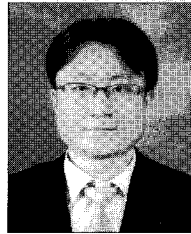


# 구조물 상태평가 기술

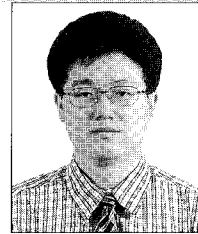
## Evaluation of Structural Condition using Measurement Data



조 자 옥\*



김 지 영\*\*



김 대 영\*\*\*

\* (주)대우건설 기술연구원 연구원  
\*\* (주)대우건설 기술연구원 책임연구원  
\*\*\* (주)대우건설 기술연구원 수석연구원

### 1. 서 론

최근 지구촌에서는 지진, 태풍, 쓰나미 등의 위협이 점점 증가하고 있다. 지난 2009년 8월 대만을 강타한 태풍 모라꼿의 경우 사망 126명, 실종 60명, 부상 45명 등의 인명피해를 발생시키고 21억 대만달러 이상의 재산피해를 기록했다. 이러한 환경의 위협에도 불구하고 건축 구조물은 초고층화, 대형화되어가는 추세이다. 이런 초대형 구조물은 풍하중, 지진 하중 등의 외부하중에 대하여 민감하며, 피해 발생 시 대규모 재난으로 이어질 수 있다. 뿐만 아니라 초대형 건축물의 수명은 100년 이상을 계획하기 때문에 지속적이고 효율적으로 건물을 관리할 수 있는 방안 및 위험 대처 방안이 요구된다.

### 2. 구조물 계측 유지관리의 목적

건축·토목 구조물은 시간의 경과에 따라 점진적인 노후화에 의해 구조적으로 결함이 발생하게 된다. 뿐만 아니라 태풍, 지진 등 급격한 하중에 의하여 손상이 발생하기도 한다. 이러한 손상으로 인하여 불시에 구조적 안전성이 급격하게 저하되기 때문에 위험을 초래할 수 있다. 현재 이런 사고

를 미연에 방지하기 위하여 주요 시설물의 정기적인 안전진단을 전문가를 통하여 실시하도록 하고 있다. 그러나 현행 구조 안전 점검은 육안조사 및 국부적인 비파괴 조사를 바탕으로 전문가의 판단에 의존하는 경향이 있기 때문에 구조물 내부의 치명적인 손상을 간과할 수 있다. 또한 발생한 손상에 대하여 정량적인 평가가 어려운 측면이 있다.

(주)대우건설에서는 구조물에 대하여 계측유지관리 시스템을 구축함으로써 전역적인 구조물의 손상에 대한 정량적 평가 및 손상위치를 추정하는 구조물 상태평가 기술을 개발함으로써 구조물의 건전도 평가를 수행할 수 있는 기술을 개발하여 실무에 적용하고 있다.

### 3. 구조물 상태평가 시스템

구조물의 상태평가 시스템은 구조물의 거동을 계측하는 센서부, 데이터를 기록·관리하는 계측시스템 및 계측데이터를 이용한 상태평가 알고리즘으로 구성된다. 구조물의 상태평가는 구조물에서 계측된 진동데이터를 분석하여 시공 초기 구조물의 상태와 현재 상태를 비교함으로써 이루어지며, 이를 통해 구조물의 손상발생 부위 및 정도를 추정할 수 있다.

