

가속도 및 임피던스 신호의 특징분류를 통한 교량 연결부의 하이브리드 손상 모니터링 기법

Hybrid Damage Monitoring Technique for Bridge Connection Via Pattern-Recognition of Acceleration and Impedance Signals

김정태¹⁾ · 나원배²⁾ · 홍동수³⁾ · 이병준⁴⁾

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

국문 요약 >> 본 논문에서는 구조물의 전역적인 손상도 평가와 국부 구조 연결부의 손상 검색을 동시에 수행할 수 있는 하이브리드 구조 손상 모니터링 체계가 제시되었다. 하이브리드 손상 모니터링 체계는 진동기반 기법과 전기/역학적 임피던스 기법으로 구성되었다. 진동기반 기법은 구조물의 모드특징의 변화를 사용하여 구조물의 전역적 특성의 변화를 감지하고, 전기/역학적 임피던스 기법은 PZT 센서의 저항 변화를 사용하여 국부 구조 연결부의 손상 여부를 검출한다. 제안된 하이브리드 모니터링 체계를 검증하기 위해 구조 연결부의 볼트 풀림 상황을 손상 시나리오로 선택하였으며, 가속도 응답과 임피던스 응답 신호가 측정되었다. 실험 결과, 제안된 하이브리드 모니터링 체계를 통해 구조물의 전역적 손상 상태와 국부 구조 연결부의 손상을 정확하게 모니터링 할 수 있었다.

주요어 하이브리드 모니터링, 구조 연결부, 고유진동수, 모드형상, 전기/역학적 임피던스, 진동 기반 손상검색

ABSTRACT >> This paper presents hybrid structural damage monitoring system which performs both global damage assessment of structure and damage detection of local structural joints. Hybrid damage monitoring system is composed of vibration-based technique and electro/mechanic impedance technique. Vibration-based technique detects global characteristic change of structure using modal characteristic change of structure, and electro/mechanical impedance technique detects damage existence of local structural joints using impedance change of PZT sensor. For the verification of the proposed hybrid monitoring system, a series of damage scenarios are designed to loosened bolts situations of the structural joints, and acceleration response and impedance response signatures are measured. The proposed hybrid monitoring system is implemented to monitor global damage-state and local damages in structural joints.

Key words hybrid monitoring, structural joints, natural frequency, mode shape, electro/mechanical impedance, vibration-based damage detection

1. 서론

대형 구조물은 설계 및 시공과정에서의 결함 또는 설계 당시에 고려되지 못하였던 각종 하중조건과 환경요인, 자연 재해로 인해 구조 손상이 발생할 위험이 있다. 특히, 구조 연결부의 손상은 응력 전달의 불균형과 편심효과를 가져오

며 응력 집중의 효과로 인한 또 다른 손상을 초래한다. 이에 구조물의 안전성을 확보하기 위한 노력으로 구조물의 응답 변화를 이용하는 구조 건전성 모니터링(structural health monitoring; SHM) 기법에 관한 연구가 활발히 수행되어 오고 있다.⁽¹⁻³⁾ 이상적인 구조 건전성 모니터링 기법이 갖추어야 할 전제 조건은 다음과 같다. 먼저, 구조물 내의 손상 발생의 유무를 검출 할 수 있어야 한다. 둘째, 손상이 존재한다면 손상의 위치를 정확히 검색할 수 있어야 한다. 또한, 손상의 정도를 추정할 수 있어야 하며, 손상이 구조물의 성능에 미치는 영향을 평가할 수 있어야 한다.⁽⁴⁾

구조 건전성 모니터링 기법은 그 영역에 따라 크게 전역적 기법과 국부적 기법으로 구분된다. 소위 진동기반 구조

¹⁾ 정회원·부경대학교 해양공학과 교수

(대표전자: idis@pknu.ac.kr)

²⁾ 부경대학교 해양공학과 조교수

³⁾ 부경대학교 해양공학과 석사과정

⁴⁾ (주)오션스페이스 연구원

본 논문에 대한 토의를 2007년 2월 28일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2006. 10. 18 / 심사종료일 : 2006. 11. 22)

건전성 모니터링이라고 불리는 전역적 모니터링 기법은 저 주파수 대역의 진동 특성치의 변화를 감지하여 구조 특성치의 변화를 식별하는 개념에 기초한다. 이런 모니터링 기법은 고유진동수와 모드형상 등 진동 특성치에 큰 변화를 발생시키는 손상의 검색에 용이하다.⁽⁵⁾ 하지만 손상의 위치가 모드 특성 민감도의 변화가 작은 곳인 경우와 손상 크기가 초기 균열과 같이 모드특성 민감도의 변화를 작게 야기하는 경우에는 손상 검색이 어렵다. 이에 고주파수 대역의 진동 특성을 이용하여 국부의 미소 손상을 검색하는 국부적 모니터링 기법에 대한 연구가 활발히 수행되고 있다. 이러한 모니터링 기법들은 센서 인접부의 상태 변화의 검출이 용이한 특징을 이용하여 파괴위험 부위와 같은 특정부의 손상여부 규명에는 용이하지만 모니터링 영역이 협소하다는 제약이 따른다.⁽⁶⁾

1993년 성수대교 붕괴는 대형 구조물에 있어 구조물의 주요 부재의 파괴 유형에 적합한 모니터링 체계의 필요성을 보여준다. 대형 구조물의 경우 다양한 접합 방법들이 도입되어 하나의 구조물로서 거동하게 된다. 이런 대형 구조물의 이상 상태를 식별함에 있어 특정 모니터링 기법만으로 구조물에 발생하는 이상 거동을 모니터링하고 신속한 조치를 취하기에는 한계가 있다. 먼저, 진동기반의 전역적 모니터링 기법을 도입하여 전체 구조물의 이상 거동을 감지하는 것은 가능하나, 이상 거동의 원인이 되는 국부적 상태를 식별하는데 어려움이 있다. 또한, 전통적인 비파괴검사 기법들을 이용한 국부적 모니터링 기법을 도입하여 파괴 위험부와 같은 국부 구조 연결부의 이상 상태를 식별할 수 있으나, 구조물 전체에 존재하는 많은 파괴 위험부 거동을 모니터링 하기에는 많은 인력과 시간이 소모된다. 이에 전체 구조물에 대한 전역적 모니터링을 통해 이상 거동의 발생 및 대략적인 영역을 확인하고 국부적 모니터링을 통해 이상 거동의 원인을 식별하여 신속한 대처가 가능한 새로운 모니터링 체계의 연구가 필요하다.

