

# 구조물 건전성 모니터링 시스템을 이용한 초고층 구조물의 재난관리

## Disaster Management of High-rise Building using Structural Health Monitoring Systems



문 기 훈\*  
Moon, Ki-Hoon



김 지 영\*\*  
Kim, Ji-Young



박 재 근\*\*\*  
Park, Jae-Keun



김 주 연\*\*\*\*  
Kim, Ju-Yeon

### 1. SHM 시스템의 개요

구조물 건전성 모니터링(Structural Health Monitoring, SHM)시스템은 초기에 기계 및 항공우주 분야에서 시작되었다. 1988년 Aloha 항공 243편이 운항 중 동체의 뒷게 일부분이 탈락된 사고가 발생하였는데(〈Fig. 1 (a)〉) 이 사고 이후 기체의 미세결함에 대한 탐지를 위해 SHM 시스템의 개념이 도입되어 많은 연구가 진행되었다. 토목분야에서는 1998년 남아공화국에서 Injaka Bridge를 시공하던 중 교량의 붕괴사고가 발생하였고(〈Fig. 1 (b)〉) 그 후 장경간 교량의 모니터링에 대한 중요성이 인식되었다.

이로부터 미국, 일본, 유럽 등 전세계적으로 장경

간 교량에 대한 SHM 시스템이 활발히 연구되었고 다수의 교량에 실제 적용되어 운영되고 있다. 우리나라의 경우에도 서해대교, 진도대교, 돌산대교, 영흥대교, 삼천포 대교, 올림픽 대교와 같은 사장교에 SHM 시스템이 적용되었으며, 남해대교, 영종대교, 광안대교와 같은 현수교에도 SHM 시스템이 운영되고 있다.

건축분야에서도 건물의 초고층화, 대형화에 따라 사용성 및 안전성에 대한 문제가 대두되면서 계층 유지관리에 대한 적용이 늘어나고 있다. 미국, 일본, 유럽 등에서는 이미 대형 재난에 대한 대비가 필요한 초고층 및 대공간 건축물에 대해 SHM 시스템의 적용이 확산되고 있다. 특히, 일본의 경우에는 대형 지진에 대한 피해가 많이 발생하기 때문에 초고층 건물 뿐만 아니라 공장 및 중/저층 건물에도 SHM 시스템이 적용되고 있다. 우리나라에서는 타워펠리스 등 초고층 건물에 거동 데이터 확보 및 유

\* 정회원·(주)대우건설 기술연구원 전임연구원

\*\* 정회원·(주)대우건설 기술연구원 수석연구원

\*\*\* 정회원·(주)대우건설 기술연구원 과장

\*\*\*\* 정회원·(주)대우건설 기술연구원 선임연구원

지관리의 목적으로 계측기가 설치되었다.

이처럼 SHM 시스템의 주요기능은 구조물의 건전성을 실시간 모니터링하여 재난으로부터 위험요소를 관리하게 된다. 기존 손상 탐지 기법은 이미 구조물에 손상이 발생한 뒤에 계측장비를 설치하고 데이터를 계측하기 때문에 손상원인에 대한 정확한 평가와 신속한 대처가 어렵다. 또한 장비를 설치하고 계측하는데 시간이 소요되므로 추가적인 경제적 손실이 발생할 수 있으며, 이 시간 내에 추가적인 붕괴로 인해 인명피해가 발생할 수 있다. 반면 SHM 시스템은 실시간으로 구조물의 상태를 평가하기 때문에 실제 발생한 외부하중 데이터와 구조물의 응답 데이터를 바탕으로 운영자에게는 신속한 상황판단 및 대처가 가능하게하고 거주자에게는 위험상황에서 대피하며 불필요한 불안감을 해소시킬 수 있다.



