압전소자를 이용한 볼트 체결 겹침 보의 토크추정에 관한 연구
Study on the Torque Estimation of Bolting-Connection Overlapping Beam using the PZT Sensor

홍 용†·홍동표*·한수현**·김영문***

Hong Yong, Hong Dong Pyo , Han Su Hyun, Kim Young Moon

Key Words : Structural Health Monitoring, PZT Sensor, Peak Frequency, Coupling Torque, Torque Wrench, Bolt-Connection Overlapping Beam

ABSTRACT

This paper presents a primary study for a new method of enhancing measurement using impedance analysis method, which is widely used for structure health monitoring. Many of skyscrapers, bridges, tunnels, which have been built up several years, and nearly reached their operating life due to aging crack, material deterioration, and so on. therefore, the health monitoring technique has obtained considerable attention. The usage of the PZT sensor is proposed, and the coupling torque of bolt-connection overlapping beam is assumed. By using the torque wrench, it is easy to apply torque of different values to each bolt. The coupling torque is adjusted gradually from 3N · m to 0N · m with the decrement of 1N · m. Simultaneously, the impedance peak variation is measured. The peak frequency variation can be determined through the change of bolt coupling torque. .

기호설명

Y : 어드미턴스

Z_a : 압전 소자의 기계적 임피던스

Z_s : 구조물의 기계적 임피던스

Y_{xx}^E : 압전 소자의 전계가 $0(kV/m)$일때의 신장 탄성률

d_{3x} : 임의의 x방향에 대한 등가 압전 정수

ϵ_{33}^T : 유전정수

δ : 압전 소자의 유전손실율

w_a, l_a , h_a : 압전 소자의 폭, 길이, 두께

1. 서 론

항공기, 선박, 철도등의 교통 시설이나 교량, 터널, 빌딩 등의 토목건축 구조물은 그 규모가 크고 사람의 생활과 밀접한 관계를 지니고 있어 파괴시 사회적, 경제적 장애를 줄 뿐만 아니라 인명 손실등으로 연결되기 때문에 높은 신뢰성과 안정성이 요구된다. 이러한 구조물은 사용환경이 매우 다양하기 때문에 그 손상과정이 복잡하고, 구조물에 영향을 주는 자연현상의 불확실성으로 인해 손상의 평가에 통계적 방법을 이용하고 있다. 하지만 파괴를 막기 위한 손상을 조기 발견하기에는 아직 그 신뢰도가 사회적 요구에 미치지 못하고 있어, 더욱 신뢰성이 있는 구조물 손상 모니터링 기술이 요구되고 있다. 구조물의 손상의 종류로서는 강재의 균열이나 부식, 볼트의 풀림이나 탈락등이 있다. 강재의 균열이나 볼트의 풀림은 도장에 덮여서 발견하기 어렵기 때문에 조기 발견이 어렵다. 더욱이 강재의 균열은 금속 피로의 경우가 많고, 금속재료는 부식이 되면 그 피로강도이하로도 파괴가 일어난다. 그래서 강재의 내부 응력이나 부식 상태에 따른 볼트 상태를 정상적으로 검사할 필요가 있다.

이런 사회적 요구로부터 최근 구조물의 건상 상태를 감지하는 구조물 건강 모니터링의 연구가 주목되고 있다. 선진국에서는 이미 대형 구조물의 정량적 비파괴 검사나 건강 모니

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

* 전북대학교 기계항공시스템 공학부

** 전북대학교 정밀기계공학과

*** 전북대학교 건축공학과

터링에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.

2. 임피던스 계측법

2.1 PZT를 이용한 임피던스 계측법 개념

균열이나 부식등의 내,외부적 요인으로 인해 손상이 발생한 구조물은 손상이 없을 때에 비해 강성 및 감쇠율의 변화가 발생하여 구조물의 기계적 임피던스가 변화하게 된다. 이 손상의 발생으로 인한 구조물의 기계적 임피던스 변화와 PZT 센서의 전기적 임피던스 변화의 관계를 이용하여 구조물의 건강상태를 평가하는 것이 임피던스 계측법의 원리이다. 그러나 일반적으로 미소한 기계적 임피던스의 변화를 고정밀도로 계측하는 것은 어려운 일이다. 그래서 그림 2)에 나타낸 압전 소자가 부착된 구조물의 모델을 고려해보면 압전소자의 어드미턴스(전기적 임피던스의 역수)는 구조물 및 압전소자의 기계적 임피던스를 이용해 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

