

변단면 캔틸레버형 보의 고유진동수 추정 및 기저모델 개선

이종원
남서울대학교 건축공학과

Natural Frequency Estimation and Baseline Model Updating for Non-Uniform Cantilever-Type Beams

Jong-Won Lee
Department of Architectural Engineering, Namseoul University

요약 원형강관 형태의 구조부재는 여러 시설물에 광범위하게 이용되고 있는데, 말단질량을 갖고 탄성지지되는 변단면 캔틸레버형 보의 형태가 많다. 이러한 구조물의 건전성 모니터링을 위하여 진동기반 결함탐지방법이 일반적으로 사용되는데, 이를 위해서는 건전상태 구조물의 모드특성을 해석적으로 구할 수 있는 기저모델의 개선이 요구된다. 본 연구에서는 자유단에 말단질량을 가지고 지지부에서 탄성지지 되며, 단면특성이 계단식으로 변화하는 캔틸레버형 보의 구조물 건전성 모니터링을 위한 기저모델개선기법을 제안한다. 이를 위하여 변단면 보에 대한 미분방정식의 일반해에 말단질량 및 탄성지지의 경계조건과 단면 변화부에서의 연속조건을 적용하여 고유진동수 추정기법을 연구한다. 이후, 제안된 고유진동수 추정기법과 신경망기법을 적용하여 실험체에 대한 기저모델 개선을 수행한다. 탄성지지부의 병진 및 회전 스프링 상수를 조정함으로써 기저모델을 개선하였는데, 개선된 기저모델로부터 산정한 고유진동수와 실험결과로부터 추정된 결과가 잘 일치함을 확인하였다. 따라서 제안된 기법을 이용하여, 말단질량을 갖는 탄성지지 변단면 캔틸레버형 보에 대한 기저모델을 개선하고, 이를 활용하여 효과적인 구조물 건전성 모니터링 및 결함탐지가 가능할 것으로 판단된다.

Abstract Structural members in the form of steel pipe are used widely in major facilities. In numerous cases, they are restrained non-uniform cantilever-type beams with a tip mass. Vibration-based damage detection methods elastically are generally used for the health monitoring of those structures. For this, it is important to update the baseline model that can analytically estimate the modal characteristics of the structure in a healthy state. In this study, a baseline model updating method for monitoring the health of a cantilever-type beam that has step changes in the properties of its cross-section and a tip mass and spring support is proposed. To this end, a natural frequency estimation technique was studied by applying the boundary conditions at the tip mass and the elastically restrained support and the continuity conditions at the section change part to the general solution of the differential equation for the non-uniform beam. The proposed natural frequency estimation technique and neural network technique were applied to update the baseline model for a specimen. The baseline model was updated by improving the translational and rotational spring constants at the elastically restrained support. The natural frequencies calculated from the updated baseline model and the experimental results were in good agreement. Therefore, using the proposed technique, the baseline model for the elastically restrained non-uniform cantilever-type beam with a tip mass could be updated and utilized effectively for structural health monitoring and damage detection.

Keywords : Non-Uniform, Baseline Model Updating, Natural Frequency, Cantilever-Type Beam, Step Change

이 논문은 2020년도 남서울대학교 학술연구비 지원에 의해 연구되었음.

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

email: jwlee@nsu.ac.kr

Received April 28, 2021

Accepted August 5, 2021

Revised June 1, 2021

Published August 31, 2021

1. 서론

원형강관 형태의 구조부재는 해상풍력발전기, 건축구조물, 플랜트 등 여러 시설물에 광범위하게 이용되고 있는데, 길이 방향으로 구조특성이 변화하는 보의 형태가 많다. 또한, 구조물의 한쪽 단에 중량물이 설치되어 자유단에 말단질량을 갖고, 반대쪽 단이 지반에 의하여 탄성지지 되는 캔틸레버 보의 형태와 유사한 경우가 많다. 이러한 구조물의 중요성이 증가할수록 구조안전성 확보를 위한 모니터링 및 손상탐지 관련 기술개발이 요구되고 있는데, 진동기반 모니터링 및 결합탐지기법을 활용하면 구조물의 사용 중 예측되는 진동 데이터를 이용하여 구조물의 현 상태를 평가하고 손상을 판정할 수 있다. 진동기반 결합탐지기법은 일반적으로 결합으로 인한 구조물의 고유진동수 등의 변화를 이용하며, 모델기반 기법을 적용하여 손상위치와 정도를 추정하기 위해서는 우선 건전상태 구조물의 모드특성을 해석적으로 구할 수 있는 기저모델(Baseline Model)의 개선(Updating)이 요구된다. 즉, 지지조건과 말단질량 등을 고려한 변단면 보의 진동특성을 해석적으로 추정할 수 있는 기법의 개발이 필요하다.

