

압전소자를 이용한 손상계측기술에 관한 기초연구

Basic research for Health Monitoring Technique with PZT Patches

하 남^{*1)} · 채관석^{**2)} · 홍동표^{***3)} · 채희창^{****4)}

Nam Ha, Kwan-Suk Chae, Dong-Pyo Hong, Chae Hee Chang

Key Words : Structural Health Monitoring, Impedance analysis method, PZT Patches, Piezoelectric Impedance Response, Damage Assessment Indice

ABSTRACT

This work presents a study on development of a practical and quantitative technique for assessment of the structural health condition by piezoelectric impedance-based technique associated with longitudinal wave propagation method. The bolt fastening condition is adjusted by torque wrench. In order to estimate the damage condition numerically, three damage indices, impedance peak frequency shift ΔF , peak amplitude ratio δ and quality factor ratio γ , are proposed in this paper. Furthermore, an assessment method is described for estimation of the damage by using these three damage indices.

기호설명

- Y : 어드미턴스
- Z_a : 압전 소자의 기계적 Impedance
- Z_s : 구조물의 기계적 Impedance
- Y_{xx}^E : 압전 소자의 전계가 $0(kV/m)$ 때의 신장 탄성률
- d_{3x} : 임의의 x 방향에 대한 등가 압전 정수
- ϵ_{33}^T : 유전정수
- δ : 압전 소자의 유전손실율
- w_a, l_a, h_a : 압전 소자의 폭, 길이, 두께

1. 서론

다리나 철탑 등의 거대구조물은 주로 사람의 생활가까이 설치되어있다. 이들이 붕괴하면 많은 인명피해가 발생하게 되기 때문에 붕괴를 막기 위해서 손상을 조기 발견해 대책을

제시한 필요가 있다. 우리나라에서 발생했던 1994년 성수대교 붕괴사고, 서울 종암동 육교붕괴사고, 이듬해인 1995년 삼풍백화점 붕괴사고, 일본의 1998년 송전탑 붕괴사고, 미국의 1984년 샌프란시스코 오클랜드만 교량붕괴 등이 이러한 손상 계측기술의 필요성을 잘 말해주고 있다.

구조물 손상의 종류로서는 강재의 균열이나 부식, 볼트의 해이해짐이나 탈락 등이 있다. 강재의 균열이나 볼트의 해이해짐은 도장에 의해 외부로 드러나지 않기 때문에 조기 발견이 어렵고, 더욱이 강재의 균열은 금속 피로의 경우가 많고, 재료가 부식되면 강도가 현저 저하되어 이로 인한 파괴의 위험을 수반하게 된다. 여기서 강재의 내부 응력이나 부식 및 손상 상태, 볼트 조임상태 등을 정상적으로 검사할 필요성이 제기되고 있다.

손상 평가에 적합한 재료중의 하나가 압전소자인데 이는 센서와 액추에이터로서의 기능을 동시에 가지고 있어 Impedance 계측 방법에 적용하기가 매우 용이하다.

본 연구에서는 구조물의 초기 손상을 조기 발견할 수 있는 헬스 모니터링 기술의 확립을 목표로 하여 구조물의 초기 손상을 정량적으로 계측평가 하는 기술을 개발하기 위한 기초적인 자료를 제시하고자 한다.

1) 소속 : 전북대학교 정밀기계공학과
E-mail : gkska@hotmail.com
Tel : (063) 270-2374, Fax : (063) 270-2388

2) 전북대학교 기계설계공학과
3) 전북대학교 정밀기계공학과
4) 전북대학교 기계설계공학과

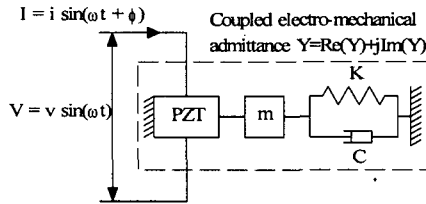
2. Impedance 계측 방법

2.1 압전소자를 이용한 Impedance 계측법의 개념

구조물에 어떠한 요인으로 손상이 발생 하면 건전시에 비해 구조물의 강성이나 감쇠를 등이 변화하고, 그 결과 구조물의 기계적 Impedance가 변화하게 된다. Impedance 계측법은 손상의 발생과 전기적 Impedance의 변화의 관계로부터, 기계적 Impedance의 계측을 실시하여 구조물의 건강 상태(손상의 유무)를 평가하고자 하는 것이다.

