

## 타워 구조물의 진동기반 결함탐지기법

### Vibration-Based Damage Detection Method for Tower Structure

이종원† · 김상렬\* · 김봉기\*

Jong-Won Lee, Sang-Ryul Kim and Bong-Ki Kim

**Key Words** : Vibration-Based(진동기반), Crack Identification(균열탐지), Committee of Neural Networks(군집신경망), Tower Structure(타워 구조물), Energy Method(에너지 방법)

#### ABSTRACT

A crack identification method using an equivalent bending stiffness for cracked beam and committee of neural networks is presented. The equivalent bending stiffness is constructed based on an energy method for a straight thin-walled pipe, which has a through-the-thickness crack, subjected to bending. Several numerical analysis for a steel cantilever pipe using the equivalent bending stiffness are carried out to extract the natural frequencies and mode shapes of the cracked beam. The extracted modal properties are used in constructing a training patterns of a neural network. The input to the neural network consists of the modal properties and the output is composed of the crack location and size. Multiple neural networks are constructed and each individual network is trained independently with different initial synaptic weights. Then, the estimated crack locations and sizes from different neural networks are averaged. Experimental crack detection is carried out for 3 damage cases using the proposed method, and the identified crack locations and sizes agree reasonably well with the exact values.

#### 1. 서 론

원형 강관의 타워 형식 구조물은 풍력발전기, 플랜트, 건축구조물 등 주요 시설물에 널리 이용되고 있으며, 이에 대한 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 운

용 중 계속되는 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 원형 강관 구조물에 대한 균열탐지기법에 대한 연구는 다음과 같다. 등가 탄성스프링으로 균열을 모델링하고 주파수를 예측하여 유체를 포함하는 파이프의 단일 균열을 탐지하는 연구가 수행되었으며<sup>(1)</sup>, Rayleigh 보 요소를 수립하고 균열 위치와 크기에 영향을 주는 3차까지의 고유주파수를 근사화한 후, 예측된 고유주파수와 유전자 알고리즘을 이용하여 파이프 균열의 위치와 크기를 판정하였다<sup>(2)</sup>. 응력확대계수와 유한요소법을 활용한 파이프 균열탐지기법이 제안되었으며<sup>(3)</sup>, 고유주파수 변화를 이용하여 균열을 회전 스프링으로 모델링하여 원형 강관구조물에 대하여 다른 방향의 균열을 추정할 수 있는

† 교신저자; 정회원, 남서울대학교 건축공학과

E-mail : jwlee@nsu.ac.kr

Tel : 041-580-2761, Fax : 041-580-2929

\* 정회원, 한국기계연구원 시스템다이내믹스연구실

기법이 연구되었다<sup>(4)</sup>.

본 연구에서는 힘을 받는 원형 강관구조물에 발생하는 관통균열의 위치 및 크기를 추정하기 위하여, 에너지 방법을 이용하여 균열보에 대한 등가 휨강성을 유도한다. 이를 기반으로 캔틸레버 원형 강관 보에 대한 수치 해석을 수행하여 균열보의 고유주파수 및 모드형상을 계산한다. 이를 이용하여 신경망의 훈련패턴을 생성한 후 군집 신경망을 적용하여 균열의 위치와 크기를 추정한다.

## 2. 원형 강관 균열보의 등가 휨강성

Fig. 1과 열린 균열이 존재하는 원형 강관에 대하여, 변형 에너지 균형 조건식<sup>(5)</sup>을 이용하고 파괴역학 이론 및 응력확대계수를 적용하면, 보에서의 등가 휨강성을 다음 식으로 구할 수 있다.

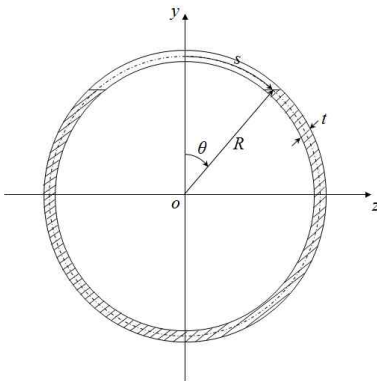


Fig. 1 Cross section of the cracked pipe.