변단면 보의 자유진동에 대한 일반해는 문헌[1]에서 제시되었으며, 이후 다양한 조건에 대한 변단면 보의 진동과 관련된 연구결과가 제안되었다. 즉, Chen과 Wu는 강성 및 질량 시스템을 가지는 변단면 캔틸레버형 보의 고유진동수 및 모드형상을 구할 수 있는 정확해를 제안하였는데[2], 인접 보 사이의 변형 적합조건 및 힘의 평형조건을 고려하여 운동방정식을 수립하였다. Ece 등은 지수함수로 단면의 폭이 변화하는 보의 진동 관련 연구를 수행하였는데[3], 상미분방정식으로 보의 지배 방정식을 유도하고, 오일러-베르누이 보 이론을 활용하여 경계조건에 대한 보의 모드특성을 구하였다. 또한, Rosa 등은 변단면 보의 한쪽 단에 말단질량을 갖고 반대쪽 단이 탄성지지 되며, 임의의 위치에 대시포트가 존재하는 오일러-베르누이 보의 고유진동수를 추정할 수 있는 연구를 진행하였는데[4], 탄성지지부를 병진 변위와 회전을 고려할 수 있는 요소로 모델링하였다. Zhao 등은 길이방향으로 특성이 변화하는 변단면 오일러-베르누이 보와 티모센코 보의 자유진동 해석을 위하여 체비쇼프 다항식 이론 기반 기법을 제안하였는데[5], 단면적, 관성모멘트, 질량, 영계수 등의 특성치를 가중함수로 처리하였다. 한편, Cao 등은 경계조건이 다른 변단면 및 비균질 보의 자유진동해석을 위한 단순해를 구하기 위하여 점근 섭동 방

법을 적용하였는데[6], 오일러-베르누이 보 이론을 기반으로 보의 선형 지배방정식을 구하였고, 보의 고유진동수 점근 해를 유도하기 위하여 섭동 이론이 사용하였다. Ling 등은 탄성힌지 구조물의 자유진동해석을 위하여 변단면 보에 대한 동적강성행렬을 유도하였는데[7], 재귀적분을 이용하여 일반 변단면 티모센코 보의 진동해를 구한 후 변분 원리를 기반으로 보의 동적강성행렬을 유도하였다. 또한, Cao와 Gao는 지배방정식이 미분방정식인, 길이방향으로 특성이 변화하는 변단면 보의 자유진동 해석을 위하여 점근 발달법을 이용하였는데[8], 경계조건이 다른 변단면 보의 고유진동수 근사해를 구하기 위하여 섭동 이론을 적용하였다. Nikolic과 Salinic는 3차원 변단면 오일러-베르누이 보와 티모센코 보의 자유진동 해석을 위하여 강체 세그먼트 방법을 이용하였는데[9], 탄성 보를 6 자유도 탄성 조인트로 연결되는 3개의 강체 세그먼트로 분할하였다.

