

대공간 구조물 계측유지관리 적용 사례

Application of Structural Health Monitoring to a Large Span Roof Structure



김지영*
Kim, Ji Young



박재근**
Park, Jae Keun



김대영***
Kim, Dae Young

1. 서론

건축/토목 구조물은 항상 예기치 못한 구조적인 결함을 가질 수 있으며, 이러한 구조적인 결함은 경미한 균열발생으로부터 구조물의 붕괴를 발생시킬 수 있는 중대한 단면손실까지 다양하게 나타날 수 있다. 건축/토목 구조물은 규모가 크기 때문에 모든 부분의 이상유무를 항상 관찰하는 것은 현실적으로 불가능하며, 육안관찰만으로는 내부적인 손상의 발생을 찾아내기 어렵기 때문이다. 특히, 건축물의 경우에는 외장재, 마감 등으로 주구조체가 차폐되어 있기 때문에 균열의 진전과 손상의 발생을 발견하기 어렵다. 따라서 이러한 건축/토목 구조물의 손상발생을 초기단계에 발견할 수 있는 확률을 높이기 위하여 계측유지관리 (Structural Health Monitoring, SHM)가 도입되게 되었다.

이를 위해 미국, 일본, 유럽 등 전세계적으로 토목 분야 장경간 교량에 대한 SHM 시스템이 활발히 연구되었으며, 다수의 교량에 적용되어 운영되고 있다.

우리나라의 경우에도 서해대교, 진도대교, 돌산대교, 영흥대교, 삼천포 대교, 올림픽 대교와 같은 사장교에 SHM 시스템이 적용되거나 설치될 예정이며, 남해대교, 영종대교, 광안대교와 같은 현수교에도 SHM 시스템이 운영되고 있다.

건축분야에서도 건물의 초고층화, 대형화에 따라 사용성 및 안전성에 대한 문제가 대두되면서 계측유지관리에 대한 적용이 늘어나고 있다. 이러한 초대형 구조물의 경우에는 상시 거주 및 유동 인구가 수만명이 될 수 있기 때문에 지진 및 태풍의 발생으로 인하여 구조물의 붕괴가 발생할 경우 막대한 인명 및 재산 피해가 발생할 수 있다. 따라서 대우건설이 시공하고 있는 송도 Asia Trade Tower와 아시아 최고층 주거 복합건물인 두산건설의 해운대 워브터제니스에 계측유지관리 시스템이 구축되고 있다. 이와 관련하여 대공간 지붕구조물에 대한 계측유지관리 시스템을 적용 사례를 살펴보고자 한다.

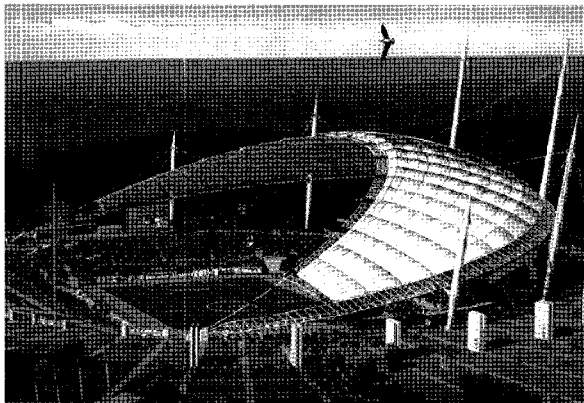
2. 대상 구조물 및 계측유지관리 개요

대상 구조물은 제주에 위치한 축구경기장으로로서

* (주)대우건설 기술연구원, 책임연구원 공학박사

** (주)대우건설 기술연구원, 대리

*** (주)대우건설 기술연구원, 수석연구원 공학박사



〈그림 1〉 대상 구조물 조감도

그림 1과 같이 철골 구조물에 지붕막이 설치된 구조 형식이다. 2002년 발생한 태풍 루사에 의해 지붕막이 파괴되는 사고를 겪은 후 계측유지관리의 중요성이 인식되어 (주)대우건설 기술연구원에서 가속도계 및 막장력 계측시스템을 구축하고 현재까지 유지관리에 참여하고 있다. 유지관리 시스템의 구축은 계측시스템을 설치하는 것에 그치는 것이 아니라 아래와 같은 세 가지 구성요소를 설계하고 구현하는데 있다.

