

에너지소산률을 이용한 구조물의 건전도 모니터링에 관한 연구

An Energy-Dissipation-Ratio Based Structural Health Monitoring System

허 광 희*

Heo, Gwang-Hee

신 형 철**

Shin, Heung-Chul

신 재 철***

Shin, Jae-Chul

Abstract

This research develops a technique which uses energy dissipation ratio in order to monitor the structural health on real time basis. For real-time monitoring, we employ the NExT and the ERA which enable us to obtain real-time data. Energy dissipation ratio is calculated from those data only with the damping and natural frequency of the structure, and from the calculated values we develop an algorithm (Energy dissipation method) which decides the damage degree of structure. The Energy dissipation method developed in this research is proved to be valid by comparison with other methods like the eigenparameter method and the MAC. Especially this method enables us to save measuring time and data which are the most important in real-time monitoring, and its use of the ambient vibration also makes it easy to monitor the whole structure and its damage points.

요 지

본 연구에서는 에너지소산률을 활용하여 구조물의 건전도를 실시간 상에서 모니터링하는 기법을 제시하였다. 실시간 모니터링에 적합하도록 계측은 자연가진기법(NExT)이 채택되었고, 동적 분석을 위해서는 고유계 구현기법(ERA)이 채택되어 실시간 데이터의 분석이 가능하도록 하였다. 이들 데이터로부터 계산된 구조물의 댐핑과 고유치만을 사용하여 에너지소산률을 계산하고, 이들 값으로부터 구조물의 손상도를 평가하는 알고리즘(에너지소산법)을 개발하였다. 본 연구에서 제안된 에너지소산법은 기존의 방법(고유치변화법과 모드변화법(MAC))과 비교하여 유용성이 입증되었다. 특히 에너지소산법은 실시간 모니터링에 중요한 계측시간과 데이터의 량을 줄일 수 있었고, 자연가진을 이용하여 전체적인 구조물의 거동을 파악하기에 용이하였으며 구조물의 손상 유무를 판단하는 효과적 기법으로 입증되었다.

Keywords : Ambient vibration, Damage detection, Eigenparameter method, Energy dissipation ratio, Era, Next, Structural health monitoring.

핵심 용어 : 상시 진동, 손상 검출, 고유치변화법, 에너지소산률, 고유계 구현기법, 자연가진기법, 구조물 건전도 모니터링

* 정회원, 건양대학교, 토목공학과, 교수

** 정회원, 충남대학교, 토목공학과, 박사과정

*** 정회원, 충남대학교, 토목공학과, 교수

E-mail : shinhc0905@hanmail.net 041-736-6326

•본 논문에 대한 토의를 2003년 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 2004년 4월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

바람과 지진, 그리고 기타 급작스럽게 발생하는 외부 하중들로부터 구조물의 안정성을 유지 관리하기 위한 구조물의 건전도 모니터링 시스템을 개발하기 위해 많은 연구가 이루어지고 있다.^{1,2)} 구조물의 건전도 모니터링은 주로 구조물의 동적 특성 변수인 고유주파수나 감쇠비와 모드 형상을 이용하는 방법들이 대부분이다.^{3,4)} 이러한 모달 변수는 입·출력 신호를 동시에 측정하여 계산된 주파수응답함수를 이용한 모드 해석에 의해 획득된다.⁵⁾ 하지만, 건물이나 교량과 같은 구조물의 출력 신호(동적 응답)는 구조물에 부착된 가속도계 등을 통해 쉽게 측정할 수 있지만, 실 구조물에 대해 입력 신호나 공용 중에 발생하는 외부 가진 신호는 측정이 불가능하거나 매우 어렵다.^{6,7)} 비록, 입력 신호의 측정이 가능한 경우라도 구조물의 형태나 주변 여건에 의해 가진 위치나 가진기의 설치 방법, 가진 방법 등에 제약이 따르고, 가진을 위해 발생시키는 외부 하중에 의해 구조물의 손상을 유발할 수 있는 문제가 있다.⁷⁾

반면에, 차량이나 바람 등과 같은 상시 진동에 의해 발생하는 응답 신호를 이용하면 입력 신호의 계측에 대한 문제가 해소되고, 상시 계측이 가능해지는 장점이 있다. 이와 같은 관점에서 많은 연구자들이 상시 진동을 이용한 구조물의 특성 분석 기법에 대한 많은 연구가 있었다. 이들 중 James 등은 구조물의 동적 특성을 분석하기 위해 상시 진동에 의한 자연가진기법을 이용하여 입력 신호의 측정 문제를 해결할 수 있는 가능성을 제시하였으나 불규칙 신호를 사용하여 윈드 터빈의 동적 특성치를 추출하기 위한 이론적인 개발과 모의실험 데이터를 이용하여 자연가진기법을 검증하였을 뿐 실시간 모니터링에 적용하지는 못하였다.⁸⁾ 그리고 Farrar 등은 뉴멕시코 주에 위치한 I-40교량의 고유주파수와 모드 형상 등의 동적 특성치를 분석하는데 성공적으로 활용하여, 구조물의 손상검출을 위해 자연가진기법을 적용하였으나 실시간 모니터링을 적용하지 못하였다.⁹⁾ 그리고 Juang과 Pappa 등은 다중 입출력을 갖는 시스템에 적합한 시간 영역의 동특성 분석 알고리즘인 고유계 구현기법을 제시하였다.^{10,11)}