기존 연구에서는 단면특성이 함수형태로 변화하는 변단면 보의 진동특성 추정기법이 주로 연구된 것으로 판단된다. 본 연구의 목적은 해상풍력발전기의 모노파일 형식 지지구조물과 같이, 단면특성이 계단식으로 변화하고, 자유단에 말단질량을 가지며 지지부에서 탄성지지 되는 캔틸레버형 보의 기저모델을 개선하기 위한 고유진동수 추정기법 기초연구이다. 이를 위하여 변단면 보에 대한 미분방정식의 일반해에 경계조건을 적용하여 고유진동수를 구한 후 이를 예제 보에 적용하여 검증한다. 이후, 구조물 건전성 모니터링을 위한 기저모델을 개선하기 위하여 실험연구를 수행하는데, 제안된 고유진동수 추정기법과 신경망기법을 적용하여 탄성지지부의 병진 스프링상수와 회전 스프링상수를 조정함으로써 기저모델을 개선한다. 한편, 본 연구에서 제안되는 방법으로 기저모델을 개선한다면, 다양한 손상경우에 대한 모델링을 기저모델에 적용하여 시뮬레이션을 수행하고, 이를 해당 구조물에 대한 거동 측정결과와 비교 분석하여 효과적인 건전성 모니터링이 가능할 것으로 판단된다.

2. 말단질량을 갖는 탄성지지 변단면 캔틸레버형 보의 고유진동수

본 연구에서는 Fig. 1에 보인 바와 같이 단면변화부에 서 탄성계수, 관성모멘트, 단면적, 단위체적당 질량이 계단식으로 변화함에 따라 휨강성 및 휨강도가 급격히 변

화하는 캔틸레버형 보의 고유진동수 추정기법을 연구한다. 문헌[1]에서, Fig. 1과 같이 단면특성이 계단식으로 변화하는 보의 일반해를 2개의 세그먼트로 분리하여 Eq. (1) 및 (2)로 구할 수 있다. μ 는 지지부에 연결되는 세그먼트 길이이고 γ 는 말단질량을 갖는 세그먼트 길이이며 $\mu + \gamma = 1$ 이다.

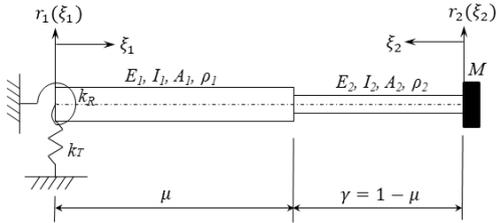


Fig. 1. Cantilever-type non-uniform beam with a tip mass and spring support

$$r_1(\xi_1) = A_1 \sin \beta_1 \xi_1 + B_1 \cos \beta_1 \xi_1 + C_1 \sinh \beta_1 \xi_1 + D_1 \cosh \beta_1 \xi_1 \quad (1)$$

$$r_2(\xi_2) = A_2 \sin \beta_2 \xi_2 + B_2 \cos \beta_2 \xi_2 + C_2 \sinh \beta_2 \xi_2 + D_2 \cosh \beta_2 \xi_2 \quad (2)$$

where,

$$\beta_1^4 = \frac{\rho_1 A_1}{E_1 I_1} \omega^2 L^4 \quad (3)$$

$$\beta_2^4 = \frac{\rho_2 A_2}{E_2 I_2} \omega^2 L^4 \quad (4)$$

$$\phi = \left(\frac{\rho_2 A_2}{\rho_1 A_1} \right)^{1/4} \quad (5)$$

$$\alpha = \left(\frac{E_2 I_2}{E_1 I_1} \right)^{1/4} \quad (6)$$

$$\theta = \frac{\phi}{\alpha} = \frac{\beta_2}{\beta_1} \quad (7)$$

where, $r(\xi)$ is transverse displacement, E is Young's modulus, I denotes area moment of inertia, A denotes cross sectional area, ρ is mass density, ω is natural circular frequency, and L denotes total beam length.

Fig. 1에 나타낸 바와 같이 지지부에 병진 스프링상수 (k_T)와 회전 스프링상수(k_R)를 갖는 탄성스프링으로 지지된 캔틸레버형 보의 경계조건은 Eq. (8) 및 (9)와 같고, 말단질량(M)을 가지는 자유단에서의 경계조건은 Eq. (10) 및 (11)과 같다. 이때 말단질량의 회전강성 효과는

무시한다.

