

## 진동감시를 통한 트러스 구조물의 진단 Diagnostics of Truss Structures via Vibration Monitoring

박 수 용\* / 김 정 태\*\* / 김 연 복\*\*\*  
Park, Sooyong / Kim, Jeong-Tae / Kim, Yeon-Bok

---

### Abstract

In this paper the feasibility of Nondestructive Damage Detection (NDD) in large structures is demonstrated via simulating vibration monitoring of such structures. The theory of NDD for truss type structures is formulated. To examine the feasibility of the theory, a finite element model of a 3-D truss structure, which consists of sixteen bays and includes 246 elements, is developed to simulate damage. Four damage cases are simulated numerically and the cases range from the structure being damaged in one location to the structure being damaged in three locations. For the given modal parameters, this study reveals very good results for small amounts of damage as well as large damage.

*Keywords* : Systematic diagnosis, Nondestructive damage detection, Large structures, Vibrational modes, Mode shapes

---

### 요 지

본 논문에서는 모의실험을 이용하여 진동감시를 통한 거대 구조물에서의 비파괴 손상탐지의 타당성을 입증하였다. 트러스 형식의 구조물에 대한 비파괴 손상탐지 이론을 정립하였다. 이 이론의 타당성 조사를 위하여 16개의 격간과 246개의 요소로 구성되어 있는 3차원 트러스 구조물을 유한요소로 모델링 하였으며, 이 모델을 이용하여 모의 손상을 가하였다. 손상의 경우는 총 4가지로 대상 구조물의 한 곳에서 손상이 발생한 경우부터 세 곳에서 손상이 발생한 경우까지를 고려하였다. 주어진 모달 매개변수를 이용하여 미세 손상 뿐 아니라 큰 손상에 대해서도 결과가 잘 일치함을 알 수 있었다.

**핵심용어** : 체계적 진단, 비파괴 손상 탐지, 대형 구조물, 진동모드, 모드형상

---

\* 정회원, 건설기술연구원 토목연구부 선임연구원

\*\* 부경대학교 해양공학부 부교수

\*\*\* 정회원, 건설기술연구원 토목연구부 수석연구원

## 1. 서 론

토목, 건축 구조물은 지진하중, 교통하중, 바람 하중 등 다양한 하중조건에 견딜 수 있도록 설계 되어 있지만, 초기 설계와 시공이 잘 이루어졌다 하더라도 시간이 흐름에 따라 노후화 현상, 피로 하중, 또는 예기치 못한 하중 등으로 인하여 구조물 내 손상이 축적되기 마련이다. 국내에서도 성수대교나 당산철교의 교훈으로 잘 알려져 있다시피 이러한 손상 및 원인을 조기에 발견하고 적절한 조치를 취하지 않으면 구조물의 파괴 등으로 인하여 막대한 인명피해와 경제적 손실을 입게 된다. 따라서 기존구조물의 손상위치 및 손상도를 정확하게 파악할 수 있는 방법론의 개발이 시급한 실정이다.

지난 수십 년 간 세계적으로 구조물의 동적 특성 변화를 이용한 전체적인 비파괴 손상 평가방법에 관한 연구가 활발히 진행되어 왔다. 여기서 전체적이란 단어의 의미는 초음파시험, X-선시험, eddy current 등과 같은 국부적 탐사 방법과는 달리 구조물내의 손상을 그 구조계의 전체에 속하는 특성(예를 들어, 주파수, 모드형상 등)을 이용하여 손상을 찾아내는 것을 뜻한다. 이러한 방법들은 각각의 성능에 따라 다음과 같이 네 단계로 분류 할 수 있다 (Rytter, 1993): (1) I 단계 방법 손상이 구조물 내에 있는지 없는지만을 찾아내는 방법 (Vandiver, 1977; Kenley 등, 1980; Crohas 등, 1982; Kato 등, 1984; Mazurek 등, 1990); (2) II 단계 방법 손상여부 뿐 아니라 손상위치도 찾아내는 방법 (Pandey 등, 1991; Chance 등, 1994; Toksoy 등, 1994; Mayes, 1995); (3) III 단계 방법 손상여부, 손상위치 및 손상정도를 산출하는 방법 (Cawley 등, 1979; Stubbs 등, 1992; Spillman 등, 1993; Kim 등, 1995; Zimmerman 등, 1994; 윤정방 등, 1997; Park 등, 1998); (4) IV 단계 방법 손상여부, 손상위치, 손상정도 및 손상이 구조물에 미치는 영향을 평가하는 방법 (Yao, 1980; Stubbs 등, 1992; Park, 1997; Park 등, 1997).

본 연구의 목적은 구조물의 동적특성을 이용하여 대형 구조물에 대한 비파괴 손상탐지의 타당성을 조사하는 것으로 다음과 같은 과제를 수행

하였다.

첫째, 모드형상에 따른 변형에너지를 이용하여 트러스 구조물에 적용할 수 있는 비파괴 손상탐지 이론을 공식화하여 정립하였다.

둘째, 16개의 격간과 246개의 요소로 구성되어 있는 3차원 트러스 교량을 유한요소로 모델링 하였다.

