

## 고유진동수의 시간이력을 이용한 보 구조물 손상 모니터링 기법

### Damage monitoring scheme of beam-type structures using time history of natural frequencies

박재형\*            김정태\*\*            류연선\*\*\*  
Park, Jae-Hyung    Kim, Jeong-Tae    Ryu, Yeon-Sun

---

#### ABSTRACT

The objective of this paper is to monitor damage in beam-type structures by using time history of natural frequencies. First, numerical experiments on test beams are described. Dynamic responses of the test structures are obtained for several damage scenarios in a consequent order. Next, the time history of natural frequencies are extracted for the first four modes from the dynamic responses of the test structures. Finally, damage detection in the test structures is performed using the time-history of natural frequencies.

---

#### 1. 서    론

대형 구조물들을 설계 및 시공과정에서의 결함 또는 설계 당시에 고려하지 못하였던 각종 요인으로 인하여 구조 손상이 발생되며, 또한 사용 기간이 경과함에 따라 노후화되어 안전성이 위협을 받게 된다. 이에 최근 국·내외에서 구조물의 동적 특성의 변화를 감지하여 손상을 추정하는 기법들에 대한 연구가 활발하다. 일부 연구에서는 적용성 실험의 일환으로서 실물 교량을 대상으로, 구조물 동특성의 변화를 계측하여 구조물의 건전도를 평가하는 연구가 수행되어 오고 있다. 이 같은 연구노력에도 불구하고, 실제 교량에 상시 건전도 모니터링 체계를 실현하기 위해서는 구조물의 실시간 거동으로부터 이상 징후를 감지할 수 있는 모니터링 기법의 개발이 필요하다.

일반적으로 구조물의 손상은 예고 없이 불시에 발생한다. 그러므로, 구조물의 건전성 검사를 위해 특정 기간에 진동특성 측정을 하여 구조물의 이상 상태를 판단하는 것은 예상치 못한 심각한 하중이 발생할 경우 위협을 초래할 가능성이 높다. 이로 인해 대형 구조물에는 상시 건전

---

\* 부경대학교 해양공학과 박사과정

\*\* 정희원 · 부경대학교 해양공학과 부교수

\*\*\* 정희원 · 부경대학교 해양공학과 교수

성 모니터링 시스템을 도입하여 구조물의 안전성을 확보하려는 노력이 계속되고 있다. 이러한 모니터링 시스템의 이상상태 발견은 크게 시간 영역 해석과 주파수 영역 해석을 통한 방법이 있다. 본 연구에서는 주파수 영역 해석 방법을 사용한다.

본 연구의 목적은 고유진동수 기반으로 한 해석 방법으로 고유진동수 시간이력을 사용하여 보 구조물의 손상을 모니터링하는 것이다. 이를 위해 다음과 같은 연구를 수행하였다. 첫째, 보 구조물의 수치모형을 결정하여, 이동 가진 하중에 대한 동적 응답을 측정하였다. 동적응답은 일련의 손상시나리오에 대해 연속적으로 측정되었다. 둘째, 일련의 동적 응답 특성을 분석하여 고유진동수 시간이력을 추출하였다. 마지막으로, 고유진동수의 시간이력을 이용하여 손상지수를 계산하여 손상 발생 시간과 위치를 발견하였다.