$$\frac{d^2 r_1(\xi_1)}{d\xi_1^2} \Big|_{\xi_1=0} = \frac{k_R L}{E_1 I_1} \frac{dr_1(\xi_1)}{d\xi_1} \Big|_{\xi_1=0} \quad (8)$$

$$\frac{d^3 r_1(\xi_1)}{d\xi_1^3} \Big|_{\xi_1=0} = -\frac{k_T L^3}{E_1 I_1} r_1(\xi_1) \Big|_{\xi_1=0} \quad (9)$$

$$\frac{d^2 r_2(\xi_2)}{d\xi_2^2} \Big|_{\xi_2=0} = 0 \quad (10)$$

$$\frac{d^3 r_2(\xi_2)}{d\xi_2^3} \Big|_{\xi_2=0} = \frac{M}{\rho_2 A_2 L} \theta^4 \beta_1^4 r_2(\xi_2) \Big|_{\xi_2=0} \quad (11)$$

단면 변화부($\xi_1 = \mu, \xi_2 = \gamma$)에서의 변위, 회전각, 휨 모멘트 및 전단력의 연속조건을 적용하면 Eq. (12) ~ (15)와 같은 경계조건을 이용할 수 있다.

$$r_1(\mu) = r_2(\gamma) \quad (12)$$

$$\frac{dr_1(\xi_1)}{d\xi_1} \Big|_{\xi_1=\mu} = \frac{dr_2(\xi_2)}{d\xi_2} \Big|_{\xi_2=\gamma} \quad (13)$$

$$\frac{d^2 r_1(\xi_1)}{d\xi_1^2} \Big|_{\xi_1=\mu} = \alpha^4 \frac{d^2 r_2(\xi_2)}{d\xi_2^2} \Big|_{\xi_2=\gamma} \quad (14)$$

$$\frac{d^3 r_1(\xi_1)}{d\xi_1^3} \Big|_{\xi_1=\mu} = -\alpha^4 \frac{d^3 r_2(\xi_2)}{d\xi_2^3} \Big|_{\xi_2=\gamma} \quad (15)$$

Eq. (8) ~ (15)의 8개 경계조건을 Eq. (1) 및 (2)에 적용하면 상수 $A_1, B_1, C_1, D_1, A_2, B_2, C_2, D_2$ 에 대한 연립방정식이 유도될 수 있고, Eq. (16)과 같이 행렬식이 영이 될 때 자명하지 않은 해를 가질 수 있다.

$$\begin{vmatrix} E_{11} & \beta_1 & E_{13} & -\beta_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \beta_1^3 & E_{22} & -\beta_1^3 & E_{24} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & E_{46} & -1 & E_{48} \\ E_{51} & E_{52} & E_{53} & E_{54} & E_{55} & E_{56} & E_{57} & E_{58} \\ E_{61} & E_{62} & E_{63} & E_{64} & E_{65} & E_{66} & E_{67} & E_{68} \\ E_{71} & E_{72} & E_{73} & E_{74} & E_{75} & E_{76} & E_{77} & E_{78} \\ E_{81} & E_{82} & E_{83} & E_{84} & E_{85} & E_{86} & E_{87} & E_{88} \end{vmatrix} = 0 \quad (16)$$

Eq. (16)의 요소들(E_{nm})은 8개 경계조건을 적용한 연립방정식 유도과정에서 구할 수 있으며, Eq. (16)을 만족하는 β_1 을 구한 후 이를 Eq. (3)에 대입하면 고유진동수를 구할 수 있다.

단, 변단면 부재는 강구조물일 경우 용접접합 방법으로 제작할 수 있으며, 용접접합을 통하여 강성 및 강도의 변화가 있을 수 있는 것으로 판단된다. 이는 향후 기법의 실적용을 위한 추가연구에서 고려되어야 할 것으로 사료되며, 본 연구에서는 이상적 접합을 가정하여 연구를 진행한다.

3. 예제 보의 고유진동수 추정

Fig. 2에 보인 바와 같이 외측반경이 200 mm이고 두께가 각각 20 mm와 10 mm이며 전체길이가 5 m인 변단면 원형강관 캔틸레버형 보의 고유진동수를 Eq. (3) 및 (16)을 이용하여 구하였다. 2개 세그먼트의 $E=2.1E+11$ Pa, $\rho=7,850$ kg/m³로 동일하게 설정하였으며, $\mu=0.4$, $\gamma=0.6$ 이다. 이때 k_T 는 $12E_1I_1/L_1^3(=1.461E+7$ N/m)로, k_R 은 $4E_1I_1/L_1(=1.948E+7$ Nm)로 가정하였고, 말단질량 M 은 100 kg으로 설정하였다.

