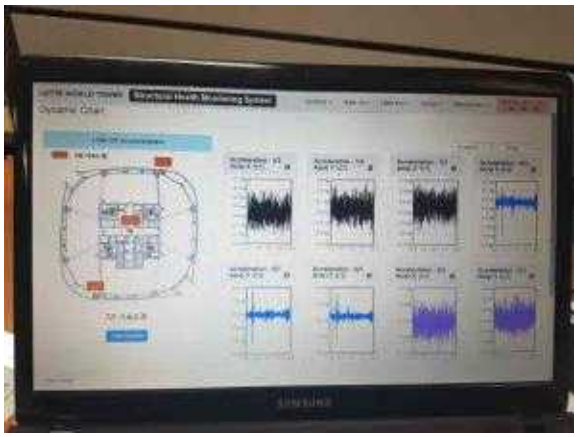
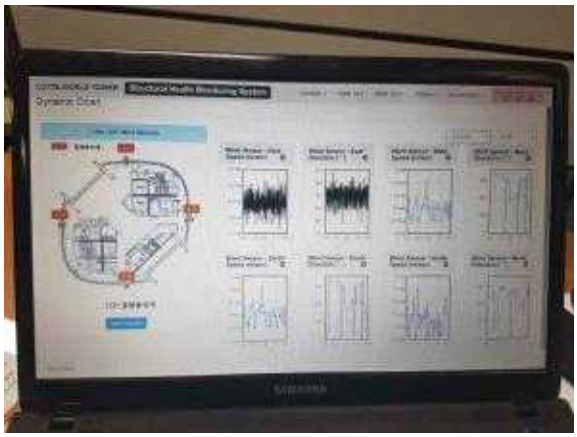
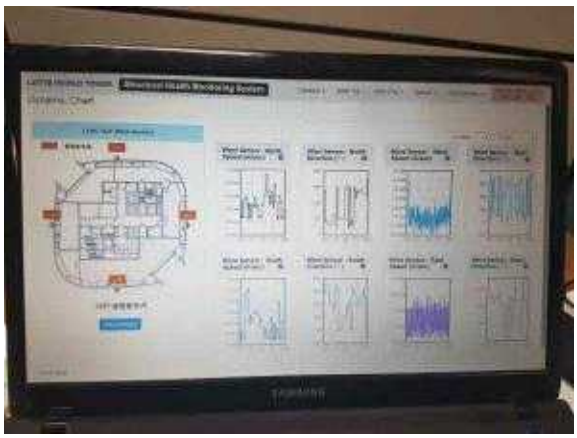
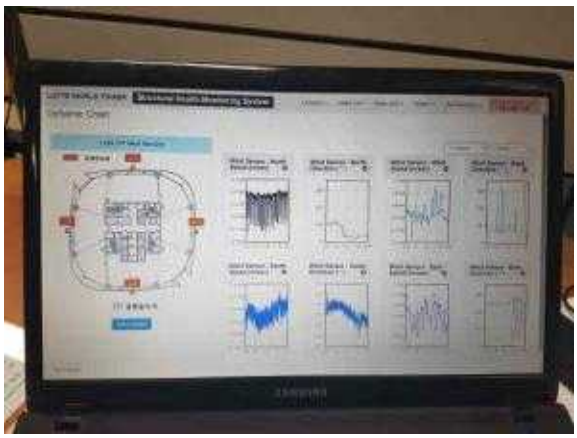
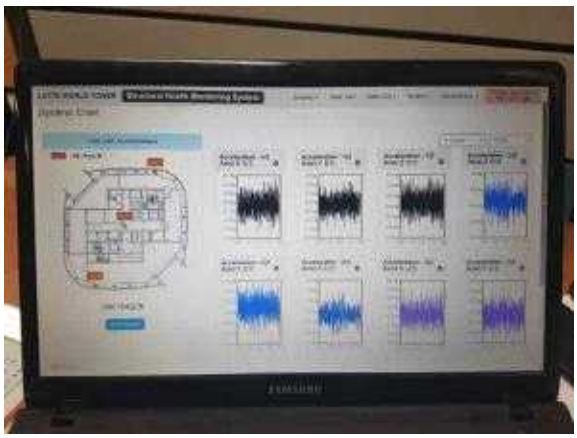
표. 건물 구조건전성 모니터링 통합플랫폼 접근권한 차등화 및 보안 기술의 차별성



(3) 적용제품에 대한 성능 및 기능 향상 내용

(가) 건물 구조건전성 모니터링 웹기반 GUI 개발

- 동적데이터 실시간 차트 48ch 이상 동시 처리(그림 29)(KTL 통합 플랫폼 공인인증 시험)

동적 채널 그래프	
	
8개	8개
	
8개	8개
	
8개	8개

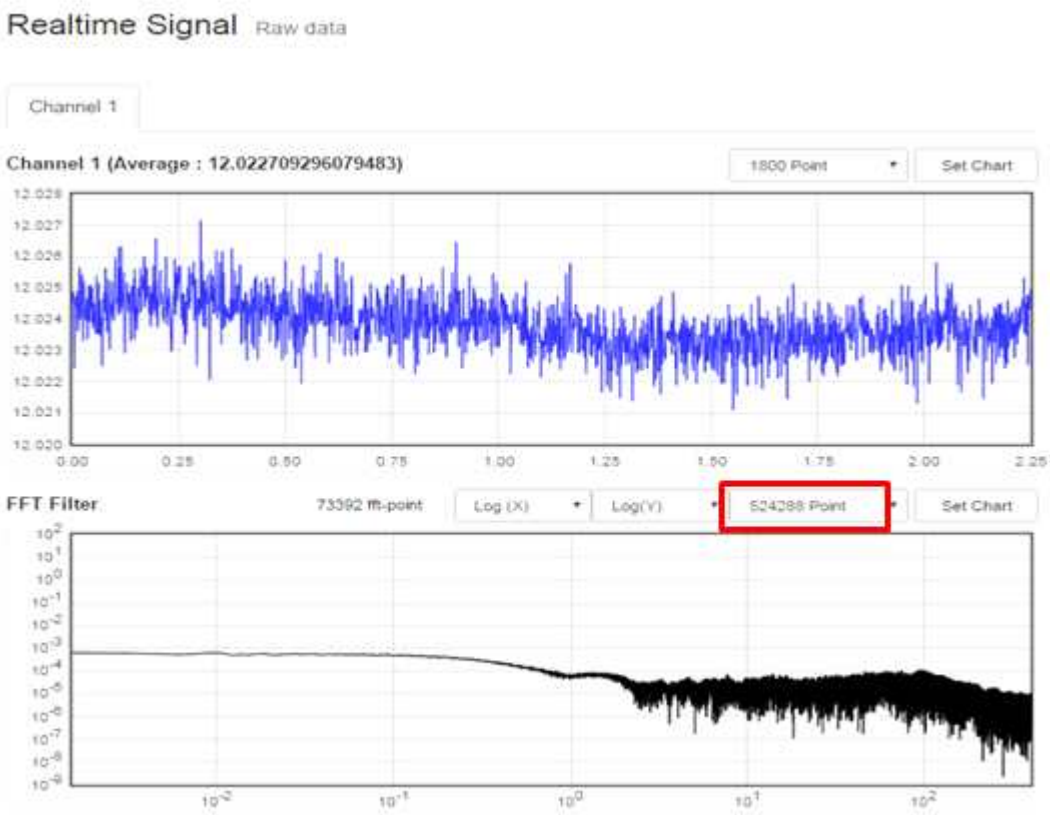
동적데이터 실시간 차트

- 실시간 정적데이터 차트 100ch 이상 동시처리 기능(그림 30)(KTL 통합 플랫폼 공인 인증 시험)

정적 채널 그래프	
	
16개	16개
	
12개	16개
	
12개	24개

정적데이터 실시간 차트

- 300,000개 이상의 연속 동적신호 파형 실시간 주파수 분석 및 디스플레이 기술 (KTL 통합 플랫폼 공인인증 시험)



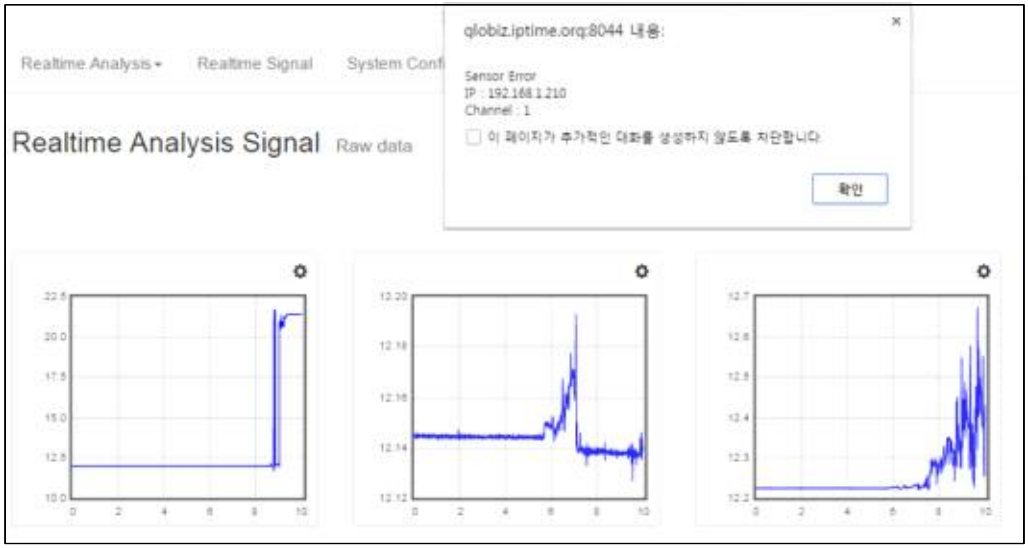
실시간 동적데이터 주파수 분석 성능

(나) 건물 구조건전성 모니터링 통합플랫폼 기술

- 동적로거와 정적로거 통합형으로 HW 및 펌웨어를 개발하고 이들 시스템과 유기적으로 연계하여 운영할 수 있는 웹기반 통합운영 SW를 장착한 서버시스템 구축
- 센서와 동적데이터로거 사이의 신호선 단락 시 이를 통합 운영플랫폼에서 감지하고 GUI상에 신호선 단락을 디스프레이하는 시험을 실시함(KTL 통합 플랫폼 공인인증 시험)
- 필요한 경우 팝업창이외에 이메일이나 문자발송이 가능함



