Trans. Korean Soc. Noise Vib. Eng., 25(11) : 764~770, 2015
http://dx.doi.org/10.5050/KSNVE.2015.25.11.764

한국소음진동공학회논문집 제 25 권 제 11 호, pp. 764~770, 2015
ISSN 1598-2785(Print), ISSN 2287-5476(Online)

말단질량을 갖는 원형강관 캔틸레버 보의 결함탐지기법

Fault Detection Method of Pipe-type Cantilever Beam with a Tip Mass

이 종 원†

Jong Won Lee

(Received September 22, 2015 ; Revised November 6, 2015 ; Accepted November 6, 2015)

Key Words : Crack Identification(균열추정), Tip Mass(말단질량), Natural Frequency(고유 주파수)

ABSTRACT

A crack identification method using an equivalent bending stiffness and natural frequency for cracked beam is presented. Modal properties of cantilever beam with a tip mass is identified by applying the boundary conditions to a general solution. An equivalent bending stiffness for cracked beam based on an energy method is used to identify natural frequencies of cantilever thin-walled pipe with a tip mass, which has a through-the-thickness crack, subjected to bending. The identified natural frequencies of the cracked beam are used in constructing training patterns of neural networks. Then crack location and size are identified using a committee of the neural networks. Crack detection was carried out for an example beam using the proposed method, and the identified crack locations and sizes agree reasonably well with the exact values.

1. 서 론

원형강관의 타워 형식 구조물은 건축구조물, 풍력발전기, 플랜트 등 주요 시설물에 널리 이용되고 있는데, 풍력발전기와 고정식 해양플랜트의 경우 구조물 상단에 위치하는 나셀 또는 탑사이드 등에는 상당한 중량물이 설치되기 때문에 자유단에 집중질량을 갖는 캔틸레버 보의 형태와 유사하다. 이러한 타워 구조물이 대형화되고 기능이 중요해질수록 구조적 안전성 확보를 위한 건전성 모니터링 및 결함탐지 기술개발이 요구되고 있다. 한편, 균열은 타워 구조물에서 가장 대표적인 손상형태 중 하나이며, 전통적인 비파괴검사 기법들은 구조물 전체에 대한 검사가 필요하고 때로는 해당 구조물이 속한 시스템의 운용을 중단할 필요가 있다. 그러나 진동기반 균열탐지기법은 시스템의 운용 중 계측되는 진동 데이터를 이용하여 균열의 위치나 크기를 판정할 수 있다.

진동기반 균열탐지기법은 일반적으로 균열로 인한 구조물의 모드특성 변화를 활용하며, 다양한 기법들이 여러 연구자들에 의하여 제안되고 있다. 이들 중 원형강관 구조물에 대한 균열탐지기법과 관련된 연구는 다음과 같다. 내부가 유체로 채워진 원형강관에서 균열이 발생한 단면을 등가의 회전강성을 갖는 힌지로 모델링하고 주파수를 계측하여 단일 균열을 탐지하는 연구가 수행되었으며[1], 레일리(Rayleigh) 보 요소를 수립하고 균열위치와 크기에 영향을 주는 3차까지의 고유 주파수를 근사화한 후, 계측된 고유 주파수와 유전자 알고리듬을 이용하여 파이프 균열의 위치와 크기를 판정하였다[2]. 응력확대계수와 유한요소법을 활용한 파이프

† Corresponding Author ; Member, Namseoul University
E-mail : jwlee@nsu.ac.kr

‡ Recommended by Editor Hyung-Jo Jung

ⓒ The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

균열탐지기법이 제안되었으며[3], 원형강관 구조물에 대하여 균열을 회전 스프링으로 모델링하고 고유 주파수의 변화와 스프링 강성의 변화를 이용하여 방향이 서로 다른 균열을 식별할 수 있는 기법이 연구되었다[4]. 또한, 유체를 포함하는 파이프 구조물에 대하여, 등가 회전스프링 강성을 적용하고 고유 주파수 변화를 기반으로 하여 복수 균열의 위치를 탐지할 수 있는 기법이 제안되었고[5], 횡방향 진동을 시뮬레이션하고 균열위치를 추정할 수 있는 스프링으로, 유체를 포함하는 파이프 구조물의 부분 관통균열을 모델링하여 축과 직각 방향의 균열을 판정하기 위한 연구가 수행되었다[6].

