

구조물 손상 위치 및 크기 평가를 위한 압전소자 응용기술

Application Technique of PZT Patches to
Estimation of Crack Location and Size in Structures

홍동표†·홍용*·왕고평*·한병희*·황승호*·김영문**

Hong Dong-pyo, Hong Yong and Wang Gao-ping and Han Byeong-hee
and Hwang Seung-ho and Kim Young-moon**Key Words** : NDT(비파괴 검사), PZT Patch(압전소자), Guided Wave(유도전파), Wavelet Transform(웨이블렛 변환),
Damage Detection(손상 검출).

ABSTRACT

Non-Destructive Health Monitoring using PZT sensors is a major concern and has great significance for research about NDT (Non-Destructive Test). In this paper, we study about the guided wave measurement method using PZT sensors to find cracks and estimate locations. Two aluminum beams bonded with PZT sensors were tested for estimating about the guided wave propagation characteristics and shape of each beam are decided in terms of analytical purpose. NI Signal Acquisition Device and specially designed LabVIEW VI program were used for data acquisition and analysis. The measured data were progressed by using a high-pass filtering.

기 호 설 명

x : Length(mm) t : Time(msec)
 c_b : Longitudinal wave speed(var velocity)
 E : Young's Modulus
 ρ : Mass density

1. 서 론

현대 사회에서 건축 구조물 및 사회 기반시설의 노후화 상태 평가는 매우 중요한 관심사 중 하나이다. 현재 미국, 유럽을 비롯한 대부분의 선진 국가의 건축물 및 기계 구조물은 수명이 거의 끝나가고 있거나 이미 끝난 상태에 있으며, 이러한 구조물의 붕괴 시에는 많은 인명 및 물적 피해가 발생하게 된다. 또한 새로운 구조물에 대한 안전 검사 또한 매우 중요한 이슈로서 이러한 건축 구조물의 안전

성 및 노후화 평가 기술에 대한 많은 기술이 개발 되어졌으며, 현재 이러한 기술은 스마트 구조물의 개발로 진행되고 있다. 본 연구에서 주목한 압전소자는 크기가 작고 가벼워 구조물에 쉽게 부착가능하며 구조물 상태 평가를 위한 센싱과 가진을 하나의 소자로 모두 구현 가능한 장점을 가지고 있다. 또한 작은 크기로도 높은 센싱 능력을 발휘할 수 있어, 기계·항공 및 건축 분야등 많은 분야에서 관련 기술 개발 및 연구가 진행되고 있다. 본 연구는 스마트 구조물의 구축을 위한 NDT 기술의 하나인 압전소자와 유도초음파를 이용한 구조물의 손상 위치 및 크기 분석에 대한 연구를 진행하였다.

2. 배경지식

2.1 Guided Wave Method

압전센서를 이용한 손상 추적 방법으로서 센서와 액추에이터로 작동하는 압전센서를 측정 대상물에 다수 부착하여 시간영역(Time Domain)을 이용하는 방법을 고려하였다. 이러한 방법은 초음파 탐상법의 Pulse-Echo 측정법과 측정 알고리즘이 유사한 방법이며, 초음파 가진기를 대신하여 다수의 압전소자를 이용하는 가진 방법이 다르다.

압전소자를 이용하여 가진 신호를 발생하게 되고 시험편의

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

* 전북대학교 정밀기계공학과

** 전북대학교 건축공학과

물성치와 길이를 고려한 전파속도를 계산하여 Time domain에 나타난 Initial echo와 Back echo를 추정 (tracking)하여 손상의 위치를 찾아내게 된다. 그러나 다자유도계에서는 Time Domain에 나타나는 echo의 추정이 힘들기 때문에 이 방법은 1자유도계의 모델에만 적용이 가능하다 [1].