신호선 단락시험



신호선 단락 시 팝업 창에 의한 알림

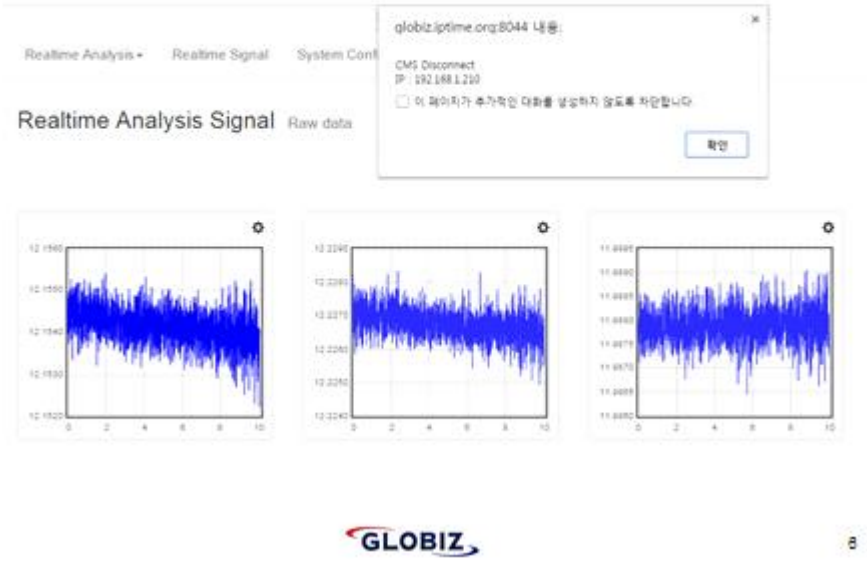
- 통신선의 단락을 자체 감시하며 통신선의 단락 시 데이터를 데이터로거에 저장하고 통신선 복구 시 데이터를 추가로 전송하는 시험을 실시함



통신선 단락 시 팝업 창에 의한 알림

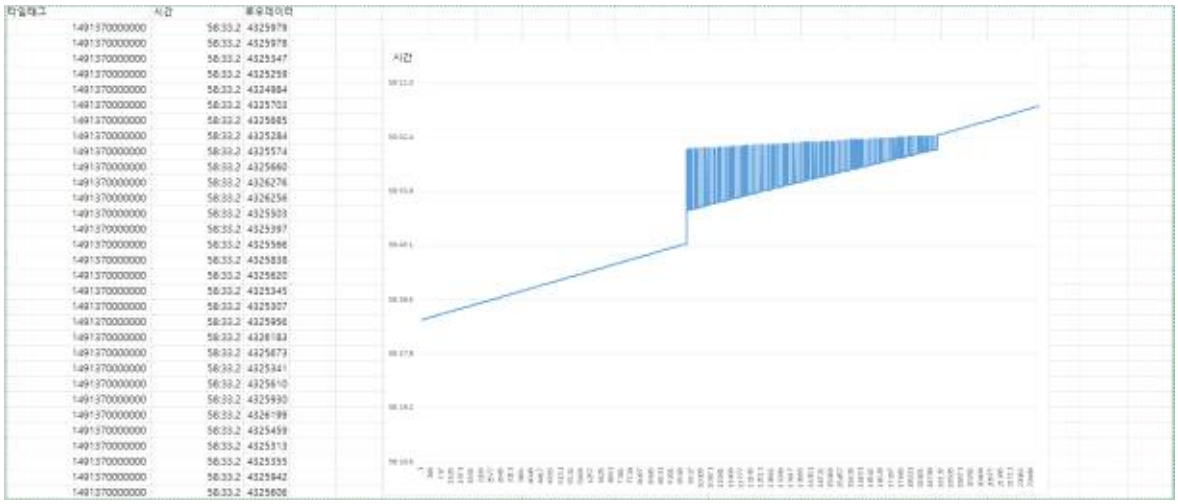
- 통신선의 단락을 감지하는 경우 팜업 창을 통해 디스플레이 하고, 필요시 이메일이나 문자를 발송할 수 있음.

단락 시 알람 스크린샷



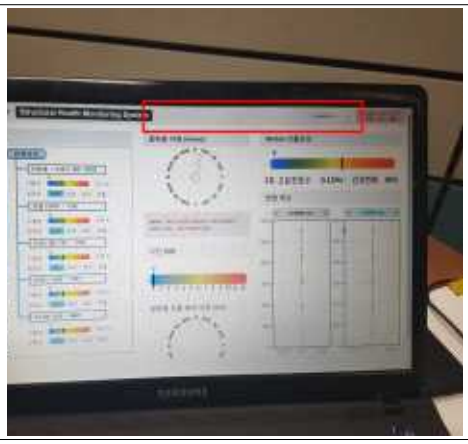
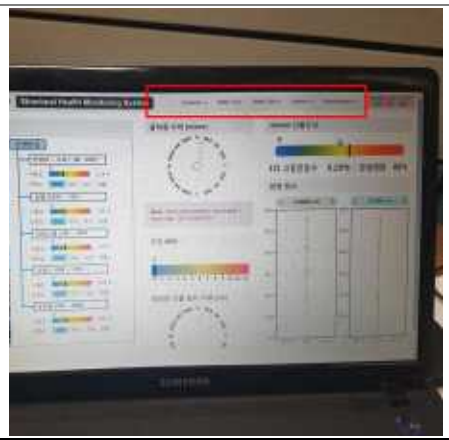
통신선 단락 시 팝업 창에 의한 알림

- 통신선의 단락 시 팜업을 띄우는 동시에 데이터를 데이터로거에 저장하고 통신선 복구 시 데이터를 추가로 전송하는 시험을 실시함
- 다음 그림은은 통신선의 단락 시 데이터를 데이터로거에 저장하고 통신선 복구 시 데이터를 추가로 전송하는 것을 나타내는 것을 데이터의 타임 테그를 그래프로 그린 것으로 통신선 단락이 없는 경우 데이터의 타임 테그는 선형적으로 증가하게 되는데, 통신선 복구 후에는 현재의 데이터와 과거의 데이터가 동시에 전송되기 때문에 단차가 지는 만큼 타임 테그를 왔다 갔다하면서 점차 현재시간에 구렴하는 전형적이 데이터 복구 형태를 나타냄



통신선 단락 후 연결시 데이터 복구

- 사용자의 접근 권한 등급을 4단계로 차등화하여 정보의 열람과 데이터의 다운기능을 제한하여 시스템 보안기능을 높였음 (KTL 통합 플랫폼 공인인증 시험)

레지던트 화면 (globizr)	엔지니어 화면 (globize)
	
어날리스트 화면 (globiza)	관리자 화면 (root)
	

접근 권한 4단계 구현

- 그리고 웹브라우저기반의 운영시스템을 제공하여 시스템업그레이드를 웹서버에서만 실시하면 간단히 해결되므로 모든 사용자는 항상 최신버전을 자동으로 사용할 수 있음
- 무엇보다 웹기반으로 인터넷만 되면 어디서 던지 어떠한 기기에서도 접근이 가능하여, 긴급한 상황에 대처할 수 있는 방법을 항상 제공받을 수 있음

4. 현장 적용 및 시방서

가. TEST BED 구축

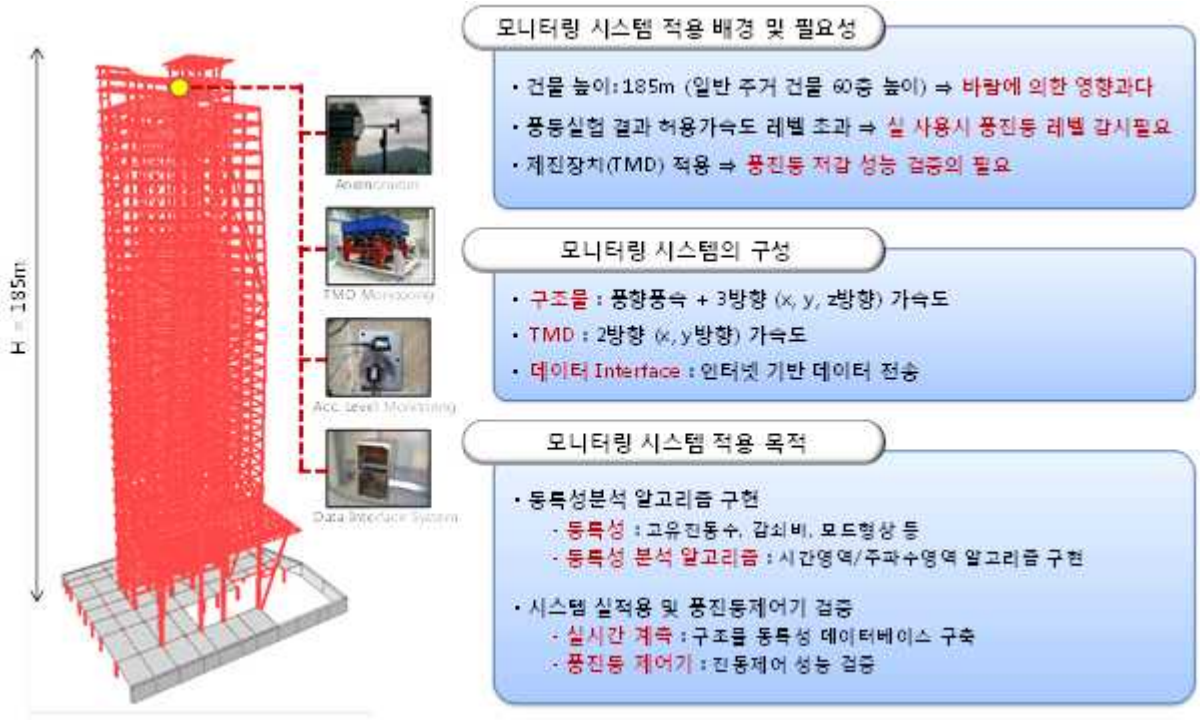
(1) 시공 및 시스템 설치

(가) 계측 대상 개요

포스코 건설 송도사옥은 38층의 사무용 건물이며, 층고가 4.1m 로서 일반적인 건물보다 높아 건물의 높이가 185m에 이르고, 이에 바람에 의한 영향이 증대하였다. 풍동실험 결과에 의하면 송도 사옥은 북서쪽에서 불어오는 계절풍과 주변에 계획된 고층빌딩의 영향으로 인하여 AIJ-2004의 사무용 건물에 대한 풍진동 기준 중, 인간 지각역 평균값보다 약간 큰 H-70을 두 배 이상 초과하였으며, 이에 따라 풍진동 저감 대책에 대한 여러 대안 검토가 실시되었다. 그 결과 경제성을 고려한 최적 대안으로서 구조보강과 제진장치의 동시 고려가 적용되었다.