- a. 센서 및 계측 시스템 (Sensor and Measurement System)
구조물의 국부 및 전역적 거동을 측정하여 데이터를 측정하여 데이터를 관리함
- b. 구조물 식별 및 손상평가 시스템 (System Identification and Damage Evaluation System)
구조물의 상태를 평가하고 손상의 정도 및 위치를 파악함
- c. 의사결정 시스템 (Decision-Making System)
현재 구조물의 상태 및 손상 정도에 따른 사용자의 대처방안을 제시함

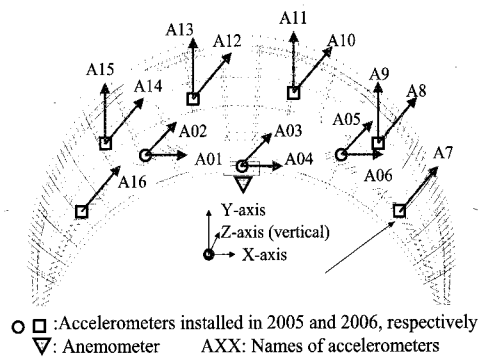
이에 따른 일련의 설계 및 구축과정에 대하여 기술하도록 한다.

3. 계측유지관리 시스템의 구축

3.1 초기 구조물 동특성의 평가

구조물에서 손상이라고 하는 것은 동일한 구조물

에서 시간의 경과에 따른 두 시점 사이의 상대적인 상태의 변화로 정의할 수 있다. 따라서 초기 구조물의 상태를 정확히 파악하는 것이 중요하다. 대상 지붕 구조물의 관리항목은 막케이블 장력 및 철골 구조물의 구조안전성이므로 이에 대한 초기 상태를 먼저 파악하였다. 막케이블 초기 장력은 막구조물 재시공 시 측정된 긴장력 데이터로부터 결정되었으며, 철골 구조물의 초기 상태는 계측에 의한 구조물 식별과 FE 해석의 결과로부터 분석되었다.



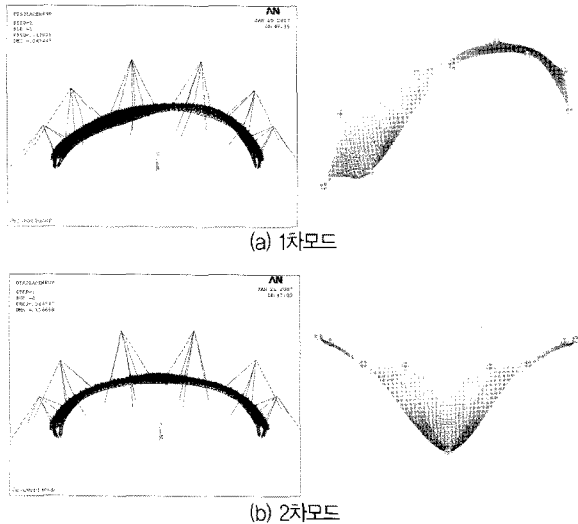
〈그림 2〉 가속도계의 설치 위치

그림 2와 같이 대상 지붕구조물에 총 16개 채널의 가속도계를 사용하여 가속도 데이터를 수집하였다. 수집된 데이터는 Low-pass 필터링과 Re-sampling을 수행하여 구조물의 동적특성(고유진동수, 진동모드 및 감쇠)을 정확히 평가할 수 있도록 가공되었다. 가속도 측정데이터로부터 Frequency Domain Decomposition (FDD)법을 이용하여 고유진동수, 진동모드 및 감쇠율을 추출하였다. 그리고 FE 해석을 실시하여 고유진동수 및 진동모드의 해석값을 산정하였으며 이를 계측된 결과와 비교하였다. 표 1 및 그림 3과 같이 실측된 고유진동수 및 모드형상이 해석결과와 유사한 것으로 나타났으므로 FE 해

