

# 건축구조물에 대한 구조건전성 모니터링의 적용

## Applications of Structural Health Monitoring to Architectural Structures



김지영\*

\* (주)대우건설 기술연구원 방재연구팀 책임연구원

### 1. 서론

건축/토목구조물은 시공 초기의 상태에서 시간이 경과함에 따라 점진적인 노후화에 의해 구조적인 결함이 발생하게 되며, 때때로 태풍 지진 등과 같은 급격한 외적환경의 변화에 의해 구조적인 손상이 발생할 수 있다. 따라서 대형 건축물 및 중요도가 높은 토목구조물의 경우 정기적으로 안전진단을 실시하여 구조물의 손상유무를 점검하고 필요시 보수보강을 실시하도록 법으로 규정하고 있다. 그러나 규모가 큰 구조물일수록 이상징후 발생시 육안조사 및 비파괴 조사에 의존하는 기존의 안전진단방법으로는 원인규명에 많은 시간이 소요되며, 건전한 상태인 구조물의 거동에 대한 이력데이터가 없을 경우에는 정확한 원인규명이 이루어지기 어려운 경우가 많다. 따라서 구조물의 안전성을 유지하고 이상상황 발생시 효과적인 대처를 위해 구조건전성 모니터링(Structural Health Monitoring) 시스템의 적용이 대형 건설구조물을 중심으로 증가되고 있는 추세이다.

구조물의 설계, 시공, 및 운영의 각 단계에 관여하는 기술자와 소유자, 사용자의 입장에서 볼 때 SHM의 효용가치를 나타내면 그림 1과 같다. 즉, 설계자의 경우 실제 구조물이 설계기준에서 요구하는 성능을 나타내는지, 특히 그 동안의 경험이나 연구를 통해 개발된 기술이 적용되었을

경우 적용된 기술이 의도한 성능을 발휘하는지를 계측데이터를 통해 검증할 수 있다. 시공자와 발주처, 현장감독자의 입장에서 시공도중 혹은 완공후 구조물이 겪는 구조거동의 이력을 직접 파악함으로써 구조물의 성능을 정량적으로 확인하고 필요할 경우 보안을 지시할 수 있게 된다. 시공중일 경우도 임시계측시스템에 의한 데이터를 활용하여 시공정밀도관리나 특수공법 적용시 시공중의 구조안전성을 확인할 수 있으며, 이들 임시계측시스템도 구조물의 안전성 및 사용성의 감시라는 측면에서 볼 때 넓은 의미의 SHM 시스템으로 볼 수 있다.

시공이 완료된 이후에는 주로 거주자와 소유자를 위해 구조물의 안전성 및 사용성이 유지되도록 SHM 시스템이 활용된다. 즉 상시계측시스템을 사용하여 구조물의 거동에 대한 데이터를 지속적으로 얻을 수 있으므로 이상상황의 발생을 즉시 탐지할 수 있으며 문제발생시 신속한 현상파악 및 유지보수상의 의사결정이 가능해진다. 따라서, 문제의 파악 및 해결을 위해 소요되는 기간을 단축시킬 수 있으며 이를 통해 경제적인 손실(예를 들어 임대료의 손실)을 줄일 수 있다. 대부분의 경우 완공 후 건물 또는 시설물의 운영자는 구조 전문가가 아니므로 계측데이터를 보고 구조물의 손상을 판단하여 적절한 조치를 취하는 것은 거의 불가능하며 또한 구조에 관련된 문제가 발생하였을 경우 즉