본 논문에서는 기존의 모니터링 기법의 장점들을 활용하여 국부적이고 전역적인 손상 정보를 획득할 수 있는 하이브리드 구조 건전성 모니터링(hybrid structural health monitoring) 체계를 제안하고자 한다. 전역적 모니터링 기법으로는 진동기반 손상 검색 기법을 선택하였으며, 국부적 모니터링 기법으로는 전기/기계적 임피던스(electro/mechanical impedance) 기법을 선택하였다. 이러한 기법들은 구조물의 상태를 진단함에 있어 다른 모니터링 기법들에 비해 측정이 쉽고, 경제성이 우수하며 현장 적용성이 뛰어나다.^(6,9) 제안된 하이브리드 모니터링 기법은 손상 정보를 취득함에 있어 전역적

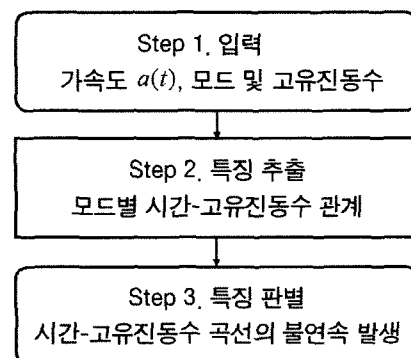
기법이 손상 발생 유무 및 손상의 영역을 추정하고, 국부적 기법은 손상의 위치를 판별한다.

하이브리드 구조 건전성 모니터링 기법의 적합성을 검증하기 위해 볼트로 연결된 양단 고정 모형 알루미늄 보에 대한 실험을 수행하였다. 먼저, 연결부의 일련의 볼트풀림 상황을 손상시나리오로 선택하여 각 손상 시나리오에 대한 가속도 응답과 임피던스 응답신호를 계측하였다. 다음으로, 계측된 가속도 신호를 주파수 영역에서 분석하여 동적 특성을 추출하고 고유진동수 시간이력과 고유진동수 기반 손상 검색 기법을 이용하여 손상 발생 및 손상 영역을 검색하였다. 마지막으로, 계측된 임피던스 신호를 주파수 영역에서 분석하여 전기/역학적 임피던스 특징정보를 추출하고 그 변화를 분석하여 손상 위치를 검색하였다.

2. 진동기반 손상 검색 기법

2.1 고유진동수 시간이력

일반적으로 손상은 구조강성 및 에너지소산특성과 같은 동적응답특성의 변화를 초래해 고유진동수를 변화시킨다. 이에 손상 발생 시 시간-고유진동수 관계에서 고유진동수의 불연속이 발생하고, 이로부터 손상 발생에 대한 위험정보를 하고자 하는 것이다.^(10,11) 고유진동수 시간이력분석을 통해 손상 발생에 대한 위험정보를 하기위한 고유진동수 시간이력 모니터링 알고리즘을 그림 1과 같이 구성하였다. 먼저, 임의 시간에 계측된 가속도 신호의 FFT(fast fourier transform) 또는 STFT(short time fourier transform)분석을 통해 주파수 대역에서의 특정 진동모드의 고유진동수를 추출한다. 이때, 신호를 계측할 가속도계의 위치는 구조 강성 및 질량 등의 구조 특성치의 변화에 민감한 곳이어야 한다. 다음으로, 모드별 시간-고유진동수 관계를 도출한다. 마지막으로, 시간-고유진동수관계에서의 불연속이 발생할 때까지 주기적으로



〈그림 1〉 고유진동수 시간이력 모니터링 알고리즘

계측하여 손상 발생에 대한 위험정보를 수행한다.

2.2 고유진동수 기반 손상 검색

고유진동수 기반 손상검색(frequency-based damage detection; FBDD)은 진동모드특성치의 변화로 직접 손상의 위치를 추정하는 Kim과 Stubbs⁽⁷⁾가 제시한 알고리즘을 사용하였다. 먼저, 구조물의 초기상태와 손상상태에서의 진동특성치가 모드실험으로부터 계측된다. 초기상태의 모드특성자료가 기록되지 않은 현존하는 구조물의 경우에는 초기진동특성치가 해석적인 방법으로 추정 될 수 있다. 다음으로, 초기상태와 손상상태의 모드 특성치와 구조특성치가 손상예측 모델에 입력되어 손상위치가 추정된다.