그러나, 일반적으로 미소한 기계적 Impedance의 변화를 고정밀도에 계측 하는 것은 어렵기 때문에 [그림 1]에 나타낸 압전 소자를 붙여 있 구조물의 모델을 생각하고, 압전 소자의 어드미턴스(전기적 Impedance의 역수)는 구조물 및 압전 소자의 기계적 Impedance임을 이용해 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$Y = i\omega \frac{w_a l_a}{h_a} \left[\epsilon_{33}^T (1 - i\delta) - \frac{Z_s(\omega)}{Z_s(\omega) + Z_a(\omega)} d_{3x}^2 Y_{xx}^E \right] \quad (1)$$



[그림 1] 압전 소자를 붙인 구조물의 일자유도 모델

[그림 1]에서, 손상이 생기지 않으면 압전 소자의 기계적 Impedance는 일정하므로, 구조물의 기계적 Impedance의 변화가 지배적이 된다. 따라서, 구조물의 기계적 impedance의 값은 거기에 붙인 압전 소자의 전기적 Impedance의 계측을 통해 얻을 수 있다. 본 연구에서는 「구조물의 손상」과 「기계적 Impedance」, 그리고 「압전소자의 전기적 Impedance」의 관계에서 압전 소자의 전기적 Impedance를 계측 하는 것으로 구조물의 손상 상태를 평가하고자 한다.

2.2 압전소자를 이용한 Impedance 계측방법

기초 실험으로서 구조물의 기본 요소인 보를 사용하였다[그림 2]. 경계 조건이나 외부 가진에 의한 영향을 가능한 줄이기 위해, 보를 발포 합성수지로 지지하여 양단을 자유단으로 하였고, 서로 탄성파판 발생되도록 보의 표리 대칭의 위치에 압전 소자가 1매씩 붙여, 2매의 소자를 동위상으로 구동시켰다. 계측 시스템의 개략도를 [그림 3]에 나타냈다. 압전 소자의 Impedance 계측은 Impedance 분석기(HP4192A)를 사용했다. 또, 정량적 평가방법을 확립하기 위해, 가상 손상으로서 U자형의 말굽자에 볼트너트 장치를 한 간단한 억압 장치를 사용해, 구조물에 부하하는 응력을 억압 나사에 토크를 정량적으로 주는 것으로 조정할 수 있도록 하였다.

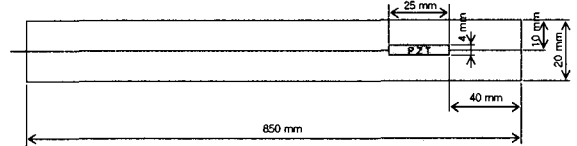
[그림 4]은 [그림 3]의 보에 대해서 압전 소자에 인가한 전압

을 1~100 kHz까지 가졌을 경우의 Impedance실부의 응답이다. 여기서, 보의 양단은 자유단이므로 그 세로 진동의 기본 주파수는

$$f_n = \frac{c}{2l} n = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

에 의해 구할 수 있다. 여기서, c는 대들보의 내부를 전해지는 위상 속도이며, 재료의 주파수는 탄성계수 E와 밀도로 정해진다. 실험에 쓰인 알루미늄 보의 물성치는 Table1과 같고 경계조건을 양단 자유로 하면 식 (1)에 의해 그 고유 주파수는 $f_n = 3.01n$ (kHz)가 된다.

또한 Impedance 분석기에 의해 측정된 Impedance 신호에는 실부와 허부가 있지만, Impedance실부의 신호가 구조물의 기계적 Impedance의 변화에 대해서 고감도이기 때문에, Impedance실부의 파형을 사용하였다.