Fig. 2의 예제 보에 대하여, Eq. (3) 및 (16)을 이용하여 구한 고유진동수와 유한요소해석 프로그램을 이용한 결과를 Table 1에서 비교하여 검증하였는데, 지지부에 스프링이 없는 고정단 경우의 고유진동수 산정 결과도 함께 나타내었다. 유한요소해석 프로그램은 Midas Gen을 이용하였는데, 원형강관 단면을 가지는 보 요소로 모델링하였고, 지지부에 선형 포인트 스프링요소를 적용하여 병진 및 회전 스프링상수의 가정치를 입력한 후 고유치해석을 수행하여 고유진동수를 구하였다. 본 연구에서 Eq. (3) 및 (16)을 이용하여 산정된 고유진동수와 유한요소해석에 의한 결과가 거의 일치함을 알 수 있다. 여기서 약간의 오차는 반올림 오차로 판단된다. 본 연구에서 제안하는 고유진동수 추정기법을 이용하여 건전상태 구조물에 대한 기저 해석모델을 수립한다면, 추후 결함을 모델링하여 해석모델에 적용할 수 있고, 이를 이용하여 다양한 경우의 결함에 대한 구조응답을 수치적으로 시뮬레이션 할 수 있다. 이 결과를 사용 중 구조물에 대하여 측정되는 구조응답과 비교함으로써 유한요소법 보다 효율적으로 구조물의 상태를 판정하고 결함을 판정할 수 있을 것으로 판단된다. 한편, 예제 보의 모드형상을 Fig. 3에 나타내었는데, 지지부에서 병진 스프링으로 탄성지지되어 모달변위가 발생함을 알 수 있다. 즉, Fig. 3에서 좌측단 지지부의 횡방향 모달변위를 특히 3차와 4차 모드에서 확인할 수 있다.

이 장에서는 단면특성이 계단식으로 변화하고 말단질량을 갖는 탄성지지 캔틸레버형 보의 고유진동수를 Fig. 2의 예제 보에 대하여 추정할 수 있었다.

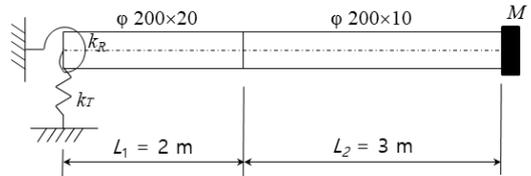


Fig. 2. Example beam

Table 1. Natural frequencies of example beam

(unit: Hz)

Mode no.		1	2	3	4
w/o springs	Calculated	5.794	39.106	112.118	232.512
	FEM	5.795	39.106	112.116	232.508
w/ springs	Calculated	5.033	29.229	69.536	138.105
	FEM	5.033	29.229	69.536	138.104

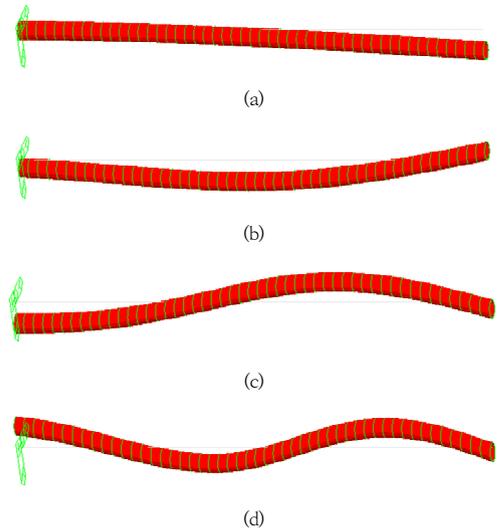


Fig. 3. Mode shapes of example beam

(a) 1st mode (b) 2nd mode (c) 3rd mode (d) 4th mode

4. 실험연구를 통한 기저모델 개선

제안된 기법을 검증하기 위하여 실험체를 제작하고 자유진동실험을 수행하였다. Fig. 4에 나타낸 바와 같이 외측반경이 139.8 mm이고 두께가 각각 6 mm와 3 mm