셋째, 네 가지 경우의 모의 손상에 대하여 이론의 타당성을 조사 하였다

## 2. 비파괴 손상탐지 이론

### 2.1 손상위치 추정

여기서  $k_j$ 는  $j$ 번째 부재의 강성,  $i, j$ 는  $i$ 번째 모드에서  $j$ 번째 부재의 변위,  $NE$ 는 부재의 수를 나타낸다.

$$F_{ij} = \frac{k_j(\Delta_{ij})^2}{\sum_{j=1}^{NE} k_j(\Delta_{ij})^2} \quad (1)$$

손상된 구조물에 대한 변수를 별표(\*)로 표시하면 식(1)은 다음과 같다. 손상이 없는 트러스 구조물에서  $i$ 번째 모드의 동적 변형에너지에 대한  $j$ 번째 부재가 가지는 민감도를  $F_{ij}^*$ 라 하면

$$F_{ij}^* = \frac{k_j^*(\Delta_{ij}^*)^2}{\sum_{j=1}^{NE} k_j^*(\Delta_{ij}^*)^2} \quad (2)$$

여기서  $F_{ij}$ 와 사이에는 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$F_{ij}^* F_{ij} = F_{ij} + dF_{ij} \quad (3)$$

만일,  $A = k_j(\Delta_{ij})^2 = \frac{A_j E_j}{L_j} (\Delta_{ij})^2$ ,  $B = \sum_{j=1}^{NE} k_j(\Delta_{ij})^2 = \sum_{j=1}^{NE} \frac{A_j E_j}{L_j} (\Delta_{ij})^2$  으로 정의하면 식(1)로부터

$$dF_{ij} = \frac{dA}{B} - \frac{A dB}{B^2} = \frac{A}{B} \left( \frac{dA}{A} - \frac{dB}{B} \right) \cong \frac{dA}{B} \quad (4)$$

를 얻을 수 있다. 식  $\frac{dB}{B}$  를 무시 할 수 있다. (4)에서 국부적인 손상으로 부터 발생하는 변형에너

지의 차이  $dA$ 는 전체 변형에너지의 차이  $dB$ 와 같고,  $B/A$ 의 관계식이 성립하기 때문에 두 번째 항인  $\frac{dB}{B}$ 를 무시할 수 있다.

식  $X = k_j$ ,  $Y = (\Delta_{ij})^2$ ,  $dK = dk_j$ 로 치환하면 식(4)는 다음과 같이 다시 쓸 수 있다. 그리고 이를 간단히 하기 위해

$$dF_{ij} = \frac{1}{B} \left[ \frac{\partial A}{\partial X} \frac{\partial X}{\partial K} dK + \frac{\partial A}{\partial Y} \frac{\partial Y}{\partial K} dK \right] \quad (5)$$

여기서  $\frac{\partial A}{\partial X} = (\Delta_{ij})^2$ ,  $\frac{\partial X}{\partial K} = 1$ ,  $\frac{\partial A}{\partial Y} = k_j$  이  $\frac{\partial Y}{\partial K} = 2(\Delta_{ij})$ 라

$$\frac{\partial Y}{\partial K} = \frac{\partial((\Delta_{ij})^2)}{\partial K} = \frac{\partial\left(\frac{P}{K}\right)^2}{\partial K} = \frac{-2(\Delta_{ij})^2}{k_j} \text{로 표현할}$$

수 있다고 정의하면, 힘  $P$ 를 되고,

$$B \cdot \frac{\partial A}{\partial X} \cdot \frac{\partial X}{\partial K} + \frac{\partial A}{\partial Y} \cdot \frac{\partial Y}{\partial K} \text{를 식(5)에 대입하면 및}$$

$$dF_{ij} = -F_{ij} \frac{dK}{k_j} \quad (6)$$

를 얻을 수 있다.

식  $\beta_j$ 에 관하여 정리하면(6)을 식(3)에 대입하고 손상지표

$$\beta_j = \frac{k_j^*}{k_j} = \frac{\frac{f_{ij}^*}{f_{ij}} + 1}{2} \quad (7)$$

여기서  $f_{ij} = (\Delta_{ij})^2 / \sum_{j=1}^{NE} (\Delta_{ij})^2$ ,  $f_{ij}^* = (\Delta_{ij}^*)^2 / \sum_{j=1}^{NE} (\Delta_{ij}^*)^2$ 이다.

그리고 문제는 식  $f_{ij}^*/f_{ij}$ 항의 분자, 분모 양쪽에 1을 더해 줌으로써 해결할 수 있으며, 이것은  $f$ 함수의 영역을 단순히 영역(0,1)의 함수에서 영역(1,2)의 함수로 옮기는 것이다. 식(7)을 다시 정리하면(7)의 손상지표를 실제 구조물에 적용할 때, 만일 구조물의 부재가 어떤 모드의 노드점이나 근처에 있을 때에는 그 부재의 변형에너지가 다른 부재의 변형에너지보다 상대적으로 매우 작기 때문에 잘못된 결과를 초래할 수도 있다. 이러한 제한적 조건에 따른문제는  $f_{ij}^*/f_{ij}$ 항의 분자, 분모

양쪽에 1을 더해 줌으로써 해결할 수 있으며, 이것은  $f$ 함수의 영역을 단순히 영역(0,1)의 함수에서 영역(1,2)의 함수로 옮기는 것이다. 식(7)을 다시 정리하면

$$\beta_j = \frac{\frac{f_{ij}^* + 1}{f_{ij} + 1} + 1}{2} \quad (8)$$

이 되며, 만일 다수의 모드(NM)를 동시에 사용하게 되면

$$\beta_j = \frac{\frac{\left(\sum_{i=1}^{NM} f_{ij}^*\right) + 1}{\left(\sum_{i=1}^{NM} f_{ij}\right) + 1} + 1}{2} \quad (9)$$

로 표현할 수 있다.