우선 구조적 골조보강이 적용되어 시공시 반영되었으며, 제진장치의 성능 및 대상 건물에 대한적용성 등의 종합적 대안 검토 결과로서 질량 동조 감쇠장치인 콘크리트 질량체를 이용한 TMD가 설치되었다.

위와 같은 특성으로 인하여 송도사옥에 대한 풍진동 영향성 감시 및 적용된 제진장치의 성능 검증을 목적으로 건물의 최상층 풍향풍속, 가속도와 TMD의 거동을 계측할 수 있는 모니터링 시스템이 적용되었다. 다음절에는 계측 대상이 되는 포스코건설 송도 사옥과 설치된 제진장치의 특성에 대하여 정리하였다.



송도사옥 모니터링 시스템

(나) 계측기 선정

송도사옥의 풍진동 모니터링 시스템 구축은 1) 건물의 x, y-방향 및 Torsion 방향 동적거동, 2) 풍향/풍속, 3) TMD 동적거동의 세 가지를 계측하는 것을 주요 목적으로 한다. 이를 위해 1) 건물측정용 1방향 가속도계 3개, 2) 풍향풍속계 1개, 그리고 3) TMD 동적거동 측정용 1방향 가속도계 2개를 설치하고 데이터의 수집과 전송을 위하여 4) DAQ Board (8 Channel) 및 데이터로거와 5) 인터넷기반 데이터 송수신 장비를 설치한

다. 다음은 각각의 센서와 장비의 주요사양이다.

① 가속도계

건물의 동적거동과 TMD의 동적거동 계측을 위해 설치되는 가속도계는 서보타입 가속도계로 미국 Kinemetrics 사의 ES-U2 EpiSensor 가속도계 이다. ES-U2 EpiSensor 가속도계는 0-200Hz의 저주파 진동계측에 적합한 가속도계로 지진가속도 계측용으로 많이 사용되고 있다. 또한 ± 0.25g, ± 0.5g, ± 1g, ± 2g, ± 4g의 최대 측정 가속도값을 쉽게 조절할 수 있어 다양한 진폭의 진동계측에 적합하다. 가속도계의 출력은 -5V ~ 5V의 전압값이며 설정된 최대 가속도값에 따라 scale factor를 조절하여 가속도 값으로 변환하여야 한다. 가속도계의 크기는 55 x 65 x 97mm 이고 무게는 0.35kg 이다. 아래 그림은 ES-U2 EpiSensor 가속도계를 나타내며 주요 특징은 표에 정리하였다.

Specification	Description
Dynamic range	140 dB+
Bandwidth	DC to 200 Hz
Calibration coil	Standard
Full-scale range	User selectable: ± 0.25g, ± 0.5g, ± 1g, ± 2g or ± 4g
Outputs	User selectable at: ± 2.5V single-ended; ± 10V single-ended; ± 5V differential; ± 20V differential
Zero adjust	User-friendly access hole for simple, safe and efficient adjustment
Linearity	< 1000 μg/g2
Hysteresis	< 0.1% of full scale
Cross-axis sensitivity	< 1% (including misalignment)
Zero point thermal drift	< 500μg/°C (1g sensor)
Power consumption	Quiescent current < 9 mA from +/- 12 V
Mounting	Dual bolt for horizontal or vertical mounting
Operating Temperature	-20° to 70°C (0° to 160°F)
Housing	EMI/RFI Watertight enclosure 55 x 65 x 97mm (2.2″x 2.6″x 3.8″)
Weight	0.35kg (0.77 pounds)

② 풍향풍속계

풍향풍속의 계측을 위하여 설치된 풍향풍속계는 측정값의 신뢰성과 기상조건의 의존성을 고려하여 프로펠러형 풍향풍속계로 선정하였으며 미국 R. M. Young社의 05103 Wind Monitor 모델을 설치하였다.

Young 05103 풍향풍속계는 네 개의 날개를 갖고 있으며, 날개의 회전에 의해 AC 싸인파 voltage 신호가 생성된다. 바람의 방향은 뒷쪽의 날개판에 의해 감지되며 각도는 정밀한 변위차계 (potentiometer)에 의해 정해진다. 자왼선 차단 플라스틱과 스테인레스 스틸, 산화 알루미늄으로 이루어져 있으며 1 inch 파이프에 정착된다. 아래 그림은 설치된 Young 05103 풍향풍속계를 보여주며 주요 특징은 표에 정리하였다.

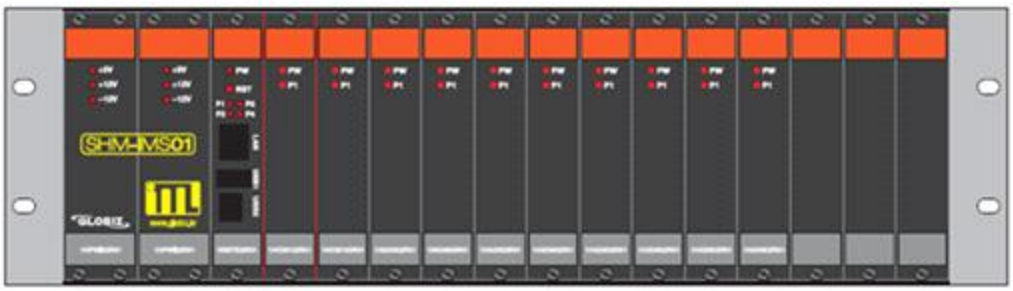
Specification	Description
Range	0-100 m/s (224 mph), 0- 360°
Accuracy	Wind Speed: ±0.3 m/s (0.6 mph) or 1% of reading Wind Direction: ±3 degrees
Operating Temperature	-50 to 50° C
Threshold	Propeller: 1.0 m/s (2.2 mph) Vane: 1.1 m/s (2.4 mph)
Signal Output	Wind speed: magnetically induced AC voltage, 3 pulses per revolution. 1800 rpm (90 Hz) = 8.8 m/s (19.7 mph) Wind direction: DC voltage from conductive plastic potentiometer - resistance 10K Ω, linearity 0.25%, life expectancy - 50 million revolutions
Power Requirement	Potentiometer excitation: 15 VDC maximum
Dimensions	37 cm (14.6 in) H x 55 cm (21.7 in) L, Propeller: 18 cm (7 in) dia.
Weight	1.0 kg (2.2 lbs)

③ 데이터 로거

5개의 가속도계와 1개의 풍향풍속계로부터 측정된 신호를 수집하고 Analogue 신호를 Digital 신호로 변화 (ADQ)하기 위한 장치로 이번 공동연구 기관인 글로비즈에서 개발한 데이터로거 SHM-IMS01을 적용하였다. SHM-IMS01은 최대 12개까지 채널을 가질 수 있으나, 본 계측시스템에서는 7개의 Input (5 가속도계 + 1 풍향 + 1 풍속)만 측정하기 때문에 8개의 채널로 구성하였다. SHM-IMS01의 주요 특징은 다음과 같다.

- The Widest Range of Sensor Available in the World
- Dynamic Range 139dB or more
- Real Time Condition Monitoring & Diagnosis
- 19" Sub-rack Type and Wall Mount Type Available
- Synchronized Measurement for all channels
- DSP & ARM Dual Process Adapted for Optimal Performance
- Max. 1kHz Sampling Rate Available
- Multi-Physical Quantity Sensing: Acceleration, Wind Speed and Direction, Point Displacement by GPS, Vibration of Wire etc. al.
- Unique Synchronized Measurement of VW Sensors in the World
- Real Time Filtering
- Complies with the National Standard of the Seismic Recorder
- Sensor and Communication Status monitoring and Recovery System

아래 그림은 SHM-IMS01 을 나타낸다.



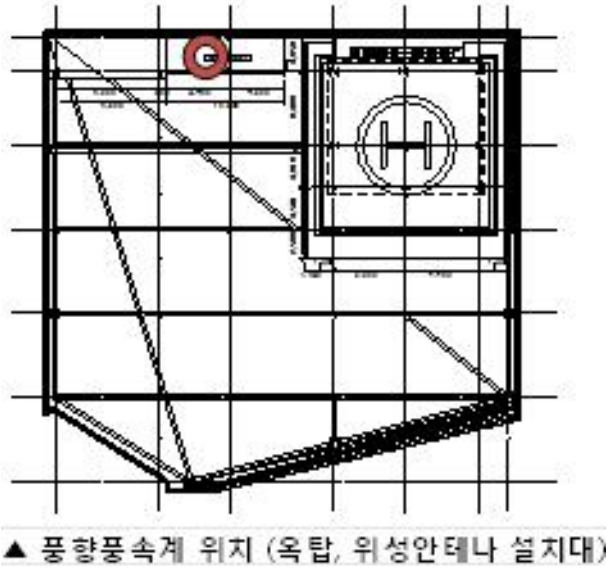
GlobIz SHM-IMS01 데이터로거

(다) 계측기 설치

포스코 건설 송도사옥의 풍진동 모니터링을 위하여 현장과 협의 하에 계측기 설치 위치를 선정하였으며, 그 내용을 다음에 정리하였다. 그림 1-12~1.15는 계측기의 설치 완료 사진 및 최종 선정된 풍향풍속계(상) 및 구조물, TMD 가속도계의 현장 설치 위치 계획과 데이터 로거와 통신 장비 등이 들어 있는 Rack의 설치위치 및 사진을 나타낸다.

① 풍향풍속계의 경우 구조물에 의한 바람의 영향을 최소화 하기 위하여 커튼월 최상부보다 더 높이 설치해야 하므로, 사옥동 헬리포트 층 배면쪽에 위치한 위성안테나 설치대 위에 안테나와의 간섭을 피하여 설치하는 것으로 결정되었다.