## 2. 수치모형 실험

수치실험에 사용된 단순보의 치수와 형상, 단면형상, Sensor의 위치, Damage의 위치를 Fig. 1에 도시되었다. 각 요소는 등 간격으로 구성되어 있으며 단면은 I형 단면을, 재료는 Steel 을 모델에 사용하였다. 전체 6개의 손상 시나리오에 대한 수치실험을 수행하였다. 손상 시나리오는 Table 1에 요약되었다. 1.637초까지는 구조물의 비손상상태이다. 1.637초부터 4.914초까지는 Damage 2-Damage 3의 경우로, 4번 요소에 손상이 발생한 경우이다. 손상의 크기는 휨 강성의 크기를 5%, 10% 감소하여 모사하였다. 이후 Damage 4-Damage 5의 경우는 4번 요소의 손상에 이어 2번 요소의 손상이 추가적으로 모사된 경우이다. 손상의 크기는 4번 요소 휨강성의 20%로 감소하면서 2번 요소의 강성이 5% 감소하여 순차적으로 2번 요소가 10%, 20%로 변화시켰다. 동적 해석을 위해 하중은 실제 구조물의 차량 이동 경우를 고려하여 1.4m/s의 속도로 이동하면서 각 절점에 가진하도록 단순화하여 계획하였다. 이와 같은 대상 구조물의 동적 거동 해석을 수행하기 위하여 유한요소해석 프로그램인 MIDAS를 이용하였다. 대상 구조물의 응답 신호는 2.6초까지 0.0002초 간격으로 샘플링 하였다. 단, 구조물의 감쇠효과를 모사하기위해 각 모드별 감쇠비를 1%로 입력하였다.

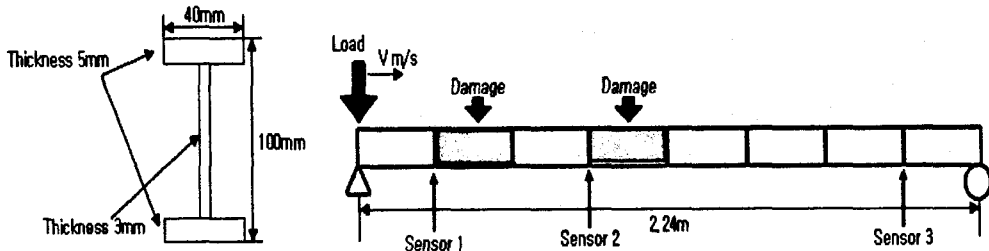


Fig. 1 단순보의 유한요소 모델

Table 1 손상 시나리오

Time	Damaged Element	Stiffness	Note
0.000		E	Undamage
1.638	4	0.95E	Damage 1
3.276	4	0.9E	Damage 2
4.914	4 2	0.8E 0.95E	Damage 3
6.552	4 2	0.8E 0.9E	Damage 4
8.190	4 2	0.8E 0.8E	Damage 5

### 3. 동적 응답 특성 및 고유진동수 시간이력

실험구조물의 센서 1로부터 Fig. 2와 같이 동적응답신호를 계측하였다. 먼저, 0-1.638초 동안 비손상상태의 응답신호를 계측하였다. 응답신호는 0.0002초 간격으로 샘플링하였다. 먼저 1.638초 동안 비손상상태의 응답신호가 계측되었다. 다음으로 1.638초-3.3276초 동안 손상상태 Damage 1에 대해서 계측었으며, 3.326초-4.914초 동안 손상상태 Damage 2에 대하여, 4.914초-6.552초 동안 손상상태 Damage 3에 대해서, 6.552초-8.190초 동안 Damage 4에 대해, 8.190초 동안 9.830초 동안 Damage 5에 대하여 동적응답신호를 계측하였다.

다음으로, 계측된 동적응답신호를 주파수응답신호로 변환하였다. 각 샘플링은  $2^{10}$ 이었으며, 손상 시나리오마다 8회의 FFT변환이 수행되었다. Fig. 3(a) - Fig. 3(f)는 비손상 상태와 Damage 1 - Damage 5까지 손상시나리오에 대한 1회의 주파수응답신호이다. Fig. 4는 대상구조물의 주파수응답특성으로부터 추출한 초기 4개 진동모드 주파수의 시간이력을 보여준다. 각 모드의 주파수가 시간영역에서 변화하는 것을 보여준다. Table 2는 전체 6개 시나리오의 경우(비손상, Damage 1 - Damage 5)의 고유진동수를 요약한 것으로, 손상에 의한 고유진동수의 변화를 보여준다.