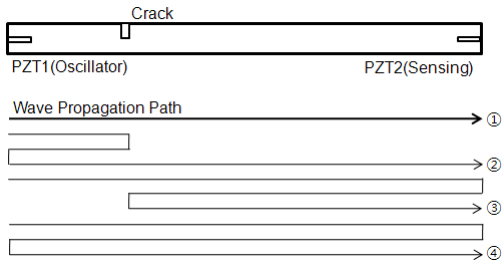


그림 1. Guide Wave의 구조물에서의 전파 경로

1자유도계의 구조물을 지나는 전파는 1자유도계의 수평 변형과 1자유도 응력으로 구성된다 [2]. 수평응력 τ_x 는 시간과 변위만의 함수이며 다른 응력과 달리 전파과정에서 소멸되지 않는다. 변형율과 응력의 관계는 1자유도계에서 $\tau_x = E \epsilon_x$ 로 정의되며 이를 이용하면 다음과 같이 구조물을 지나는 전파의 속도를 구할 수 있다 [2].

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

$$c_b = \sqrt{E/\rho}$$

$u(x,t)$ 는 시간 t 와 위치 x 의 변위이다. 위 식을 사용하여 실험으로 구해진 데이터를 검증한다.

2.2 측정 방법

(1) 측정 장비

본 실험을 위해서 신호수집 장비로 NI 4472가 사용되었다. 압전센서에 가진 신호를 발생시키기 위해서 Agilent 33250A 임의함수 발생기를 사용하였으며 Laptop 컴퓨터와 GPIB를 사용하여 통신 및 제어를 실시하였다.

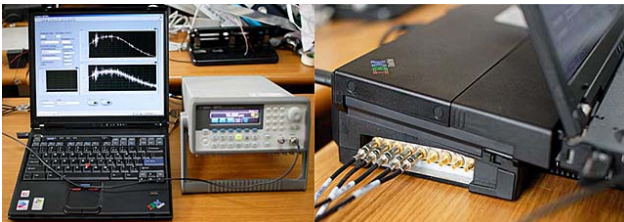


그림 2. NI4472가 내장된 Laptop과 함수발생기

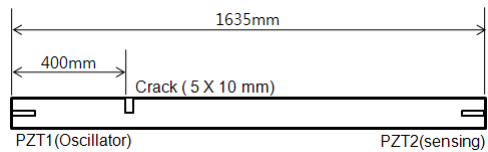
측정 장비의 제어 및 신호수집 및 분석을 위해서 LabVIEW를 이용하여 프로그래밍 된 VI를 사용하였다. VI는 신호 수집의 효율을 높이는 것을 우선으로 하여 최대한 간결하게 프로그래밍 되었으며 신호 수집 - 신호 처리 - 측정 신호의 표시 - 데이터의 저장의 순서로 처리된다. 측

정된 신호는 VI의 프론트 블록의 그래프를 사용하여 1차 분석을, 데이터의 저장 후 스프레드시트 프로그램을 이용하여 세부적인 분석을 실시하였다.

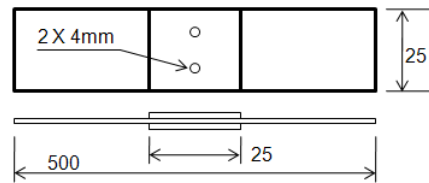
(2) 시험 구조물

우리는 Guided Wave의 전파 경로를 알아보기 위해 다음과 같은 시험편을 준비하였다.

모든 시험편은 굽힘 모멘트의 영향을 상쇄하고 종파만을 발생시키기 위하여 가진을 위한 압전 센서를 시험편의 양면에 대칭이 되도록 부착하였으며 센서의 부착에는 에폭시 분드를 사용하였다.



(a) 시험편 I - 일자형 보



(b) 시험편 II - 2개의 홀과 볼트로 체결되는 구조물

그림 3. 시험편

(3) 측정 방법

함수 발생기 33250A를 사용하여 pulse width 10 μsec , 10Vpp의 Impulse 신호를 압전센서에 인가하였으며 신호수집을 위한 트리거링을 가진 센서의 신호를 이용하여 실시하였다.

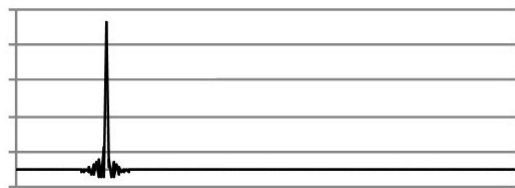


그림 4. 가진 신호 (Impulse, 10Vpp)

측정 데이터는 102.4kHz의 샘플링 비율로 시험편에 따라 0.25msec와 0.5msec 동안 수집하여 표시하였다.

