

수정 라플라시안 및 고유주파수를 이용한 보 구조물의 결함탐지기법

이종원
남서울대학교 건축공학과

Fault Detection Method for Beam Structure Using Modified Laplacian and Natural Frequencies

Jong-Won Lee

Department of Architectural Engineering, Namseoul University

요약 대형구조물의 효과적인 구조 안전성 확보를 위해서는 결함탐지기법을 포함한 건전성 모니터링의 적용이 필요하다. 본 연구에서는 보 구조물에 발생하는 균열위치와 균열크기를 추정하기 위하여 다음과 같은 2단계의 균열추정방법을 제안한다. 우선, 보 구조물의 분포 국부 변형률 계측결과를 이용하여 변형률 모드형상을 구하고, 이에 대한 수정 라플라시안 (Laplacian) 연산을 통하여 균열발생 영역을 추정한다. 이후, 가속도 측정을 통하여 구한 고유주파수와 신경망기법을 이용하여, 미리 추정된 균열발생 영역을 대상으로 균열위치와 균열크기를 추정한다. 이때, 신경망을 훈련시키기 위하여, 에너지법에 의해 유도된 균열보의 등가휨강성을 이용하여 균열보의 고유주파수를 해석적으로 구한다. 기법을 검증하기 위하여 알루미늄 캔틸레버 보에 대한 손상실험을 수행하였다. 인위적으로 실험체에 균열을 가한 후 자유진동실험을 수행하여 동적 변형률과 가속도를 계측하고 이를 이용하여 변형률 모드형상과 고유주파수를 구하였다. 변형률 모드형상에 대한 수정 라플라시안 연산을 통하여 균열발생 영역을 추정하고, 고유주파수와 신경망기법을 이용하여, 미리 추정된 균열발생 영역에 대하여 균열위치와 균열크기를 판정하였다. 3가지 손상경우에 대한 균열발생 영역의 추정결과는 실제 영역과 잘 일치하였으며, 균열위치와 균열크기 추정결과의 정확성을 상당히 향상시킬 수 있었다. 제안된 기법은 장대구조물에 대한 구조물 건전성 모니터링에 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

Abstract The application of health monitoring, including a fault detection technique, is needed to secure the structural safety of large structures. A 2-step crack identification method for detecting the crack location and size of the beam structure is presented. First, a crack occurrence region was estimated using the modified Laplacian operator for the strain mode shape obtained from the distributed local strain data. The crack location and size were then identified based on the natural frequencies obtained from the acceleration data and the neural network technique for the pre-estimated crack occurrence region. The natural frequencies of a cracked beam were calculated based on an equivalent bending stiffness induced by the energy method, and used to generate the training patterns of the neural network. An experimental study was carried out on an aluminum cantilever beam to verify the present method for crack identification. Cracks were produced on the beam, and free vibration tests were performed. A crack occurrence region was estimated using the modified Laplacian operator for the strain mode shape, and the crack location and size were assessed using the natural frequencies and neural network technique. The identified crack occurrence region agrees well with the exact one, and the accuracy of the estimation results for the crack location and size could be enhanced considerably for 3 damage cases. The presented method could be applied effectively to the structural health monitoring of large structures.

Keywords : Modified Laplacian operator, Natural frequency, Strain mode shape, Crack identification, Neural network technique

이 논문은 2017년도 남서울대학교 학술연구비 지원에 의해 연구되었음.

*Corresponding Author : Jong-Won Lee(Namseoul Univ.)

Tel: +82-41-580-2761 email: jwlee@nsu.ac.kr

Received March 7, 2018

Revised April 9, 2018

Accepted May 4, 2018

Published May 31, 2018

1. 서론

대형 사회기반시설물의 구조적 안전성 확보를 위해서는 1차적으로 과학적이고 체계적인 계획, 설계 및 시공이 이루어져야 하며, 2차적으로는 시공된 구조물의 적절한 유지관리를 통하여 안전성을 확보해야 한다. 구조물의 효과적인 유지관리를 위해서는 정기점검 및 정밀안전진단도 필요하지만, 구조물의 노후화, 손상 발생 및 진전 여부 등을 항시 감시할 수 있는 구조물 건전성 모니터링(structural health monitoring) 기술의 적용이 필요하다.