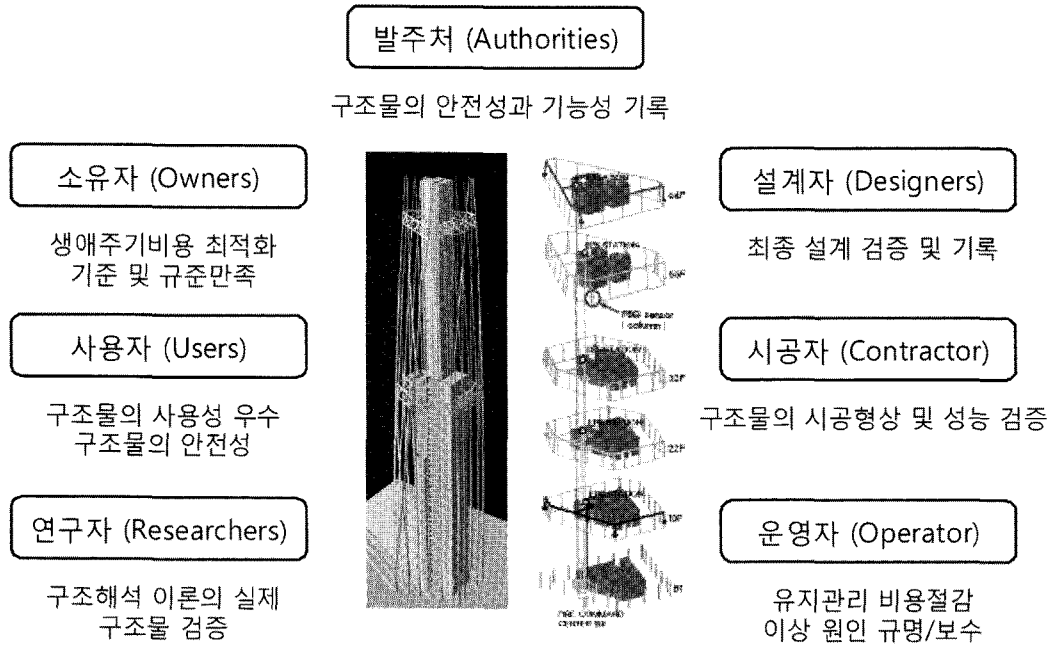


그림 1 SHM의 활용분야 및 목적

각적인 구조전문가의 도움을 받는 것도 쉽지않다. 따라서 진정한 의미의 SHM 시스템에는 상시계측시스템과 함께 이들 데이터로부터 구조물의 손상을 판단하는 손상탐지시스템 및 손상탐지결과에 따른 단계별 대응방안이 마련되어야 한다. 현재로서 이러한 완벽한 SHM 시스템이 구축된 사례는 아직 찾아볼 수는 없지만 관련된 센서기술 및 손상탐지기술의 발전에 따라 가까운 장래에는 가능할 것으로 생각된다. 다음은 (주)대우건설에서 시공중 혹은 완공후 구조물의 구조모니터링 및 이를 활용한 건전성감시에 대한 최근 사례로서 이를 통해 SHM의 활용분야와 효과에 대해 살펴보고자 한다.

