

웨이블렛 변환 기법을 이용한 선체 구조의 결함진단

⁰이대성*, 조대승**

Damage Detection of Ship Structures Using Wavelet Transformation

Dae-Sung Lee, Dae-Seung Cho

ABSTRACT

The early damage detection of large structures is very important to prevent the disaster due to its global failure. In this paper, a damage detection method of the beam-analogy structure based on the wavelet transformation of mode shape is presented. This can effectively detect the singularity of mode shape caused to the inconsistency of bending moment and shear force at the damaged part using the discrete wavelet and its inverse transforms. To investigate the validity and the applicability of the presented damage detection method, numerical simulation and experiment are carried out for the idealized beam and the real ship structures.

1. 서론

선박, 교량 등과 같은 대형 구조물의 결함 유무 및 결함 발생시의 위치 진단은 이들 구조물의 중대 손상으로 인한 인명 및 경제적 손실 예방에 매우 중요하다. 그러나 대부분의 대형 구조물은 결함 발생 가능 부분이 광범위하게 분포하고 구조가 복잡하여 통상적인 결함 진단에는 많은 비용과 노력이 요구된다. 이로 인해 보다 효율적인 방법으로 구조의 안정성을 감시하고 결함을 진단하기 위한 많은 노력이 진행되고 있으며, 선박의 경우에 있어서도 선체의 구조 안정성을 효율적으로 감시하기 위한 선체 응력 모니터링 시스템의 개발 및 장치가 증가하고 있는 추세이다[1].

일반적으로 구조물에 결함이 발생하면 구조물의 진동특성이 변화한다[2-5]. 이를 이용하여 구조물의 결함을 진단하는 방법으로는 구조물에 결함이 없는 경우와 결함이 발생한 경우의 고유진동형 차이를 이용하여 결함 위치를 파악[6-9]하거나, 균열이 발생한 구조물의 고유진동형의 곡률 변화

를 이용하여 결함을 진단하는 방법[10,11] 등이 있다. 또한, 굽힘모멘트와 전단력이 불연속적인 결함 부로 인한 고유진동형의 특이점을 신호의 평탄성(smoothness) 분석 기능이 뛰어난 웨이블렛 변환(wavelet transform) 기법으로 찾아서 결함을 진단하는 방법[12]과 충격 또는 초음파와 같은 이동파(propagating wave)를 구조물에 가할 경우에 결함 부에서 발생하는 반사파를 찾아내어 결함부를 진단하는 방법[13] 등이 있다.

본 논문에서는 선체 구조의 효율적 결함 진단 방법을 모색하기 위하여 선체 구조물의 결함으로 인한 고유진동형의 특이점을 웨이블렛 변환을 이용하여 찾는 방법에 대한 연구를 수행하였다. 이때, 결함진단을 위한 고유진동형은 저차 보유추거동 고유진동형을 이용하였으며, 웨이블렛 함수는 결함이 구조물의 모드 형상에 특이점으로 반영된다는 것에 착안하여 특이점 진단에 효과적인 쌍직교 웨이블렛 함수(biorthogonal wavelet function)를 이용하였다. 본 연구에서 적용한 결함 진단 방법의 타당성과 유용성은 두께 변화 또는 균열을 갖는 양단 자유 보에 대한 수치해석과 실험 및 균

* 부산대 대학원 조선해양공학과

** 부산대 조선해양공학과

열을 갖는 선체 구조물에 대한 수치해석을 수행하여 검토하였다.

