

형상기억합금을 이용한 자가치유 볼트접합부 시스템에 관한 연구

A Study on Self-Healing Bolted Joints using Shape Memory Alloy

장 하 주¹⁾ · 이 창 길²⁾ · 박 승 희³⁾
Chang, Ha Joo · Lee, Chang Gil · Park, Seung Hee

요 약 : 본 연구는 압전 센서를 이용한 구조물의 실시간 모니터링과 강구조물 볼트접합부의 동적 컨트롤이 가능한 자가치유 시스템에 관한 것이다. 볼트접합부의 볼트 풀림 손상 탐색을 위해서 압전 물질의 전기역학적 커플링 성질을 이용하는 임피던스 기반의 구조물건전성평가 기법을 이용하였다. 계측된 임피던스 값을 기준치 값과 비교함으로써 볼트 풀림 손상 진단이 가능하다. 볼트 풀림 손상은 손상지수를 이용하여 정량적으로 평가되어지고, 손상이 진단되면 형상기억합금 와셔에 감겨있는 외부히터가 와셔에 열을 가하게 된다. 열이 가해진 형상기억합금 와셔는 축방향으로 팽창하고, 볼트접합부는 볼트풀림으로 인해 잃어버린 토크력을 회복하게 된다. 압전 센서를 이용한 임피던스 기반의 구조물건전성 평가기법과 형상기억합금 기반의 볼트접합부 동적 컨트롤 기능과 이를 이용한 자가치유 볼트접합부 시스템의 적용가능성과 성능을 실험을 통해 평가하였다.

ABSTRACT : This paper describes the smart structural system that uses smart materials for real-time monitoring and active control of bolted joints in steel structures. The impedance-based structural health monitoring (SHM) techniques, which utilize the electro-mechanical coupling property of piezoelectric materials, was used to detect loose bolts in bolted joints. By monitoring the measured electrical impedance and comparing it with the measured baseline, a bolt loosening damage was detected. The damage was evaluated quantitatively using the damage metrics in conductance signature with respect to the healthy states. When loosening damage was detected in the bolted joint, the external heater actuated the shape memory alloy (SMA) washer. Then the heated SMA washer expanded axially and adjusted the bolt tension to restore the lost torque. An experiment was conducted by integrating the piezoelectric-material-based SHM function and the SMA-based active control function on a bolted joint, after which the performance of the smart self-healing joint system was investigated.

핵심용어 : 볼트접합부, 전기역학적 임피던스, 압전 센서, 평균 제곱근편차, 자가치유, 형상기억합금, 구조물건전성평가

KEYWORDS : bolted joints, electro-mechanical impedance, piezoelectric material, root mean square deviation, self-healing, shape memory alloy, structural health monitoring

1. 서론

볼트 접합부는 여러 가지 사회 기반 시설물 중 강구조물의 가장 기본적인 요소 중 하나로 볼트의 체결은 전동공구를 이용한 작업자의 수작업으로 시공되는 경우가 대부분이며, 이 때문에 작업자의 숙련도, 작업조건 및 환경에 따라 좌우되고 있다. 또한 볼트 접합부는 결합초기에 충분한 인장력이 주어지지 설치되더라도 지속적인 하중, 충격이나 진동 등에 의해 인장력 감소, 볼트 풀림 등이 발생하여 사회 기반 시설물의 손

상 및 붕괴를 가져와 경제적으로 막대한 손실을 유발하고 대규모의 인명피해를 갖고 올 수 있는 만큼 이를 방지하기 위해서 볼트 접합부 이완 손상에 대한 상시 모니터링 체계를 갖추고, 제수명이 다하기 전에 보수, 교체를 지속적으로 수행해야 한다. 사회 시설물의 사고를 사전에 방지하기 위해 여러 가지 구조물 건전성 평가기법과 비파괴 검사(NDE)가 수행되고 있다. 가속도 기반의 모드테스트, 육안검사, 초음파 검사 기법 등의 비파괴 검사기법은 복잡한 알고리즘과 검사장비의 고비용으로 실제 구조물의 평가에 적용하는 데는 어려

1) 성균관대학교 u-City공학과, 석사과정(hajoo@gmail.com)
2) 성균관대학교 건설환경시스템공학과, 박사과정(tolck81@gmail.com)
3) 교신저자. 성균관대학교 사회환경시스템공학과, 조교수
(Tel: 031-290-7525, Fax: 031-290-7549, E-mail: shparkpc@skku.edu)

본 논문에 대한 토의를 2012년 4월 30일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

움이 있었다. 특히 비상시적인 비파괴검사 방식의 특성상 검사 기간 사이에 발생하는 손상을 즉각적으로 발견하지 못하고, 바로 손상에 대처하지 못한다는 한계점이 있었다. 임피던스 기반의 구조물 건전성 평가기법은 가진과 센서 역할을 동시에 수행하는 압전 센서를 이용하여 국부적인 손상이나 초기의 미세 손상에도 민감하게 반응하는 고주파수 대역의 진동 응답 특성을 통해 구조물의 상태를 모니터링 함으로써 비파괴검사기법의 한계점을 극복할 수 있다. 대표적인 압전 센서로는 Lead-Zirconate-Titanate(PZT), Micro Fiber Composite(MFC) 등이 있으며 본 연구에서는 압전효과를 이용한 구조물의 임피던스 계측을 위해 PZT센서가 사용되었다. 압전 센서의 특성인 압전 효과는 압전체를 매개로 기계적 에너지와 전기적 에너지가 상호 변환하는 작용으로 압전소자에 외부 응력, 진동 변위 등이 가해지면 전기적 신호가 발생하며, 압전 소자에 전압을 걸어주면 기계적 변위가 발생하는 것이다(Liang 등, 1994).