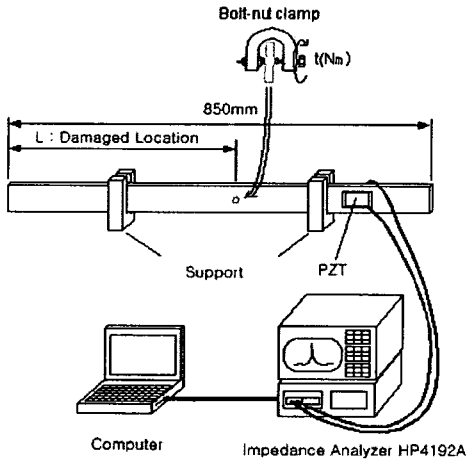
[그림 2] 실험에 사용된 알루미늄 보와 표면에 부착된 압전 소자

[Table 1] 알루미늄 보와 압전소자의 물성치

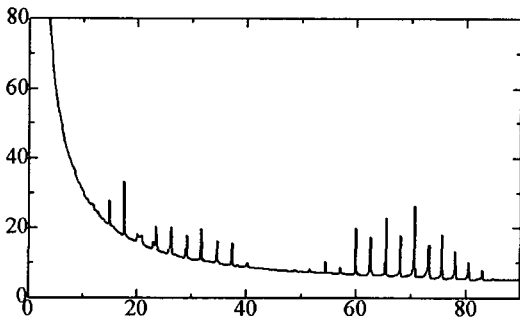
Property of Aluminum beam element	
Length l_s (mm)	850
Width w_s (mm)	25
Thickness h_s (mm)	2
Density ρ_s ($\times 10^3 \text{ kg/m}^3$)	2.70
Young's Modulus E_s ($\times 10^{10} \text{ N/m}^2$)	7.06
Piezo-electric element (C-6)	
Length l_a (mm)	25
Width w_s (mm)	4
Thickness h_s (mm)	0.3
Density ρ_s ($\times 10^3 \text{ kg/m}^3$)	7.4
Relative dielectric constant ϵ_{33}^T	2000±300
Piezo-electricity constant d_{31} ($\times 10^{-12} \text{ m/V}$)	-195
Young's Modulus Y_{11}^E ($\times 10^{10} \text{ N/m}^2$)	5.8
Induced loss $\tan \delta$	2.1
Frequency constant N_{31} (Hz · m)	1400

[그림 3]은, 손상이 있는 것으로 가장한 위치에 억압 장치를

달아 일정 토크($T=1.0 \text{ Nm}$)를 가해 구조물의 응답을 측정 한 Impedance 측정장치의 구조도이다. 이 장치를 통해 [그림 4]와 같은 세로탄성파의 파형을 얻었으며, 이것으로부터 Impedance의 변화를 계측, 미소한 응력변화에 의한 파형변화를 계측하여 미소 손상의 존재를 예측하는 것이 가능하다.



[그림 3] Impedance 측정장치의 개략도



[그림 4] 알루미늄 보의 Impedance 파형

일반적으로 Impedance 계측법을 이용했을 경우, 구조물에 발생한 손상이 가져온 Impedance의 변화는 측정 주파수대역에 따라서 다르다. 때문에, 어느 주파수 대역을 사용할지가 계측 정밀도와 평가 신뢰성에 크게 영향을 준다.

압전 소자 길이에 의한 진동 모드를 생각해 보면 [그림 4]에 나타낸 것과 같이 보의 양면에 압전소자가 부착된 경우 보의 고유 진동수를 살펴볼 수 있다. 압전 소자와 알루미늄 보는 각각 단면적일 모양, 재질이 균일하며, 압전 소자가 알루미늄 보에 완전하게 고정되고 있어 동일 단면에 있어서의 진동량은 동일하다고 가정하였다. 알루미늄 보의 길이 방향을 x 축, x 방향 변위를 $u(x, t)$ 로 놓고, 보의 단면적을 A_s , 세로 탄성 계수를 E_s , 단위 체적당의 질량 ρ_s , 또한

압전 소자의 단면적을 A_a , 세로 탄성 계수를 E_a , 단위 체적당의 질량을 ρ_a 로 놓으면, 그 운동 방정식은 식(3)과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{(A_s E_s + 2A_a E_a)}{(\rho_s A_s + 2\rho_a A_a)} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (3)$$

