

동적응답신호를 이용한 건축물의 손상추정기법 Damage Detection of Building Structures by Dynamic Response



유 석 형^{1)*}

Yoo, Suk Hyeong

1. 머리말

최근 건축 구조물이 대형화, 고층화 되어감에 따라 구조적 안전성에 대한 중요성이 점차 증가하고 있으며, 과거 성수대교나 삼풍백화점의 붕괴 등 대형참사를 교훈으로 신도시와 같은 대단위 건설이나 고층건물, 교량, 댐 또는 원자력발전소와 같은 중요도가 높은 구조물에 대한 유지관리 기술개발의 중요성이 제기되어 왔다. 구조물의 유지관리 기술은 사용 중인 구조물의 상태조사 및 성능평가 기술과 이에 따른 보수보강 등의 조치기법으로 구분할 수 있다. 현재 사용 중인 건물에 대한 안전진단은 시설안전기술공단의 “안전점검 및 정밀안전진단세부지침(건축물)”에 따라 수행하고 있으나, 건물전체에 대한 종합 평가 시 몇몇 건물 부위별로 선택된 부재에 대한 조사만으로 평가하므로 종합평가에 대한 신뢰도

가 낮고 또한 조사 항목별로 평가된 등급이 수학적모델인 퍼지이론에 의하여 취합됨으로써 건물의 실질적인 내구성, 사용성 및 안전성 평가에 어려움이 있다.

건물의 상태조사에 사용되어 오던 기존의 비파괴 검사기법은 건물외피의 육안조사, 일부부재에 대한 국부적인 조사 및 기술자의 주관적 경험에 의한 판단에 의존하므로 접근이 어렵거나, 마감재의 제거가 곤란한 부재 또는 조사대상에서 누락된 부재의 결함을 검출하기가 어려우며, 조사에 많은 시간과 노동력 그리고 비용을 필요로 한다.

선진 외국에서는 20여년 전부터 구조물 전체의 동적거동 계측을 이용하여 구조체 손상의 위치와 정도를 파악하는 SI기법(System Identification)을 개발하여 사용하여 왔다. SI기법은 과거 우주항공기의 손상검출에 적용하기위하여 개발된 역해석(Inverse Analysis) 기법으로서 토목구조물의 건전도 조사를 위하여 응용되어 활용되다

1) 경남과학기술대학교 건축공학과 교수

* E-mail : piter31@gntech.ac.kr

가 최근 건축구조물의 손상추정에 적용하기 위한 연구가 초기 단계에서 진행되고 있다. 그러나 건축구조물의 경우 동적응답신호로 구조물을 판별하기에는 토목구조물에 비하여 구조형식이 복잡하고 건축마감재 및 칸막이 벽 등의 비구조요소의 영향과 기계, 차량 및 주변 환경으로부터 발생한 진동 등이 응답신호에 포함되어 있어 구조물 판별에 어려움이 있다.

2010년 소방방재청에서 고시된 「지진가속도계측기 설치 및 운영기준」(이하 고시 기준)에서는 국가주요시설물들에 대하여 지진가속도계 설치를 의무화함으로써 지진 등의 재해로 인한 구조물의 손상을 신속하게 평가하고 대응할 수 있는 제도적 기틀을 마련하였다. 고시된 기준에 의하여 지진가속도계 설치를 의무화하고 있는 대상 구조물들은 정부청사 및 국립대학 등 건축물들과 댐, 교량, 고속철도 및 원자력 시설물 등의 토목 구조물이다. 토목구조물의 경우 계측된 진동신호로부터 구조물의 상태를 조사하고 평가할 수 있는 기법이 기준고시 이전에 실용화 되어 적용되어 오고 있었으나, 건축구조물의 경우 계측된 진동신호로부터 구조물의 상태를 평가할 수 있는 기법이 정립되어 있지 않아 고시기준에 의하여 계측된 건축구조물의 진동신호를 분석하고 이를 통하여 건축물의 상태를 평가할 수 있는 기법의 연구개발이 필요한 실정이다.

본고에서는 동적응답신호를 이용하여 구조물의 손상을 추정할 수 있는 이론적 배경 및 연구동향을 건축구조물을 중심으로 고찰하고자 한다.

