

말단질량을 갖는 탄성지지 균열보의 고유주파수와 임피던스 특성 연구

이종원

남서울대학교 건축공학과

A Study on the Characteristics of Natural Frequency and Impedance of Elastically Restrained Cracked Beam with a Tip Mass

Jong-Won Lee

Department of Architectural Engineering, Namseoul University

요약 주요 시설물에 널리 이용되고 있는, 말단질량을 갖는 탄성지지 캔틸레버형 보의 구조적 안전성 확보를 위하여, 대표적 손상형태 중 하나인 균열의 발생 및 진전을 센서를 통하여 측정된 데이터를 이용하여 추정함으로써 건전성을 모니터링할 수 있는 기술개발이 필요하다. 균열탐지를 위하여 압전재료를 이용한 임피던스기법이 활발히 연구되고 있는데, 이러한 기존연구들은 주로 균열과 임피던스 신호와의 관련성을 손상지수를 이용하여 실험적으로 규명함으로써 손상을 추정하는 내용으로 판단된다. 본 연구는 말단질량을 갖는 탄성지지 캔틸레버형 보의 균열에 따른 임피던스 신호의 변화와 해석적으로 구한 균열보 고유주파수 변화의 상관성을 규명하기 위한 연구이다. 정확한 고유주파수 해석을 위하여 자유진동실험 결과를 이용하여 건전보에 대한 해석모형을 개선한 후, 캔틸레버형 보에 단계적으로 균열을 발생시키면서 임피던스 신호를 측정하고 이에 대한 손상지수를 제곱평균제곱근편차를 이용하여 구한다. 그 결과를 개선된 해석모형을 기반으로 산정한 균열보의 고유주파수와 비교함으로써 고유주파수와 임피던스 신호와의 상관관계를 규명한다. 실험적으로 구한 임피던스 손상지수와 해석적으로 구한 1차 및 2차 고유주파수의 손상전후 비율 간의 상관계수가 각각 0.924 및 0.928로써, 밀접한 상관관계를 가지는 것으로 알 수 있었는데, 이러한 상관성을 활용하면 임피던스기법 기반 손상추정의 결과로부터 구조물의 현재 상태에 대한 구조특성을 보다 정확히 평가할 수 있고, 해석모형을 이용하여 구조물의 거동을 효과적으로 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

Abstract The development of a technique that can monitor the cracks, which is one of the typical types of damage, is necessary to secure the structural safety of elastically restrained cantilever-type beams with a tip mass that is used widely in infrastructure. Impedance techniques have been actively researched to detect cracks, and the cracks were estimated mainly by experimentally investigating the relationship between the crack and impedance signal. This study examined the correlation between the change in the impedance signals due to the crack, and the natural frequency obtained analytically. After updating the analysis model for the intact beam, the impedance signal was measured while gradually inflicting cracks in the cantilever-type beam, and the damage index was obtained. The results were compared with the natural frequencies calculated from the updated analysis model to investigate the correlation. A close correlation was observed between the experimentally obtained impedance damage index, and the analytically calculated natural frequency. Using this correlation, the structural characteristics could be evaluated more accurately from the damage estimation results, and the behavior of the structure could be predicted effectively using the analysis model.

Keywords : Natural Frequency, Impedance, Crack, Elastically Restrained, Tip Mass

본 연구는 한국전력공사의 2020년 선정 기초연구개발 과제 연구비에 의해 지원되었음(과제번호 : R2OXO02-30). 이 논문은 2017년 대한민국 과학기술정보통신부와 한국연구재단의 중견연구지원사업의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2017R1A2B4006722).

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

email: jwlee@nsu.ac.kr

Received September 21, 2020

Revised October 13, 2020

Accepted November 6, 2020

Published November 30, 2020

1. 서론

캔틸레버 보 형태의 구조물은 건축구조물, 풍력발전기, 플랜트 등 주요 시설물에 널리 이용되고 있는데, 지지단이 탄성지지 되어있어 있고 자유단에는 집중질량을 갖는 경우가 많다. 이러한 구조물의 구조적 안전성 확보와 효과적 유지관리를 위한 기술개발이 요구되고 있으며, 이를 위한 구조물 건전성 모니터링(structural health monitoring) 기술이 활발히 연구되고 있다. 한편, 균열은 구조물에서 발생할 수 있는 가장 대표적인 손상형태 중 하나이며, 구조응답 측정을 통한 균열탐지기법 관련 연구가 다양하게 수행되고 있다.

구조물 건전성 모니터링을 위한 전통적인 센서 및 결합탐지기법들의 한계를 극복하고, 보다 효율적이고 신뢰성 있는 구조물 결합탐지기를 위하여 스마트 재료에 대한 연구개발이 진행되고 있다. 압전재료(piezoelectric material)를 이용한 임피던스(impedance) 기반 결합탐지기법은 대표적인 스마트 재료 관련 기법 중 하나로써, 최근 관련 연구가 활발히 진행되고 있다. 이중 균열을 탐지하기 위한 기존의 연구는 다음과 같다.