손상위치예측모델은 모드민감도와 고유진동수 사이의 선형적 관계로부터 간접적으로 해를 구하는 방법을 사용한다. 전체 NE 부재($j = 1, 2, \dots, NE$) 구조계의 계측된 NM 개 모드 중 임의의 두 모드 m 과 n 을 고려하자. 임의의 m 모드에 대한 민감도 방정식이 다음과 같이 표현된다.

$$\sum_{j=1}^{NE} F_{mj} \alpha_j = Z_m \tag{1}$$

여기서, F_{mj} 는 m 모드에서 j 부재가 차지하는 변형 에너지량의 비율을 나타내는 모드 민감도이고, Z_m 은 손상발생 전후의 m 모드 고유치의 변화율, α_j ($-1 \leq \alpha_j \leq 0$)는 j 번째 부재의 부재강성도의 변화율을 나타낸다. 또한, 임의의 n 모드에 대해서 식 (1)은 다음과 같이 표현된다.

$$\sum_{j=1}^{NE} F_{nj} \alpha_j = Z_n \tag{2}$$

다음으로, 구조계의 단일위치 q 가 손상되었다고 가정하자. 이는 다음과 같은 제약조건을 의미한다.

$$\begin{aligned} \alpha_j &= 0, \quad j \neq q \\ \alpha_j &\neq 0, \quad j = q \end{aligned} \tag{3}$$

여기서, $\alpha_j \neq 0$ 는 $-1 \leq \alpha_j \leq 0$ 인 조건이다. 그러면 식 (1), 식 (2)는 다음과 같이 표현된다.

$$Z_m / Z_n = F_{mq} / F_{nq} \tag{4}$$

여기서, Z_m / Z_n 은 손상 발생에 의한 m 모드 고유치변화율과 n 모드 고유치변화율의 비이고, F_{mq} / F_{nq} 은 m 모드에서의 부재 q 의 모드 민감도와 n 모드에서의 부재 q 의 모드 민감도의 상대적인 비를 나타낸다. 위의 식 (4)는 식 (2)에 의거하여

전체 계측모드 NM 에 대하여 다음과 같이 확장될 수 있다.

$$Z_m / \sum_{k=1}^{NM} Z_k = F_{mq} / \sum_{k=1}^{NM} F_{kq} \tag{5}$$

한편, 식 (4)와 식 (5)는 상기의 가정과 식 (3)에 의거하여 부재 q 가 손상된 조건에서만 성립한다. 임의의 부재 j ($j = 1, 2, \dots, q, NE$)에 대해서 식 (5)가 성립하는 정도는 다음과 같은 오차지수를 사용하여 산정하였다.

$$e_{ij} = Z_m / \sum_{k=1}^{NM} Z_k - F_{mq} / \sum_{k=1}^{NM} F_{kq} \tag{6}$$

여기서, e_{ij} 는 i 모드와 j 부재의 오차를 나타내며 그 값은 j 부재의 위치가 실제 손상위치 q 와 일치하는 위치오차 정도를 지시한다. 식 (6)은 오차가 '0' 일 때, j 부재에서 손상이 예측되었음을 의미한다. 즉, 미지의 손상위치 q 에서 $e_{iq} = 0$ 이 성립하면 q 부재에 손상이 발생한 것을 의미하며 식 (6)과 같은 오차지수를 통해 j 부재의 손상을 예측하기 위한 j 부재의 손상위치지수 β_j 는 다음과 같이 정의된다.

$$\beta_j = \left[\sum_{i=1}^{NM} e_{ij}^2 \right]^{-1/2} \tag{7}$$

여기서, 손상위치지수 β_j 는 $-1 \leq \beta_j < \infty$ 의 값을 가지며, 추정된 값이 국부 최대인 임의의 위치 j 가 손상 위치로 예측된다.

3. 전기/역학적 임피던스 기법

전기/역학적 임피던스(electro-mechanical impedance) 기법은 PZT(piezoelectric zirconate-titanate) 패치를 이용하여 국부적 위치에서의 상태 변화를 감지하는 모니터링 기법이다. PZT 패치는 압전현상을 일으키는 압전세라믹(piezoceramics)으로 만들어졌다. 이는 역 압전효과와 압전효과가 동시에 작용하여 센서와 가진의 역할을 동시에 수반한다.^(12,13) 전기/역학적 임피던스 기법은 이 두 효과를 이용한 기법으로 전기/역학적 임피던스 신호로부터 구조 손상이나 구조물의 다른 물리적 변화를 알아낸다. 이런 PZT 패치의 거동에 관한 압전 기본식은 다음과 같다.

$$S_i = s_{ij}^E T_j + d_{mi} E_m \tag{8}$$

$$D_m = d_{mi} T_i + \epsilon_{mk}^T E_k \tag{9}$$

여기서, S 는 역학적 변형률, T 는 역학적 응력, E 는 전기장, D 는 전하밀도, s 는 컴플라이언스, d 는 압전 결합상수, ϵ 는

PZT 재료의 절연상수를 나타낸다. 하첨자 i, j, m, k 는 응력, 변형률 혹은 전기장의 방향을 나타내고, 상첨자 E 와 T 는 상대적으로 일정한 전기장과 무응력 상태에서 측정된 값이라는 것을 나타낸다. 식 (8)은 역 압전효과를 나타내며 식 (9)는 압전효과를 나타낸다.⁽¹⁴⁾

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

$$Z = c + \left(\frac{m\omega^2 - k}{\omega} \right) i = |Z|e^{i\theta} \tag{10}$$

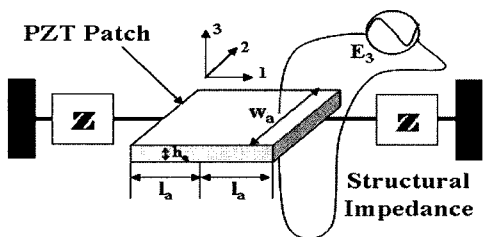
여기서, F_0 는 가진력, \dot{x}_0 는 속도이며, m, c, k 는 각각 구조물의 질량 감쇠 강성을 의미하고 실수부는 에너지가 소산하는 물리량을 표현하고 허수부는 반작용 물리량이다. 또, 그림 2과 같이 폭 w_a , 높이 h_a 그리고 길이가 $2l_a$ 인 직육면체 형태의 PZT 패치에 대한 임피던스는(Z_a)는 다음과 같이 구할 수 있다.⁽⁶⁾

$$Z_a = \frac{k w_a h_a \overline{Y_{11}^E}}{(i\omega) \tan(k l_a)} \tag{11}$$

여기서, $k = \omega \sqrt{\rho/Y_{11}^E}$ 는 파수(wave number)이며, 이 때 ω 는 가진 주파수이다. 그리고 구조물-센서 시스템의 전기/기계적 임피던스는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\overline{Y} = 2\omega i \frac{\omega_a l_a}{h_a} \left[\left(\frac{T}{\epsilon_{33}} - d_{31}^2 \overline{Y_{11}^E} \right) + \left(\frac{Z_a}{Z + Z_a} \right) d_{31}^2 \overline{Y_{11}^E} \left(\frac{\tan k l_a}{k l_a} \right) \right] \tag{12}$$