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

여기서,

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

$$D(\theta) = \frac{\sqrt{2}(1-\nu^2)iG(\theta)}{\pi^2 ER^2 t \varepsilon} \quad (3)$$

$$iG(\theta) = \int_0^\theta G(\theta)^2 d\theta \quad (4)$$

$$G(\theta) \approx 0.0858\theta^5 - 0.1589\theta^4 + 0.2379\theta^3 - 0.1023\theta^2 + 1.0172\theta \quad \left(0 < \theta < \frac{\pi}{2}\right) \quad (5)$$

$$k(\theta) = \frac{2\sqrt{2}R(1-\nu^2)iG(\theta)}{\pi^2 \varepsilon \theta} \left(\frac{I_c}{I-I_c}\right) \quad (6)$$

$$j(\theta, c) = \arctan\left(\frac{L-c}{k(\theta)\theta}\right) + \arctan\left(\frac{c}{k(\theta)\theta}\right) \quad (7)$$

이며,  $c$ 는 균열 위치,  $\nu$ 는 포아손비,  $E$ 는 영계수,  $I$ 와  $I_c$ 는 각각 비균열보 및 균열보의 단면이차모멘트,  $L$ 은 보의 길이이다.

균열이 있는 오일러 보에서 횡방향의 변위를  $w(x, t)$ 라고 정의하면 등가 휨강성  $EI_c$ 를 적용한 운동방정식은 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$\frac{d^2}{dx^2} \left[ EI_c \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial x^2} \right] + m \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial t^2} = 0 \quad (8)$$

위 운동방정식을 변수 분리하여 보의 특성방정식을 구한 후 갈레르킨법을 사용하여 특성방정식의 해를 구하면 균열보에 대한 고유주파수 및 모드형상을 구할 수 있다.

## 3. 군집 신경망기법

최근 구조물에 대한 시스템인식 및 손상추정 문제에 신경망기법을 적용하기 위하여 많은 연구가 수행되어 왔다. 신경망기법 기반 시스템인식 및 손상추정의 과정은 패턴인식의 문제로 정의될 수 있으며, 신경망기법은 이러한 패턴인식의 문제에 매우 효과적인 기법이다. 그러나 신경망기법 적용 시 국소 최저치 문제, 노이즈 및 제한된 계측자료 등으로 인한 신경망기법의 비유일성 문제 등이 존재한다. 이를 해결하기 위한 방법 중 하나로, 통계적 접근 방법인 군집 신경망(committee of neural networks; CNN)을 적용할 수 있는데, 이 방법에서는 신경망의 출력을 함수 공간에서 평균하여 처리한다.

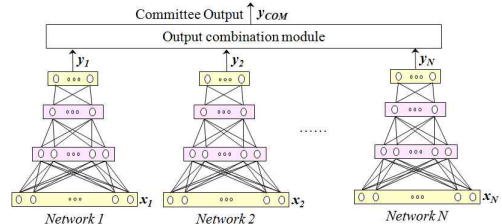


Fig. 2 Illustration of CNN.

군집 신경망기법에서는 Fig. 2와 같이 여러 개의 개별 신경망을 독립적으로 훈련시키며 이때 각 개별 신경망들의 초기 연결강도, 구조 및 훈련패턴 등을 동일하게 또는 달리 적용할 수 있다. Fig. 2에서  $x_i$ 는  $i$ 번째 신경망의 입력벡터이고  $y_i$ 는  $i$ 번째 신경망에 대한 변환함수(mapping function)  $f_i(x_i)$ 에 의해 계산되는 출력벡터이다. 군집 변환함수(committee mapping function)는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$f_{COM}(X) = \sum_{i=1}^N \alpha_i f_i \quad (9)$$

여기서  $X=(x_1, x_2, \dots, x_N)$ 이고  $N$ 은 개별 신경망의 총 개수이며,  $\alpha_i$ 는  $i$ 번째 신경망에 대한 가중치이며  $\sum_{i=1}^N \alpha_i = 1$ 이다. 따라서 군집 출력(committee output)은 다음 식으로 계산될 수 있다.

$$y_{COM} = \sum_{i=1}^N \alpha_i y_i \quad (10)$$

위 식을 이용하여 개별 신경망들의 출력을 단순 평균할 수 있고, 가중치를 설정하여 평균할 수도 있다.

