

형상기억합금 와셔를 이용한 볼트접합부 자가치유 시스템

Self Healing Bolted Joints System Using Shape Memory Alloy Washer

장 하 주* · 박 승 희** · 이 창 길*** · 김 태 헌**** · 남 민 준*****

Chang, Ha-Joo · Park, Seunghee · Lee, Chang-Gil · Kim, Tae-Heon · Nam, Min-Jun

요 약

본 논문에서는 구조물 연결부의 실시간 손상 검사를 통해 이상이 감지되었을 경우 자가치유까지 가능한 지능형 볼트접합부 시스템에 관한 실험적 연구결과가 제시되었다. 지능형 센서인 PZT센서의 전기-역학적 커플링 특성을 이용한 전기역학적 임피던스 기반의 구조물 건전성 평가 방법이 사용되었다. 전기역학적 임피던스의 측정을 통한 계측값을 베이스라인 값과 비교하는 손상 평가를 통해 구조물 볼트접합부의 볼트풀림 손상을 진단하고, 손상은 손상지수 RMSD를 통하여 정량화되었다. 볼트접합부의 손상이 감지되었을 경우 형상기억합금(SMA) 와셔에 부착되어있는 히팅 필름에 전원을 가함으로써 형상기억합금에 열을 가하고, 가열된 형상기억합금 와셔는 축방향으로 팽창을 함으로써 잃었던 볼트의 토크력을 회복시켜주었다. 실험 결과, 제안된 전기역학적 임피던스 기반의 구조물 건전성 평가기법과 형상기억합금 와셔 기반의 볼트접합부 자가치유 시스템의 성능 평가와 검증이 이루어졌다.

keywords : 볼트접합부, 전기역학적 임피던스, 지능형센서, 자가치유, 형상기억합금

1. 서 론

철도, 교량 등의 사회 시설물은 상시적인 감시체계를 갖추고, 수명이 다하기 전에 보수, 교체 등을 지속적으로 수행해야 한다. 특히 볼트접합부의 국부적인 볼트풀림 손상은 대형사고로 이어질 수 있기 때문에 이를 방지하기 위해서 볼트접합부 이완 손상에 대한 상시 모니터링 체계가 갖추어져야 하며, 손상 발생 시 즉각적인 보수, 보강이 이루어져야한다. 기존의 비파괴 검사기법은 고가의 장비와 복잡한 알고리즘으로 실제 구조물 평가에 적용하기는 어려움이 있었다. 전기역학적 임피던스 기반의 구조물 건전성 평가기법은 특정주파수 대역의 진동 응답을 계측하여 다양한 구조물의 국부적인 손상을 검색하는 기술로 이용할 수 있어(Bhalla et al. 2003; Park, G. et al. 2003) 구조물 건전성 평가 분야에서 널리 사용되고 있다.

본 연구에서는 압전 센서를 이용하여 볼트접합부의 볼트풀림 등의 손상을 자가진단하고 형상기억합금(Shape Memory Alloy, SMA)을 이용하여 볼트풀림으로 인해 잃어버린 토크력을 회복시키는 자가치유형 시스템의 적용 가능성을 평가하였다. 강판의 볼트접합부에 압전센서를 부착하여 임피던스 기반의 손상 탐색 기