구조물의 질량, 감쇠 및 강성과 관련하여 전기/역학적 임피던스 신호가 생성되며 동특성을 이용하여 특징을 분석할 수 있다. 따라서 손상에 따른 구조계의 변화로부터 손상 전후의 임피던스는 변화하고 이는 어드미턴스(admittance)의 크기와 공진 주파수에 변화를 준다.⁽¹⁵⁻¹⁸⁾ 이로부터 구조 손상이나 다른 물리적 변화에 대한 모니터링이 가능해진다. 그리고 구조물-PZT 패치 시스템의 능동 어드미턴스(active admittance)는 다음과 같이 표현된다.



〈그림 2〉 구조물-PZT 패치의 상호작용 모델⁽⁶⁾

$$\overline{T}_A = G_A + B_A i = \omega i \frac{\omega_a l_a}{h_a} \frac{Z_a}{Z + Z_a} d_{31}^2 \overline{T_{11}^E} \left(\frac{\tan k l_a}{k l_a} \right) \tag{13}$$

4. 하이브리드 구조 건전성 모니터링 체계

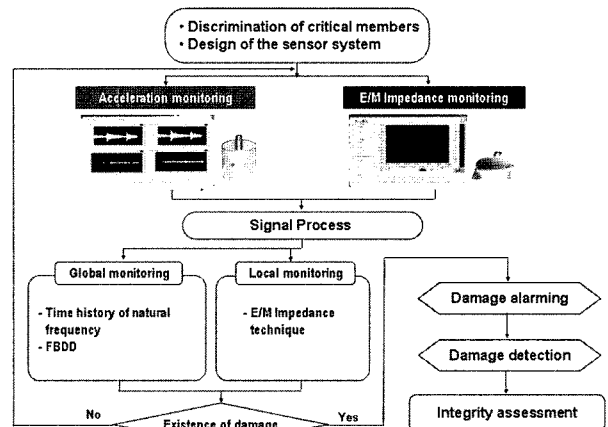
구조물에 신뢰할 만한 모니터링 체계를 구축하기 위해 그림 3와 같은 하이브리드 구조 건전성 모니터링 체계를 제시하였다. 먼저, 대상구조물의 위험 유형을 분석한 후 그에 따른 센서 시스템을 선정한다. 센서 시스템의 설계에 있어 가속도 모니터링의 경우 동특성 정보를 추출하기 위한 최적의 위치에 센서를 설치하며, 전기/역학적 임피던스 모니터링의 경우 모니터링 영역이 매우 협소하므로 모니터링하고자 하는 위치에 센서를 부착한다. 다음으로, 각각의 센서로부터 취득된 신호를 일련의 신호처리과정을 거친 후 선택된 모니터링 기법을 이용하여 손상의 존재에 대한 결정을 수행한다. 손상 발생시 위험경보를 발하고 손상영역과 손상위치를 추정하며 손상유형을 결정한다.

하이브리드 구조 건전성 모니터링 체계는 일련의 과정을 통하여 구조물의 손상 검색을 수행하며, 전역적 모니터링 기법으로부터 손상 발생 유무 및 손상 영역을 확인하고, 국부적 모니터링 기법으로부터 정확한 손상 위치를 검색한다. 이는 모니터링 기법의 효율성을 높일 뿐 아니라, 실시간 모니터링과 신뢰도 향상에도 기여 할 수 있다.

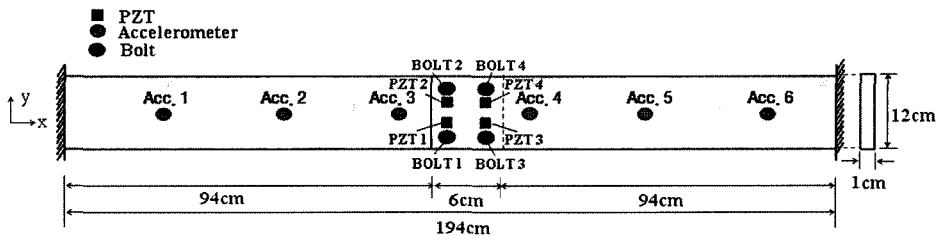
5. 실험 검증

5.1 실험 모델 구성

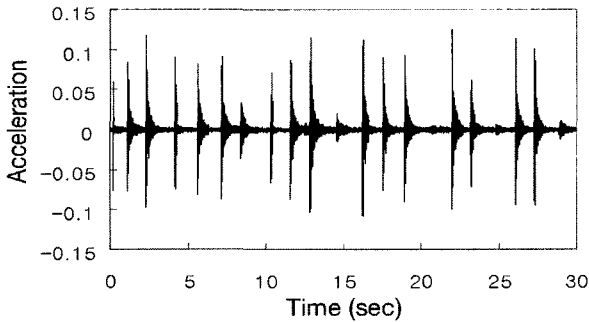
제안된 하이브리드 모니터링 기법을 평가하기 위해 실험에 사용된 양단 고정보 모형은 그림 4와 같이 알루미늄 보(1cm × 12cm × 100cm)를 6cm 중첩하여 4개의 볼트로 연결 되어