손상지표를 계산한 후 손상위치를 결정하는 기준은 통계적 이론으로 구할 수 있다. 각 부재로부터 구한 1,2, 3,...,NE값을 확률 변수(random variable)로 고려하여 표준화된 손상지표를 구하면

$$Z_j = \frac{\beta_j - \mu_\beta}{\sigma_\beta} \quad (10)$$

여기서  $\mu_\beta$ 와  $\sigma_\beta$ 는 각각 손상지표  $j$ 의 평균과 표준편차를 나타낸다. 손상위치 결정에 있어서 마지막 단계는 그룹 분류이다. 그룹 분류란 어떠한 객체를 대상으로 관찰한 결과를 여러 개의 가능한 그룹 중 하나로 귀속시키는 것이다. 본 연구에서는 두 개의 그룹으로 분류할 수 있는데 손상이 없는 부재와 손상이 있는 부재로 분류할 수 있다. 여기서 객체를 대상으로 관찰한 결과는  $j$ 이다. 그룹 분류를 하기위해 여러가지의 테크닉을 이용할 수 있으나 비교적 이용이 쉬운 Neyman-Pearson 기준(Gibson 등, 1975)을 택하여 사용하였으며 다음과 같은 두 가지 경우의 가설을 설정할 수 있다: (1) 가설  $H_0$  구조물 내  $j$ 번째 부재에 손상이 없음; (2) 가설  $H_1$  구조물 내  $j$ 번째 부재에 손상이 있음. 식(10)에서 구한  $Z_j$ 값으로부터 그 부재에 손상이 있는지 없는지를 판별할 수 있으며, 만일  $Z_j > 3$ 이면 가설  $H_1$ 을 택하여 구조물에 손상이 있음

을 나타내고, Zj이면 가설 Ho를 택하여 손상이 없음을 결정한다.

## 2.2 손상도 추정

식(7)에서 나타낸 바와 같이 손상지표는 손상이 없는 부재의 강성과 손상이 있는 부재의 강성의 비이다. j1이면 그 부재는 손상이 있는 것을 의미하며 트러스 구조물의 경우 모든 부재에서 j를 구할 수 있다. 식(10)에서 Zj를 구하여 부재에 손상이 있다고 판정되면, 그 부재의 손상도는 부재강성의 분수적 차이로 정의하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\alpha_j = \frac{k_j^* - k_j}{k_j} = \frac{1}{\beta_j} - 1 \quad (11)$$

따라서 만일 부재에 손상이 있다면  $\alpha_j < 0$ 이고,  $\alpha_j = -1$ 면 그 부재의 모든 강성이 손상된 경우이다.

## 3. 유한요소 모델

2절에서 언급한 손상탐지 기법을 검증하기 위해 3차원 트러스 교량을 대상 구조물로 선정하였고, 그림 1과 같이 유한요소를 이용하여 모형화하였다. 그림 1에서 보는 바와 같이 대상 구조물은 3차원 트러스 구조물로서 총길이는 161m이고 양단에서 교각에 의해 지지되며 연속 경간의 한 경간으로 가정하였다. 16개의 격간과 총 246개의 트러스 부재로 상하현재, 수직재, 사재, 브레이싱재 등으로 구성되어 있다. 인접경간과 연속으로 모델링하기 위하여 8개의 스프링요소를 양단 상현재에 Y축과 Z축 방향으로 연결하였으며, 12개의 스프링요소를 양단 하현재에 X축, Y축 및 Z축 방향으로 연결하였다. 하현재에 연결되어 있는 스프링 중 X축 방향의 4개 스프링은 교각의 수직방향 유연성을 고려하였다. 트러스 부재의 재료적 성질은 표 1에 기록하였다. 모달(modal) 매개변수를 얻기 위해 동적해석을 수행하였으며, 모드형상은 각 조

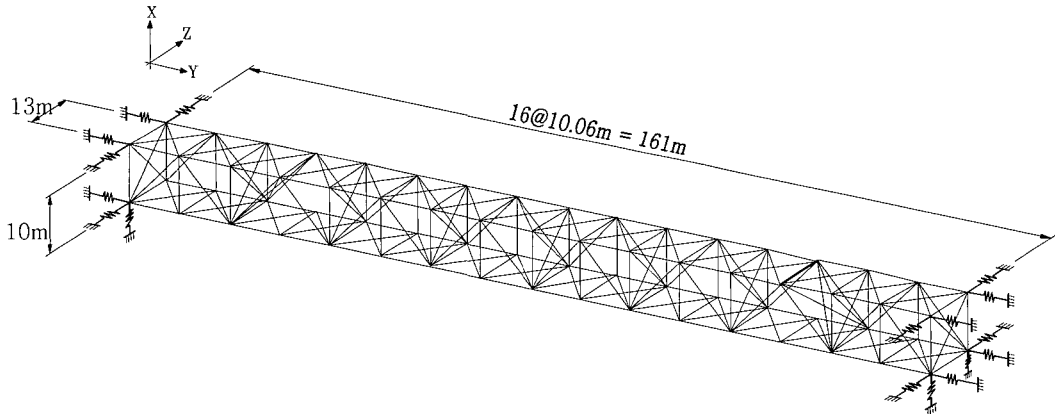


그림 1. 트러스 유한요소모델

표 1. 트러스 부재의 재료적 성질

부재	탄성계수(kPa)	포아송비	밀도(kg/m <sup>3</sup> )
상·하현재	212 x 10 <sup>6</sup>	0.3	7850
사재	175 x 10 <sup>6</sup>	0.3	7850
그 외의 부재	166 x 10 <sup>6</sup>	0.3	7850

인트에 68개의 모의 센서를 X, Y 및 Z축으로 부착한 것으로 가정하여 해석하였다. 본 연구에서 손상추정을 위해 사용한 모드형상은 그림 2와 같다.