* 정회원 · 성균관대학교 u-City공학과 석사과정 hajooc@skku.edu

** 정회원 · 성균관대학교 사회환경시스템공학과 교수 shparkpc@skku.edu

*** 성균관대학교 건설환경시스템공학과 박사과정 tolck81@gmail.com

**** 성균관대학교 u-City공학과 석사과정 tamasii@gmail.com

***** 성균관대학교 u-City공학과 석사과정 namml8@naver.com

법을 이용한 볼트풀림 손상의 탐색 적용 가능성을 알아보고, 볼트의 토크력을 조절하여 볼트풀림 손상 케이스를 수집하였다. 또한 손상지수 RMSD(Root Mean Square Deviation)를 구하여 볼트풀림 손상으로 인한 볼트 토크력의 변화를 정량적으로 분석하였다. 그리고 열을 가하면 본래의 형태로 돌아가려는 성질을 가진 형상기억합금(SMA)와서를 이용하여 볼트의 이완으로 인한 손상 발생시 볼트접합부가 잃었던 토크력을 회복하여 자가치유가 가능한지 평가하였다. 본 논문은 본문인 2장에서는 연구에 사용된 임피던스 기법과 RMSD, 3장에서는 형상기억합금을 이용한 볼트접합부 자가치유의 이론적 배경에 대해 정리하고, 4장에서는 실험 수행 및 결과에 대해 정리한 후 5장에서 결론을 서술하는 것으로 구성되었다.

2. 전기역학적 임피던스 기반의 구조물 건전성 평가

전기역학적 임피던스 기반의 구조물 건전성 평가는 구조물에 부착된 PZT센서 등의 압전 센서에서 얻어지는 시간영역의 구조응답을 주파수 영역에서 상시적으로 분석하여 기준신호로부터 갑작스런 특정변화가 나타날 때, 이 변화를 이용하여, 전역적 또는 국부적인 이상상태를 찾아내는 기술이다. 본 연구에서는 저비용으로 높은 신뢰도를 보여주는 커패시터를 이용한 저비용 셀프센싱 기법을 이용하였다. 셀프센싱 기법에서는 하나의 압전 센서가 가진기와 센서의 역할을 동시에 수행하고 하나의 간단한 커패시터 연결만을 필요로 하기 때문에 기존의 임피던스 측정 시스템에 비해 저비용이다.

구조물에 부착된 압전센서로부터 측정된 전기역학적 임피던스 신호의 변화를 통해 구조물의 건전성을 평가할 수 있다. 그러나 임피던스의 변화는 손상의 질적 평가만을 제공해주기 때문에 이를 정량화하여 추출된 손상 지수인 RMSD(Root Mean Square Deviation)를 이용하여 각 주파수별 임피던스의 차이를 구하며, 식(1) 같이 계산한다.

$$RMSD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\text{Re}(Z_0(\omega_i)) - \text{Re}(Z_1(\omega_i)))^2}{\sum_{i=1}^n \text{Re}(Z_0(\omega_i))^2}} \quad (1)$$

여기서 $Z_0(\omega)$ 는 구조물이 정상 상태에 압전센서로부터 측정된 임피던스이고 $Z_1(\omega)$ 은 구조물의 각 상태에 측정된 임피던스, 그리고 n 은 샘플 포인트의 수이다. 이렇게 구해진 RMSD의 더 큰 지수 값, 즉 기준 임피던스와 대상 임피던스의 더 큰 차이는 구조물의 손상이 더 분명함을 의미한다.

3. 형상기억합금을 이용한 볼트접합부 자가치유

서론에서 언급했듯이 볼트접합부의 자가치유를 위해서 형상기억합금(Shape Memory Alloy, SMA) 기술을 이용한다. 형상기억합금은 이름 그대로 형상을 기억하는 합금이다. 일반적으로 금속재료는 외력에 의해 탄성변형이 유발되었을 경우 외력을 제거하면 원래의 형상으로 돌아간다. 하지만 탄성영역을 지나면 소성변형이 발생하고 이는 외력을 제거해도 원상태로 되돌아가지 않는다. 이와 같이 일반적인 금속 재료는 소성변형에 의해 변형이 영원히 잔류하게 된다. 하지만 형상기억합금은 탄성영역을 넘어서는 외력이 작용하여 소성변형에 상당하는 변형이 남는데 이 변형은 열을 가함에 따라서 원상태로 돌아온다. 즉 이 합금은 일단 어떤 형상을 기억하면 여러 가지 형상으로 변형시켜도 적당한 온도로 가열하면 변형전의 형상으로 되돌아오는 성