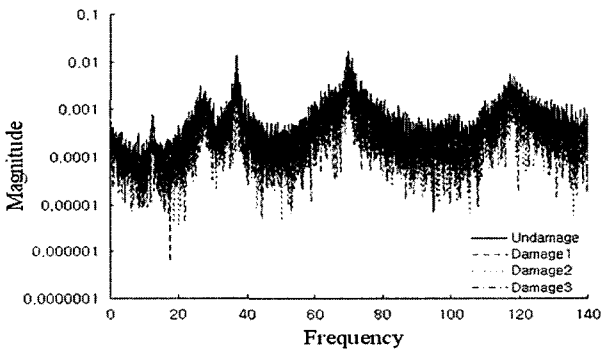
〈그림 3〉 하이브리드 구조 건전성 모니터링 체계



〈그림 4〉 대상 구조물의 볼트 연결부 실험 모식도



〈그림 5〉 대상구조물의 가속도 신호 응답(센서 Acc.3)



〈그림 6〉 가속도 신호(센서 Acc.3)의 주파수 응답 함수

있으며, 압전형 가속도계(PCB 393B04)는 총 6개를 고정단으로부터 29.5cm 떨어진 위치부터 등간격(27cm)으로 배열하였다. PZT 패치는 볼트의 근접위치에 길이방향으로 3cm, 폭 방향으로 6cm 간격으로 총 4개를 부착하였다. 대상 구조물 재료의 특성과 PZT 재료의 특성을 표 1과 표 2에 각각 요약하였다. 손상시나리오는 볼트 연결부 모형의 파괴 위험요소인 볼트 풀림으로 선정하였으며, 표 3에서 요약된 것과 같이 순차적으로 3개의 볼트가 풀린 상태까지의 3가지 경우(Damage 1은 볼트 1개 풀림, Damage 2는 볼트 2개 풀림, Damage 3는 볼트 3개 풀림)를 살펴보았다. 동적 응답신호를 받기 위해, $x/L=0.013$ 위치에 가진 지점을 설정하고 충격 해머로 충격하중을 주어 각 시나리오 별 24회 가진 실험을 수행하였다.

압전형 가속도계를 이용하여 샘플링 주파수를 1,000Hz로 하고 총 32,678개의 가속도 신호를 취득하였다. 그림 5는 볼트 연결부 좌측의 3번 가속도 센서($x/L=0.43$)에서 획득된

〈표 1〉 대상 구조물 재료의 물성치

Elastic Modulus	Mass Density	Poisson's ratio
$70 \times 10^9 \text{kgf/m}^2$	2700kgf/m^3	0.33

〈표 2〉 PZT 재료의 특성

Density	7800kg/m^3
Electric permittivity	$2.124 \times 10^{-8} \text{farad/m}$
Piezoelectric strain coefficient	$-2.1 \times 10^{-10} \text{m/v}$
Young's modulus	$4.667 \times 10^{10} \text{N/m}^2$
Dielectric loss factor	0.015

〈표 3〉 볼트 풀림에 대한 손상 시나리오

Case	Scenario
Damage 1	Bolt 1 loosened
Damage 2	Bolts 1, 2 loosened
Damage 3	Bolts 1, 2, 3 loosened

〈표 4〉 실험에서 추출된 대상 구조물의 고유진동수

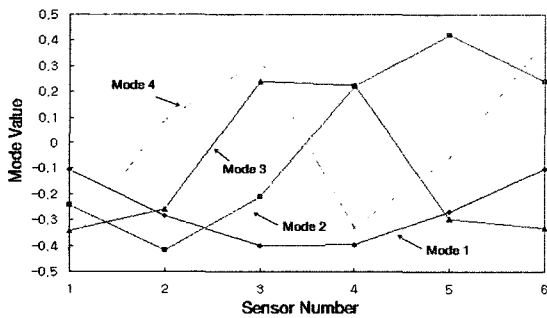
Case	Natural Frequency (Hz)			
	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4
Undamage	12.61	36.91	70.07	118.35
Damage 1	12.58	36.94	69.95	118.7
Damage 2	12.55	36.89	69.82	118.08
Damage 3	12.51	36.93	69.25	117.71

비손상상태의 가속도 신호를 나타내며 그림 6는 FFT변환으로 추출된 손상시나리오별 주파수응답함수를 나타낸다. 모드특성을 추출하기 위하여 실험에서 획득된 가속도 데이터로부터 상호상관스펙트럼 행렬을 특이치 분해하여 고유진동수와 모드형상을 추출하는 주파수영역분해법(frequency domain decomposition; FDD)을 이용하였다.⁽¹⁹⁾ FDD를 이용하여 추출된 각 손상 시나리오별 고유진동수의 24회 평균값을 표 4에 요약하였으며 비 손상 상태의 저차 4개의 휨 모드에 대한 모드형상은 그림 7과 같다.

