

효과적인 구조물 진단 시스템을 위한 MULTI MODE 계측법의 연구

Study about MULTI MODE Measurement Algorithm For Effective Structural Monitoring System

홍용*·왕고평*·황승호*·박현우*·홍동표†

Hong Yong, Wang Gao-ping, Hwang Seung-ho, Park Hyun-woo, Hong Dong-pyo

Key Words : Structural Health Monitoring, PZT Sensors, Impedance Measurement, Guided Wave, Mode switching.

ABSTRACT

In this paper, we study about the measuring algorithm that can implement Structural Health Monitoring (SHM) more efficiently by two measurement methods using smart sensor. Through the impedance measurement method, the damage condition of structures on wide area is monitored first, and then it changes the mode to guided wave measurement mode by mode switching algorithm when impedance measurement mode detects abnormal signals. Efficient handling of the real-time data would be available by analyzing location and shape of damage through guided wave measurement.

1. 서론

사회 기반 시설 및 건축물, 구조물 등이 대형화되면서 이러한 시설들의 건강상태를 측정하는 구조물 건강 모니터링(SHM) 시스템에 대한 연구는 중요한 분야로서 발전되고 있다. 특히 비파괴 검사의 경우 검사의 편의성, 결과의 신뢰성, 유지 보수비의 절감등의 이유로 많은 계측법이 연구되고 있으며 실제로 산업 현장에 투입되어 사용되고 있다. 압전소자를 이용한 비파괴 검사법은 센서와 액추에이터를 동시에 수행가능한 점, 저렴한 센서 비용, 간단한 계측 알고리즘, 저렴한 구축비용등의 이유로 많은 연구가 진행되고 있다. 특히 점차 대형화 되어가는 구조물을 정밀하게 계측하기 위해서는 고성능의 계측 장비와 전문 인력이 필요한 단점의 해소를 위한 연구가 진행되고 있다. 이 연구에서는 지금까지 작은 구조물의 손상 계측에 대하여 연구가 되어진 몇가지 계측법을 사용하여 대형 구조물을 효과적으로 감시할 수 있는 알고리즘의 개발에 대하여 연구하였다.

2. 손상 탐지 기법

2.1 E/M Impedance Method

PZT와 구조물 사이에 발생하는 상호작용은 그림 1의 1차원 모델과 같이 나타낼 수 있다. PZT와 구조물간의 기계적 상호작용이 확실하게 일어날 수 있도록 고강도 에폭시 접착제를 이용하여 구조물의 표면에 직접 부착하였다. 부착된 PZT는 인가된 교류 전압에 대한 응답으로 축방향 진동을 발생하여 액추에이터로 작용한다. 구조물은 한쪽이 고정되어 있는 외팔보로서 1자유도 시스템으로 나타내진다. 두 개의 이산점에서 상호작용을 나타내는 이러한 가정은 부착된 PZT센서에서 구조물 까지 전달되는 힘의 메커니즘과 같다. 이러한 원리를 나타내는 모델이 그림 1에 나타나 있다.

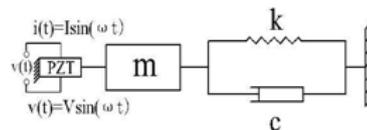


그림 1. PZT가 부착된 1자유도 구조물

† 교신저자; 전북대학교 정밀기계공학과
E-mail : hongdp@chonbuk.ac.kr
Tel : (063) 270-2374, Fax : (063) 270-2374

* 전북대학교 정밀기계공학과

2.2 Guided Wave Method

손상의 위치를 찾기 위해서는 여러 개의 PZT를 이용한 Time Domain의 연구가 필요하다. 유도초음파의 Time Domain 분석법의 알고리즘은 ultrasonic 검사에서 종종 사용하였던 pulse-echo 법에서 출발하였다. 초음파 변환기를 대신하여 여러 개의 PZT 센서가 손상의 위치를 검출하기 위한 알고리즘 연구에 사용되었다. PZT센서 - 액츄에이터는 기본적으로 얇은 PZT patch이다. 유도초음파 분석법을 이용하기 위해서는 PZT에 의해 발생하는 파형에 주의해야 한다. 전파 속도는 시편의 길이와 Initial signal과 반사되는 Echo signal과의 시간차에 의해서 계산 된다. 그래서 우리는 Flaw echo를 추적해서 손상의 위치를 파악할 수 있다. 이러한 방법은 1-D모델에서만 적용된다. 전파를 1-D로 가정할 수 없다면 반사 방법이 복잡해진다.

