

# 빔 구조물의 모달 변형에너지를 이용한 손상탐지

## Damage Detection in a Beam Structure Using Modal Strain Energy

박 수 용†

Park, Soo Yong

최 상 현\*

Choi, Sang-Hyun

(논문접수일 : 2003년 6월 23일 ; 심사종료일 : 2003년 8월 26일)

### 요 지

본 논문의 목적은 빔 구조물에서 발생할 수 있는 손상의 위치를 탐색하고, 그 손상의 정도를 추정할 수 있는 알고리즘을 제안하는 것이다. 제안된 방법은 구조물의 모달 변형에너지의 차이를 이용한다. 구조물 내 발생한 국부적인 손상의 위치를 파악하고 그에 상응하는 손상도를 추정할 수 있는 손상지수를 손상 전과 손상 후 구조물의 모드형상에서 얻을 수 있는 모달 변위로 표현하였고 그 관계식을 정립하였다. 구조물 내 발생한 손상의 위치를 결정하는 방법은 기 개발된 손상 지표를 적용하였다. 제안된 방법의 우수성과 효용성은 수치적으로 손상을 모사한 빔 구조물을 이용하여 입증하였다.

**핵심용어** : 손상탐지, 손상도 추정, 모달 변형에너지, 손상지수, 빔 구조물

### Abstract

The objective of this paper is to present an algorithm to locate and size damage in a beam structure. The method uses the changes in the modal strain energy distribution. A damage index, utilized to identify possible location and corresponding severity of local damage, is formulated and expressed in terms of modal displacements that can be obtained from mode shapes of the undamaged and the damaged structures. The possible damage locations in the structure are determined by the application of damage indicator according to previously developed decision rules. The robustness and effectiveness of the method are demonstrated using numerical examples of beam structures with simulated damage.

**Keywords** : damage detection, severity estimation, modal strain energy, damage index, beam structure

## 1. 서 론

구조물에 발생할 수 있는 열화나 손상으로부터 구조물의 성능을 보호하고 구조물을 안전하게 사용할 수 있도록 관리를 철저히 하는 것은 정부 관계자, 구조 실무자, 사용자 등 모두의 관심사이다. 구조물에 발생한 손상 및 원인을 조기에 발견하고 적절한 조치를 취하지 않으면 사회·경제적으로 막대한 인명피해와 경제적 손실을 입게 됨은 주지의 사실이다. 이러한 손실을 막기 위한 노력의 일환으로 지난 수십 년 간 구조물의 진동특성을 이용한 비파괴 손상평가 분야의 연구가 활발하게 진행되고 있으며 많은 연구자들이 다양한 방법론 등을 제안하고 있다.<sup>1)</sup> 이렇게 다양한

방법들의 공통점은 구조물의 진동특성 중 주로 고유진동수와 모드형상을 일반적으로 사용하고 있다는 것이며, 구조물의 손상 탐지나 건전성 평가 등에 진동특성을 이용하는 근본적인 배경은 그 특성을 실험을 통하여 쉽게 얻을 수 있을 뿐만 아니라 구조물이 손상 등으로 물리적으로 변화하면 구조물의 진동특성도 따라서 변하기 때문이다. Ultrasonic 등과 같은 비파괴 손상탐지 기법도 구조물의 건전성 평가에 이용되나 진동특성을 이용하는 방법과 근본적으로 다른 점은 이러한 비파괴 손상탐지 기법은 구조물의 물리적 상태를 직접 재는 것으로 진단의 정확성이 장비의 성능과 전문 기술자의 판단에 상당히 의존하고 있다는 것이다. 또한 기존의 비파괴 검사와 진동특성을 이용하는 방법의

† 책임저자, 정회원 · 영산대학교 건축학부 전임강사  
전화: 055-380-9495 ; Fax: 055-380-9229  
E-mail: sypark@ysu.ac.kr

\* 정회원 · 한국원자력 안전기술원 선임연구원

· 이 논문에 대한 토론을 2003년 12월 31일까지 본 학회에 보내주시면 2004년 3월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

주요한 차이점은 기존 방법은 국부적이고 접근이 용이하지 않은 부위는 진단 수행을 할 수 없는 반면에 가속도계 등 센서를 이용하는 방법은 구조물의 전체적인 평가를 할 수 있다는 것이다.

구조물의 진동특성 변화를 이용한 손상평가에 관한 연구를 살펴보면, 초기 연구에서는 주로 해양 구조물에서 진동 감시를 통해 고유진동수의 변화를 구조물의 손상지표로 이용할 수 있는 가능성에 초점을 두었으며,<sup>2),3)</sup> 그 후 빔의 균열과 진동수 변화와의 관계,<sup>4)</sup> 모드형상의 곡률을 이용한 빔의 균열 위치추정,<sup>5)</sup> 민감도 분석을 이용한 손상위치와 손상도를 추정하는 기법,<sup>6),7)</sup> 고유진동수와 모드형상을 이용한 PSC보의 손상검색<sup>8)</sup> 등이 개발되었다. 최근에는 패턴인식(pattern recognition)과 신경망 기법 등을 적용하여 빌딩,<sup>9)</sup> 빔,<sup>10)</sup> 트러스 구조물에<sup>11)</sup> 적용하였다. 그러나 이렇게 다양한 이론이나 알고리즘의 개발에도 불구하고 그 효용성이나 실용성 측면에서 볼 때 개선되어야 할 부분이 상당히 존재하고 있고 실 구조물에 적용 시 제약사항이 많은 것이 사실이다. Farrar와 Jauregui<sup>12)</sup>는 진동특성을 이용한 손상평가 방법 중 최근 현저하게 두각을 나타내고 있는 몇몇 방법들의 장점 및 단점을 객관적으로 자세하게 분석하였다.

본 논문의 목적은 진동특성 중 모드형상을 이용하여 빔 구조물에서 발생할 수 있는 손상의 위치를 정확하게 탐색할 수 있고, 또한 손상부위의 손상 정도를 정확하게 추정할 수 있는 알고리즘을 개발하는 것이다. 이러한 알고리즘은 구조물의 진동특성 변화에 민감하여 구조요소의 강성 변화를 잘 파악할 수 있는 효과적인 손상지수(damage index)의 개발이 가장 중요하며 이를 위해 다음과 같은 과제를 수행하였다. 첫째, 빔 구조물의 손상 전과 손상 후의 부재별 모달 변형에너지를 이용하여 휨을 받는 빔 구조물의 손상지수를 대표하는 식을 유도하였다. 모달 변형에너지를 변화는 손상 전과 손상 후의 모드형상으로부터 구할 수 있다. 둘째, 앞서 구한 손상지수로부터 손상 위치를 결정하는 과정을 간략하게 검토하였다. 손상위치를 결정하는 과정은 부재별 손상지수를 통계적으로 처리하는 과정으로 기 개발하여 사용하고 있는 방법을 사용하였다. 셋째, 제안된 방법의 우수성과 효용성을 입증하기 위하여 단순보와 2연속 스펜의 빔 구조물에 수치적으로 손상을 모사한 후 손상 전과 손상 후의 모드형상만으로 손상위치와 손상도를 구한 후 그 결과를 원안과 비교, 분석하였다.