(a) Aloha Airlines Flight 243



(b) Injaka Bridge

〈Fig. 1〉 Collapse Examples of Aircraft and Bridge

또한 SHM 시스템 같은 재난에 대해 피해예측 및 피해확산 제어가 필요한 이유는 재난으로 인한 인적, 물적 피해는 대부분 대규모 단위로 발생하기 때

문에 국가적 차원의 손실이 발생한다. 국내에서도 최근 작은 규모의 지진들이 빈번하게 발생하고 있어 지진에 대한 불안감이 높아지고 있다. 또한 태풍 역시 발생 빈도가 많아지고 그 크기 면에서 증가하고 있어 초고층 구조물들인 경우 심각한 피해가 발생할 수 있다. 그리고 이상 진동 발생으로 사용자 및 거주자가 불안감을 느끼고 대피하는 등의 안전에 대한 문제가 최근 자주 대두되고 있다.

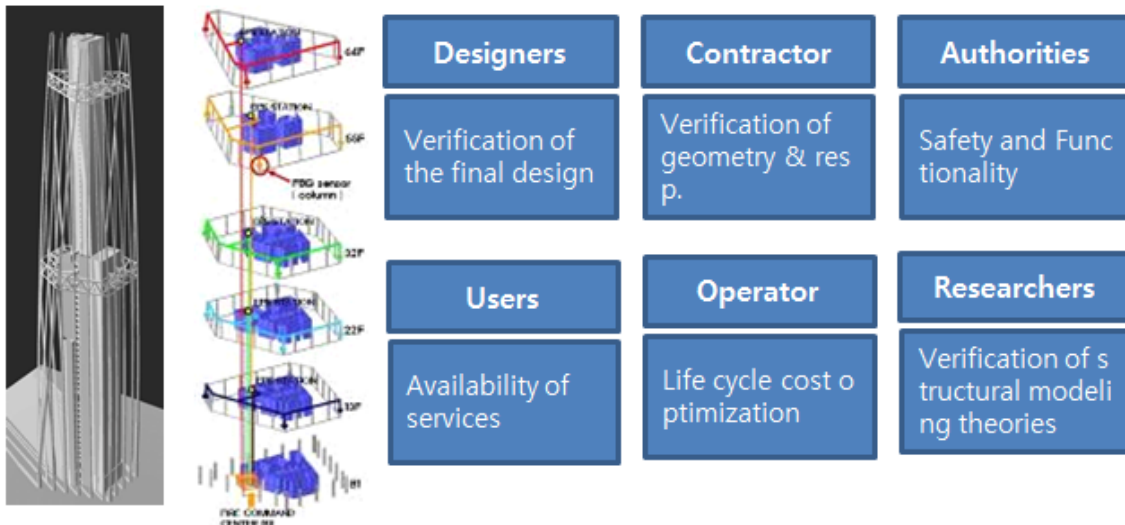
따라서 구조물 건전성 모니터링시스템을 구축함으로써 지진이나 태풍 등과 같은 자연재해 뿐만 아니라 이상 진동으로부터 건축물의 구조안전성 평가와 피난 및 대피 등의 후속 대책을 수립하여 건물을 이용하는 사람들에게 사용성 및 안정성을 확보할 수 있다.

그리고 구조물은 사람과 마찬가지로 사용연한이 증대됨에 따라 노후화가 발생한다. 사람도 나이를 먹으면서 각종 기관에 이상이 발생하기 시작하는데 별 특별한 증상이 없이 지내다가 어느 순간 큰 문제로 발전되어 회복 불능의 상황이 되기도 한다. 구조물도 노후화에 따른 구조물의 손상이 눈에 띄게 나타나지 않으므로, 평상시에는 감지하지 못하다가 심각한 상황을 초래할 수 있다. 그러므로 계측 유지관리를 통해 격년 변화에 따른 데이터를 확보하고 정기적으로 분석함으로써 구조물의 건전도를 평가하는 것이 요구되며, 필요 시 적절한 보수보강을 실시함으로써 사용연한 동안 최상의 구조안전성을 확보할 수 있다. 또한 적절한 보수보강을 통해 구조물의 사용연한을 증대시킴으로써 자원절약 및 건설폐기물의 발생을 줄이는데 기여할 수 있다.