따라서 알루미늄 보의 양면에 붙은 압전소자로 인하여 전해지는 진동모드의 위상 속도 c 는 식(4)와 같이 쓸 수 있다.

$$c = \sqrt{\frac{A_s E_s + 2A_a E_a}{A_s \rho_s + 2A_a \rho_a}} \quad (4)$$

그런데, 보의 양면에 압전소자가 부착된 부분에 정재파가 존재한다고 하면, 그 고유 주파수는 양단의 경계 조건에 의존하므로, 고유 주파수가 가장 높은 경계 조건일 양단 자유 또는 양단 고정, 양단 고정의 경우와 가장 낮은 조건일 일단 고정 일단 자유의 경우에 대해 고유 주파수를 산출하면 각각 식(5)과 (6)과 같이 쓸 수 있다.

$$f_n = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{A_s E_s + 2A_a E_a}{A_s \rho_s + 2A_a \rho_a}} \quad n = 1, 2, 3 \quad (5)$$

$$f_n = \frac{(2n-1)}{4l} \sqrt{\frac{A_s E_s + 2A_a E_a}{A_s \rho_s + 2A_a \rho_a}} \quad n = 1, 2, 3 \quad (6)$$

[Table 1]에 나타낸 압전 소자 및 대들보의 물성치를 식 (5)과 식(6)에 대입해 산출한 일차 모드의 고유 주파수는 각각 $f_n = 49.75 \text{ kHz}$ 와 $f_n = 99.50 \text{ kHz}$ 였다. 즉, 실제 구조물을 생각했을 경우, 주파수 영역 49 ~ 100 kHz 에 대해 압전 소자의 출력이 가장 큰 일을 예상할 수 있고, 이것은 [그림 4]의 임피던스 응답 결과와도 일치한다. 따라서, 본 연구에서는 주파수역 49 ~ 100 kHz에 있어서의 Impedance 치가 가장 큰 파형의 전후의 것을 대상 주파수역으로 해, 손상의 정량적인 평가를 수행하였다.

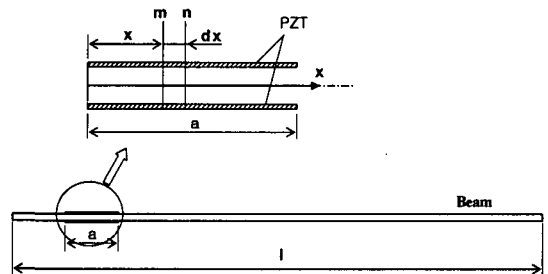


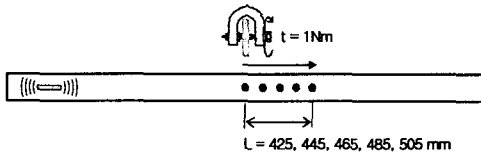
그림 4 빔과 2개의 PZT 패치로 구성된 보의 분석모델

3. 구조물의 손상평가 방법

3.1 손상위치의 평가

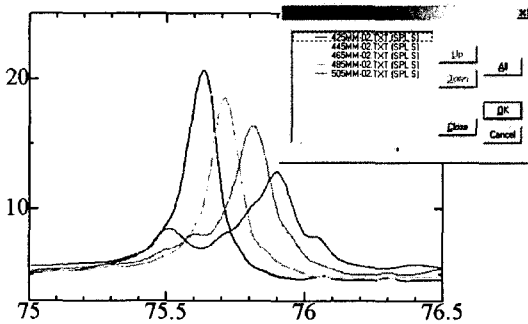
하중위치를 변화시켜가며 임피던스 변화를 측정할 실험을

[그림 5]에 나타냈다. 하중 응력의 크기를 체결 토크 1.0 Nm로 일정하게 하고 응력이 부가된 위치를 변화시켜 임피던스를 측정하였다. 응력 하중의 위치는 각각 L=425, 445, 465, 485, 505mm로 하였다.



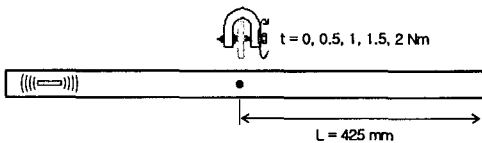
[그림 5] 하중위치에 따른 임피던스 측정

[그림 6]에 건강한 구조물과 하중의 위치를 달리했을 때, 21차 모드의 변형분포 예이다. 그림을 보면 하중의 위치에 따라 피크점이 오른쪽으로 이동하였고(ΔF), 파형의 크기(A/A_0)도 선형적으로 줄어든 것을 알 수 있다.