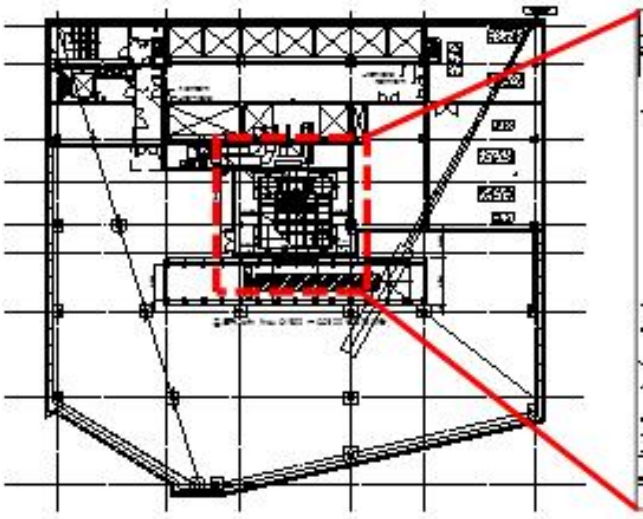




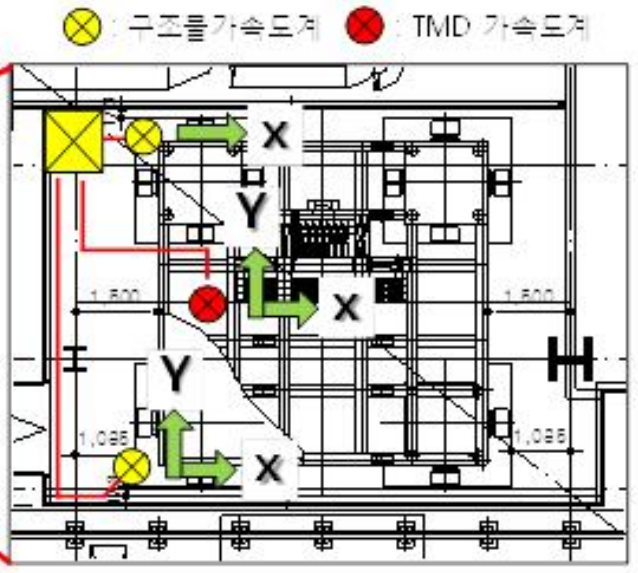
▲ 풍향풍속계 위치 (옥탑, 위성안테나 설치대)

풍향풍속계 설치 위치 및 사진

② 구조물 가속도계의 경우 X, Y, Z, 3방향의 계측을 위하여 TMD 실내 두 곳을 선정하여 한 곳에는 X,Y 방향의 가속도계를 각 1기씩 설치하며, 또 다른 한 곳에 X방향의 가속도계 1기를 추가하여 Z방향의 가속도를 계측하도록 계획하였다.



▲ TMD실 위치 (38F)



▲ 가속도계 / Rack 설치위치 및 방향

③ TMD의 성능 검증을 위한 X, Y 방향 가속도계의 경우 TMD 상부 프레임의 아래쪽에 방향에 따라 각 1기, 총 2기가 설치되었으며 준공 후 TMD 가동시 거동을 모니터링 하게 된다.

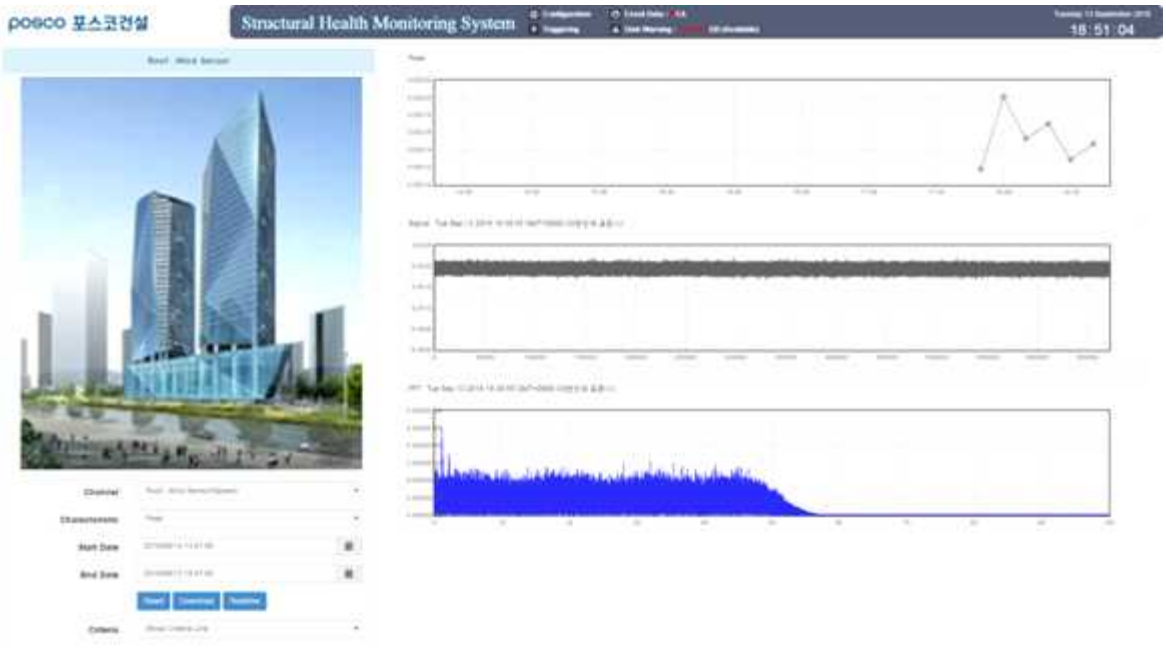
(2) 모니터링 웹 프로그램



웹기반 운영프로그램 예(테스트베드 동특성 모니터링 운영프로그램)



실시간 측정데이터 그래프



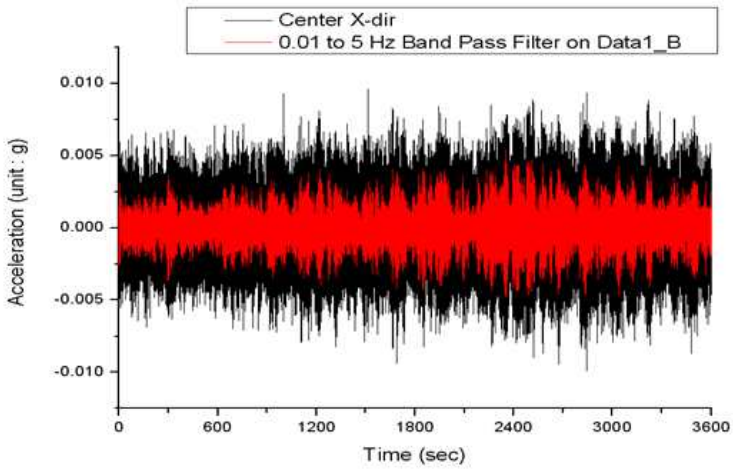
Trend Analysis

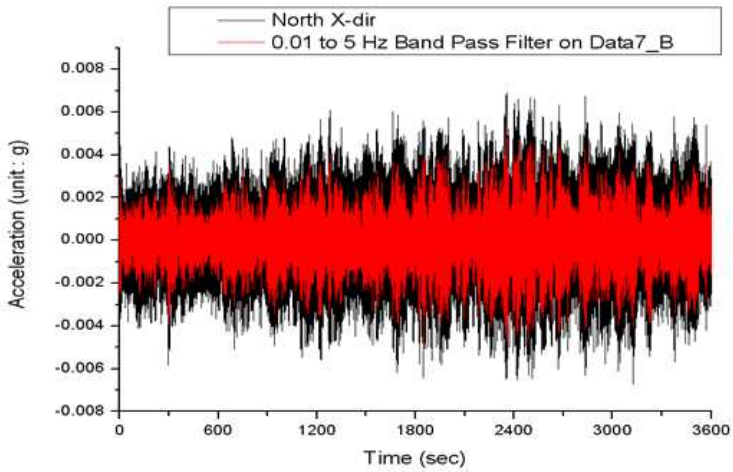
(3) 데이터 분석

(가) 가속도 시간이력 데이터

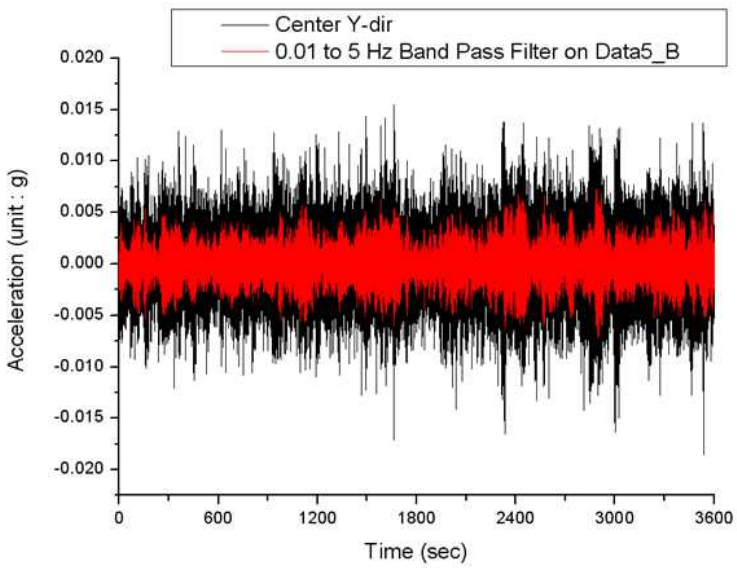
가속도 데이터는 sampling rate 200Hz로 기록되었다. 구조물 가속도는 센서는 중앙부 X, Y방향과 모서리 X방향으로 계측되었다.

계측된 가속도 데이터의 시간 이력 데이터 그래프는 아래와 같다. 검은색 라인은 raw data이며, 붉은색 라인은 0.01~5Hz로 밴드필터링 된 데이터이다. 구조물의 주요 응답모드를 고려할 때, 5Hz이상성분은 노이즈 제거를 위해 필터링으로 제거하는 것이 적절하게 판단된다. X방향의 최대가속도는 약 5.4gal로 분석되었다.