## 2. 이 론

### 2.1 손상지수 및 손상도 추정 알고리즘

$N(j=1 \dots N)$ 개의 구조 부재로 구성되어 있는 임의의 빔 구조물에서  $NM(i=1 \dots NM)$ 개의 손상 전과 손상 후의 모드형상을 알고 있다고 가정하면, 손상이 있는 구조물의  $i$ 차 모드의 전체 변형에너지 중  $j$ 번째 부재에 편중되어 있는 변형에너지,  $F_{ij}^*$ 는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$F_{ij}^* = \frac{\int_{\Delta_j} k_j^*(y_i^{*''})^2 dx}{\int_L k^*(y_i^{*''})^2 dx} \quad (1)$$

여기서,  $k_j^*$ 는 부재  $j$ 의 휨 강성,  $k^*$ 는 빔 구조물의 전체 강성,  $y_i^{*''}$ 는  $i$ 차 모드형상의 곡률(curvature),  $\Delta_j$ 는 부재  $j$ 의 길이,  $L$ 은 빔 구조물의 길이, 위첨자 \*는 손상의 상태를 나타낸다. 식(1)에서 손상이 있는 부재  $j$ 의 휨 강성  $k_j^*$ 와  $i$ 차 모드형상의 곡률  $y_i^{*''}$ (이하 아래첨자  $i$ 는 생략)은 손상이 없는 경우와 다음과 같은 상관관계가 성립한다.

$$k_j^* = k_j(1 + \alpha_j) \quad (2)$$

$$y_i^{*''} = y_i'' + \Delta y_i'' \quad (3)$$

여기서,  $\alpha_j$ 는  $j$ 부재의 손상도를 나타내는 변수로 만일  $\alpha_j=0$ 이면 손상이 없음을 의미하고,  $\alpha_j=-1$ 이면 손상으로 인하여  $j$ 부재의 휨 강성이 완전히 손실되었음을 의미한다.  $\Delta y_i''$ 는 손상 전과 손상 후의 모드형상 간의 곡률의 차이이다. 식(1)에서의 분모는 손상이 있는 구조물의 전체 변형에너지로 만일 손상의 부위가 한 곳 혹은 두 곳에 집중되어 있다고 가정하면 구조물의 평균 강성의 변화는 작기 때문에 식(1)은 식(2)와 (3)을 대입하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$F_{ij}^* \approx \frac{\int_{\Delta_j} k_j(1 + \alpha_j)(y_i'' + \Delta y_i'')^2 dx}{\int_L k(y_i'' + \Delta y_i'')^2 dx} = \frac{\int_{\Delta_j} k_j(1 + \alpha_j)(y_i''^2 + 2y_i'' \Delta y_i'' + \Delta y_i''^2) dx}{\int_L k(y_i''^2 + 2y_i'' \Delta y_i'' + \Delta y_i''^2) dx} \quad (4)$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{\int_{a_i} k_j y''^2 (1 + \alpha_j) \left(1 + 2 \frac{\Delta y''}{y''} + \left(\frac{\Delta y''}{y''}\right)^2\right) dx}{\int_L k y''^2 dx + \int_L 2 k y'' \Delta y'' dx + \int_L k \Delta y''^2 dx} \\
 &= \frac{\int_{a_i} k_j y''^2 (1 + \alpha_j) \left(1 + 2 \frac{\Delta y''}{y''} + \left(\frac{\Delta y''}{y''}\right)^2\right) dx}{\int_L k y''^2 dx \left[1 + 2 \frac{\int_L k y'' \Delta y'' dx}{\int_L k y''^2 dx} + \frac{\int_L k \Delta y''^2 dx}{\int_L k y''^2 dx}\right]}
 \end{aligned}$$

식(4)의 분모에서  $2 \frac{\int_L k y'' \Delta y'' dx}{\int_L k y''^2 dx} + \frac{\int_L k \Delta y''^2 dx}{\int_L k y''^2 dx}$  은 1보다 작고  $a = 2 \frac{\int_L k y'' \Delta y'' dx}{\int_L k y''^2 dx}$ ,  $b = \frac{\int_L k \Delta y''^2 dx}{\int_L k y''^2 dx}$  로 치환하여 Taylor series를 이용하면 식(4)는

$$F_{ij}^* = \frac{\int_{a_i} k_j y''^2 (1 + \alpha_j) [1 + C(x)] dx [1 - (a + b)]}{\int_L k y''^2 dx} \quad (5)$$

이 된다. 여기서  $C(x) = 2 \frac{\Delta y''}{y''} + \left(\frac{\Delta y''}{y''}\right)^2$  이다. 식(5)를 다시 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 F_{ij}^* &= \frac{\int_{a_i} k_j y''^2 dx}{\int_L k y''^2 dx} \\
 &+ \frac{\int_{a_i} k_j y''^2 C(x) dx - (a + b) \int_{a_i} k_j y''^2 [1 + C(x)] dx}{\int_L k y''^2 dx} \quad (6) \\
 &+ \alpha_j \frac{[1 - (a + b)] \int_{a_i} k_j y''^2 [1 + C(x)] dx}{\int_L k y''^2 dx}
 \end{aligned}$$

식(6)에서 첫 번째 항은 손상이 없는 경우의  $F_{ij}$ 이고 앞서 가정한대로 손상이 크지 않다면  $F_{ij}^* \approx F_{ij}$  라고 볼 수 있다. 식(6)을  $\alpha_j$ 에 관하여 다시 정리하면

$$\alpha_j = \frac{\left[ \frac{2 \int_L \Delta y'' y'' dx}{\int_L y''^2 dx} + \frac{\int_L \Delta y''^2 dx}{\int_L y''^2 dx} \right] \int_{a_i} y''^2 dx - \int_{a_i} (2 \Delta y'' y'' + \Delta y''^2) dx}{\left[ 1 - \frac{2 \int_L \Delta y'' y'' dx}{\int_L y''^2 dx} + \frac{\int_L \Delta y''^2 dx}{\int_L y''^2 dx} \right] \int_{a_i} y''^2 dx} \quad (7)$$

이 된다. 식(7)에서 알 수 있듯이  $j$ 부재의 손상도를 나타내는  $\alpha_j$ 는 손상 전과 손상 후의 모드형상만으로 표시할 수 있다. 손상탐지를 위한 손상지수를 손상 전  $j$ 부재의 휨 강성과 손상 후  $j$ 부재의 휨 강성의 비로 정의하면 손상지수,  $\beta_j$ 는 식(2)를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\beta_j = \frac{k_j}{k_j^*} = \frac{1}{1 + \alpha_j} \quad (8)$$

### 2.2 손상탐지 알고리즘

손상부위를 결정하는 손상탐지는 패턴인식(pattern recognition)을 이용하여 효과적으로 구할 수 있으며 손상 전과 손상 후의 모달변수의 함수로 이루어진 손상지수를 decision 알고리즘으로 유한 개소의 집단으로 분류할 수 있다.<sup>13)</sup> 즉, decision 알고리즘의 기능은  $D_n$ 개의 유한한 집단으로 파티션을 나누는 것으로 본 연구에서는  $n=2$ 로 다음과 같은 두가지 경우로 나눌 수 있다. 첫째는 구조물 내 어느 특정 부위에 손상이 있는 경우이고, 두 번째는 구조물 내 어느 특정 부위에 손상이 없는 경우이다. 식(8)의 손상지수를 계산한 후 손상위치를 결정하는 기준은 통계적 이론으로 구할 수 있다. 각 부재로부터 구한  $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \dots, \beta_N$  값을 확률변수(random variable)로 고려하여 표준화된 손상지수를 구하면 식(9)와 같다.