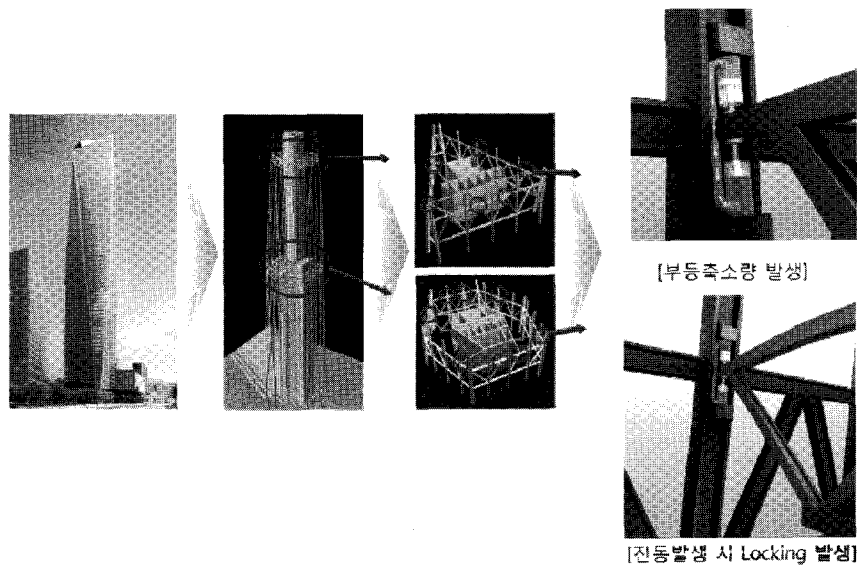
## 2. 적용사례

### 2.1 초고층 아웃리거 댐퍼의 성능모니터링

아웃리거가 있는 초고층건물의 경우수직부재의 부등축소현상 때문에 시공중에는 아웃리거를 외고각기둥과 임시로 접합한 후 주기적으로 접합부에 사용되는 보정철판(sim plate)의 높이를 조정하고 완벽한 접합은 최대한 뒤로 늦춰지게 된다. 따라서 시공중에 작용하는 횡하중은 아웃리거를 제외한 수직부재가 저항하도록 해야 하므로 구조물량이 증가하게 되며 기둥축소에 대한 보정에 상당한 노력 및 비용이 요구된다. 대우건설에서는 이를 해결하기 위해 초고층 건물의 시공 중 부등축소량 자동 보정 및 풍진동 제어

를 위해 아웃리거 댐퍼 시스템을 개발하고 이를 송도 NEATT 현장에 적용한 바 있다. 아웃리거 댐퍼시스템은 그림 2(a)와 같이 초고층 건물의 아웃리거 보와 기둥사이에 설치되는 유압잭과 유사한 장치로 시공 중에는 수직부재의 부등축소량을 자동으로 보정하기 위한 장치로 또한 시공 후에는 지진 및 풍하중에 대한 진동을 제어하는 댐퍼로 작용한다. 즉, 아웃리거와 연결된 기둥과 코어사이에 점진적인 부등축소가 발생할 경우 유압실린더 내부의 오리피스에 의해 상하 유압잭 사이에 유압이동이 서서히 발생해 부가하중의 발생없이 부등축소가 자동보정되며, 지진 및 풍하중과 같은 충격하중이 발생할 경우에는 오리피스에 의해 오일의 Locking 현상이 발생하여 진동을 제어할 수 있다.

아웃리거 댐퍼시스템의 성능검증을 위해 구조모니터링 시스템이 활용되었다. 즉, 그림 2(b)와 같이 아웃리거 댐퍼의 거동을 제측할 수 있는 변위계와 압력계를 설치하여 상시로 계측하였으며, 풍하중에 대한 진동제어효과를 검증하기 위해 건물의 여러부분에서 가속도데이터를 측정하였다. 송도 NEATT의 경우 횡력 저항시스템으로 아웃리거 시스템을 적용하고 있으므로 풍하중 및 지진하중이 아웃리거에 집중되어 지지된다. 따라서 횡력저항시스템의 주요 구조부재인 아웃리거 트러스에 광섬유 센서를 설치하여 국부적인 변형을 감시함으로써 전체적인 구조안정성에 대한 모니터링이 이루어지도록 하였다. 계측된 데이터는 현장 내 설치된 임시 서버에 저장되도록 하였으며, 계측결과는 아웃리거 댐퍼가 포함된 구조해석모델의 해석결과와 비교하여 시



(a) 아웃리저댐퍼 시스템 개요



(b) 아웃리저 댐퍼 시스템 계측 및 성능평가

그림 2 SHM을 이용한 아웃리저 댐퍼 시스템 성능평가

공 중 댐퍼의 성능 및 효과를 검증하였다.

## 2.2 초고층 건물 풍진동 계측

초고층 건물은 주로 풍하중에 의해 구조시스템이 결정되며, 풍진동에 의한 거주자의 사용성이 중요한 설계요소가 된다. 일반적으로 설계 당시에 예측된 풍진동은 설계 및 해석상의 가정사항에 의해 다소 보수적으로 예측되므로 실제 계측된 값보다 큰 경우가 많다. 이러한 현상의 주된 원인은 설계 당시 작성된 구조해석모델이 많은 가정에 의해 실제 구조물의 특성을 정확하게 구현할 수 없기 때문이다. 이로 인해 풍응답이 과대평가될 수 있으며, 구조물량이 증가되거나 부가적인 제진장치가 도입되는 경우가 있다. 물론 반대의 경우로 풍응답이 과소평가되어 추후에 제진장치를 설치하게 되는 경우도 발생한다. 이 때에도 계측을 통해 건물의 특성을 정확하게 파악하여 제진장치를 설계하는 것이

중요하다.