2. 웨이블릿 이론

2.1 연속 웨이블릿 변환

함수 $f(x)$ 의 연속 웨이블릿 변환 함수 $W(a, b)$ 의 정의는 다음과 같다.

$$W(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x)\psi^{a,b}(x)dx \quad (1)$$

여기서, ψ 는 웨이블릿 함수(wavelet function)로서

$$\psi^{a,b}(x) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{x-b}{a}\right), \quad a > 0 \quad (2)$$

로 정의되며, a 는 신호 $f(x)$ 의 $x=b$ 근방에서의 변환되는 영역의 스케일링(scaling) 인자, 즉 변환되는 영역의 크기를 결정하고, b 는 변수 x 의 이동(translation) 효과를 나타낸다. 따라서, 웨이블릿 변환은 a, b 의 변화를 통해 변환되는 영역의 위치 및 크기를 균형적으로 국소화시킬 수 있어 공간 또는 시간 함수의 특이성 분석에 유용하게 사용될 수 있다[14]. 웨이블릿 함수 $\psi^{a,b}(x)$ 는 그 응용에 따라 달리 결정될 수 있으나 1차 이상의 소멸모멘트(vanishing moment)를 가지고, 다음과 같은 유한 조건을 최소한 만족해야 한다.

$$C_\psi = \int_0^\infty \frac{|\widehat{\psi}(\xi)|^2}{\xi} d\xi < \infty \quad (3)$$

2.2 이산 웨이블릿 변환

식(1)의 연속 웨이블릿 변환은 정수 j, k 를 이용하여 주파수 대역 계수 a 를 급수 2^{-j} , 시간 계수 b 를 $2^{-j}k$ 로 나타내면 이산 웨이블릿 변환은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$W(2^{-j}, k) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x)\psi_{j,k}(x)dx \equiv \langle f(x), \psi_{j,k} \rangle \quad (4)$$

여기서,

$$\psi_{j,k}(x) = 2^{j/2} \psi(2^j x - k) \quad (5)$$

이다. 이산 웨이블릿 변환에 있어서 필터 개념을 도입하고, 스케일링 함수 $\phi(x)$ 를

$$\phi(x) = \sqrt{2} \sum_n h_n \phi(2x - n) \quad (6)$$

와 같이 정의하면 $\phi(x)$ 와 직교 관계식이 성립하는 웨이블릿 함수 $\psi(x)$ 는

$$\psi(x) = \sqrt{2} \sum_n g_n \phi(2x - n) \quad (7)$$

와 같이 구축할 수 있다[15,16]. 여기서, n 은 이산

필터를 정의하는 계수의 개수를 나타내며, h_n 은

$$\sum_n h_n h_{n+2m} = 0 \text{ for all positive integer } m$$

$$\sum_n h_n = \sqrt{2} \quad (8)$$

를 만족하는 계수이고, g_n 은

$$g_n = (-1)^n h_{1-n} \quad (9)$$

이다.

상기의 스케일링 함수 $\phi(x)$ 와 웨이블릿 함수 $\psi(x)$ 는 자신은 물론 상호간에도 직교관계를 만족하는 직교 기저 함수(orthonormal basis function)이다. 이산 웨이블릿 변환은 이들 직교 기저함수를 이용하여 함수 $f(x)$ 를

$$f(x) = \sum_k c_{0,k} \phi_{0,k}(x) + \sum_{j=0}^{\infty} \sum_k d_{j,k} \psi_{j,k}(x) \quad (10)$$

와 같이 분해(decomposition) 하는 것이다. 여기서, 계수 $c_{j,k}$ 와 $d_{j,k}$ 는 $\phi(x)$ 와 $\psi(x)$ 의 직교성에 의해 내적을 이용하면

$$c_{j,k} = \langle f(x), \phi_{j,k}(x) \rangle$$

$$d_{j,k} = \langle f(x), \psi_{j,k}(x) \rangle \quad (11)$$

이 된다. 또한, 함수의 분해(decomposition) 과정에서 연속되는 변환 과정간에는

$$c_{j,k} = \sum_n h_{n-2k} c_{j+1,k} \quad (12)$$

$$d_{j,k} = \sum_n g_{n-2k} c_{j+1,k} \quad (13)$$

의 관계식이 성립하는데 식(12)는 down sampling 과정상에서 저역 통과 필터링(low-pass filtering), 식(13)은 고역 통과 필터링(high-pass filtering)을 나타낸다[17,18]. 따라서, 식(10)의 우변의 첫 번째 항은 함수 $f(x)$ 의 최종 웨이블릿 변환 레벨에서 저역 통과 필터링으로 추출된 성분 즉, $f(x)$ 의 근사성분(approximate component)을 나타내며, 두 번째 항은 각 레벨에 있어서 고역 통과 필터링으로 추출된 상세 성분(detail component)들의 합을 나타낸다. 한편, 분해된 근사 성분과 상세 성분을 이용하여 함수를 복구(reconstruction)하는 역 웨이블릿 변환(inverse wavelet transform)에 있어서는