대표적 압전재료인 PZT(Pb-Zr-Ti, Lead Zirconate Titanate) 패치를 알루미늄 보에 부착한 후 균열진전에 따른 임피던스 신호의 변화를 조사하였는데, 균열진전에 대한 응력 반복회수와 임피던스 손상지수 간의 상관관계를 연구하여 통계적 손상기준치를 제안하였다[1]. 다수의 압전재료로부터 측정되는 정보를 융합하여 균열의 위치와 크기를 추정할 수 있는 수정 전기역학적 임피던스기법을 제안하였는데, 제곱평균제곱근편차(root mean square deviation)를 손상지수로 사용하여 원형강관에 발생하는 균열을 탐지하였다[2]. 섬유보강 시멘트 복합체(fiber-reinforced cementitious composites)에 발생하는 균열을 탐지하기 위하여, 다채널 임피던스 취득시스템을 통한 균열위치 추정 알고리즘을 제안하였는데, 다양한 온도조건에 대하여 추정결과를 검증하였다[3]. 콘크리트에 분포되는 미세균열을 탐지하여, 이로 인한 손상진전을 모니터링할 수 있는 기법을 제안하였는데, 콘크리트 표면에 PZT 패치를 부착한 후 미세균열 형태의 초기손상과 전기역학적 임피던스로부터 구한 컨덕턴스(conductance) 스펙트럼의 공진 피크 특성의 관계의 조사하고, 손상진전에 따른 전기역학적 컨덕턴스의 변화를 연구하였다[4]. 전기역학적 임피던스를 이용한 복합재료의 효과적인 결합검출을 위하여 서로 다른 PZT 패치 부착방법에 대한 임피던스기법의 성능을 연구하였는데, 유

리섬유 복합 판(glass fibre composite plate)의 균열 및 층간박리(delamination) 검출에 적용하였다[5]. 콘크리트에 발생하는 균열과 동결융해를 모니터링하기 위하여 매입형 압전재료를 제작하여 설치한 후, 전기역학적 임피던스 기법을 이용하여 임피던스의 스펙트럼과 균열 깊이 및 동결융해 사이클의 관계를 조사하였는데, 제곱평균제곱근편차를 손상지수로 사용하였다[6].

위에서 조사된 임피던스 기반 균열탐지에 대한 기존 연구들은 주로 균열 등 손상과 임피던스 신호와의 관련성을 손상지수를 이용하여 실험적으로 규명함으로써 손상을 추정하는 내용으로 판단된다. 구조물과 구조물에 부착된 PZT 패치 사이의 복잡한 구조적 연동특성과 고주파 영역에서의 동적해석의 어려움으로 인하여, 임피던스 신호와 구조물의 물리적 매개변수 간의 상관관계 규명이 어려울 수 있다[7]. 만약 임피던스 신호와 구조물에 대한 해석모델의 상관관계가 규명된다면, 임피던스기법 기반 손상추정의 결과로부터 구조물의 현재 상태에 대한 구조특성을 보다 정확히 평가할 수 있고, 해석모델을 이용하여 구조물의 거동을 효과적으로 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

한편, 고유주파수는 구조물의 전역적(global) 거동을 나타내는 대표적인 구조특성이다. 해석모델을 통하여 추정되는 고유주파수와 임피던스 신호 취득을 통하여 실험적으로 평가되는 구조물 상태의 상호관계를 규명할 수 있다면, 해석모델과 실험결과를 연동하여 구조물의 현 상태를 보다 정확히 모니터링할 수 있고, 이를 기반으로 구조물의 거동예측이 가능할 것으로 판단된다. 고유주파수를 포함한 구조물의 모드특성과 임피던스 신호를 병용한 구조물 건전성 모니터링 관련 기존의 연구는 다음과 같다.

진동 기반 전역적 모니터링 및 임피던스 기반 국부적 모니터링을 통합할 수 있는 센서노드를 개발하고, 하이브리드 가속도-임피던스 모니터링 절차를 제안하였으며, 이를 볼트 접합부 이음판에 가속도계와 PZT 패치를 부착하여 적용하였다[8]. 진동 기반 모니터링과 임피던스 기반 모니터링의 단계적 모니터링 절차를 제안하고, 이를 풍력터빈 타워의 볼트 이완 모니터링을 위하여 적용하였는데, 진동 기반 및 임피던스 기반 손상추정의 결과를 비교하였고 하이브리드 손상탐지기법의 적용성을 검증하였다[9].

위 기존연구에서는 가속도 기반 고유주파수 등 모드특성과 임피던스 기반 손상지수를 통합하기 위하여, 가속도와 임피던스 측정을 통합할 수 있는 하드웨어를 개발하

거나, 진동 및 임피던스 기반 손상추정기법을 단계적으로 적용하기 위한 연구가 주로 진행되었다. 즉, 구조물의 해석모델을 통한 고유주파수와 임피던스 신호의 상관관계 규명과 관련된 연구는 미흡한 상황이라고 판단된다.

