# 구조물 손상평가를 위한 인공신경망의 RC Mock-up 적용 평가

# Application of the Artificial Neural Network to Damage Evaluations of a RC Mock-up Structure

김 지 영* • 김 주 연** • 유 은 종*** • 김 대 영****
Kim, Ji Young • Kim, Ju Yeon • Yu, Eunjong • Kim, Dae Young

요 약

구조물의 건전도를 평가하기 위해 상시 구조물 계측을 이용한 Structural Health Monitoring (SHM) 시스템을 적용하게 된다. SHM 시스템의 궁극적 목적은 계측된 데이터를 이용하여 구조물의 손상위치 및 손상정도를 분석하여 거주자에게 유지관리정보와 대처요령 신속하게 제공하는 것이다. 따라서 본 연구에서는 구조물의 손상탐지를 위해 인공신경망(Artificial Neural Network)을 도입한 알고리즘을 수립하고, 이를 3층 실대 RC Mock-up 구조물에 적용하여 성능을 평가하였다. 먼저 인공신경망의 학습을 위해 구조해석 프로그램을 이용하여 구조물의 손상에 따른 동적특성 변화 데이터베이스를 구축하였다. 그리고 학습된 인공망에 실제 구조물에서 추출한 동특성의 변화를 입력하여 손상탐지를 실시하였다. 이를 통해 인공신경망의 학습방법, 학습데이터의 정규화 방법 등을 규명하고 인공신경망을 이용한 손상탐지의 효과를 분석하였다.

***keywords*** : SHM, 손상탐지, 인공신경망, 학습데이터, 손상시뮬레이션

## 1. 서 론

구조물은 시공 후 사용연한의 증가에 따라 노후화하게 되며, 때로는 대형 지진, 대형 태풍 및 폭발 등과 같은 예기치 못한 재난에 의해 급격히 손상되기도 한다. 따라서 거주자의 안전을 최우선으로 확보하기 위해 정기적 또는 비정기적 안전진단 등을 실시하여 구조물의 건전도를 평가하도록 법으로 규정하고 있다. 최근 계측 및 컴퓨터 해석기술의 발전에 따라 구조물의 현재 상태를 상시계측을 통해 얻어진 데이터를 이용하여 평가하는 Structural Health Monitoring 기술이 많이 도입되고 있는 추세이다. 초장대 교량과 같은 토목 구조물에서는 SHM 기술이 이미 전체 유지관리 시스템에 통합되고 있으며, 건축분야에서도 초고층 및 대공간 구조물을 중심으로 기술 적용이 이루어지고 있다. (김지영, 2009)

현재까지 SHM 시스템은 구조물의 특정 부위의 진동, 변위, 변형도 등에 대한 관리한계치를 설정하고 이를 계측기기를 이용해 상시 모니터링함으로써 구조물의 노후화 및 위험상황을 감시하는 체계로 구축되고 있다. 그러나 SHM 시스템의 궁극적 목적은 계측된 데이터를 이용하여 구조물의 손상위치 및 손상정도를 분석

* 정회원 • (주)대우건설 기술연구원 책임연구원 kimjyoung@dwconst.co.kr
** (주)대우건설 기술연구원 전임연구원 daisy@dwconst.co.kr
*** 정회원 • 한양대학교 건축공학부 eunjongyu@hanyang.ac.kr
**** (주)대우건설 기술연구원 수석연구원 kimdy@dwconst.co.kr

하여 거주자에게 유지관리정보와 대처요령 신속하게 제공하는 것이다. 이를 위해서는 SHM 시스템 내에 구조물의 손상 위치와 손상 정도를 평가할 수 있는 손상탐지 시스템이 필요하다. 손상탐지를 위한 알고리즘으로는 FE model updating을 이용한 해석모델기반 손상탐지 기법이 활발히 개발되어 왔으며, 최근에는 인간의 지각을 이용한 인공신경망 기법들이 연구되고 있다.

해석모델을 기반 손상탐지 기법은 계측된 데이터를 이용하여 해석모델 자체를 수정하여 손상위치 및 정도를 분석하기 때문에 평가결과가 논리적 근거에 의해 추출됨으로써 신뢰성이 높다. 그러나 해석모델과 알고리즘이 손상탐지 시스템에 포함되어야 하고, 해석모델의 크기에 따라 손상탐지에 많은 시간이 요구될 수 있다. 인공신경망 기법은 임의의 구조물에 대한 손상시뮬레이션을 통해 인공신경망을 학습시키고, 학습된 인공신경망을 이용하여 실제 구조물에서 발생한 손상을 탐지하기 때문에 손상탐지 시스템이 보다 간단하게 구성될 수 있다. 또한 인간의 지각과 유사하게 직관적으로 손상을 평가하기 때문에 신속한 평가가 가능하다. 그러나 학습된 범위 이외에는 손상탐지가 어려우며, 해석기반 손상평가기법에 비해 신뢰성이 다소 낮을 수 있다. 이러한 단점은 추가적인 학습을 통해 극복이 가능하다.