이러한 압전효과를 이용하면 압전 센서를 구조물에 부착하여 구조물을 가진하고 응답신호를 계측하여 교량, 철로, 건물, 항공기 등 다양한 구조물의 국부적인 손상을 검색하는 기술로 이용할 수 있다(Bhalla 등, 2003; Giurgiutiu 등, 2002; Park G 등, 2000, 2003; Park S 등, 2005, 2006, 2007).

자가치유 볼트접합부 시스템은 모든 볼트 체결부에 적용하는 것이 아니라 특정 구조물에서 구조적으로 손상 발생 시 큰 사고로 이어질 수 있는 모니터링과 제어가 가장 필요하다고 판단되는 구조적 취약부에 적용하기 위한 것이다. 구조물의 안전점검이 주기적으로 이루어지는 만큼 점검 시점 사이에 일어나는 손상에 대해서 즉각적으로 대처하기 어려우므로, 임피던스 기반 손상 탐색 기법을 이용해 상시적으로 모니터링하고 손상 확인 시 사람의 개입 시점 전까지 더 큰 사고로 이어지는 것을 미연에 방지하기 위함이다. 본 연구에서는 압전 센서를 이용하여 볼트 접합부의 볼트 풀림 손상을 자가진단하고 형상기억합금(Shape Memory Alloy, SMA)으로 제작된 와셔를 이용하여 볼트 풀림 손상으로 인해 잃어버린 볼트의 토크력을 회복시키는 자가치유형 시스템의 적용 가능성을 평가하였다. 강판의 볼트접합부에 압전 센서를 부착하여 임피던스 기반의 손상 탐색 기법을 이용한 볼트 풀림 손상의 탐색 적용 가능성을 알아보고, 토크렌치를 이용하여 볼트를 단계적으로 풀어줌으로써 볼트의 체결력을 조절하여 볼트 풀림 손상 케이스를 수집하였다. 또한 손상지수인 평균 제곱근 편차(Root Mean Square Deviation, RMSD)를 구하여 볼트 풀림 손상으로 인한 볼트 체결력의 변화를 정량적으로 분석하였다. 그리고 열을 가하면 본래의 형태로 돌아가려는

성질을 가진 SMA와셔를 이용하여 볼트의 이완으로 인한 손상 발생 시 볼트 접합부가 잃었던 토크력을 회복하여 자가치유가 가능한지 평가하였다.

2. 이론적 배경

2.1. 임피던스 기반의 손상 검색 평가

전기/역학적 임피던스 기반의 손상평가는 구조물에 부착된 PZT 및 MFC와 같은 작은 압전 센서를 통해 고주파 영역에서 구조물을 가진하고 동시에 그 구조물의 전기/역학적 임피던스의 변화를 관찰한다. 압전 센서가 대상 구조물에 부착되어 있을 때 구조물의 역학적 임피던스 $Z_s(\omega)$, 압전 센서의 임피던스 $Z_a(\omega)$ 가 상호 연계된 전기적 임피던스의 역수인 전기적 어드미턴스 $Y(\omega)$ 를 다음 식(1)과 같이 정리하였다(Liang 등, 1994).

$$Y(\omega) = j\omega \frac{wl}{h} (\epsilon_{33}^T - d_{31}^2 \overline{Y^E}) + \left(\frac{Z_a(\omega)}{Z_s(\omega) + Z_a(\omega)} \right) d_{31}^2 \overline{Y^E} \left(\frac{\tan \kappa l}{\kappa l} \right) \quad (1)$$

여기서 ω , l 및 h 는 각각 압전 센서의 너비, 길이와 두께를 나타내고 $\epsilon_{33}^T = \epsilon_{33}^T (1 - \delta j)$ 는 일정한 응력상태에서의 압력센서의 복합 전기유전율을 나타내며 δ 는 압전센서의 역학적 손실계수를 나타낸다. $\overline{Y^E} = Y^E (1 + \eta j)$ 는 지속적인 전기장 내에서 압전 센서의 Young의 계수, η 은 압전 센서의 역학적 손실계수를 나타내며 d_{31} 은 압전 센서의 전기-역학적 상수인 압전상수를 나타내고 $Z_s(\omega)$ 와 $Z_a(\omega)$ 는 각각 압전 센서와 구조물의 전기적 임피던스를 나타낸다. $\kappa = \omega (\rho / \overline{Y^E})^{1/2}$ 는 파수(wave number)를, ρ 는 압전 센서의 밀도를 나타낸다. 실수부와 허수부의 복잡한 숫자들의 조합으로 구성된 이 식을 통해 어드미턴스 $Y(\omega)$ 를 구할 수 있다. 임피던스를 이용한 계측에는 다양한 방법이 있는데, 본 연구에서는 저비용으로 높은 신뢰도를 보여주는 커패시터를 이용한 저비용 셀프센싱 기법을 이용하였다(Lee 등, 2006; Peairs 등, 2002). 셀프센싱 기법에서는 하나의 압전 센서가 가진기와 센서의 역할을 동시에 수행하고 하나의 간단한 커패시터 연결만을 필요로 하기 때문에 기존의 임피던스 계측 시스템에 비해 저비용이다. 셀프센싱 계측기법을 위한 커패시터를 연결한 간단한 전압 분배기의 회로는 그림 1과 같이 구성된다.