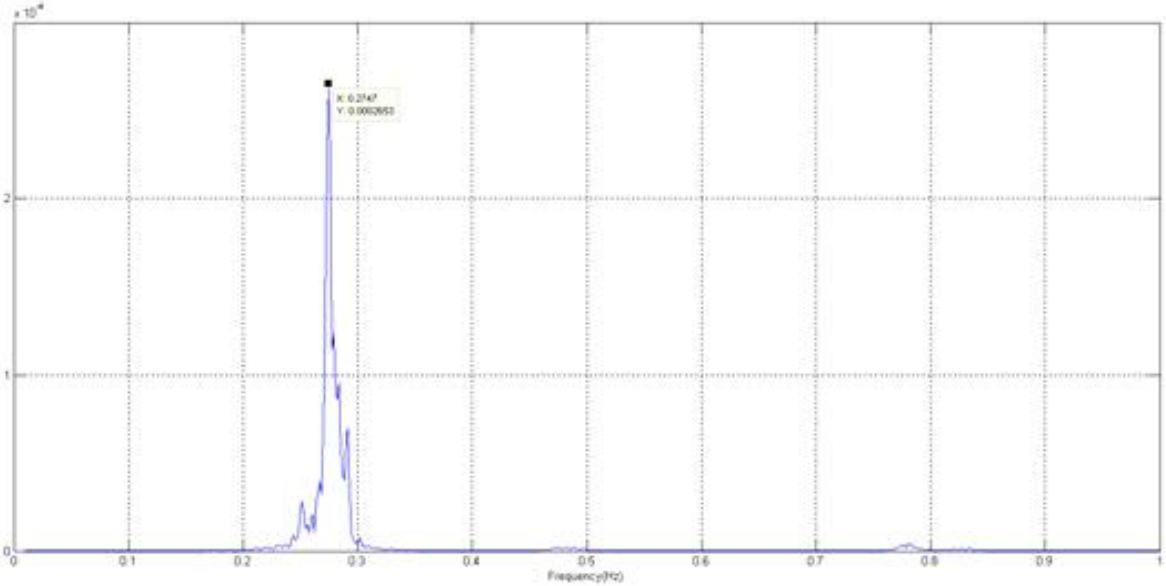


아래 그래프는 Y방향의 가속도 데이터 그래프이며, Y방향 최대 가속도는 약 7.3gal로 분석되었다.

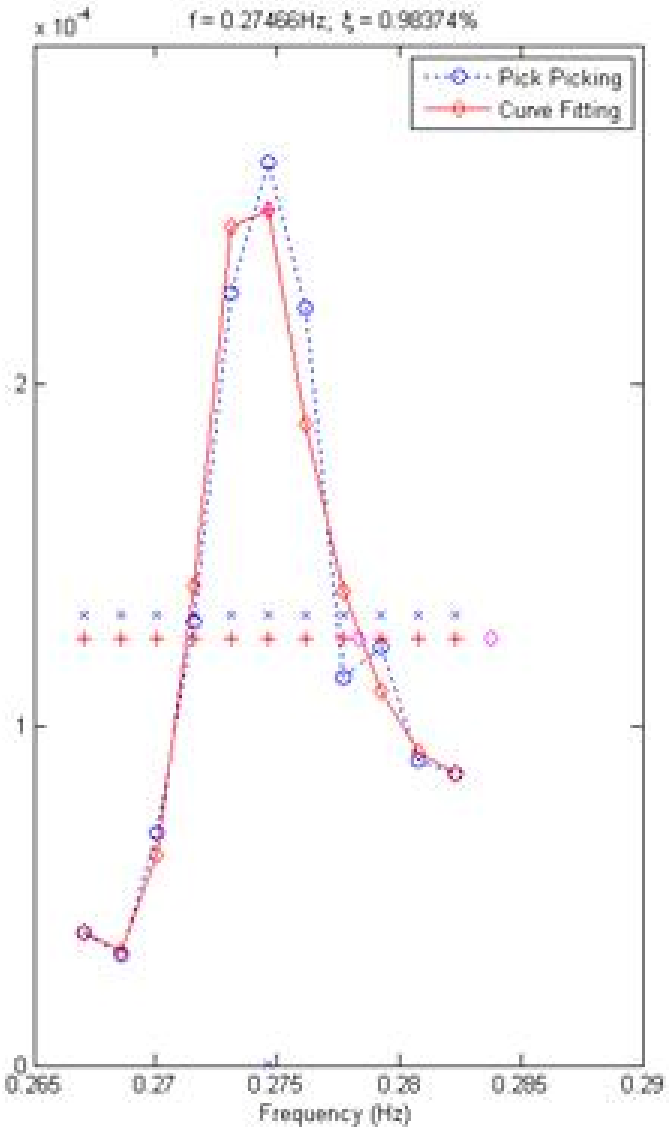


(나) 가속도 FDD 변환

아래 그래프는 X방향의 가속도 데이터의 FDD(Frequency domain decomposition) method) 결과이다. 데이터 분석에는 멀티윈도우가 반영되었으며, 에버리징이 수행되었다. X방향 고유진동수는 약 0.275 Hz이며, 감쇠비는 약 1.0%이다.

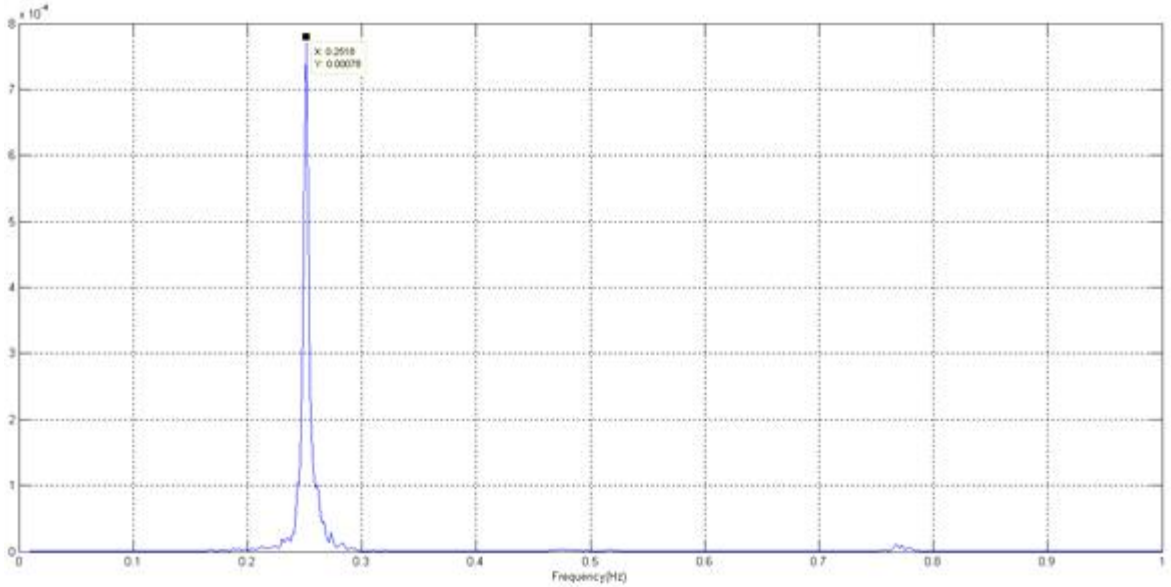


X방향 FDD 결과 중 진동수

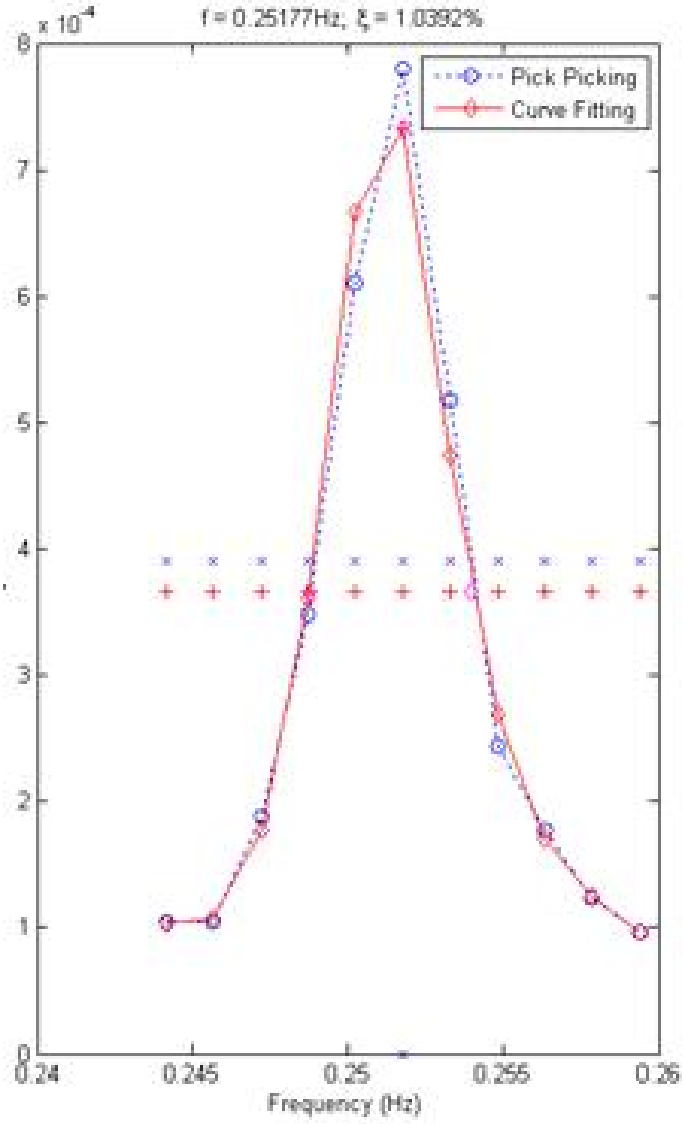


X방향 FDD 결과 중 감쇠비

아래 그래프는 Y방향의 가속도 데이터의 FDD(Frequency domain decomposition) method) 결과이다. 데이터 분석에는 멀티윈도우가 반영되었으며, 에버리징이 수행되었다. X방향 고유진동수는 약 0.252 Hz이며, 감쇠비는 약 1.0%이다.