한편, 이 연구에서는 열린 균열이 존재하는 보의 에너지 균형 조건을 이용하여 균열보에 대한 등가휨강성을 구하고 이를 이용하여 균열 발생에 따른 고유 주파수를 산정하는데, 이에 대한 연구동향은 다음과 같다. 직사각형 단면의 양단 단순지지 및 고정지지 조건의 보에 대해 에너지 균형 조건식을 이용하여 등가휨강성을 구한 후 균열크기와 위치에 따른 고유 주파수의 변화를 연구하였고[7], 이를 직사각형 단면의 캔틸레버 보에 대하여 확장하여 균열크기와 위치에 따른 고유 주파수의 해를 제시하고 이를 실험을 통하여 검증하였다[8]. 또한, 에너지 균형 조건을 이용하여 원형강관 캔틸레버 균열보에 대한 등가휨강성을 유도하고 이를 이용하여 균열보의 모드특성을 구한 후 균열위치 및 크기를 추정할 수 있는 기법을 제안하였다[9].

이 연구에서는 선행연구[9]를 확장하여, 자유단에 집중질량을 가지고 휨을 받는 원형 강관구조물에 발생하는 관통균열의 위치 및 크기를 추정한다. 즉, 에너지 균형 조건식으로부터 유도된 균열보의 등가휨강성을 이용하여, 말단질량을 갖는 캔틸레버 원형 강관 균열보에 대한 고유 주파수 계산한다. 이를 이용하여 신경망의 훈련패턴을 생성한 후 군집 신경망기법을 적용하여 균열의 위치와 크기를 추정한다.

2. 말단질량을 갖는 캔틸레버 보의 모드특성

균일단면 보의 공간좌표 x와 시간 t에 대한 횡방향 운동방정식을 변수 분리하여, 공간좌표에서의 특성방정식을 구할 수 있다. 여기에 Fig. 1에 보인 바와

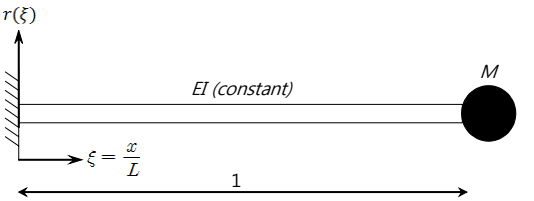

Fig. 1 Cantilever beam with a tip mass

같이 ξ를 원점으로부터 보의 임의 위치까지의 거리 x를 보 길이(L)로 나눈 값으로 설정하면, 식 (1)과 같이 특성방정식을 구할 수 있고, 이에 대한 일반해를 식 (2)와 같이 구할 수 있다[10].

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

$$r(\xi) = A\sin\beta\xi + B\cos\beta\xi + C\sinh\beta\xi + D\cosh\beta\xi \tag{2}$$

$$\beta^4 = \frac{\rho A \omega^2 L^4}{EI} \tag{3}$$

여기서, $r(\xi)$는 보의 횡방향 변위, E는 영계수, I는 단면이차모멘트, A는 단면적, ρ는 단위체적당 질량, ω는 고유 각주파수이다.