여기서 사용된 셀프센싱 회로는 입력신호에 대한 역학적 응

답신호를 구별해내는데 사용된다. 셀프센싱 기법은 1. 파형 시험 적용을 통한 Scaling Factor(SF)의 계산, 2. 임의의 입력 파형에 해당하는 역학적 응답 추출의 두 단계로 구성된다. 이 과정들은 시간 반전 처리를 위해 필요하다. 압전 센서의 한 면은 대상 구조물과 부착되고 나머지 한 면은 임의의 파형 생성기(AWG)에서 생성된 입력 전압 $v_i(t)$ 와 연결된다.

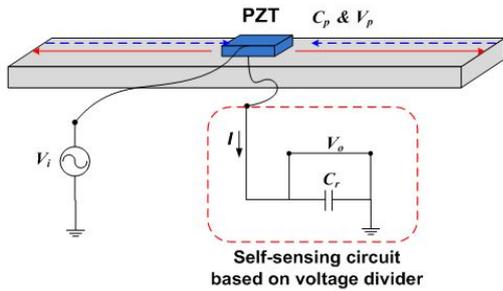


그림 1. 커패시터를 이용한 셀프센싱 회로

그리고 구조물과 부착된 반대면은 제안된 셀프센싱 회로와 연결되고 셀프센싱 회로로부터의 출력 전압 $v_o(t)$ 는 디지털라이저(Digitizer)에서 계측된다. 사용된 셀프센싱 회로의 출력전압은 입력전압과 대상구조물의 역학적 응답신호 $v_p(t)$ 로 구성되어있는데 일반적으로 입력전압의 진폭 크기는 역학적 응답의 크기보다 크기 때문에, 출력 전압은 입력전압의 지배를 받고 식 (2)와 같이 정리 된다.

$$v_o(t) = \frac{C_p}{C_p + C_r} (v_i(t) + v_p(t)) \approx \frac{C_p}{C_p + C_r} v_i(t) \quad (2)$$

여기서 C_p 는 압전 센서의 커패시턴스, C_r 은 셀프센싱 회로의 참조 커패시턴스이다. 여기에서 제안된 셀프센싱 회로의 SF 지수는 다음 식 (3)과 같이 정의된다.

$$SF = \frac{C_p}{C_p + C_r} \approx \frac{v_o(t)}{v_i(t)} \quad (3)$$

식(3)은 입력신호에 대한 출력신호의 진폭비율을 구함으로써 SF 지수의 근사치를 구할 수 있음을 보여준다. 여기서 셀프센싱기법의 전기적 어드미턴스는 식 (4)와 같이 다시 정의할 수 있다.

$$Y(\omega) = j\omega C_p \frac{V_o(\omega)}{V_i(\omega) - V_o(\omega)} \quad (4)$$

여기서 C 는 하중이 없는 상태에서의 압전 센서 커패시턴스 값을, V_o 는 출력전압, V_i 는 입력전압을 각각 나타낸다. Lee 등(2006)은 직교성의 방법을 통해 이를 증명함으로써 위의 식이 정의됨을 보였다.

앞 절과 같은 방법으로 구조물에 부착된 압전 센서로부터 얻은 전기-역학적 임피던스 신호의 변화를 관찰함으로써 구조물의 건전성을 평가할 수 있다. 하지만 임피던스의 변화는 손상 탐색을 위한 질적 평가만을 제공해주기 때문에 정량화된 스칼라 손상 지수가 정량적인 구조물손상의 평가를 위해 사용되고 있다. 임피던스 기반 손상 탐색 기법을 위해서는 RMSD를 사용하는 것이 일반적이고 이는 각 주파수별 임피던스의 차이를 아래 식 (5)와 같이 구한다.

$$RMSD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\text{Re}(Z_0(\omega_i)) - \text{Re}(Z_1(\omega_i)))^2}{\sum_{i=1}^n \text{Re}(Z_0(\omega_i))^2}} \quad (5)$$

여기서 $Z_0(\omega)$ 는 구조물이 정상 상태에 압전 센서로부터 계측된 임피던스이고 $Z_1(\omega)$ 은 구조물의 각 상태에 계측된 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 뜻한다.