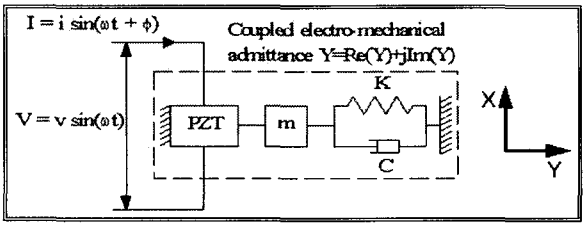

그림 1) 압전소자(PZT)가 부착된 구조물의 1자유도 모델

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

구조물에 손상이 발생하지 않았을 때의 구조물의 임피던스가 일정하다고 가정하면, 손상이 발생할 경우에는 구조물의 임피던스가 변화하여 그 공진주파수 대역이 달라질 것이라는 예측을 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 구조물의 손상으로 인해 발생되는 기계적 임피던스와 압전소자(PZT)의 전기적 임피던스의 관계를 이용하여 구조물의 손상 상태와 손상 정도를 계측 및 분석하여, 구조물의 손상 정도를 평가할 수 있는 건강 모니터링 기술의 확립을 목표로 하는 기초연구를 시행하였다.

2.2 측정 대상물

여러 구조물의 경우 부재와 부재사이를 볼트와 너트를 이용하여 결합하고 있는 경우가 많다. 본 연구에서는 간단한 두 개의 알루미늄 보를 이용하여 겹친 후 볼트를 체결하고 결합 토크를 변화시키면서 손상위치와 토크의 크기를 추정할 수 있는가에 대해 실험을 통하여 분석 하였다. 볼트 겹침 보 실험에서는 손상 상태 평가를 위한 볼트를 제외하고, 나머지 각각의 볼트에 토크렌치를 이용하여 $3.0N.m$의 일정한 힘으로 체결시켰다. 실험구조물은 그림 2)와 같다. 구조물에는 압전소자를 보의 양면에 대칭으로 부착시킨다. 표 1)은 실험에 사용된 알루미늄 보와 압전소자의 물성치를 나타낸 것이다.

Aluminum beam element	
Length l_s (mm)	400
Width w_s (mm)	25
Thickness h_s (mm)	2
Density ρ_s $(\times 10^3 kg/m^3)$	2.70
Young's Modulus E_s $(\times 10^{10} N/m^2)$	7.06
Piezo-electric element (C-6)	
Length l_a (mm)	25
Width w_s	4
Thickness h_s (mm)	0.3
Density ρ_s $(\times 10^3 kg/m^3)$	7.4
Relative dielectric constant ε_{33}^{T}	2000±300
Piezo-electricity constant d_{31} $(\times 10^{-12} m/V)$	-195
Young's Modulus Y_{11}^{E} $(\times 10^{10} N/m^2)$	5.8
Induced loss $\tan\delta$	2.1
Frequency constant N_{31} $(N \cdot m)$	1400

표 1) 알루미늄 보와 압전 소자(PZT)의 물성치

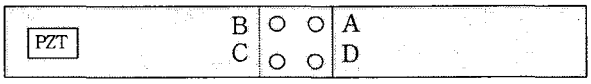

그림 2) 알루미늄 보를 사용한 겹침 보 구조물

3. 실험 방법

본 연구에서는, 손상 모델로서 토크 렌치에 의한 볼트의 조임토크를 이용하기 위해 체결된 볼트 중 하나를 선택하여 볼트를 점차 느슨하게 풀어가면서 몇 개의 주파수 영역에 대해서 임피던스 계측을 실시하였다. 겹침 보의 건강 상태는 보를 토크 렌치에 의해 일정하게 $3.0N.m$로 조인 상태이며 손상 상태는 선택된 볼트를 $1N.m$씩 느슨하게 한 상태이다. 이 방법의 장점은 재현성이 높은 측정을 실시할 수 있다는 점이다. 실험은 알루미늄 겹침보의 양단을 자유로운 상태로 하기위해 스티로폼으로 양단을 지지하였고, 대칭으로 붙인 압전소자 PZT1, PZT2에 동시에 교류 전압을 걸어 겹침보에 세로 탄성파를 발생시킨다. PZT를 이용한 계측 장비로는 임피던스 분석기(Impedance Analyzer : HP 4192A)를 사용하였으며, 이것으로 임피던스의 변화를 계측하여 구조물에 발생되는 미소손상의 존재와 손상의 종류, 크기등을 알아낼 수 있다.