1-D 종변형에서의 파형들은 순수한 세로저항에 대한 파의 움직임의 유일한 형태가 아니다. 두 번째 형태는 1-D 응력에서의 파의 움직임에 의한 것이고 반면 수직 응력 τ_x 는 x 와 t 만의 함수이고 사라지지 않는 응력 요소이다. 다른 모든 응력 요소는 사라진다. 1-D응력의 경우의 τ_x , ϵ_x 는 $\tau_x = E\epsilon_x$ 의 관계가 있다.[2] 그래서 종파 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial u(x,t)}{\partial t^2} = c_b^2 \frac{\partial u(x,t)}{\partial x^2} \quad (1)$$

$$c_b = \sqrt{E/\rho} \quad (2)$$

여기서 $u(x, t)$ 는 x 와 시간 t 에서의 변위이다. c_b 는 수직파 속도이다(보통 bar속도라고 한다). E 는 탄성계수이고 ρ 는 밀도이다. 식(2)에서 계산되는 종파의 속도는 실험에 의한 값과 비교하는데 사용된다.

3. 모드 스위칭 이론

3.1 임피던스 분석

임피던스 계측을 통한 구조물의 모니터링은 손상의 발생에 대한 판단에 적합한 결과를 보여주고 있다. 임피던스 계측 결과를 분석하는 방법은 피크 주파수의 이동을 이용하는 방법과 특정 주파수 영역대를 선택하여 통계적 분석 방법을 이용하는 방법을 사용하게 된다.

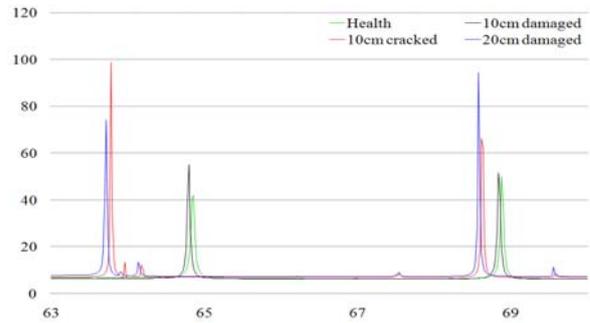


그림 2. 손상된 빔의 임피던스 응답

피크 주파수 이동을 이용하는 방법은 국소적이고 지역적으로 나타나는 손상의 검출에 적합하다. 손상에 의해 구조물에 발생하는 집중응력의 영향으로 구조물의 고유진동수가 변화하면 임피던스 응답의 피크가 발생하는 주파수 값이 변화하게 된다. 주파수의 이동은 주로 저주파영역으로 진행되며 손상이 진행될수록 이동값이 정량적으로 증가함을 알 수 있다.

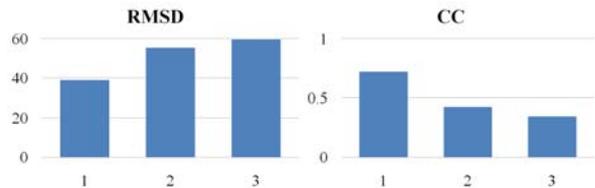


그림 3. 손상된 구조물의 임피던스 통계적 분석방법

통계적 지수를 이용하여 임피던스를 분석하는 방법은 구조물 전반에 걸쳐 발생하는 손상의 검출에 이용하면 좋은 결과를 가져올 수 있다. RMSD, CC지표를 이용한다. 구조물 손상이 진행됨에 따라 각 지표들은 일정하게 변화하게 된다. 통계적 지표를 이용하면 알고리즘의 구현이 쉬우며, 분석을 위해 필요한 시간 또한 단축할 수 있다. 그러므로 통계적 분석 지수는 실시간 모니터링에 적합하다.