이와 같이 자연가진기법과 고유계 구현기법을 조합하여 상시 진동에 적용한 논문들이 최근에 많이 보고되었다. 그들 중 Caicedo 등은 사장교의 모의실험을 통해 고유계 구현기법을 조합한 자연가진기법을 이용하여 구조물의 건전도 모니터링에 유용하게 활용될 수 있는 가능성을 제시하였으나 실구조물의 계측이 아닌 단순한 모의실험의 결과에 의존하고 있다.⁶⁾ 그리고 최근 연구에서는 4층 규모의 모형 구조물에 자연가진기법과 고유계 구현기법을 조합하여 시스템 식별과 손상도 검출을 수행하고 구조물의 건전도 모니터링에 이용하였다.^{12)~14)} 다른 한편으로 Roepak 등은 상시 진동에 의한 그의 Benchmark 연구를 통해 추계론적 부공간 규명법을 이용하기도 하였지만⁷⁾, 상시 진동에 의한 구조물의 동적 특성치의 분석 방법들은 그 이론적 배경이 거의 유사하고 수행하는 과정상의 해법이 조금씩 다르게 응용될 뿐이다.

따라서 본 연구에서는 구조물의 실시간 모니터링이 가능하도록 하기 위해 상시 진동을 이용하여 실시간으로 데이터를 계측하고, 계측된 데이터를 자연가진기법과 고유계 구현기법을 적용하여 동적 특성치를 분석하였다. 이들 데이터로부터 계산된 동적 특성치 중에서 구조물의 감쇠비와 고유치만을 사용하여 에너지소산률을 계산하고, 이들 값으로부터 구조물의 손상도를 평가하는 알고리즘(에너지소산법)을 개발하였다. 본 연구에서 제안된 에너지소산법은 캔틸레버 보의 손상 실험에 적용되고, 기존의 방법(고유치변화법과 모드변화법(MAC))과 비교하여 유용성이 검증되었다.

2. 상시 진동을 이용한 구조물의 손상 검출 알고리즘

본 연구에서 제안된 손상검출기법은 바람과 차량 등 외부에서 자연적으로 발생하는 상시 진동에 의한 구조물의 응답을 교차과워스펙트럼의 형태로 계측하고, 동시에 MATLAB의 알고리즘을 이용하여 고속으로 역푸리에 변환(IFFT)하여 교차상관함수로 변환된다. 이와 같이 시간 영역으로 변환된 교차상관함수를 이용하여 Hankel 행렬을 구성하고, Marcov Parameter를 획득하는 순서로 구성된 고유계 구현기법을 이용하여

동적 특성치(고유주파수, 감쇠비, 모드형상)를 산출하도록 MATLAB으로 알고리즘 되었다. 그리고 분석된 동적 특성치 중에서 고유주파수와 감쇠비를 이용하여 구조물의 소산에너지를 계산하고, 이들 값으로부터 에너지소산률을 계산하여 구조물의 손상정도를 찾기 위한 손상지표로 사용하였다. Fig. 1은 본 연구에서 개발된 상시 진동을 이용한 에너지소산률의 변화를 산출하는 모니터링 알고리즘이다.

2.1 상시 진동에 의한 구조물의 특성 분석

강제 가진법이 가지는 문제점을 해결하기 위한 방안으로 많은 연구자들에 의해 자연가진기법이 연구되었다.^{(6,8)~(13)} 이것은 외부 가진력을 불특정 정상상태의 외부 가진으로 가정하게 되면, 강제 진동을 갖는 운동방정식의 형태가 교차상관함수에 의해 2계 제차미분방정식의 형태로 표현되는 특성을 이용한 기법이다. 이 기법은 구조물의 가속도에 의한 응답만이 측정 가능할 때 유용한 방법이다. 이 기법은 유한개의 계측위치로부터 측정된 응답 신호들 간의 교차파워스펙트럼을 획득하여 다음 식 (1)과 같이 교차상관함수와 교차파워스펙트럼이 푸리에 쌍(pair)으로 존재한다는 점을 이용한다.

$$R_{AB}(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \Omega_{AB}(k) e^{j(2\pi kn/N)}, \quad n=0,1,2,\dots,N-1 \quad (1)$$

여기서, R_{AB} 는 교차상관함수이며, Ω_{AB} 는 이산된 교차파워스펙트럼이고, n 과 k 는 이산 시간과 주파수

를 나타낸다. 이렇게 변환된 교차상관함수는 시간영역의 동특성 분석 알고리즘에 의해 구조물의 동적 특성이 분석될 수 있다.