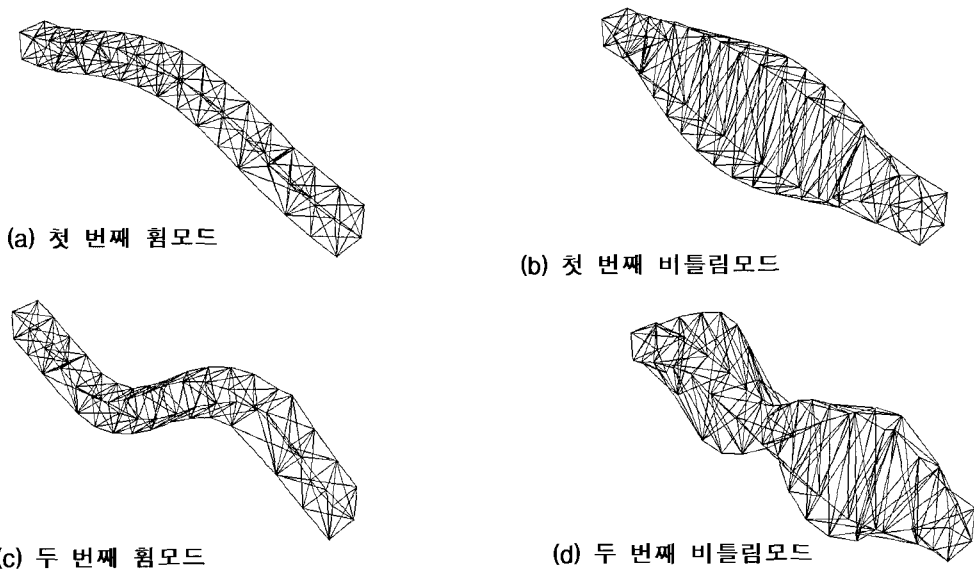


그림 2. 대상 트러스 구조물의 모드형상

**4. 모의실험을 통한 손상탐지 이론의 검증**

**4.1 손상시나리오**

모의 손상과 탐지를 위하여 각 부재에 번호를 부여하였다. 손상의 경우는 모두 4가지 경우를 고려하였으며, 손상의 범위는 구조물 내 한 곳에 손상이 발생한 경우로부터 세 곳이 손상된 경우까지이며, 손상의 위치 및 정도는 다음과 같다.

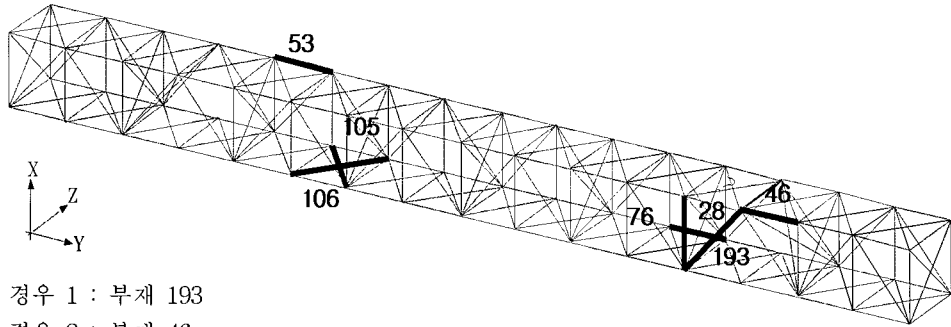
- 손상경우 1 : 193번 부재 강성 2% 감소
- 손상경우 2 : 46번 부재 강성 5% 감소
- 손상경우 3 : 105번, 106번 부재 강성 30% 감소
- 손상경우 4 : 28번, 53번, 76번 부재 강성 30% 감소

4가지 경우에 해당되는 부재의 위치는 그림 3에 표시하였다. 손상이 없는 경우와 각각의 손상 경우에 대하여 동적해석을 수행하여 모드형사사용한 4개 모드의 고유진동수를 표 2에 정리하였다.