$$c_{j+1,k} = \sum_n h_{k-2n} c_{j,n} + \sum_n g_{k-2n} d_{j,n} \quad (14)$$

의 관계식이 성립한다.

실제 이산 웨이블릿 변환의 적용은 연속 함수 $f(x)$ 의 이산화 자료 f_k ($k = \dots, -1, 0, 1, \dots$)를 임의 레벨에서의 $f(x)$ 의 근사 성분 값으로 간주하고, 스케일링 함수에 따라 결정되는 식(12)와 식(13)의 관

계식을 이용하여 Fig. 1에 보인 바와 같이 하위 레벨에서의 함수 $f(x)$ 의 근사 성분과 상세 성분을 추출하는 것이다. 상기 이산 웨이블릿 변환의 개념을 벡터 영역(vector space)에서 표현하면 Fig. 2에 보인 바와 같다.

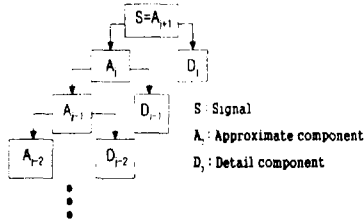


Fig. 1 General idea of wavelet analysis

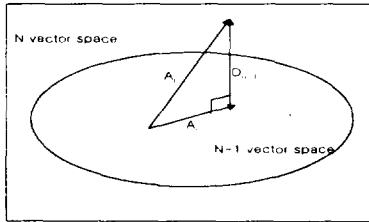


Fig. 2 Interpretation of wavelet transformation in the vector space

3. 웨이블릿 변환을 이용한 보유추 구조물의 결함진단

p 차 소멸모멘트를 갖는 웨이블릿 함수 즉,

$$\int x^k \psi(x) dx = 0 \text{ for } 0 \leq k \leq p-1 \quad (15)$$

을 만족하는 웨이블릿 함수는 $(p-1)$ 차 이하의 다항 함수와 직교관계를 가진다. 따라서, 특정 함수 $f(x)$ 가 주어진 점 x_0 에서 p 차 미분이 불가능한 경우 함수 $f(x)$ 에 대한 웨이블릿 변환 결과는 영이 아닌 유한한 값을 가진다.

보유추 구조물에 균열과 같은 결함이 있는 경우 결함부에서는 굽힘모멘트와 전단력의 불연속성이 발생한다. 이는 결함이 있는 보유추 구조물의 고유진동형에는 결함부에서 2차 미분값과 3차 미분값이 불연속적인 특이점이 존재한다는 것을 의미한다. 따라서, 보유추 구조물의 경우 2차 이상의 소멸모멘트를 갖는 웨이블릿 함수를 이용하여 고유진동형을 웨이블릿 변환하면 결함부에서는 직교관계식이 성립하지 않아 결함이 발생하지 않은 곳보다 상세 성분 값이 크게 나타난다는 점을 이용하면 결함 위치를 파악할 수 있다. 그러나, 이 방

법은 웨이블릿 변환 단계마다 고유진동형을 정의하는 위치 정보가 절반씩 감소하는 단점이 있다. 이에 본 연구에서는 결함의 위치를 보다 정확하게 파악하기 위하여 고유진동형을 한번 웨이블릿 변환한 후 상세 성분만을 역 웨이블릿 변환하여 복구한 값으로부터 결함 위치를 파악하는 방법을 적용하였다.