$$Z_j = \frac{\beta_j - \mu_\beta}{\sigma_\beta} \quad (9)$$

여기서,  $\mu_\beta$ 와  $\sigma_\beta$ 는 각각 손상지수  $\beta_j$ 의 평균과 표준편차를 나타낸다. 손상부위를 결정하는 마지막 단계는 앞서 언급한 그룹분류이다. 그룹분류를 하기 위해 여러 가지의 테크닉을 이용할 수 있으나 비교적 이용이 쉬운 Neyman-Pearson<sup>14)</sup> 기준을 택하여 사용하였으며 다음과 같은 두 가지 경우의 가설을 설정할 수 있다: (1) 가설  $H_0$  - 구조물 내 부재  $j$ 에 손상이 없음; (2) 가설  $H_1$  - 구조물 내 부재  $j$ 에 손상이 있음. 식(9)에서 구한  $Z_j$ 값으로부터 그 부재에 손상의 유무를 판별할 수 있으며 기준 값에 따라 가설테스트의 신뢰도(significance level)도 달라진다. 예를 들어 기준 값을 3이라고 결정하면 가설테스트는 99%의 신뢰도를 가지며 이때  $Z_j \geq 3$ 이면 가설  $H_1$ 을 택하여 구조물에 손상이 있음을 결정하고,  $Z_j < 3$ 이면 가설  $H_0$ 을 택하여 손상이 없음을 결정한다.

### 3. 해석 모델을 이용한 모의 손상탐지 및 손상도 추정

#### 3.1 해석 모델 및 모의 손상

본 논문에서 제안한 알고리즘의 효용성을 입증하기 위하여 단순 지지보와 2연속 스펠의 빔 구조물을 선택하여 손상을 모사하였다. 예제 구조물은 그림 1과 같이 단순보는

표 1 모의 손상 부재번호 및 손상도

대상구조물	손상 경우	손상 부재번호	손상도(%)
단순보	1	24	10
	2	4	50
	3	9, 30	30, 20
	4	4, 21, 31	20, 30, 20
연속보	5	24	10
	6	4	50
	7	21, 40	10, 20
	8	9, 48, 63	20, 30, 20

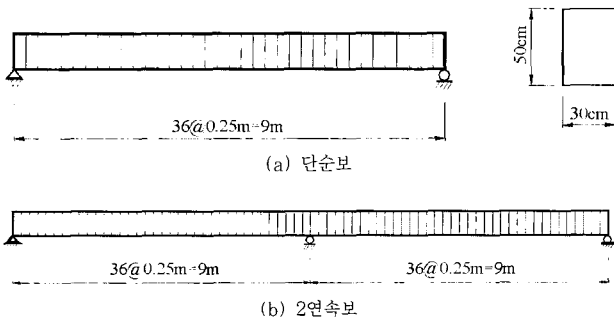
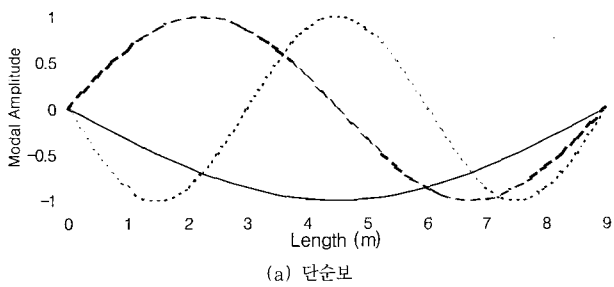
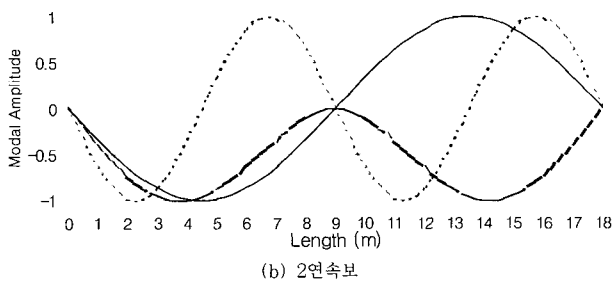


그림 1 예제 구조물



(a) 단순보



(b) 2연속보

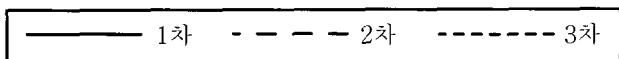


그림 2 단순보와 연속보의 모드형상 길이가 9m이고 36개의 보 요소로 구성하였으며, 각 부재의 길이는 0.25m이다. 2연속보는 단순보를 9m 연장하였으며 빔의 크기는 단순보와 같이 0.25m로 하였다. 단면의 크기는 단순보, 연속보 모두 그림과 같이 동일한 단면을 사용하였고, 부재의 재료적 특성은  $E=200\text{Gpa}$ ,  $\rho=7.827\text{kg/m}^3$ 을 사용하였다. 모의 손상은 단순보와 연속보에 각각 4가지의 경우로 총 8개의 시나리오로 구성하였다. 표 1에 각 손상 경우별로 손상을 가한 부재와 손상도를 정리하였다. 표 1에 나타낸 바와 같이 손상은 단순보와 연속보에서 각각 1군데, 2군데, 3군데에서 발생한 것으로 가정하였고, 손상은 각 해당부재의 탄성계수  $E$ 를 표에서 나타낸 만큼 줄여서 모사하였다. 손상탐지 및 손상도 추정에 사용할 모드는 각 구조물의 저차 3차 모드까지만을 사용하는 것으로 가정하였고, 유한요소모델로 자유진동 해석을 통하여 손상 전과 손상 후의 모드형상을 추출하였다. 본 연구에서 사용한 단순보와 연속보의 모드는 그림 2와 같다.

#### 3.2 손상위치 및 손상도 추정 결과

손상위치의 추정은 손상 전후의 모드형상을 이용하여 휨강성이 저하된 부재를 찾아내는 것으로 다음과 같이 수행하였다: (1) 각 부재의 손상지수  $\beta_j$ 를 식(8)을 이용하여 계산한다; (2) 표준화된 손상지수  $Z_j$ 를 식(9)로부터 계산한다; (3) 식(9)에서 구한  $Z_j$ 값으로부터 그 부재에 손상이 있는지 없는지를 98% 신뢰도의 가설테스트로 판별한다. 즉  $Z_j \geq 2$ 이면 부재  $j$ 에 손상이 있다고 판별하고,  $Z_j < 2$ 이면 부재  $j$ 에 손상이 없다고 판별한다; (4) 손상이 있다고 판별된 부재  $j$ 의 손상도를 식(7)을 이용하여 계산한다.

