

압전소자를 이용한 TRUSS 구조물의 볼트 결합 토크 추정에 관한 연구

Study of Bolt Coupling Torque Conclusion of TRUSS Structure Using PZT Patches

한수현* · 김병진* · 홍동표**

Han Su Hyun, Kim Byung Jin, Hong Dong Pyo

Key Words : Structural Health Monitoring, PZT Patches, Impedance response, Bolt Torque

ABSTRACT

This studies presented truss frame which use aluminum beam by damage model. Truss frame which each joint part is contracted by bolt contracted conclusion of each bolt by 3.0 N/m. And measured impedance change that appear making bolt 0.5 N/m on damage condition 8 times. Compares impedance change of 5 segments that was set by measurement area and displayed result. To measure torque change of bolt, other damage model did not apply.

1. 서론

Truss형을 한 구조물에는 다리나 첩탑등이 있어, 사람들의 생활에 가까이 존재 한 경우가 많다. 그 때문에 truss구조물을 이용한 철교나 고가다리, 송전선 첩탑이 폭락이나 붕괴하면 많은 인명피해가 발생되며 또 경제활동이 중지되는 것으로 방대한 자금이나 자원이 없어지게 된다. 그래서 다리나 첩탑등과 같은 구조물의 폭락이나 붕괴를 막기 위해서 손상을 조기 발견해 대책을 실시할 필요가 있다. 구조물의 손상의 종류로서는 강재의 균열이나 부식, 볼트의 헤이해짐이나 단락 등이 있다. 강재의 균열이나 볼트의 헤이해짐은 도장에 숨어 발견하기 어렵기 때문에, 조기 발견이 어렵다. 한층 더 강재의 균열은 금속 피로의 경우가 많아, 강교외에도 고속도로내의 표시기등이 그 기초부에 바람이나 교통량으로 일어난 진동에 의해 반복 응력을 받아 금속 피로로부터 균열이 생기며 파손된 보고가 있다. 또 금속재료는 부식되면 그 피로강도 이하로 파괴가 일어난다. 그래서 강재의 내부 응력이나 부식 상태에 따른 볼트 상태를 정상적으로 검사할 필요가 있다.

최근 구조물의 건강상태를 감시하는 구조물 건강 모니터링의 연구가 주목되고 있다. 구조물을 파괴하지 않고 손상을 평가한 방법으로서 비파괴 검사와 구조물의 헬스 모니터링 기술이 있다.

구조물의 헬스 모니터링 기술은 재료 중에 신경이나 뉴런과 같이 센서를 묻어, 구조물에 가해진 변형이나 응력 변화, 재료중에 발생한 손상등을 리얼타임으로 자기 감지, 진단하는 기술이다. 여러 가지 비파괴 검사 방법이 있지만 이번 연구에서는 압전소자를 이용한 방법을 사용하였다. 계측 시스템의 조작인 간단하고 온라인으로 계측이 가능한 압전소자는 동시에 엑츄에이터로도 사용할 수 있어, 재료에 붙이는 것만으로 사용할 수 있기 때문에, 강재에 붙여 계측을 실시하는 것으로서 손상의 평가를 할 수 있게 된다.

2. 실험장치

2.1 실험 구조물

이번 실험에서 사용한 truss구조물은 다음 그림과 같이 설계 제작하였다. 이 구조물은 알루미늄 보 부분과 조인트 부분으로 구성되어 있다. 각 보를 조인트부분에 달려면 4개의 볼트가 필요하며 각각의 볼트에 토크렌지를 통하여 3N/m의 일정한 힘으로 한결같이 하여 토크를 체결시켰다. 또 알루미늄 보만으로는 구조물이 불안정하므로 구조물의 아래부분에 부분의 앵글을 넣어서 구조물의 상태를 안정화 시켰다.

† 전북대학교 정밀기계공학과
E-mail : hab79@hanmail.net
Tel : (063) 270-2374, Fax : (063) 270-2374