알루미늄 보 구조물의 기계적 임피던스를 측정하기 위해서는 컴퓨터를 이용하여 계측하고자 하는 주파수 범위와 주파수 영역을 임피던스 분석기에 입력하면, 입력값들에 대응하

는 일정한 교류신호가 PZT에 더해진다. 이러한 과정에 의해 구조물에 발생하는 종탄성파가 PZT에 전위변화를 발생시키며, 이 전위 변화로 임피던스가 계산되며, 컴퓨터에 전송하여 기록된다.

4. 정상 구조물의 임피던스 응답

기본 구조물인 보의 양단이 자유 또는 고정된 경우, 종탄성 진동에서의 보의 고유 주파수는

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

여기서, c는 보의 내부에 전해진 위상 속도, l는 길이, E는 탄성계수, ρ는 밀도이다. 그런데, 식(2)에 표1)에 나타낸 보의 물성치를 대입하면 보의 고유 주파수는 fn=3.456(kHz)가 된다.

그림 3)은 정상 알루미늄 보 구조물에 대하여 1 KHz ~ 150 KHz까지의 임피던스 응답을 계측한 결과가 나타나 있다. 임피던스 분석기에 의해 계측된 임피던스에는 실수부와 허수부가 있지만 그림에서 알 수 있는 것처럼 실수부가 응답의 변화를 확인하기 용이하고, 측정 정밀도가 높기 때문에 임피던스 응답파형의 실수부를 평가에 사용하였다. 그림 3)에서 피크가 발생되는 주파수의 주기(펄스)는 약 3.531 KHz 이며, 식 (2)에 의해 계산된 이론적인 주파수 $f_n = 3.456$ KHz과 거의 유사하다.

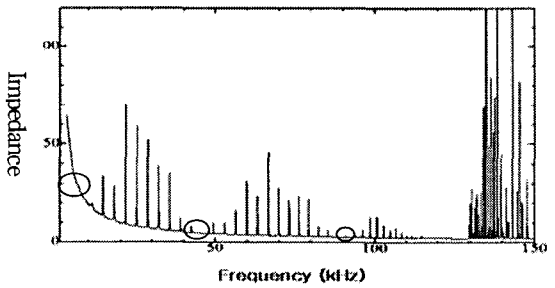

그림 3) 알루미늄 보의 impedance 파형

5. 구조물의 미소손상 계측 및 분석

구조물에 손상을 주면 그 임피던스의 피크치의 크기와 주파수가 변화한다. 그 손상의 크기가 미소하면 피크의 변화도 미소하다. 본 연구에서는 미소한 손상의 변화를 한 지점의 체결 토크가 느슨해졌을 경우를 손상으로 생각하였다. 볼트 풀림의 조정은 토크 렌치로 조절하기 때문에, 여러 번 재현하여 계측을 실시할 수 있다. 그러나 볼트 결합부는 볼트와 너트로 고정되어 있기 때문에, 볼트의 토크를 한 번 변화시키면 시험편 전체의 특성이 변화할 가능성이 있다. 우선 알루미늄보에 볼트가 가해진 경우의 임피던스를 측정하였다. A,B,C,D위치의 볼트들이 전부 체결된 상태와 전부 풀린 상태, A,D부분 볼트풀림 상태와 B,C부분의 볼트 풀림 상태를 측정하였다.