태풍 또는 강풍 시 계측된 풍진동 데이터를 이용하여 실제 초고층 건물의 고유한 동적특성을 추출하고, 이를 바탕으로 건물의 풍진동을 실제와 보다 가깝게 예측할 수 있다. 대우건설에서는 풍응답의 정확한 예측을 위해 풍응답 계측 시스템을 활용하여 다수의 초고층 건물에 대한 풍진동 계측 및 동특성 평가를 실시하였으며, 이 결과를 근거로 그림 3과 같이 실제 초고층 건물과 가장 유사하게 구조해석모델을 작성하는 절차를 수립하고, 이에 의한 풍진동 평가절차를 구축하여 실무에 적용하고 있다. 이를 통해 가장 효율적인 구조시스템을 설계할 수 있으며, 진동제어 장치의 설치 여부도 합리적으로 결정할 수 있다.

## 2.3 초대형 구조물 완공 후 계측유지관리 시스템 구축

대우건설은 제주월드컵경기장, 동북아무역센터 등 초대

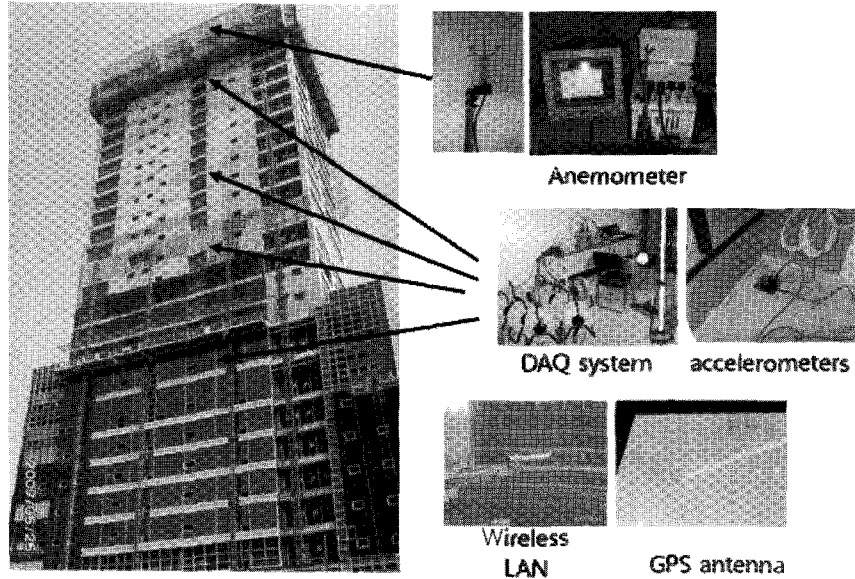


그림 3 초고층 건물 풍응답 현장 계측시스템

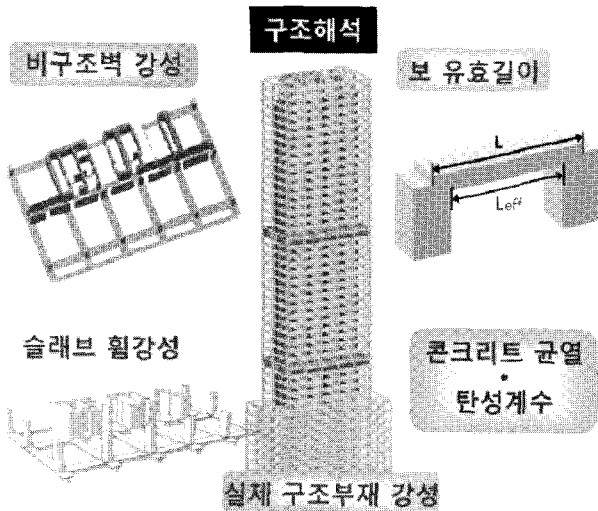


그림 4 실제 구조물 특성을 반영한 FE 구조해석

형 구조물에 SHM 시스템을 구축하여 운영하거나 현재 시스템을 구축 중에 있다. 제주월드컵경기장은 스패 200m의 장스팬 구조물로서 과거 2002년도 월드컵 이후 최악의 대형태풍으로 인해 지붕막이 손상되는 사고를 경험하였다. 손상 발생 후 지붕의 형상을 바람에 유리하도록 개선하여 재시공하였으며, 동일한 손상의 방지를 위해 SHM 시스템을 도입하여 지붕구조물에 대한 상시 모니터링을 실시하고 있다.