3. 측정 결과

3.1 Daubechies 4 Wavelet Transform

실험을 통하여 측정된 데이터는 결함에 의해 반사된 펄스의 크기가 작아지고, 긴 거리를 이동하면서 분산에 의해 크기 및 형태의 왜곡뿐만 아니라 잡음에 의해 펄스 정보의 추출이 어렵게 나타나는 경우가 있었다. 따라서 측정된 신호

의 신호처리를 실시하였다.

db4(Daubechies 4) 웨이블릿은 이산웨이블릿 분석을 실용화한 Orthonormal 웨이블릿이다. 단시간에 발생하는 과도현상의 검출에 적합하며, 4개의 Tap을 가지고, 웨이블릿 길이가 8샘플인 Scaling 필터로서 Scaling 함수 계수는 다음과 같다[5].

$$h_0 = (1 + \sqrt{3}) / 4\sqrt{2} \quad h_1 = (3 + \sqrt{3}) / 4\sqrt{2}$$

$$h_2 = (3 - \sqrt{3}) / 4\sqrt{2} \quad h_3 = (1 - \sqrt{3}) / 4\sqrt{2}$$

입력된 데이터를 각 단계별로 Scaling 함수를 적용시키게 된다. 웨이블릿 함수 계수 값은 다음과 같이 된다.

$$g_0 = h_3, \quad g_1 = -h_2, \quad g_2 = h_1, \quad g_3 = -h_0$$

Scaling과 웨이블릿 함수는 계수와 4개의 데이터 값의 내적으로 계산되며 그 식은 다음과 같다.

db4 scaling function :

$$a_i = h_0 s_{2i} + h_1 s_{2i+1} + h_2 s_{2i+2} + h_3 s_{2i+3}$$

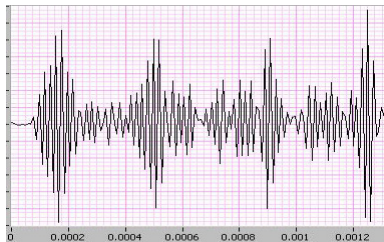
$$a[i] = h_0 s[2i] + h_1 s[2i+1] + h_2 s[2i+2] + h_3 s[2i+3]$$

db4 wavelet function :

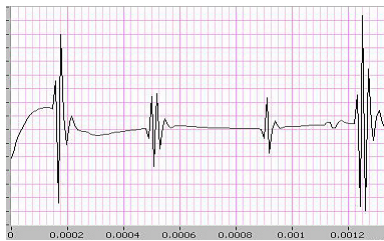
$$c_i = g_0 s_{2i} + g_1 s_{2i+1} + g_2 s_{2i+2} + g_3 s_{2i+3}$$

$$c[i] = g_0 s[2i] + g_1 s[2i+1] + g_2 s[2i+2] + g_3 s[2i+3]$$

실제 Wavelet 변환은 labview의 Wavelet VI를 통해 이루어졌으며 그림 5를 통하여 필터 적용의 효율성을 관찰할 수 있다.



(a) Measured Data



(b) Processed Data

그림 5. Wavelet 변환의 적용

3.2 측정 데이터의 분석

(1) 시험편 I

그림 6에 시험편 I의 건강상태와 손상상태의 Time Domain이 나타나있다. 건강상태의 그래프에 나타나는 피크의 시간을 이용하여 시험편에서의 전파의 속도를 계산하면 다음과 같다.

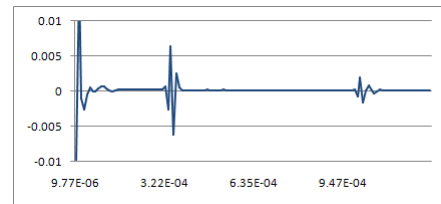
$$c_{meas.} = L / t_1 = 1.635 / 0.330 \times 10^{-3} = 4955 \text{ [m/s]}$$

건강상태에서 계산된 구조물의 전파속도 4955m/s를 이용하여 손상상태의 그래프에 나타난 피크의 변화를 추종해 보자. 첫 번째 피크를 지나 나타나는 두 번째와 세 번째 피크는 그림 1에 나타난 전파 경로에서 ②와 ③에 해당하는 피크이다. 건강상태에서는 없는 피크로 시험편의 상태가 변화하였음을 알려준다. 피크 ②의 시간 값 t_2 를 이용하여 손상의 위치를 역으로 계산하면 다음과 같다.