**4.2 손상위치 및 손상도 추정**

손상위치 및 손상도 추정이론을 각각의 손상경우에 대하여 적용하였다. 손상위치 추정 결과는 그림 4에서 그림 7에 나타내었다. 그림에서 보듯이 손상위치는 두 가지의 경우로 해석하였는데, 첫 번째는 각각의 개별모드를 이용하여 손상위치를 추정하는 것이고 두 번째는 4개의 모드를 동시에 사용하여 손상위치를 추정하는 것이다. 개별모드를 사용할 때는 식(8)을 이용하여 각 부재에 대

손상경우	고유진동수(Hz)			
	첫 번째 휨모드	첫 번째 비틀림모드	두 번째 휨모드	두 번째 비틀림모드
손상없음	0.9798	1.6557	2.1455	3.2315
경우 1	0.9796	1.6554	2.1453	3.2314
경우 2	0.9797	1.6555	2.1451	3.2311
경우 3	0.9797	1.6487	2.1455	3.2283
경우 4	0.9785	1.6546	2.1326	3.2247



- 손상 경우 1 : 부재 193
- 손상 경우 2 : 부재 46
- 손상 경우 3 : 부재 105, 106
- 손상 경우 4 : 부재 28, 53, 76

그림 3. 각손상 경우 손상부재 위치

하여 손상지표를 계산하였으며 4개의 모드를 동시에 사용할 때는 식(9)을 이용하였다. 이렇게 계산된 한 셀(set)의 데이터는 손상위치를 결정하는 기준(decision rule)에 적용하여 손상위치를 분류하였으며, 일단 손상이 있다고 결정된 부재에 대해서는 식(11)을 이용하여 손상도를 계산하였다. 본 연구에서 제안한 방법으로 추정된 각 손상경우의 손상위치와 손상도는 표 3과 같으며 정해와 함께 나열하였다.

### 5. 결과토의

4가지 손상경우의 손상위치 예측결과에 대한 평가는 표 4에서 표 7까지 요약하여 정리하였다. 평가의 기준은 사용한 모드 개수와 손상위치 개수의 함수로 나타내었다. 제안된 이론의 정확도를 구하기 위해 false positive수(실제로손상이 없으나 예측 결과 손상이 있다고 판정한 예)와 false negative수(실제로 손상이 있으나 예측 결과 손상이 없다고 판정한 예)를 탐지 확률(probability of detection)과 함께 나타내었다. 손상탐지를 위하여 대상구조물의 동적특성 중 오직 한 개의 모드만을 사용하였을 때, 손상위치가 두 군데였을 경우까지는 100% 정확하게 손상위치를 찾았으나 손상위치가 세 군데였을 경우는 손상위치를 찾을 확률이 0100%의 분포를 보였다. 그러나 4개의 모드를 동시에 사용하였을 경우에는 모든 경우에서 정확하게 손상위치를 추정할 수 있었다. 손상도 추정의 경우 표 3에서 알 수 있듯이 4개의 모드를

동시에 사용하였을 경우 손상위치가 한 군데였을 경우에는 오차 없이 정확하게 추정하였으며, 손상위치가 두 군데 이상이였을 경우 최소 3.3%에서 최대 10%의 오차를 보였다.

손상위치 및 손상도 추정결과를 요약하면 다음과 같다: (1) 본 연구에서 제안한 동적특성을 이용한 비파괴 손상평가 방법은 대형 구조물에 손쉽게 적용할 수 있다; (2) 모드형상을 이용하여 손상부재의 수가 1개인 미세 손상 뿐 아니라 손상부재의 수가 3개인 큰 손상의 경우에도 정확하게 손상위치 및 손상도를 추정할 수 있었다; (3) 손상탐지는 여러 개의 모드를 사용하였을 경우 한 개의 모드를 사용하였을 경우보다 향상된 결과를 얻을 수 있었다.

### 6. 요약 및 결론

본 논문의 목적은 구조물의 동적특성(모드형상)을 이용하여 거대 구조물에 대한 비파괴 손상탐지의 타당성을 조사하는 것이었다. 3차원 트러스 형식의 구조물에 대해 손상위치 및 손상도를 추정하는 이론을 공식화하여 정립하였고, 실제 트러스 교량의 한 경간을 대표하는 유한요소모델을 통해 모의 실험을 수행하였다. 모의 실험은 구조물 내 한 곳에서 손상이 발생한 경우에서 세 곳에서 발생한 경우까지 총 4가지 경우를 고려하였다. 손상 전의 구조물과 손상 후 구조물의 모드형상을 이용한 결과 모의한 정해와 제안된 이론에 의해 추정한 예상해가 잘 일치함을 알 수 있었다.