4. 수치해석 및 실험

본 연구에서는 선박과 같은 양단 자유 보유추 구조물의 결함을 웨이블릿 변환에 의해 진단하는 방법의 타당성을 검토하고자 양단 자유 보에 대한 수치해석 및 실험과 실선에 대한 수치해석을 수행하였다. 이때, 웨이블릿 함수는 Fig. 3에 보인 바와 같이 5차 소멸모멘트를 갖는 쌍직교 웨이블릿 함수(biorthogonal wavelet function)[19]를 적용하였다.

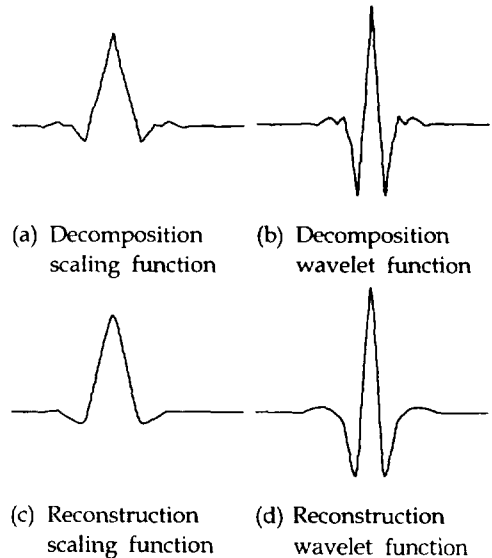


Fig. 3 Biorthogonal 6.8 wavelet function

4.1 양단 자유 보에 대한 수치해석

수치 해석 및 실험 모델인 양단 자유 균일단면 강재 보의 기하학적 형상은 Fig. 4에 나타내었다. 수치해석에 있어서 보는 총 50개의 보 요소로 유한요소 모델링하였다. 수치 해석은 다음의 3가지 경우에 대해서 수행하였다.

Case 1) 결함이 없는 보

Case 2) 보의 240 mm와 250 mm 사이에 위치한 요소의 강성이 5% 작은 결함이 있는 경우

Case 3) 보의 240 mm와 250 mm 사이에 위치한 요소의 단면 두께가 5% 작은 결함이 있는 경우

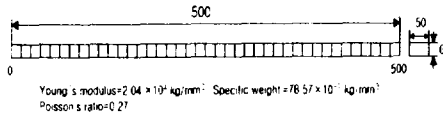


Fig. 4 Free-Free Beam

상기 각 경우에 대한 1차 고유진동형을 범용 유한 요소해석 프로그램인 NASTRAN을 이용하여 구한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 이로부터 보의 결함 유무에 따른 고유진동형의 차이는 거의 없음을 확인할 수 있다. Fig. 6에는 결함이 있는 보의 고유진동형을 1 단계 이산 웨이블릿 변환한 후 이의 상세 정보만을 역 웨이블릿 변환하여 복구한 결과를 결함이 없는 보에 대한 결과와 함께 나타내었다. 이로부터 결함이 없는 경우에는 각 위치별 복구된 상세 성분 값의 차이가 거의 없을 뿐만 아니라 그 크기도 매우 작으나 결함이 있는 경우에는 위치별 복구된 상세 성분 값의 변화가 심하고, 결함 위치에서 가장 큰 값을 나타냄을 확인할 수 있다. 따라서, 본 연구에서 적용한 방법은 균일한 단면 특성을 갖는 보 유추 구조물의 결함 유무 및 결함 위치 파악에 유용하게 적용될 수 있음을 확인할 수 있다.