#### 4. 실험연구

제안된 기법을 검증하기 위하여 손상실험을 수행하였다. 길이가 3 m, 외경이 216.3 mm, 두께가 4.5 mm인 캔틸레버 원형 강관 보로 실험체로 설계하였다. 전체적인 실험 셋업을 Fig. 3에 나타내었다.



Fig. 3 Experimental set-up.

Fig. 4와 같이 8개의 가속도계를 실험체에 부착한 후 인위적으로 균열을 발생시키며 자유진동실험을 수행하였다. 이때 데이터 취득 속도는 1280 Hz로 설정하였다.

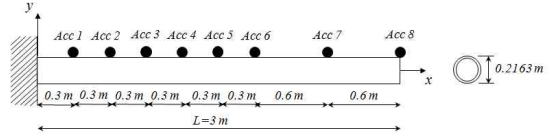


Fig. 4 Measurement locations of the specimen.

캔틸레버 보 고정단에서 0.3 m 위치( $c/L=0.1$ )에 균열을 발생시켰으며, 균열 크기( $\theta$ )를 단계적으로 깊이 발생시키면서 실험을 수행하였다. 즉, 균열 크기를 26.9°, 49.5°, 및 65.1°가 되도록 순차적으로 균열 크기를 깊게 발생시켰으며, 각 손상 단계별로 10회의 자유진동실험을 수행하여 결과를 평균하였다. 3단계의 손상경우를 Table 1에 정리하였다. 한편, Acc 6의 가속도 신호는 측정장비의 이상으로 측정 이후 제거하였으며, 나머지 7개의 가속도 신호를 이용하여 결과를 분석하였다.

Table 1 Damage cases

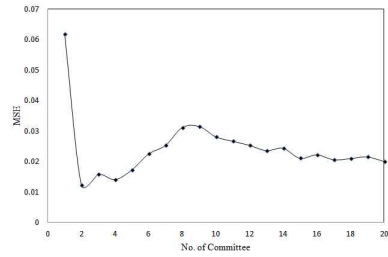
Case	Crack location, $c/L$	Crack size, $\theta$ (degree)
1	0.1	26.9
2	0.1	49.5
3	0.1	65.1

Table 1에 나타난 각각의 손상경우에 대하여 변화된 1차, 2차 및 3차 고유주파수 및 모드형상을 구하였으며, 이때 2장에서 설명된 균열보의 등가 휨강성을 이용하였다. 즉, 각각의 훈련패턴은 3개의 손상전후 고유주파수 비율, 21개의 손상전후 모드형상 비율 및 이에 해당하는 균열 위치와 크기로 구성된다. 따라서 신경망 입력자료는 24개로써 1차, 2차 및 3차 고유주파수 비율 및 모드형상 비율이고, 출력층은 균열 위치와 크기로 구성하였다. 한편, 16개 및 8개 노드의 2개 은닉층을 구성하였다.

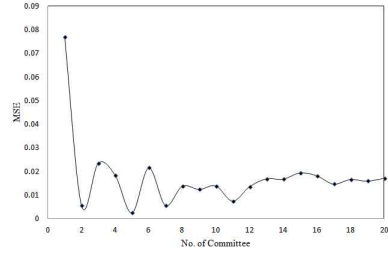
군집 신경망을 구성하기 위하여 위에서 설명된 신경망과 동일한 구조의 신경망을 20개 작성한 후, 동일한 훈련패턴으로 단일 신경망들을 독립적으로

학습시켰다. 이때 단일 신경망들의 초기 연결강도를 랜덤하게 설정하여 각각 다른 초기 연결강도를 가지고 학습시켰다. 20개의 단일 신경망에 대한 학습이 종료된 후, Table 1에 보인 3가지 손상경우에 대한 고유주파수 및 모드형상 비율을 단일 신경망들에 입력하여 균열 위치 및 크기를 각각 추정하였다. 단일 신경망들에 의하여 계산된 결과와 식 (10)을 이용하여 군집 출력을 계산하였는데 이때 단순 평균 방법을 적용하였다.