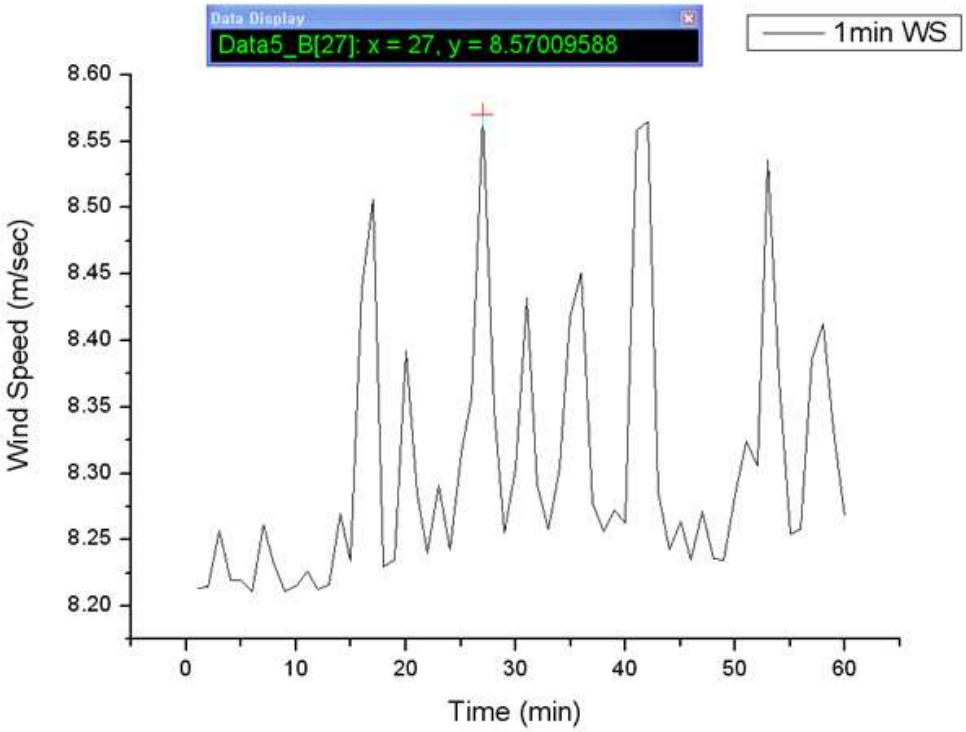
Y방향 FDD 결과 중 진동수



Y방향 FDD 결과 중 감쇠비

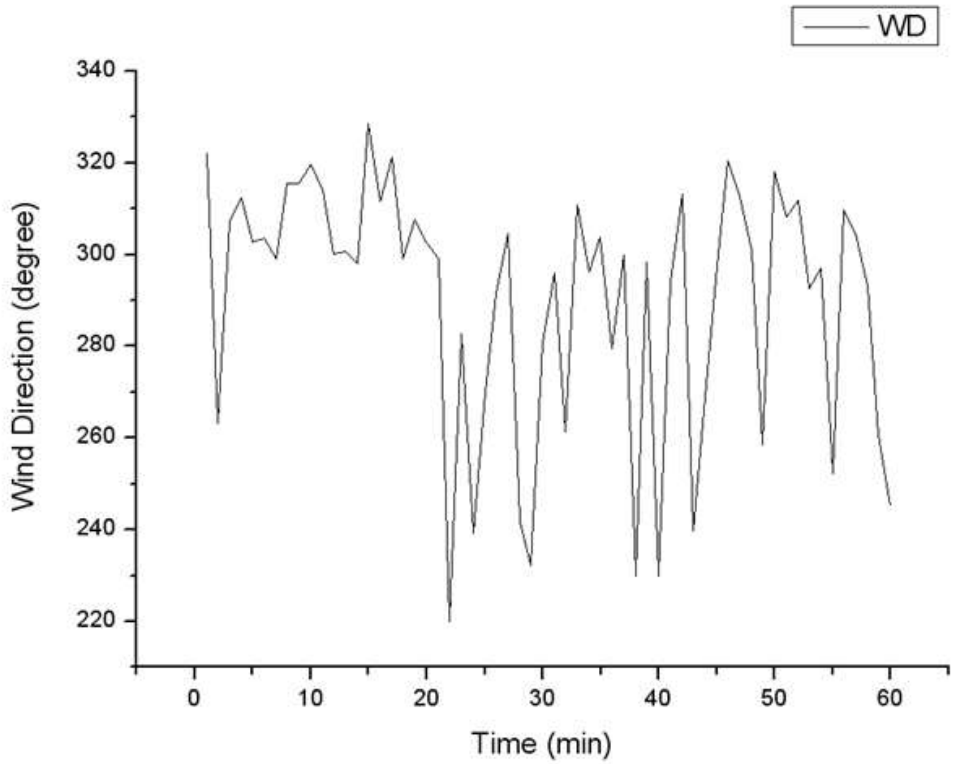
(다) 풍향풍속 데이터

계측된 풍속 데이터의 1분 평균 시간 이력 데이터 그래프는 아래와 같다. 1분 최대 풍속은 약8.6 m/sec로 분석되었다.



1분 평균 풍속 그래프

풍향은 북서풍으로 계측되었다. 풍향의 시간이력 데이터 그래프는 아래와 같다..



풍향 그래프

나. 시방서

(1) 가속도 계측 시스템

가속도계의 경우 수평 유지가 매우 중요하므로 바닥에 설치하는 경우에는 아래 그림과 같이 레벨링 볼트를 통하여 수평을 맞추고, TMD의 경우 별도의 프레임을 제작하고 TMD 상부 프레임 형강 내부에 아래 그림과 같이 설치하여 수평을 유지시킨다. 설치된 센서들은 케이블 작업을 통해 Rack 함체 내의 데이터로거에 연결시킨다.



(a) 앵커볼트 설치 (b) 가속도계 설치 및 레벨링 (c) 보호함체 설치

구조물 가속도계 설치 사진



(a) 설치위치 선정 (b) 가속도계 설치 프레임 설치 (c) 보호함체 설치

TMD 가속도계 설치 사진



Rack(데이터 로거, 서버) 설치 사진

(2) 풍향풍속 계측 시스템

풍향풍속계의 경우 구조물에 의한 바람의 영향을 최소화 하기 위한 장소 선정 및 배치가 중요하다. 포스코건설 송도사옥의 경우 커튼월 상부로 돌출시켜 건물의 영향을 최소화시켰으며, 더샵퍼스트월드의 경우 헬리포트 층 남측에 항공장애등과의 간섭을 피하여 설치하였다.

아래 그림은 풍향풍속계의 설치 순서를 나타낸다. 특히 지지대 및 하부 앵커의 경우 강풍에 대한 변형을 최소화 시키고 안전성이 검증되어야 한다.



(a) 프로펠러식



(b) 초음파식

풍향풍속계 설치 사진



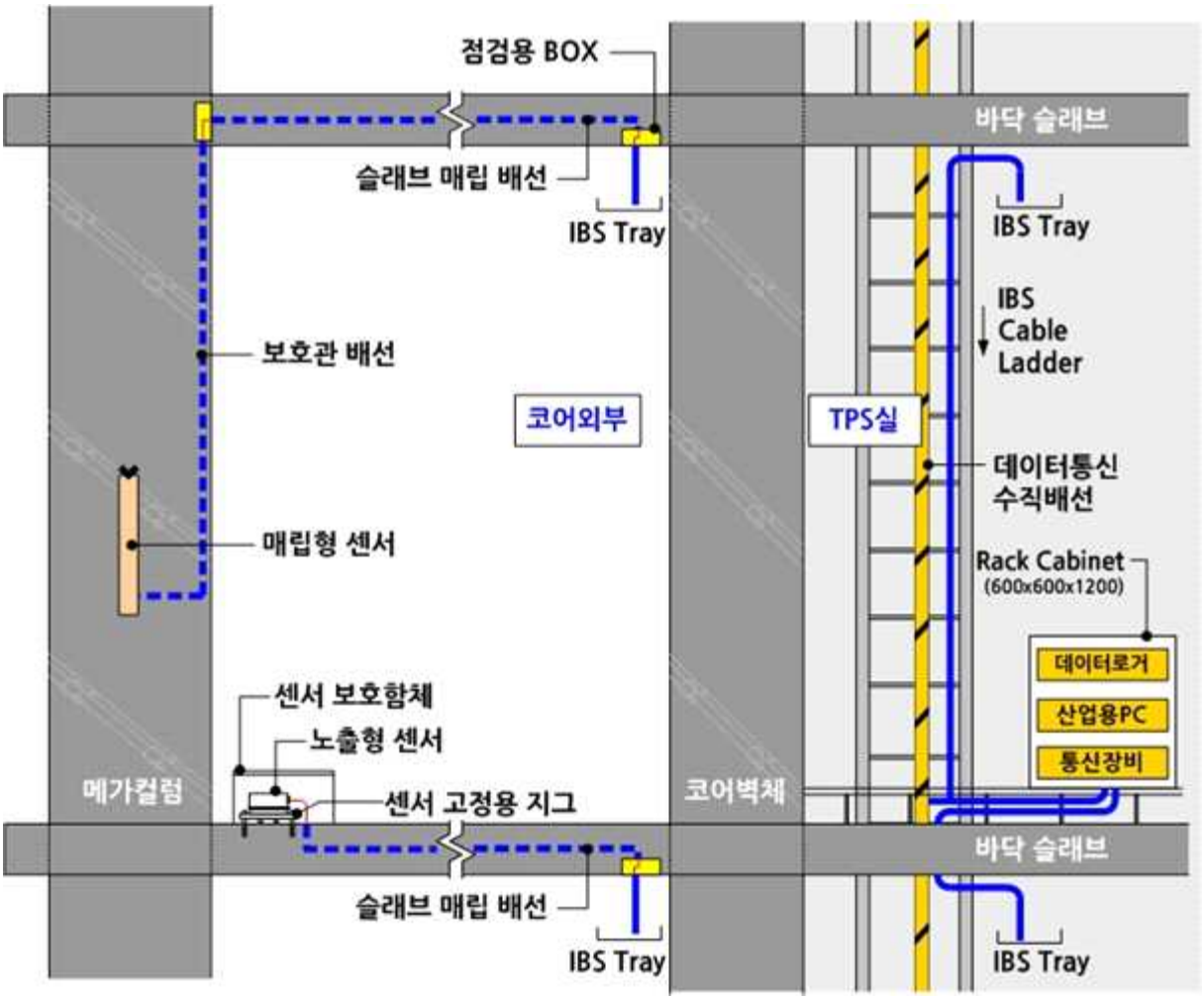
(a) 앵커볼트 설치 (b) 풍향풍속계 지지대 설치 (c) 풍향풍속계 설치

풍향풍속계 설치 순서

(3) 모니터링 시스템 배선방안

- 센서에서 코어 내부로 인입하는 배선의 경우 슬래브를 통과시에는 매립으로 구성하여 향후 전기.통신 시스템 개•보수시 혼선이 없도록 하며, 불가피한 경우 또는 슬래브 골조 시공 완료 후 설치시에만 노출형태로 배선한다.
- 슬래브로의 배선 인입 및 출구에는 점검용 박스를 설치하여 향후에도 배선의 유지보수를 용이하게 한다.
- 트레이 사용시 알림 표식을 부착하여 향후 전기 및 통신 배선과의 혼선을 방지해야 한다
- 건물 BIS(Building Information System) 전용 트레이가 있을 경우 이를 활용하여 통신실(TPS) 인입하며, 없을 경우에는 일반 통신 트레이를 활용하여, 통신실(TPS)로 인입한다.