고층건물, 장대교량, 대형 풍력터빈 블레이드 및 타워 등 장대구조물에 대한 구조물 건전성 모니터링을 위하여, 급속형 변형률 센서 또는 광섬유 브래그 격자(FBG: fiber bragg grating) 센서를 구조물 길이 방향으로 분포시켜 연속적으로 설치하여 국부 변형률을 계측하고, 동시에 가속도계를 통하여 구조물의 진동을 계측하는 경우가 많다. 높이 632 m 상하이 타워에 대한 장기 구조성능 모니터링을 위하여 다양한 센서를 이용한 모니터링 시스템을 연구하였는데, 변형률 및 응력수준 모니터링을 위하여 건물의 높이 및 평면 방향으로 변형률 센서를 분포하여 설치하였고, 가속도 모니터링을 위하여 건물 최상부를 포함하여 가속도계를 설치하였다[1]. 길이 61 m 트러스 교량의 구조물 건전성 모니터링을 위하여 교량의 길이 및 폭 방향으로 변형률 센서 및 가속도계를 분포하여 설치하였는데, 변형률 계측결과는 유한요소 모델에 의한 응답과 비교 및 하중 경로 파악을 위하여 이용되었고, 가속도 계측결과는 유한요소 모델의 개선에 활용되었다[2]. 한편, 대형 풍력터빈 블레이드 및 타워를 대상으로, 길이 방향으로 분포되는 변형률을 계측하기 위하여 FBG 센서를 적용한 연구가 진행되었다. 즉, 풍력터빈 블레이드의 끝단 처짐을 평가하기 위하여 FBG 센서를 활용하였고[3], 풍력터빈 블레이드의 FBG 센서 기반 모니터링시스템을 제안하였으며[4], 풍력터빈 타워의 변형률과 변위를 추정하기 위하여 FBG 센서를 적용하였다[5].

변형률, 응력수준, 진동 모니터링과 변위추정, 유한요소 모델과의 비교 등 장대구조물에 대한 분포 변형률과 가속도 계측의 기존 목적을 달성하면서, 이들 센서를 활용하고 필요한 경우 센서시스템을 보완하여 구조물의 결함을 병행하여 탐지할 수 있으면 보다 효과적인 구조물 건전성 모니터링을 수행할 수 있을 것으로 판단된다. 본

연구에서는 2단계의 균열추정방법을 제안한다. 우선, 보 구조물의 분포 국부 변형률 계측결과를 기반으로 변형률 모드형상을 구하고, 수정 라플라시안(Laplacian) 연산을 통하여 균열발생 영역을 추정한다. 이후, 가속도 측정을 통하여 구한 고유주파수와 신경망기법을 이용하여, 추정된 균열발생 영역을 대상으로 균열위치와 균열크기를 추정할 수 있는 기법을 제안한다. 이때 에너지법에 의해 유도된 균열보의 등가휨강성을 이용하여 균열보의 고유주파수를 계산하고 이를 이용하여 신경망의 훈련패턴을 생성한다. 제안된 기법을 검증하기 위하여 알루미늄 캔틸레버 보에 대한 손상실험을 수행한다.

2. 수정 라플라시안 연산

균열 또는 다른 형태의 손상은 보의 휨강성을 국부적으로 저하시키며 이는 변형률 모드형상의 국부적인 변화를 초래한다. 따라서 변형률 모드형상 모니터링을 통하여 구조물에 발생하는 손상위치의 영역을 추정할 수 있다. Ratcliffe[6]은 다음과 같은 수정 라플라시안 연산을 이용하여 변형률 모드형상의 평탄성(smoothness)을 조사함으로써 손상위치의 영역을 추정할 수 있는 방법을 제안하였다.

$$\delta_i = (a_0 + a_1x_i + a_2x_i^2 + a_3x_i^3) - \tilde{L}_i \quad (1)$$

여기서 δ_i 는 Fig. 1에 보인 i 노드에서의 차이함수(difference function)이고, \tilde{L}_i 는 i 노드에서의 일차원 라플라시안이며 다음과 같이 구한다.

$$\tilde{L}_i = (y_{i+1} + y_{i-1}) - 2y_i \quad (2)$$

여기서 y_i 는 i 노드에서의 모달변위이며, Eq. (1)의 3차 다항식 계수 a_0, a_1, a_2, a_3 는 라플라시안 $\tilde{L}_{i-2}, \tilde{L}_{i-1}, \tilde{L}_{i+1}, \tilde{L}_{i+2}$ 를 이용하여 구할 수 있다.