시간영역에서의 특성 분석 기법은 다양하지만, 고유계 구현기법은 경 감쇠를 갖는 구조물의 특성 분석에 적합하고, 다중 입출력 모델에 효과적인 기법이다. 이 알고리즘은 획득된 교차상관함수를 이용하여 구성된 다음 식 (2)와 같은 Hankel 행렬로 시작된다.

$$H(k-1) = \begin{bmatrix} y(k) & y(k+1) & \dots & y(k+s) \\ y(k+1) & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y(k-1) & \dots & \dots & y(k+s+r) \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서, $y(k)$ 는 임펄스 응답 행렬로, r 과 s 는 각각 Hankel 행렬의 행과 열의 수이다. 식 (2)에서 적절한 크기의 행과 열을 선택하여 $H(0)$ 를 산출하고, 식 (3)과 같이 Hankel 행렬에 대해 특이치 분해를 수행한다.

$$H(0) = RAS^T \quad (3)$$

여기서, R, S 는 비특이행렬이고, Λ 는 양의 대각 행렬로, $H(0)$ 의 특이 값이다. 그리고 R_n, S_n, Λ_n 은 수치적 모드(물리적 의미가 없음)에 대응되는 극히 작은 특이 값에 대응하는 행과 열을 제거하여 획득된 행렬이다(Juang, 1985). 또, Λ 는 대각 행렬이므로 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

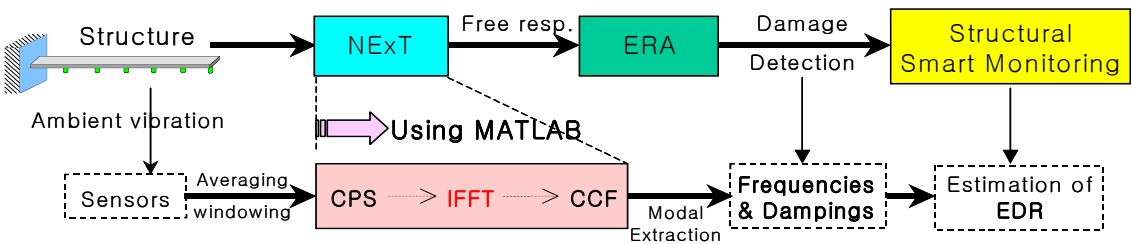


Fig. 1 에너지소산률에 의한 구조물의 모니터링 알고리즘

$$H(0) = (R_N \Lambda_N^{1/2})(\Lambda_N^{1/2} S_N^T) \quad (4)$$

이산시간 상태 공간에서의 Markov 변수에 의해 식 (2)는 식 (5)와 같이 된다.

$$H(k-1) = P A^{k-1} Q = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ M \\ CP^1 \end{bmatrix} A^{k-1} [Ax(0) \quad \dots \quad Ax(k)] \quad (5)$$

여기서, A와 C는 각각 시스템 행렬과 출력 행렬이다. 그리고, x(0)는 초기조건 벡터이며, k는 이산시간에서 k번째 샘플을 의미한다. 식 (5)에서 k=1과 k=2를 고려하여 P와 Q를 구하고, 각각을 식 (5)와 조합하여 식 (6)과 (7)과 같이 상태 공간에서의 시스템 행렬과 출력 행렬을 정의한다.

$$A = \Lambda_N^{-1/2} R_N^T H(1) S_N \Lambda_N^{-1/2} \quad (6)$$

$$C = [I \quad 0 \quad \dots \quad 0] R_N \Lambda_N^{1/2} \quad (7)$$

여기서, I는 항등 행렬이고, 0은 영 행렬이다. 따라서 시스템의 고유 주파수는 구조물의 질량, 감쇠, 강성 등의 항으로 구성된 시스템 행렬 A의 고유 값으로 직접 획득하게 된다. 그리고 구조물의 변위 형상은 다음 식 (8)과 같이 시스템 행렬 A의 고유 벡터에 출력 행렬을 곱하여 획득하게 된다.

$$\Phi = C\Psi \quad (8)$$

여기서, Φ 는 변위 형상이고, Ψ 는 시스템 행렬 A의 고유 벡터이다.

2.2 에너지소산률

(Energy Dissipation Ratio ; EDR)의 산정

점성 감쇠를 포함하고 있는 조화하중을 받는 단자유도 시스템에 대한 운동방정식은 다음 식(9)과 같이 쓸 수 있다.

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = P_0 \sin \bar{\omega}t \quad (9)$$

여기서, u는 변위, m는 질량, c는 감쇠 계수, k는 강성, $P_0 \sin \bar{\omega}t$ 는 시스템에 작용하는 조화 하중이다.

본 논문에서는 가진주파수에 의해서 진동이 생기는 정상 상태 운동을 고려하고, 구조물에서 생기는 감쇠를 점성 감쇠로 가정한다. 그러므로 이러한 시스템에서 감쇠력($c\dot{u}$)은 점성에 의해 에너지 소산이 이루어지게 된다. 점성 감쇠에 의해 이루어지는 소산에너지는 가진주파수 $\bar{\omega}$ 를 가지는 조화 진동의 1주기 동안에 감쇠력($c\dot{u}$)에 의해 행해진 일의 양과 같다. 감쇠력을 f_d 라 표시하면 감쇠에 의해 소산되는 에너지 E_d 는 다음 식 (10)과 같다.

$$E_d = \int f_d du = 2\pi m \xi \omega \bar{\omega} u_o^2 \quad (10)$$

여기서, m은 구조물의 질량, ω 는 구조물의 고유 주파수, $\bar{\omega}$ 는 구조물에 가해지는 가진주파수, u_o 는 운동 진폭이다. 이러한 단자유도 시스템의 운동방정식은 실 구조물에 적용하기 위하여 다자유도 시스템으로 확장할 수 있다.