- 가급적으로 전기적 노이즈를 방지하기 위해 전력선 통과 트레이는 사용하지 않으며, 중간 서버 및 배선도 전기실(EPS)은 배제함을 원칙으로 함. 부득이하게 이용할 경우 반드시 노이즈 발생 및 데이터 간섭여부를 확인하여야 한다.
- TPS실내의 센서케이블 및 데이터 로거 케이블의 경우 Access Floor 하단 트레이를 이용하여 배선하며, Access Floor가 없을 경우 별도 배관을 설치하여 인입한다.
- 각 층 TPS실에서 방재실로의 데이터 케이블은 통신 전용 Ladder를 이용하여 배선한다.
- 개별 장비 및 배선에는 별도 표식을 하여 추후 통신 및 전기시설 유지보수시 손상되는 일이 없도록 조치한다.



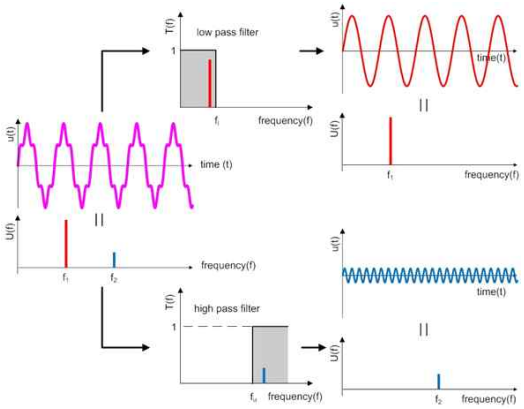
배선 개념도

다. 시스템 검증

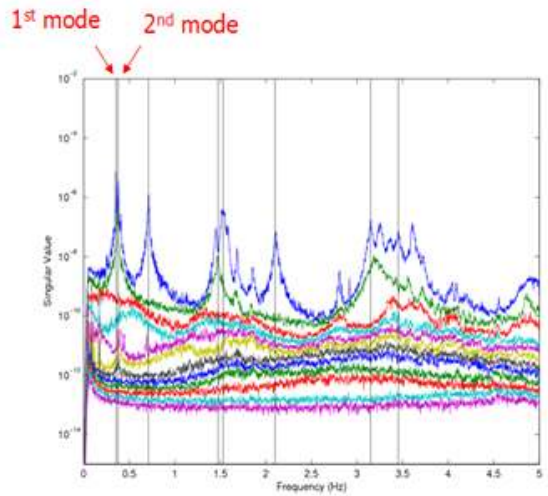
(1) 상태평가 시스템

초고층 구조물의 계측 데이터(가속도 데이터, 주요부재 변형률 데이터)를 통해 개발된 상태평가프로그램으로 강성 평가 및 손상추적을 수행하여 시스템검증 및 결과분석하였다.

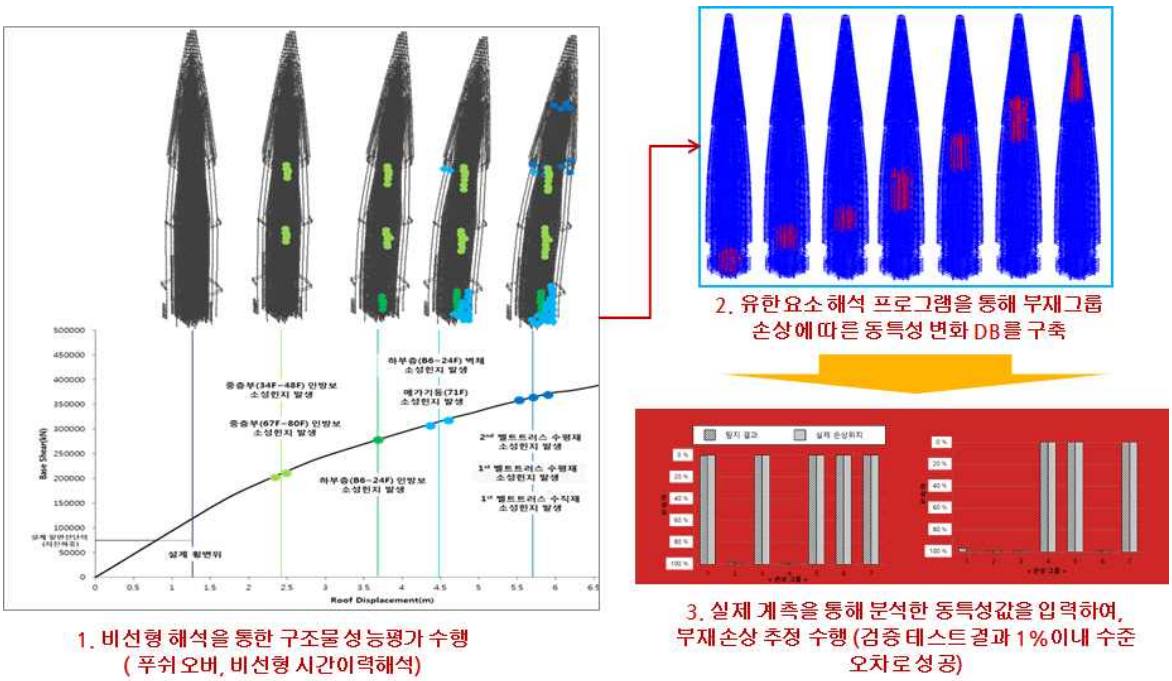
상태평가프로그램 중 강성평가는 비선형 해석을 통해 구조물 성능평가를 수행하여, 강성저하 시나리오 및 DB를 작성하는 단계, 자동으로 가속도 raw 데이터를 불러오는 단계, 필터링 및 패턴제거를 수행하는 단계, SI를 수행하는 단계, 커프피팅을 수행하는 단계, 감쇠비를 구하는 단계, 모드형상을 구하는 단계, 취득한 동특성을 파일로 저장하는 단계, 취득한 동특성을 통해 사전 학습된 인공신경망 알고리즘을 통해 분석하는 단계, 손상을 추정하는 단계로 구성되어있다. 검증테스트 결과, 사전 해석 DB를 가지고 검증 테스트 결과 1%이내 수준 오차로 손상을 예측하였다.



필터링 및 패턴제거 단계

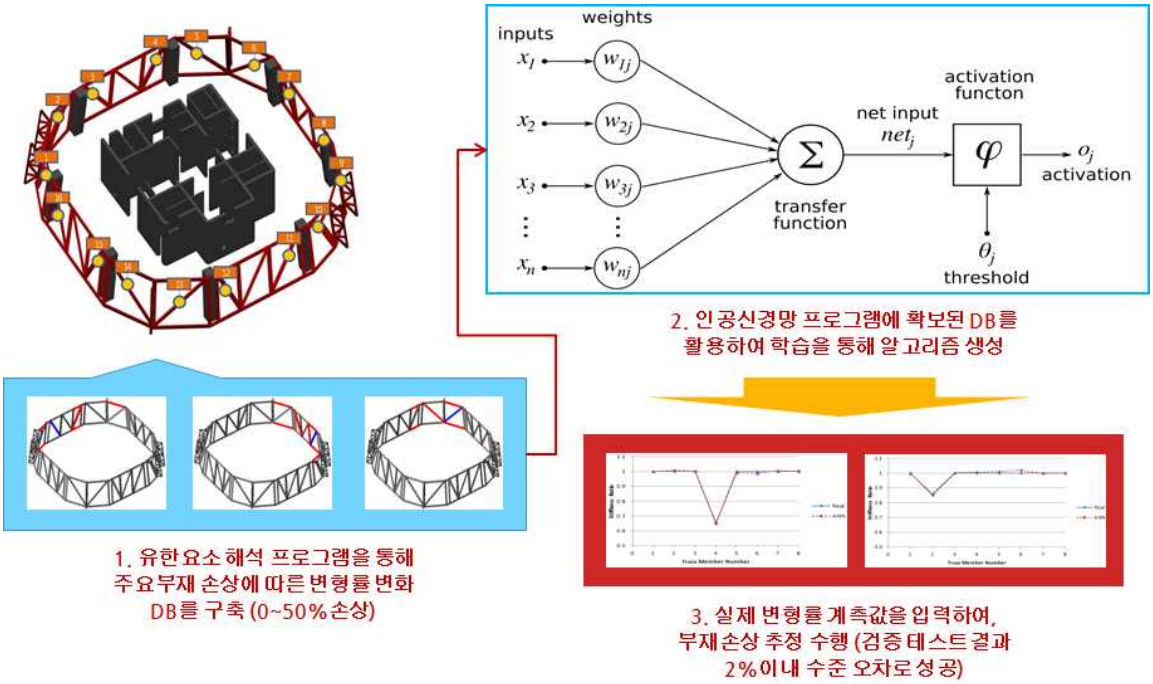


SI 및 커브피팅 단계



강성저하 시나리오 및 DB를 작성, 손상을 추정하는 단계

상태평가프로그램 중 손상추적은 유한요소 해석을 통해 구조물 손상시 변형율 변화 DB를 작성하는 단계, 자동으로 주요부재 변형률 raw 데이터를 불러오는 단계, 변형률 데이터를 통해 사전 학습된 인공신경망 알고리즘을 통해 분석하는 단계, 손상을 추정하는 단계로 구성되어있다. 검증테스트 결과, 사전 해석 DB를 가지고 검증 테스트 결과 2%이내 수준 오차로 손상을 예측하였다.