본 연구의 목적은 말단질량을 갖는 탄성지지 캔틸레버형 균열보에 대한 해석모델을 수립하고, 이를 통하여 구해지는 고유주파수와 임피던스 신호와의 상관관계를 규명하는 것이다. 즉, 힘을 받는 직사각형 단면 보에 발생하는 균열을 추정하기 위하여, 표면에 PZT 패치를 부착한 후 단계적으로 균열을 발생시키면서 임피던스 신호를 측정하고 손상지수를 구한다. 그 결과를 균열보의 등가힘강성을 적용한 특성방정식으로부터 계산되는 고유주파수 해석결과와 비교하여, 균열로 인한 임피던스 신호와 균열보에 대한 고유주파수의 상관성을 규명한다. 이때, 보다 정확한 고유주파수 산정을 위하여, 건전상태에 대한 해석모델을 자유진동실험 결과를 이용하여 개선한다.

2. 이론적 배경

2.1 말단질량을 갖는 탄성지지 보의 모드특성

균열단면 보의 길이방향 공간좌표 x 와 시간 t 에 대한 횡방향 운동방정식을 변수분리하여, 공간좌표에서의 특성방정식을 구할 수 있다. 여기에 Fig. 1에 보인 바와 같이 원점으로부터 보의 임의 위치까지의 거리 x 를 보 길이(L)로 나눈 값을 ξ 로 설정하고, 횡방향변위 $r(x)$ 를 보 길이로 나눈 값을 $r(\xi)$ 로 표기하면 Eq. (1)과 같이 특성방정식을 구할 수 있고, 이에 대한 일반해를 Eq. (3)과 같이 구할 수 있다.

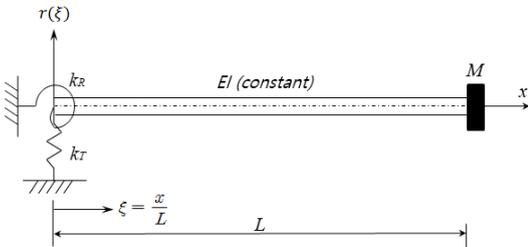


Fig. 1. Elastically restrained cantilever-type beam with a tip mass

$$\frac{d^4 r(\xi)}{d\xi^4} - \beta^4 r(\xi) = 0 \quad (1)$$

$$\beta^4 = \frac{\rho A \omega^2 L^4}{EI} \quad (2)$$

where, E is Young's modulus, I is area moment of inertia, A is cross sectional area, ρ is mass density, and ω is natural circular frequency.

$$r(\xi) = A \sin \beta \xi + B \cos \beta \xi + C \sinh \beta \xi + D \cosh \beta \xi \quad (3)$$

한편, Fig. 1에 보인 바와 같이 고정단 부분에 병진 스프링상수(k_T)와 회전 스프링상수(k_R)를 가지는 스프링으로 탄성지지된 캔틸레버형 보의 $\xi = 0$ 에서의 경계조건은 Eq. (4) 및 (5)와 같고, 집중질량(M)을 가지는 자유단 ($\xi = 1$)에서의 경계조건은 Eq. (6) 및 (7)과 같다. 이때 집중질량의 회전강성 효과는 무시한다.

$$\frac{d^3 r(\xi)}{d\xi^3} = -\frac{k_T L^3}{EI} r(\xi) \quad (4)$$

$$\frac{d^2 r(\xi)}{d\xi^2} = \frac{k_R L}{EI} \frac{dr(\xi)}{d\xi} \quad (5)$$

$$\frac{d^3 r(\xi)}{d\xi^3} = -\frac{M}{\rho AL} \beta^4 r(\xi) \quad (6)$$

$$\frac{d^2 r(\xi)}{d\xi^2} = 0 \quad (7)$$

위 경계조건을 Eq. (3)에 적용하면 상수 A, B, C, D 에 대한 연립방정식이 유도되고, 자명하지 않은 해를 가지기 위해서는 다음과 같이 행렬식이 영이 되어야 한다.

$$\begin{vmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} \\ p_{41} & p_{42} & p_{43} & p_{44} \end{vmatrix} = 0 \quad (8)$$

where,

$$p_{11} = -\beta^3 \quad (9)$$

$$p_{12} = p_{14} = k_T L^3 / EI \quad (10)$$

$$p_{13} = \beta^3 \quad (11)$$

$$p_{21} = p_{23} = -k_R L / EI \quad (12)$$

$$p_{22} = -\beta \quad (13)$$

$$p_{24} = \beta \quad (14)$$

$$p_{31} = -\cos \beta + \frac{M}{\rho AL} \beta \sin \beta \quad (15)$$

$$p_{32} = \sin \beta + \frac{M}{\rho AL} \beta \cos \beta \quad (16)$$

$$p_{33} = \cosh\beta + \frac{M}{\rho AL}\beta \sinh\beta \quad (17)$$

$$p_{34} = \sinh\beta + \frac{M}{\rho AL}\beta \cosh\beta \quad (18)$$

$$p_{41} = -\sin\beta \quad (19)$$

$$p_{42} = -\cos\beta \quad (20)$$

$$p_{43} = \sinh\beta \quad (21)$$

$$p_{44} = \cosh\beta \quad (22)$$

Eq. (8)을 만족하는 β 를 구한 후 이를 Eq. (8)에 대한 연립방정식에 대입하여 상수 A, B, C, D 를 구하면 다음 식과 같이 모드형상을 구할 수 있다.