질을 가지는 것이다. 이와 같이 변형전의 형상으로 되돌아가는 성질을 가지는 형상기억합금을 활용하여 볼트 접합부의 자가치유가 가능함을 본 연구를 통하여 평가하였다. 형상기억합금으로 만들어진 와셔를 가열하여 축방향으로 팽창하고, 직경은 줄어드는 변형전의 형상으로 되돌아오면서 볼트풀림으로 인해 잃어버린 토크력을 회복할 수 있음을 검증하였다,

4. 실험 연구 및 분석

4.1. 실험 연구

본 연구에서 사용된 시편은 아래의 그림 1과 같다. 실험용 강판의 총길이는 가로 80cm, 세로 20cm, 두께 0.3cm이며, 2cm x 2cm의 PZT 센서가 정중앙에 부착된 볼트접합부는 가로 20cm, 세로 20cm이며 위,아래로 뒹뒹한 두 개의 철판까지 포함한 전체 두께는 0.7cm 였다. 데이터계측을 위한 시스템은 그림2에 나타나 있다. 내장형 컨트롤러, 임의 파형 생성기(AWG), 고속 신호 디지털라이저(DIG) 및 멀티플렉서(Multiplexer)로 구성된다. 이들은 Lab-View 프로그램을 통해 제어되고 작동되었다. 추가적으로 셀프센싱 기법의 임피던스 계측 회로 구성을 위해 압전센서의 커패시턴스 값과 대응하는 용량의 커패시터가 디지털라이저와 병렬로 연결되어 출력전압을 분배해준다.

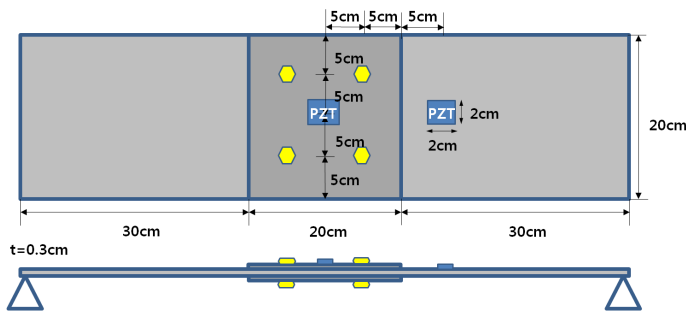


그림 1 실험용 시편의 구성

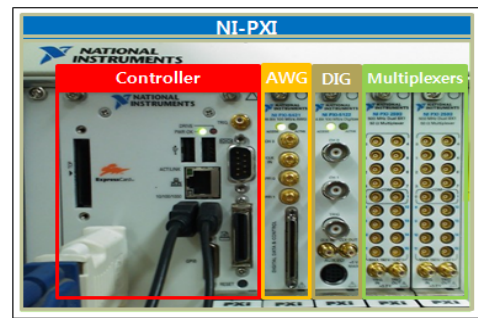


그림 2 NI DAQ 시스템

임피던스 계측을 통해 손상을 진단한 후에는 볼트접합부에 접속되어 있는 SMA와셔에 열을 가함으로써 볼트풀림으로 인한 손상을 자가치유할 수 있음을 검증하기 위해 그림 3과 같이 Heating Film이 부착된 SMA가 준비되었다.

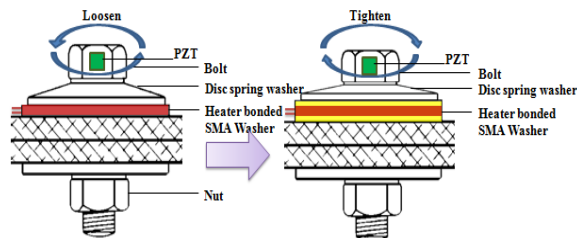


그림 3 지능형 자가치유 볼트접합부

4.2. 실험 결과

본 실험은 볼트풀림의 손상 탐색과 손상 정량화를 위해 토크렌치를 이용하여 40Nm에서 15Nm로 볼트의

토크력을 줄여서 임피던스 신호를 계측하였고, SMA와셔에 감겨 있는 Heating Film에 전원을 공급함으로써 가열된 SMA와셔가 축방향으로 늘어나게 되어 볼트는 잃었던 토크력을 회복하게 됨을 보였다. 실험 결과는 아래 그림 4와 같다.