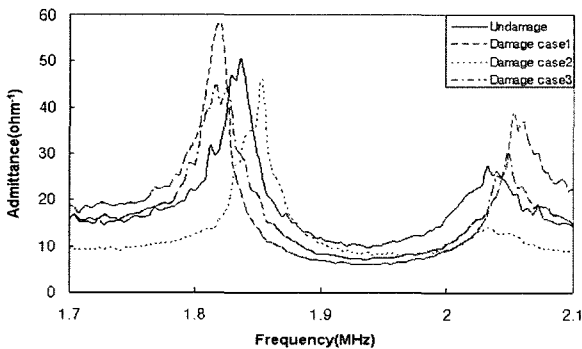
전기/기계적 임피던스 모니터링을 위해 임피던스 분석기는 HIOKI 3532를 사용하였으며 신호의 주파수 간격은 1KHz이고, 전압의 크기는 1V로 하여 신호를 추출하였다. 본 실험

에서는 실험적 오차가 상대적으로 적은 두께방향 모드의 공진 주파수 대역을 사용하였다. 그림 8는 PZT 1에서의 어드미턴스를 도시한 것으로 손상 시나리오에 따라 전기/기계적 임피던스 신호의 패턴이 변화함을 보여주고 있다. 대상구조물의 볼트 풀림 손상을 검색하기 위하여, 먼저 가진 실험으로부터 공진 주파수를 추출한다. 다음으로, 추출된 공진주파수를 중심주파수로 두고 일정 범위의 전기/기계적 임피던스 신호를 계측한다. 계측된 전기/기계적 임피던스 신호로부터 통계적 기법인 RMSD(root mean square deviation)로 손상을 평가하고 공진주파수의 변화로부터 손상 판별을 한다. 손상검색의 한 방법인 RMSD는 다음 식과 같이 정의된다.

$$RMSD(\%) = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (Z_j^d - Z_j^0)^2}{\sum_{j=1}^N (Z_j^0)^2}} \times 100 \quad (14)$$



〈그림 7〉 대상 구조물의 실험 모드 형상



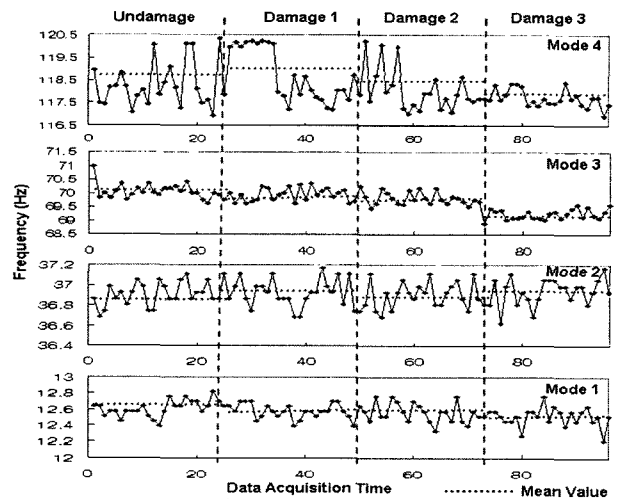
〈그림 8〉 볼트 연결부 PZT 1 센서의 어드미턴스 신호

여기서, Z_j^d 는 j 번째 측정점에서의 손상 후의 임피던스 신호를 나타내며, Z_j^0 는 j 번째 측정점에서의 손상 전의 임피던스 신호를 나타낸다.

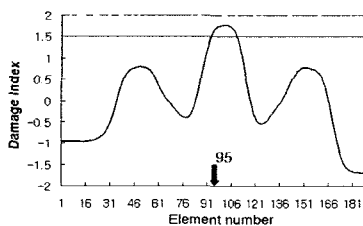
5.2 실험 결과

먼저 고유진동수 시간이력의 결과를 살펴보면, 그림 9와 같이 손상 시나리오에 대하여 각 모드별로 시간-고유진동수의 불연속성이 발생하고 있으나 손상에 따른 그 차이가 확연하게 나타나지 않았다. 그러나 각 손상 시나리오 별 고유진동수의 평균값의 변화를 살펴보면 Mode 1, Mode 3에 일정 경향으로 고유진동수가 낮아짐을 알 수 있었다. 따라서 Mode 1, Mode 3의 결과로부터 손상이 발생하였음을 예측할 수 있다.

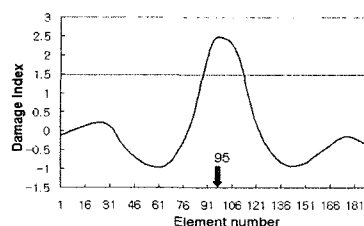
아래의 그림 10은 FBDD의 결과로부터 추론된 손상 위치의 결과를 보여준다. 실제 손상의 위치를 살펴보면, Damage 1과 2의 경우 95 요소 근처이며, Damage 3의 경우 손상 위치는 95와 98 요소 근처이다. 하지만, 추론된 결과로 Damage 1의 경우 그림 10(a)와 같이 손상지수(damage index)가 1.5이상인 영역은(정규분포상 기각영역 93.3%) 93-108번 요소로 나타났다. Damage 2의 경우 그림 10(b)와 같이 손상지수가