손상시 변형율 변화 DB를 작성, 손상을 추정하는 단계

제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

1. 목표 달성도

분야	목표	달성도(%)	내용
표준 SHM 시스템 제안	학술발표1건, 지침제안 2건, 전문가평가 2건	100%	- 표준 SHM 시스템의 제안을 자료집 2건으로 제안하였으며, 관련 분야 전문가에게 평가 및 지적사항 보완 완료
구조물 실시간 상태평가 시스템 개발	학술발표1건, SW등록 1건, 지침제안 1건, 전문가평가 1건	100%	- 상태평가 시스템의 제안을 자료집 1건으로 제안하였으며, 관련 분야 전문가에게 평가 및 지적사항 보완 완료 - 상태평가 프로그램 SW등록 1건 완료
동적/정적 통합 데이터로거 제작	48ch 동적데이터로거와 100ch 정적데이터로거 동시계측 특허출원 1건, 시제품 1건, SW등록 1건	100%	- 동적범위 130dB이상의 48ch 동시계측, 데이터로거 개발 - 진동현 센서 100ch이상 동시계측 정저로거 개발 - 동적/정적 통합시스템 개발 - 관련 프로그램 SW등록 1건 완료 - 관련 특허 1건 출원 완료
모니터링 웹운영 기본 프로그램	특허출원 2건, 학술발표 1건, 시제품 1건, SW등록 1건	100%	- URL 접근방식의 GUI - 접근권한별 데이터 열람의 차등화 - DBMS운영 및 경향분석 기능 - 관련 특허 2건 출원 완료 - 관련 프로그램 SW등록 1건 완료
현장 적용 및 시방서	현장적용 1건, 자료집 1건	100%	- 현작적용하여 테스트 완료 - 시방서 자료집 1건 완료

2. 관련 분야 기여도

항목	기여한 점
표준 SHM 시스템 제안	SHM 시스템 기획을 위한 가이드 제공
구조물 실시간 상태평가 시스템 개발	SHM 데이터 분석을 위한 가이드 제공
장비 국산화	외제 장비 국산화로 인한 성능 개선 및 단가 절감
모니터링 웹 프로그램	외부 접속을 통한 모니터링 반응 속도 향상
현장 적용 및 시방서	현장 적용 예시 및 작업 사진을 통한 노하우 제공

제5장. 연구개발성과의 활용계획

본 기술사업화 제안에서는 단순 모니터링 시스템 제안에서 더 나아가 국내 기업과의 협업을 통한 센서에 대한 데이터로거(H/W) 개발을 통해 모니터링 핵심 요소기술의 국산화를 모색하고자 한다. 개발 목표 성능은 외산 제품보다 동등 수준 이상이며, 최근 높아진 국가 위상과 함께 상품화하여 국내 대형 건설사와 함께 해외진출도 가능할 것으로 판단된다.

초고층 건축분야 외에도 동일 계측 아이템을 가진 타 구조물에 동일 적용이 가능하다. 일반 건물 뿐 아니라 플랜트, 대공간 구조물에도 적용이 가능하며, 토목 및 철도 분야의 진출도 가능할 것으로 판단된다.

대부분의 외산 제품의 경우 제한된 기능 및 S/W패키지 판매로 인하여, 구매자의 필요에 맞춘 제품 구성이 쉽지 않다. 개발 예정이 모니터링 시스템 통합 플랫폼의 경우 앞으로 활성화될 모니터링 시장에 범용적으로 적용할 수 있는 제품의 개발을 목표로 하고 있으며, S/W 또한 장소의 제약을 받는 오프라인 환경에서만 작동되는 것이 아닌 웹베이스의 온라인 환경에서의 실시간 구동 기능을 탑재하여 개발 목표를 잡고 있다. 또한, 사용자별 맞춤형 시스템 구성이 가능하여 경제적인 시스템 구현이 가능하며, 대형 건설사 건설현장을 테스트베드 삼아 사용실적을 확보하고 실구조물에서의 성능을 검증할 경우 외산 제품에 대한 경쟁력을 충분히 확보할 수 있다.

이러한 고성능 장비와 웹 프로그램을 통해 양질의 모니터링 데이터를 확보하여, 구조물 상태평가를 실시하면 구조물 유지관리시 안전성을 보다 확보할 수 있고, 실제 구조물 거동의 연구를 통해 구조설계기술 또한 발전될 수 있다.

제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

분야	수집한 과학기술 정보	비고
해외서적	- 10권	
센서 및 로거 브로셔	- 국외 브로셔 20건,	

제7장. 연구개발성과의 보안등급

보안등급 분류	보안	일반
		o
결정 사유	일반 기업을 상대로 비즈니스 모델을 개발하여 사업화 하는자 하는 연구과제로서 세부적인 연구결과는 지적재산권을 통해 보호 받고자 하는 것으로 국가적인 기밀 사항 없는 것으로 판단됨	

제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황(해당없음)

구입 기관	연구시설/ 연구장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입 가격 (천원)	구입처 (전화번호)	비고 (설치 장소)	NTIS장비 등록 번호
-	-	-	-	-	-	-	-	-

제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

1. 안전조치 관련

가. 기술적 위험요소 분석

- 연구실 내에는 S/W 개발 및 데이터로거 제작 등을 주업무로 하여, 안전에 관련한 특이한 사항이 없음.

나. 안전관리 대책

- Test Bed 운영에 관련하여 건설 현장의 안천수칙에 맞도록 안전 보호장구(안전화, 각반, 안전그네, 안전모 등)를 착용하여 현장작업을 실시하기 때문에 기본적인 안전조치는 필수적으로 이행하고 있음.

제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적

번호	구분 (논문/ 특허/ 기타)	논문명/특허명/ 기타	소속 기관명	역할	논문 게재지/ 특허 등록 국가	영향력 지수	논문 게재일 /특허 등록일	사사 여부 (단독 사사 또는 중복 사사)	특기 사항 (SCI 여부/인용 횟수 등)
1	학술발표논문	초고층 구조물 건전성 모니터링을 위한 축응력 계측 및 해석에 관한 연구	마이다스아이티	주관	한국건축시공학회		2015.11.14	단독 사사	
2	학술발표논문	구조건전도모니터링시스템을 활용한 건물 동특성 평가	포스코건설	주관	한국구조물진단유지관리공학회		2016.04.08	단독 사사	
3	학술발표논문	대형 구조물 상태평가를 위한 트러스 구조물 손상 평가에 관한 연구	마이다스아이티	주관	한국건축시공학회		2016.11.21	단독 사사	
4	특허	대공간 구조물 붕괴 감지장치 및 붕괴 감지 방법	마이다스아이티/글로비즈/포스코건설	주관	한국		2015.08.31	단독 사사	
5	특허	구조물 모니터링 장치 및 구조물 모니터링 방법	마이다스아이티/글로비즈/포스코건설	주관	한국		2016.02.02	단독 사사	
6	특허	대공간 구조물 붕괴 감지 장치와 구조물 모니터링 장치 및 이를 이용한 방법	마이다스아이티/글로비즈/포스코건설	주관	PCT		2016.08.18	단독 사사	
7	프로그램	대형 구조물 건전성 모니터링 상태평가 프로그램	마이다스아이티	주관	한국		2017.02.13	단독 사사	
8	프로그램	고층빌딩 구조건전성 모니터링시스템 펌웨어	㈜글로비즈	주관	한국		2017.03.03	단독 사사	
9	프로그램등록	초고층빌딩 구조 건전성 실시간 모니터링 운영프로그램	㈜글로비즈	주관	한국		2017.03.03	단독 사사	

제11장. 기타 사항

1. 관련 법규 보완

가. 초고층 및 지하연계 복합건축물 재난관리에 관한 특별법 시행규칙

- 현재 초고층 및 지하연계 복합건축물 재난관리에 관한 특별법 시행규칙에는 제7조 4항에 지진계 및 풍향풍속계 설치를 초고층 건축물에 한정하는 것으로 2016.10.6 개정되었다. 개정된 내용만으로는 지하연계구조물의 구조 안전성 계측 설비의 법적 기준 및 근거가 명확하지 않다. 초고층 건물과 비교하여 저층 구조물의 경우 일반적으로 풍하중 보다는 지진하중에 의해 횡력에 대한 전단력이 지배적인 경향이 있어 풍향풍속계는 설치가 의무화되지 않더라도 지진계의 설치가 필요할 수 있다.

제12장. 참고 문헌

[1] Charles R. Farrar, Keith Worden, Structural Health Monitoring a machine learning perspective, WILEY

[2] M.L. Wang,j.p.Lynch and H.Sohn, Sensor Technologies for civil infrastructures, WP

[3] A wireless vibrating wire sensor node for continuous structural health monitoring
HM Lee, JM Kim, K Sho, HS Park
Smart Materials and Structures 19 (5), 055004

[4] Application of GPS to monitoring of wind-induced responses of high-rise buildings, HS Park, HG Sohn, IS Kim, JH Park, The Structural Design of Tall and Special Buildings 17 (1), 117-132

[5] 강보선, 박문규, 기계계측공학, 시그마프레스

[6] 초고층 및 지하연계 복합건축물 재난관리에 관한 특별법

[7] 초고층 및 지하연계 복합건축물 재난관리에 관한 특별법 시행규칙

[8] 사전재난영향성검토협의 지침

[9] 지진가속도계측기 설치 및 운영기준

[10] Y.Q. Ni, SHM benchmark for high rise structures a reduced order finite element model and field measurement data, Smart Structures and Systems, Vol. 10

[11] jia-Zhan Su, Long-term structural performance monitoring system for the Shanghai Tower, J Civil Struct Health Monit,2013 3:49-61

[12] Xiao Lu, Development of a simplified model and seismic energy dissipation in a super-tall building, Engineering Structures 67, 2014, 109-122

[13] ASCE 41-13

[14] 홍갑표, 고층건물의 수직·수평진동 측정 및 제한기준 개발 연구보고서, 2001건설핵심기술연구개발사업 최종보고서

[15] 김두기, 구조동역학, 구미서관

[16] 교량의 건전성 평가를 위한 IT기반 스마트 계측 및 모니터링 시스템의 개발,2006, 건설교통부 한국건설교통기술평가원, 산학연 공동연구개발사업 최종보고서

[17] H Adeli, H Seon Park, Counterpropagation neural networks in structural engineering
Journal of Structural Engineering 121 (8), 1205-1212

[18] SW Choi, EM Kwon, Y Kim, K Hong, HS Park , A practical data recovery technique for long-term strain monitoring of mega columns during constructio n,Sensors13(8),10931-10943

[19] 김승남, 전역적 응답을 이용한 건축 구조물의 진동기반 손상탐지기법, 2014, 한양대학교 대학원 박사학위 논문

[20] 국립재난안전연구원, 진동자료기반 시설물 재난대비 기반기술 개발

[21] 유은종, 장기 모니터링을 통한 대공간 구조물의 동특성 분석, 한국공간구조학회지 학술기사

[22] 건축구조물의 상시모니터링 기술과 재해, 재난피해 예측기술 동향에 관한 연구, 2006, 연구보고서, 국토교통부

[23] Daniel Balageas, Calus-Peter Fritzen, and Alfredo Guemes, Edit, (2005), Structural Health monitoring, 4thEdition,Wiley-Interscience

[24] Structural Health Monitoring Workshop, Sponsored by Army, Navy, and Air Force, Administered by the Advanced Materials, Manufacturing & Testing Information Analysis Center(AMMTIAC), November18-20, 2008, Austin, TX.

[25] Hall,S.R.,“The Effective Management and Use ofStructural Health Data,” Proceedings of the 2nd International Workshop on Structural Health Monitoring,1999, pp. 265-275.