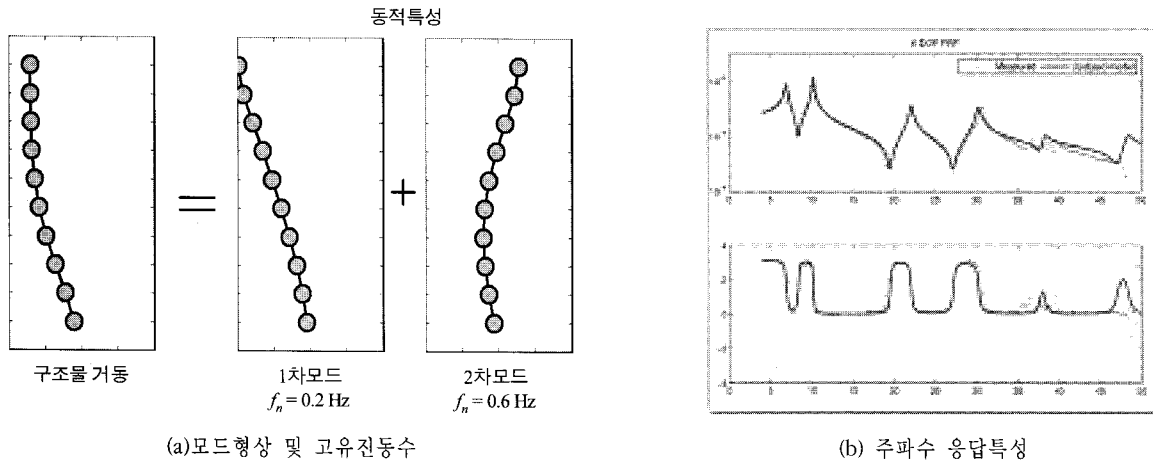


그림 1 구조물의 고유진동특성

구조물은 그림 1과 같이 구조물만의 고유한 진동특성을 나타낸다. 이것은 고유진동수, 진동모드형상, 감쇠비, 주파수 응답특성 등으로 표현할 수 있다. 구조물의 고유진동특성은 구조물의 질량 및 강성에 의하여 결정된다. 따라서 구조물에 손상이 발생하면 강성에 변화가 발생하게 되고 그에 따라 고유진동특성이 변하게 되므로 이를 이용하여 구조물의 현재 상태를 분석할 수 있다.

이를 위해 구조물의 상태평가 알고리즘에는 세부적으로 계측데이터의 신호처리를 위한 Signal processing(신호처리)부, 고유진동특성을 추출하는 System Identification(구조물 식별)부 및 고유진동특성을 결정하는 구조 파라미터(구조물 질량, 강성, 단면적 등)의 변화를 분석하는 수치해석부

로 구성된다. 여기에서 신호처리나 구조물 식별기법은 상태평가를 위한 전처리 단계에 해당되므로 구조물 상태평가 기술의 대부분은 구조 파라미터 변화를 분석하는 수치해석 기법이 주가 된다.

이러한 수치해석적 기법에는 여러 가지 방법이 있지만 (주)대우건설에서는 인공지능망에 기반한 상태평가 알고리즘을 개발하고 3층 Mock-up 구조물에 적용하여 검증하였다. 인공지능망을 이용한 상태평가 방법은 그림 2와 같이 먼저 임의의 구조물의 다양한 상태변화에 따른 고유진동특성의 변화를 구조해석 Tool을 통해 데이터베이스화하고 이를 인공지능망에 선행 학습시킨다. 그리고 실제로 계측된 구조물의 고유진동특성을 인공지능망에 입력하게 되면 대상 구조물의