3.2 유도초음파 분석

시간 영역의 데이터를 통해서 손상에 의해 변경되는 유도초음파의 진행 경로의 변화를 분석함으로써 손상의 위치를 찾는 것이 가능하다. 이러한 분석법은 높은 정확도로 손상의 위치를 찾을 수 있다. 센서 네트워킹 기술을 적용한다면 손상의 모양과 정도를 파악하는 것이 이론적으로 가능하다. 또한, 짧은 시간의 실험을 몇 번씩 반복함으로써 분석결과의 신뢰성을 증명할 수 있다.

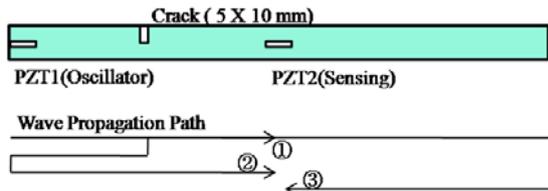


그림 4. 유도초음파의 전파 경로

3.3 모드스위칭 알고리즘

손상에 의한 유도초음파의 전파 경로 변화를 시간 도메인의 피크 점 분석을 통하여 실시하도록 한다. 이 분석법은 높은 정밀도로 손상의 위치를 파악할 수 있으며 센서 네트워킹 기법을 적용하면 손상의 범위 및 형상의 파악이 이론적으로 가능하다는 장점이 있다. 또한 단시간에 수차례의 실험을 반복하여 데이터의 신뢰도를 향상시킬 수 있다.

구조물 손상을 효율적으로 수행하기 위한 프로그램 랩뷰를 이용하여 만들었다. 랩뷰의 상태전이 알고리즘과 이벤트 발생 구조를 기본으로 하여 프로그램을 작성하였으며 신호 수집부, 데이터의 후처리, 측정 데이터의 비교분석, 후처리 데이터의 저장 및 데이터 베이스의 업데이트가 프로그램 내부에서 이루어지게 된다. 각각의 과정은 모두 독립된 모듈식으로 sub-VIs로 이루어졌으며 메인 VI에서 이러한 과정들을 구조물 상태에 따라 처리하도록 하였다. 측정 알고리즘의 가장 핵심적인 부분으로 임피던스 데이터베이스와 유도초음파 데이터베이스의 구축 및 호출이다. 프로그램 외부에서의 데이터 후처리의 편의성을 위해 스프레드시트 형식으로 저장 및 프로그램 알고리즘 구현의 편의성 및 효율성을 고려하여 바이너리 방식으로 저장되는 랩뷰 데이터베이스 형식으로 동시에 저장을 실시하였다.

랩뷰는 각각의 알고리즘을 구현하기에 알맞고 편리한 툴을 제공하고 있으며 차후 모드 스위칭 알고리즘의 구현을 위한 하드웨어를 개발할 때 프로그램의 수정 및 적용이 편리하며 비용이 적게 드는 장점이 있다. 프로그램은 실행되었을 때 구조물의 상태를 건강상태로 인식한다. 프로그램 실행시 최초로 손상상태와 비교하기 위한 현상태(건강상태)의 임피던스 응답과 유도초음파 데이터를 수집한다. 측정된 데이터는 스프레드시트 파일 또는 랩뷰 전용 데이터베이스 포맷으로 저장된다.

건강상태의 데이터가 모두 수집되면 일정 시간 간격을 가지고 임피던스 데이터를 취득하며 구조물의 건강상태를 모니터링 한다. 임피던스 응답은 넓은 범위의 구조물의 특성을 파악할 수 있기 때문에 실시간 모니터링에 적합한 방법이다. 임피던스 응답 분석에

의해 구조물에 손상이 발견되었다고 판단되면 프로그램은 구조물 모니터링 모드를 유도초음파 측정 상태로 전환하며 이때 유도초음파 모드를 통하여 손상의 위치를 정밀하게 파악한다.