본 연구에서는 식 (10)에서 구조물의 질량은 공용 연수가 증가하더라도 그 변화량이 미소하며 대부분의 구조물에서 손상은 질량의 변화보다는 균열과 같은 원인에 의해 발생하므로 질량의 변화가 없는 것으로 가정하였다. 그리고 시스템 응답과 기준 응답과의 상호 관계를 나타내는 교차상관함수가 조화 운동 방정식의 해가 되므로⁸⁾ 상시 진동 측정에 적용하

기 위해서 가진주파수와 운동 진폭은 손상에 대해 영향이 적다고 가정하였다. 이에 따라 구조물의 감쇠에 의해 소산되는 에너지를 식 (11)과 같이 단순화시킬 수 있다.

$$E_d = \Omega \xi \omega \quad (11)$$

여기서,

$\Omega = 2\pi m \bar{\omega}_0^2$ 는 일정한 값이다.

그리고 손상 전과 후의 소산에너지를 이용하여 손상을 평가하기 위한 지수로 에너지소산률을 식 (12)과 같이 제시한다.

$$EDR = \frac{|E_d - E_d^*|}{E_d} \times 100 \quad (12)$$

여기서,

* 는 손상이 있는 경우를 의미한다.

3. 상시 진동의 측정과 동적 특성 변수의 분석

구조물의 모니터링을 위해 본 연구에서 제안된 손상 평가지표인 에너지소산률의 적용성과 손상에 대한 민감도를 비교 분석하기 위해 캔틸레버 보의 손상 실험을 진행하였다. 동적 계측은 대형 토목 구조물의 특성상 장시간 모니터링이 가능하도록 상시 진동에 의한 응답을 가속도계를 이용하여 스펙트럼으로 획득하였고, 자연가진기법을 이용하여 구조물의 동적 변수를 분석하였다.

3.1 보의 제원과 손상 모델

본 연구에서는 측정 및 분석과 손상의 도입이 용이하고, 구조물의 모니터링을 위해 결정된 자유도인 주축 방향의 휨 모드에 의해 구조물의 전체적인 거동 특성이 결정되도록 캔틸레버 보를 제작하여 손상실험을 수행하였다. 캔틸레버 보의 구조용 강재를 이용하여 제작되었으며, 모형 구조물의 총 길이는 1.2m로 제작되었다. 보의 폭과 두께는 6cm와 0.5cm로 하여 횡방향의 동적 응답이 주축 방향으로 발생하는 동적 응답에 영향을 받지 않도록 하였고, Table 1은 사용된 보의 재료적 특성치이다.

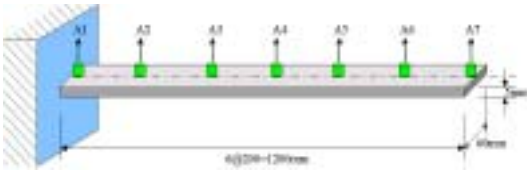
그리고 손상 전의 원형 구조물에 대해서 손상에 의해 발생된 구조적 손상을 정의하기 위해 횡단면적의 감소율로 표현하였다. 손상의 위치는 단부의 지점에서부터 주축 방향으로 30cm의 위치에 단면적 감소율을 각각 10%, 20%, 30%로 증가해 가면서 총 3가지의 손상 시나리오를 설정하였다. 이것은 손상의 양에 따른 에너지소산률의 변화를 알아보고 손상검출지표로서의 적용 가능성과 적합성을 비교 분석하기 위해 계획된 것이다.

3.2 상시 진동의 측정

계획된 손상 모형 시험체로부터 상시 진동의 응답을 측정하기 위해서 가속도계를 다음 Fig. 2와 같이 설치하였다. 상시 진동을 측정하여 구조물의 동적 응답을 분석하고 손상검출을 위한 목적 모드는 1~4차까지의 휨 모드로 제한하였다. 상시 진동에 의한 응답의 측정 및 획득을 위해서 신호 측정 장비로 8채널의 HP-VXI 1432시스템과 MTS사의 T-DAS를 이용하여 데이터를 획득하였다. Fig. 3은 실험 장비의 설치 상태를 도시한 것이다.

Table 1 캔틸레버 보의 재료적 특성

특 성	보의 길이(m)	단면적(m ²)	탄성계수(kgf/cm ²)	단위 중량(kgf/m ³)
크 기	1.2	0.06×0.005	2.0×10 ⁶	7820



(a) 가속도계 및 단면의 크기



(b) 설치된 캔틸레버 보

Fig. 2 가속도계의 부착 위치 및 보의 설치

그리고 가속도의 계측을 위해서는 민감도가 500mV/G 이며, 측정 주파수의 범위는 1~3000Hz를 갖는 Dytran 모델 3134D의 가속도계 7개(기준 채널 1개 포함)를 Fig. 2와 같이 부착하였다.