한편, Fig. 1에서 보인 바와 같이 자유단에 집중질량 M을 가지는 캔틸레버 보의 고정단($\xi = 0$)에서의 경계조건은 식 (4), 자유단($\xi = 1$)에서의 경계조건은 식 (5)와 같다. 이때 집중질량에 의한 회전관성 효과는 무시한다.

$$r(\xi) = \frac{dr(\xi)}{d\xi} = 0 \tag{4}$$

$$\frac{d^2 r(\xi)}{d\xi^2} = 0, \quad \frac{d^3 r(\xi)}{d\xi^3} = -\frac{M}{\rho A L}\beta^4 r(\xi) \tag{5}$$

위 경계조건을 식 (2)에 적용하면 상수 A, B, C, D에 대한 연립방정식이 유도되고, 자명하지 않은 해를 가지기 위해서는 다음과 같이 행렬식이 영이 되어야 한다.

$$\begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ \sin\beta & \cos\beta & -\sinh\beta & -\cosh\beta \\ E_{41} & E_{42} & E_{43} & E_{44} \end{vmatrix} = 0 \tag{6}$$

여기서,

$$E_{41} = \cos\beta - \frac{M}{\rho AL}\beta\sin\beta \quad (7)$$

$$E_{42} = -\sin\beta - \frac{M}{\rho AL}\beta\cos\beta \quad (8)$$

$$E_{43} = -\cosh\beta - \frac{M}{\rho AL}\beta\sinh\beta \quad (9)$$

$$E_{44} = -\sinh\beta - \frac{M}{\rho AL}\beta\cosh\beta \quad (10)$$

식 (6)을 만족하는 β를 구한 후 이를 식 (6)에 대한 연립방정식에 대입하여 상수 A, B, C, D를 구하면 다음 식과 같이 모드형상을 구할 수 있다.

$$r(\xi) = \sin\beta\xi - \sinh\beta\xi - \gamma(\cos\beta\xi - \cosh\beta\xi) \quad (11)$$

여기서,

$$\gamma = \frac{\sin\beta + \sinh\beta}{\cos\beta + \cosh\beta} \quad (12)$$

외측반경이 1 m이고 두께가 20 mm이며 길이가 20 m인 원형강관 캔틸레버 보의 고유 주파수를 식 (3) 및 (6)을 이용하여 구하였다. 이때 $E = 2.05\text{E}+11$ Pa, $\rho = 7850$ kg/m^3, 집중질량 $M = 18\,840$ kg으로 설정하였다. 동일 조건에서 범용 유한요소 해석 프로그램을 이용하여 구한 결과를 Table 1에서 비교하였으며, 집중질량이 없는 경우의 결과도 함께 나타내었다. 이 연구에서 계산된 고유 주파수 결과가 범용 유한요소 해석에 의한 결과와 잘 일치함을 알 수 있다. 한편, 식 (11)을 이용하여 4차까지의 모드형상을 구하였는데 각 모드형상의 euclidean norm으로 정규화(normalizing)하여 Fig. 2에 나타내었다.

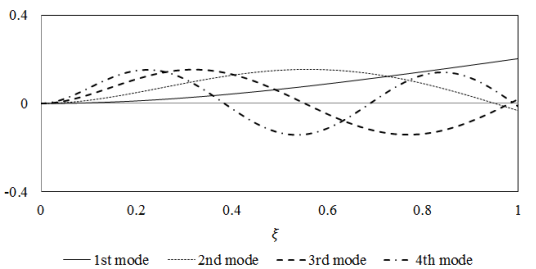

Fig. 2 Mode shape of an example beam

Table 1 Natural frequencies of an example beam

(unit: Hz)

Mode no.		1	2	3	4
w/o tip mass	Calculated	5.005	31.364	87.819	172.090
	FEM	5.005	31.336	87.825	172.102
w/ tip mass	Calculated	2.249	23.168	72.489	149.784
	FEM	2.249	23.170	72.494	149.795