(1) 모드 스위칭 알고리즘의 이점

이러한 모드 스위칭 알고리즘의 이점은 복합 구조물 및 대형 구조물에서 큰 장점이 있다. 이러한 구조물들은 복잡한 형상으로 인하여 소수의 센서를 이용하여 정밀한 측정이 곤란하다. 이러한 단점을 개선하기 위하여 우리는 다수의 센서를 유기적으로 연결하여 넓은 범위에서 정밀한 손상의 측정을 수행할 수 있는 센서 네트워킹 방법을 연구 하고 있다[레퍼런스]. 센서 네트워킹을 이용하는 방법은 다량의 데이터가 발생하게 되며 이러한 데이터의 처리를 위해서는 높은 성능의 하드웨어 및 복잡한 연산 알고리즘이 필요하게 된다.

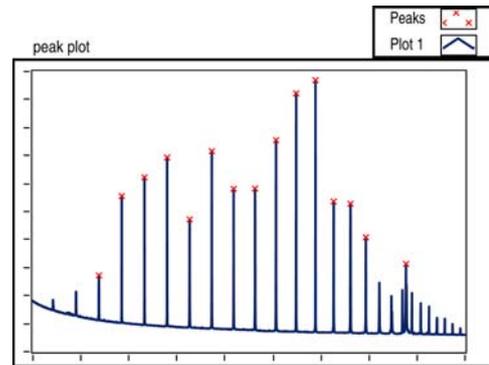


그림 5. 랩뷰를 이용한 임피던스 응답과 피크 감지

모드 스위칭 방법에 의한 멀티모드법을 사용하게 되면 광범위한 구조물의 모니터링을 위하여 임피던스 방법을 사용함으로써 데이터의 양을 줄여 데이터 처리를 위한 하드웨어의 스펙을 줄여 효과적인 모니터링이 가능하다. 또한 직진성을 가지는 임피던스 측정법의 특성을 이용하여 대형 구조물을 몇 개의 섹션으로 나누고 각 섹션별로 하나의 센서를 이용한 임피던스 측정에 의한 모니터링 및 유도초음파를 이용한 손상의 추적을 이용하면 적은 수의 센서를 사용하여 넓은 범위의 정밀한 측정이 가능하다.

4. 결론

본 연구를 통하여 구조물 손상 측정을 위한 효율적인 측정 알고리즘을 알아보았다. 임피던스 측정에 의한 손상 발견과 유도초음파에 의한 손

상 위치 추적의 효율적인 계측이 가능했으며 랩 뷰를 이용한 계측 프로그램의 제작 및 실험의 수행을 통하여 손상의 발견 및 추적이 효과적으로 수행됨을 알 수 있었다.

멀티모드 스위칭 기법을 더욱 효과적으로 발전 시키기 위해서 임피던스와 유도초음파의 측정을 같이 수행할 수 있는 측정 모듈의 개발 및 모듈의 소형화 및 신뢰성 향상에 대한 연구를 수행하여야 할 것이다.

후 기

This work was supported by the Korea Science and Engineering Foundation (KOSEF) grant funded by the Korea government(MOST) (No. R01-2007-000-10941 -0)

참 고 문 헌

- (1) Kazuhisa K., 1998, "Structural Health Monitoring using Multiple Piezoelectric Sensors and Actuators", Faculty of Virginia Polytechnic Institute, April
- (2) J. D. Achenbach, 1975, "Wave Propagation in Elastic Solids", North-Holland Publishing company
- (3) V. Giurgiutiu, A.N. Reynolds, and C.A. Rogers., 1999, "Experimental Investigation of E/M Impedance Health Monitoring of Spot-Welded Structural Joints", Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 10, p802-812.
- (4) Victor G. and Andrei N. Z., 2002, "Embedded Self-Sensing Piezoelectric Active Sensors for On-Line Structural Identification", Journal of Vibration and Acoustics, Vol. 124
- (5) Victor G., Andrei N. Z. and Jing J. B., 2002, "Piezoelectric Wafer Embedded Active Sensors for Aging Aircraft Structural Health Monitoring, Structural Health Monitoring", Sage Publications
- (6) Daniel M. Peairs, Gyuhae Park and Daniel J. Inman., 2004, "Improving Accessibility of the Impedance-based Structural Health Monitoring Method", Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. p129-139, 15-February
- (7) Gyuhae Park, Harley H. Cudney and Daniel J. Inman., 2001, "Feasibility of using impedance-based damage assessment for pipeline structures", Earthquake Engng Struct. Dyn. 30; 1463-1474