

전기기계적 임피던스 기술기반 휴대용 손상감지 시스템 개발

김이슬*, 나원기*

*서울과학기술대학교 건설시스템공학과
e-mail:wongi@seoultech.ac.kr

Development of portable damage detection system based on electromechanical impedance technique

Yi-Seul Kim*, Wongi S Na*

*Dept. of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology

요약

항공, 건설, 기계 공학 등의 다양한 분야에서 부재를 연결할 때 볼트 체결 방식이 가장 흔히 쓰인다. 볼트 체결 방식으로 연결된 구조물은 사용 중에 진동을 받아 볼트가 점차 풀리게 되고 그것은 구조물 안전성 저하를 야기한다. 현재 구조물의 안전성을 점검하기 위해 슈미트 해머를 이용한 비파괴검사가 지배적이다. 이 방법은 구조물의 규모가 클수록 시간 소비적이고, 많은 인력을 필요로 하며 점검 위치에 따라 위험을 동반하기도 한다. 따라서 업무의 효율성을 높이기 위해 PZT 변환기를 이용한 휴대용 비파괴 검사를 제안한다. PZT 변환기를 통해 한 위치에서 여러 볼트의 풀림을 조사할 수 있으며, 센서의 부착만으로 쉽게 점검이 가능해진다.

1. 서론

항공, 건설, 기계 공학 등의 다양한 분야에서는 부재나 부품을 연결할 때 대부분 볼트를 이용한다. 볼트의 체결을 통한 부재의 연결은 처리 과정의 간편성, 간단한 도구, 무소음 등의 장점을 갖기 때문에 가장 흔히 쓰이는 연결 방식이다. 볼트가 강력하게 조여질수록 구조물의 연결부가 안전하다고 여길 수 있다. 하지만 아무리 강력하게 볼트를 조였더라도, 구조물은 사용 중에 진동을 받게 되고, 그 진동은 볼트 풀림으로 직결된다. 초기 단계의 볼트 풀림은 후에 구조물의 파괴까지 야기할 수 있으므로, 심각한 수준에 도달하기 전에 볼트의 풀림을 발견하고 그것에 대한 조치를 취하는 것은 구조물의 유지 관리에서 중요하다. 그렇기 때문에 볼트 풀림을 감지하는 방법에 대해 다양한 연구가 이루어져 왔다.

볼트 풀림의 감지는 크게 직접 측정 방법과 간접 측정 방법으로 나눌 수 있다. 직접 측정 방법은 볼트 아래에 설치된 와셔, 볼트에 내장된 변형률 게이지의 이용 또는 토크 렌치 기술 등을 통한 측정이 있다. 또 간접 측정 방법에는 진동 기반, 주파수 기반 방법 등의 방법이 있다. 이때 직접 측정 방법은 많은 인력 또는 시간이 소모되고, 위험을 동반하는 작업이기 때문에 간접 측정 방법으로 대체될 필요가 있다. 또 다양한 장비를 통해 간접적으로 볼트의 회전력을 측정할 수 있는데, 상용화를 위해 장비의 가격, 간소화 등의 문제를 고려해야 한다. 이와 같은 조건들을 만족시키는 압전 센서 PZT 변환기를 이

용하여 볼트의 풀림을 측정하고자 한다.

또 기존의 PZT 변환기를 이용한 볼트 풀림에 대한 연구들은 센서를 볼트의 상단에 영구적으로 부착하는 방식으로 진행되었다. 이러한 방법은 측정의 정확도를 높여줄 수 있지만 센서의 고장을 인지하기에 어려움이 있으며, 한 구조물의 모든 볼트에 부착하기에는 상당한 비용이 투자되어야 한다. 따라서 PZT 변환기를 이용한 휴대용 비파괴검사 장비를 제안한다.

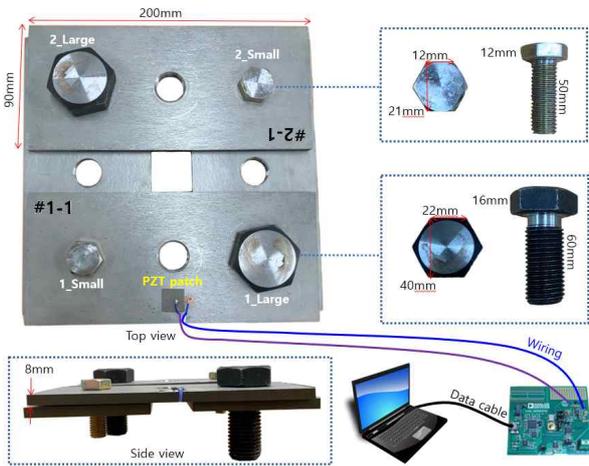
2. 실험 방법

2.1 시험체의 제원 및 성능

Fig. 1[1]은 실험에 사용된 시험체이다. 볼트로 연결된 구조물을 간소화하여 나타내기 위해 각 두 장의 플레이트(200mm x 90mm x 8mm)가 나란히 두 층으로 쌓여 총 네 개의 볼트로 연결되어있다. 위에 놓인 두 플레이트는 각각 #1-1, #2-1로 정하고, #1-1위의 두 볼트는 #1_Small, #1_Large, #2-1위의 두 볼트는 #2_Small, #2_Large로 각각의 사이즈별로 태그하였다. 두 사이즈의 볼트는 각각 두 개씩 총 네 개가 엇갈려 설치되어 있고, 볼트의 크기, 위치에 따라 볼트 풀림을 감지할 수 있도록 설계하였다.