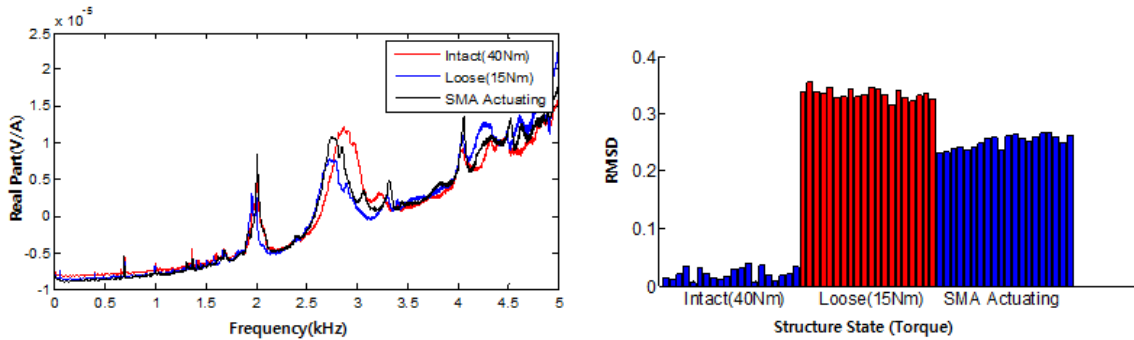


그림 4 0~5kHz구간의 임피던스 신호와 RMSD

그림 4의 왼쪽 그래프에 나타나듯이 볼트의 토크력이 40Nm인 무손상(Intact)상태에서 손상상태인 15Nm로 변화함에 따라 임피던스 신호의 Peak이 좌측, 하향으로 이동함을 볼 수 있었고, 히팅 필름에 전원을 공급함으로써 SMA와셔가 가열됨에 따라 Peak이 처음과 동일한 위치는 아니지만 다시 우측, 상향으로 이동함을 확인할 수 있다. 또한 손상지수인 RMSD 값의 Intact 상태와의 차이가 손상상태인 토크력 15Nm때보다 SMA와셔 가열 후에 줄어들음을 통해서 볼트가 잃었던 토크력을 일정부분 회복함을 보여주고 있다.

5. 결론

본 연구에서 구조물의 볼트접합부의 볼트풀림 손상에 대한 진단과 볼트 토크력의 회복을 통한 자가치유 시스템에 관한 검증 실험을 수행하였다. 실험 결과, 압진센서를 이용한 손상진단이 가능하며 SMA와셔에 히팅 필름을 부착하여 열을 가함으로써 볼트의 잃어버린 토크력을 일정부분 회복할 수 있음을 확인하였다. 추후에는 토크렌치를 이용한 손상, 히팅 필름에의 전원공급 등의 인위적 개입 없이 손상 진단시 컨트롤러가 스스로 판단하고 명령을 내려 자가치유할 수 있는 알고리즘 등에 대한 추가 연구가 필요하겠다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부의 u-City 석·박사 과정 지원사업의 지원과 2010년도 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 원자력연구 사업(2010-0025889) 및 기초연구사업(2010-0023404) 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

- Bhalla, S. and Soh, C.K. (2004) High frequency piezoelectric signatures for diagnosis of seismic/blast induced structural damages, *NDT&E International*, 37(1), pp.23-33.
- Park, G., Muntges, D. and Inman, D.J. (2003) Self-repairing joints employing shape-memory alloy actuators, *JOM*, 55(12), pp.33-37
- Park, G., Sohn, H., Farrar, C.R. and Inman, D.J. (2003) Overview of piezoelectric impedance-based health monitoring and path forward, *The Shock and Vibration Digest*, 35(6), pp.451-463.