* 전북대학교 정밀기계공학과

** 전북대학교 기계항공시스템공학부

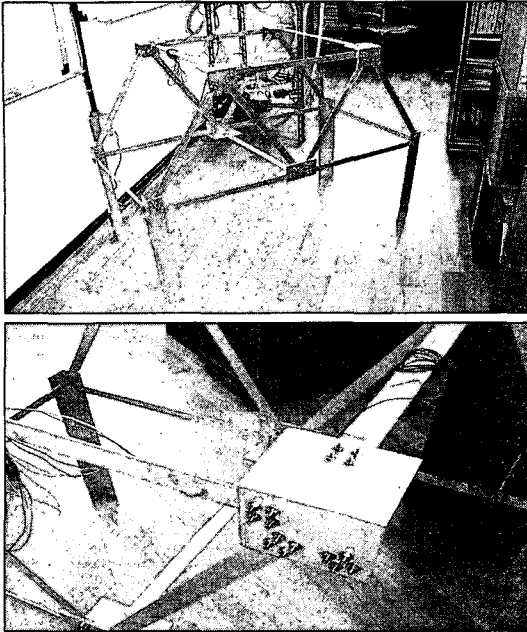


Fig2.1 트리스 구조물 제작 실제 모습

구조물의 중앙보에는 다음 그림 2,1과 그림 2.2와 같이 압전 소자를 보의 표리대칭부분에 부착시킨다. 표2.1에서는 알루미늄보와 압전소자의 물성치를 나타내었다.

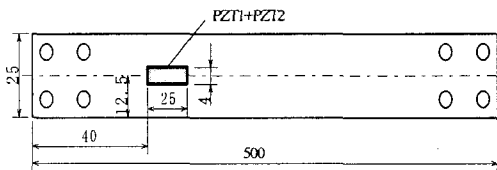


Fig 2.2 aluminum beam of experiment

Table 2.1. 알루미늄 보와 압전소자의 물성치

Aluminum beam element	
Length l_s (mm)	490
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}	-195

($\times 10^{-12} \text{ m/V}$)	
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} ($\text{Hz} \cdot \text{m}$)	1400

3. 실험 방법

본 연구에서는, 손상모델로서 토크 렌치에 의한 볼트의 억압 토크를 이용하여 볼트를 점차 느슨하게 하면서 5개의 주파수 역에 대해서 임피던스 계측을 실시하였다.

truss의 건강 상태는 보를 truss에 토크 렌치에 의해 한결 같게 5.0 Nm로 조인 상태로 해, 손상 상태는 그림 3.1에 나타난 볼트 A를 토크 렌치에 의해 2.0 Nm까지 0.5 Nm씩 느슨하게한 상태로 한다. 이 방법의 장점은 재현성이 높은 측정을 실시할 수가 있는 것이다

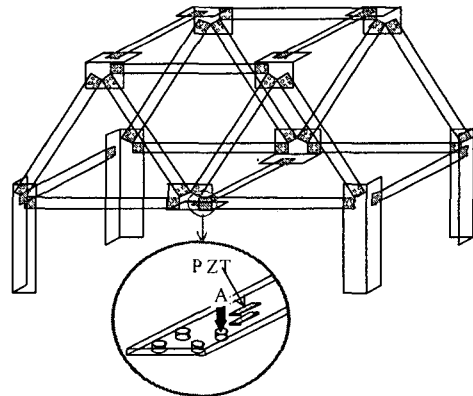


Fig 3.1. Sketch of the truss structure and position where the bolts and PZT are considered in experiment.

보의 표리 대칭의 위치에 있는 압전 소자 PZT1와 PZT2에 동시에 교류 전압을 거는 것으로 구조물중에 세로 탄성파를 발생시킨다. 압전소자의 전기적 impedance 응답은, impedance 애널라이저(HP 4192A)를 사용해 측정을 하였다. Computer에서 계측 한 주파수 범위와 가진 주파수 스텝을 Impedance Analyzer에 입력 하면, 거기에 대응 한 일정 전압(1 Vrms)의 교류 신호가 PZT에 더해져 소자의 진폭에 의해 구조물에 탄성파가 생긴다. 이것에 의해 구조물에 생긴 정상파가 PZT에 전위 변화를 가져온다. 이 전위 변화가 Impedance Analyzer내에서 impedance로 계산되어 Computer에 전송, 데이터로서 기록된다.

압전 소자로 있는 부분에 정재파가 존재 하면, 그 교류

주파수는 양단의 경계 조건에 의존 한다고 생각된다. 거기서, 고유 진동수의 가장 높은 경계 조건인 양단 자유 또는 양단 고정 의 경우와 가장 낮은 조건인 일단 고정 일단 자유의 경우에 대해 고유 주파수(f_n)를 구 한다.