2.2 SMA를 이용한 볼트접합부 자가치유

앞에서 언급했던 것처럼 볼트 접합부의 자가치유를 위해서는 SMA 기술을 이용한다. 형상기억합금(SMA)은 이름 그대로 형상을 기억하는 합금이다. 일반적으로 금속재료의 경우 외력이 가해져 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 성질을 가지는 것이다. 이러한 형상기억합금으로는 니켈-티탄(Ni-Ti)계, Cu계, Fe계 등이 있으며, 이들 중 Ni-Ti계 형상기억합금은 여타의 합금에 비하여 형상기억효과 및 그 내구성이 우수하여 가장 많은 분야에 이용되고 있다.

금속에 형상기억효과가 있다는 것은 1951년 L.C. Chang

과 T.A. Read에 의해서 Au - 47.5 at.%Cd합금에서 최초로 발견되었으며, 1964년 미국 해군무기연구소에서 우연한 기회에 Ni-Ti 합금에서도 그 특성이 확인되었다. 그들은 Ni-Ti 합금이 우수한 진동흡수능을 가지고 있고 해수에 대한 내식성이 극히 좋다는 점에서 잠수함용의 새로운 소재로서 오랜 연구를 해오던 중 우연히 이 합금의 형상기억효과를 발견했다고 한다. Ni과 Ti을 거의 동량씩 포함하는 이 합금은 그 원소명과 연구소의 두문자를 연결하여 니티놀(NITINOL)이라고 명명했다.

형상기억효과는 그림 2와 같이 소성변형을 시킨 재료를 고유한 임계점 이상으로 가열하였을 경우 재료가 변형 전의 형상으로 되돌아가는 형상을 의미한다. 다시 말해 고온에서 임의의 형태로 형상을 만들어 형상을 기억시킨 다음 냉각하여, 마르텐사이트(martensite) 변태온도 이하에서 변형을 시키면 본래의 형상으로 되돌아가지 않지만 모상인 오스테나이트(austenite) 변태온도 이상으로 가열하면 본래의 형상으로 되돌아가는 것을 뜻한다. 형상기억합금의 마르텐사이트 변태는 변태시의 체적변형이 작고, 쌍정계면과 variant의 이동이 용이하다. 그러므로 탄성변형에너지만 중요하고 계면에너지나 소성변형에너지는 대단히 작으므로 모상과 마르텐사이트 사이에 열탄성적평형의 상태가 성립한다. 따라서 형상기억특성을 나타낼 수 있는 열탄성형 마르텐사이트 변태를 한다.

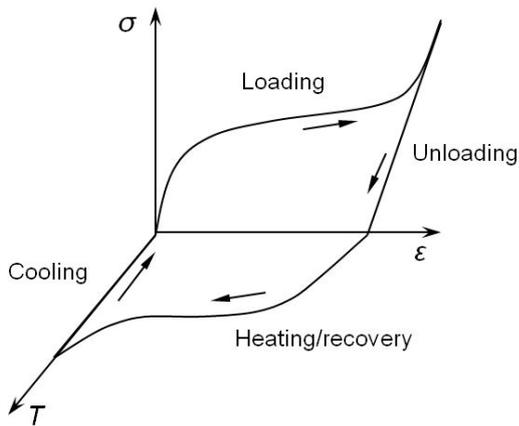


그림 2. 형상 기억효과

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

3. 실험 연구

3.1 실험 모델 구성

임피던스를 이용한 자가치유 및 형상기억합금을 이용한 볼트 접합부 자가치유 시스템의 실험을 위한 실험 setup은 그림 3과 같이 제작되었다. 실험용 강관의 총길이는 가로 80cm, 세로 20cm, 두께 0.3cm이며, 2cm x 2cm의 PZT 센서가 정중앙에 부착된 볼트 접합부는 가로 20cm, 세로 20cm이며 위,아래로 덧댄 두 개의 철판까지 포함한 전체 두께는 0.7cm였다.

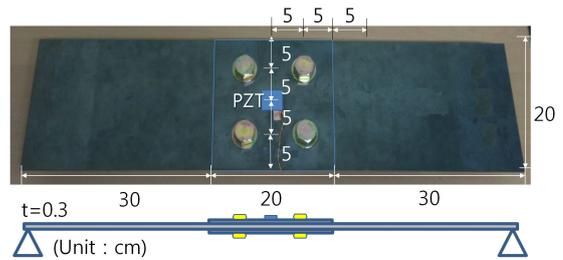


그림 3. 실험용 시편 구성

강관의 양끝단은 힌지 경계조건으로 구성하였다. 실험에 사용된 볼트는 길이 5.08cm인 M22 일반각볼트였으며 이는 볼트머리 공칭직경이 22mm임을 의미한다.



그림 4. 실험을 위한 DAQ 시스템

그림 4는 임피던스 신호 계측을 위한 NI-PXI 장비의 구성을 보여준다. 입력신호를 생성하는 임의파형생성기(Arbitrary Waveform Generator, AWG), 센서로부터 구조물의 응답신호를 계측하는 디지털라이저(Digitizer) 및 자동으로 계측채널을 변경해주는 멀티플렉서(Multiplexer)가 슬롯형태로 NI-PXI 새시 안에 삽입되었다. 이들을 제어하기 위한 내장형 제어기(Embedded Controller)가 새시 안에 함께 삽입되었고, 이들은 Lab-View 프로그램을 통해 제어되고 작동되었다. 추가적으로 셀프센싱 기법의 임피던스 계측 회로 구성을 위해 압전 센서의 커패시턴스 값과 대응하는 용량의 커패시터가 다

지타이저와 병렬로 연결되어 출력전압을 분배해준다(Park 등, 2003).

