

구조 접합부의 손상검색을 위한 하이브리드 모니터링

Hybrid Monitoring for Damage Detection in Structural Joints

김 정 태* · 나 원 배** · 이 병 준*** · 홍 동 수**** · 도 한 성*****

Kim, Jeong-Tae · Na, Won-Bae · Lee, Byung-Jun · Hong, Dong-Soo · Do, Han-Sung

ABSTRACT

The purpose of this study is to develop a promising hybrid structural health monitoring system for structural joints. For this propose, the combined use of vibration-based techniques and electro-mechanical impedance technique is employed. For the verification of the proposed health monitoring scheme, a series of damage scenarios are designed to simulate various situations at which the connection joints can experience during their service life. The obtained experimental results, modal parameters and electro-magnetic impedance signatures, are carefully analyzed to recognize the connecting states and the target damage locations. From the analysis, it is shown that the proposed hybrid health monitoring system is successful for acquiring global and local damage information on the structural joints.

Keywords: hybrid monitoring, damage detection, structural joints, electro-mechanical impedance

1. 서 론

구조 건전성 모니터링 시스템은 대상 구조물로부터 신호를 계측하고, 신호 처리 및 정보 분석 과정을 통해 구조물의 손상 상태 평가 및 잔류 수명 예측을 수행하는 종합적인 체계이다. 구조 건전성 모니터링 시스템의 궁극적인 목표는 구조물의 사용 하에서 안전을 지속적으로 감시하는 것이다. 이상적인 구조 건전성 모니터링 시스템이 갖추어야 할 전제 조건은 첫째, 구조물 내의 손상의 유무를 탐지 할 수 있어야 하고, 둘째, 손상이 있다면 손상의 위치를 정확히 가려내고, 셋째, 손상의 정도를 추정 할 수 있어야 하며, 넷째, 손상이 구조물에 미치는 영향을 평가할 수 있어야 한다.

이러한 모니터링 기법은 취득 정보와 검색 영역에 따라 전역적 모니터링 기법과 국부적 모니터링 기법으로 나눌 수 있다. 소위 진동기반(Vibration-based) 구조 건전성 모니터링이라고 불리는 전역적 모니터링 기법은 진동 특성치의 변화를 감지하여 구조 특성치의 변화를 식별하는 개념에

* 정회원 · 부경대학교 해양공학과 교수 E-mail: idis@pknu.ac.kr

** 정회원 · 부경대학교 해양공학과 교수 E-mail: wna@pknu.ac.kr

*** 비회원 · (주)오션스페이스 연구원 E-mail: bjlee@oceanspace.com

**** 학생회원 · 부경대학교 해양공학과 석사과정 E-mail: king2532@pknu.ac.kr

***** 학생회원 · 부경대학교 해양공학과 석사과정 E-mail: hssu1217@daum.net

기초한다. 이런 모니터링 기법은 고유진동수와 모드형상 등의 진동 특성치에 큰 변화를 발생시키는 손상의 검색에 용이하다(Kim 등, 2003). 하지만 손상의 위치가 모드 특성 민감도의 변화가 작은 곳인 경우와 손상 크기가 초기 균열과 같이 모드특성 민감도의 변화를 작게 야기시키는 경우에는 손상검색이 어렵다. PZT센서의 EMI(Electro Mechanical Impedance)기법을 이용한 국부적 모니터링 기법은 국부적인 손상이나 초기의 미소 손상에도 민감하게 반응하는 고주파수 대역의 진동특성을 이용함으로써 구조물의 상태를 판별한다. 하지만 이런 모니터링 기법은 센서 인접부의 국부 상태의 변화를 감지하는 기법이며, 파괴위험 부위의 손상여부 규명에는 용이하지만 모니터링 영역이 협소하다는 제약이 따른다(Bhalla S. 등, 2003). 이에 각각의 모니터링 기법의 장점들을 이용한 새로운 모니터링 체계의 필요성이 대두되어지고 있다.