## 2. SHM 시스템의 활용

구조물의 SHM 시스템은 〈Fig. 2〉와 같이 구조물의 설계, 시공 및 운영과정에서 다양하게 활용될 수 있다.

설계자는 구조물의 계획 단계에서 현재까지의 보유 기술과 경험 및 노하우를 바탕으로 발주기관의



〈Fig. 2〉 Application areas of SHM systems

요구를 만족시킬 수 있도록 구조물을 설계하게 된다. 그리고 완성된 설계도서에 따라 시공과정을 통해 실제 구조물이 구현되며, 특히 초대형 구조물의 경우 설계 당시 최첨단 공법이 적용되기도 한다. 설계자는 각종 첨단 기술과 경험으로 시공된 구조물이 실제 설계된 성능을 만족하는지 확인하기 위하여 SHM 시스템으로 측정된 데이터를 바탕으로 성능검증을 수행할 수 있다.

시공자도 설계도서 및 시방서와 같이 건물이 시공되고 있는지 확인하기 위하여 SHM 시스템을 활용할 수 있다. 시공 중 임시로 설치된 계측센서를 이용하여 구조물의 형상을 단계별로 확인하여 시공 정밀도를 관리할 수 있으며, 특수공법의 적용 시 구조 모니터링을 통해 시공 중 구조안전성을 체크하면서 안전한 시공을 수행할 수 있다.

특히, 발주처 또는 현장감독자의 경우 실제 시공 시 구조물이 겪는 구조거동의 이력을 직접 파악함으로써 시공 후 구조물의 성능을 정량적으로 확인하고 필요할 경우 보완을 지시할 수 있게 된다.

시공이 완료된 이후에는 거주자를 위해 사용 중 구조물의 안전성이 최상으로 유지되도록 SHM 시스템을 통해 구조물이 관리될 수 있다. 건물의 노후화를 측정된 자료를 통해 정량적으로 평가하고, 객관적인 평가자료를 토대로 합리적인 보수보강 방안을

수행할 수 있다.

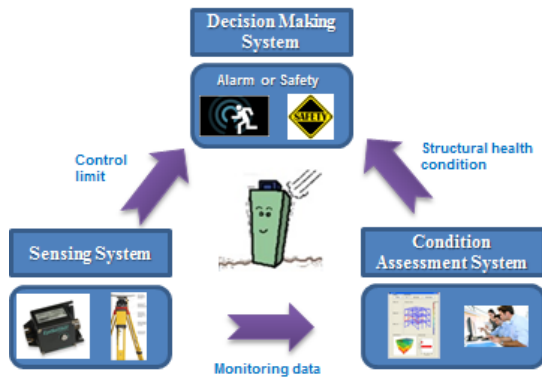
구조물에 점진적인 노후화 또는 예기치 못한 급격한 손상이 발생하면 제일 먼저 운영자가 그 정도를 파악하고 대응조치를 취할 수 있어야 한다. 그러나 대부분의 운영자는 구조 전문가가 아니므로 피해 정도를 직접 판단하여 적절한 조치를 취하는 것이 쉽지 않다. 또한 대규모 재난(지진 등)이 발생하여 구조물의 손상이 발생하였을 때 즉각적인 구조 전문가의 도움을 받는 것은 거의 불가능하다. 그러나 SHM 시스템을 사용하게 되면 구조물의 손상평가와 단계별 대응방안이 시스템을 통해 제시될 수 있으므로 운영자 측면에서도 즉각적으로 효과적인 조치를 취할 수 있다.

그리고 구조물의 시공과 운영 또는 위기 상황 중 측정된 데이터는 향후 구조물의 성능향상을 위해 연구자에게 귀중한 자료로 제공될 수 있다.