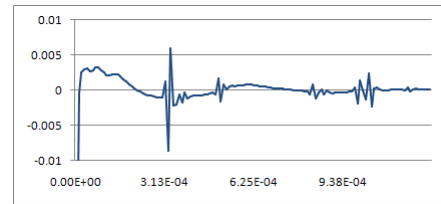
$$d = c_{meas.} (t_2 - t_1) / 2$$

$$= 4955 \times (0.490 - 0.330) / 2 = 396.4 \text{ mm}$$

실험에 의해 구해진 손상의 위치는 실제 손상의 위치와 비교하였을 때, 뒤에 설명하게 될 오차범위를 고려하면 매우 정확하게 나왔음을 알 수 있다.



(a) 건강상태



(b) 손상상태(5×10mm 일자형 크랙)

그림 6. 시험편 I의 측정데이터(sec)

(2) 시험편 II

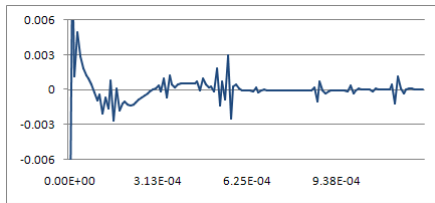
두 번째 시험편을 통하여 구조물의 구조 결함을 볼트 풀림으로 시뮬레이션 하여 Guided Wave 측정법을 적용한 평가의 가능 여부를 실험하였다.

25×500mm의 구조물의 중앙에 2개의 홀을 통하여 25×25mm의 부재를 체결한 상태를 건강상태로 하며, 볼트가 풀렸을 때를 손상상태로 가정하여 데이터를 수집하였다. 볼트의 체결력은 볼트가 더 이상 움직이지 않는 상태까지 조여주는 것으로 하였다.

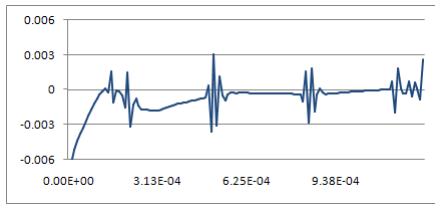
그림 7의 (a)와 (b)의 비교를 통하여 시험편 II의 상태 변화를 유추할 수 있다. 부재의 체결력 변화에 의한 피크의 감쇠와 반사 펄스 신호의 이동이 관찰되었다. (c)를 통하여 볼트 및 부재를 제거 했을 때 펄스의 진폭 및 주기의 변화를 관찰할 수 있다. 부재의 영향에 의한 펄스 진폭의 감소 영향이 없어지고 2개의 홀에 의한 새로운 피크가 주기적으로 관찰되고 있음을 알 수 있다. 이를 통하여 시험편에 부재가 높은 체결력으로 체결되어 있으면 펄스의 진폭에 영향을 주며 부재의 영향으로 새로운 피크가 출현되고 체결력이

약화 되었을때 볼트의 영향으로 시험편의 원형 손상(볼트 체결 구멍)의 검지가 어렵다는 것을 알 수 있다. 또한 부재 및 볼트의 제거 후 실험 결과에 의해 시험편의 원형 손상의 존재 및 위치를 정량적으로 평가가 가능함을 알 수 있다.