$$\phi(\xi) = \sin\beta\xi + q_7\cos\beta\xi + q_8\sinh\beta\xi + q_9\cosh\beta\xi \quad (23)$$

where,

$$q_7 = -(q_1 - q_4q_3/q_6)/(q_2 - q_5q_3/q_6) \quad (24)$$

$$q_8 = -(q_1 + q_2q_7)/q_3 \quad (25)$$

$$q_9 = -(p_{11} + p_{12}q_7 + p_{13}q_8)/p_{14} \quad (26)$$

$$q_1 = p_{11} - p_{12}p_{14}/p_{24} \quad (27)$$

$$q_2 = p_{12} - p_{22}p_{14}/p_{24} \quad (28)$$

$$q_3 = p_{13} - p_{23}p_{14}/p_{24} \quad (29)$$

$$q_4 = p_{31} - p_{41}p_{34}/p_{44} \quad (30)$$

$$q_5 = p_{32} - p_{42}p_{34}/p_{44} \quad (31)$$

$$q_6 = p_{33} - p_{43}p_{34}/p_{44} \quad (32)$$

2.2 균열보의 고유주파수

힘을 받는 중실 직사각형 단면의 보에 균열이 발생하였을 때, 에너지 균형 조건을 이용한 균열보의 등가휨강성 유도 과정은 기존연구[10]에서 자세히 설명되어 있으므로 이를 참조할 수 있으며, 이를 요약하면 다음과 같다. 즉, 균열보의 등가휨강성 EI_c 를 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$EI_c(x) = \frac{EI}{1 + \frac{ETR(a, c)}{\left\{1 + \left(\frac{x-c}{k(a)a}\right)^2\right\}}} \quad (33)$$

where, c is distance to crack location from elastic support, a is crack size as shown in Fig. 3, and I_c is area moment of inertia at crack location.

즉, 균열보의 등가휨강성을 보 길이방향 좌표 x , 균열 위치 c 및 균열크기 a 등의 함수로 나타낼 수 있다. 한편, $R(a, c)$ 와 $k(a)$ 는 기존연구[10]를 참조할 수 있다.

3장의 Fig. 3에서 설명되는 보와 동일한 보에서, 균열 위치(c/L)가 0.5일 때 Eq. (33)을 이용하여 구한 균열보의 등가휨강성을 Fig. 2에 나타내었다. 즉, 보 길이에 따른 등가휨강성의 변화를 나타내었는데, 균열위치에서 급격한 등가휨강성의 감소가 발생하고, 균열위치에서 멀어질수록 건전보의 휨강성 값으로 수렴하는 것을 알 수 있다. 또한 균열크기가 증가할수록 균열위치 근방에서의 등가휨강성이 감소함을 알 수 있다.

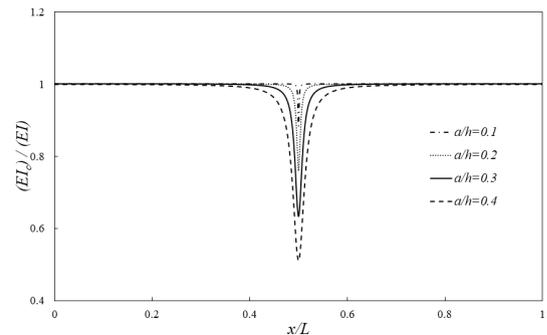


Fig. 2. Variation of equivalent bending stiffness ($c/L = 0.5$)

한편, Galerkin 방법을 이용하여 균열보의 고유주파수를 구할 수 있다. 즉, 가중함수(weight function)로서 건전보의 모드형상인 Eq. (23)을 이용하고 시도함수(trial function)를 4차항까지만 고려하며, Eq. (33)의 등가휨강성을 적용하면 다음과 같은 적분 형태의 특성방정식을 얻을 수 있다. 즉, Eq. (34)에 대해 수치적분을 수행하여 균열보의 고유주파수를 구할 수 있다.

$$\int_0^L \frac{d^2\phi_i}{dx^2} EI_c \frac{d^2\phi_j}{dx^2} dx + \frac{d\phi_i}{dx} \Big|_{x=0} k_R \frac{d\phi_j}{dx} \Big|_{x=0} + \phi_i \Big|_{x=0} k_T \phi_j \Big|_{x=0} - \omega_c^2 \left\{ \rho A \int_0^L \phi_i \phi_j dx + \phi_i \Big|_{x=L} M \phi_j \Big|_{x=L} \right\} = 0 \quad (34)$$

where, ω_c is natural circular frequency of cracked beam.