임피던스를 통한 손상 진단 후에는 히팅 필름이 부착된 SMA 와셔에 열을 가함으로써 자가치유가 가능함을 실험을 통해 검증할 것이기에 볼트접합부에 SMA와셔와 와셔를 가열할 히팅 필름이 필요하다. 그 구성은 그림 5와 같다.

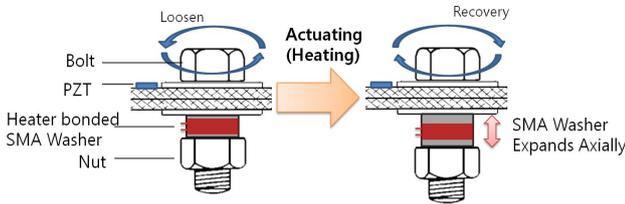


그림 5. SMA를 적용한 자가치유 볼트 접합부 구성

3.2 실험 절차

본 실험은 실험적 기초 연구로, 상온의 실내 실험실에서 진행되었으며 온도 변화 외의 환경적 요인은 본 실험에서 고려하지 않았다. 볼트 풀림의 손상 탐색을 위해 저비용 셀프센싱 기법을 사용하여 임피던스를 계측 하였다. 저비용 셀프센싱 기법에서는 가진기와 센서의 역할을 하나의 압전 센서가 수행하기 때문에 하나의 센서만이 사용되었다.

AWG를 통하여 발생된 전기적 입력 신호를 압전 센서에서 역학적 에너지로 변환하여 구조물을 가진하고 이때의 구조물 응답을 다시 동일한 센서로 받아서 압전효과로 인해 다시 전기적 신호로 변환한다. 이 출력 전압을 병렬로 연결된 커패시터와 디지털타이저에서 분배 원리에 따라 측정하여 임피던스 값을 계측한다. 볼트 풀림의 손상 탐색과 손상 정량화를 위해 토크렌치를 이용하여 40Nm에서 15Nm로 볼트의 토크력을 줄여가며 임피던스 신호를 계측하였고, 그 이후에 SMA와셔에 감겨 있는 히팅 필름에 전원을 공급함으로써 가열된 SMA와셔는 축방향으로 늘어나게 되어 볼트는 잃었던 토크력을 회복하게 된다. 아래 그림 6에 볼트 풀림의 손상 발생부터 볼트 토크력을 회복하는 전 과정이 표현되어 있다.

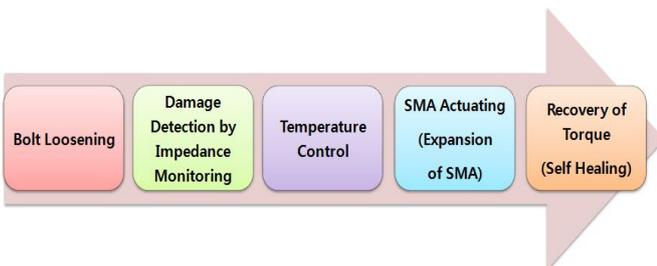


그림 6. 볼트접합부의 자가치유 흐름도

3.3 실험 결과

3.3.1 볼트 풀림 손상 탐색

볼트 풀림으로 인한(토크력 감소) 손상이 증가함에 따른 임피던스 신호 변화 그래프를 그림 7에 나타내었다.

0.1kHz ~ 5kHz의 주파수 영역에서 손상단계별로 20회씩 계측한 값을 평균 내어 사용하였으며 용이한 비교를 위해 모든 손상단계를 하나의 그래프에 함께 그리고 각기 다른 색상으로 표시 하였다. 그림 7의 그래프에서 보면 볼트 토크력이 40Nm-25Nm-15Nm로 감소함에 따라 그래프 형태의 변화와 공진주파수 Peak의 좌측 하향 이동이 점차 커지는 것을 볼 수 있다. 하지만 이 그래프만으로는 볼트접합부의 볼트 풀림의 손상정도를 정량적으로 객관화 할 수가 없다. 따라서 임피던스 신호의 변화를 손상지수를 구함으로써 정량화 시켜 객관성을 확보할 필요가 있기에 본 연구에서는 각 손상단계별 RMSD를 계산 하여 손상판단에 활용하였고 그 그래프는 그림 8에 나타내었다.