그림 5와 같이 제주경기장의 SHM 시스템은 주구조 시스템(철골지붕)을 감시하는 가속도 계측시스템과 2차 구조부재(지붕막)를 감시하는 막장력 계측시스템으로 구성되어 있으며, 실제 작용하는 풍하중의 규모를 계측하기 위해 풍

향풍속계를 설치하여 운영하고 있다. 가속도 계측유지관리 시스템은 철골 지붕 구조물의 진동을 측정하여 고유한 동적특성을 분석함으로써 철골지붕에 대한 전역적인 구조안전성을 감시하도록 구성되어 있다. 그리고, 막케이블 장력 계측시스템은 막구조를 지지하는 국부적인 케이블의 장력 변화를 상시 모니터링함으로써 관리한계치 이상의 장력손실 또는 증가가 발생할 경우 관리자에게 통보하여 대응이 이루어질 수 있도록 구축되어 있다.

이와 같은 서귀포경기장의 계측 시스템 및 상황별 대응 체계의 구축을 위해 풍동실험의 결과를 이용하여 풍하중에 대한 구조물의 동적해석을 실시하고 풍진동 및 풍하중 레벨에 따른 구조물의 손상도를 평가하였다. 또한 구조해석을 통해 풍진동 및 막케이블 장력을 가장 효과적으로 계측할 수 있는 위치를 선정하여 계측시스템을 설계하였다.

이와 함께 완공되면 국내에서 가장 높은 건물이 되는 350m 높이의 송도 동북아무역센터(North East Asia Trade Tower)에도 상시 구조안전성 유지관리를 위해 SHM 시스템을 도입하고 있다. 그림 6과 같이 4개층에 가속도계를 설치하여 구조물의 동적특성 및 진동응답을 측정함으로써 전체 구조물의 구조안전성을 감시하도록 하였다.

#### 2.4 수상구조물 진수를 위한 계측유지관리

대우건설에서 시공중인 한강 플로팅아일랜드의 인공섬은 지상에서 대부분의 구조체를 조립하고 진수하는 방식으로 시공되고 있다. 즉, 그림 7과 같이 지상에서 조립된 인공섬 부유체 아래에 원통형의 에어백(고무튜브)을 설치하