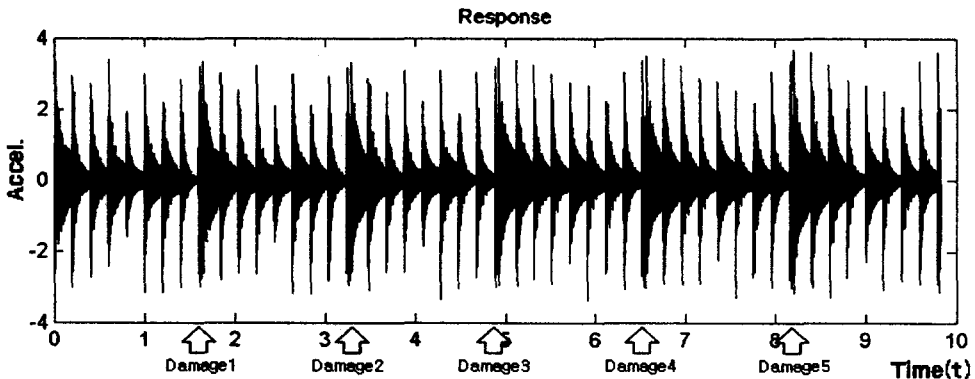


Fig. 2 대상 구조물의 동적 응답 신호

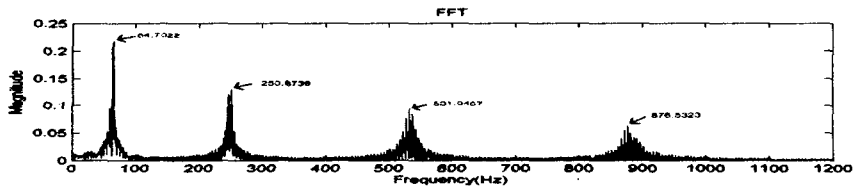


Fig. 3(a). 주파수응답특성 - 비손상

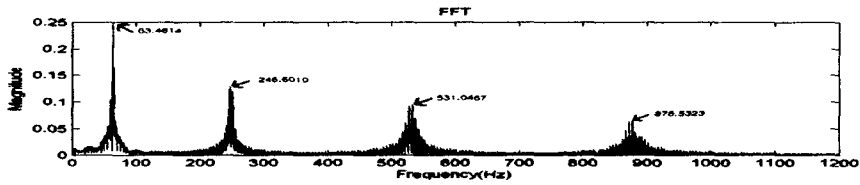


Fig. 3(b). 주파수응답특성 - Damage 1

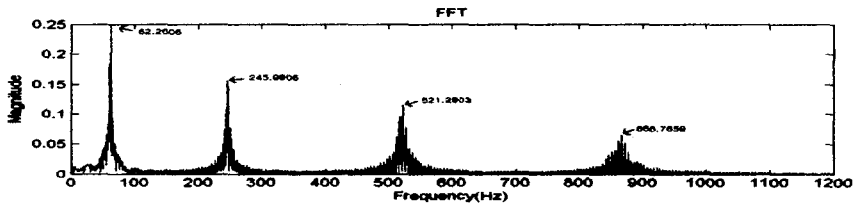


Fig. 3(c). 주파수응답특성 - Damage 2

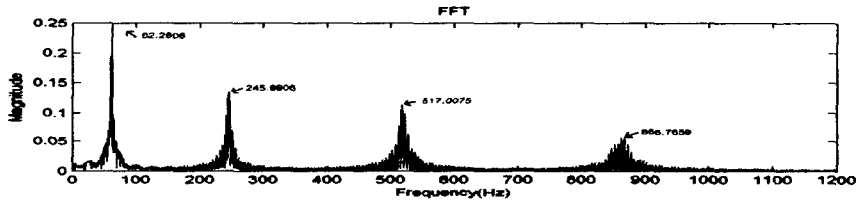


Fig. 3(d). 주파수응답특성 - Damage 3

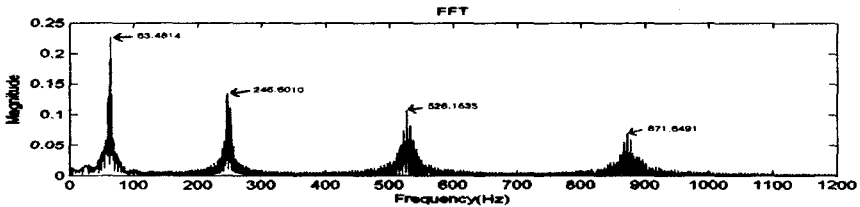


Fig. 3(e). 주파수응답특성 - Damage 4

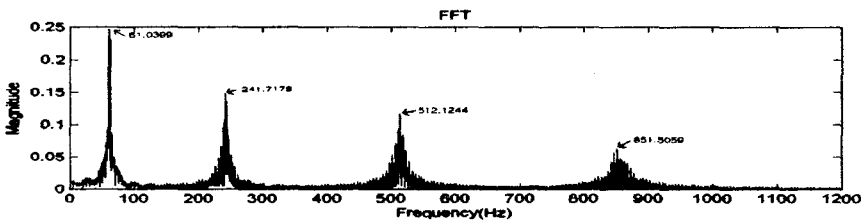


Fig. 3(f). 주파수응답특성 - Damage 5

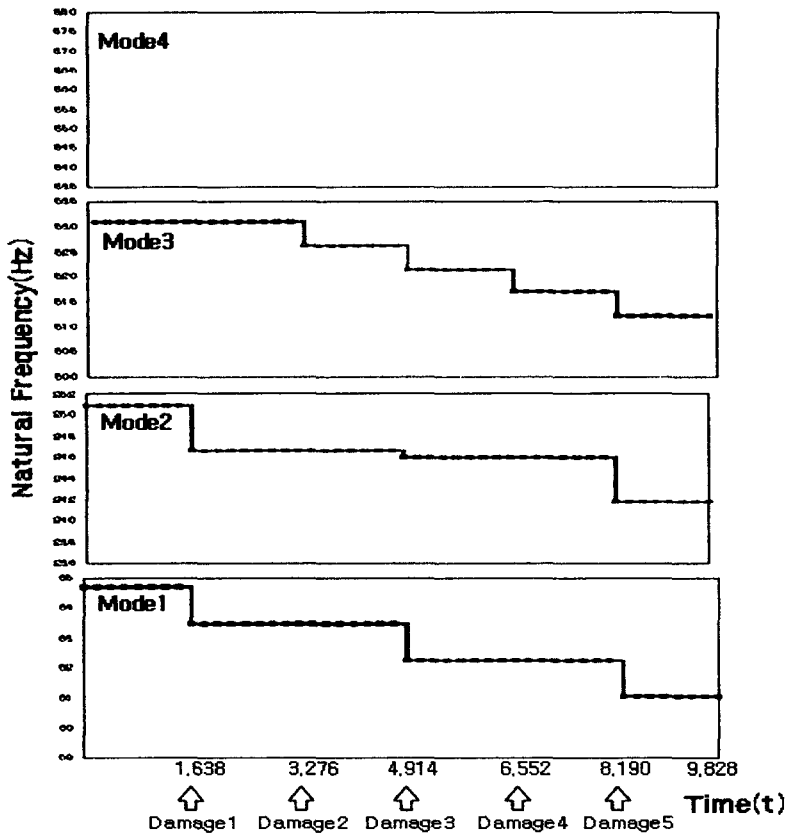


Fig. 4 고유진동수의 시간이력

Table 2 손상 시나리오별 고유진동수

	Mode1(Hz)	Mode2(Hz)	Mode3(Hz)	Mode4(Hz)
Undamage	64.7022	250.8738	531.0467	876.5323
Damage 1	63.4814	246.6010	531.0467	876.5323
Damage 2	63.4814	246.6010	526.1635	871.6491
Damage 3	62.2606	245.9906	521.2803	866.7659
Damage 4	62.2606	245.9906	517.0075	866.7659
Damage 5	61.0399	241.7178	512.1244	851.5059

Fig. 4에서 살펴보면 각 모드는 손상에 따라서 진동수 변화에 차이가 있다. 모드 1, 2는 damage 1(대상구조물의 4번 요소에 강성 5%감소)에 민감하게 반응하는데 비해, 상대적으로 모드 3-4는 손상에 민감하게 반응하지 않았다. Damage 2(4번 요소 추가적인 5%의 강성이 감소)의 경우에는 모드 1, 2는 변화하지 않으며, 모드 3, 4는 진동수의 변화가 나타나고 있다. Damage 4(2번 요소)에 추가적인 5% 강성 감소)의 경우 모드 3만이 진동수의 변화가 나타났으며, Damage 5의 경우 모든 모드에서 진동수의 변화가 나타났다. 이는 각 모드의 진동수 변화는 손상의 크기에 따른 영향이 있다고 판단된다.