이에 본 논문에서 손상 영역 추정에 용이한 진동기반 전역적 모니터링과 센서 인접부의 국부상태의 변화에 민감한 EMI기반 국부적 모니터링을 병행한 하이브리드 모니터링 체계를 구축하고 이를 구조 접합방법의 하나인 볼트연결부 실험을 통해 검증하였다.

제시된 하이브리드 모니터링 체계의 적합성을 검증하기 위해 양단 고정보 볼트연결부 모형에 대한 실험적인 연구를 수행하였다. 먼저, 연결부의 일련의 볼트풀림 상황을 손상시나리오로 선택하여 각 손상 시나리오에 대한 가속도 응답과 임피던스 응답신호를 계속하였다. 다음으로, 계속된 가속도 신호를 주파수 영역에서 분석하여 동적 특성을 추출하고 고유진동수 기반 손상검색을 이용하여 손상영역을 검색하였다. 마지막으로, 계속된 임피던스 신호를 주파수 영역에서 분석하여 EMI 특징정보를 추출하고 그 변화를 분석하여 손상검색을 수행하였다.

2. 전역적 모니터링 기법

2.1. 고유진동수 기반 손상검색

고유진동수 기반 손상위치 검색기법은 Kim 등(2003)에서 제시한 알고리즘을 사용하였다. 이 알고리즘을 이용하기 위하여 첫 번째로, 고유진동수를 검출할 가속도계 위치를 선정한다. 진동가진 실험으로부터 구조물 초기상태의 가속도응답을 계속하고 주파수응답함수를 분석하고 이로부터 구조물 초기상태의 고유진동수(w_i)를 추출한다. 손상 전후의 고유진동수를 계속하여 식 (1)와 같이 모드 i 의 고유치의 변화율(Z_i)를 구한다. 두 번째로, 대상구조체에 대한 고유진동해석으로부터 모드 i 의 모드형상(ϕ_i)를 구하여, 식 (2)과 같이 모드 i 와 위치 j 의 모드민감도(F_{ij})를 구한다. 세 번째로, 식 (3)를 이용하여 모드 i 와 위치 j 에서 손상위치지수(e_{ij})를 계산한다. 특징분류 및 손상판별은 통계적 가설검증 기법을 활용하여 수행한다. 통계적인 패턴인식에 의해 가설검증의 기각영역을 98.7% 또는 99.8% 신뢰도로 설정한다. 손상위치지수(e_{ij})를 정규화한 후, 위치 j 의 정규 손상지수가 기각영역에 속하는 지(즉, 손상되었는지) 여부를 식별한다.

$$Z_i = \delta w_i^2 / w_i^2 \tag{1}$$

$$F_{ij} = \frac{\{\phi_i\}^T [C_j] \{\phi_i\}}{\{\phi_i\}^T [C] \{\phi_i\}} \tag{2}$$

$$e_{ij} = Z_m / \sum_{k=1}^{NM} Z_k - F_{mq} / \sum_{k=1}^{NM} F_{kq} \tag{3}$$

3. 국부적 모니터링 기법

3.1. EMI(Electro Mechanical Impedance)기법

국부 건전성 모니터링 방법 중 하나인 EMI기법은 PZT 센서를 이용한 구조건전성 모니터링 기법이다. PZT Patch는 압전현상을 일으키는 piezoceramics로 만들어 졌다. 이는 역 압전효과와 압전효과가 동시에 작용하여 센서와 가진의 역할을 동시에 수반한다. EMI기법은 이 두 효과를 이용한 기법으로 EMI 신호로부터 구조손상이나 구조물의 다른 물리적 변화를 알아내는 것이다. 이런 PZT patch의 거동 관한 압전 기본식은 다음과 같다.

$$S_1 = \frac{T_1}{Y_{11}^E} + d_{31}E_3 \tag{4}$$

$$D_3 = d_{31}T_1 + \overline{\epsilon}_{33}^T E_3 \tag{5}$$

여기서 T_1 은 1방향의 축 방향 응력이고 S_1 은 1방향의 변형률, D_3 은 3방향의 전기적 처짐 \overline{Y}_{11}^E 은 PZT의 일정 전기장하 1-1방향의 복소 탄성계수, d_{31} 은 PZT의 piezoelectric strain coefficient, $\overline{\epsilon}_{33}^T$ 는 PZT의 일정 응력 하의 3-3방향 복소 유전율이다.