대상 구조물인 캔틸레버 보의 동적 특성을 분석하기 위해 교차파워스펙트럼이 측정되었다. 측정 데이터의 각 프레임당 크기는 1024로 설정하였다. 그리고 샘플링 주파수 범위는 256Hz까지로 설정하고, 목적 모드인 최대 4차의 휨 모드를 획득하기에 충분하도록 0~100Hz까지를 획득하여 분석하였다. 또, 측정 잡음을 제거하고 전기적 신호의 왜곡을 피하기 위해 중형 윈도우를 이용하였다. 기준 채널은 목적하는 모든 모드(1~4차의 휨 모드)의 응답을 적절하게 반영할 수 있도록 A7 계측 점으로 설정하였다. 구조물에 가해진 상시 진동은 캔틸레버 보의 외부에서 임의로 발생시켰

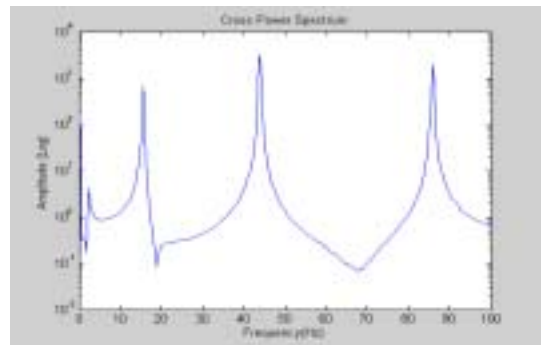


Fig. 3 계측 시스템 구성

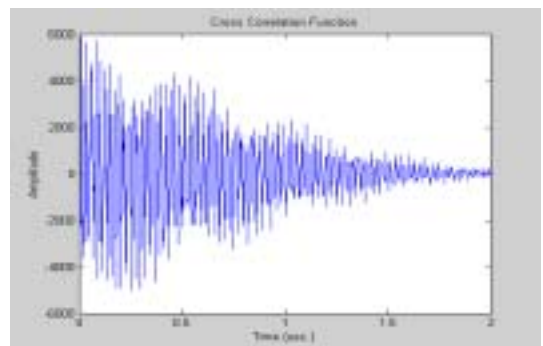
으며, 외부 가진력에 대한 측정은 없었다. 그리고 단면적의 손상을 표현하기 위해 절단기를 이용하여 구조물의 손상을 유발시켰다.

3.3 실험의 결과

상시 진동에 의해 측정된 가속도 신호는 자연가진기법을 이용하여 구조물의 동적 특성이 분석되도록 하였다. 응답 신호들 간에 직접적으로 획득한 교차파워스펙트럼을 자연가진기법에 의한 특성 분석을 위해서 먼저 고속으로 역푸리에 변환되어 시간 영역의 응답 신호인 교차상관함수로 변환되어야 하며, 본 연구에서는 MATHWORKS사의 MATLAB을 이용하여 계측 데이터의 변환 과정을 수행하였다. Fig. 4는 이와 같이 계측된 교차파워스펙트럼으로부터 교차상관함수로 변환된 대표적인 신호처리 결과를 도시한 것이다.



(a) Cross Power Spectrum



(b) Cross Correlation Function

Fig. 4 동특성 분석을 위해 변환된 데이터

Fig. 4에서 보는 바와 같이 측정 범위 내에서 목적했던 1~4차의 휨 모드가 고르게 분포하고 있으며, 교차상관함수를 이용하여 고유계 구현기법의 알고리즘에 의해 구조물의 동적인 특성치를 분석하기 위해서는 MATLAB을 이용하여 알고리즘 하였다. 손상 이전의 원형 구조물의 가속도 신호로부터 분석된 동적인 특성변수(고유주파수, 감쇠계수)와 손상 이후의 특성변수의 분석 결과는 다음 Table 2와 같다.

원형 구조물의 주파수는 차례로 2.67, 15.67, 43.94, 86.17 Hz로 나타났고, 구조물의 감쇠 특성도 모드에 따라 2.36%~0.15%로 분포하고 있다. 손상 시나리오에 따른 분석 결과는 캔틸레버 보에 가해진 손상의 영향으로 구조물의 강성의 감소를 유발하고, 그 양이 미소하지만 질량의 감소를 유발하기 때문에 고유주파수는 감소하고, 감쇠비는 높아지는 결과를 보여주었다. 하지만, 손상으로 인한 고유주파수나 감쇠비의 변화는 미소하게 나타났다.

4. 손상 검출 기법의 적용

4.1 에너지소산률

캔틸레버 보의 손상실험의 결과로 분석된 고유주파수와 감쇠비를 이용하여 식 (7)과 같이 각 모드에 대해 1 주기 동안의 소산되는 에너지가 산출되었다. 그리고, 원형 구조물이 갖는 소산된 에너지에 대한 손상 구조물의 소산된 에너지의 비를 비교하여 에너지 소산의 증가율을 손상 검출을 위한 지표로 사용하였다. 다음 Fig. 5와 Table 3은 각각의 단면적 감소율에 따른 손상 시나리오 별 에너지소산률의 변화를 나타낸 것이다.