3. 균열보의 등가휨강성 및 고유 주파수

휨을 받는 원형 강관구조물에 관통균열이 발생하였을 때, 에너지 균형 조건을 이용한 원형강관 균열보의 등가휨강성 유도 과정은 선행연구[9]에서 자세히 설명되어 있으므로 이를 참조할 수 있다. 즉, 균열보의 휨강성 EI_c를 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$EI_c(x) = \frac{EI}{1 + \dfrac{EIR(\theta,c)}{\left\{1 + \left(\dfrac{x-c}{k(\theta)\theta}\right)^2\right\}}} \quad \left(0 < \theta < \frac{\pi}{2}\right) \quad (13)$$

여기서, c는 고정단에서 균열위치까지의 거리이고 θ는 Fig. 3에서 나타낸 균열크기인데, Fig. 3에 보이는 좌표축은 Fig. 4를 참조할 수 있다. 즉, 균열보의 등가휨강성을 보 길이방향 좌표 x, 균열위치 c 및 균열크기 θ 등의 함수로 나타낼 수 있다. 한편, 식 (13)에서 $R(\theta,c)$와 $k(\theta)$는 각각 다음과 같다.

$$R(\theta,c) = \frac{2D(\theta)}{k(\theta)\theta\, j(\theta,c)} \quad (14)$$

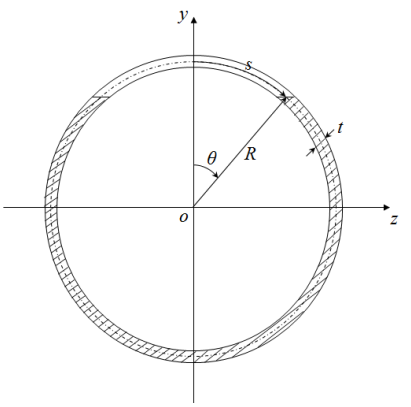

Fig. 3 Cross section of cracked beam

$$k(\theta)=\frac{2\sqrt{2}\,R(1-\nu^2)\,iG(\theta)}{\pi^2\varepsilon\theta}\left(\frac{I_c}{I-I_c}\right) \tag{15}$$

$$D(\theta)=\frac{\sqrt{2}(1-\nu^2)iG(\theta)}{\pi^2ER^2t\varepsilon} \tag{16}$$

$$j(\theta,c)=\arctan\left(\frac{L-c}{k(\theta)\theta}\right)+\arctan\left(\frac{c}{k(\theta)\theta}\right) \tag{17}$$

$$G(\theta)=\sin\theta\left[1+\frac{1}{2}\frac{\theta-\cot(1-\theta\cot\theta)}{2\cot\theta+\sqrt{2}\,\cot\left(\frac{\pi-\theta}{\sqrt{2}}\right)}\right] \tag{18}$$

$$iG(\theta)=\int_0^{\theta}G(\theta)^2d\theta \tag{19}$$

$$\varepsilon^2=\left(\frac{t}{R}\right)/\sqrt{12(1-\nu^2)} \tag{20}$$

여기서, $G(\theta)$는 파이프 단면의 열린 균열 면적에 대한 형상함수(configuration function), ν는 푸아송 비, R은 균열 단면에서 원형강관 외측 반경과 내측 반경의 평균, t는 원형강관의 두께, I_c는 균열 위치에서의 단면이차모멘트이다.