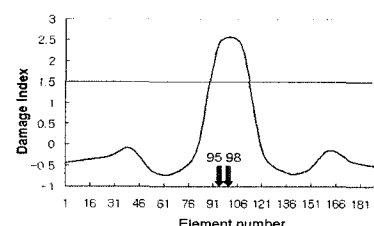
〈그림 9〉 대상 구조물의 고유진동수 시간이력 모니터링



(a) Damage 1

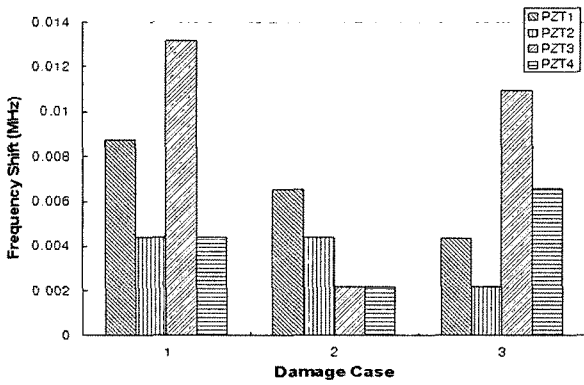


(b) Damage 2



(c) Damage 3

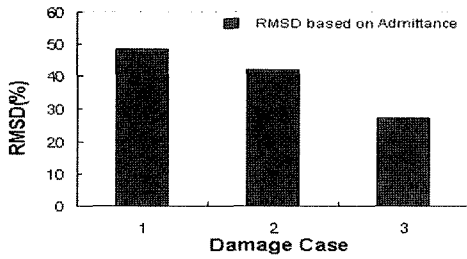
〈그림 10〉 대상 구조물의 고유진동수 기반 손상 검색



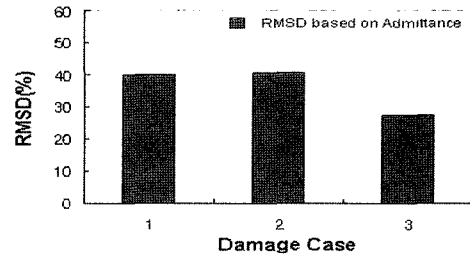
〈그림 11〉 손상에 따른 공진 주파수의 변화

1.5이상인 영역은 89-113번 요소로 나타났다. Damage 3의 경우 그림 10(c)와 같이 손상지수가 1.5이상인 영역은 90-113번 요소로 나타났다. 이처럼 손상 위치를 포함한 손상 영역을 추정할 뿐 정확한 손상위치 추정에는 어려움이 있다.

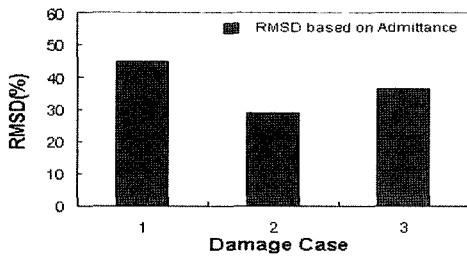
그림 11은 손상 시나리오별 PZT의 공진 주파수 변화 결과로 손상에 의한 공진주파수 변화가 확인된다. 국부적인 영역에서는 정확한 손상위치를 검색하기 위해, RMSD 평가 방법으로 손상검색을 수행한 결과를 그림 12와 그림 13에 나타내었다. 그림 12은 어드미턴스를 기초로 한 RMSD 결과를 나타내었고, 그림 13은 서셉턴스(Susceptance)를 기초로 한 RMSD 결과를 나타내었다. 결과로부터 유추해 낼 수



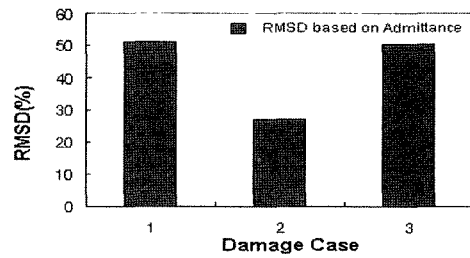
(a) PZT 1



(b) PZT 2

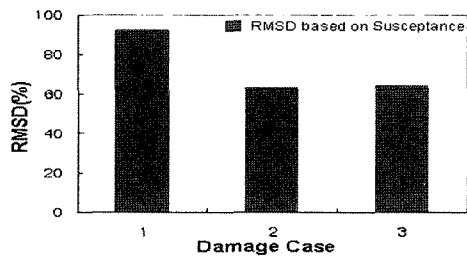


(c) PZT 3

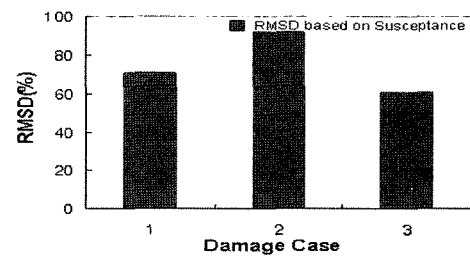


(d) PZT 4

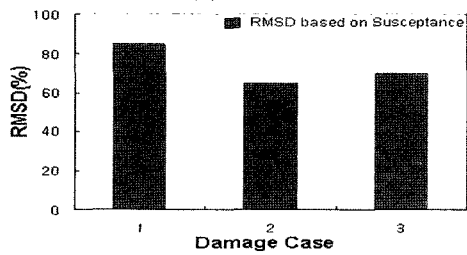
〈그림 12〉 어드미턴스를 기초로 한 RMSD 평가



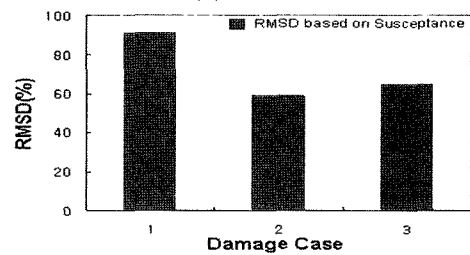
(a) PZT 1



(b) PZT 2



(c) PZT 3



(d) PZT 4

〈그림 13〉 서셉턴스를 기초로 한 RMSD 평가

있는 사실은 볼트 풀림에 근접한 센서에서 손상에 대한 민감도가 더 크다는 것이다. 예를 들어, 그림 12에서 보면 PZT 1의 경우 Bolt 1(Damage 1)의 풀림에 의한 손상이 가장 민감하였고, PZT 2의 경우 Bolt 1과 Bolt 2(Damage 1 혹은 Damage 2)의 풀림에 의한 손상이 민감하였다. PZT 3과 PZT 4의 경우 Damage 2보다는 Damage 1과 Damage 3에서 더 민감하게 나타났다. 이는 그림 13에서도 유사한 결과를 보인다. 이로부터 국부적인 영역에서의 손상의 위치를 비교적 정확하게 추정할 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 구조물의 전역적인 손상도 평가와 국부 구조 연결부의 손상 검색을 동시에 수행할 수 있는 하이브리드 구조 손상 모니터링 체계가 제시되었다. 이 같은 목적을 달성하기 위하여 다음과 같은 연구가 수행되었다. 먼저, 실험 대상인 양단 고정보 볼트 연결부 모형의 실험으로부터 볼트 풀림에 따른 가속도 응답과 임피던스 응답신호를 계속하였다. 다음으로, 계속된 가속도 신호를 주파수 영역에서 분석하여 동적 특성을 추출하고 24회 평균된 고유진동수 시간이력으로부터 손상 발생 유무를 경보할 수 있었고, 고유진동수 기반 손상검색을 이용하여 중앙부근의 손상 영역을 확인하였다. 마지막으로, 계속된 임피던스 신호를 주파수 영역에서 분석하여 전기/역학적 임피던스 특징정보를 추출하고 그 변화를 분석하여 국부영역의 손상을 검색하였다. 그 결과 국부영역의 볼트 풀림의 위치를 비교적 정확하게 검색하였다.