이렇게 구한  $Z_j$ 의 부재별 분포도를 각 손상 경우 별로 그림 3에서 그림 10에 나타내었다. 패턴인식의 관점에서 그림을 보면 구조물의 어느 부위에 손상이 발생했는지를 한 눈에 알 수 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 각 경우의 손상탐지 결과는 몇몇 모드를 제외하고는 완벽하게 모의 손상위치를 정확하게 찾아내었다. 각 그림에는 개별 모드를 이용한 손상 탐지 결과와 개별모드로부터 3모드를 합성하여 구한 결과를 함께 표시하였다. 3모드의 합성은 각각의 모드로부터 구한  $\beta_j$ 를 산술적으로 평균하여 표준화시킨 결과이다. 3모드를 합성하였을 때의 장점은 만일 손상이 개별모드의 노드점(즉, 모드형상이 0이 되는 점)이나 빔의 곡률이 변하는 근처에 생기면 그 부근에 있는 부재의 변형에너지는 다른 부재보다 훨씬 적기 때문에 손상탐지 알고리즘 적용 시 오류가 생길 수 있으나, 여러 개의 모드를 동

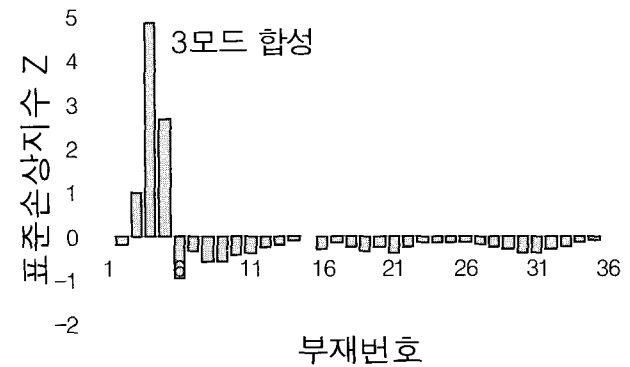
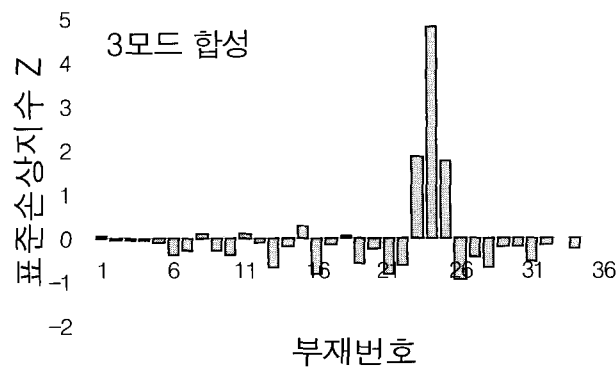
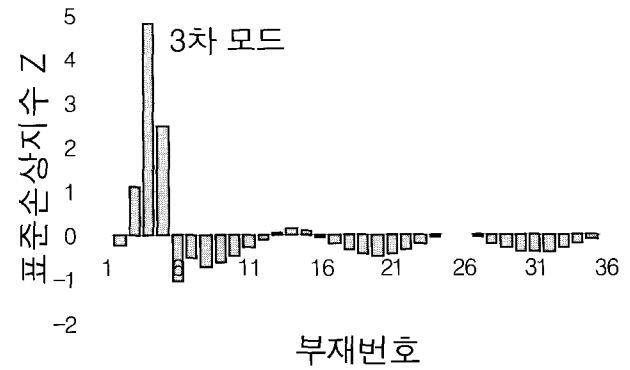
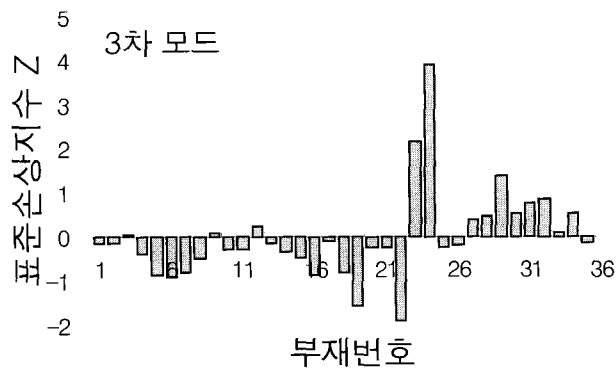
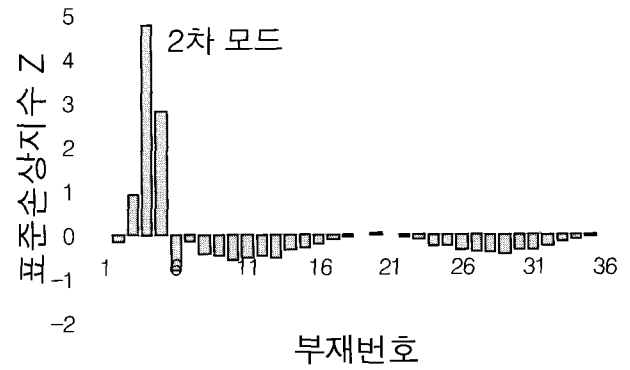
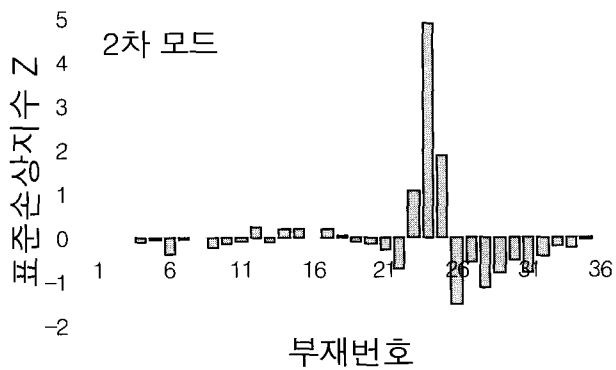
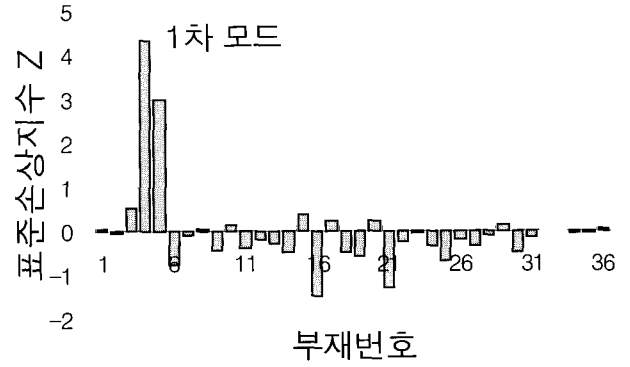
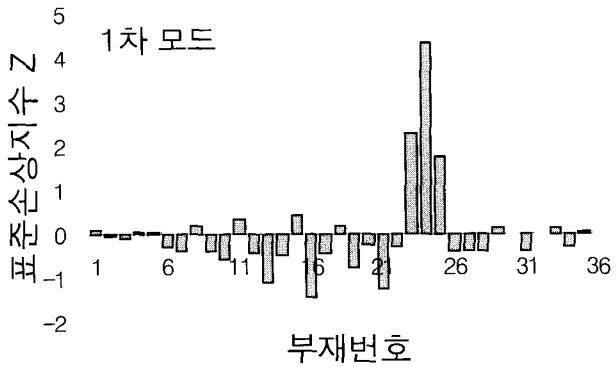