설정된 구조물의 임피던스를 측정하기 위해 대표적으로 세 가지 장치를 고려할 수 있다. 첫 번째로 일반적

으로 많이 사용되는 임피던스 애널라이저, 두 번째로는 함수 발생기와 오실리스코프를 간단한 회로로 연결하여 PZT 센서를 통해 임피던스를 대략적으로 측정하는 방법이 있다. 마지막으로 이 실험에서 사용한 AD5933 evaluation board가 있다. 이 장치의 사용은 앞서 소개한 두 방법에 비해 비용이 저렴하고, 성능 또한 100kHz까지 500개 이상의 데이터 포인트를 측정할 수 있어 실험에서 이용하기에 효율적이라고 판단하였다. 이때 PZT 패치는 두께 3mm, 지름 25mm의 금속과 두께 5mm, 지름 25mm의 금속에 에폭시를 이용해 부착하여 휴대용 측정기로 사용했다.



[Fig. 1] 시험체 제원¹

2.1 데이터 처리 과정

소개된 장치를 통해 측정한 데이터는 주파수에 따른 임피던스를 데이터 포인트로 하여 그래프로 작성된다. 볼트의 풀림 여부와 그 위치에 따라 그래프는 다른 형상을 가질 것이고 각각의 상황별 그래프를 기준 임피던스로 정한다. 기준 임피던스 그래프는 새로운 조건에서 실험한 결과 그래프와 비교하여 어떤 기준 그래프에 부합하는지 찾을 수 있다.

그래프 비교를 통해 볼트 풀림을 조사하기 위해 데이터를 정량화할 필요가 있다. 확률론적 방법인 RMSD (root mean square deviation)를 통해 상황별 주파수-임피던스 그래프의 변화를 정량화할 수 있다.

$$RMSD = \sqrt{\frac{\sum_N [Re(Z_i) - Re(Z'_i)]^2}{\sum_N [Re(Z'_i)]^2}} \quad (1)$$

식 1에서 N 은 임피던스 측정 횟수, Z'_i 는 손상 전 임피던스, Z_i 는 손상 후 임피던스를 나타낸다. 이렇게 계산된 RMSD값은 그래프의 변화가 클수록 즉, 구조물의 손상이 클수록 큰 값을 갖는다.

3. 결과

PZT 센서의 부착 위치에 따라 같은 손상에서도 다른 임피던스 측정 결과가 나온다. 따라서 볼트 풀림의 해석을 위해 Fig.1과 같이 #1-1의 중앙부를 PZT 패치 부착 위치로 선정하여 각각의 볼트 풀림에 대해 주파수 대비 임피던스를 측정하였다. 결과적으로 풀린 볼트의 위치가 PZT 패치로부터 멀수록 RMSD가 작게 계산되었다. 또 풀린 볼트의 수가 많을수록, 볼트의 크기가 클수록 RMSD가 크게 계산된다. 볼트 풀림에 대한 RMSD 계산 값을 기준으로 하여 구조물이 새로운 상황에 놓였을 때의 RMSD와 비교하면 그 상황이 어떤 볼트가 풀린 것인지 예측할 수 있다. PZT 센서는 아주 민감하여 센서를 탈부착할 시 다른 결과의 임피던스를 측정할 수 있다. 하지만 3mm 금속에 부착된 PZT 변환기로 임피던스를 5회 반복 측정했을 때 산정된 그래프를 평균화하여 결과를 도출하면 정확도가 90% 이상으로 유의미한 결과라고 판단된다. 한편 PZT 패치를 부착하기 위해 사용한 금속의 두께에 따라 다른 결과가 도출되었다. 3mm 두께의 금속은 정확도가 약 90%인 반면 5mm 두께의 금속은 정확도 약 40%로 현저히 떨어졌다. 금속의 두께가 두꺼울수록 정확도가 떨어지는 것을 확인할 수 있으며, 그 두께의 차이가 2mm로 작은 차이여도 결과적으로는 큰 차이를 초래한다.

참고문헌

[1] Y-S. Kim, W.S. Na, "Development of a portable detection system based on electromechanical impedance technique for monitoring of bolted joint structures" in preparation., 2021.