다음으로 PZT patch를 부착한 구조를 단자유도계로 등가화 하는 경우, 구조물의 역학적 임피던스($Z = F_0 / \dot{x}_0$)는 다음과 같다.

$$Z = c + \left(\frac{m\omega^2 - k}{\omega} \right) i = |Z| e^{i\theta} \tag{6}$$

여기서 F_0 는 가진력, \dot{x}_0 는 속도이며, m, c, k 는 각각 구조물의 질량 감쇠 강성을 의미하고 실수부는 에너지가 소산하는 물리량을 표현하고 허수부는 반작용 물리량이다.

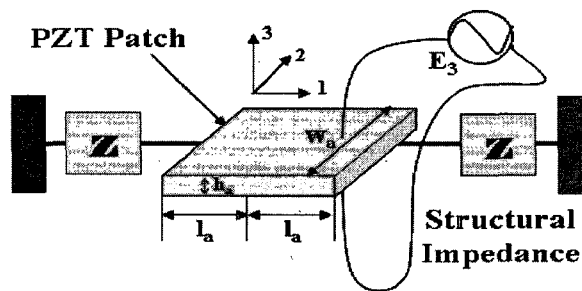


그림 1 구조물-PZT patch의 상호작용 모델(Bhalla and Soh, 2003)

또 폭 w_a , 높이 h_a 그리고 길이가 $2l_a$ 인 직육면체 형태의 PZT 패치에 대한 임피던스는(Z_a)는 다음과 같이 구할 수 있다(Bhalla and Soh 2003).

$$Z_a = \frac{\kappa w_a h_a \overline{Y}_{11}^E}{(i\omega) \tan(\kappa l_a)} \tag{7}$$

여기서, $\kappa = \omega \sqrt{\rho / \bar{Y}_{11}^E}$ 는 파수(wave number)이며 이 때 ω 는 가진 주파수이다. \bar{Y}_{11}^E 는 일정한 전기장 하에서의 1-1방향으로의 PZT 탄성계수이다. 그리고 구조물-센서 시스템의 EMI는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\bar{Y} = 2\omega i \frac{w_a l_a}{h_a} \left[(\bar{\epsilon}_{33}^T - d_{31}^2 \bar{Y}_{11}^E) + \left(\frac{Z_a}{Z + Z_a} \right) d_{31}^2 \bar{Y}_{11}^E \left(\frac{\tan \kappa l_a}{\kappa l_a} \right) \right] \quad (8)$$

구조물의 질량, 감쇠 및 강성과 관련하여 EMI 신호가 생성되며 동특성을 이용하여 특징을 분석할 수 있다. 따라서 손상에 따른 구조계의 변화로부터 손상 전후의 임피던스는 변화하고 이는 어드미턴스의 크기와 공진 주파수에 변화를 준다. 이로부터 구조규명이 가능하고 손상검색이 된다. 그리고 구조물-PZT Patch 시스템의 Active admittance는 다음과 같이 표현된다.

$$\bar{Y}_A = G_A + B_A i = \omega i \frac{w_a l_a}{h_a} \frac{Z_a}{Z + Z_a} d_{31}^2 \bar{Y}_{11}^E \left(\frac{\tan \kappa l_a}{\kappa l_a} \right) \quad (9)$$

4. 실험 예제

4.1 실험 대상 모델 및 Setup

접합부 손상의 경우 모니터링 기법을 평가하기 위하여 실험에 사용된 양단 고정보 모형은 두개의 알루미늄 보를 중첩하여 볼트로 연결 되어 있으며, 그 치수와 형상 및 PZT patch의 부착한 위치는 그림 2와 같고, 대상 구조물 재료의 특성은 표 1에 요약하였다. 압전형 가속도계(PCB 393B04)는 총 12개를 등간격으로 그림 3과 같이 부착하였다. 가진은 Impact Hammer로 충격하중을 주어 실험을 수행하였다.