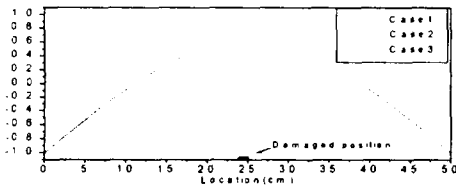


Fig. 5 The first mode shapes of free-free beams with and without damage

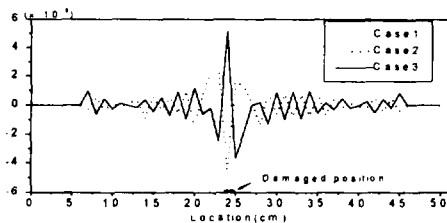


Fig. 6 The reconstructed 1st-level detail component of the mode shapes : Free-free beams

4.2 양단 자유 보에 대한 실험에 의한 검증

수치해석을 통해서 확인된 결과를 검증하기 위해서 4.1절의 수치해석 대상 양단 자유 보와 동일한 보에 대해서 실험을 수행하였다. 이때, 결함부는 톱을 이용하여 보의 좌단에서 245 mm 지점에 보의 전폭에 걸쳐 두께의 40%에 해당하는 2.4 mm 깊이의 균열로 구현하였다. 실험에 있어서 자유 경계조건은 보의 하부에 스펀지를 설치하여 구현하였다.

보의 좌단에서부터 10 mm 간격으로 위치를 달리 하면서 충격 가진하여 측정된 주파수 응답함수로부터 구한 실험 대상 보의 1차 고유진동형을 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 8에는 상기 고유진동형을 4.1절에서와 동일한 웨이블릿 변환방법으로 복구한 상세 성분 값을 나타내었다. 이로부터 수치해석 예에서와 마찬가지로 결함위치에 가장 인접한 240mm 및 250 mm 위치에서 복구된 상세 성분 값이 가장 크게 나타나 이 사이 구간에 결함이 위치함을 파악할 수 있다.

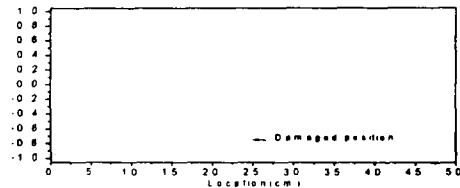


Fig. 7 First mode shape of the damaged beam obtained by the experiment

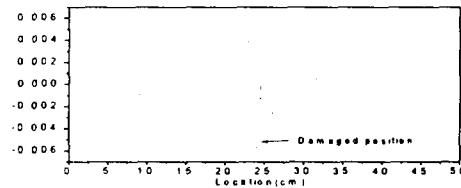


Fig. 8 The reconstructed 1st-level detail component of the damaged beam mode shape obtained by the experiment

4.3 선체 구조물에 대한 수치해석

본 연구에서 적용한 결함 진단 방법의 선박에 대한 적용 가능성을 검토하기 위하여 300,000톤급 원유 운반선에 대한 수치해석을 수행하였다. 이때, 선체 결함은 Fig. 9에 보인 바와 같이 선미로부터 140m 지점에 위치한 횡단면부의 종격벽과 호퍼

(hopper)가 만나는 지점에 종격벽 및 호퍼부 방향으로 각각 3m, 4m 길이의 균열이 있는 것으로 가정하였다. 결합진단에 필요한 상기 선박의 고유진동형 계산에 사용된 3차원 유한요소 모델은 Fig. 10에 나타내었다.

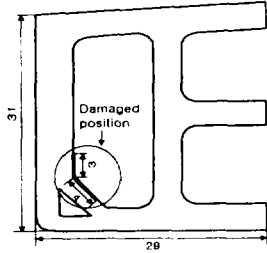
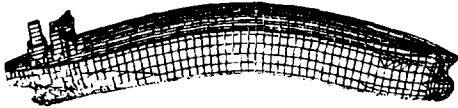


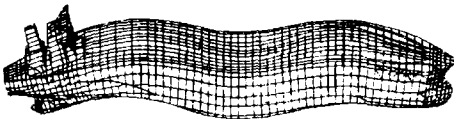
Fig. 9 Ordinary section adopted for numerical analysis(unit : m)



Fig. 10 Finite element model of the ship



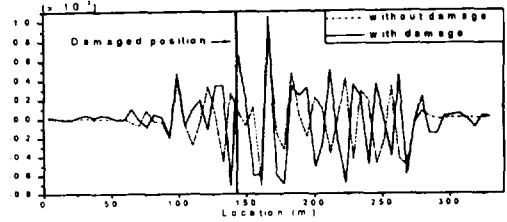
(a) 2-node mode shape (0.642Hz)