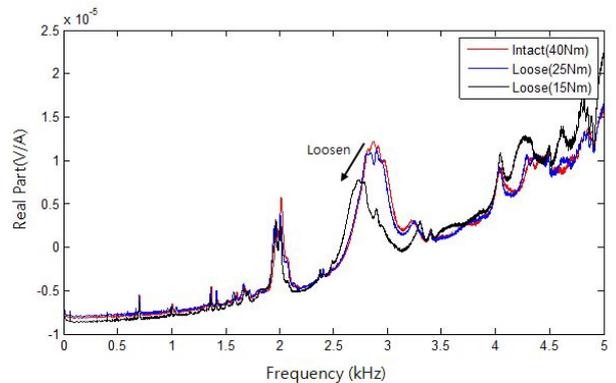


그림 7. 압전 센서로부터 계측한 임피던스 신호 변화

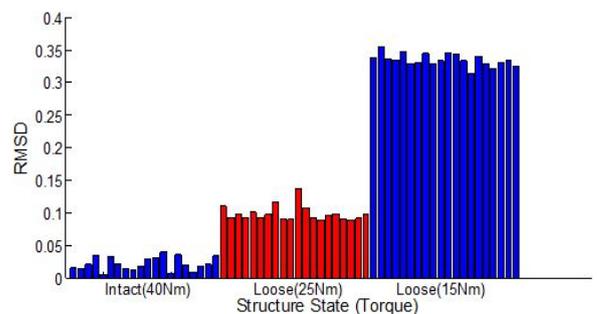


그림 8. 볼트풀림에 따른 임피던스 RMSD 변화

3.3.2 SMA를 이용한 토크력 회복 탐색

그림 9에 나온 것처럼 Minco사의 Thermofoil™ 히팅 필름을 SMA와셔에 부착하였다. 잘 휘어지는 성질을 가진 히팅 필름은 크기가 1mm x 7.6mm x 79mm에 6.4Ω의 저

항을 가지며, 최고 22V의 전압과 2.5A의 전류를 가지는 발 전기를 통해 전압을 주면 SMA와서는 히팅 필름을 통해 가 열된다.

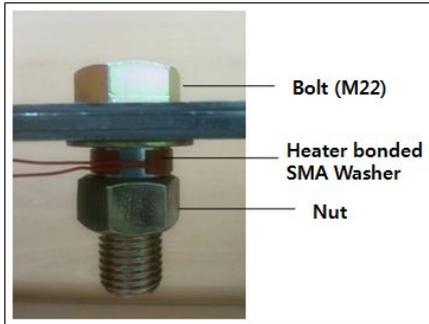


그림 9. 히팅 필름이 부착된 SMA와서

실험에 사용된 SMA와서는 아래의 그림 10과 같고, 표 1. 에 나온 것처럼 초기 상태의 내부직경은 24.2mm, 외부직경 은 26.85mm, 두께는 9.7mm였다.

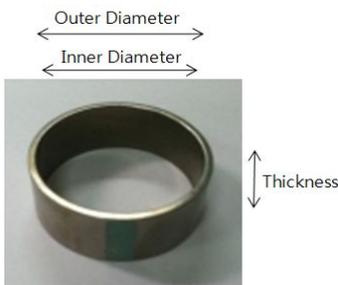


그림 10. SMA와서

표 1. SMA 와서의 성질

Resistance	0.0018 ohms
Mass	6.778g
Thickness	9.7mm
Inner Diameter	24.4mm
Outer Diameter	26.8mm
Inner Diameter Maximum Recovered	23.3mm
Minimum Substrate Diameter	23.65mm
Nominal Clamping Force	13920N
Thermal Conductivity	18W/m K

볼트 접합부는 처음에 40Nm로 조여졌으며, 0.1kHz ~ 5kHz구간에서 임피던스를 측정하였다. 이후에 볼트를 완전히 풀었다가 25Nm, 15Nm로 토크력을 줄여가면서 임피던

스를 측정하였다. 15Nm까지 임피던스를 측정할 이후에 SMA Actuating 시간을 30초, 3분, 6분, 20분으로 총 4단계로 나눠서 진행하였다. 각 임피던스의 측정은 SMA Actuating 전 즉 히팅 필름에의 전원 공급 전 상온 상태인 25°C로 식은 것을 확인한 후에 진행하였다. 이는 순간적인 온도변화로 인해 임피던스의 계측값이 달라질 수 있기 때문에 이를 방지하고, 토크력의 변화로 인한 임피던스의 변화만을 확인하기 위함이다. 총 4단계의 Actuating후의 임피던스 계측값을 분석한 결과 1단계에서 3단계인 30초 ~ 6분 가열의 경우 토크력 복귀가 거의 확인되지 않았다. 4단계인 20분 가열 후 SMA의 최고 온도는 200°C였으며, 25°C로 식은 후에 계측한 임피던스의 결과값은 그림 11과 같다. 그림에 나타나듯이 40Nm(파란선)에서 25Nm(빨간선)로 토크력을 줄였을 때 임피던스 신호는 변화를 거의 보이지 않다가 15Nm(분홍선)로 줄이자 신호가 shift하는 것을 확실하게 확인 할 수 있었다. 토크력이 줄어들때 따라 구조물의 강성 변화를 나타내는 공진주파수의 Peak이 좌하향함을 볼 수 있었고, 좌하향했던 Peak이 200°C 가열 이후에 우상향하고 있음을 확인할 수 있었다. 히팅 필름을 통해 SMA가 가열된 이후에 Peak이 완벽하게 처음과 동일한 위치는 아니지만 다시 우상향으로 이동하여, 볼트풀림 손상을 주기 전 무손상 상태로 회귀하는 경향을 보임을 확인 할 수 있었다.