2. 역해석(Inverse Analysis)

손상된 구조물의 손상을 추정하기 위하여 이용되는 수학적 이론은 역해석을 필요로 한다. 기존의 구조설계를 위한 해석의 과정에서는 아직 시공 전에 존재하지 않는 구조물이지만 도면 등

을 통하여 구조물의 정보를 알고 여기에 구조물 수명기간동안 작용할 것으로 예상되는 하중이 가해졌을 경우 이에 대한 반력, 처짐 내력분포 등의 응답을 구하는 방향으로 구조해석이 진행된다. 그러나 손상추정과정에서는 이와는 반대로 구조물은 현재 존재하고 있으나 손상에 대한 정보를 알 수 없기 때문에 진동이나 처짐 등의 응답 신호로부터 구조물에 대한 정보를 파악하는 역해석의 과정이 요구된다.

Fig. 1과 같이 일반구조해석은 구조계와 입력원(하중)을 알고서 구조계의 응답(변위, 반력 등)을 구하는데 비하여 역해석은 입력원과 응답치(변위, 속도, 가속도 등)로부터 구조계를 파악한다. 외국에서는 이미 이를 토목구조물에 응용·개발하여 실무에 적용하고 있으며, 최근 건축물의 구조적인 손상검출에 적용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 역해석은 기지의 입력하중과 출력응답 값을 통하여 시스템 변수를 구하는 과정을 거치므로 구조물을 인위적으로 가력한다. 이때 가력으로 인한 구조물의 손상위험이 있고 또한 경제적으로 많은 비용이 소요된다. 따라서 Fig. 1과 같이 상시미진동과 같은 미지의 입력하중에 의한 응답치를 이용하여 구조물을 판별하는 Output Only Analysis 기법들이 개발되어 활용되고 있다.

SI기법은 크게 주파수영역(frequency domain)

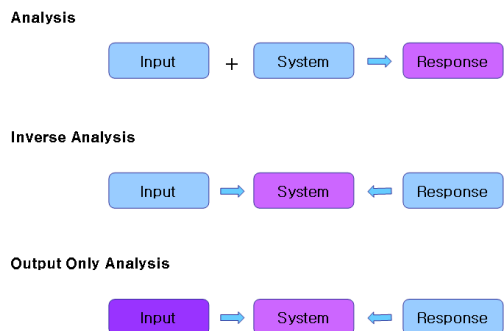


Fig. 1 손상검출을 위한 해석기법

에 바탕을 둔 시스템분석법과 시간영역(Time domain)에 바탕을 둔 시스템분석법으로 나눌 수 있다. 구조물의 동적거동 계측자료를 주파수 영역에서 분석할 경우 많은 양의 정보를 직접처리하는 대신 mode shape, 고유주기 및 damping ratio 등 비교적 간단한 양의 data로 구조계의 강성 및 동특성을 파악할 수 있기 때문에 기존에는 주로 주파수영역에 바탕한 SI기법이 토목구조물을 중심으로 활발히 연구되었다. 그러나 이 방법을 건축구조물에 적용할 경우 구조물은 거시적 차원에서 다루어지며, 아주 소수의 저차모드만이 시스템식별에 활용될 수 있다. 따라서 건축구조물을 구성하고 있는 개별적인 모든 부재의 구조적 특성을 추정하는 것은 어렵고, 층 단위 수준의 추정까지 가능하다. 따라서 매우 심하게 손상된 부재의 위치와 손상정도를 추정하는 것조차 불가능하다. 또한 구조부재가 상당 부분 손상 되어도 고유주기의 변화는 2% 미만으로 발생되어 고유주기로서 손상검출을 할 경우 민감도가 매우 낮으며, 동특성으로는 손상의 유형을 구분할 수 없다. 즉 균열로 인한 강성의 감소나 철근부식으로 인한 강성과 질량의 변화를 구분할 수 없다.

시간영역에서의 동적응답신호의 분석은 구조물의 운동방정식에서 개별부재에 대한 강성과 감쇠비를 직접 변수로 고려하여 역해석을 수행할 수 있다. 따라서 다양하고 복잡한 건축구조물

의 각 부재 단위의 손상추정이 가능하다. 그러나 이는 신호처리 및 분석기법의 신뢰성 확보가 선행되어야 한다.

최근 상시미진동 상태의 동적응답신호로부터 구조물의 손상을 추정하기 위해 입력가진 정보를 랜덤한 확률변수로 정의하고 역해석을 수행할 수 있는 기법이 다양하게 연구되고 있으며, 또한 지문인식, 화상정보 분석에 활용되고 있는 웨이블릿변환 (Wavelet Transformation) 기법을 구조물의 손상 추정에 활용 하고자 하는 연구가 초기단계 수준에서 연구되고 있다.