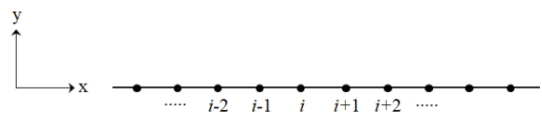


Fig. 1. Node for modified Laplacian operator.

한편, 미소 변위 하에서 보의 곡률은 다음과 같이 라플라시안과 관계가 있다.

$$\kappa_i = y_i'' \cong \frac{y_{i+1} - 2y_i + y_{i-1}}{\Delta x^2} = \frac{\tilde{L}_i}{\Delta x^2} \quad (3)$$

여기서 Δx 는 수치 미분에서 x 방향 증분이며, Fig. 1에서는 노드 간 거리이다.

또한, 직사각형 보의 높이를 h 라 하면 표면 변형률은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\epsilon = \kappa \frac{h}{2} \quad (4)$$

Eq. (3)과 (4)에서 다음 식이 유도될 수 있다.

$$\tilde{L} = \kappa \Delta x^2 = \frac{2}{h} \Delta x^2 \epsilon = C \epsilon \quad (5)$$

여기서 C 는 비례상수이다. 즉, 라플라시안과 표면 변형률은 비례 관계이므로 다음과 같이 변형률 모드형상을 측정하여 라플라시안을 구할 수 있다.

$$\tilde{L}_i = C \epsilon_i \quad (6)$$

이를 이용하여 Eq. (1)의 차이함수를 변형률 모드형상을 통하여 구할 수 있다. 각 노드에서 차이함수를 구한 후 차이함수가 크게 평가되는 영역이 변형률 모드형상의 평탄성이 약화되는 부분이므로 이를 손상영역으로 추정할 수 있다.

3. 균열보의 고유주파수

Yang 등[7]에서는 열린 균열이 존재하는 직사각형 단면 보에서 변형 에너지의 균형 조건식을 이용하여 균열보의 등가휨강성을 다음 식과 같이 유도하고, 이를 이용하여 균열크기와 위치 변화에 따른 고유진동수를 계산하는 연구를 수행하였다.

$$EI_c(x) = \frac{EI}{1 + EIR(a,c)/[1 + ((x-c)/\{k(a)a\})^2]} \quad (7)$$

여기서 a 는 균열깊이, c 는 균열위치, EI 는 비균열보의 휨강성이다. 나머지 함수는 참고문헌[7]을 참조할 수 있

다. 즉, Eq. (7)을 이용하면 임의 위치 및 깊이의 열린 균열이 있는 보의 등가휨강성을 구할 수 있다.

한편, 균열이 있는 오일러-베르누이(Euler-Bernoulli) 보의 특성방정식은 다음과 같다.

$$\frac{d^2}{dx^2} \left[EI_c \frac{d^2 W}{dx^2} \right] - \rho A \omega_c^2 W = 0 \quad (8)$$

여기서 W 는 횡방향 변위, ω_c 는 균열보의 고유 각주파수, ρ 는 밀도, A 는 단면적이다.

이후에 실험이 수행되는 캔틸레버 보에 대한 Eq. (8)의 해를 구하기 위하여 갈레르킨(Galerkin) 방법을 이용하였다. 즉, 가중함수와 시도함수를 4차까지의 비균열보 모드형상으로 가정하고 캔틸레버 보의 경계조건을 적용하여 Eq. (11)와 같이 적분형태의 특성방정식을 구하였다.

$$k_{ij} = (\phi_i, L\phi_j) = \int_0^l \frac{d^2 \phi_i}{dx^2} EI_c(x) \frac{d^2 \phi_j}{dx^2} dx, \quad i, j = 1, 2, 3, 4 \quad (9)$$

$$m_{ij} = (\phi_i, \rho A \phi_j) = \rho A \int_0^l \phi_i \phi_j dx, \quad i, j = 1, 2, 3, 4 \quad (10)$$

$$k_{ij} - \omega_c^2 m_{ij} = 0 \quad (11)$$

여기서 ϕ_i 는 비균열보의 i 차 모드형상, l 은 보의 길이이며 L 은 Eq. (8)의 미분연산자이다. 수치적분을 이용하여 Eq. (11)의 k_{ij} 와 m_{ij} 를 구한 후 고유치해석을 수행하여 균열보의 고유 각주파수 ω_c 를 구할 수 있다.