### 3. SHM 시스템 구성

SHM 시스템의 구성요소는 〈Fig. 3〉과 같이 (1) 센서/계측 시스템과 (2) 계측데이터에 기반한 구조물 상태평가 시스템 그리고 (3) 대응시나리오를 포함한 의사결정 시스템으로 구분된다.

먼저, 센서 및 계측시스템은 구조물의 응답을 직



<Fig. 3> SHM components

접 계측하여 기록하는 시스템으로서 국부적 거동 (Local Behavior) 계측과 전역적 거동(Global Behavior) 계측으로 구분될 수 있다.

국부적 거동을 측정하는 대표적인 센서로는 변형률계(Strain Gauge)를 들 수 있으며, 주로 전기저항식 변형률계, 진동현식 센서, 광섬유 센서가 사용된다. 국부적 거동측정 계측기를 이용하여 주로 주요부재의 변형률, 변위, 부재력, 반력 등을 측정함으로써 전체 구조물의 성능을 크게 좌우하는 붕괴 유발부재(아웃리거, 메가기둥 등)의 거동을 직접 모니터링할 수 있다.

구조물의 전역적 거동을 계측하게 되면 전체 구조물의 손상정도 및 손상위치를 해석적 기법을 통해 추정할 수 있다. 구조물의 전역적 거동을 계측하는 센서로 대표적인 것이 가속도계(Accelerometer)이다. 최근 가속도계와 더불어 GPS(Global Positioning System)를 이용하여 건물의 전역적 거동을 측정하려는 시도가 많이 이루어지고 있으며, 토목 및 건축구조물 시공 시 좌표관리 및 초고층 건축물의 풍응답 계측 등에도 GPS가 이용되고 있다.

그리고 외력으로 작용하는 하중의 규모를 직접적으로 파악하기 위하여 지진계 및 풍향풍속계가 이용된다.

구조물의 상태평가 시스템은 주로 구조물에서 계측된 데이터를 분석하여 시공 초기 구조물의 상태와 현재 상태를 비교함으로써 구조물의 구조적 안전성을 평가하는 시스템이다. 구조물이 완성되고

나면 개별 구조물은 고유한 진동특성을 나타내게 된다. 구조물의 고유진동특성은 구조물의 질량 및 강성에 의해 결정되는데 손상에 의해 구조물의 강성이 변화하게 되면 구조물의 고유진동특성도 변화하게 되므로, 이를 분석하여 구조물의 손상도 추정할 수 있다.

구조물의 상태평가 알고리즘으로는 구조특성의 변화를 바탕으로 구조 부재의 손상도를 분석하는 수치해석기법이 주를 이루고 있다.

(주)대우건설에서는 인공지능에 기반한 구조물상태평가 기술을 개발하고 구조건전도 자율진단 시스템을 구축하였다. 인공지능을 이용한 구조건전도 평가 시스템은 임의의 구조물에 대하여 국부적 손상에 따른 구조물의 거동특성을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 데이터베이스화하고 이를 인공지능에 선행 학습시켜 구축된다. 간단히 말해 임의의 구조물의 특정한 거동에 대한 구조물의 건전도가 입력된 인공지능이다. 그리고 실제로 SHM을 통해 계측된 구조물의 거동특성을 인공지능에 입력하게 되면 대상 구조물의 손상 정도와 위치를 추정할 수 있다.

개발된 인공지능 구조건전도 평가 시스템의 장점은 인공지능의 선행학습에 소요되는 시간이 필요하지만 학습 후에는 다른 해석적 기반 손상평가 기법에 비해 계측데이터로부터 즉각적인 결과를 얻을 수 있으므로 위기 상황 시 이에 대한 대응을 보다 신속하게 할 수 있다는 것이다.