Table 2 손상에 따른 주파수 분석 결과 (주파수, Hz)

	1		2		3		4	
	주파수	감쇠	주파수	감쇠	주파수	감쇠	주파수	감쇠
원형	2.67	2.36	15.67	0.68	43.94	0.24	86.17	0.15
손상 1	2.63	2.40	15.60	0.71	43.76	0.29	85.84	0.21
손상 2	2.63	2.43	15.49	0.73	43.78	0.32	85.62	0.28
손상 3	2.61	2.58	15.51	0.74	43.74	0.38	85.48	0.29

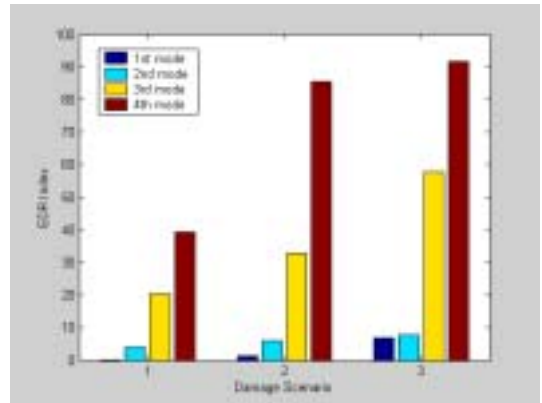


Fig. 5 손상과 에너지 소산법 적용

Table 3 에너지소산률의 변화량(%)

손상	모드	손상 1 (10%)	손상 2 (20%)	손상 3 (30%)
1차 모드	1차 모드	0.171	1.424	6.865
	2차 모드	3.945	6.120	7.712
	3차 모드	20.338	32.848	57.613
	4차 모드	39.464	85.475	91.785

손상 검출을 위해 이용된 모드는 총 4차까지의 모드가 고려되었으며, 각 모드의 영향을 분석한 결과 고차의 모드로 진행될수록 최고 4차 모드의 변화율이 39.464%, 85.475%, 91.785%를 보이고, 3차 모드가 20.338%, 32.848%, 57.613%까지 변화하고 있으며, 저차의 모드로 진행될수록 손상에 따른 변화율이 감소하면서 나타났다. 그리고 저차의 1~2차 모드는 에너지소산률의 변화율이 미소하게 나타나며, 손상 시나리오 2 이상의 손상이 발생하면서 5%이상의 변화율을 보이고 있다.

이와 같은 결과는 저차의 휨 모드를 결정하는 구조적 특성 변수에 대해 구조물에 가해진 손상의 양이 크게 영향을 미치지 않고 있기 때문인 것으로 판단된다. 하지만, 고차의 모드(3~4차 모드)로 진행될수록 동적 거동 특성에 손상이 영향을 미치면서 손상을 감지하기에 충분히 우수한 손상 지표임을 보여주고 있다.

4.2 고유치 변화법

구조물의 동적인 거동 특성은 질량, 감쇠와 강성의 특성 행렬에 의해 결정되게 된다. 그러나 구조물에 발생하는 손상은 이러한 특성 행렬의 변화를 일으키게 되며, 결과적으로 구조물이 갖는 고유한 특성인 고유주파수의 감소를 유발하게 되어 손상을 표현하게 된다. 이와 같이 손상의 형태에 대한 고유주파수의 변화를 이용하는 방법은 구조물의 손상을 쉽게 감지하는 기법으로 그 적용이 간단하다는 장점이 있다.¹³⁾ 본 손상실험에 의한 구조물의 고유치 변화율과 에너지소산률의 변화율을 각 모드별로 비교하여 다음 Table 4에 나타내었다.

손상 1은 손상에 따른 주파수의 변화율이 모드에 관계없이 최소 0.383%에서 최대 1.498%까지 변화하는 반면에 에너지소산률은 0.171~39.464%까지 변화하고 그 최대값이 26배 이상 에너지소산률이 손상에 민감한 것을 알 수 있다. 손상 2는 고유치 변화율이 0.364~1.498%로 손상의 양에 따라 변화되는 폭이 미소하고, 에너지소산률과는 최대 57배까지 차이를 보이고 있다. 마지막으로 손상 3에 대해서는 0.445~2.247%까지 고유치가 변하고 있으며 에너지소산률과 41배 이상 차이를 보이고 있다.

이와 같이 손상에 따른 고유치의 변화율과 에너지소산률의 변화율을 비교하였을 때, 같은 양의 손상에 대해서 26~57배 이상 에너지소산률이 민감한 손상 지표임을 알 수 있다.