따라서 본 연구에서는 실무에서 보다 적용성이 높은 인공신경망 기반 손상탐지 알고리즘을 제시하였으며, 3층 RC Mock-up 구조물에 대한 적용을 통해 계측방법, 학습데이터의 선정 및 생성, 데이터의 정규화 및 손상탐지 등의 절차를 수립하였다. 그리고 실제 구조물에 대한 SHM 구축 시 실무 적용성을 높이기 위한 방안을 검토하였다.

## 2. 손상탐지를 위한 인공신경망 기법

인공신경망은 인간 두뇌세포의 상호간 작용을 수학적으로 모델링한 것으로서, 반복적인 학습과정을 통해 인간의 지각과 유사한 방법으로 문제해결이 가능하다. 인간의 두뇌세포는 반복적인 학습(예: 사람, 자전거)을 통해 뉴런간의 연결강도가 결정되면, 추후 유사한 형태를 볼 때 학습된 신경망에 의해 즉각적으로 인식(예: 자전거탄 사람)하게 된다. 이와 유사하게 그림 1과 같이 구조물에 임의의 손상을 가정하고 이에 따른 고유특성을 분석하여 인공신경망을 학습시킨 뒤, 실제 구조물의 고유특성을 학습된 인공신경망에 입력하면 즉각적으로 손상의 위치와 정도를 파악할 수 있게 된다. 이번 연구에서는 Radial Basis Neural Network(RBNN)를 사용하여 구조물의 손상탐지 알고리즘을 구축하였다. RBNN은 Back-propagation 등의 기존 인공신경망 기법과 달리 많은 변수에 대해서도 보다 안정적인 학습과 결과도출이 가능한 것으로 알려져 있다.

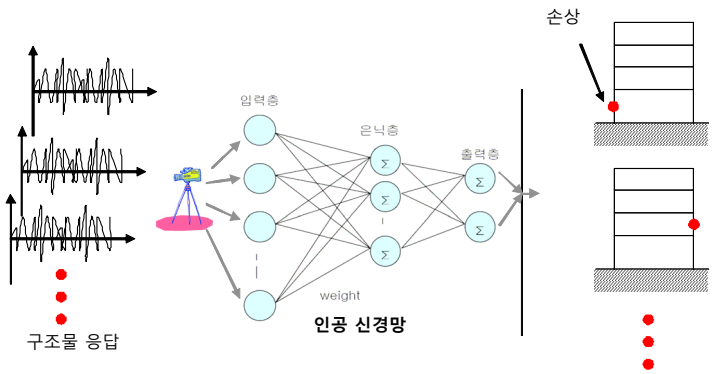



그림 1 인공신경망을 이용한 구조물 손상평가

인공신경망의 학습을 위한 데이터는 SAP2000을 이용하여 손상시뮬레이션을 실시하여 취득하였다. 구조물의 부재레벨에서 손상탐지를 실시하는 것은 시스템 구축 비용측면에서 매우 비효율적이므로, 설치된 계측기의 종류와 개수에 따라 구조물을 적정한 구역으로 나누어 손상탐지를 실시하는 것이 바람직하다. 따라서 해석모델의 부재를 적정한 그룹으로 구분하고 각 그룹의 강성도를 임의로 변경하여 동특성해석을 실시함으로써 강성변화에 따른 동특성변화 대한 학습데이터를 구축하였다.

학습데이터는 목표값에 따른 입력의 패턴변화가 클수록 학습에 효과적이다. 따라서 인공신경망에 입력되는 동특성은 각각의 손상에 대하여 뚜렷한 차이를 보이는 것을 선택하여야 한다. 또한, 이러한 차이를 보다 명확히 하기 위하여 입력값과 목표값은 적절하게 정규화 되는 것이 필요하다. 그리고 인공신경망 학습시 선택된 데이터 간의 중요도 차이를 반영하고 상대적인 크기를 적정하게 보정하기 위하여 가중치 계수를 적용할 수도 있다. 이번 연구에서는 학습을 위한 동특성 데이터로 고유진동수와 모드형상을 사용하였으며, 손상전 동특성 값을 기준으로 강성변화에 따라 변화된 동특성 값과의 차이를 입력데이터로 설정하였다. 그리고 모드형상과 고유진동수와의 값에 대한 차이를 보정하기 위하여 모드형상에 가중치 계수를 적용하였다.