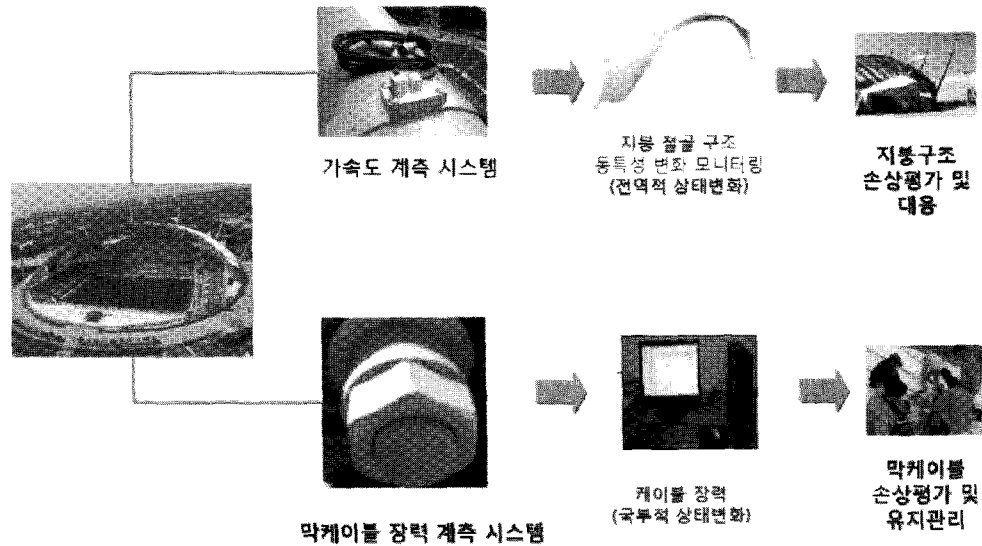


그림 5 제주월드컵경기장 SHM 시스템

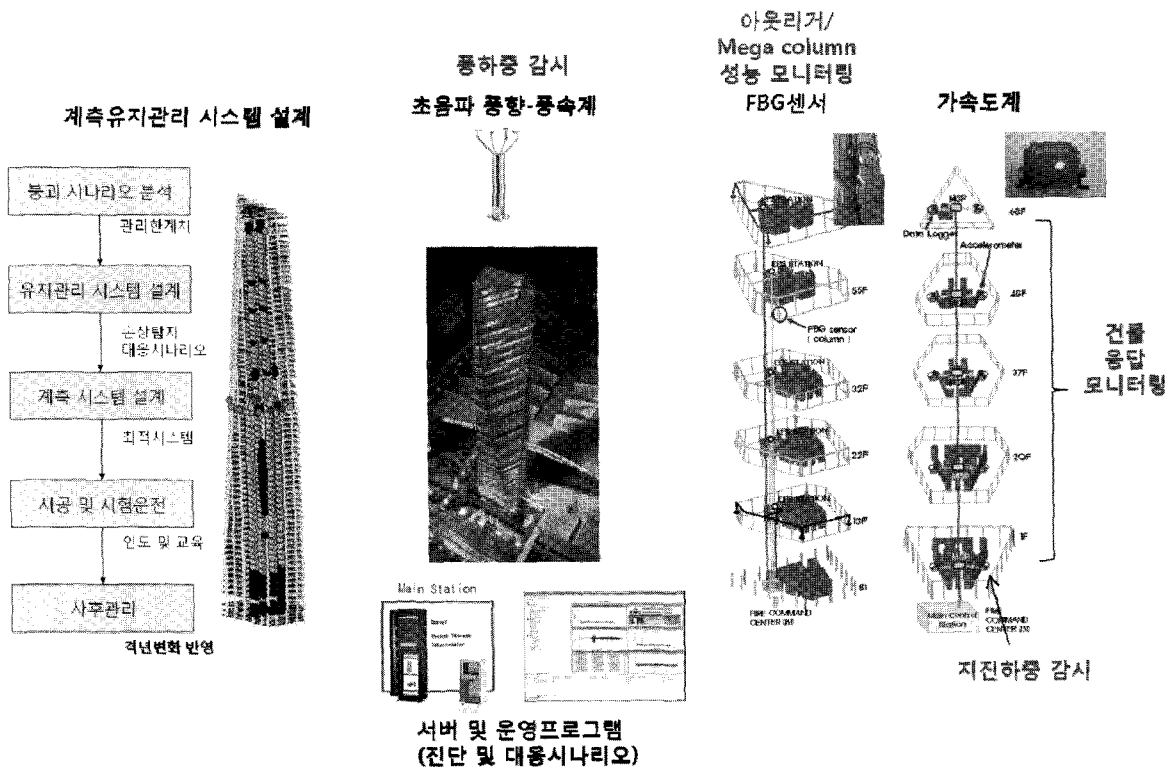


그림 6 동북아무역센터 SHM 시스템

고 윈치를 이용해 지상에서 강변까지 굴러서 이동한 뒤 강변 경사로에서 로프를 풀어 배처럼 진수하였다. 따라서 지상이동 및 진수 시 발생할 수 있는 충격하중에 대하여 상부 돔 구조물과 부유체의 구조안전성을 사전에 해석하고 검토하였으며 실제 이동 중에는 실시간 계측 및 손상평가를 통해 구조안전성을 모니터링하였다. 구조모니터링 시스템은 그림 8과 같이 변형률계를 부유체 상판과 주요 기둥