손상 부재가 파괴 위험부재일 경우 기존의 전역적 모니터링 기법만을 이용하여 손상 검색을 수행하였을 때, 손상 영역을 추정할 뿐 손상위치를 명확하게 판단하기 어려웠다. 이에 즉각적인 보수가 이루어져야 할 경우 국부적 모니터링 기법이 동시에 요구된다. 그러므로 본 논문과 같이 전역적 모니터링 기법인 고유진동수 시간이력으로부터 손상유무를 확인한 후, 고유진동수 기반 손상검색으로 손상 영역을 추정하고, 국부적 모니터링 기법을 도입하여 손상 위치를 찾는 하이브리드 모니터링 체계의 구축이 필요하다. 본 연구에서 제안된 기법을 실 구조물에 적용하기 위해서는 신호분석 및 모델 결정시의 불확실성 요인에 대한 정량적 평가가 필요하며, 향후 이에 대한 깊이 있는 실험 연구가 진행될 예정이다.

감사의 글

이 연구는 2005년도 교육인적자원부의 재원으로 학술진흥

재단의 지원을 받아 수행된 연구(KRF- 2005-041-D00780)이며, 저자는 이에 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. 윤정방, 이형진, "System Identification 기법을 이용한 교량의 안전진단방법", 대한토목학회지, 제 45권, 2호, 1997, pp. 74-82.
2. 김정태, "소수의 고유진동수를 사용하는 비파괴 균열발견모델의 유도 및 검증", 한국전산구조공학회, 제 12권, 2호, 1999, pp. 140-159.
3. Sohn, H., Farrar, C.R., Hemez, F.M., Shucnk, D.D., Strmemales, D.W. and Nadler, B.R. *A Review of Structural Health Monitoring Literature 1996-2001*, LA-13976-MS, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos. 2003, 301pp.
4. Rytter, A., "Vibration based inspection of civil engineering," Ph.D. Dissertation, University of Alborg, Denmark, 1993.
5. Kim, J.T., Ryu, Y.S., Cho, H.M. and Stubbs, N., "Damage identification in beam-type structures: frequency-based method vs mode-shape-based method," *Engineering Structure*, Vol. 25, No. 1, 2003, pp. 57-67.
6. Bhalla, S. and Soh, C.K., "Structural impedance based damage diagnosis by piezo-transducers," *Earthquake Engng Struct. Dyn.* Vol. 32, No. 12, 2003, pp. 1897-1916.
7. Kim, J.T. and Stubbs, N., "Improved damage identification method based on modal information," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 252, No. 2, 2002, pp. 223-238.
8. Giurgiutiu, V. and Zagari, A.N., "Embedded self-sensing piezoelectric active sensors for on-line structural identification," *Journal of Vibration and Acoustics-Transactions of ASME*, Vol 124, No. 1, 2002, pp. 116-125.
9. Giurgiutiu, V. and Zagari, A.N., "Damage detection in thin plates and aerospace structures with electro-mechanical impedance method," *Structural Health Monitoring*, Vol 4, No. 2, 2005, pp. 99-118.
10. Randall, R. B., *Frequency Analysis*, Research Studies Press LTD, 1987, 344pp.
11. Craig, R. R., *Structural Dynamics*, Wiley, New York, 1990, 523pp.
12. Liang, C., Sun, F.P. and Rogers, C.A., "An impedance method for dynamic analysis of active material system", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 8, No. 4, 1997, pp. 323-334.
13. Zhou, S.W. and Rogers C.A., "Heat Generation, Temperature, and Thermal Stress of Structurally Integrated Piezo-Actuators," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 6, No. 3, 1995, pp. 372-379.
14. Park, G., Farrar, C.R., Rutterford, A.C. and Robertson, A.N., "Piezoelectric active sensor self-diagnostics using electrical admittance measurements," *Journal of Vibration and Acoustics*, Vol. 128, No. 4, 2006, pp. 469-476.
15. Giurgiutiu, V. and Rogers, C.A., "Recent advancement in

- the electro-mechanical impedance method for structural health monitoring and NDE," *Proceedings of the SPIE's 5th International Symposium on Smart Structures and Materials*, 1998, pp. 536-547.
16. Giurgiutiu, V., Redmond, J., Roach, D. and Rackow, K., "Active sensors for health monitoring of aging aerospace structures," *Proceeding of the SPIE's 7th International Symposium on Smart Structures and Material*, 2000, pp. 294-305.
17. Park, G., Cudney, H.H. and Inman, D.J. "Feasibility of using impedance-based damage assessment for pipeline structures," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 30, No. 10, 2001, pp. 1463-1474.
18. Park, G., Kabeya, K., Cudney, H.H. and Inman, D.J. "Impedance-based structural health monitoring for temperature varying applications," *JSME International Journal*, Vol. 30, No. 2, 2001, pp. 1463-1474.
19. Yi, J.H. and Yun, C.B., "Comparative study on modal identification methods using output-only information," *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 17, No. 3, 2004, pp. 445-466.