- 대들보의 단면적 : A_s
- 대들보의 세로 탄성 계수 : E_s
- 대들보의 단위 체적당의 질량 : ρ_s
- 압전 소자의 단면적 : A_a
- 압전 소자의 세로 탄성 계수 : E_a
- 압전 소자의 단위 체적당의 질량 : ρ_a
- (으)로 했을 때, 양단 자유의 고유 진동수는

$$f_n = \frac{n}{2a} \sqrt{\frac{A_s E_s + 2A_a E_a}{A_s \rho_s + 2A_a \rho_a}} \quad n = 1, 2, 3 \quad (3.1)$$

된다. 이와 같이 일단 고정 일단 자유의 고유 진동수는

$$f_n = \frac{(2n-1)}{4a} \sqrt{\frac{A_s E_s + 2A_a E_a}{A_s \rho_s + 2A_a \rho_a}} \quad n = 1, 2, 3 \quad (3.2)$$

된다.

식(3.1), (3.2)에 각종 물성치를 대입 한 결과, f_n 는 양단 자유의 42.29 kHz, 일단 고정 일단 자유의 84.58 kHz가 되었다. 즉 실제의 구조물을 생각했을 경우, 주파수 영역 42~84 kHz 에 대해 압전 소자의 출력이 가장 큰 것을 예상할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는, 주파수역 42~84 kHz에 나타난 impedance 피크 주변 파형을 측정 주파수역으로 한다. 다음에, 주파수역 42~84 kHz에 나타난 impedance 피크를 조사하기 위해서 건강 상태의 impedance 계측 실험을 실시했다. 그 결과를 그림 3.2에 나타낸다. 이 결과로부터 주파수역 42~84 kHz에는 5개(A~E)의 impedance 피크가 존재 하는 것을 알 수 있다.

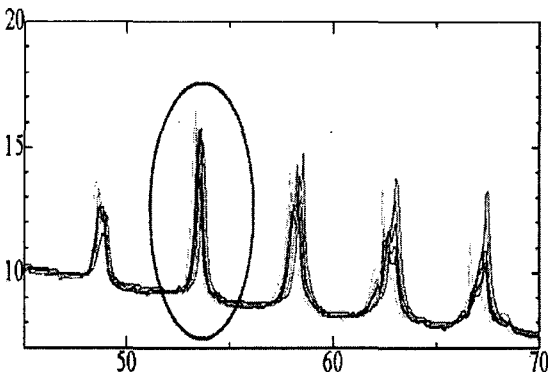


Fig 3.2, 42 - 84kHz에서 발생하는 임피던스 피크

4. 실험결과

구조물에 손상을 주면 그 임피던스의 피크치의 크기와 주파수가 변화한다. 그 손상의 크기가 미소하면 피크의 변화도 미소하다. 본 연구에서는 미소한 손상의 변화의 일례로서 한 곳의 볼트의 합계 체결 토크가 느슨해졌을 경우를 손상으로 생각한다. 볼트의 헤이해짐의 조정은 토크 렌치로 조절하기 때문에, 다시 잡는 것으로 몇 번이나 계측을 실시할 수가 있다. 그러나 이 구조물은 보와 조인트부를 볼트와 너트로 고정되어 있기 때문에, 볼트와 너트로 고정되어 있기 때문에, 볼트의 억압 토크를 한 번 변화시키면 시험편 전체의 특성이 변화할 가능성이 있다.

그래서 우선 처음에 매우 양호한 상태의 임피던스 파형을 취하고 단계적으로 변화시키며 임피던스 응답을 측정한다. 위와 같은 방법으로 8번을 측정하여 그 결과를 각 주파수역 별로 모아 결론을 내었다. 그림 4.2, 4.3은 47.5 - 50KHz, 52 - 55 KHz 에서 나타난 변화로 나온 임피던스 파형을 나타 낸 그림이다.

각 그림의 실험 데이터를 토대로 하여 각 주파수역별로 데이터를 모아 손상과 임피던스 파형과의 관계를 알아보았다. 이번 실험은 데이터 측정은 주파수 쉬프트량 ΔF 를 사용하여 각 실험의 변화되는 것을 알아보았다. 주파수 변화에 의한 손상 추정 방법은 일반적으로 구조물에 손상이 발생하면, 그 용력에 의해 내부를 전파한 탄성파가 변화하므로, 그것에 따라 주파수 응답에 변화가 일어나, 건강 상태에 비해 임피던스 피크가 나타난 주파수가 쉬프트 한 점에 주목한 손상 추정 방법이다.

그림 4.1에서 보는 것과 같이 건강할 때의 주파수에서 손상을 되었을 때의 주파수의 차로 나타낼 수 있다.