이며 전체길이가 1.46 m인 변단면 원형강관 캔틸레버형 보를 SS275의 강재로 제작하였다. 즉, 2개 세그먼트의 $E=2.1E+11$ Pa, $\rho=7,850$ kg/m³로 동일하며, $\mu=0.274$, $\gamma=0.726$ 이다. 외경은 동일하지만 두께가 다른 두 원형강관을 개선용접으로 접합하였는데, 앞에서 언급된 용접접합에 의한 강성 등의 변화는 없는 것으로 가정하였다. 한편, 전체적인 실험 셋업을 Fig. 5에 나타내었다.

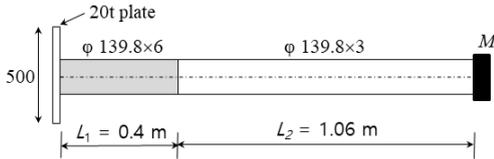


Fig. 4. Dimension of specimen

고장력볼트를 이용하여 Fig. 4의 좌측 20t 판을 기초 블록에 체결하였고, 기초 블록 부분은 일정한 고정효과가 구현되도록 실험실 바닥과 접촉시켰다. 이때 20t 판과 기초 블록의 접합부분이 완전한 고정효과를 구현하지 못하는 것으로 판단하여 병진 및 회전스프링에 의한 지지조건으로 고려하였다. 해석조건과 같이 구조물을 횡으로 설치하기 위해서는 실험실에 강성이 큰 벽체 또는 프레임이 설치되어야 하나, 실험실의 상황이 여의치 않아 종으로 설치하여 실험을 수행하였다. 한편, 자유단의 말단질량 M 은 5.65 kg으로 부가하였다.

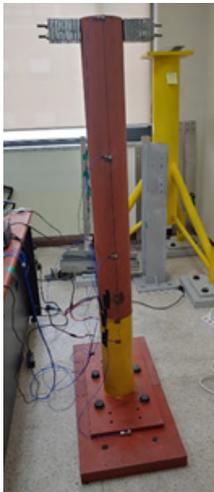


Fig. 5. Experimental setup

진전상태에 대한 해석모델 개선을 수행하기 위하여 자유진동실험을 수행하였는데, 모드식별을 위하여 가속도

계(PCB Piezotronics; 333B40 및 482C05) 4개를 지지부, 지지부에서 0.73 m, 지지부에서 1.095 m 위치 및 자유단에 설치하였다. 임팩트 해머를 이용한 충격을 통하여 자유진동을 가진 시켰는데, 자유단에 5회, 실험체 길이방향 중앙부에 5회, 총 10회의 자유진동실험을 수행하였으며, 데이터 취득속도는 5000 Hz로 설정하였다. 이때 자유단에 설치된 가속도계에 의하여 측정된 가속도의 자유진동 시간이력 예를 Fig. 6에 나타내었다. 10회의 자유진동실험을 수행한 후, 주파수 영역 분해기법을 이용하여 3차까지의 고유진동수를 추정하였다.