2장에서 대상으로 했던 보와 동일한 20 m 원형강관 캔틸레버 보에서, Fig. 4와 같이 균열위치(c/L)가

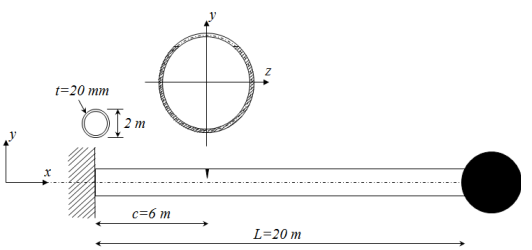

Fig. 4 Example cantilever beam with a tip mass

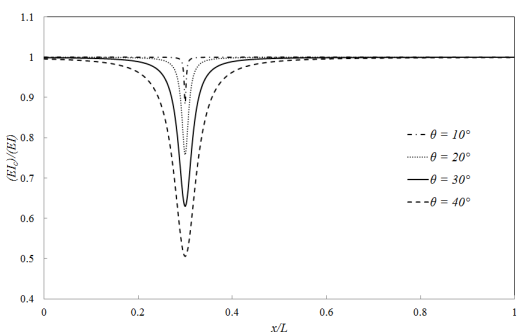

Fig. 5 Normalized equivalent bending stiffness

0.3일 때, 식 (13)을 이용하여 구한 균열보의 등가휨강성을 Fig. 5에 나타내었다. 즉, 보 길이에 따른 등가휨강성의 변화를 나타내었는데, 균열 발생 단면에서 휨강성이 급격히 감소하고 균열위치에서 멀어질수록 공칭휨강도에 가까워지는 현상을 보인다. 또한 균열크기가 커질수록 등가휨강성 감소 정도가 커지는 것을 알 수 있다.

한편, Galerkin 방법을 이용하여 균열보의 고유주파수를 구하였다. 균열 전후의 모드형상의 변화가 크지 않을 것이라는 가정 하에 가중함수(weight function)로서 건전보의 모드형상인 식 (11)을 이용하고 시도함수(trial function) ϕ를 4차항까지만 고려하면 다음과 같은 적분 형태의 특성방정식을 얻을 수 있다. 이에 대한 자세한 유도 과정은 선행연구[8,9]를 참조할 수 있다.

$$\int_0^L\frac{d^2\phi_i}{dx^2}EI_c\frac{d^2\phi_j}{dx^2}dx-(\rho A+M\delta)\omega_c\int_0^L\phi_i\phi_j dx=0 \tag{21}$$

여기서, $\delta=1(\mathrm{if}\,x=L),0(\mathrm{if}\,x\neq L)$이며 ω_c는 균열보의 고유 주파수이다. 식 (21)에 대해 수치적분을 수행하여 균열보의 고유 주파수를 구하였다.

Fig. 4에 나타낸 원형강관 캔틸레버 보에서, 균열위치(c/L)가 0.3일 때 균열크기를 변화시키며 4차까지의 고유 주파수 변화를 구하였다. 이를 Fig. 6에 나타내었는데, y축은 건전보 고유 주파수에 대한 균열보 고유 주파수의 비율이며, 균열크기가 증가할수록 고유 주파수가 감소함을 알 수 있다. 한편, 균열크기가 60°일 때 균열위치(c/L)를 고정단에서 자유단까지 변화시키며 고유 주파수를 구하였다. 이를 Fig. 7에 나타내었는데, 1차 고유 주파수는 균열위치가 고정단에 가까울수록 감소량이 증가하였으나, 2차 이상 고유 주파수의 감소량은 균열위치에서의 모달 변위에 영향을 받는 것으로 판단된다. 예를 들어 3차 고유 주파수는 균열위치(c/L)가 약 0.55인 경우에 고유 주파수 감소량이 적어지는데, 이는 Fig. 2에서 알 수 있듯이 해당 위치에서 3차 모드의 모달 변위는 거의 영이기 때문에 이 위치에서의 균열이 고유 주파수의 변화에 미치는 영향이 미미하기 때문인 것으로 추정된다. 또한, 해당 모드차수에서 모달 변위가 큰 위치에서 균열이 발생하는 경우 고유 주파수 감소량이 커지는 경향을 알 수 있다.