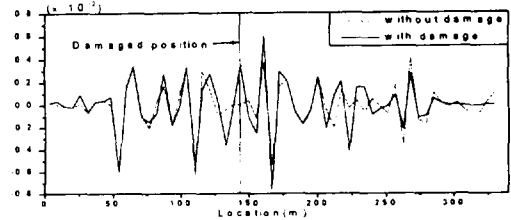
(b) 4-node mode shape (2.11 Hz)

Fig. 11 Hull girder mode shape in vertical directions of the damaged ship structure

범용 유한요소 프로그램인 NASTRAN을 이용하여 구한 상기 선박의 경하상태 상하 2절 및 4절 고유진동수와 고유진동형은 Fig. 11에 나타내었다. Fig. 12에는 결합이 있는 경우의 선체 상갑판 중앙부 절점에서의 상하 변위 성분 고유진동형만으로 이산 웨이블릿 변환한 후 첫 번째 레벨의 상세 성분을 복구한 결과를 결합이 없는 경우에 대한 결과와 함께 나타내었다.



(a) 2-node mode shape



(b) 4-node mode shape

Fig. 12 The reconstructed 1st-level detail component of the ship structure

이로부터 상하 2절 고유진동형의 경우 결합이 없는 경우와 있는 경우의 복구된 상세 성분의 절대값이 결합 부위 근처를 제외하고는 큰 차이가 없음을 확인할 수 있다. 그러나, 결합이 위치한 부분은 물론 선체 구조 자체가 불연속적인 횡격벽 부분에서 결합 유무에 상관없이 복구된 상세 성분의 값이 크게 나타나 복구된 성분의 크기만으로 결합 진단이 곤란함을 확인할 수 있다. 한편, 상하 4절 고유진동형의 경우 결합 유무에 따른 복구된 상세 성분 값의 변화가 비교적 적으나 결합부에서는 상대적으로 큰 값의 변화를 나타내었다. 이는 고차 진동형일수록 곡률 변화율이 커서 결합으로 인한 고유진동형의 불연속성 효과가 잘 나타나기 때문인 것으로 사료된다.

상기의 실선에 대한 수치해석 결과 선체와 같이 구조적 불연속성을 갖는 구조물에 대해 고유진동형의 웨이블릿 변환을 이용한 결합 진단 방법을 적용하기 위해서는 결합 유무에 따른 고유진동형의 웨이블릿 변환 결과를 상호 비교하거나 복구된 상세 성분 값만으로 구조 불연속부와 결합부를 구분할 수 있는 방법에 대한 연구가 필요하다고 판단한다.

5. 결론

본 논문에서는 고유진동형을 한번 웨이블릿 변환한 후 이의 상세 성분만을 역 웨이블릿 변환으로 복구한 값의 크기를 이용하여 선체 구조물의

로 복구한 값의 크기를 이용하여 선체 구조물의 결함을 진단하는 방법에 대한 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 고유진동형의 웨이블릿 변환을 이용한 결함진단 방법은 감성 및 질량 분포가 연속적인 양단 자유 보의 결함 유무 및 결함 위치를 정도 높게 파악할 수 있다.
- (2) 본 연구에서 적용한 결함 진단 방법을 실제 구조물에 적용하기 위해서는 정밀한 고유진동형의 측정이 요구된다.
- (3) 구조 불연속부를 갖는 선체 구조물의 경우 고유진동형의 웨이블릿 변환 결과만으로는 결함부와 구조 불연속부를 구분하기가 어렵다. 따라서, 본 연구에서 제시된 방법을 결함진단에 적용하기 위해서는 결함 유무에 따른 고유진동형의 웨이블릿 변환 결과를 상호 비교하거나 복구된 상세 성분 값만으로 구조 불연속부와 결함부를 구분할 수 있는 방법에 대한 연구가 선행되어야 한다.