#### 4. 고유진동수 기반 손상위치 검색

고유진동수 기반 손상위치 검색기법은 Kim 외(2003)에서 제시한 알고리즘을 사용하였다. 다음의 식(1)은 모드  $i$ 와 위치  $j$ 에서 손상위치를 예측하는 식이다. 이때,  $F_{ij}$ 는 모드  $i$ 와 위치  $j$ 의 모드 민감도로서 실험적으로 측정된 모드형상 또는 이론적인 수치해석으로부터 구할 수 있다.

한편,  $Z_i$ 는 손상 전후 측정된 모드  $i$ 의 고유치의 변화율이다. 계산된  $e_{ij}$ 를 정규화하고, 통계적인 패턴인식에 의해, 위치  $j$ 에 대한 손상지수를 추정한다. 다음으로, 식(2)를 사용하여 모드  $i$ 에서 무차원의 손상크기 ( $a/H$ )를 예측한다. 여기서,  $S_{ik}$ 는 모드  $i$ 의 모드형상 곡률로부터 구한 위치  $j$ 의 민감도이다. 아래의 식(1)과 식(2)에 대한 자세한 설명은 참고문헌[1,3]를 참고하기 바람.

$$e_{ij} = Z_m \sqrt{\sum_{k=1}^{NM} Z_k} - F_{mq} \sqrt{\sum_{k=1}^{NM} F_{kq}}, F_{ij} = \frac{\{\phi_i\}^T [C_j] \{\phi_i\}}{\{\phi_i\}^T [C] \{\phi_i\}}, Z_i = \delta w_i^2 / w_i^2 \quad (1)$$

$$\frac{\delta w_i^2}{w_i^2} = \eta S_{ik} \left( \frac{a_k}{H} \right)_i^2, S_{ik} = \int_k \{\phi_i^n\}^2 dx \left/ \int_0^L \{\phi_i^n\}^2 dx \right. \quad (2)$$