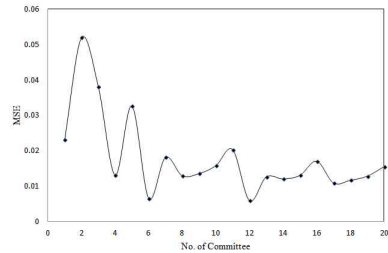
손상추정결과를 Fig. 5에 나타내었는데, 그래프에는 군집 신경망을 위하여 적용된 단일 신경망의 개수에 따른 평균 제곱 오차(mean square error: MSE)의 변화를 손상경우별로 나타내었으며, 단일 신경망의 개수가 증가하면서 오차가 감소함을 알 수 있다. 즉, 군집 신경망기법을 적용함으로써 손상위치 및 손상정도의 추정결과가 향상됨을 알 수 있다. 여기서도 20개의 단일 신경망들이 동일한 구조와 훈련패턴으로 학습되었지만 서로 다른 초기 연결강도를 가지고 훈련되었기 때문에, 군집 신경망의 주요 효과 중 하나는 초기 연결강도에 민감한 국소 최저치 문제 완화인 것으로 판단된다. 한편, 3가지 손상경우에 대한 균열 위치 및 크기 추정 결과를 Table 2와 3에 정리하였으며, 모든 손상경우에 대하여 성공적으로 균열의 위치와 크기를 추정할 수 있었다. 이를 통하여, 원형 강관 형식의 구조물에 대하여 개발된 결함판정 기법을 초기 검증할 수 있었으며, 구조물 건전성 모니터링에 제안된 방법을 효과적으로 활용할 수 있음을 확인할 수 있었다.



(a) Case 1



(b) Case 2



(c) Case 3

Fig. 5 Results of crack identification.

## 5. 결론

본 연구에서는 힘을 받는 원형 강관구조물에 발생하는 관통균열의 위치 및 크기를 추정하기 위하여, 구조물의 모드특성 및 군집 신경망을 이용하였다. 이를 위하여 에너지 방법을 이용하여 균열보에 대한 등가 휨강성을 유도하였고, 이를 기반으로 캔틸레버 원형 강관 보에 대하여 수치 해석을 수행하여 균열보의 고유주파수 및 모드형상을 추정하였다. 이를 이용하여 신경망의 훈련패턴을 생성한 후 군집 신경망을 적용하였다. 제안된 기법을 검증하기 위한 손상실험을 수행하였으며, 모든 손상경우에 대하여 성공적으로 균열의 위치와 크기를 추정할 수 있었

Table 2 Estimated crack locations

Case	Crack location, $c/L$	
	Accurate	Estimated
1	0.1	0.118
2	0.1	0.116
3	0.1	0.112

Table 3 Estimated crack sizes

Case	Crack size, $\theta$ (degree)	
	Accurate	Estimated
1	26.9	25.2
2	49.5	50.6
3	65.1	66.7

다. 이를 통하여, 원형 강관 형식의 타워 구조물에 대하여 개발된 결함판정 기법을 초기 검증할 수 있었으며, 구조물 건전성 모니터링에 제안된 방법을 효과적으로 활용할 수 있음을 확인할 수 있었다.

## 후 기

본 연구는 지식경제부 신재생에너지기술개발사업 (융합원천)인 "서남해 2.5GW 해상풍력을 위한 실증 단계 연구"과제의 세부연구 일부 내용임을 밝히는 바이며, 연구수행에 지원해 주신 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- (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, 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, 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, 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, pp.693~708.
- (5) 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, pp.339~357.