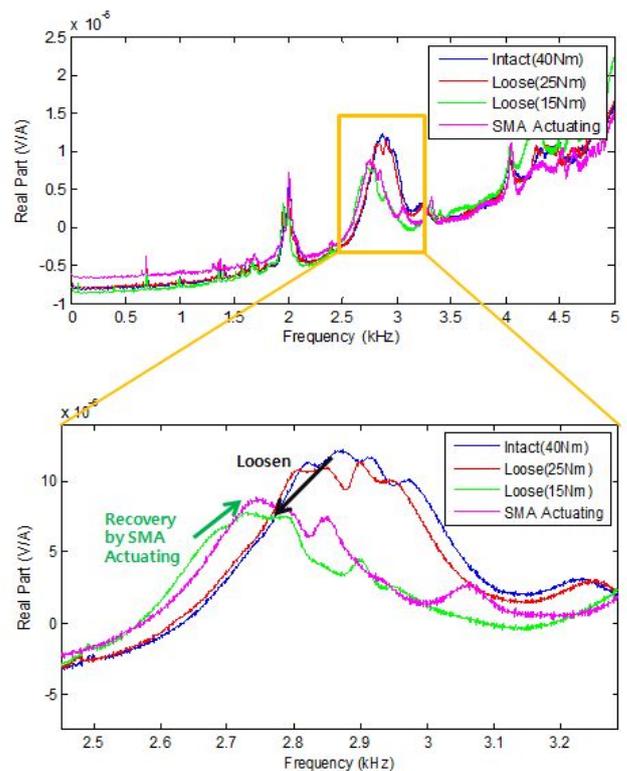


그림 11. SMA Actuating(200°C)후 임피던스 신호 변화

그림 12를 통해 볼트의 토크력이 감소할수록 손상지수인 RMSD의 값이 단계적으로 커짐을 확인할 수 있다. RMSD 값이 클수록 손상이 없는 정상 상태와의 차이가 커진다는 것을 의미한다. 그래프에서 RMSD의 값이 단계적으로 증가하다가 마지막에 줄어드는 것은 SMA가 축방향으로 늘어남으로 인해 볼트가 잃었던 토크력을 일정 부분 회복해서 정상 상태와의 차이가 줄어들었음을 보여주는 것이다. 또한 실험 전 내부직경이 24.4mm였던 SMA와셔가 SMA Actuating 이후 내부직경이 23.5mm로 줄어드는 것을 통해 표 1에 나온 스펙상의 완벽한 회복을 보이지는 않았으나, 토크력을 회복하는 경향을 보임을 다시 한 번 확인할 수 있었다.

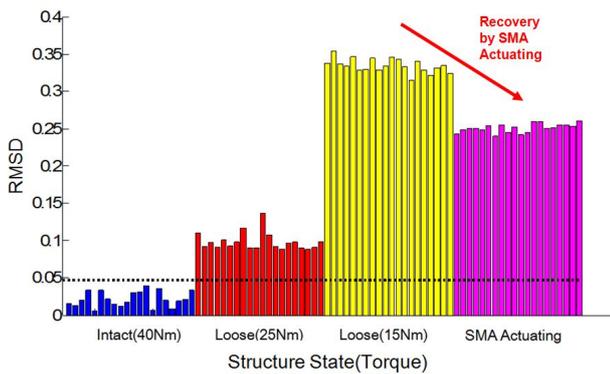


그림 12. SMA 작동(200°C)에 따른 임피던스 RMSD 변화

4. 결론

본 연구에서 강구조물의 볼트 접합부의 손상 중 가장 자주 나타나는 볼트풀림 손상에 대해서 사전에 손상을 진단하고 구조물이 스스로 볼트 토크력을 회복하는 자가치유 가능한 시스템의 검증에 관한 실험연구를 수행한 결과는 다음과 같다.

- (1) PZT센서를 이용하여 계측한 볼트풀림 손상탐색 실험에서 볼트 토크력이 줄어들수록 계측된 임피던스 신호의 형태변화와 공진주파수 Peak의 이동이 커짐을 확인할 수 있었고
- (2) 손상지수인 RMSD를 계산하여 손상의 증가에 따른 RMSD의 단계적인 변화를 확인할 수 있었다.
- (3) SMA와셔에 히팅 필름을 부착하여 열을 가함으로써 볼트풀림 손상으로 인해 잃어버린 토크력에 대해서 약간의 회복 효과를 보임을 확인할 수 있었다.

임피던스 기반 셀프센싱 기법을 이용하여 수행된 본 연구를 통해 구조물의 볼트풀림 자가진단이 가능하며 높은 정확도를

보임을 확인할 수 있었고, SMA와셔와 히팅 필름을 이용하여 볼트풀림 손상을 일정부분 치유할 수 있음을 확인하였다. 본 시스템을 이용하면 안전점검 시점의 주기 사이에 일어난 손상에 대해 사람의 개입 이전에 시스템 스스로가 즉각적으로 대처하여 더 큰 사고로 이어지는 것을 방지할 수 있어 구조물 유지관리 분야에 적극 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구 실험에서는 토크력을 인위적으로 줄이고 직접 발전기를 돌려 히팅 필름을 통해 SMA와셔를 가열해주었지만, 추후 토크력의 변화를 진단한 컨트롤러가 스스로 발전기를 작동시켜 SMA와셔를 가열해주어 사람 개입 없이 볼트 접합부가 온전히 스스로 치유할 수 있는 자가치유 시스템을 위한 알고리즘 등에 대한 추가 연구와 시뮬레이션을 통해 구조물의 구조적 취약부의 선정에 관한 추가 연구가 필요하겠다.