SHM 시스템의 최종 목적은 구조물에 대한 손상평가가 아니라 손상평가 이후 사용자가 대처할 수 있는 방안을 제시하는 것이다. 즉, 임의의 손상이 감지되었을 때 이 손상이 구조물에 미치는 영향을 파악하고 위험여부를 판단하여 거주자가 특정 상황 발생 시 즉각적인 조치를 취할 수 있도록 개발되어야 한다. 따라서 국부적 및 전역적 손상탐지의 결과와 측정된 데이터의 관리한계를 기준으로 대응 시나리오를 작성하여 SHM 시스템을 구축하여야 한다. 이러한 대응 시나리오를 작성하기 위해서는 구조물에 대한 붕괴해석을 통해 구조물의 보유내력을

평가하는 것이 필요하다. 또한 입력된 하중(지진 및 풍하중)의 크기에 따른 구조물의 손상정도를 해석을 통해 파악하고 계측된 지진 및 풍하중에 따른 대응방안을 제시하는 것도 요구된다.

#### 4. 초고층 구조물 적용사례

앞서 언급한 바와 같이 SHM 시스템은 구조물의 시공 중 설계검증, 완공 후 성능평가, 그리고 사용 중 구조안전유지관리 등에 다양하게 적용될 수 있다. (주)대우건설에서는 독자적인 SHM 시스템을 개발하고 이를 실제 초고층 구조물에 적용하고 있다. 이러한 SHM 시스템 적용의 대표적인 사례로 한전 신사옥 구조물(〈Fig. 4〉)에 SHM 시스템을 구축하였다.

한전 신사옥 구조물은 본관동(타워동)과 부속동으로 구분되어 있으며, 본관동(타워동)은 지하 2층 지상 31층 구조물로 철근콘크리트 특수전단벽으로 설계되었으며 부속동은 지하 2층 지상 2층 구조물로 철근콘크리트 중간모멘트 골조로 설계되었다.

그리고 한전 신사옥 구조물은 지진 및 풍하중에도 거주자의 안전성과 쾌적성이 항상 확보될 수 있도록 SHM 시스템을 계획하였다. 건물의 거동을 계측장비를 통해 상시 모니터링 함으로써 지진 및 풍하중에 대하여 구조물의 지속적인 안전성을 확보하였다.

대상건물에 구축된 SHM 시스템은 구조물의 동적 특성 및 응답가속도 등을 주기적으로 계측함으로써 대상건물의 구조적 특성 이력을 관리하게 된다. 따라서 예상치 못한 하중으로 인해 건물에 손상이 발생 시 확보된 정량적 데이터를 바탕으로 정확한 원인분석과 함께 경제적이고 합리적인 보수·보강 방안을 수립하게 된다.

또한 FE해석을 통하여 손상패턴에 따른 구조물의 거동 및 동적특성을 미리 예측함으로써 구조물의 손상단계를 정의하여 단계별 SHM 시스템의 설계에 적용하였다



〈Fig. 4〉 New KEPCO building

한전 신사옥의 SHM 시스템은 다음과 같은 진행 절차에 의해 설계되었다(〈Fig. 5〉).

##### a. 초기 FE 해석 모델의 작성

실제 시공 도면을 바탕으로 최대한 실제 구조물의 상태를 반영할 수 있도록 구조 해석 모델을 구현한다.

##### b. 건물 초기 동적특성의 분석

FE해석 모델의 검증과 건물의 상태를 분석하기 위하여 구조물의 초기 동적특성을 분석하게 된다. 이는 구조물의 손상이 발생하였을 때 비교가 되는 척도로도 사용되게 된다.

##### c. 구조물 붕괴거동 해석

지진 및 태풍에 의해 구조물의 손상 발생여부를 평가하기 위해서는 미리 해석을 통해 구조물이 피해 발생에 따른 변화를 예측하여야 한다. 이를 위해서는 비선형 해석을 수행하여야 하며, 가장 널리 사용되는 방법 중에 하나는 PUSHOVER 해석을 통해 소성 힌지의 발생과정을 추적하게 된다. PUSHOVER 해석으로부터 구조물의 밀면전단력-변위의 그래프를 통해 손상단계를 구분할 수 있다. 그리고 구조물의 손상정도에 따라 대응 시나리오를 수립하게 된다.