표 1 구조물 재료의 물성치

Elastic Modulus	Mass Density	Poisson's ratio
$70 \times 10^9 \text{kgf/m}^2$	2700kgf/m^2	0.33

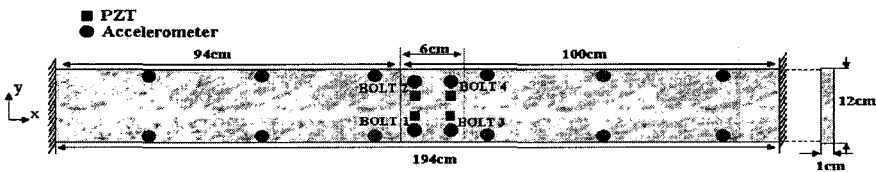


그림 2 볼트 접합부 실험 모식도

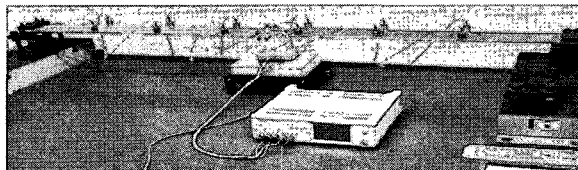


그림 3 양단 고정보의 실험 setup 및 가속도계 부착

4.2 손상 시나리오 별 실험

실험은 압전형 가속도계를 이용하여 획득된 가속도 신호가 그림 4와 같다. 모드특성을 추출하기 위하여 실험에서 획득된 가속도 데이터로부터 상호상관스펙트럼 행렬을 특이치 분해하여 모드 특성을 추출하는 주파수영역분해법(FDD)을 이용하였다. 상호상관스펙트럼을 구하는데 있어 4196개의 데이터를 Hanning Window를 사용하여 66.7% 중첩하는 것으로 설정하였다. FDD를 이용하여 추출된 고유진동수는 통계적 처리 후 24회 평균한 것을 표 2에 요약하였으며 모드형상은 그림 5에 보여진다.

다음으로 PZT 재료의 특성은 표 3과 같다. 임피던스 분석기는 HIOKI 3532를 사용하였으며 신호의 주파수 간격은 1kHz이고, 전압의 크기는 1V로 하여 신호를 추출하였다. 손상시나리오는 볼트 풀림으로 하였으며 표 4에 볼트 접합부 모형실험의 손상 시나리오가 요약되었다.

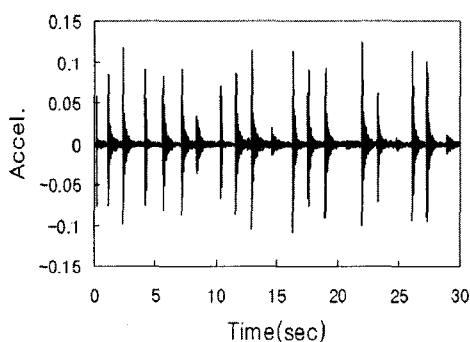


그림 4 취득된 가속도 신호

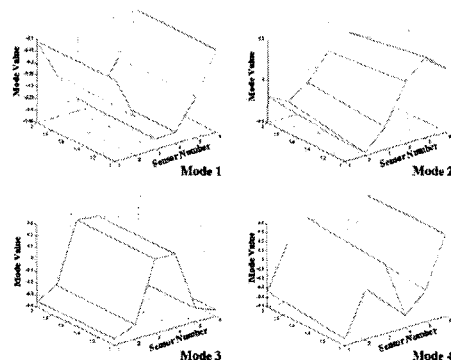


그림 5 추출된 모드형상

표 2 실험에서 추출된 고유진동수 (Hz)