3. 관련기술개발 및 연구 동향

3.1 건물의 손상추정

국내에서 건축물을 대상으로 손상을 추정하기 위한 연구개발의 실적은 매우 부족한 실정이다. 일부 수행된 연구과제의 경우도 부분적이고 제한적인 범위에 국한되어 실용화단계에 이르지 못하고 있다. 1999년 대한주택공사에서 건교부 산학연 과제로서 “아파트건물의 구조진단용 진동측정시스템개발” 과제를 수행한 바 있으나, 이는 현장에서 진동측정 시 계측이 용이한 장치개발에 주안점을 두고 연구가 수행되었으며, 네트워크화된 시스템의 개발은 이루어 지지 않았다. 또한, 제시된 손상추정 알고리즘에 대해서도 단일벽체의 축소 모형에 의한 단편적인 실험이 수행되었을 뿐 건축물에서의 적용성은 충분히 검증되지 못하였다.

이외에도 건축물을 대상으로 윤정방 등에 의한 “신경망기법 및 부분구조추정법의 적용사례 (1996, 1997, 1999)”가 있다. 이들 연구에서는 프레임 도는 트러스를 대상으로 수치해석결과와 2층규모의 평면강골조를 대상으로 한 실험결과를 이용하여 제안기법의 신뢰성을 검증하고 있

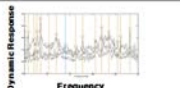
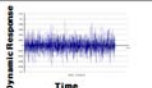
	Frequency Domain	Time Domain
Modal Analysis		
Estimated Parameter	ω_n : Natural Frequency Φ : Damping Ratio Φ : Mode Shape	K : Stiffness γ : Damping Ratio
Damage Detection	Global level Story level	Element level

Fig. 2 진동신호 분석기법 비교

으나, 4, 5차의 고차모드를 이용하고 있어 실제 현장에서 얻을 수 있는 진동모드의 한계를 고려한다면 실용적으로 활용되기에는 어려울 것으로 판단된다.

이외 건축물을 대상으로한 손상추정에 관한 개별 연구논문들은 다음과 같다.

Hong, Kap Pyo 등(1998)은 3차원의 콘크리트 골조를 제작하여, 이에 대한 진동실험을 수행하고 모드해석을 통하여 동적특성을 파악하였다. 동적 특성 중 고유진동수 변화량을 이용하여 구조체의 손상을 추정하고, 해석적 방법과 비교·분석하여, 손상탐지 이론의 3차원 콘크리트 구조물에 대한 적용성을 검증하였다.

Yoon, Sung Kee 등(2001)은 전단형 골조구조물의 손상된 층으로 인한 고유진동수, 모드형상등의 동적특성치의 변화로부터 1차 민감도해석을 통해 손상을 정량적으로 평가하였다. 손상 위치는 손상 전·후의 모드강성의 변화를 이용하여 추정하고, 손상이 추정된 층으로부터 각 층의 민감도 계수를 이용하여 손상정도를 평가하였다.

Han, Dong Ho 등(2003)은 진동계측이 수행된 층 사이에 손상이 위치한다고 가정하고 이 구간의 모드형상을 추정하여 손상위치와 정도를 파악할 수 있는 방안을 제시하였다.

Yoo, Suk Hyeong 등(2013)은 손상 전·후 전단형 건물의 모드형상과 손상 전 구조물의 강성을 이용하여 손상위치를 추정할 수 있는 방안을 제시하고 이를 소형 진동대 실험을 통하여 검증하였다.

3.2 상시미진동을 이용한 손상추정

손상추정을 위한 동적실험은 대체로 강제진동 및 상시미진동 혹은 자연진동 등으로 구분할 수 있다. 종전에는 주로 강제진동을 이용하여 구조

물의 동특성을 파악하였으나, 최근에는 해석기법의 발전, 실험의 편이성, 대형가진장치의 부족 및 경제적 부담 등으로 상시미진동을 이용한 손상추정에 관심이 높아져 가고 있다.

상시미진동 기법은 강제진동과 달리 자연진동에 의하여 미세하게 흔들리는 구조물의 동적응답을 측정하고 이에 근거하여 모달해석을 수행한다. 이러한 측정결과로부터 획득할 수 있는 동특성치는 고유주기, 감쇠비 및 모드형상 등이며 실시간으로 측정신호를 분석할 수 있는 프로그램이 요구된다. 상시미진동 해석은 Output-Only Analysis 인 점이 강제진동과 차이점이다.