에 부착하여 이동 중 변형에 의해 부가적으로 발생하는 응력을 계측할 수 있도록 하였으며, 상부 돔 구조물 및 부유체 상판에는 가속도계를 설치하여 충격에 의해 발생하는 진동을 직접 측정할 수 있도록 하였다. 또한 부유체 상판에 경사계를 부착하여 부유체가 에어백에 의해 균등하게 지지되어 사전에 설계된 경사도로 이동 및 진수되는지 모니터링하였다. 그리고 전체 구조물의 이동경로를 추적하기 위

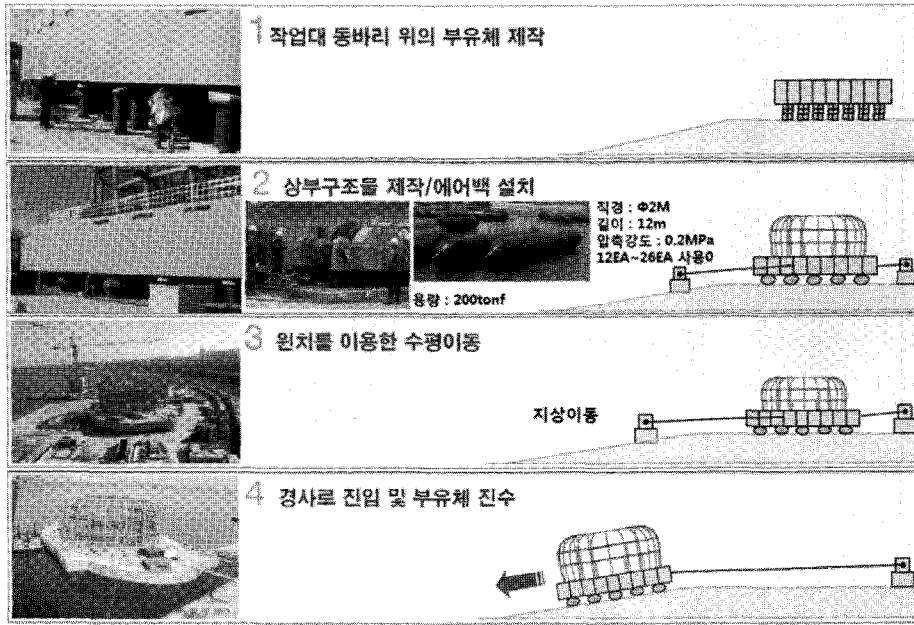


그림 7 플로팅 아일랜드 진수과정

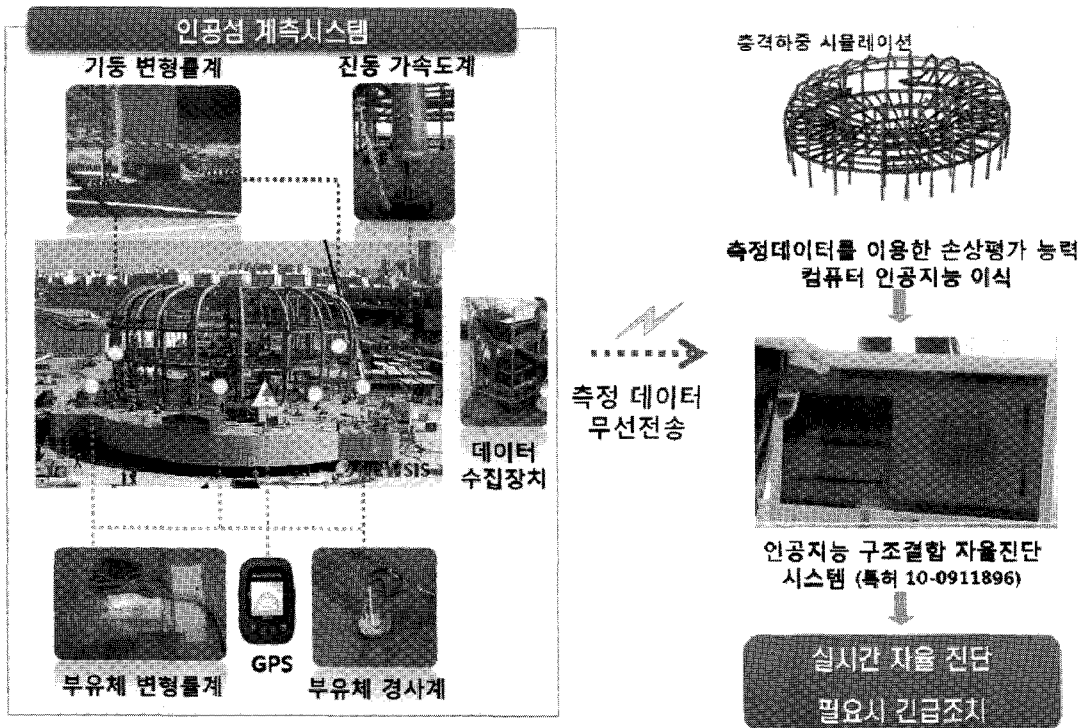


그림 8 플로팅 아일랜드 진수 시 계측유지관리시스템

하여 GPS를 설치하였다.


인공섬은 지상에서 수상으로 이동하기 때문에 계측기로부터 측정된 데이터를 유선으로 직접 전송할 수 없으므로 무선계측시스템을 적용하여 실시간으로 데이터가 전송될 수 있도록 하였다. 무선으로 계측된 데이터는 계측 데이터 수집용 컴퓨터에 저장되고 사전에 구축된 구조물 건전도

평가 시스템에 입력되어 관리자가 실시간으로 구조안전성을 평가할 수 있도록 하였다. 구조물 건전도 평가시스템은 충격하중에 대한 상부 돔 구조물의 응답을 동적 구조해석을 통해 시뮬레이션하고 구조물에서 발생하는 진동 및 변형과 이에 대응하는 손상 정도를 학습데이터로 구성한 뒤 이를 인공지능에 학습시켜 구현되었다.