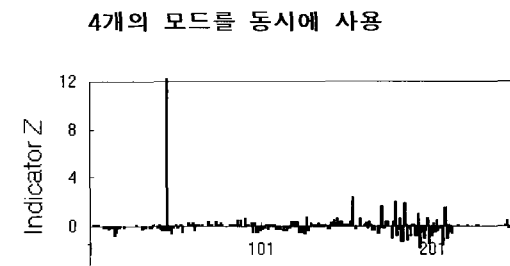
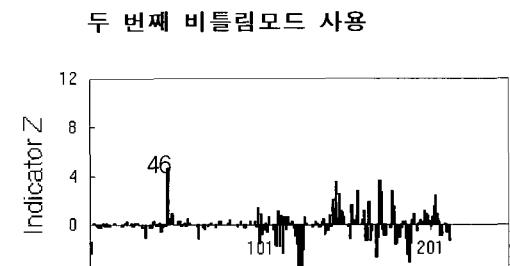
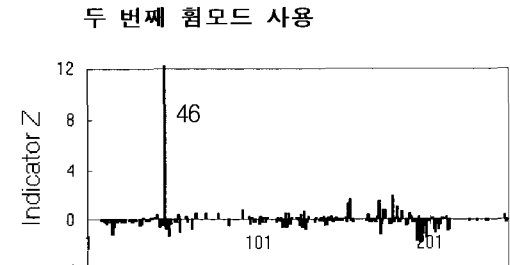
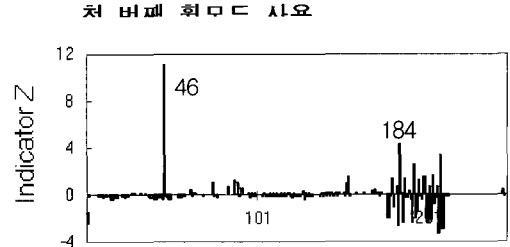
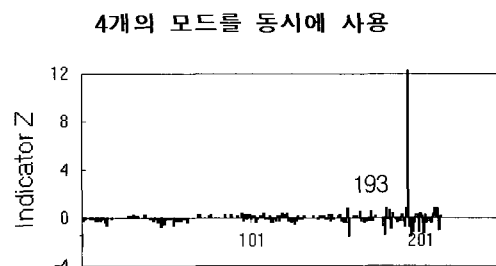
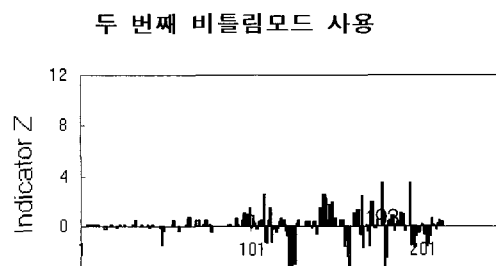
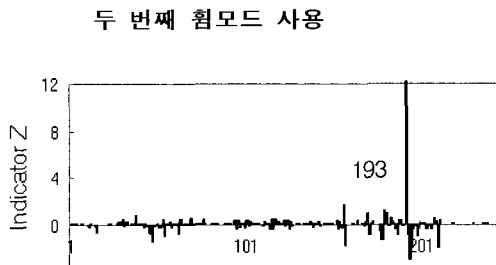
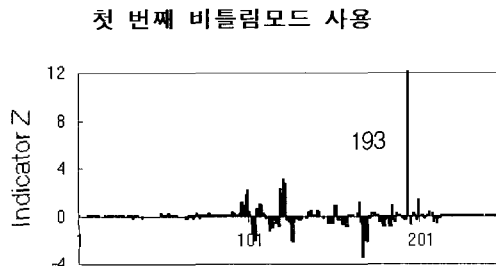
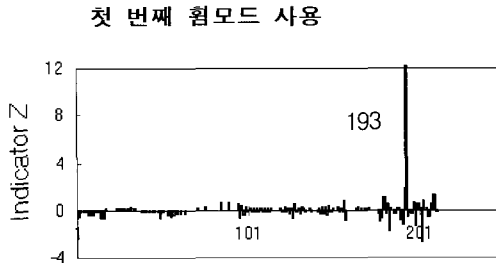


그림 4. 손상 경우 1 손상위치 추정결과 (모의 손상부재 193)

그림 5. 손상 경우 2 손상위치 추정결과 (모의 손상부재 46)

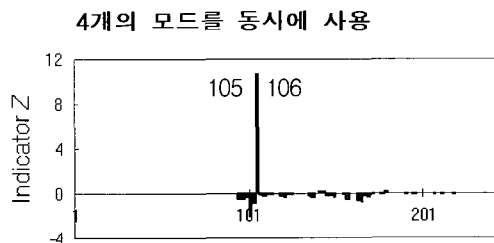
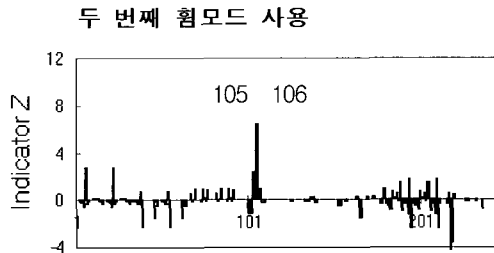
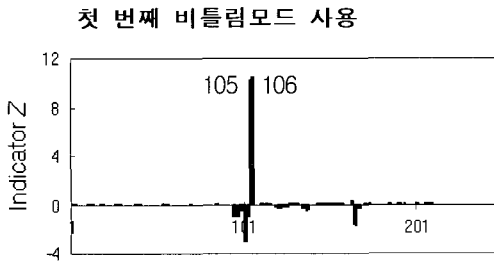
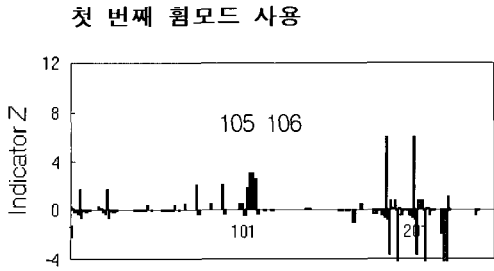


그림 6. 손상 경우 3 손상위치 추정결과  
(모의 손상부재 105, 106)