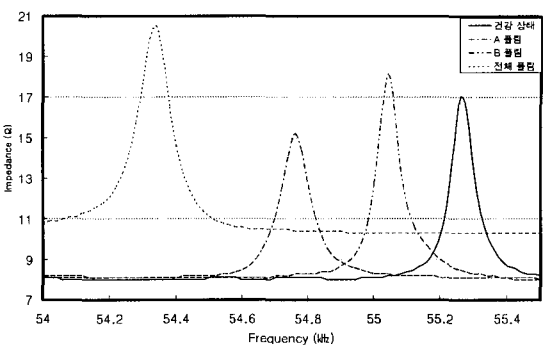

그림 4) 보의 볼트체결 위치에 따른 impedance 파형

여기서 앞쪽 볼트 토크 뿐 아니라 뒤쪽 볼트 토크의 변화에서도 임피던스 주파수 변화가 측정되는 경향을 볼 수 있었다. 이런 경향은 볼트가 다수가 결합되어 있을 경우 각 볼트의 풀림 측정에 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

위의 결과를 바탕으로 임피던스 주파수의 변화가 잘 나타나는 전반부 중 B 볼트의 풀림을 손상 상태로 하여 1N.m씩 풀려가면서 나타나는 임피던스 파형을 측정하였다. 그림 6, 7은 실험에서 나타난 임피던스 변화를 나타낸 그림이다. 실험 평가지수로는 주파수 쉬프트량 ΔF를 사용하여 각 실험의 데이터가 변화되는 것을 알아보았다. 주파수 변화에 의한 손상 추정 방법은 일반적으로 구조물에 손상이 발생하면 그 응력에 따라 주파수 응답에 변화가 일어나며, 건강 상태에 비해 임피던스 피크 주파수가 쉬프트 한 점에 주목한 손상 추정 방법이다. 그림 5에서 보는 것과 같이 건강할 때의 주파수에서 손상이 되었을 때의 주파수의 차로 나타낼 수 있다.