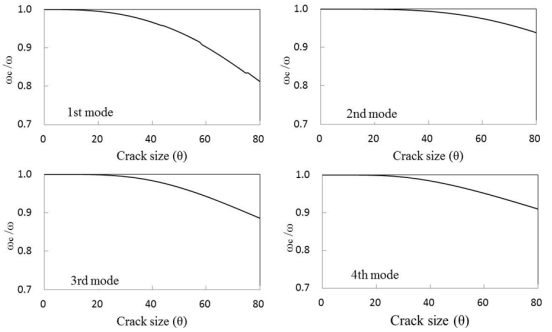

Fig. 6 Frequency change according to crack size

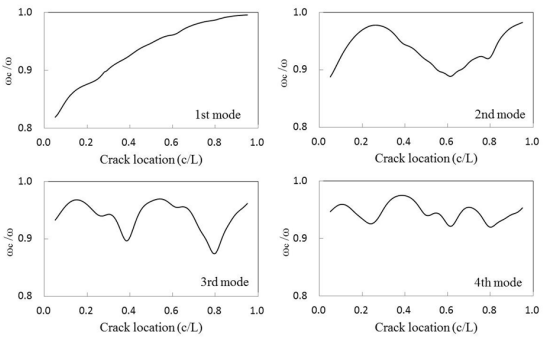

Fig. 7 Frequency change according to crack location

4. 균열위치 및 균열크기 추정

이 연구에서는 군집신경망(committee of neural networks: CNN)[9]을 이용하여 균열을 추정하였다. 즉, 신경망기법 적용 시 국소 최저치 문제, 노이즈 및 제한된 계측자료 등으로 인한 해의 비유일성 문제 등을 해결하기 위하여 신경망의 출력을 함수 공간에서 평균하여 처리하였다.

집중질량을 갖는 원형강관 캔틸레버 보에 대하여, 균열위치 및 크기를 달리하는 여러 손상 경우들을 샘플링하고 이에 해당되는 고유 주파수를 수치해석을 통하여 구한 후 이를 이용하여 신경망의 훈련패턴을 생성할 수 있다. 생성된 훈련패턴을 이용하여 훈련된 신경망에 계측된 고유 주파수를 입력하면 균열위치 및 크기를 판정할 수 있다.

Fig. 4에 보인 원형강관 캔틸레버 보에 대하여 우선 300셋의 균열위치 및 크기를 무작위로 샘플링한 후 이에 대한 균열보의 고유 주파수를 위에서 설명된 등가휨강성을 이용하여 구하였다. 각각의 손상 경우에 대하여 변화된 4차까지의 고유 주파수를 구하였다. 즉, 각각의 훈련패턴은 4개의 손상전후 고유 주파수 비율 및 이에 해당하는 균열위치와 크기로 구성된다. 따라서 신경망 입력자료는 4개로써 1차, 2차, 3차 및 4차 고유 주파수 비율이고, 출력층은 균열위치와 크기로 구성하였다. 한편, 3개의 노드를 각각 가지는 2개의 은닉층을 구성하였다. 생성된 훈련패턴을 이용하여 신경망을 학습시켰으며 이때, 안정된 추정오차를 위하여 훈련패턴의 순서를 무작위로 하여 100회의 반복학습을 수행하였다. 한편, 이 연구에서는 해석적인 결과를 이용하였으나, 계측 데이터에 노이즈가 포함된 경우에는 노이즈의 영향을 감소하기 위하여 노이즈 첨가학습(noise injection learning)을 적용할 수 있다. 즉, 훈련패턴에 인위적으로 일정 정도의 노이즈를 첨가시킨 후 학습을 수행함으로써, 신경망의 일반화 성능을 향상시켜 추정결과의 정확성을 개선시킬 수 있다.

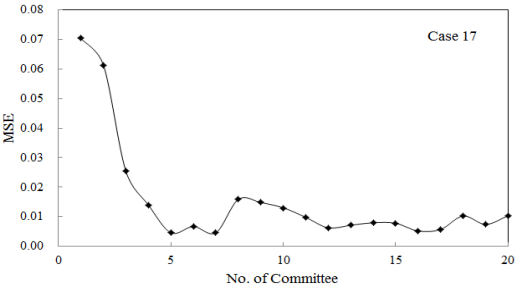

Fig. 8 Result of crack identification using the CNN

군집신경망을 구성하기 위하여 위와 동일한 구조의 신경망을 20개 작성한 후, 동일한 훈련패턴으로 단일 신경망들을 독립적으로 학습시켰다. 이때 단일 신경망들의 초기 연결강도를 랜덤하게 설정하여 각각 다른 초기 연결강도를 가지고 학습시켰다.