Mode	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4
Undamage	12.61	36.91	70.07	118.35
Damage1	12.58	36.94	69.95	118.7
Damage2	12.55	36.89	69.82	118.08
Damage3	12.51	36.93	69.25	117.71

표 3 PZT 재료의 특성

Density	7800(kg/m3)
Electric permittivity	2.124×10^{-8} (farad/m)
Piezoelectric strain coefficient	-2.1×10^{-10} (m/v)
Young's modulus	4.667×10^{10} (N/m ²)
Dielectric loss factor	0.015

표 4 손상 시나리오

Damage case	Scenario
1	Bolt 1 Loosened
2	Bolt 1&2 Loosened
3	Bolt 1&2&3 Loosened

5. 실험 결과

5.1 고유진동수 기반 손상검색(FBDD)

본 연구에서는 대상구조물의 손상 시나리오에 대하여 가속도 센서로부터 손상 시나리오 별로 각각 응답신호를 계측하였다. 샘플링 주파수를 1000Hz로 32768개의 계측된 가속도신호를 주파수 영역 분해법을 통하여 초기 4개의 모드형상을 추출하였으며, 추출된 모드형상으로부터 모드변형에 너지법을 이용하여 구하여 FBDD를 수행하였다.

그 결과 그림 6(a)와 같이 Damage 1의 경우 손상지수(damage index)가 1.5이상인 영역은(정규 분포상 기간영역 93.3%) 93-108번 요소로 나타났다. 따라서 위치오차는 0이다. 또한 그림 6(b)와 같이 Damage 2의 경우 손상지수가 1.5이상인 영역은 89-113번 요소로 나타났다. 따라서 위치오차는 0이다. 그리고 그림 6(c)와 같이 Damage 3의 경우 손상지수가 1.5이상인 영역은 90-113번 요소로 나타났다. 따라서 위치오차는 0이다.

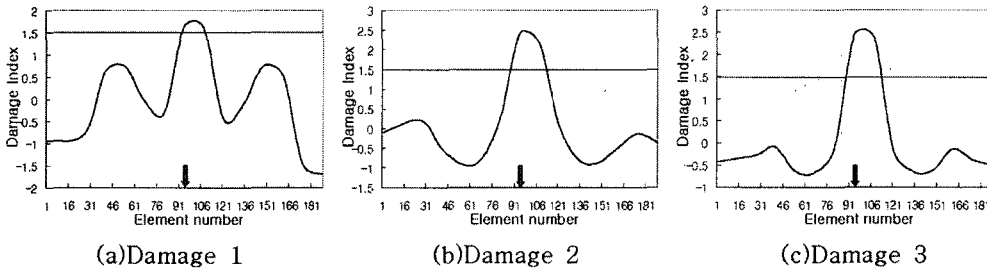


그림 6 고유진동수 기반 손상위치 검색

5.2 EMI기법

EMI기법은 다음의 순서로 손상검색을 한다. 대상구조물의 볼트 풀림 손상을 검색하기 위하여, 먼저 EMI 신호를 검출할 PZT Patch의 위치를 선정한다. 능동 가진 실험으로부터 공진 주파수를 추출한다. 다음으로, 추출된 공진주파수를 중심주파수로 두고 일정 범위의 EMI 신호를 계측한다. 계측된 EMI 신호로부터 통계적 기법인 RMSD로 손상을 평가하고 공진주파수의 변화로부터 손상 판별을 한다. 그림 7는 PZT 1에서의 Admittance를 도시한 것으로 손상 시나리오에 따라 EMI 신호의 패턴이 변화함을 보여주고 있다.