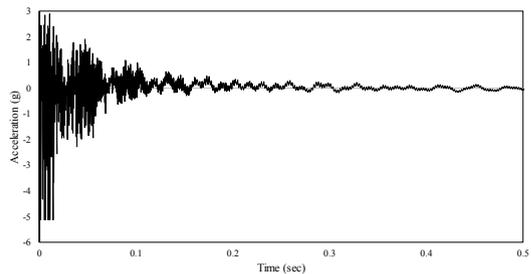


Fig. 6. Acceleration time history

자유진동실험 결과로부터 구한 고유진동수를 Table 2에 나타내었으며, 이를 지지부에 스프링이 없는 고정단 경우의 해석결과와 비교하였다. 두 결과가 차이가 있는데, 이는 앞에서 언급된 바와 같이, 실험체 하단의 지지조건이 완전한 고정효과를 구현하지 못하는 탄성지지 조건 때문인 것으로 판단하였다. 즉, 실험체의 제작도면에 의하여 수립되고 지지부를 고정단으로 처리한 최초 해석모델을 수립하였으나, 이 해석모델에 의한 고유진동수 산정결과가 실험결과와 차이를 보였다. 여기서, 지지부가 완전한 고정효과를 구현하지 못하는 것으로 판단하여 지지부의 병진 및 회전스프링 상수를 변수로 기저모델을 개선하였다. 즉, 지지부의 병진 및 회전스프링 효과가 구조부재 자체의 강성 및 강도에 비하여 불확실성이 큰 것으로 판단하여 변수로 설정하였다. 실제로 해상풍력발전기의 모노파일 형식 지지구조물과 같은 캔틸레버형 보의 경우 지지부가 지반에 의하여 탄성지지 되는 경우가 많고, 지반의 탄성지지 효과가 구조물 자체의 강성 및 강도에 비하여 불확실성이 큰 것으로 판단된다.

따라서 병진 및 회전 스프링상수를 초기 가정하였는데, 시행착오방법(Trial and Error Method)으로 초기치를 결정하였다. 즉, 병진 스프링상수의 초기치(k_1^0)를 $0.075 \times 12E_1I_1/L_1^3 (=1.670E+7$ N/m)로, 회전스프링상

수의 초기치(k_R^i)를 $0.075 \times 4E_1I_1/L_1 (=8.907E+5 \text{ Nm})$ 로 설정한 후, Eq. (3) 및 (16)을 이용하여 산정된 고유진동수를 Table 2에 함께 비교하였다.

이후 1, 2 및 3차 고유진동수를 입력으로, k_T 와 k_R 을 출력으로 신경망을 구성하여, 실험결과와 대응되는 k_T 와 k_R 을 구하였다. 즉, k_T^i 와 k_R^i 를 기준으로 일정한 범위 안에서 300셋의 k_T 와 k_R 을 무작위로 샘플링한 후, 이에 대하여 변화된 3차까지의 고유진동수를 Eq. (3) 및 (16)을 이용하여 구하였다. 즉, 각각의 훈련패턴은 3개의 변화된 고유진동수 및 이에 해당하는 k_T 와 k_R 로 구성되었다. 따라서 신경망 입력자료는 1, 2 및 3차 고유진동수 3개이고, 출력층은 k_T 와 k_R 2개이다. 한편, 각각 4개 및 3개 노드의 2개 은닉층을 구성하였다. 훈련패턴을 이용하여 신경망을 학습시킨 후, 실험결과로부터 구한 1, 2 및 3차 고유진동수를 신경망에 입력하여 $k_T = 0.807k_T^i$ 로, $k_R = 0.934k_R^i$ 로 개선하였다. 개선된 k_T 와 k_R 을 적용하고 Eq. (3) 및 (16)을 이용하여 산정된 고유진동수를 Table 2에 함께 비교하였는데, 실험결과로부터 구한 고유진동수와 잘 일치함을 확인할 수 있다.

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

Mode no.	1	2	3
Experiment	25.635	168.460	406.494
Calculated w/o springs	49.415	352.643	980.866
Calculated w/ springs (initial) $k_T^i = 0.075 \times 12E_1I_1/L_1^3$ $k_R^i = 0.075 \times 4E_1I_1/L_1$	26.294	178.249	421.721
Calculated w/ springs (updated) $k_T = 0.807k_T^i$ $k_R = 0.934k_R^i$	25.589	168.248	404.582

이 장에서는 실험연구를 통하여 고유진동수를 추정하고 기저모델을 개선하는 절차 및 방법을 제안하였다. 제안된 고유진동수 추정기법을 이용하여 기저모델을 개선한다면, 말단질량을 갖는 탄성지지 변단면 캔틸레버형 보에 대한 구조물 건전성 모니터링 및 결함탐지를 효과적으로 수행할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 자유단에 말단질량을 가지고 지지부에

서 탄성지지되며, 단면특성이 계단식으로 변화하는 캔틸레버형 보의 구조물 건전성 모니터링을 위한 고유진동수 추정기법 및 기저모델 개선기법을 제안하였다.