## 3. RC Mock-up 구조물 적용평가

### 3.1. 실험체 및 가진실험 개요

인공신경망 기반 손상탐지 기법을 검증하기 위하여 그림 2와 같은 3층 RC Mock-up 구조물을 (주)대우건설 기술연구원 대형구조실험동 내에 제작하였다. Mock-up 구조물의 높이는 7 m이며, 장변이 6.3 m, 단변이 4.3 m이다. 그리고 단변방향으로 각 층에 철골가새를 설치하여 임의 손상발생을 부여할 경우 가새를 제거하였다. 실험동 내에서 상시진동을 이용하여 Mock-up 구조물의 동특성을 추출하기 어려우므로 강제가진이 가능한 소형 가진기를 설치하였다. 그리고 각 층에서 x 및 y-translation과 z-rotation에 대한 모드형상과 고유진동수를 추출하기 위하여 각 층별로 3개의 Force-balace type 가속도계를 배치하였다. 설치된 가진기로 White-noise 강제가진 실험을 실시하였으며, 손상별 실험 case는 표 1 및 그림 3과 같다.

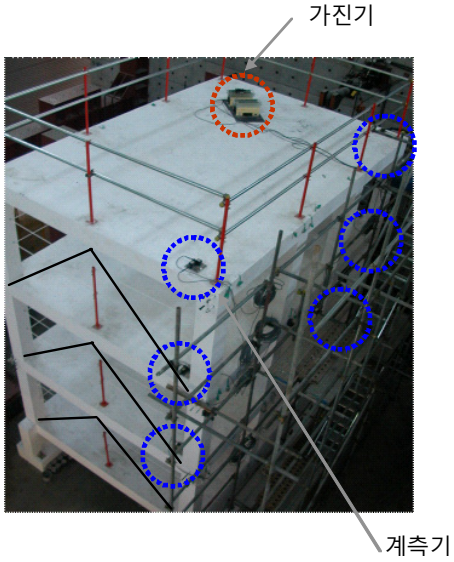



그림 2 Mock-up 구조물

표 1 초기 균열과 각도

| Cases | 제거된 가새번호 |
|---|---|
| 손상전 | - |
| Case 1 | ① |
| Case 2 | ① ② |
| Case 3 | ① ② ③ |

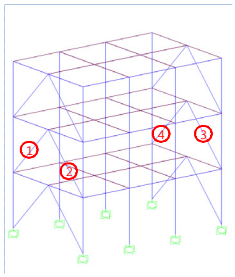



그림 3. Mock-up 구조물 가새번호

### 3.2. 동특성 추출 및 학습데이터 생성

White-noise 가진에 의한 가속도데이터를 이용하여 고유진동수 및 모드형상을 추출하였다. 사용된 구조물 식별 기법은 Input-output 데이터를 이용할 수 있는 SSI법을 이용하였으며, 9차 모드까지 고유진동수 및 모드형상을 추출하였다. 추출된 동특성 데이터에서 가새의 손상을 가장 효과적으로 탐지할 수 있는 모드에 대한 선정이 필요하다. 따라서 단변방향의 진동을 나타내는 y축 방향의 모드와 z-rotation 모드를 선정하여 손상탐지를 실시하였다. y-축 방향의 모드만 사용하게 되면 2층 내의 가새손상에 대해서만 탐지할 수 있지만 z-rotation 모드를 이용하여 인공신경망을 학습시키면 가새 ①/②와 ③/④의 위치까지 손상탐지가 가능할 수 있다. 그리고 그림 4와 같이 대상 구조물을 6개의 구역으로 분할하고 각각의 구역에 대한 강성을 임의로 변경해 가면서 동특성 해석을 실시하여 300 set의 구조물 동특성-강성변화율 학습데이터를 생성하였다. 생성된 학습데이터는 손상전 값에 대하여 정규화 되었으며, 고유진동수와 모드형상 값의 차이를 보정하기 위하여 가중치계수를 적용하였다.

### 3.3. 손상탐지 결과

표 1의 각 Case별 손상탐지결과는 그림 5와 같다. 그림 5 (a)와 같이 ① 가새가 제거된 Case 1의 경우 위치도의 3구역에 손상이 붉은색으로 표시되며 손상지수가 약 40% 정도인 것으로 나타났다. 그리고 그림 5 (b)에서는 가새 ① 및 ②가 손상된 Case 2의 결과를 나타내고 있으며, 위치도에서 3구역에 손상이 발생하고 손상지수가 약 75% 정도이다. 마지막으로 Case 3의 결과는 그림 5 (c)와 같으며, 손상의 위치가 3 및 4 구역에서 발생하고 있는 것을 알 수 있으며, 각 구역의 손상지수가 50% 및 40% 정도로 나타났다. Case 3의 경우 4구역에서는 가새 ①이 손상된 Case 1의 손상지수와 유사하게 40% 정도를 나타나고 있으나 3구역에서는 손상지수가 25%정도 낮게 나타난 것을 볼 수 있다. 그러나 인공신경망을 통해 손상의 위치와 손상지수가 대체로 손상을 감지하고 평가할 수 있을 정도로 나타나고 있음을 알 수 있다.