그림 3 손상 경우 1

그림 4 손상 경우 2

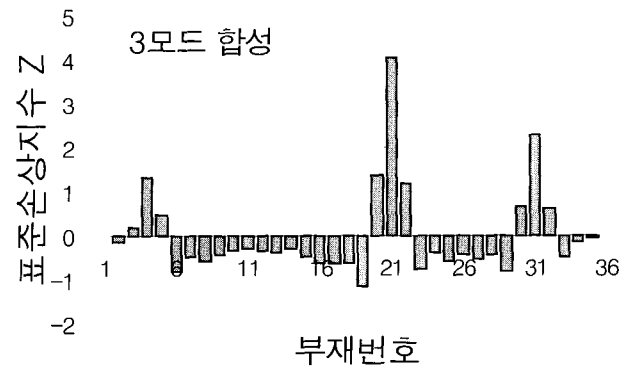
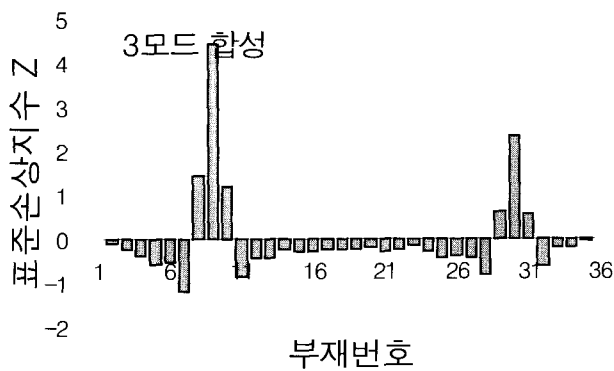
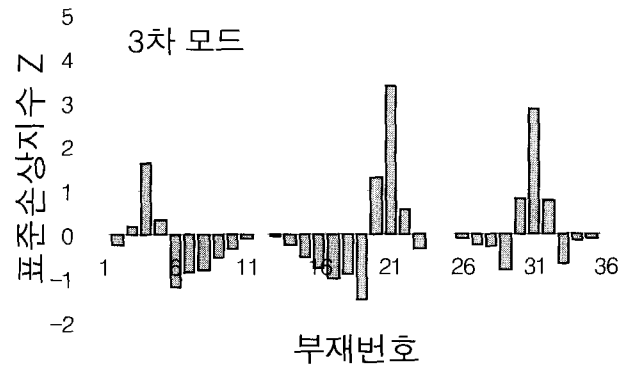
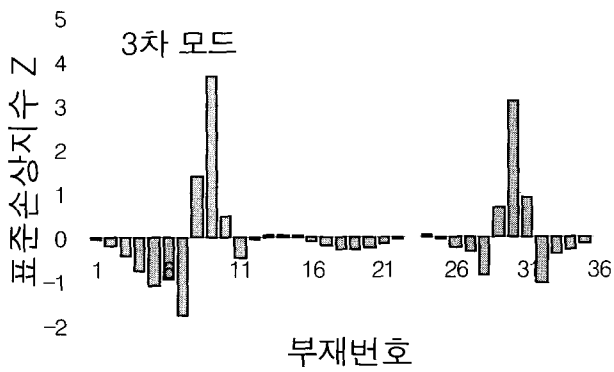
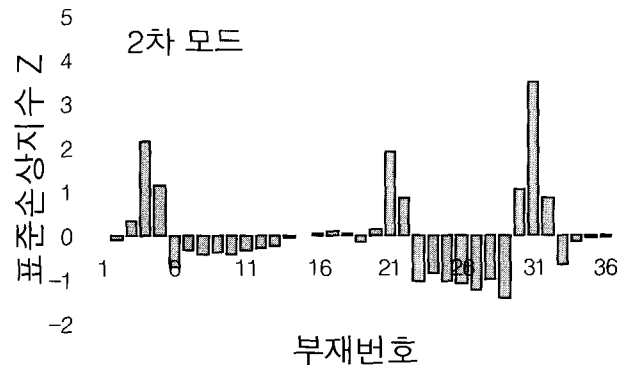
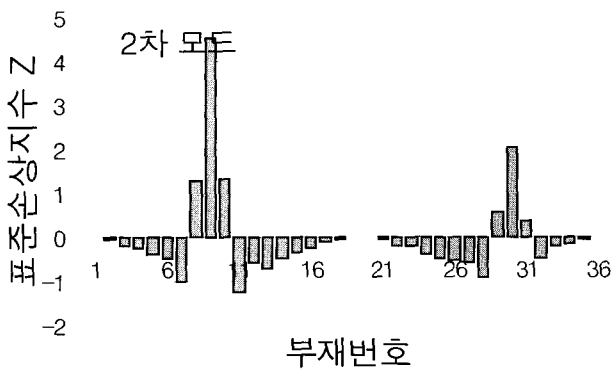
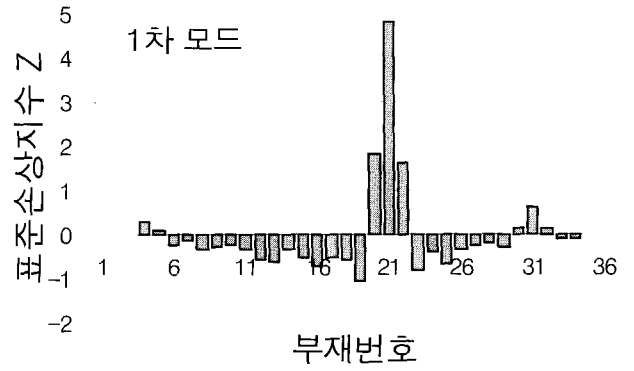
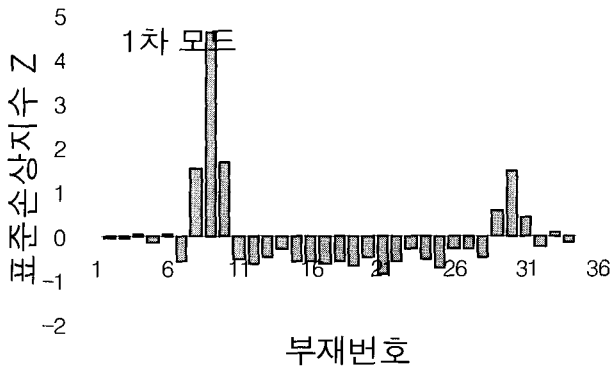