참고문헌

- [1] 신찬호, 박재홍, 백상환, "선체 감시 장치의 개발", 선박해양구조연구회 논문집, 제 13권 1호, pp. 177~193, 1999.
- [2] G. E. Nash, "An Analysis of the Forces and Bending Moments Generated during the Notched Beam Impact Test", *J. of Fracture Mechanics*, Vol. 5, pp. 269-286, 1969.
- [3] K. Kishimoto, S. Aoki and M. Sakata, "Simple Formula for Dynamic Stress Intensity Factor of Pre-cracked Charpy Specimen", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 13, pp. 501-508, 1980.
- [4] F. D. Ju, M. Akgun, T. L. Paez and E. T. Wong, "Diagnosis of Fracture Damage in Simple Structures", *Bureau of Engineering Research Report No. CE-62(82) AFOSR-993-1 University of New Mexico*, 1982.
- [5] T. G. Dighondros, "A Continuous Cracked Beam Vibration Theory", *J. of Sound and Vibration*, Vol. 215 No. 1, pp. 17-34, 1998.
- [6] A. K. Pandey, M. Biswas and M. M. Samman, "Damage Detection from Changes in Curvature Mode Shape", *J. of Sound and Vibration*, Vol. 145, pp. 312-332, 1991.
- [7] Z. Wang, R. M. Lin and M. K. Lim, "Structural Damage Detection Using Measured FRF Data", *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, Vol. 147, pp. 187-197, 1997.
- [8] Y. Narkis, "Identification of Crack Location

- in Vibrating Simply Supported Beams", *J. of Sound and Vibration*, Vol. 172 No. 4, pp. 549-558, 1994.
- [9] M. M. A. Wahab, "Damage Detection in Bridges Using Modal Curvatures: Application to a Real Damage Scenario", *J. of Sound and Vibration*, Vol. 226 No. 2, pp. 217-235, 1999.
- [10] M. Boltezar, B. Strancar and A. Kuhelj, "Identification of Transverse Crack Location in Flexural Vibrations of Free-Free Beams", *J. of Sound and Vibration*, Vol. 211 No.5, pp. 729-734, 1998.
- [11] N. M. M. Maia and J. M. M. Silva, "Damage Detection Using the Frequency-Response-Function Curvature Method", *J. of Sound and Vibration*, Vol. 226 No.5, pp. 1029-1042, 1999.
- [12] 이호철, 김윤영, 이용욱, "모드형상의 웨이블릿 변환을 이용한 보의 결함진단", 한국소음공학회, 춘계학술대회 논문집, pp. 430~435, 1999.
- [13] 김윤영, 김용훈, "웨이블릿과 위그너빌을 이용한 구조진단법", 한국소음진동공학회, 춘계학술대회 논문집, pp. 436-441, 1999.
- [14] 이남용, 김윤영, "웨이블릿이란", 한국소음진동학회지, 제9권 제 5호, pp. 867-875, 1999.
- [15] Daubechies, I., "Orthonormal Basis of Compactly Supported Wavelets", *Comm. Pure & Appl. Maths*, Vol. 46, pp. 909-996, 1988.
- [16] Daubechies, I., "The Wavelet Transform, Time-Frequency Localization and Signal Analysis", *IEEE Transactions of Information Theory*, Vol. 36, pp. 961-1005, 1990.
- [17] D. E. Newland, "An Introduction to Random Vibrations, Spectral & Wavelet Analysis", *Longman Scientific & Technical*, 1994.
- [18] G. Strang and T. Nguyen, "Wavelets and Filter Banks", *Wellesley-Cambridge Press*, 1997.
- [19] C. K. Chui, Wavelets, "A Mathematical Tool for Signal Analysis", *SIAM*, 1997.
- [20] M. Misiti, Y. Misiti, G. Oppenheim and J. M. Poggi, "Wavelet Toolbox User's Guide", *MathWorks, Inc.*, 1997.