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

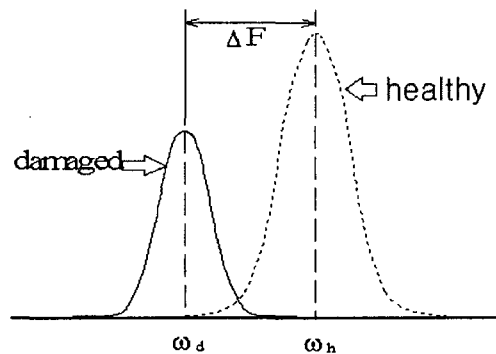


Fig 4.1 주파수 쉬프트량 ΔF

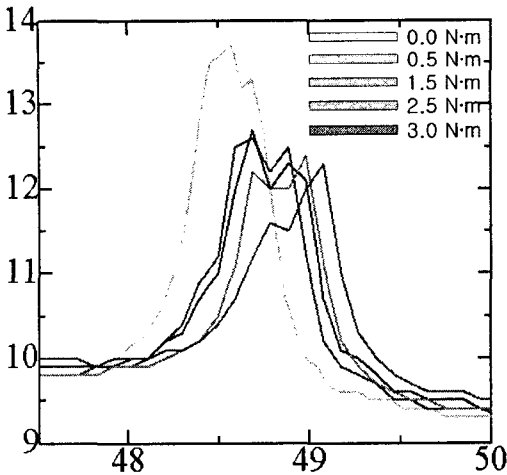


Fig4.2 47.5 - 50 KHz 임피던스 파형

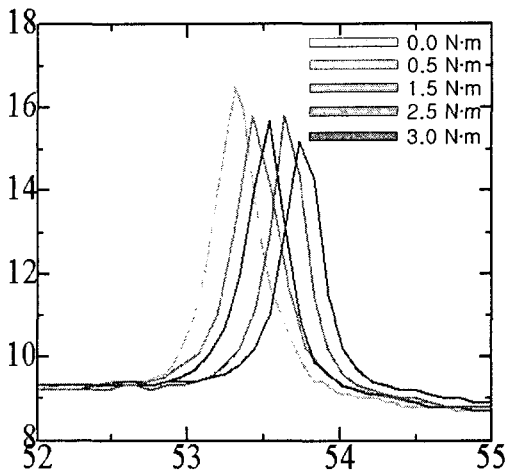


Fig4.3 52 - 55 KHz 임피던스 파형

위 그림 4.2 - 4.2에서 보는 확대도와 같이 토크의 감소에 따라 임피던스 파형의 각 피크 주파수의 쉬프트 및 진폭의 변화가 현저하게 잡아서 볼트의 결합력의 정량 평가가 가능하다고 생각된다. 또한 순차적으로 주파수가 오른쪽으로 이동하는 것을 볼 수 있다.

5. 결 론

구조물이 받는 손상의 한 예로 트러스 구조물의 볼트의 느슨해짐을 생각해 임피던스 응답을 계측하는 것으로 볼트를 조인 토크를 추정하는 연구를 실시하였다 얻을 수 있는 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 피크는 볼트의 억압 토크의 변화에 의해 각 Reg에서의 파형도 변화하고 있는 것이 알았다. 그러나, 그 변화의 형태는 다양한 것이 되고 있어 각 Reg로 차이가 난다. 또한 복수의 피크가 관측할 수 있는 Reg도 있었다.
2. 임피던스 계측의 재현성을 실험에 의해 확인하였다.
3. 각 토크 조건에서 임피던스 변화가 8회 내내 일치하지 않았다. 볼트의 토크에 의한 보의 억압조건보다 실험 환경의 영향이 더 크게 나타나는 것을 알 수 있었다.

본 연구에서는 트러스 구조물의 볼트의 체결 토크를 미소한 손상의 일례로서 생각했지만, 단일 보와는 달리 구조물에서는 여러 가지 요소가 복합적으로 작용하는 것을 알 수 있었다. 여러 가지 크랙이 발생하거나 화학적으로 발생할 수 있는 구조물의 손상등 여러 가지 조건들을 모두 적용하여 검증한 데이터 베이스를 갖추어야 손상위치를 구하는 것이 가능할 것이라 생각이 든다.

후 기

본 연구는 과학기술부 주관 국제공동연구 프로젝트로 "스마트 재료를 사용한 구조물 헬스 모니터링 시스템 개발"과제의 일환으로 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) Kevin L. Rens, Terry J. Wipf and F. Wayne Klaiber "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マonitoring技術" 日本機械學會論文集, 67-655, A(2001), 378-383