2.3 임피던스 신호의 손상지수

임피던스 기반 결함탐지기법에서는 일반적으로 임피던스 분석기가 사용되며 수십에서 수백 kHz 범위 내에서 특정 대역의 주파수를 스위핑(sweeping)하면서 구조물에 부착된 압전재료에 전압을 인가하고, 이에 대한 응답을 압전재료의 전기역학적 임피던스로 측정한다. 또한, 구조물의 손상 전후 측정된 임피던스 신호를 비교하여 손상을 추정할 수 있다.

PZT 패치로부터 측정되는 임피던스의 변화를 측정함으로써 구조물의 결함을 탐지할 수 있는데, 이를 위하여 임피던스 변화를 정량화한 손상지수를 사용할 수 있다. 일반적으로 사용되는 손상지수는 다음 식과 같은 제곱평균제곱근편차이다.

$$DI = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \{Re(Z_i^d) - Re(Z_i^0)\}^2}{\sum_{i=1}^n Re(Z_i^0)^2}} \quad (35)$$

where, $Re(Z)$ denotes real electro-mechanical impedance, i is frequency, and 0 and d are healthy and damaged state respectively.

결함이 없는 경우 손상지수는 영에 가까운 수치이고, 결함이 발생한다면 영과 크게 다른 값이 측정된다.

3. 실험방법

임피던스 측정신호를 이용하여 균열을 탐지하기 위하여 Fig. 3과 같이 길이 1 m이고 중실 직사각형 단면 (폭 40 mm, 높이 60 mm)의 알루미늄 실험체를 제작하였으며, 전체적인 실험 셋업을 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 3에 보인 바와 같이 고정부로부터 0.1 m 위치($c/L=0.1$)에 균열을 발생시키면서 실험을 진행하였다. 또한, 고정부로부터 0.15 m 위치에 10(L)×10(W)×0.3(T) 규격의 PZT 패치를 실험체 표면에 부착하였다. 즉, 균열위치에서 0.05 m 떨어진 위치에 PZT 패치를 부착하여 임피던스 신호를 측정하였다. 본 연구에서는 균열위치 근방의 임의 위치에 PZT 패치를 부착하여 실험을 진행하였는데, 실 구조물 적용 시에는 구조물에 대한 정밀해석, 균열사례조사, 응력집중부 해석 등을 통하여 균열발생 예상 위치를 파악한 후, 근방에 PZT 패치를 부착하여 균열탐지 수행이 가능할 것으로 판단된다.

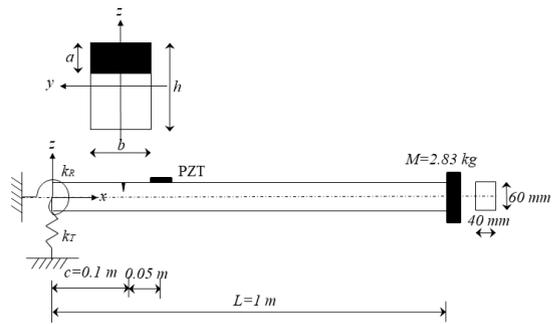


Fig. 3. Example solid rectangular aluminum beam

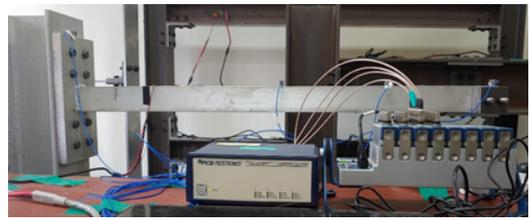


Fig. 4. Experimental setup

Fig. 4에 보인 바와 같이 실험체 고정부는 8개의 고정력볼트를 이용하여 H형강(150×150×7×10)에 연결하였으며, H형강 하부는 견고한 기초 블록에 연결하였다. 또한, 집중질량을 추가하기 위하여 Fig. 4에서와 같이 강판을 자유단에 볼트로 연결하여, 2.83 kg의 집중질량을 추가하였다.

한편, 건전보에 대한 해석모델을 개선하기 위하여 자유진동실험을 수행하였는데, 가속도계(PCB Piezotronics: 333B40 및 482C05) 4개(Acc 1 - Acc 4)를 고정부, 고정부에서 0.5 m, 고정부에서 0.75 m 및 자유단에 설치하였다.

균열크기 a 를 단계적으로 깊이 발생시키면서 실험을 수행하였으며, Fig. 5에 발생시킨 손상의 예를 나타내었다. 건전상태와 각 손상단계별로 임피던스 분석기(Keysight: E4990A)를 이용하여 임피던스 실험을 수행하였으며, 8단계의 손상경우를 Table 1에 정리하였다.

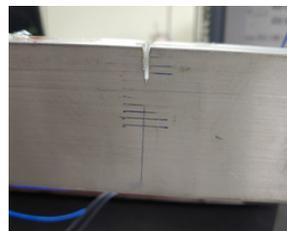


Fig. 5. Inflicted crack ($a/h=0.206$)

Table 1. Damage scenario

Case	Crack size, a/h	Crack location, c/L
1	0.050	0.1
2	0.100	
3	0.159	
4	0.206	
5	0.275	
6	0.300	
7	0.350	
8	0.396	

4. 기저모델 개선

건전보에 대한 자유진동실험 결과로 추정된 고유주파수를 Table 2에 정리하였으며, 이를 고정부를 병진 및 회전 스프링이 없는 고정단으로 처리하고, 자유단에 집중 질량 2.83 kg을 부가한 경우의 해석결과와 비교하였다. 이때, 본 연구의 2.1절 내용을 이용하여 계산한 결과와 동일 조건에서 범용 유한요소해석 프로그램(Midas Gen)을 이용하여 구한 결과를 Table 2에서 비교하였는데, 두 결과가 잘 일치함을 알 수 있다.