4. 실험연구

4.1 실험방법

제안된 기법을 검증하기 위하여 알루미늄 캔틸레버 보에 대한 손상실험을 수행하였다. Fig. 2에 보인 바와 같이 노드를 9개 설정한 후 각 노드의 위치 하단 표면에 금속형 변형률 센서(gage length: 5 mm)를 길이방향으로 분포시켜 부착하였으며(SG1 - SG9), 자유단 끝단에 가속도계를 설치하였다. 인위적으로 균열을 발생시키며 자유진동실험을 수행하였는데, 캔틸레버 보의 자유단에 초기변위를 가하여 자유진동을 발생시킨 후 동적 변형률

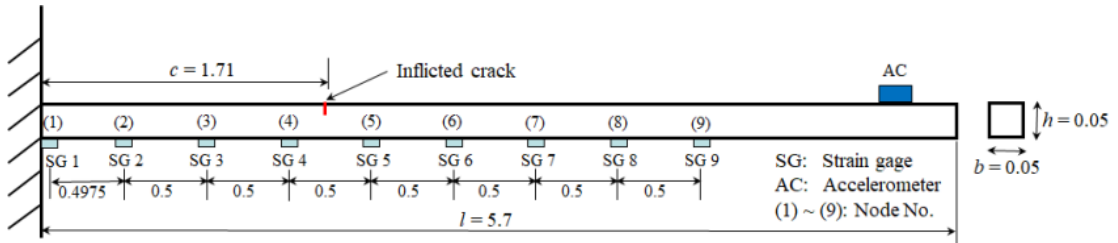


Fig. 2. Dimension of the specimen and sensor locations (lengths in m).

신호와 가속도 신호를 함께 측정하였다. 전체적인 실험 셋업은 Fig. 3에 보이고 있다. 실험체의 길이(l), 폭(b) 및 높이(h)는 각각 5.7 m, 0.05 m 및 0.05 m이며, 탄성 계수와 밀도는 각각 70 GPa 및 2710 kg/m³이다.

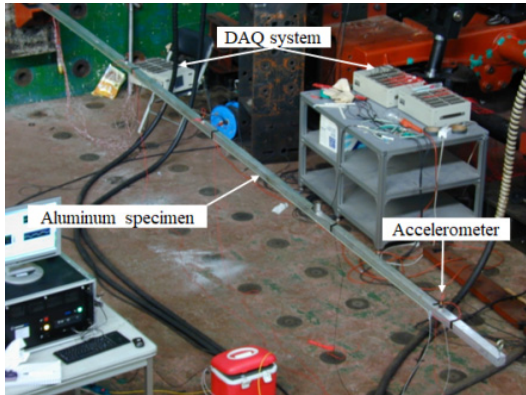


Fig. 3. Experimental setup.

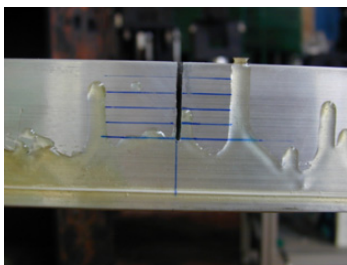


Fig. 4. Inflicted crack ($a/h=0.5$).

균열깊이를 단계적으로 깊이 발생시키면서 자유진동 실험을 수행하였으며, 캔틸레버 보 고정단에서 1.71 m 위치($c/l=0.3$)에 균열을 발생시켰다. 즉, Fig. 4에 보인 바와 같이 균열깊이와 보 높이의 비(a/h)가 0.3 (Damage Case 1), 0.4 (Damage Case 2), 0.5 (Damage Case 3)가 되도록 순차적으로 균열깊이를 깊게 발생시

켰으며, 건전상태와 각 손상단계별로 3회의 자유진동 실험을 수행하여 동적 변형률 및 가속도를 측정하여 결과를 평균하였다. 이때 변형률 데이터는 50 Hz, 가속도 데이터는 200 Hz의 속도로 취득하였다.