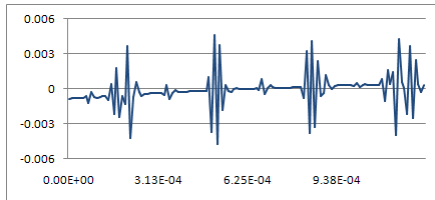
그림 7에는 나타나 있지 않지만 건강상태에서는 부재에 의한 응력 집중에 의해 피크의 출현이 1.5ms이후에는 나타나지 않았으나 부재의 영향을 덜 받는 두 가지 손상상태에서는 2.5ms까지 가진 신호에 의한 피크가 관찰되는 차이점도 발견할 수 있었다. 또한 압전 센서에 의해 측정된 데이터의 진폭 값이 차이가 있는데 이러한 결과는 두께가 얇은 시험편 I이 두께가 두꺼운 시험편 II에 비해 같은 가진 신호에서 상대적으로 가진이 쉽게 이루어진 결과로 추정된다. 그러므로 측정 센서는 물론 가진을 위한 압전소자의 크기는 대상 측정물의 Dimension을 고려하여 결정하여야 한다.



(a) 건강상태



(b) 손상상태(볼트 풀림)



(c) 손상상태(볼트 및 부재의 제거)

그림 7. 시험편 II의 측정 데이터(sec)

(3) 오차범위의 고찰

아날로그 신호인 Time Domain을 디지털 신호로 수집하는 과정에서 측정된 데이터는 이산화 과정을 거친다. 이산화 과정은 측정 장비의 Re-Sampling Rate에 의해서 정확성이 결정되며 이는 측정 데이터의 오차 범위와 직접적으로 연관된다. 측정에 사용된 NI4472는 $102.4\text{ks/s} = 9.765\ \mu\text{sec}$ 의 Re-Sampling Rate를 가지고 있다. 실험에 사용된 시험편의 전파속도 $c_{meas.} = 4955\text{[m/s]}$ 를 고려한 손상 측정 실험의 오차범위는 다음과 같다.

$$\Delta d = (4955 \times 10^3) \times (9.765 \times 10^{-6}) = 48.39\text{[mm]}$$

시험편 I에서 측정된 손상의 위치의 추적 결과 396.4mm

는 앞서 고려한 오차범위 값에 의해 타당한 결과임을 알 수 있다. 오차범위를 줄이기 위해서는 높은 Re-Sampling Rate를 가지는 신호 수집 장비를 사용해야 한다는 점이 Guided Wave 측정법의 단점이다.

4. 결론

본 연구를 통하여 압전소자를 이용한 구조물의 손상검지를 위한 Guided Wave 측정법의 적용법을 알아보았다. 측정된 데이터의 분석을 통하여 건강상태의 측정 결과와 구조물의 형상을 바탕으로 구조물을 구성하는 재료의 손상과 구조 결함 여부를 검지할 수 있음을 알 수 있었다.

특히 Guided Wave는 구조물을 통하여 전파되는 전파의 Echo를 측정하는 방법이므로 실험에 사용한 알루미늄 구조물뿐만 아니라 최근 각광받는 복합소재에 적용이 쉽게 가능하다는 장점이 있다. 다만 정확한 손상의 분석 및 측정 데이터의 재현성 확보를 위해서는 신호 수집 장비의 높은 성능을 요구하게 되므로 범용 측정 장비를 사용하게 되면 실제 구조물에 적용 가능한 측정 솔루션의 제안이 어렵다는 단점의 개선을 위한 연구가 필요하다.

후기

본 연구는 MOCT(건설교통부)에서 주관하는 최첨단 도시개발계획 및 MOST(과학기술부)에서 주관하는 NRL사업의 일환으로 시행되었습니다.

참고 문헌

- (1) Kazuhisa K., "Structural Health Monitoring using Multiple Piezoelectric Sensor and Actuators", Faculty of Virginia Polytechnic Institute, April 1998
- (2) J. D. Achenbach, "Wave Propagation in Elastic Solids", North-Holland Publishing Company, 1975
- (3) G. Park, H. Sohn, R. Farrar, D. J. Inman., "Overview of piezoelectric impedance-based health monitoring and path forward", The Shock and Vibration Digest, Vol. 35, No. 6, 2003, p451-463.
- (4) G. Park, H. Cudney, D. J. Inman., "Impedance-based health monitoring of civil structural components", ASCE, Journal of Infrastructure Systems, 2000, p153-160.
- (5) 김충락 등, 1999, "웨이브렛의 기본이론과 통계에의 응용", 대우학술총서 438, 도서출판 아르케, 5장.