〈Fig. 5〉 Procedures of SHM systems

#### d. 계측 시스템 구축

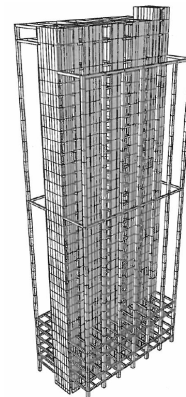
해석 결과를 바탕으로 구조물의 손상 정도를 파악할 수 있는 최적의 위치에 필요로 하는 계측 장비를 계획하고 이를 연계할 수 통신라인을 구축하게 된다. 그리고 계측 데이터를 분석하여 운영자 및 사용자에게 건물의 건전성 상태를 제공할 수 있는 운영 프로그램을 구축하게 된다.

#### e. 완공 후 시험운전

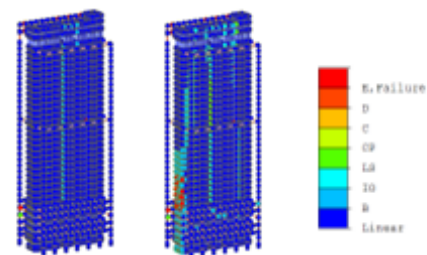
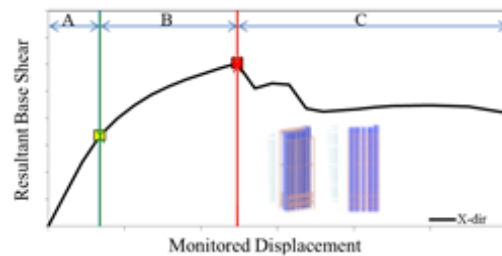
FE 해석 모델에서 예측한 응답값과 실제 건물에서 계측한 데이터 값과 비교 검토가 필요하다. 해석 결과와 실제 응답값과의 차이가 크지 않아야겠지만 FE해석 모델이 실제 건물이 지니고 있는 수많은 불확실성을 모두 반영할 수 없기 때문에 계측한 데이터와 일정한 오차가 발생할 수 밖에 없다. 따라서 허용 한계내의 오차들을 실제 건물 데이터에 맞게 재보정함으로써 좀 더 실제 구조물의 손상위험 평가의 정밀도를 높이게 된다.

대상건물인 한전 신사옥 구조물인 경우 주요구조물인 본관동이 지진 및 태풍에 가장 큰 영향을 받기 때문에 본관동을 대상으로 해석을 수행하였다. 본관동의 주요 구조 시스템은 코어벽체의 특수전단벽

구조시스템과 플랫 슬래브 구조로 되어 있다. 이에 따라 해석에 사용한 초기 FE해석 모델은 〈Fig. 6 (a)〉와 같이 주요 횡력저항구조 시스템으로 특수전단벽 시스템과 플랫 슬래브를 등가의 모멘트 골조로 치환하여 구조 해석을 수행하였다.



(a) primary lateral resisting system



(b) nonlinear analysis

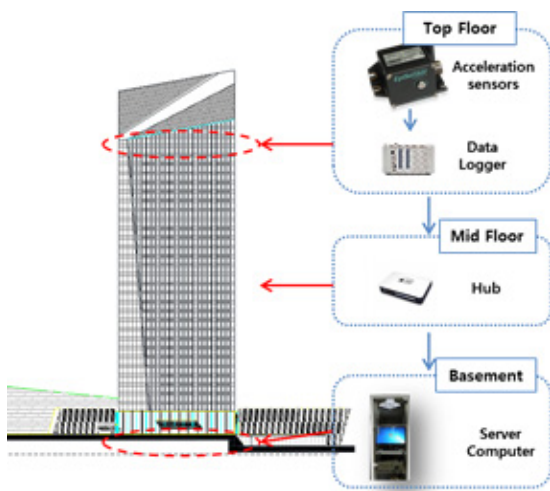
〈Fig. 6〉 Structure analysis and performance evaluation