〈표 1〉 지붕구조물 고유진동수 비교

모 드	고유진동수 (Hz)		
	해 석	실 측	오 차
1	0.717	0.745	3.90%
2	0.847	0.874	3.19%
3	0.938	0.950	1.33%
4	0.972	0.989	1.78%
5	1.141	1.108	-2.86%

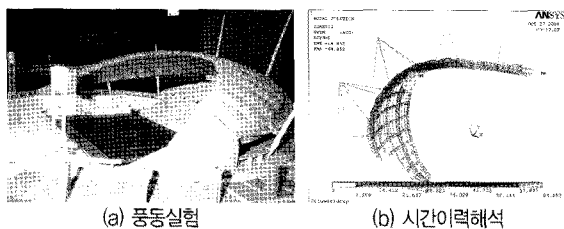
석을 이용한 손상 시뮬레이션을 통해 고유진동수 및 모드형상에 따른 손상정도의 분석이 가능한 것으로 판단되었다.



〈그림 3〉 지붕구조물 모드형상의 비교

3.2 손상평가 계획 및 계측항목 선정

지붕 철골구조물은 수많은 철골부재로 구성되어 있으므로 개별 부재의 국부적 계측을 통해 손상을 탐지하는 것은 현실적이지 못하다. 따라서 전역적인 풍응답의 계측을 실시하고 이의 변화에 따라 손상을 추정하는 것이 합리적이다. 따라서 초기 구조물 상태 평가에서 작성된 FE 모델을 이용하여 풍속레벨별 풍응답을 평가하고 풍응답 레벨에 따른 지붕구조물의 안정성 판단기준을 도출하였다. 이를 위해 그림 4 (a)와 같이 풍압실험을 통해 얻은 시간이력 풍압데이터를 FE 모델에 입력하여 그림 4 (b)와 같이 시간이력해석을 실시하였다.

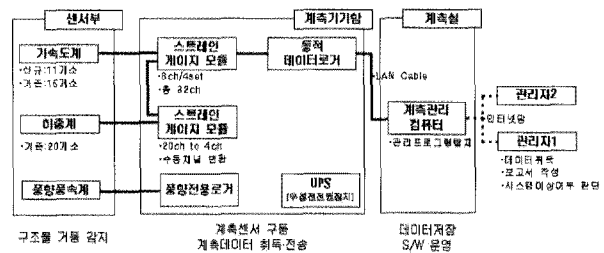


〈그림 4〉 대상 지붕구조물에 대한 풍응답 평가

또한 지붕 철골 구조물의 손상정도에 따른 고유진동수 및 진동모드의 변화정도를 분석하여 미진동하에서 계측된 고유진동수 및 모드형상의 변화에 따라 구조물의 손상정도를 추정할 수 있도록 하였다. 현재까

지 이러한 손상평가에 가장 적절한 계측항목이 가속도 데이터이므로 대상 지붕구조물에 가속도계를 설치하는 것으로 계획하였다.

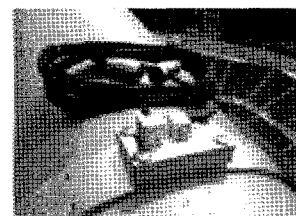
막케이블 장력의 경우 국부적인 거동만을 보이는 구조부재이므로 전역적인 풍응답의 계측을 통해 손상을 탐지하는 것은 불가능하다. 그러나 모든 막케이블의 장력을 모니터링하는 것은 실제로 불가능하므로 대표되는 몇 개의 막케이블 샘플에 대해 장력을 모니터링하여 전체적인 막케이블의 장력손실을 추정하는 것으로 계획되었다. 그리고 실제적인 풍하중의 규모를 추정하기 위하여 지붕 최상부에 풍향-풍속계를 설치하도록 하였다.