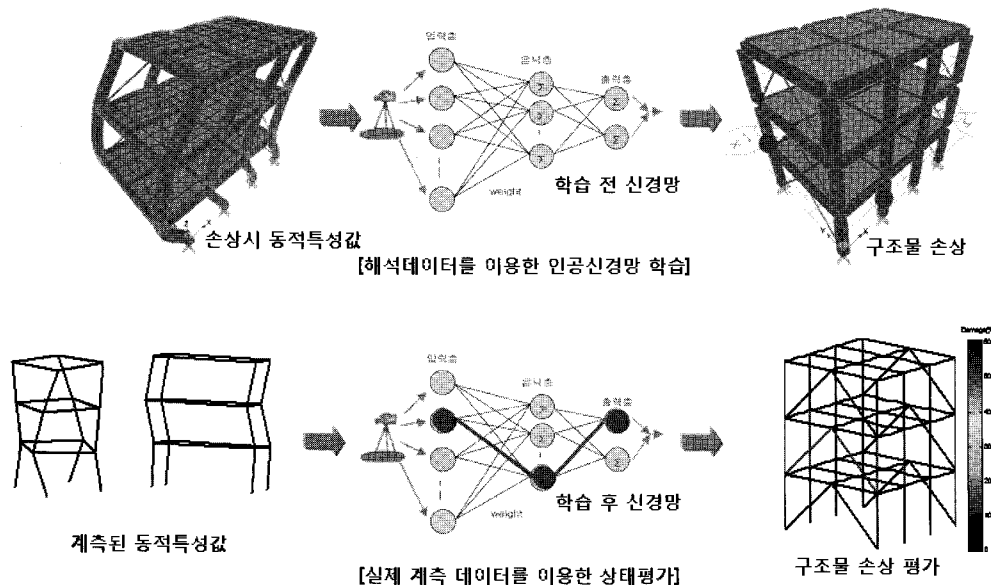


그림 2 인공지능망 기반 상태평가 기술

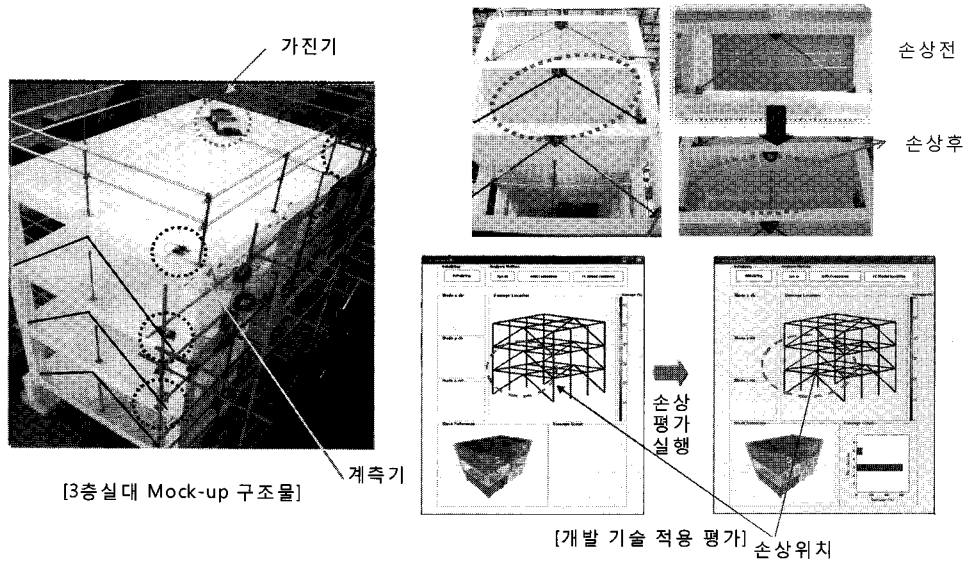


그림 3 상태평가 기술의 Mock-up 구조물 적용

상태변화 정도와 위치를 추정할 수 있다. 이러한 인공신경망의 장점은 선형학습에 소요되는 시간이 필요하지만 학습 후에는 다른 해석적 기반 상태평가 기법에 비해 계측데이터로부터 즉각적인 결과를 얻을 수 있으므로 이에 대한 추후 대처를 보다 신속하게 할 수 있다는 것이다.

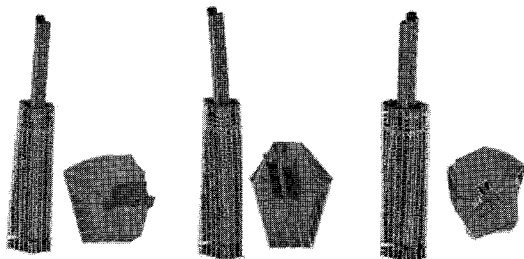
개발된 인공신경망 기반 상태평가 기술은 그림 3과 같이 Mock-up 구조물에 적용하여 성능을 검증하였다. 3층 RC 구조물의 대각 가새에 다양한 임의의 손상을 발생시키고 인공신경망을 통해 손상의 위치와 정도를 추정하였으며, 결과에서 나타난 바와 같이 손상의 위치를 정확하게 추정해낼 수 있는 것으로 나타났다. 인공신경망 기반 상태평가 기법의 경우 상태평가를 좀 더 신속하게 할 수 있지만 상태변화의 정도는 해석적 기반 상태평가 기법이 보다 정밀할 수 있다. 따라서 개발된 상태평가 알고리즘은 구조해석 모델 개선(FE model updating)기법에 기반한 상태평가 추정을 병행하여 적용할 수 있도록 개발하였다.

#### 4. 상태평가 기술의 적용

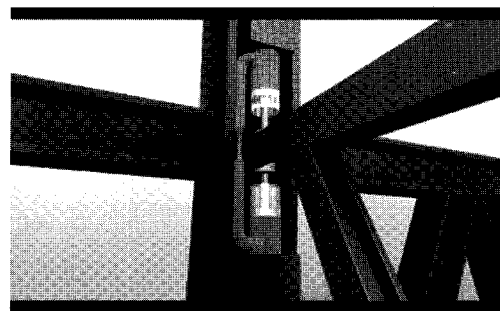
개발된 상태평가 기술은 시공 중에는 공사중인 구조물의 수직도 관리 뿐만 아니라 설계의 검증이 가능하며, 완공 후 성능평가 및 사용 중 구조안전유지관리 등에 다양하게 적용될 수 있다.