$$\Delta F = F_{healthy} - F_{damage}$$

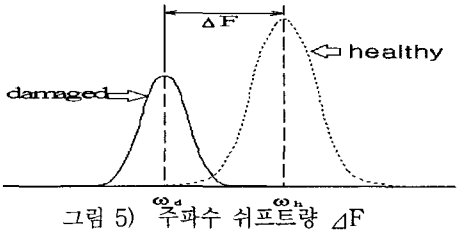

그림 5) 주파수 쉬프트량 ΔF

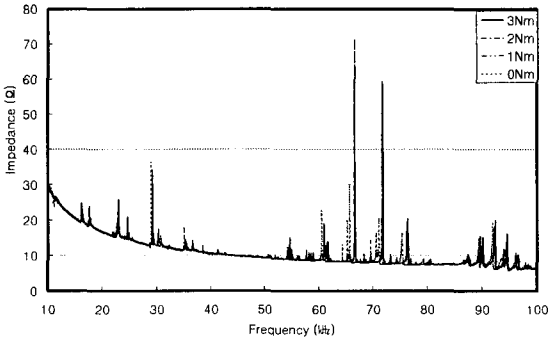

그림 6) 전체 임피던스 파형

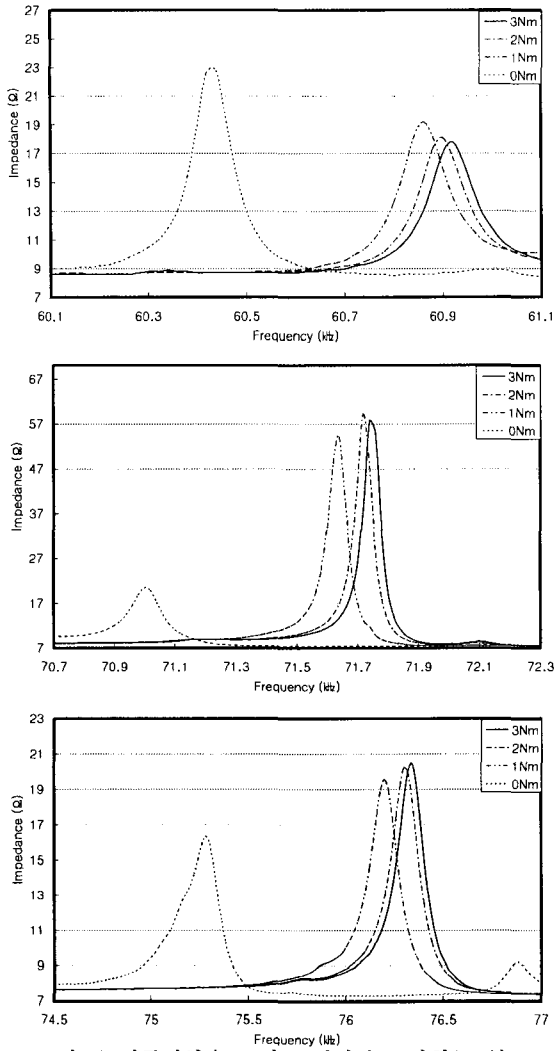

그림 7) 이동경향을 보이는 임피던스 파형(B-볼트)

그림 7)에서 보는 바와 같이 토크의 감소에 따라 각각의 피크 주파수의 쉬프트 및 진폭의 변화가 현저하게 나타나기 때문에 볼트 결합력의 정량 평가가 가능하다고 판단된다. 또한 결합 토크를 낮춰감에 따라 토크변화에 따른 임피던스 주파수는 순차적으로 좌측으로 이동하는 경향을 볼 수 있다. 하지만 전체 임피던스 주파수의 경우 일부에서는 피크주파수들의 쉬프트되는 현상이 뚜렷하지 않는 경우가 있어 실험조건 및 측정 피크 주파수의 선정에 세심한 주의를 기울여야 한다.

6. 결론

구조물이 받는 손상의 한 예로 알루미늄 겹침보 구조물의 볼트 풀림에 따른 임피던스 응답을 계측하여 볼트 체결 토크의 추정과 손상위치의 추정에 관한 연구를 수행하였다. 이번 연구를 통해 얻은 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 건강상태($3N.m$)에서 $1N.m$씩 볼트를 풀어주며 측정된 피크 주파수는 좌측으로 이동되는 결과를 확인하였다. 그러므로 압전소자를 이용한 임피던스 피크 주파수 이동량을 통한 볼트의 토크 추정이 가능함을 확인하였다.
2. 볼트의 결합 위치에 따른 임피던스 주파수의 변화가 일어남을 확인하였다. 이 경향을 바탕으로 구조물 결합시 다수의 볼트 체결상태에서도 각 부분의 볼트 토크 및 위치 추정에 관한 임피던스 측정도 가능함을 알 수 있었다.
3. 실험을 통하여 임피던스 계측의 재현성을 확인하였다.
4. 손상 평가 지수로서 ' 피크 주파수 쉬프트량 ΔF ' 를 사용하여 데이터로 활용 가능함을 확인하였다.

본 연구에서는 알루미늄 겹침 보의 볼트 체결 토크를 미소한 손상의 일례로서 실험을 수행 하였지만, 단일 보와는 달리 구조물에서는 여러 요소가 복합적으로 작용하므로 기계적 크랙이나 화학적 손상과 같은 여러 조건들을 적용하여 검증된 데이터 베이스를 갖추어야 하며, 이러한 데이터를 바탕으로 손상위치 및 손상진행에 관한 추적이 가능할 것이라 생각한다.

후 기

본 연구는 과학기술부 주관 국제공동연구 프로젝트 및 NRL 사업 과정에서 수행되었습니다.

참 고 문 헌.

1) Zhongwei Jiang and Yasutaka Takeuchi, "Damage Assessment for Truss Structural Health Monitoring with Piezoelectric Impedance-Based Technique" Proceedings of ICMIT'01, 283-286,2001

(2) KevinL.Rens, TerryJ. Wipf and F.WayneKlaiber "Review of nondestructive evaluation techniques of civil infrastructure" Journal of performance constructed facilities/November 1997(152-159)

(3) Darryll J Pines and Philip A Lovell "Conceptual framework of a remote wireless health monitoring system for large civil structures", Smart Mater.Stuct, 1998

(4) C. Liang, F. P. Sun and C. A. Rogers, "Coupled Electro-Mechanical Analysis of Adaptive Material Systems Determination of the Actuator Power Consumption and System Energy Transfer", Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 5, 1994

(4) 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モニタリング技術"日本機械学会論文集, 67-655, A(2001), 378-383

(5) 윤기현, 오기영, "압전.전왜 액추에이터", 반도출판사, 1995.