지진 및 태풍이 발생할 경우 구조물의 비선형 거동과 부재의 손상을 예측하기 위하여 해석모델의 주요 구조 부재들을 FEMA 356(2000)에 따라 비선형 힌지 모델로 모델링 되었다. 비선형 힌지 모델로 모델링된 구조 해석 모델은 〈Fig. 6 (b)〉와 같이 PUSHOVER 해석을 수행하여 외부하중에 의한 구조물의 비선형 거동과 손상 정도를 평가하게 된다.

PUSHOVER 해석 결과로부터 구조물의 손상정도를 예측하고, 손상정도에 따라 운영자 및 거주자가 수행해야 대응방안에 대한 시나리오를 계획하게 된다. 이러한 대응 시나리오는 외부하중의 작용하는 크기와 구조물의 건전성 상태에 따라 달라 질 수 있다. 따라서 각각 위험정도에 따라 대피 및 대처 방안 에 대한 시나리오를 각 상황에 맞게 계획하게 된다.

그리고 해석 결과로부터 구조물의 이력거동과 위험정도를 평가한 후 이를 가장 잘 평가할 수 있는 위치에 계측 장비를 계획하게 된다. 한전 신사옥 구조물인 경우 <Fig. 7>과 같이 계측장비, 통신라인, 서버컴퓨터를 구축하여 구조물의 건전성 상태와 외부하중의 크기를 측정하게 된다.

계측 장비 설치 후에 실제 구조물에서 계측된 데이터들은 후속 연산작업을 통해 외부하중의 크기를 평가하고 구조물의 상태평가 알고리즘을 거쳐 구조물의 건전성 상태를 점검하게 된다.



<Fig. 7> Measurement systems

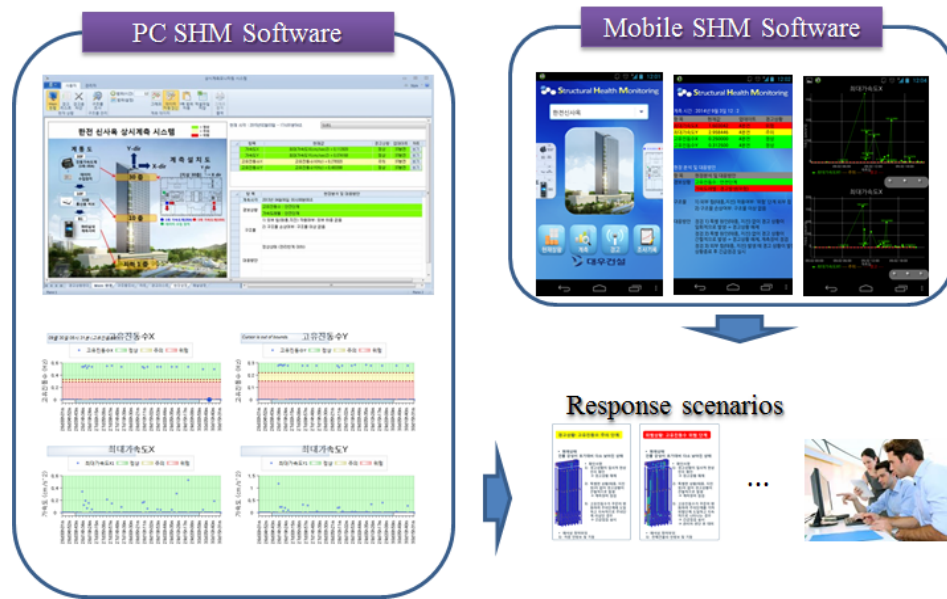
이러한 평가 결과들은 <Fig. 8>과 같이 PC용 SHM 통합프로그램과 Mobile용 SHM 통합프로그램을 통해 운영자가 관리하게 된다. PC용 SHM 통합 프로그램은 실시간으로 구조물에 작용하는 하중의 크기와 구조물의 건전성 상태를 모니터링하게 되며, 구조물에 위험 징후가 발생할 경우 운영자에게 위