4.2 변형률 모드형상 및 균열발생 영역 추정

시스템의 가진점 j 와 i 사이의 변위 주파수응답함수 (displacement frequency response function) $H_{ij}(\omega)$ 와 변형률 주파수응답함수(strain frequency response function) $H_{ij}^e(\omega)$ 는 다음과 같이 유사하게 표현된다. 따라서 기존의 변위 모드형상을 추정하는 방법으로 변형률 모드형상을 추정할 수 있다.

$$H_{ij}(\omega) = \sum_{r=1}^m \frac{\phi_{ir} \phi_{jr}}{k_r - \omega^2 m_r + j \omega c_r} \quad (12)$$

$$H_{ij}^e(\omega) = \sum_{r=1}^m \frac{\psi_{ir}^e \phi_{jr}}{k_r - \omega^2 m_r + j \omega c_r} \quad (13)$$

여기서 k_r , m_r , c_r 는 r 번째 모드의 강성, 질량, 감쇠 성분, ϕ_{ir} 는 r 번째 변위 모드형상의 i 점에서의 성분, 그리고 ψ_{ir}^e 는 r 번째 변형률 모드형상의 i 점에서의 성분을 각각 나타낸다.

변위 모드형상 추정에 널리 이용되는 주파수영역분해법(frequency domain decomposition method)을 이용하여, 동적 변형률 데이터로부터 변형률 모드형상을 추정하였다. 즉, 손상단계별로 3회에 걸쳐 수행된 자유진동 실험에서 얻어진 동적 변형률 데이터를 이용하여 1차 변형률 모드형상을 각각 계산하였고 이를 평균하였다.

추정된 변형률 모드형상에 대해, 2장에서 설명된 수정 라플라시안 연산을 이용하여 균열발생 영역을 추정하였다. Fig. 2에 보인 노드 (3)-(7)에 대한 차이함수(절대

값)를 Eq. (1)을 이용하여, 건전상태와 3단계의 손상단계 별로 구하였으며 이를 Fig. 5에 나타내었다. 이때, 임의 노드에서 차이함수를 계산하기 위해서는 양쪽으로 최소 2개 이상 노드에서의 데이터가 필요하므로 노드 (3)-(7)에 대한 차이함수만을 구하였다.

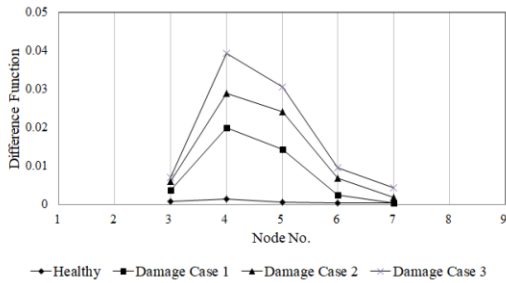


Fig. 5. Difference functions.

노드 (4)와 (5)에서 차이함수가 크게 발생함을 알 수 있는데, 이는 해당 노드에서 변형률 모드형상의 평탄성이 약화되는 것을 의미하며 따라서, 노드 (4)-(5) 영역에서 균열이 발생되었다고 판단할 수 있다. 즉, 변형률 모드형상의 수정 라플라시안 연산을 통하여 노드 (3)-(7) 구간에 대해서 균열발생 영역을 평가한 결과, 이 구간 중 노드 (4)-(5) 영역이 균열발생 영역으로 추정되었고, 이는 Fig. 2의 균열발생 위치와 일치함을 알 수 있다. 또한, 균열깊이가 커질수록 차이함수가 크게 발생함을 알 수 있다.

본 논문에서는 앞서 언급된 차이함수 계산 가능 노드의 한계로 인하여 제한된 구간 즉, 구조물의 양단이 제외된 구간에 대해서 균열발생 영역을 추정하였다. 향후, 수정 라플라시안 기법의 개선, 손상발생 확률이 높은 구간의 선 지정에 의한 센서시스템 설계, 추가 센서 설치 등을 통하여 대상 구간을 확장할 필요가 있는 것으로 판단된다.

4.3 균열위치 및 균열크기 추정

측정된 가속도 신호로부터 구한 고유주파수와 신경망 기법을 이용하여 균열위치와 크기를 추정하였다. 우선, 건전상태와 3단계의 손상단계에 대하여 구한 고유주파수를 Table 1에 정리하였는데, 균열발생에 의하여 고유주파수가 감소하고 균열깊이가 커질수록 감소량이 증가함을 알 수 있다.