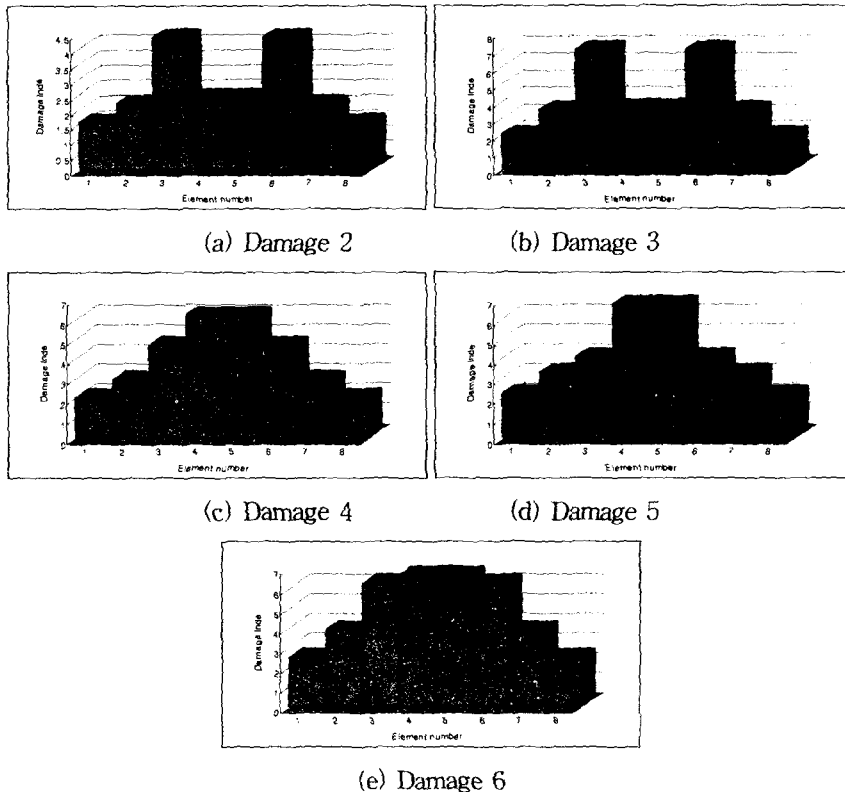


Fig. 5 각 손상 시나리오에 대한 대상구조물의 손상지수

실험구조물의 각 요소의 손상지수를 계산하였다. 각 요소의 손상지수를 계산한 결과를 Fig. 5(a) - Fig. 5(e)에 도시하였다. 실제 손상이 요소 4에 모사된 Damage 1 - Damage 2의 경우, 손상예측 위치는 3번 요소 손상이 예측되었다. 그리고 실제 손상이 요소 2와 요소 4에 모사된

손상 Damage 3 - Damage 5의 경우, 손상에측위치는 요소 3-요소 6으로 광범위하였다. 이에 대해 수치실험의 정확도를 높이기 위해 추가적인 정밀 유한요소해석에 의한 연구가 필요하다고 사료된다.

## 5. 결 론

고유진동수 시간이력을 사용하여 보 구조물의 손상을 모니터링하는 수치실험이 수행되었다. 먼저, 보 구조물의 수치모형을 결정하여, 이동 가진 하중에 대한 동적 응답을 측정하였다. 동적 응답은 일련의 손상시나리오에 대해 연속적으로 측정되었다. 다음으로, 일련의 동적 응답 특성을 분석하여 고유진동수 시간이력을 추출하였다. 마지막으로, 고유진동수의 시간이력을 이용하여 손상지수를 계산하여 손상 발생 시간과 위치를 발견하였다.

본 연구의 결과는 다음과 같이 요약된다.

1) 실험구조물의 주파수응답특성으로부터 초기 4개 진동모드 주파수의 시간이력을 추출하였으며, 각 모드의 주파수가 시간영역에서 손상발생에 반응하여 변화하였다.

2) 손상위치와 이에 민감하게 반응하는 첫 4개 모드의 고유진동수의 관계를 분석하였다. 이를 통해 각 모드의 주파수는 손상의 위치와 크기에 대해서 서로 다른 변화 양상을 나타내는 것을 알 수 있었으며 3번, 4번 모드가 1번, 2번 모드에 비해 손상의 변화에 대체적으로 민감하게 반응하는 것으로 나타났다.

3) 고유진동수 기반 손상위치검색 알고리즘을 사용하여 손상의 위치를 검색하였다. 손상의 위치 검색 결과 실제 손상 결과와 오차가 발생하였다. 수치실험의 정확도를 높이기 위해 추가적인 정밀 유한요소 해석에 의한 연구가 필요하다고 사료된다.

## 후 기

이 연구는 2004년도 한국과학재단 지정 스마트사회기반연구센터의 지원에 의해 수행되었습니다.

## 참고 문헌

1. 김정태 (1999), "소수의 고유진동수를 사용하는 비파괴 균열발견모델의 유도 및 검증", 한국전산구조공학회, Vol. 12, No. 2, pp. 140-159
2. 김성곤, 장정환, 박민석, "서해대교 교량계측 모니터링 시스템 개발", 대한토목학회 논문집, Vol. 20, No. 7. 2000.
3. J.T. Kim, Y.S, Ryu, H.M. Cho, Norris Stubbs(2003), "Damage identification in beam-type structures: frequency-based method vs mode-shape-based method", Engineering Structure 25, pp. 57-67
4. Shin, S., and Hjelmstad, K. D. (1994). "Damage detection and assessment of structure of structural systems from measured response." Civ. Eng. Studies, SRS 593, UIIU-ENG-94-2013, Univ, of Illinois at Urbana, Champaign, Ill.