4.3 모드의 상관관계 분석법

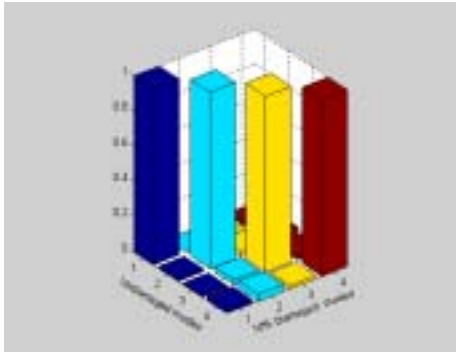
MAC은 모달 정보를 비교하는데 효과적으로 사용할 수 있는 방법으로 서로 다른 두 세트의 모드들 간의 상관관계를 수치적으로 비교·분석하는 방법이며 다음 식 (13)과 같이 정의된다.⁵⁾

$$MAC(U, D) = \frac{\left| \sum_{j=1}^n (\Phi_D)_j (\Phi_U)_j^* \right|^2}{\left(\sum_{j=1}^n (\Phi_D)_j (\Phi_D)_j^* \right) \left(\sum_{j=1}^n (\Phi_U)_j (\Phi_U)_j^* \right)} \quad (13)$$

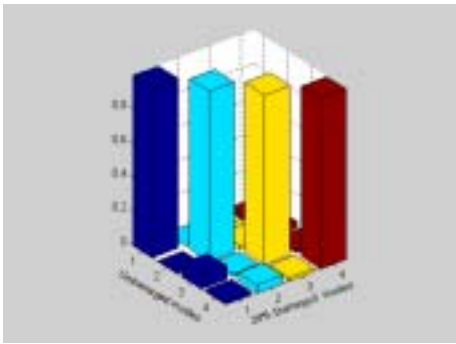
여기서, Φ_U 와 Φ_D 는 서로 다른 두 측정 세트로 각각 손상 전과 후의 모드 벡터이며, 위 첨자 U는 손상 전의 모드 벡터와 D는 손상 후의 모드 벡터를 이용하여 상관관계를 분석하였다. MAC은 모드 간의 상관관계가 정확하게 일치하면 그 값이 1을 보이고, 그렇지 않으면 0으로 나타나는 특성이 있다. 0.9이상이면 상관관계가 우수하다고 판단하게 되나, 그 수치가 계측점의 수에 많은 영향을 받기 때문에 0.8까지도 허용하고 있다.⁵⁾ Fig. 6과 Table 5는 캔틸레버 보의 손상 실험에 의해 획득한 원형 구조물과 손상 구조물의 모드간의 상관관계를 분석한 결과를 나타낸다.

Table 4 손상에 따른 에너지소산률과 주파수의 변화율(%)

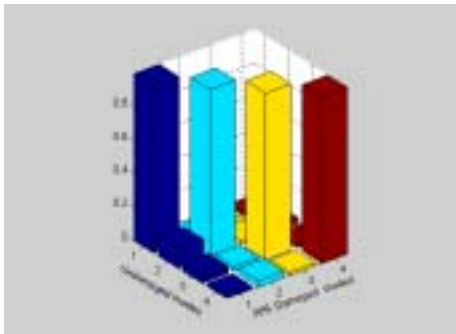
손상지표		모드	1차 모드	2차 모드	3차 모드	4차 모드
손상 1	EDR		0.171	3.945	20.338	39.464
	Δf		1.498	0.447	0.410	0.383
손상 2	EDR		1.424	6.120	32.848	85.475
	Δf		1.498	1.149	0.364	0.638
손상 3	EDR		6.865	7.712	57.613	91.785
	Δf		2.247	1.021	0.455	0.801



(a) 손상 1 (10%)



(b) 손상 2 (20%)



(c) 손상 3 (30%)

Fig. 6 손상실험 결과의 MAC

캔틸레버 보의 손상 전과 손상 후의 모드에 대해서 총 1~4차의 모드간의 상관관계가 비교·분석되었다. MAC의 수치는 손상의 유무에 관계없이 모두 상관관계가 높게 나타나 MAC의 수치만으로 손상의 유무를 판단하기가 어려웠다. 다만, 손상의 양이 20%인 경우 2차 모드와 3차 모드의 간섭이 다소 나타났고, 30%로 증가한 경우 1~3차의 모드간에 상호 영향을 미치는 경향이 있지만, 그 양이 미소하여 MAC의 값이 본 모형 시험체의 손상검출을 위한 손상지표로는 적합하지 않은 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 구조물의 모니터링을 위한 새로운 손상지표를 개발하고, 이 지표로부터 실시간 상에서 구조물을 모니터링 할 수 있는 새로운 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘의 유용성을 입증하기 위하여 모형 캔틸레버 보를 사용하여 실험을 수행하였다. 이 실험 결과를 분석하고 평가하여 다음과 같은 결론을 제시한다.

- 1) 구조물의 모니터링을 위한 새로운 방법으로 에너지 소산률을 이용한 기법을 제안하였다. 에너지소산률은 구조물에서 손상 전·후에 감쇠에 의해서 발생하는 소산에너지양의 변화를 비교하여 구조적인 손상을 감지하는 손상평가지수이다.
- 2) 제안된 에너지소산법을 캔틸레버 보의 손상 실험에 적용한 결과 고려되는 모드의 수와 손상의 정도에 따라 영향을 받는 것으로 나타났다. 최소 3~4개 이상의 모드를 손상 검출에 활용하게 되면 손상지표의 민감도가 크게 상승하여 우수한 손상 검출 결과를 얻을 수 있었다.