[그림 6] 하중위치에 따른 Impedance 파형변화

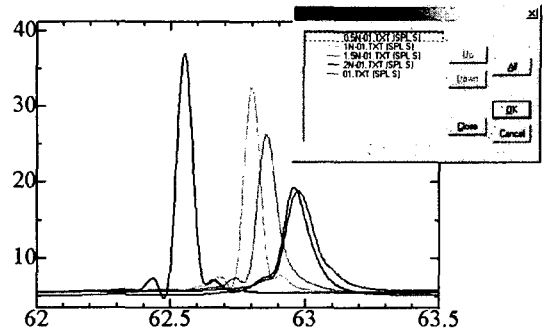
3.2 손상정도의 평가



[그림 7] 하중 크기에 따른 임피던스 측정

하중크기를 변화시켜가며 임피던스 변화를 측정할 실험을 [그림 7]에 나타냈다. 응력이 부가된 위치를 일정하게 하고 하중 응력의 크기를 0.5Nm에서 2Nm까지 0.5Nm씩 변화시켜 임피던스 변화를 측정하였다.

[그림 8]에 건강한 구조물과 하중의 크기에 따른 17차 모드의 변형분포 예이다. 여기에서도 하중 응력이 클수록 피크점이 오른쪽으로 이동하였고(ΔF), 파형의 크기(A/A_0)도 선형적으로 줄어든 것을 알 수 있다.



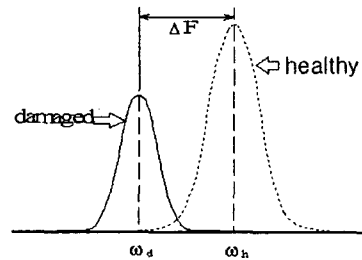
[그림 8] 하중크기에 따른 Impedance 파형변화

4. 평가지수

4.1 Impedance 피크 주파수 쉬프트량 ΔF

이상 3.1절과 3.2절의 실험결과에서 보면 하중의 위치 및 크기에 따라 모드의 파형변화가 선형적으로 현저하게 달라지고 있는 것을 알 수 있다. 여기에서 우리는 Impedance 파형변화를 평가하는 손상평가지수의 하나로 피크주파수의 쉬프트량을 이용할 수 있다. 일반적으로 구조물에 손상이 발생하면 그 응력에 의해 내부를 전파한 탄성파가 변화하므로 그에 따른 주파수 응답에 변화가 일어나 건강상태에 비해 피크가 나타난 주파수가 쉬프트한다. 건강상태에서의 피크 주파수를 w_h 로, 손상후 피크 주파수를 w_d 로 하여 그 차이를 피크주파수 쉬프트량 ΔF 이라 정의한다. 실험에 의해 토크가 감소하면 각각의 피크주파수 쉬프트량이 선형적으로 단조롭게 증가하고 있다. 이 결과로부터 피크주파수 쉬프트량을 이용하는 것으로 토크 변화를 정량적으로 평가할 수 있다.

$$\Delta F = w_h - w_d \quad (7)$$



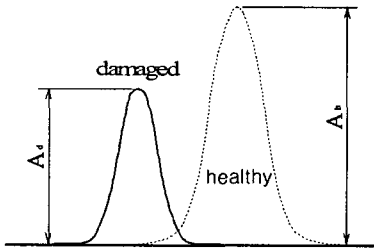
4.2 Impedance 피크 진폭비 변화율 δ

Impedance 피크진폭은 피크주파수 쉬프트와 같이 손상상태에 대해서 현저하게 변화한다. 그러므로, Impedance 피

크의 진폭변화를 손상평가지수로 선택한다. 진폭비 변화율 δ 은 건강상태일 때의 진폭 A_h , 손상후 피크를 A_d 로 하여 다음과 같은 식으로 정의한다.