### 3. 맺음말

이상과 같이 시공중 혹은 완공후 구조물의 구조모니터링 및 이를 활용한 건전성감시에 대한 최근 사례를 살펴보았다. 최근 국내외 건축 및 토목분야에서 구조물의 사용성과 안전성에 대한 문제가 대두되면서 계측유지관리에 대한 필요성이 증대되고 있다. 완공후 구조물의 경우 지속적인 유지관리를 통해 구조체의 건전성을 유지하는 것이 필요하며, 손상 후에도 즉각적인 대응방안이 거주자 또는 사용자에게 전달되어 혼란에 의해 발생할 수 있는 불필요한 과잉 대응을 막고 인명 및 재산 피해를 최소화하는 것이 요구된다. 최근에 발생한 고층건물의 진동문제에서도 볼 수 있듯이 심각한 구조적인 손상이나 인명피해가 없더라도 구조적인 안전성에 의심이 되는 문제가 발생되면 조사를 통해 원인을 파악하고 대책을 세우기 전까지는 사용이 중지되고 그에 따른 경제적인 피해가 발생한다. 따라서 문제발생시 최단시간 내에 원인분석을 실시하여 사용중지 기간을 최소

화함으로써 운영중 손실을 최소화할 수 있는 점만으로 SHM의 효용가치는 충분하다고 생각된다. 또한 엔지니어의 입장에서는 기술의 발전 및 엔지니어링의 가치를 높이기 위해서는 설계된 건물이 완공 후 어떠한 성능과 거동을 보이는지를 확인하고 이해하는 것이 시공중인 구조물에 대해서도 적용된 기술이 의도한 성능을 발휘하는지 중요한 것이며 이러한 측면에서 SHM 시스템이 활용될 수 있다.

아직 계측데이터를 통해 구조물의 손상을 즉시 탐지하고 이에 따라 단계별 대응방안까지 마련된 이상적인 SHM 시스템의 구현을 위해서는 기술적으로 많은 과제가 남겨져 있다. 하지만 SHM 시스템은 기존 구조공학과 함께 센서와 통신기술, 컴퓨터, IT 부분의 첨단기술이 복합된 기술로서 이에 관한 주도권을 가질 수 있으면 세계적인 경쟁력을 확보하고 관련된 분야에 새로운 시장을 창출할 수 있을 것으로 생각된다. 

[담당 : 유은중, 편집위원]