그러나, 실험결과와 위 결과는 차이가 있음을 알 수 있는데, 이는 고정부 지지조건의 차이 때문인 것으로 판단하였다. 즉, 고장력볼트를 이용하여 실험체를 체결하였는데, 이러한 지지조건이 완전한 고정효과를 나타내지 못하고 일정부분 병진 및 회전 스프링 효과가 있는 것으로 판단하였다. 따라서 병진 및 회전 스프링상수를 초기 가정하였는데, 고장력볼트 체결이며 휨 거동이 지배하므로 병진 스프링상수를 회전 스프링상수보다 크게 가정한 후 시행착오방법(trial and error)으로 초기치를 결정하였다. 즉, 초기 병진 스프링상수(k_T^i)를 $200 \times 12EI/L^3$ ($=1.210E+8$ N/m)로, 초기 회전 스프링상수(k_R^i)를 $80 \times 4EI/L$ ($=1.613E+7$ Nm)로 설정한 후, Eq. (2) 및 (8)을 이용하여 산정된 고유주파수를 Table 2에 비교하였다.

이후, 2차까지의 고유주파수를 입력으로, k_T 와 k_R 을 출력으로 하는 신경망기법을 적용하여, 실험결과와 대응되는 k_T 와 k_R 을 결정하였다. 즉, $k_T = 10.146 k_T^i$ 로, $k_R = 1.626 k_R^i$ 로 개선한 후 역시 Eq. (2) 및 (8)을 이용하여 계산된 고유주파수를 Table 2에 비교하였는데, 개

선된 k_T 와 k_R 이 적용된 고유주파수와 실험결과가 잘 일치함을 알 수 있다. Table 2에서 오차는 실험결과에 대한 평균절대오차이다. 따라서, 이후 수행되는 임피던스 신호와의 비교 과정에서 개선된 k_T 와 k_R 을 적용하였다.

Table 2. Natural frequencies of the specimen (Unit: Hz)

Mode no.	1	2	Error (%)	
Experiment	26.856	234.375	-	
Calculated	w/o spring	29.587	239.162	6.106
	w/ tip mass	29.530	238.913	5.947
Calculated w/ spring (initial) $k_T^i = 200 \times 12EI/L^3$ $k_R^i = 80 \times 4EI/L$	26.791	230.080	1.037	
Calculated w/ spring (updated) $k_T = 10.146 k_T^i$ $k_R = 1.626 k_R^i$	26.864	233.484	0.205	

5. 임피던스 신호를 이용한 결함탐지

구조물 결함탐지를 위하여 일반적으로 30~400 kHz의 사이의 주파수 대역에서 임피던스 분석기를 이용하여 PZT 패치에 교류 전압을 인가한다[11]. 피크가 나타나는 주파수대역을 우선 결정하기 위하여, 임피던스 분석기를 이용하여 30~400 kHz의 광대역 주파수 범위에서 스위핑 하면서 Fig. 3의 PZT 패치에 정현파의 전압을 인가하면서 동시에 임피던스를 측정하였다. 건전상태에 대하여 실험을 수행하였으며, 측정된 임피던스의 실수부를 Fig. 6에 나타내었다.

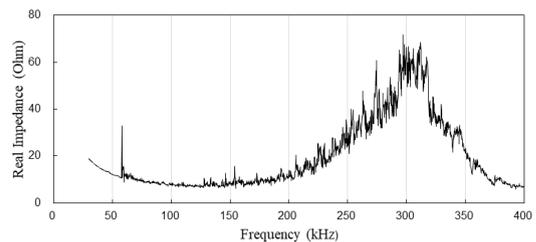


Fig. 6. Real Impedance for 30~400 kHz

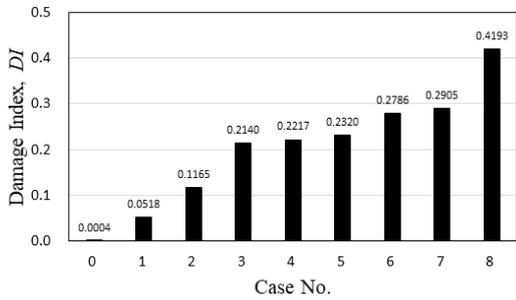


Fig. 7. Damage Index, *DI*

Fig. 6으로부터, 대상 주파수대역을 290~310 kHz 대역으로 결정한 후, 이 주파수 범위에서 스위핑 하면서 동일한 실험을 건전상태 및 8가지 손상상태에 대하여 수행하였다. 측정된 임피던스를 이용하여 Eq. (35)의 손상지수를 구하였으며, 이를 Fig. 7에 나타내었는데, 균열크기가 증가할수록 *DI*가 증가함을 알 수 있다. Fig. 7의 x축의 0에 대한 값은 2개의 건전상태 임피던스 신호 간 손상지수를 나타낸다.