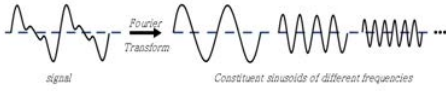
Wang 등은 시간영역에서 입력하중에 대한 정보 없이 시스템을 부재수준까지 판별할 수 있는 방법으로서 단순반복 최소자승법이 을 제안하였다. 이는 추정된 외부입력하중(상시미진동)과 계측을 통하여 확보된 진동응답(변위, 속도, 가속도) 그리고 미지의 구조계(손상된 구조물)에 대한 운동방정식으로부터 반복적 수치해석기법(최소자승법)을 통하여 미지의 구조계 즉 구조부재의 강성을 도출하는 기법으로 별도의 가진 없이 상시미진동에 의한 진동응답으로부터 부재수준의 손상검출이 가능하지만 이는 건물의 모든 부재에 대한 진동 계측값을 알고 있어야만 역해석이 가능하므로 실용적으로 활용하는데 어려움이 있다.

3.3 웨이브렛변환의 활용

일반적으로 구조물의 동적응답 신호처리 기법으로서 FFT변환을 사용하여 왔으나 최근 웨이브렛 변환을 구조물의 동적응답신호분석에 활용하고자하는 연구가 일부 진행되고 있다.

Wavelet 변환은 계측된 신호를 주파수별로 시간의 축에 전개함으로써 특정 event의 발생시간을 알 수 있는 변환이다. 과거 푸리에 변환은

● Fourier Transformation



● Wavelet Transformation

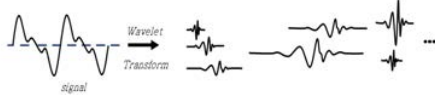


Fig. 3 진동신호분석기법

계측신호를 주파수 축에 전개하여 시간에 대한 정보를 알 수 없었으나, wavelet변환은 기본 wave (mother wave)를 이용하여 이를 scaling하거나 shift하여 원 신호를 시간축 상에 전개하는 변환으로써 시간에 따른 구조물의 특성을 분석할 수 있을 뿐만 아니라 특정주파수 성분을 선택적으로 분석할 수 있어 대용량의 신호처리에도 유용한 기법으로서 초고층 구조물의 동적거동 분석에 필연적인 방법으로 판단된다. 기존의 푸리에 변환은 Fig. 3과 같이 시간영역에서의 구조물의 응답신호를 주파수 축에 전개함으로써 시간에 대한 정보를 알 수 없게 되어 구조물의 손상시간을 알 수 없다.

웨이브렛 변환을 건축물의 손상추정에 활용하기 위한 관련 연구논문들은 다음과 같다.

Lee, Young Wook 등(2000)은 특정 위치에 강성값이 변화된 결함이 있는 보 구조물의 진동 모드에 웨이브렛 변환을 적용하여 결함의 위치를 찾아냄으로써 정상적인 상태의 보에 대한 정보 없이 가장 저차의 진동모드만으로 결함의 위치를 진단할 수 있는 새로운 웨이브렛 변환 결함 진단기법을 제안하였다.

Kim, Han Sang (2007)은 지진하중을 받은

프레임 구조물의 응답 가속도를 웨이브렛팩트 변환(WPT)을 이용하여 분해한 후 인공신경망을 이용하여 각 부재의 손상도를 평가하였다.

Kim, Hyun Su 등(2008)은 지진하중을 받은 프레임 구조물의 응답 가속도를 연속웨이브렛 변환(CWT)을 이용하여 분해한 후 손상 전·후의 정규화된 에너지 곡률(NEC)를 계산하였다. 손상 전·후의 NEC값은 손상된 부재에서 크게 변화하여 손상된 부재를 쉽게 나타내었다.

Yoo, Suk Hyeong 등(2013)은 손상 전·후 전단형 건물의 소형 진동대 실험으로 계측된 동적응답신호를 웨이브렛 변환하여 제안된 손상 위치지표에 적용함으로써 웨이브렛 변환의 활용성을 검증하였다.

4. 맺음말

구조물의 진동응답신호를 이용하여 손상을 추정하기 위해서는 진동계측기술, 신호분석기법 및 분석으로 구한 동특성치에 의한 손상추정알고리즘 등의 연구가 필요하다. 토목구조물에 비하여 구조형식이 복잡하고 진동계측에 어려움이 많아 그동안 건축구조물에 대한 연구가 부족하였으나, 향후 고시기준에 의하여 계측되는 건축 구조물의 진동신호를 분석하여 건물의 건전도를 평가하고 손상을 추정할 수 있는 기법이 실용화될 수 있도록 체계적이고 지속적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

담당 편집위원: 유석형
(경남과학기술대학교 교수)
piter31@gntech.ac.kr