20개의 단일 신경망에 대한 학습이 종료된 후, Table 2에 보인 16가지 손상 경우에 대한 고유 주파수를 단일 신경망들에 입력하여 균열위치 및 크기를 각각 추정하였다. 이후 단일 신경망들에 의하여 계산된 결과를 단순 평균 방법을 적용하여 군집 출력을 계산하였다.

손상추정결과 중 대표적인 경우(case 17)를 Fig. 8에 나타내었는데, 그래프에는 군집신경망을 위하여 적용된 단일 신경망의 개수에 따른 평균 제곱 오차(mean square error : MSE)의 변화를 나타내었다. 단일

Table 2 Damage cases

Case	Crack size, θ (degree)	Crack location, c/L	Case	Crack size, θ (degree)	Crack location, c/L
1	10	0.3	9	10	0.5
2	20		10	20	
3	30		11	30	
4	40		12	40	
5	50		13	50	
6	60		14	60	
7	70		15	70	
8	80		16	80	

Table 3 Estimated crack size and location

Case	Crack size, θ(degree)		Crack location, c/L	
	Accurate	Estimated	Accurate	Estimated
1	10	10.638	0.3	0.325
2	20	21.123		0.308
3	30	28.980		0.305
4	40	41.976		0.307
5	50	50.220		0.301
6	60	61.227		0.297
7	70	70.227		0.292
8	80	78.939		0.309
9	10	9.729	0.5	0.543
10	20	22.554		0.542
11	30	30.060		0.520
12	40	40.437		0.492
13	50	49.599		0.495
14	60	61.821		0.509
15	70	70.794		0.491
16	80	79.911		0.490

신경망의 개수가 증가하면서 오차가 감소함을 알 수 있으며, 이러한 경향은 16가지 손상 경우에 모두 유사하게 나타났다. 즉, 군집신경망기법을 적용함으로써 손상위치 및 손상정도의 추정결과가 향상됨을 알 수 있다. 또한, 20개의 단일 신경망들이 동일한 구조와 훈련패턴으로 학습되었지만 서로 다른 초기 연결강도를 가지고 훈련되었기 때문에 군집신경망의 주요 효과 중 하나는 초기 연결강도에 민감한 국소 최저치 문제 완화인 것으로 판단된다.

한편, 16가지 손상 경우에 대한 균열위치 및 크기 추정 결과를 Table 3에 정리하였다. 모든 손상 경우에 대하여 성공적으로 균열의 위치와 크기를 추정할 수 있었으며, 집중질량을 갖는 원형강관 형식의 구조물 건전성 모니터링에 대한 제안된 방법의 활용성을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

이 연구에서는 자유단에 집중질량을 가지고 휨을 받는 원형강관 캔틸레버 보에 발생하는 관통균열의 위치 및 크기를 추정하기 위하여 구조물의 고유 주파수 변화와 군집신경망기법을 이용하였다. 이를 위하여 기존 문헌에 제시되어 있는 보에 대한 미분방정식의 일반해에 말단질량을 갖는 캔틸레버 보의 경계조건을 적용하여 모드특성을 구하였고, 에너지 균형 조건을 기반으로 유도된 균열보에 대한 등가휨강성을 이용하였다. 이를 기반으로 캔틸레버 원형강관 보에 대한 수치 해석을 수행하여 균열보의 고유 주파수를 추정하였고, 이를 이용하여 신경망의 훈련패턴을 생성한 후 군집신경망을 적용하였다. 제안된 기법을 검증하기 위하여 예제 보에 대한 손상판정을 수행하였으며, 모든 손상 경우에 대하여 성공적으로 균열의 위치와 크기를 추정할 수 있었다. 이를 통하여 말단질량을 갖는 원형강관 형식 구조물의 결함탐지에 대한 개발기법의 활용성을 확인할 수 있었다. 한편, 이 연구결과를 활용하여 고정단으로 갈수록 단면이 커지는 테이퍼 원형강관 캔틸레버 보에 대한 손상추정이 가능할 것으로 판단된다. 즉, 테이퍼 보의 진동에 대한 미분방정식의 특수해를 구한 후, 건전보에 대한 고유 주파수와 모드형상을 구하고 이를 원형강관에 대한 이 연구결과에 적용하면 테이퍼 원형강관 캔틸레버 보의 결함탐지가 가능할 것으로 사료된다.