〈그림 5〉 대상 구조물 계측유지관리 시스템 개요도

3.3 계측 시스템의 구축 및 운영 시나리오 구축

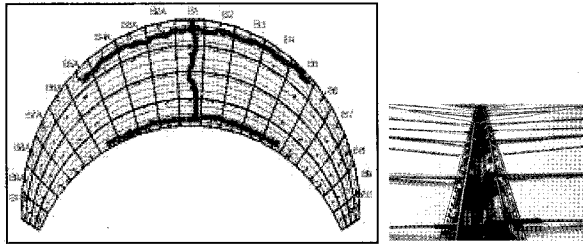
그림 5는 대상 구조물에 설치된 계측시스템의 구성을 나타낸 것이다. 계측센서부는 가속도계와 하중계로 구성되어 있으며, 이를 계측하기 위한 스트레인 게이지 모듈과 앰프 및 동적데이터로거를 계측기기함에 구성하였다. 또한 지붕 최상부에 설치된 풍향-풍속계는 별도의 풍향-풍속계 전용 데이터로거



〈그림 6〉 가속도계 설치위치

로 데이터를 수집하도록 하였다. 총 27개의 가속도계가 그림 6과 같이 9개의 측정위치에 설치되어 3축 방향의 가속도를 측정하도록 하였으며, 20개의 하중계를 그림 7과 같이 막케이블에 설치하였다. 측정된 가속도, 막케이블 및 풍속 데이터는 최종적으로 계측관

리 서버에 저장되도록 하였으며, 서버에 설치된 계측 유지관리 프로그램에 의해 수집된 데이터가 가공되어 앞에서 수립한 손상평가 계획에 따라 관리자에게 대응방안을 제시하도록 하였다.



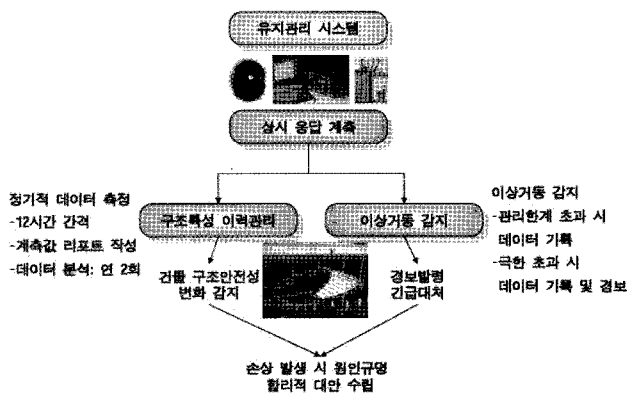
〈그림 7〉 막케이블 하중계 설치위치

계측유지관리는 서버에 설치된 유지관리 프로그램에 의해 자동적으로 운영되며, 그림 8과 같이 구조 특성 이력관리 (지붕구조물의 노후화) 및 이상거동 감지로 구분될 수 있다. 구조특성 이력관리는 진동 가속도 계측 데이터로부터 지붕구조물의 동적거동특성(고유진동수, 진동형상)을 지속적으로 계측하여 시간경과에 따른 지붕구조물의 노후화 정도를 평가하게 된다. 그리고 이상거동 감지는 풍속, 진동 가속도, 막케

이블 장력데이터에 의해 허용 가속도 이상의 진동 발생 및 막케이블의 긴장력 이완 등을 감시하게 된다.

4. 맺음말

이상과 같이 계측유지관리 시스템은 구조물의 노후화 및 이상거동을 감지하는데 효과적으로 이용될 수 있다. 이를 통해 지붕구조물의 사용연한 증대에 따른 전체적 노후화 정도를 감시함으로써 구조물의 사용연한 증대 및 사용연한 내 항상 최상의 구조안전성을 확보할 수 있다. 그리고 평상시 구조물의 손상을 감지하여 사전에 보수함으로써 불의의 사고를 미연에 방지할 수 있으며, 급격한 손상 발생시 대피경보를 발령함으로써 인명피해를 최소화할 수 있다. 그러나 향후 보다 신뢰성있는 시스템을 구축하기 위해서는 현장여건이 반영된 손상탐지 기술 및 구조물식별에 대한 연구가 지속적으로 이루어져야 하며, 일반적인 가속도계 및 변형률계보다 손상식별에 효과적인 계측장비의 개발도 수행되어야 한다.



〈그림 8〉 유지관리 시스템 운영 시나리오