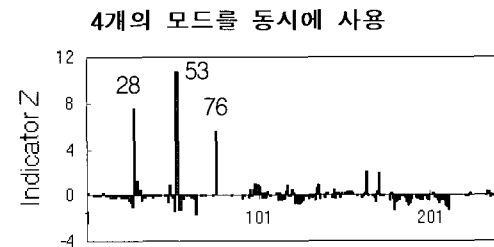
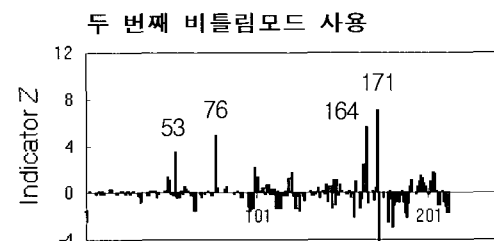
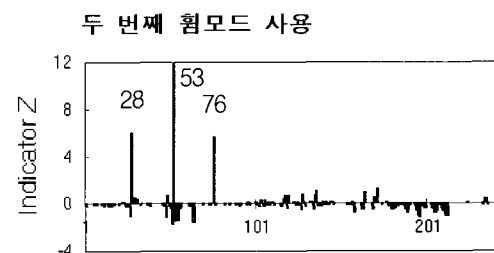
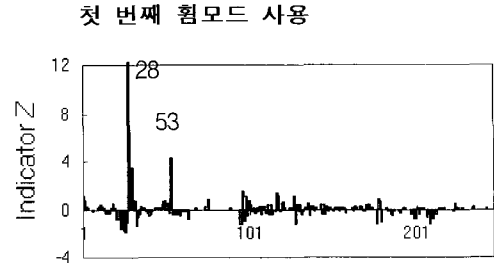


그림 7. 손상 경우 4 손상위치 추정결과  
(모의 손상부재 28, 53, 76)



표 3. 손상도 추정

손상경우	정확해	추정해
	부재(손상도)	부재(손상도)
경우 1		
첫 번째 휨	193(-0.02)	193(-0.02)
첫 번째 비틀림	193(-0.02)	193(-0.02), 121(-0.0004)
두 번째 휨	193(-0.02)	193(-0.02)
두 번째 비틀림	193(-0.02)	193(-0.02), 177(-0.001)
모든모드	193(-0.02)	193(-0.02)
경우 2		
첫 번째 휨	46(-0.05)	46(-0.05), 184(-0.002), 208(-0.004)
첫 번째 비틀림	46(-0.05)	46(-0.05), 119(-0.0003), 121(-0.0004), 122(-0.0004), 154(-0.003)
두 번째 휨	46(-0.05)	46(-0.05)
두 번째 비틀림	46(-0.05)	46(-0.05), 145(-0.001), 171(-0.001)
모든모드	46(-0.05)	46(-0.05)
경우 3		
첫 번째 휨	105(-0.3), 106(-0.3)	105(-0.09), 106(-0.09), 184(-0.002), 200(-0.002)
첫 번째 비틀림	105(-0.3), 106(-0.3)	105(-0.3), 106(-0.3)
두 번째 휨	105(-0.3), 106(-0.3)	105(-0.08), 106(-0.08)
두 번째 비틀림	105(-0.3), 106(-0.3)	105(-0.31), 106(-0.31)
모든모드	105(-0.3), 106(-0.3)	105(-0.29), 106(-0.29)
경우 4		
첫 번째 휨	28(-0.3), 53(-0.3), 76(-0.3)	28(-0.3), 30(-0.12), 53(-0.31)
첫 번째 비틀림	28(-0.3), 53(-0.3), 76(-0.3)	96(-0.01), 97(-0.01), 98(-0.01), 99(-0.006), 100(-0.006)
두 번째 휨	28(-0.3), 53(-0.3), 76(-0.3)	28(-0.27), 53(-0.28), 76(-0.32)
두 번째 비틀림	28(-0.3), 53(-0.3), 76(-0.3)	53(-0.32), 76(-0.38), 164(-0.03), 171(-0.03)
모든모드	28(-0.3), 53(-0.3), 76(-0.3)	28(-0.28), 53(-0.29), 76(-0.33)

표 4. 손상 경우 1의 손상위치 추정결과

모드	손상위치 개소	정확하게 찾은 개소(%)	No. of False Positives(%)	No. of False Negatives(%)
첫 번째 휨	1	1(100%)	0(0%)	0(0%)
첫 번째 비틀림	1	1(100%)	1(0.4%)	0(0%)
두 번째 휨	1	1(100%)	0(0%)	0(0%)
두 번째 비틀림	1	1(100%)	1(0.4%)	0(0%)
모든모드	1	1(100%)	0(0%)	0(0%)

표 5. 손상 경우 2의 손상위치 추정결과

모드	손상위치 개소	정확하게 찾은 개소(%)	No. of False Positives(%)	No. of False Negatives(%)
첫 번째 휨	1	1(100%)	2(0.8%)	0(0%)
첫 번째 비틀림	1	1(100%)	4(1.6%)	0(0%)
두 번째 휨	1	1(100%)	0(0%)	0(0%)
두 번째 비틀림	1	1(100%)	2(0.8%)	0(0%)
모든모드	1	1(100%)	0(0%)	0(0%)

표 6. 손상 경우 3의 손상위치 추정결과

모드	손상위치 개소	정확하게 찾은 개소(%)	No. of False Positives(%)	No. of False Negatives(%)
첫 번째 휨	2	2(100%)	2(0.8%)	0(0%)
첫 번째 비틀림	2	2(100%)	0(0%)	0(0%)
두 번째 휨	2	2(100%)	0(0%)	0(0%)
두 번째 비틀림	2	2(100%)	0(0%)	0(0%)
모든모드	2	2(100%)	0(0%)	0(0%)