그림 5 손상 경우 3

그림 6 손상 경우 4

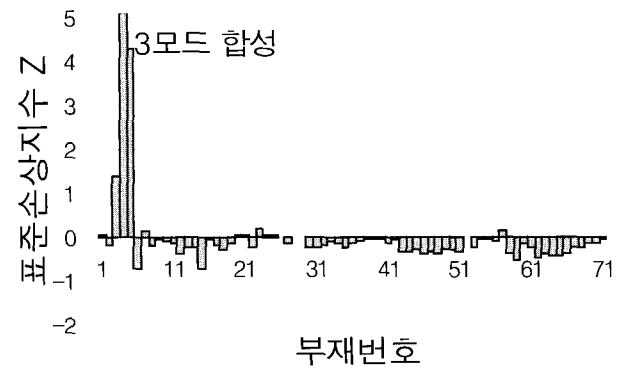
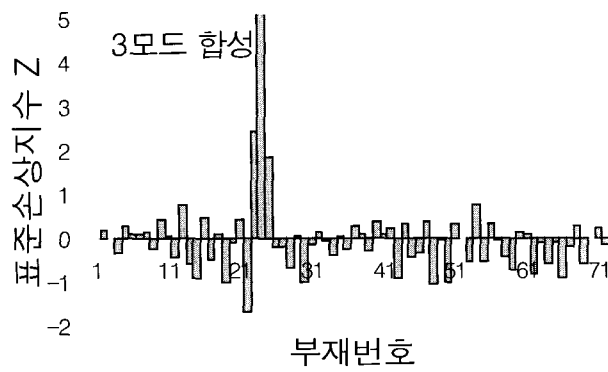
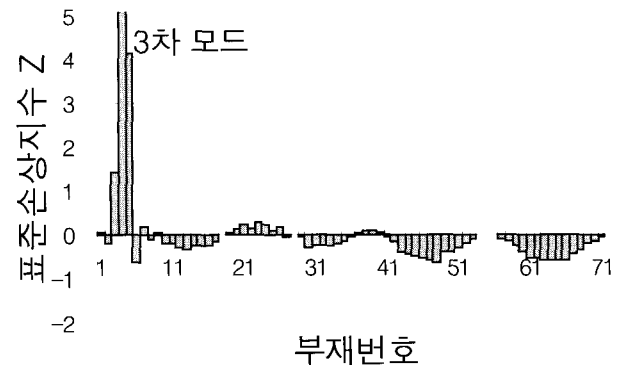
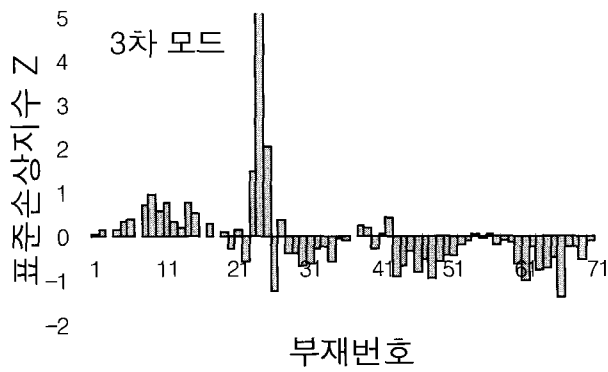
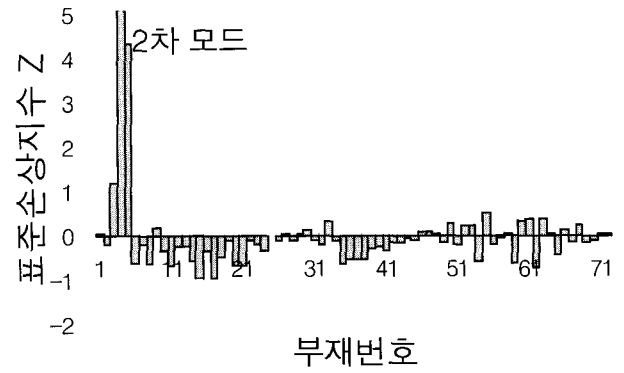
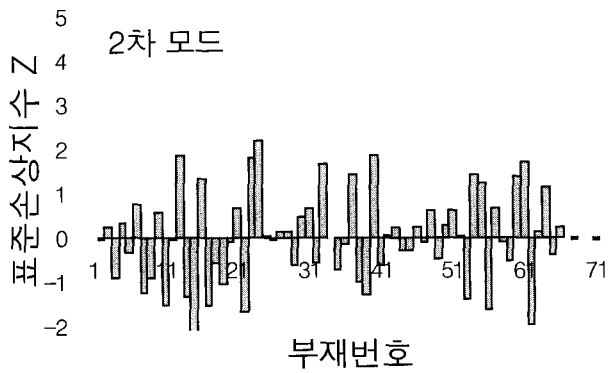
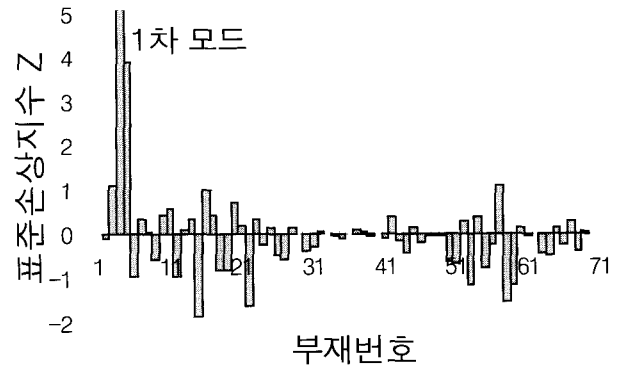
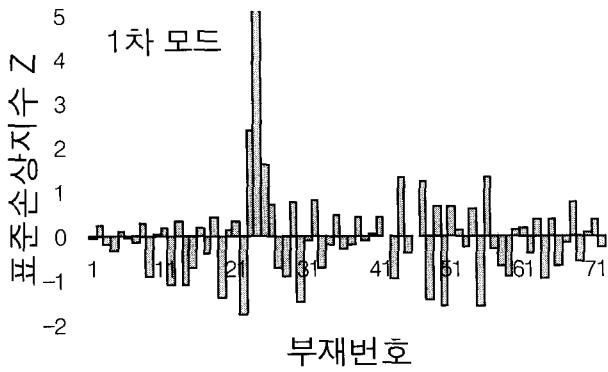