감사의 글

본 논문은 국토해양부의 u-City 석·박사 과정 지원사업의 지원과 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 원자력연구 사업(2010-0025889) 및 기초연구사업(2010-0023404)의 지원과 지식경제부 지정 전남대학교 중화학설비안전진단센터(B0010843)의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고 문헌

Bhalla, S., Naidu, A.S.K., and Soh, C.K., (2002) Influence of structure-actuator interactions and temperature on piezoelectric mechatronic signatures for NDE, *Proc. SPIE-The International Society for Optical Engineering*, Vol. 5062, No. 1, pp.263-269.

Bhalla, S. and Soh, C.K. (2004) High frequency piezoelectric signatures for diagnosis of seismic/blast induced structural damages, *NDT&E International*, Vol. 37, No. 1, pp.23-33.

Chopra, I. (2002) Review of state of art of smart structures and integrated systems, *AIAA Journal*, Vol. 20, No. 11, pp.2145-2187.

Coles, S. (2001) An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values, Springer, Verlag. pp.47-49.

Giurgiutiu, V., Zagari, A., and Bao, J.J. (2002) Piezoelectric wafer embedded active sensors for aging aircraft structural health monitoring, *International Journal of Structural Health Monitoring*, Vol. 1, pp.41-61.

Giurgiutiu, V., Zagrai, A., and Bao, J.J. (2004) Damage identification in aging aircraft structures with piezoelectric wafer active sensors, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 15, No. 9-10, pp.673-688.

Ihn, J.B. and Chang, F.K. (2004) Detection and monitoring of hidden fatigue crack growth using a built-in piezoelectric sensor/actuator network: II. Validation using riveted joints and repair patches, *Smart Materials and Structures*, Vol. 13, No. 3, pp.621-630.

Lee, S.J. and Sohn, H. (2006) Active self-sensing module for sensor diagnosis and structural health monitoring”, *Proceedings of 3rd European Workshop on Structural Health Monitoring*, Granada, Spain,

Lee, S.J. and Sohn, H. (2006) Active self-sensing scheme development for structural health monitoring, *Smart Materials and Structures*, Vol. 15, No. 6, pp.1734-1746.

Liang, C., Sun, F.P., and Rogers, C.A. (1994) 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*, Vol. 5, No. 1, pp.12-20.

Lovell, P.A. and Pines, D.J. (1998) Damage Assessment in a Bolted Lap Joint, *5th Annual SPIE Smart Materials and Structures Symposium: Smart Buildings, Bridges and Highways*, Vol. 3325, pp.112-126.

Muntges, D.E., Park, G., and Inman, D.J. (2001) Investigation of a Self-healing Bolted Joint Employing a Shape Memory Actuator, *Proceedings of SPIE*, Vol. 4327, pp.193-200.

Niezrecki, C., Brei, D., Balakrishnan, S., and Moskalik, A. (2001) Piezoelectric actuation: State of the art, *The Shock and Vibration Digest*, Vol. 33, No. 4, pp.269-280.

Park, G., Cudney, H., and Inman, D.J. (2000) Impedance-based health monitoring of civil structural components, *American Society of Civil Engineers*, Vol. 6, No. 4, pp.153-160.

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*, Vol. 35, No. 6, pp.451-463.

Park, G., Muntges, D., and Inman, D.J. (2003) Self-repairing joints employing shape-memory alloy actuators, *JOM*, Vol. 55, No. 12, pp.33-37.

Park, G., Farrar, C.R., Rutherford, A.C., and Robertson, A.N. (2006) Piezoelectric active sensor self-diagnostics using electrical admittance measurements, *Journal of Vibration and Acoustics*, Vol. 128, No. 4, pp.469-476.

Park, S., Yun, C.B., Roh, Y., and Lee, J.J. (2006) PZT-based active damage detection techniques for steel bridge components, *Smart Materials and Structures*, Vol. 15, No. 4, pp.957-966.

Park, S., Grisso, B.L., Inman, D.J., and Yun, C.-B. (2007) MFC-based structural health monitoring using a miniaturized impedance measuring chip for corrosion detection, *Reserch in Nondestructive Evaluation*, Vol. 18, No. 2, pp.139-150.

Peairs, D.M., Park, G., and Inman, D.J. (2002) Low Cost Impedance Monitoring Using Smart Materials, *Proceeding of the First European Workshop on Structural Health Monitoring*, Ecole Normale Superieure, Paris, France, July 10-12.

Rogers, C.A., Liang, C., and Fuller, C.R. (1991) Active Damage Control of Hybrid Material Systems Using Induced Strain Actuators, *Proc. AIAA 32nd Structure, Structural Dynamics, and Materials Conference*, Paper No. AIAA 91-1145-CP.

(접수일자 : 2011. 5. 20 / 심사일 2011. 5. 25 /
심사완료일 2011. 10. 5)