험 경보와 대응 시나리오를 제공하게 된다. 또한 지속적으로 축적한 데이터를 바탕으로 구조물 상태의 변동상황을 파악하게 된다. Mobile용 SHM 통합 프로그램은 PC용 SHM 통합프로그램에서 제공하는 정보와 동일하게 현재 구조물에 작용하는 외부하중의 크기와 구조물의 건전성 상태에 대한 모니터링 결과를 제공할 뿐 만 아니라 구조물의 상태 변동상황에 대한 그래프도 제공되게 된다. 특히 구조물에 위험 징후가 발생하였을 때 즉각 위험 경보가 전달 되기 때문에 신속하게 운영자에게 정보 전달이 가능하게 된다.

이와 같이 한전 신사옥에 설치된 SHM 시스템으로부터 태풍, 지진, 이상 진동 등에 의한 구조물에 발생할 수 있는 재난 위험을 지속적으로 모니터링 하면서 건전성 상태가 관리 가능하도록 구축되어 있다.

## 5. 결 언

건축 및 토목분야에서 구조물의 초고층화 및 대형화에 따라 구조물의 사용성과 안전성에 대한 문제가 대두되면서 계측유지관리에 대한 필요성이 증대되고 있다. 이러한 초대형 구조물의 경우에는 상시 거주 및 유동 인구가 수만명이 될 수 있기 때문에 구조결함에 의한 갑작스런 구조물의 붕괴가 발생할 경우 막대한 인명 및 재산 피해가 발생할 수 있다. 따라서 지속적인 유지관리를 통해 지진 및 태풍에 저항하는 구조체의 건전성을 유지하는 것이 필요하며, 손상 후에도 즉각적인 대응방안이 거주자 또는 사용자에게 전달되어 혼란에 의해 발생할 수 있는 불필요한 과잉대응을 막고 인명 및 재산 피해를 최소화하는 것이 요구된다. 초고층 건물은 주로 풍하중과 지진하중에 의해 구조시스템이 결정되며, 동하중에 의한 거주자의 사용성이 중요한 설계 요소가 된다. 이러한 목적으로 (주)대우건설에서는 SHM 시스템을 지속적으로 개발하여 왔으며, 앞에서 언급한 바와 같이 초고층 구조물에 적용되어 보



<Fig. 8> SHM software

급되고 있다. 앞으로 닥칠지 모르는 대형 재난에 대해 적극적으로 대처하기 위해서는 건축 및 토목 구조물에 대한 SHM 시스템이 지속적으로 개발되어 실무에 적용되어야 하며, 궁극적으로는 국가적인 방재 및 조기 경보시스템에 통합되어 체계화되는 것이 필요하다고 본다.

4. J. Y. Kim, et. al. (2011), "Long-term Monitoring of wind-induced responses of a large-span roof structure", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, doi: 10.1016 / j.jweia. 2011.06.008

## References

1. FEMA 356 (2010). "Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings", Prepared by the American Society of Civil Engineers for the Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.
2. Ji Young Kim, et. al. (2010), "Damage Evaluations for a 3-story RC Structure Using Trained Perception", *Proceedings of 5th World Conference on Structural Control and Monitoring*, Tokyo
3. Ji Young Kim, et. al (2009), "Calibration of analytical models to assess wind-induced acceleration responses of tall buildings in serviceability level", *Engineering Structures*, 31(9), pp.2086-2096