향후 이 연구의 결과는 실험연구를 통하여 검증할 필요가 있을 것으로 판단되며, 보다 실용적인 기법의 개발을 위하여 타 경계조건 적용, 고정단 위치에서의 결함 탐지기법 개발 및 복수균열에 대한 기법 개발 등이 필요한 것으로 사료된다.

후 기

이 논문은 2014년도 남서울대학교 학술연구비 지원에 의해 연구되었음.

References

(1) Dilena, M., Dell'Oste, M. F. and Morassi, A., 2011, Detecting Cracks in Pipes Filled with Fluid from Changes in Natural Frequencies, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 25, No. 8, pp. 3186~3197.

(2) Wang, Y. M., Chen, X. F. and Heb, Z. J., 2011, Daubechies Wavelet Finite Element Method and Genetic Algorithm for Detection of Pipe Crack, Nondestructive Testing and Evaluation, Vol. 26, No. 1, pp. 87~99.

(3) Ye, J., He, Y., Chen, X. et al., 2010, Pipe Crack Identification Based on Finite Element Method of Second Generation Wavelets, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 24, No. 2, pp. 379~393.

(4) Naniwadekar, M. R., Naik, S. S. and Maiti, S. K., 2008, On Prediction of Crack in Different Orientations in Pipe Using Frequency Based Approach, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 22, No. 3, pp. 693~708.

(5) Murigendrappa, S. M., Maiti, S. K. and Srirangarajan, H. R., 2004, Frequency-based Experimental and Theoretical Identification of Multiple Cracks in Straight Pipes Filled with Fluid, NDT&E International, Vol. 37, No. 6, pp. 431~438.

(6) Murigendrappa, S. M., Maiti, S. K. and Srirangarajan, H. R., 2004, Experimental and Theoretical Study on Crack Detection in Pipes Filled with Fluid, Journal of Sound and Vibration, Vol. 270, No. 4-5, pp. 1013~1032.

(7) Yang, X. F., Swamidas, A. S. J. and Seshadri, R., 2001, Crack Identification in Vibrating Beams Using the Energy Method, Journal of Sound and Vibration, Vol. 244, No. 2, pp. 339~357.

(8) Huh, Y. C., Kim, J. K. and Park, S. H., 2007, A Study about the Damage Model of a Cantilever Beam with Open Crack Generated in Whole Breadth of the Beam, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 17, No. 10, pp. 936~945.

(9) Lee, J. W., Kim, S. R. and Huh, Y. C., 2014, Pipe Crack Identification Based on the Energy Method and Committee of Neural Networks, International Journal of Steel Structures, Vol. 14, No. 2, pp. 345~354.

(10) Gorman, D. J., 1975, Free Vibration Analysis of Beams and Shafts, John Wiley & Sons, New York.

Jong Won Lee received his Ph.D. from the Civil and Environmental Engineering Department at Korea Advanced Institute of Science and Technology in 2003. He worked at Korea Institute of Machinery and Materials. His research interests include structural health monitoring, damage identification, and smart sensor technique.