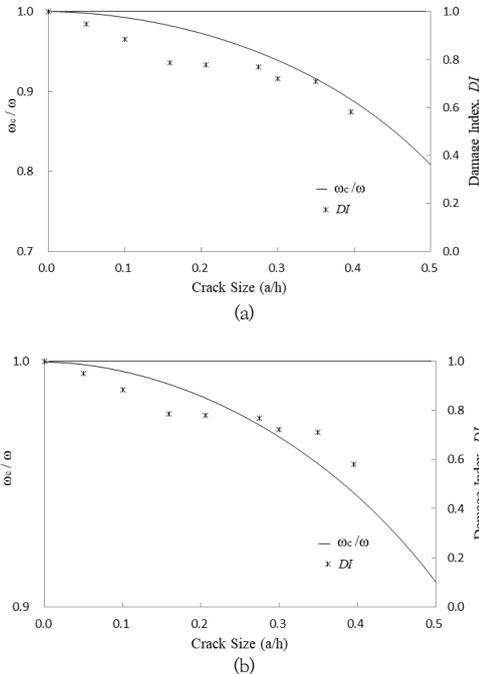


Fig. 8. Variation of natural frequency and *DI*
(a) First mode (b) Second mode

균열발생 및 진전에 의한 임피던스 손상지수와 균열보 고유주파수의 상관성을 살펴보기 위하여, 균열발생 위치에서 균열크기 변화에 따른 고유주파수의 변화를 Eq.

(34)를 이용하여 산정하고, 이를 *DI*의 변화와 Fig. 8에 비교하였다. 비교의 편의를 위하여 고유주파수는 손상전 후 비율인 ω_c/ω_0 로, 임피던스 손상지수는 $1 - DI$ 로 비교하였다. 즉, 균열발생 및 진전으로 인하여 균열위치에서의 고유주파수가 감소할수록 손상지수의 변화량이 증가함을 알 수 있다.

한편, 해당 균열위치에서 8가지 손상경우에 대하여 해석을 통하여 구한 고유주파수와 손상지수를 비교하여 Table 3에 정리하였다. 1차 고유주파수의 손상전후 비율 ω_c/ω_0 와 $1 - DI$ 간의 상관계수는 0.924, 2차 고유주파수의 손상전후 비율 ω_c/ω_0 와 $1 - DI$ 간의 상관계수는 0.928로써, Eq. (34)를 이용한 균열보의 고유주파수는 임피던스 손상지수 밀접한 상관관계를 가지는 것으로 판단된다.

Table 3. Natural frequency and damage index

Case	Crack size, a/h	ω_c/ω_0 (1st mode)	ω_c/ω_0 (2nd mode)	$1 - DI$
1	0.050	0.99803	0.99862	0.94821
2	0.100	0.99267	0.99588	0.88350
3	0.159	0.98247	0.99066	0.78598
4	0.206	0.97115	0.98496	0.77830
5	0.275	0.94889	0.97400	0.76805
6	0.300	0.93899	0.96922	0.72138
7	0.350	0.91580	0.95825	0.70955
8	0.396	0.88974	0.94627	0.58074

실험 수행 시 인위적으로 발생시킨 균열은 이론적인 균열과 차이가 있고, 구조물의 역학적 임피던스는 강성이외 감쇠특성, 국부질량, 경계조건 등 다양한 구조특성의 영향을 받는 것으로 알려져 있으므로, Table 3에서 해석치와 실험결과의 균열에 의한 변화량이 정확하게 일치되지 않을 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 균열보의 고유주파수 해석에 적용된 Eq. (33)의 등가휨강성 분포의 정확성은 향후 해당 단면 및 재질에 대한 실험을 통하여 향상될 수 있을 것으로 판단되며, 이를 통하여 보다 정확한 고유주파수 산정이 가능할 것으로 사료된다. 그러나, 균열에 의한 임피던스 신호의 변화와 해석에 의한 고유주파수의 상관관계를 규명하는 것이 본 연구의 목적이며, 이러한 상관관계가 일정 부분 규명된 것에 의미가 있는 것으로 사료된다. 이를 이용하여 향후 임피던스 신호 측정을 통한 보다 정확한 구조특성 평가가 가능하고, 구조물의 거동 예측이 가능할 것으로 판단된다.

6. 결론

본 연구에서는 지지단이 탄성지지 되어있어 있고 자유단에 집중질량을 갖는 캔틸레버형 보의 효과적인 균열탐지를 위하여, 균열보의 고유주파수를 산정할 수 있는 해석모형을 수립하였으며, 건전보에 대한 해석모형을 자유진동실험 결과를 이용하여 개선하였다. 이후, PZT 패치를 이용하여 균열발생 및 진전에 따른 임피던스 신호의 손상지수를 구한 후 그 결과를 개선된 해석모형을 기반으로 산정한 균열보의 고유주파수와 비교함으로써 고유주파수와 임피던스 신호와의 상관관계를 규명하였다.