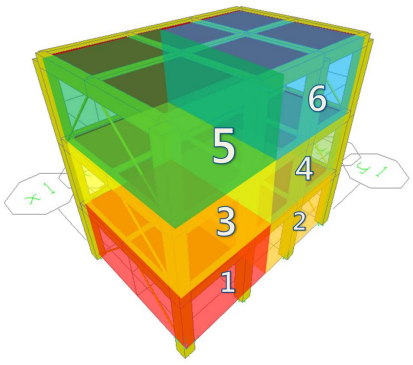
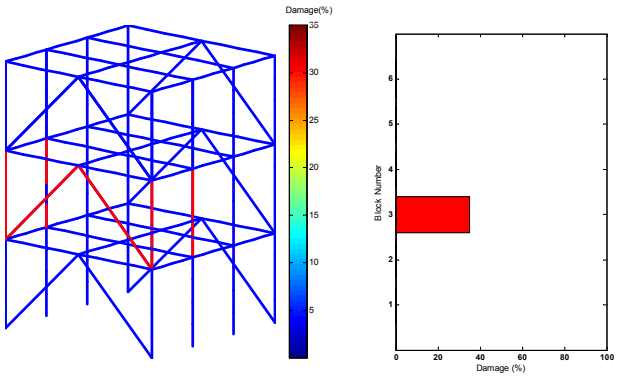
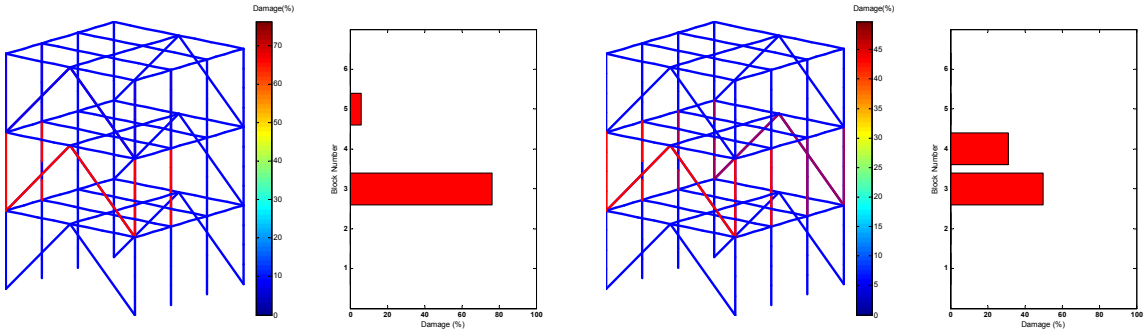



그림 4. Mock-up 구조물 손상탐지 구역




(a) Case 1

그림 5. Case 별 손상탐지 결과 - 계속




(b) Case 2 (c) Case 4

그림 5. Case 별 손상탐지 결과

## 4. 결 론

본 논문에서는 인공신경망을 이용한 손상탐지 기법을 제시하고 이를 Mock-up 구조물에 적용하여 제시된 방법에 대한 검증을 수행하였다. 실험결과에서 나타난 바와 같이 인공신경망의 학습데이터를 적절히 선정하고 이를 효과적으로 정규화할 수 있으면 효과적인 손상탐지가 수행될 수 있는 것으로 나타났다. 그러나 손상지수의 경우 손상정도에 따라 다소 비례하여 증가하지 않는 것으로 볼 때 기존 해석기반 손상탐지기법보다 정밀도가 다소 낮은 것으로 나타났다. 그러나 실무적인 측면에서 손상의 위치와 정도를 평가하기에는 큰 문제가 없을 것으로 사료된다. 그리고 손상지수와 실제 손상간의 관계가 명확하지 않으므로 향후 Push-over 실험을 통해 이에 대한 규명이 필요할 것으로 판단된다.

## 참고문헌

**김지영 외** (2009) 대공간 구조물 계측유지관리 적용사례, **한국공간구조학회지**, 35(9)

**Kim JY, 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

**J. Y. Kim et al.** (2008) Evaluations of the dynamic properties for a residential tall building in Korea. Proceedings of CTBUH 8th World Congress "Tall and Green: Typology for a Sustainable Urban Future", Dubai, 3 - 5 March