Table 1. Natural frequencies (Hz)

Mode		1st	2nd	3rd	4th
Healthy	Exact	1.26	7.92	22.17	45.45
	Experiment	1.25	7.84	21.81	43.07
Damage Case 1	Experiment	1.24	7.83	21.70	42.99
Damage Case 2		1.23	7.82	21.56	42.84
Damage Case 3		1.22	7.80	21.32	42.71

Fig. 2에 보인 캔틸레버 보에 대하여, 균열위치 및 크기를 달리하는 여러 손상경우들을 무작위로 샘플링하고 이에 해당되는 고유주파수를 수치해석을 통하여 구한 후 이를 이용하여 신경망의 훈련패턴을 생성할 수 있다. 생성된 훈련패턴을 이용하여 훈련된 신경망에 측정된 고유주파수를 입력하면 균열위치 및 크기를 판정할 수 있다.

우선 500셋의 균열위치 및 크기를 무작위로 샘플링한 후 이에 대한 균열보의 고유주파수를 3장에서 설명된 방법으로 구한 후, 각각의 손상경우에 대하여 변화된 4차까지의 고유주파수를 구하였다. 이때, 훈련패턴을 2가지 경우로 생성하였는데, 첫 번째는 균열위치를 샘플링할 때 앞에서 균열발생 영역으로 추정된 노드 (4)-(5) 영역에서만 샘플링하였고, 두 번째는 균열발생 영역이 추정되지 않았다고 가정하고 노드 (3)-(7) 영역에서 균열위치를 샘플링하였다. 단, 훈련패턴의 개수는 2개가 동일하도록 500셋을 각각 생성하였다.

각각의 훈련패턴은 4개의 손상전후 고유주파수 비율 및 이에 해당하는 균열위치와 크기로 구성된다. 따라서 신경망 입력자료는 4개로서 1차, 2차, 3차 및 4차 고유주파수 비율이고, 출력층은 균열위치와 크기로 구성하였다. 한편, 각각 3개의 노드를 가지는 2개의 은닉층을 구성하였으며, 생성된 훈련패턴을 이용하여 신경망을 학습시켰다. 또한, 측정 데이터에 포함된 노이즈의 영향을 감소하기 위하여 노이즈 첨가학습(noise injection learning)을 적용하였다. 즉, 훈련패턴에 인위적으로 일정 정도의 노이즈를 첨가시킨 후 학습을 수행함으로써, 신경망의 일반화 성능을 향상시켜 추정결과의 정확성을 개선시킬 수 있다.

학습된 신경망을 이용한 균열위치 및 균열크기 추정 결과를 Table 2와 3에 각각 나타내었다. 여기서 Result A는 앞에서 언급된 노드 (4)-(5) 영역에 대한 훈련패턴을 이용한 결과이고, Result B는 노드 (3)-(7) 영역에 대한 훈련패턴을 이용한 결과이며, RMS(root mean square) 오차도 함께 나타내었다.

Table 2. Estimated crack locations

Damage Case	Crack location, c/l		
	Accurate	Result A	Result B
1	0.3	0.305	0.329
2	0.3	0.303	0.310
3	0.3	0.302	0.288
RMS error	-	0.0062	0.0329

Table 3. Estimated crack sizes

Damage Case	Crack location, a/h		
	Accurate	Result A	Result B
1	0.3	0.300	0.284
2	0.4	0.390	0.375
3	0.5	0.508	0.504
RMS error	-	0.0128	0.0300

균열발생 영역의 선행 추정 없이 균열을 추정해도 균열위치와 크기를 합리적으로 추정할 수 있었으나(Result B), 변형을 모드형상에 대한 수정 라플라시안 연산을 통하여 균열발생 영역을 우선 추정한 후, 이 영역에 대한 집중적인 균열추정을 수행함으로써 추정결과의 정확성을 향상시킬 수 있었다. 즉, 균열위치 추정오차는 3.29%에서 0.62%로, 균열크기 추정오차는 3.00%에서 1.28%로 감소함을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 보 구조물에 발생하는 균열위치와 균열크기를 추정하기 위한 2단계의 균열추정방법을 제안하였다. 우선, 보 구조물의 변형을 모드형상에 대한 수정 라플라시안 연산을 통하여 균열발생 영역을 우선 추정한 후, 가속도 측정을 통하여 구한 고유주파수와 신경망기법을 이용하여, 미리 추정된 균열발생 영역에 대하여 집중적으로 균열위치 및 균열크기를 추정할 수 있는 기법을 제안하였다.