중실 직사각형 단면을 가지는 균열보에 대한 등가휨강성과 탄성지지 및 말단질량에 따른 경계조건을 이용하여 고유주파수를 구할 수 있는 특성방정식을 유도하였다. 이후, 건전보에 대한 자유진동실험 결과를 이용하여 탄성지부의 병진 및 회전 스프링상수를 개선하였는데, 실험과 해석에 의한 고유주파수가 잘 일치함을 확인하였다. 캔틸레버형 보에 대한 8단계의 손상실험을 수행하였으며, 각각의 경우에 임피던스 신호를 측정하여 제곱평균제곱근 편차를 이용한 손상지수를 구하였다. 또한, 각 손상실험 단계의 균열위치 및 균열크기에 대한 고유주파수를 해석모형을 이용하여 구하였으며 이를 임피던스 실험결과와 비교하였는데, 임피던스 손상지수와 해석적으로 구한 고유주파수가 밀접한 상관관계를 가지는 것으로 판단되었다. 구조물 건전성 모니터링을 위한 균열탐지기법에서, 균열보의 해석결과와 임피던스 신호의 상관성을 활용하면 손상추정의 결과로부터 구조물의 현재 상태에 대한 구조특성을 보다 정확히 평가할 수 있고, 해석모형을 이용하여 구조물의 거동을 효과적으로 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

향후, 환경변화에 따른 임피던스 신호의 재현성 관련 연구, 균열위치와 PZT 패치 부착위치에 따른 임피던스 신호 특성, 균열보 등가휨강성 분포의 정확성 개선 등에 대한 추가연구가 수반되면 연구결과의 실용성이 제고될 수 있을 것으로 판단된다.

References

[1] D. S. Rabelo, R. J. Hobeck, D. J. Inman, R. M. F. Neto, and V. Steffen Jr, "Real-time structural health monitoring of fatigue crack on aluminum beam using impedance-based portable device", *Journal of Intelligent Systems and Structures*, Vol. 28, No. 20,

pp.3152-3162, 2017.

DOI: <https://dx.doi.org/10.1177/1045389X17705213>

[2] C. Zuo, X. Feng, Y. Zhang, L. Lu, and J. Zhou, "Crack detection in pipelines using multiple electromechanical impedance sensors", *Smart Materials and Structures*, Vol. 26, 104004, 2017.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1361-665X/aa7ef3>

[3] M. S. Kang, H. Lee, H. J. Yim, Y. K. An, and D. J. Kim, "Multi-channel electrical impedance-based crack localization of fiber-reinforced cementitious composites under bending conditions", *Applied Sciences*, Vol. 8, 2582, 2018.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/app8122582>

[4] A. Narayanan and K.V.L. Subramaniam, "Experimental evaluation of load-induced damage in concrete from distributed microcracks to localized cracking on electro-mechanical impedance response of bonded PZT", *Construction and Building Materials*, Vol. 105, pp.536-544, 2016.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.148>

[5] R. Tawie, H. B. Park, J. Baek, and W. S. Na, "Damage detection performance of the electromechanical impedance (EMI) technique with various attachment methods on glass fibre composite plates" *Sensors*, Vol. 19, 1000, 2019.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/s19051000>

[6] P. Liu, W. Wanga, Y. Chen, X. Feng, and L. Miao, "Concrete damage diagnosis using electromechanical impedance technique", *Construction and Building Materials*, Vol. 136, pp.450-455, 2017.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.173>

[7] W. Yan and W. Q. Chen, "Structural health monitoring using high-frequency electromechanical impedance signatures", *Advances in Civil Engineering*, Vol. 2010, 429148, 2010.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1155/2010/429148>

[8] J. T. Kim, J. H. Park, D. S. Hong, and D. D. Ho, "Hybrid acceleration-impedance sensor nodes on Imote2-platform for damage monitoring in steel girder connections", *Smart Structures and Systems*, Vol. 7, pp.393-416, 2011.
DOI: <http://dx.doi.org/10.12989/sss.2011.7.5.393>

[9] T. C. Nguyen, T. C. Huynh, J. H. Yi, and J. T. Kim, "Hybrid bolt-loosening detection in wind turbine tower structures by vibration and impedance responses", *Wind and Structures*, Vol. 24, pp.385-403, 2017.
DOI: <http://dx.doi.org/10.12989/was.2017.24.4.385>

[10] X. F. Yang, A. S. J. Swamidass, and R. Seshadri, "Crack identification in vibrating beams using the energy method", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 244, pp.339-357, 2001.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1006/jsvi.2000.3498>

[11] S. Bhalla, A. Gupta, S. Bansal, and T. Garg, "Ultra low-cost adaptations of electro-mechanical impedance technique for structural health

monitoring", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 20. pp.991-999, 2009
DOI: <http://dx.doi.org/10.1177/1045389X08100384>

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