표 7. 손상 경우 4의 손상위치 추정결과

모드	손상위치 개소	정확하게 찾은 개소(%)	No. of False Positives(%)	No. of False Negatives(%)
첫 번째 휨	3	2(66%)	1(0.4%)	1(34%)
첫 번째 비틀림	3	0(0%)	5(2%)	3(100%)
두 번째 휨	3	3(100%)	0(0%)	0(0%)
두 번째 비틀림	3	2(66%)	2(0.8%)	1(34%)
모든모드	3	3(100%)	0(0%)	0(0%)

## 참 고 문 헌

- 윤정방, 이형진 (1997) System Identification 기법을 이용한 교량의 안전진단 방법. 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 제 45권, 제 3호.
- Cawley, P., and Adams, R.D. (1979) The Locations of Defects in Structures from Measurements of Natural Frequencies. *J. Strain Analysis*, Vol. 14, No. 2, pp. 49-57.
- Chance, J., Tomlinson, G.R., and Worden, K. (1994) A Simplified Approach to the Numerical and Experimental Modeling of the Dynamics of a Cracked Beam. *Proc. of the 12th Int. Modal Analysis Conference*, Honolulu, Hawaii, Vol. 1, pp. 778-785.
- Crohas, H., and Lepert, P. (1982) Damage Detection Monitoring Method for Offshore Platforms Is Field Tested. *Oil and Gas J.*, Vol. 80, No. 8, pp. 94-103.
- Gibson, J.D., and Melsa, J.L. (1975) *Introduction to Nonparametric Detection with Applications*. Academic Press, New York, N.Y.
- Kato, M., and Shimada, S. (1984) Vibration of PC Bridge during Failure Process. *J. Struct. Engrg.*, ASCE, Vol. 112, pp. 1692-1703.
- Kenley, R.M., and Dodds, C.J. (1980) West Sole WE Platform: Detection of Damage by Structural Response Measurements. *Proc. of the 12th Annual Offshore Technology Conference*, Houston, Texas, Paper 3866.
- Kim, J.-T. & Stubbs, N. (1995) Model-uncertainty impact and damage-detection accuracy in plate girder. *J. Struct. Engrg.*, ASCE, Vol. 121, No. 10, pp. 1409-1417.
- Mayes, R.L. (1995) An Experimental Algorithm for Detecting Damage Applied to the I-40 Bridge over the Rio Grande. *Proc. of the 13th Int. Modal Analysis Conference*, Nashville, Tennessee, Vol. 1, pp. 219-225.
- Mazurek, D.F., and DeWolf, J.T. (1990) Experimental Study of Bridge Monitoring Technique. *J. Struct. Engrg.*, ASCE, Vol. 116, No. 9, pp. 2532-2549.
- Pandey, A.K., Biswas, M., and Samman, M.M. (1991) Damage Detection from Changes in Curvature Mode Shapes. *J. Sound and Vibration*, Vol. 145, No. 2, pp. 321-332.
- Park, S. (1997) *Development of a Methodology to Continuously Monitor the Safety of Complex Structures*. PhD dissertation, Texas A&M University, College Station, Texas, USA.
- Park, S., Stubbs, N., and Sikorsky, C. (1997) Linkage of Nondestructive Damage Evaluation to Structural System Reliability. *Proceedings of SPIE, Smart Structures and Materials 1997: Smart Systems for Bridges, Structures, and Highways*, Vol. 3043, 234-245.
- Park, S., Stubbs, N., and Bolton, R.W. (1998) Damage Detection on a Steel Frame Using Simulated Modal Data. *Proc. of 16th International Modal Analysis Conference*, Santa Barbara, California, pp. 616-622.
- Rytter, A. (1993) *Vibrational Based Inspection of Civil Engineering Structures*. PhD dissertation, University of Aalborg, Aalborg, Denmark.
- Spillman, W., Huston, D., Fuhr, P., and Lord, J. (1993) Neural Network Damage Detection in a Bridge Element. *SPIE Smart Sensing, Processing, and Instrumentation*, Albuquerque, New Mexico, Vol. 1918, pp. 288-295.
- Stubbs, N., Kim, J.T., and Topole, K. (1992) An Efficient and Robust Algorithm for Damage Localization in Offshore Platforms. *ASCE 10th Structures Congress 92*, San Antonio, Texas, pp. 543-546.
- Stubbs, N., Richardson, M., and Sikorsky, C. (1992) Nondestructive Damage Assessment of a Bridge Using Modal Testing and Structural Reliability. *Proc. 3rd Workshop on Bridge Engineering Research*

- in Progress*, La Jolla, California, pp. 63-66.
- Toksoy, T., and Aktan, A.E. (1994) Bridge-condition Assessment by Modal Flexibility. *Experimental Mechanics*, Vol. 34, No. 3, pp. 271-278.
- Vandiver, J.K. (1977) Detection of Structural Failure on Fixed Platforms by Measurement of Dynamic Response. *J. Petroleum Technology*, pp. 305-310.
- Yao, J.T.P. (1980) Damage Assessment of Existing Structures. *J. Engr. Mech. Div.*, ASCE, Vol. 106(EM4), pp. 785-799.
- Zimmerman, D.C., and Kaouk, M. (1994) Structural Damage Detection Using a Minimum Rank Update Theory. *ASME J. Vibration and Acoustics*, Vol. 116, No. 2, pp. 222-231.