그림 7 손상 경우 5

그림 8 손상 경우 6

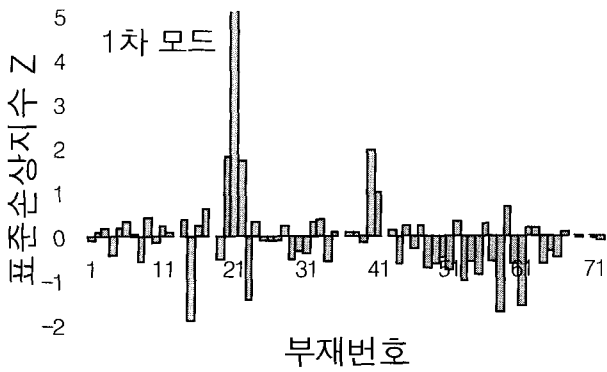


그림 9 손상 경우 7

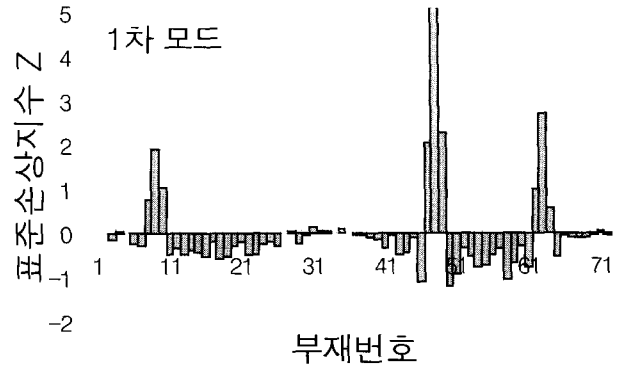
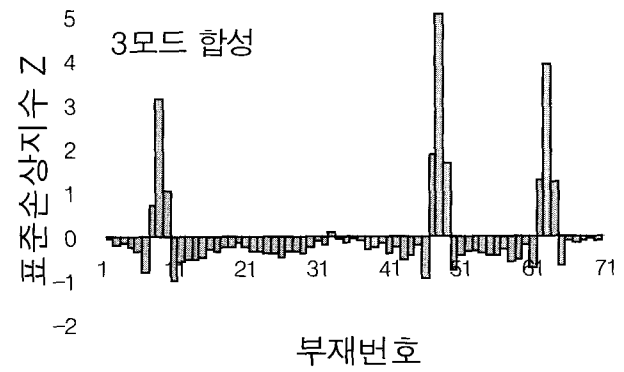
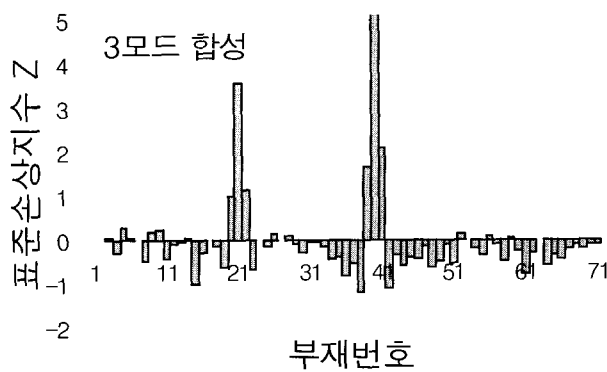
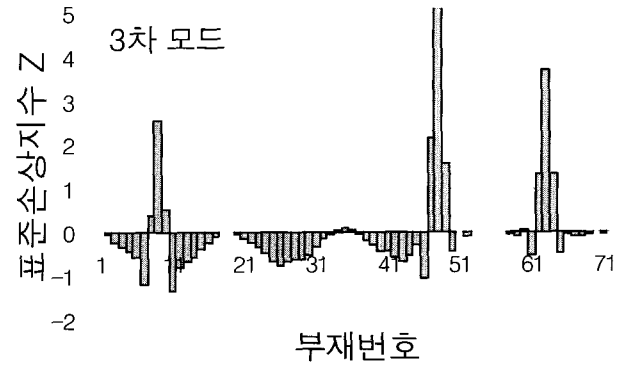
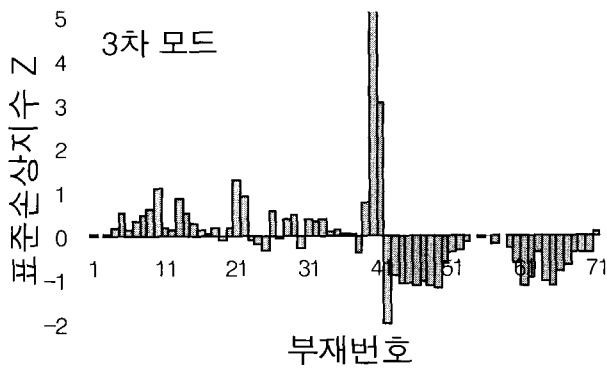
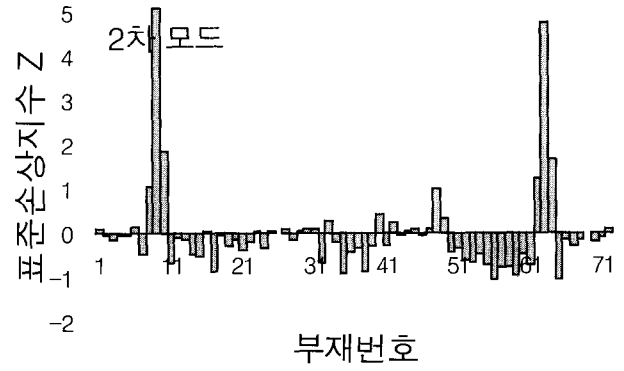
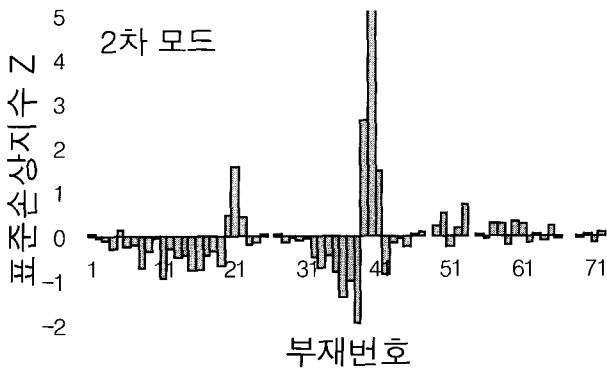


그림 10 손상 경우 8





예를 들어, 손상 경우 4는 단순보에서 부재 4번, 21번, 31번의 세 곳에서 각각 20%, 30%, 20%의 손상을 가한 경우로 그림 6에 나타난 결과를 살펴보면 1차 모드에서는 21번에서만 손상이 있음을 나타내고 있으나, 2차 모드와 3차 모드에서는 부재 21번 뿐 아니라 부재 4번과 31번에서도 손상의 징후를 보여주고 있다. 이는 그림 2에서 단순보의 1차 모드형상을 보면 빔 중앙부의 변형에너지가 양단부의 변형에너지보다 훨씬 크기 때문에 중앙부근의 부재 21번의 손상이 양단 부분의 손상탐지에 영향을 미친 것으로 판단되며, 2차 모드와 3차 모드에서는 3곳 손상 부위의 변형에너지가 거의 유사하므로 3곳 모두에서 손상의 징후를 보여주고 있다. 하지만 3모드를 합성하여 얻은 결과는 1차 모드에서 생긴 오류를 보완하여 주고 있음을 알 수 있다.

그림 7의 손상 경우 5에서도 이와 유사한 결과를 보여주고 있다. 손상 경우 5는 2연속보에서 부재 24번에 손상을 10%준 경우이다. 1차 모드와 3차 모드에서는 앞에 언급한 오류 없이 정확하게 손상을 탐지하였으나, 2차 모드만의 결과를 살펴보면 비록 부재 24번의  $Z_j$ 값이 가장 크지만 손상이 어느 부위에서 발생했는지를 판단할 수 없다. 손상의 위치는 2연속보 첫 번째 스패의 약 6m지점( $0.25m \times 24 = 6m$ )으로 그림 2에서 연속보의 2차 모드를 자세히 살펴보면 6m 지점 부근에서 빔의 곡률이 변화함을 알 수 있다. 따라서 2차 모드형상에 의한 변형에너지는 그 부분에서 매우 작아 이러한 결과를 초래했음을 알 수 있다. 하지만 손상 경우 5 역시 개별모드를 합성하여 3모드를 동시에 사용하면 부재 24번에 손상이 발생하였음을 확신할 수 있다. 그림 9, 10(손상 경우 7, 8)의 경우도 이와 유사하게 설명할 수 있으며, 3모드를 동시에 사용하였을 경우 개별 모드를 사용하였을 때 탐지하지 못한 부재의 손상을 완벽하게 탐지하였음을 알 수 있다.

만일  $Z_j$ 의 기준 값을 2라고 하면 3모드를 합성하였을 경우 총 14군데의 모의 손상 가운데 13곳의 손상을 탐지함으로써 93%의 성공률을 보여주고 있다. 모의 손상을 찾지 못한 1곳은 손상 경우 4의 4번 부재이나 그림 6에서 볼 수 있듯이 부재 4번에서도 손상의 징후가 있음을 뚜렷하게 나타내고 있다. 만일  $Z_j$ 의 기준 값을 1.5라고 하면(신뢰도 93%) 손상 탐지율은 100%이다.