기법을 검증하기 위하여 알루미늄 캔틸레버 보에 대한 손상실험을 수행하였다. 인위적으로 실험체에 균열을 가한 후, 동적 변형을 데이터를 측정하여 변형률 모드형상을 구하였고, 가속도를 측정하여 고유주파수를 구하였다. 변형률 모드형상에 대한 수정 라플라시안 연산을 통하여 균열발생 영역을 추정하였는데, 추정결과는 실제

영역과 잘 일치하였다. 이후, 고유주파수와 신경망기법을 이용하여, 미리 추정된 균열발생 영역에 대하여 균열위치와 균열크기를 판정하였으며, 3가지 손상경우에 대하여 추정결과의 정확성을 향상시킬 수 있었다. 즉, 균열발생 영역의 선행 추정 없이 균열을 추정해도 균열위치와 크기를 합리적으로 추정할 수 있었으나, 제안된 기법을 적용함으로써 추정결과의 정확성을 상당히 향상시킬 수 있었다.

장대구조물에 대한 분포 변형률과 가속도 측정의 기존 목적을 달성하면서, 이들 센서를 활용하고 필요한 경우 센서시스템을 보완하여 제안된 기법을 적용하면 보다 효과적인 구조물 건전성 모니터링이 가능할 것으로 판단된다. 향후, 균열발생 영역의 평가대상 구간에 대한 제한점을 해결하기 위하여, 수정 라플라시안 기법의 개선 및 효과적인 센서시스템 설계 등에 대한 추가연구가 필요한 것으로 판단된다.

References

- [1] J. Z. Su, Y. Xia, L. Chen, X. Zhao, Q. L. Zhang, Y. L. Xu, J. M. Ding, H. B. Xiong, R. J. Ma, X. L. Lv, A. R. Chen, "Long-term structural performance monitoring system for the Shanghai Tower", *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, vol. 3, no. 1, pp. 49-61, 2013.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s13349-012-0034-z>
- [2] A. B. MacLeod, Structural Health Monitoring of the Traffic Bridge in Saskatoon Using Strain Gauges, Master's Thesis, University of Saskatchewan, Canada, 2010.
- [3] K. S. Choi, Y. H. Huh, I. B. Kwon, D. J. Yoon, "A tip deflection calculation method for a wind turbine blade using temperature compensated FBG sensors", *Smart Materials and Structures*, vol. 21, no. 2, pp. 1-9, 2012.
DOI: <https://doi.org/10.1088/0964-1726/21/2/025008>
- [4] T. J. Arsenault, A. Achuthan, P. Marzocca, C. Grappasonni, G. Coppotelli, "Development of a FBG based distributed strain sensor system for wind turbine structural health monitoring", *Smart Materials and Structures*, vol. 22, no. 7, 2013.
DOI: <https://doi.org/10.1088/0964-1726/22/7/075027>
- [5] H. J. Bang, H. I. Kim, K. S. Lee, "Measurement of strain and bending deflection of a wind turbine tower using arrayed FBG sensors", *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol. 13, no. 12, pp. 2121-2126, 2012.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s12541-012-0281-2>
- [6] C. P. Ratcliffe, "Damage detection using a modified Laplacian operator on mode shape data", *Journal of Sound and Vibration*, vol. 204, no. 3, pp. 505-517, 1997.
DOI: <https://doi.org/10.1006/jsvi.1997.0961>

- [7] X. F. Yang, A. S. Swamidas, R. Seshadri, "Crack Identification in Vibrating Beams Using the Energy Method", *Journal of Sound and Vibration*, vol. 244, no. 2, pp. 339-357, 2001.
DOI: <https://doi.org/10.1006/jsvi.2000.3498>
-

이 종 원(Jong-Won Lee)

[정회원]



- 1991년 2월 : 연세대학교 대학원 건축공학과 (공학석사)
- 2003년 2월 : KAIST 대학원 건설 및환경공학과 (공학박사)
- 1991년 3월 ~ 2008년 8월 : 한국 기계연구원 책임연구원
- 2008년 9월 ~ 현재 : 남서울대학교 건축공학과 교수

<관심분야>

구조물 건전성 모니터링, 손상추정, 스마트센서 기술