변단면 보에 대한 미분방정식의 일반해에 말단질량 및 탄성지지의 경계조건과 단면 변화부에서의 연속조건을 적용하여 고유진동수를 구한 후 이 결과를 유한요소해석 프로그램의 결과와 비교하여 검증하였다. 이후, 기저모델을 개선하기 위하여 실험연구를 수행하였는데, 제안된 고유진동수 추정기법과 신경망기법을 적용하였다. 탄성지지의 병진 스프링상수와 회전 스프링상수를 조정함으로써 기저모델을 개선하였는데, 개선된 기저모델로부터 산정한 고유진동수와 실험결과로부터 구한 고유진동수가 잘 일치함을 알 수 있었다. 따라서 제안된 기법을 이용하여, 말단질량을 갖는 탄성지지 변단면 캔틸레버형 보에 대한 기저모델을 개선하고, 이를 해상풍력발전기의 모노파일 형식 지지구조물과 같은 구조물에 활용하여 효과적인 건전성 모니터링 및 결함탐지가 가능할 것으로 판단된다.

향후 제안된 기저모델 개선기법을 기반으로, 고유진동수를 이용한 구조물의 결함위치 및 결함판정과 관련된 연구가 필요하며, 이를 위해서는 결함의 수치적 모델링 및 제안 기법과의 연동이 수반되어야 할 것으로 판단된다. 또한, 기법의 실적용을 위하여 변단면 부재의 접합에 따른 강도 및 강성의 변화, 중력 등 외력에 의한 영향 등을 고려한 추가연구가 필요한 것으로 판단된다.

References

- [1] D. J. Gorman, Free vibration analysis of beams and shafts, p.386, John Wiley & Sons, New York, 1975, pp. 289-291
- [2] D. W. Chen, J. S. Wu, "The exact solutions for the natural frequencies and mode shapes of non-uniform beams with multiple spring-mass systems". *Journal of Sound and Vibration*, Vol.255, pp.299-322, 2002. DOI: <http://dx.doi.org/10.1006/jsvi.2001.4156>
- [3] M. C. Ece, M. Aydogdu, and V. Taskin, "Vibration of a variable cross-section beam", *Mechanics Research Communications*, Vol.34, pp.78-84, 2007. DOI:<http://dx.doi.org/10.1016/j.mechrescom.2006.06.005>
- [4] M. A. D. Rosa, M. Lippiello, M. J. Maurizi, and H. D. Martin, "Free vibration of elastically restrained cantilever tapered beams with concentrated viscous damping and mass", *Mechanics Research Communications*, Vol.37, pp.261-264, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mechrescom.2009.11.006>

- [5] Y. Zhao, Y. Huang, and M. Guo, "A novel approach for free vibration of axially functionally graded beams with non-uniform cross-section based on Chebyshev polynomials theory", *Composite Structures*, Vol.168, pp.277-284, 2017.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.02.012>
- [6] D. Cao, Y. Gao, J. Wang, M. Yao, and W. Zhang, "Analytical analysis of free vibration of non-uniform and non-homogenous beams: Asymptotic perturbation approach", *Applied Mathematical Modelling*, Vol.65, pp.526-534, 2019.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apm.2018.08.026>
- [7] M. Ling, S. Chen, Q. Li, and G. Tian, G. "Dynamic stiffness matrix for free vibration analysis of flexure hinges based on non-uniform Timoshenko beam", *Journal of Sound and Vibration*, Vol.437, pp.40-52, 2018.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsv.2018.09.013>
- [8] D. Cao, Y. Gao, "Free vibration of non-uniform axially functionally graded beams using the asymptotic development method", *Applied Mathematics and Mechanics*, Vol.40, pp.85-96, 2019.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s10483-019-2402-9>
- [9] A. Nikolic, S. Salinic, "Free vibration analysis of 3D non-uniform beam: the rigid segment approach", *Engineering Structures*, Vol.222, 110796, 2020.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110796>

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