Table 5 MAC 값

손상전 \ 손상후	손상 1의 모드				손상 2의 모드				손상 3의 모드			
	1차	2차	3차	4차	1차	2차	3차	4차	1차	2차	3차	4차
1차 모드	0.9980	0.0015	0.0314	0.0132	0.9981	0.0018	0.0315	0.0108	0.9998	0.0031	0.0306	0.0114
2차 모드	0.0122	0.9999	0.0269	0.0369	0.0020	0.9980	0.0244	0.0368	0.1148	0.9998	0.0246	0.0358
3차 모드	0.0062	0.0273	1.0000	0.0221	0.0803	0.0197	0.9998	0.0200	0.0497	0.0296	0.9998	0.0190
4차 모드	0.0233	0.0387	0.0189	0.9999	0.0207	0.0445	0.0181	0.9998	0.0178	0.0364	0.0197	0.9999

- 3) 본 연구에서 손상 검출을 위해 제안된 에너지소산법과 고유치변화법, 모드변화법을 분석하여 비교한 결과 캔틸레버 보에 도입된 손상의 양이 미소하여 고유치변화법과 모드변화법을 이용한 방법은 손상의 검출에 효과적이지 못한 결과를 나타내고 있다. 반면에 에너지소산법은 고유치변화법과 비교하여 26~57배 이상의 손상 검출 능력을 갖고 있는 우수한 손상지표이다.
- 4) 그리고 제안된 에너지소산법을 이용한 대형 토목 구조물의 모니터링 시스템을 위해서 상시 진동을 이용한 구조물의 동특성 분석 기법(자연가진기법과 고유계 구현기법)과 조합하여 장시간 모니터링을 위해 적용될 수 있는 새로운 알고리즘의 가능성을 제시하였다.

감사의 글

이 논문은 2002년도 한국학술진흥재단의 연구비 지원으로 연구되었음. 본 연구가 이루어지도록 지원하여준 한국학술진흥재단(과제번호 : KRF-2002-002-D00172)에 대단히 감사 드립니다.

참고문헌

1. Cornwell P., Doebling S. W., Farrar C. R. "Application of the Strain Energy Damage Detection Method to Plate-Like Structures", *Journal of Sound and Vibration*, 224(2), pp. 359-374, 1999.
2. Salawu O. S. and Williams C., "Review of full-scale dynamic testing of bridge structures", *Engineering Structure*, Vol.17, No. 2, pp. 113-121, 1995.
3. Salawu O. S., and Williams C., "Structural Damage Detection Using Experimental Modal Analysis-A Comparison Of Some Methods," *Proceedings of 11th International Modal Analysis Conference*, 1993.
4. Doebling S. W., Farrar C. R., Prime M. B., and Shevitz, D. W., "Damage Identification and Health Monitoring of Structural and Mechanical Systems from Changes in Their Vibration Characteristics: A Literature Review," *Los Alamos National Laboratory Report LA-13070-MS*, May, 1996.

5. Ewins D. J., *Modal Testing: Theory and Practice and Application*, Second Edition, Research Studies Press LTD, 2000.
6. Caicedo J. M., Clayton E., Dyke S. J. and Abe M., "Structural Health Monitoring for Large Structures Using Ambient Vibrations," *Proceedings of the ICANCEER Conference*, Hong Kong, pp. 15-20, 2002.
7. Roeck G. De, Peeters B. and Ren W-X, "Benchmark Study on System Identification through Ambient Vibration Measurements," *Proceedings of IMAC-XVIII, the 18th International Modal Analysis Conference*, Feb. 7-10, Texas, pp. 1106-1112, 2000.
8. James III G. H., Carne T. G., Lauffer J. P., *The Natural Excitation Technique(NEXT) for Modal Parameter Extraction from Operating Wind Turbines*, Sandia Report, SAND92-1666. UC-26L., 1993.
9. Farrar C. R., David J., "Damage Detection Algorithms Applied to Experimental and Numerical Model Data from the I-40 Bridge" *Los Alamos National Laboratory Report LA-13074-MS*, January, 1997.
10. Juang, J. N. and Pappa, R. S., "An Eigensystem Realization Algorithm for Modal Parameter Identification and Model Reduction," *J. Guidance*, Vol. 8, No. 5, pp. 620-627, 1985.
11. Pappa R. S., Juang J. N., "Some Experiences with the Eigensystem Realization Algorithm," *Journal of Sound and Vibration*, pp. 30~34, 1988.
12. Caicedo J. M., Dyke S. J., Johnson E. A., "NEXT and ERA for Phase I of the IASC-ASCE Benchmark Problem: Simulated Data", *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, submitted, 2002.
13. Caicedo J. M., Dyke S. J., "Phase II SHM Benchmark Studies: Application of the NEXT and ERA for damage detection," *Proceedings of the IMAC XXI Conference*, Orlando, Florida, February 3-6, 2003.
14. Giraldo D., Caicedo J. M. and Dyke S. J., "Experimental Phase of the SHM Benchmark Studies. Damage Detection using NEXT and ERA," *Proceedings of the 16th ASCE Engineering Mechanics Conference*, Seattle, Washington, July 16-18, 2003.

(접수일자 : 2003년 8월 1일)