이러한 EMI 신호의 변화로부터 손상검색을 수행하였다. 손상검색의 한 방법인 RMSD(root mean square deviation)는 다음 식과 같이 정의된다.

$$RMSD(\%) = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (Z_j^d - Z_j^0)^2}{\sum_{j=1}^N (Z_j^0)^2}} \times 100 \quad (10)$$

이러한 RMSD 평가방법으로 손상검색을 수행한 결과 그림 8와 같이 Susceptance의 경우 Damage 1에서 PZT patch 4개 모두 손상이 발견되었으며 PZT1의 RMSD 값이 높고, Damage 2에서 PZT 2의 RMSD 값이 큼을 알 수 있으며 Damage 3에서 PZT3의 RMSD 값이 Damage 2보다 컸다. 그리고 Admittance의 경우 그림 9과 같이 Damage 1에서 PZT1이 위험경보를 하였고 Damage 2에서 PZT 2가 위험경보를 하였다. Damage 3에서 PZT3이 위험경보를 하였으나 Damage 1에서 더 큰 RMSD 값을 보였고, PZT4는 Damage 1

과 Damage 3에서 위험경보를 했다.

공진 주파수의 변화를 살펴보면 그림 10과 같이 손상 시나리오에 따른 손상검색 결과 Damage 1에서 PZT1과 PZT3이 큰 변화를 보였으며 Damage 2에서 PZT 4의 공진 주파수가 변함을 알 수 있고 Damage 3에서 PZT 1의 공진 주파수가 크게 변함을 알 수 있다.

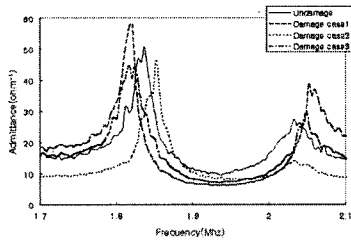


그림 7 Admittance 신호 of PZT1

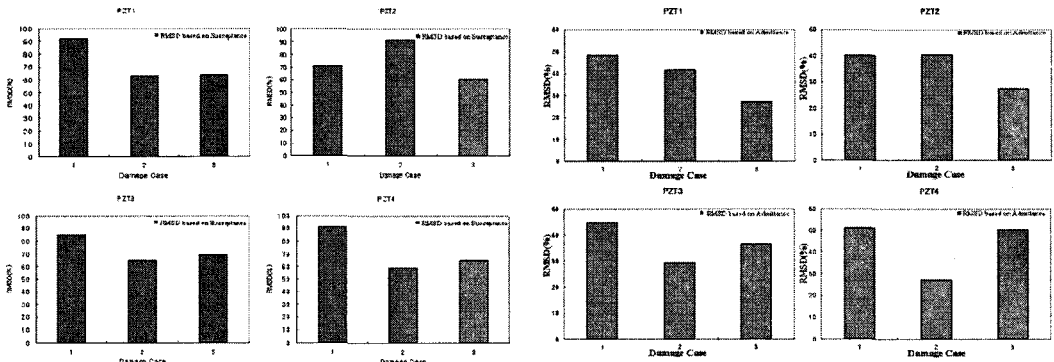


그림 8 RMSD based on Susceptance 평가

그림 9 RMSD based on Admittance 평가

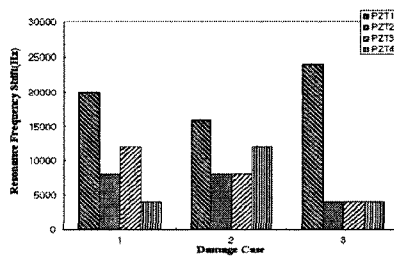


그림 10 손상에 따른 공진 주파수의 변화

6. 요약 및 결론

본 논문에서는 양단 고정보 볼트접합부 모형을 대상으로 손상 시나리오에 따른 전역-국부적 혼합 전진성 모니터링을 수행하였다. 먼저, 실험 대상인 양단 고정보 볼트접합부 모형의 실험으로부터 볼트 풀림에 따른 가속도 응답과 임피던스 응답신호를 계측하였다. 다음으로, 계측된 가속도 신호를 주파수 영역에서 분석하여 동적 특성을 추출하고 24회 평균된 고유진동수 기반 손상검색을 이용하여 중앙부근의 손상 영역을 확인하였