시공 중 적용의 대표적인 사례는 인천 송도 동북아무역센터(NEATT)에 설치된 아웃리거 댐퍼의 성능평가를 들 수 있다(그림 4). 시공 중 센서를 설치하여 진동을 계측하고 이로부터 구조물의 고유진동 특성을 분석하여 해석모델과 비교함으로써 댐퍼의 성능을 평가하였다.

완공 후 적용의 대표적인 사례는 2007년도 서울에 시공된 주상복합건물의 풍응답을 계측함으로써 구조성능을 평가한 것을 들 수 있다. 계측으로부터 분석된 고유진동특성에 대하여 구조설계 실무용으로 작성된 FE 모델링의 해석결과를 비교한 결과 진동모드는 그림 5와 같이 유사한 거동을 보였으



(a) 계측을 통한 동적특성 평가 → 설계 검증



(b) 아웃리거 댐퍼 성능평가

그림 4 시공 중 구조물 상태평가 시스템의 적용

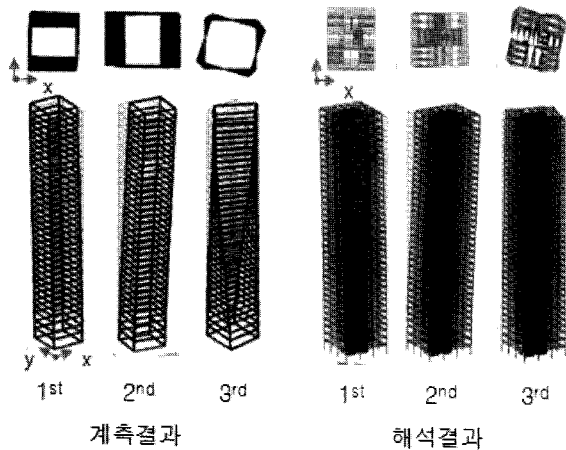


그림 5 실측결과와 해석결과의 진동모드 비교

나, 고유진동수는 1차  $y$ 축 병진모드에서 약 37%, 2차  $x$ 축 병진모드에서 약 26%, 3차  $z$ 회전모드에서 35%의 오차를 나타냈다. 그러나 구조물의 성능평가를 위하여 구조물의 고유진동특성을 정확하게 예측할 수 있는 FE 모델링을 작성하는 것은 매우 중요한 절차이다. 따라서 철근이 고려된 콘크리트 탄성계수, 슬래브, 비구조 부재의 영향 등을 고려하여 FE 모델링을 수정하였다. 그 결과 영향인자를 모두 고려한 경우 병진방향에 대해서 최대 98.2%로 실제 구조물의 고유진동수와 근접하게 예측할 수 있으며, 비틀림에 대해서는 82.9%로 실제 비틀림에 대한 고유진동수를 예측할 수 있었다. 따라서 작성된 초기이력특성을 바탕으로 향후 구조물에 손상이 감지되면 사전에 보수를 실시함으로써 불의의 사고를 미연에 방지할 수 있도록 계획하였다.

#### 4. 맺음말

구조물의 상태평가 기술은 구조물의 성능평가 및 구조안전 유지관리에 적극적으로 활용될 수 있다. 계측된 데이터에 기반하여 구조물의 상태를 평가하기 때문에 보다 정확하고 객관적인 판단을 내릴 수 있으며, 효과적인 관리방안을 도출할 수 있다. 또한 구조물의 규모가 초대형화 되어가는 추세에서 기존의 구조안전 유지관리 방안으로는 전체 구조물을 효율적으로 진단하기 어려우므로 계측을 통한 유지관리 기술의 도입이 필요할 것으로 예상된다.

향후 구조물의 상태평가 기술의 활발한 적용을 위하여 구조물의 상태 및 손상정도에 따른 사용자의 대처방안 제시를 위한 경고레벨의 수립 등에 대한 연구가 지속적으로 이루어져야 하며, 손상식별에 효과적인 계측장비의 개발도 수행되어야 할 것으로 판단된다.

#### 참고 문헌

1. J. Y. Kim et al. (2009), Calibration of analytical models to assess wind-induced acceleration responses of tall buildings in serviceability level, *Engineering Structures*, 27(9), 2086-2096
2. J. Y. Kim et al. (2007), Comparisons of full scale measurement data with the results of wind tunnel test studies for a large span roof, *ICWE12*, Seoul

[담당 : 전세진, 편집위원]