$$\delta = \frac{A_h - A_d}{A_h} \quad (8)$$

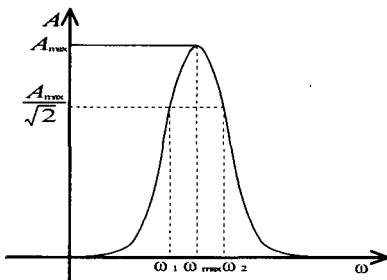
실험에 의해 토르크가 감소하면 모든 피크에서 피크 진폭비 변화율이 선형적으로 증가하고 있는 것을 알 수 있다. 이 결과로부터 피크 진폭비 변화율은 손상의 정량적 평가에 유효한 것을 알 수 있다.



4.3 특성계수 Q값 비의 변화

마지막 평가지수로서 Q값을 사용한 Q값 변화율을 고려한다. 주파수의 큰 값으로부터 작은 값을 뺀 후, 최대값으로 나누면 식 (9)에서 나타낸 Q값이 된다. 이 값은 감쇠비로 근사되기 때문에 감쇠비에 의해 정해진 값이라고도 말할 수 있다. 감쇠비가 커지면 Q값은 작아지고, 감쇠비가 작아지면 Q값은 커지는 경향을 실험을 통해 알 수 있었다. 감쇠비의 증감은 그 피크가 가진 에너지의 증감을 의미하기 때문에 손상의 평가에 이용할 수 있다. 또한 이 값은 피크값에 따라 조금의 격차가 있지만 전체적으로 증가하는 성향을 보여 손상평가에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 생각된다.

$$Q = \frac{\omega_{\max}}{\omega_2 - \omega_1} \approx \frac{1}{2\zeta} \quad (9)$$



4. 결론

본 연구에서는 철교나 고가다리, 송전선 첩탑 등의 구조물에 있어서의 초기 손상의 조기 발견을 목표로 하여 압전 소자에 의한 Impedance 계측법을 이용해 구조물의 미소한 손상에 대한 평가방법 및 추정식을 제안하였고, 그 유효성을 검증 하였다. 본연구의 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 압전소자가 부착된 구조물에 대하여 종단성과 원리를 이용한 임피던스 계측법은 광범위 주파수 영역에서 임피던스 공진주파수를 용이하게 측정 가능하다는 것을 알 수 있었다.
2. 본 연구에서는 구조물의 기계적 임피던스 변화를 고정 밀도로 측정 가능한 실수부 신호를 측정하여 손상상태와 응력관계를 알 수 있었다.
3. 미소손상이 있는 구조물에 대해 임피던스 변화를 측정함으로써 손상여부를 감지할 수 있었다.
4. 응력 하중시의 임피던스 파형변화는 응력이 부가되고 있는 위치의 변형, 크기에 의존한다.
5. 변형이 큰 위치에 응력이 부가되고 있는 경우, 측정되는 임피던스 파형은 정상상태의 파형에 비하여 피크, 주파수, 크기의 변화량이 작았다.
6. 손상평가지수로서 「피크주파수 쉬프트량」, 「피크진폭비 변화율」, 「Q값비 변화율」을 제안하였다.

참 고 문 헌

- (1) Zhongwei Jiang and Yasutaka Takeuchi, "Damage Assessment for Truss Structural Health Monitoring with Piezoelectric Impedance-Based Technique" Proceedings of ICMT'01, 283-286,2001
- (2) 武田 展雄, 岡部 洋二, "光ファイバセンサを用いた複合材料のヘルスマニタリング技術" 日本機械學會論文集, 67-655, A(2001), 378-383
- (3) 江鐘偉, 西村浩一, 長南征二, 2001, 素子を用いた縦弾性波計測による構造物の損傷監視と位置同定, 日本機械學會論文集C編, Vol.67, No.660, 2580-2586,
- (4) Kazuhisa Kabeya, 1998, STRUCTURAL HEALTH MONITORING BY IMPEDANCE AND WAVE PROPAGATION MEASUREMENT, The Fourth International Conference on Motion and Vibration Control, 207-212
- (5) Darryll J Pines and Philip A Lovell "Conceptual framework of a remote wireless health monitoring system for large civil structures", Smart Mater.Stuct, 1998