이렇게 표준화된 손상지수를 이용하여 손상의 부위를 결정하면 식(7)로 손상 부재의 손상도를 추정할 수 있다. 표 2는  $Z_j$ 의 값이 2를 초과한 부재의 손상도를 모드 별로 구한 값이다. 표에서 볼 수 있듯이 손상 전과 손상 후의 모드형상으로부터 구한 손상도 추정 값은 실제 모의한 값보다 거의 유사하거나 약간씩 크게 추정하고 있는데 오차가 생기는 이유는 모드형상으로부터 변형에너지를 구하기 위하

표 2 모드 별 손상부위 탐지 및 손상도 추정 결과

손상 경우	모의 손상 부재	모드 별 결과			
		1차 ( $a_j$ )	2차 ( $a_j$ )	3차 ( $a_j$ )	모드합성 ( $a_j$ )
1	24	23(-0.05) 24(-0.10)	24(-0.11)	23(-0.03) 24(-0.23)	23(-0.03) 24(-0.14)
2	4	4(-0.64) 5(-0.44)	4(-0.62) 5(-0.39)	4(-0.59) 5(-0.36)	4(-0.62) 5(-0.40)
3	9 30	9(-0.36)	9(-0.32) 30(-0.20)	9(-0.31) 30(-0.20)	9(-0.33) 30(-0.21)
4	4 21 31	21(-0.32)	4(-0.24) 31(-0.21)	21(-0.32) 31(-0.21)	21(-0.32) 31(-0.20)
5	24	23(-0.04) 24(-0.10)	24(-0.12)	24(-0.13) 25(-0.03)	23(-0.05) 24(-0.11)
6	4	4(-0.62) 5(-0.43)	4(-0.60) 5(-0.40)	4(-0.64) 5(-0.42)	4(-0.62) 5(-0.41)
7	21 40	21(-0.13)	39(-0.08) 40(-0.23)	40(-0.24) 41(-0.10)	21(-0.12) 40(-0.26) 41(-0.10)
8	9 48 63	48(-0.34) 63(-0.23)	9(-0.26) 63(-0.22)	9(-0.18) 48(-0.35) 63(-0.25)	9(-0.21) 48(-0.35) 63(-0.23)

여 곡률을 계산할 때 발생하는, 즉 모드형상을 2차 미분을 할 때 생기는 수치적 오차로 인한 결과로 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 빔 구조물의 손상을 찾아내고 손상의 정도를 추정할 수 있는 알고리즘을 제안하였다. 알고리즘의 이론적 배경은 구조물의 동적특성 중의 하나인 모드형상을 이용하여 손상 전과 손상 후의 모달 변형에너지의 변화로부터 손상의 위치를 탐색하고, 손상이 있다고 판단한 부재의 손상도는 강성 저하의 크기를 추정하는 것이다. 제안된 방법의 우수성과 효용성을 입증하기 위하여 단순보와 2연속보의 해석 모델로 8가지의 손상 경우를 모사하여 손상 전과 손상 후의 모드형상만을 이용하여 손상탐지와 손상도를 추정하였다. 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 본 연구에서 제안한 손상탐지 이론은 빔 구조물에서 발생하는 손상의 위치를 파악하고 그 손상의 정도를 추정하는데 효과적으로 사용할 수 있다. 예제 구조물의 결과에 따르면, 표준화된 손상지수의 기준 값을 2로 하였을 때 총 14곳의 손상 부재 중 13곳의 손상을 정확하게 탐지하였다.
- (2) 개별 모드를 사용할 때 손상이 만일 모드의 노드점이 나 곡률이 변하는 부근에서 발생하면 그 부재의 변형

에너지가 매우 작기 때문에 손상탐지 결과에 오류가 생길 수 있으나, 이러한 단점은 저차 몇 개의 모드를 동시에 합성하여 사용하면 쉽게 해결할 수 있다.

- (3) 손상도의 경우 본 연구의 제안 식으로 추정된 결과 모든 손상 경우에서 모사한 크기보다 약간씩 크게 추정하였으며, 실제 모사한 값과 추정 값의 오차는 모드형상의 곡률을 계산할 때 발생하는 수치적 오차에 기인한 것으로 판단된다.

### 참 고 문 헌

- 1) Doebling, S.W., Farrar, C.R., Prime, M.B. and Shevitz, D.W., "Damage Identification and Health Monitoring of Structural and Mechanical Systems from Changes in Their Vibrational Characteristics: A Literature Review", Technical Report LA-13070-MS, *Los Alamos National Laboratory*, 1996
- 2) Vandiver, J.K., "Detection of Structural Failure on Fixed Platforms by Measurement of Dynamic Response", *Journal of Petroleum Technology*, 1977, pp.305~310
- 3) Duggan, D.M., Wallace, E.R. and Caldwell, S.R., "Measured and Predicted Vibration Behavior of Gulf of Mexico Platforms", Proceedings of the 12th Annual Offshore Technology Conference, *Houston, Texas*, 1980, pp.3864
- 4) Gudmundson, P., "Eigenfrequency Changes of Structures Due to Cracks, Notches, or Other Geometrical Changes", *J. Mechanics and Physics of Solids*, Vol.30, No.5, 1982, pp.339~353
- 5) Pandey, A.K., Biswas, M. and Samman, M.M., "Damage Detection from Changes in Curvature Mode Shapes", *Journal of Sound and Vibration*, Vol.145, No.2, 1991, pp.321~332
- 6) Cawley, P. and Adams, R.D., "The Locations of Defects in Structures from Measurements of Natural Frequencies", *J. Strain Analysis*, Vol. 14, No.2, 1979, pp.49~57
- 7) Stubbs, N. and Osegueda, R., "Global Non-Destructive Damage Evaluation in Solids", *Int. J. Analytical and Experimental Modal Analysis*, Vol.5, No.2, 1990, pp.67~79
- 8) 김정태, 류연선, 조현만, "고유진동수 이용 손상추정법과 모드형상 이용 손상추정법에 의한 PSC 보의 비파괴 손상검색", 한국전산구조공학회 논문집, 제15권 제1호, 2002, pp.43~58
- 9) Elkordy M.F., Chang, K.C. and Lee, G.C., "A Structural Damage Neural Network Monitoring System", *Microcomputers in Civil Engineering*, Vol.9, No.2, 1994, pp.83~96
- 10) Rhim, J. and Lee, S., "A Neural Network Approach for Damage Detection and Identification of Structures", *AIAA/ASME Adaptive Structures Forum*, 1994, pp.173~180
- 11) Garcia, G.V., "Evaluation of Relative Performance of Classification Algorithms for Nondestructive Damage Detection", Dissertation for Ph.D. in Civil Engineering, *Texas A&M University*, 1996
- 12) Farrar, C. and Jauregui, D., "Damage Detection Algorithms Applied to Experimental and Numerical Modal Data from the I-40 Bridge", Technical Report, *Los Alamos National Laboratory*, 1996
- 13) Nadler, M. and Smith, E.P., Pattern Recognition Engineering, *John Wiley & Sons, New York*, 1993
- 14) Gibson, J.D. and Melsa, J.L., Introduction to Nonparametric Detection with Applications, *Academic Press, New York*, 1975