

# 건전성 평가를 위한 대형 트러스 구조물의 모드분석

† 박수용

† 한국해양대학교 해양공간건축학부 교수

## Modal Analysis of a Large Truss for Structural Integrity

† Soo-Yong Park

† Division of Architecture and Ocean Space, Korea Maritime University, Pusan 606-791, Korea

**요약** : 구조물의 대표적 동적특성인 고유진동수 및 모드형상은 손상평가, 구조계추정기법 등과 결합한 구조건전성 평가분야에서 매우 중요한 기초 자료로 활용되고 있다. 그러나 해양구조물이나 대경간 교량과 같은 대형 구조물의 경우 진동원을 정확히 계측하기 힘들기 때문에 소규모의 구조물에 많이 쓰이는 기존의 모달 테스트 기법으로는 구조물의 진동특성을 구할 수 없다. 본 논문에서는 경간이 긴 대형 트러스 구조물을 대상으로 가속도 응답만으로 고유진동수 및 모드형상을 추출할 수 있는 방법을 연구하였다. 트러스 구조물의 수치해석 모델을 이용하여 가속도 응답 및 주파수 응답함수의 생성과정, 모드분석을 통한 고유진동수 및 모드형상 추출과정을 상세히 설명하였다. 제안한 방법으로 얻은 모드형상은 고유치 해석으로부터 계산된 모드형상과 비교하여 정확성을 검증하였으며, 모의 손상을 통한 손상평가기법에 적용하여 타당성을 입증하였다.

**핵심용어** : 대형구조물, 모드분석, 고유진동수, 모드형상, 손상평가

**Abstract** : Dynamic characteristics of a structure, i.e., natural frequency and mode shape, have been widely using as an input data in the area of structural integrity or health monitoring which combined with the damage evaluation and structural system identification techniques. It is very difficult, however, to get those information by the conventional modal analysis method from large structures, such as the offshore structure or the long-span bridge, since the source of vibration is not available. In this paper, a method to obtain the frequencies and the mode shapes of a large span truss structure using only acceleration responses is studied. The calculation procedures to obtain acceleration responses and frequency response functions are provided utilizing a numerical model of the truss, and the process to extract natural frequencies and mode shapes from the modal analysis is clearly explained. The extracted mode shapes by proposed method are compared with those from eigenvalue analysis for the estimation of accuracy. The validity of the mode shapes is also demonstrated using an existing damage detection technique for the truss structure by simulated damage cases.

**Key words** : large structure, modal analysis, natural frequency, mode shape, damage evaluation

## 1. 서 론

구조물의 대표적 동적특성인 고유진동수와 모드형상은 손상을 국부적으로 탐지하고, 구조물의 건전성을 평가하는 방법들의 기초 자료로 많은 연구자들에 의해 활용되고 있다 (Gudmundson, 1982; Pandey et al., 1991; Park et al., 2006; Stubbs and Osegueda, 1990). 구조물에 균열이나 단면손실 등의 손상이 발생하면 구조시스템의 강성, 질량과 같은 물리적 성질이 변하고 이에 따라 고유진동수와 모드형상도 변하게 된다. 구조물의 고유진동수와 모드형상은 수치 해석적으로 혹은 실험적으로 구할 수 있다. 수치 해석적 방법은 유한요소모델과 같은 해석모델을 이용하여 고유치 해석을 통하여 비교적 쉽게 구할 수 있다. 실험적 접근은 모달 테스트 기법(Ewins, 1984) 이용하여 가속도계 등과 같은 센서를 구조물에 부착하여 응답을 계측하고, 전달함수인 주파수 응답함수를 구한 후 모드분석으로부터 고유진동수와 모드형상을 추출할 수 있다. 일반적으로 모달

테스팅 기법에서는 임팩트 해머 혹은 가진기로 구조물의 진동을 유발하고 이에 상응하는 응답을 동시에 계측하여 주파수 응답함수를 구한다(Choi et al., 2004). 이러한 방법은 중소규모의 구조물에서는 가능하지만 해양구조물이나 대경간 교량과 같은 대형 구조물의 경우에는 중량이 거대하여 구조물 전체의 진동을 유발시킬 수 없다. 이런 경우 파랑하중, 바람하중, 교통하중 등과 같은 상시진동원에 의한 미세진동을 계측하여 사용할 수 있다. 하지만 진동원, 즉 가진력을 계측할 수 없기 때문에 전달함수인 주파수 응답함수는 구할 수 없다. 따라서 계측한 응답으로부터 고유진동수는 얻을 수 있지만 이에 상응하는 모드형상은 구할 수 없다.

본 연구에서는 경간이 긴 대형 트러스 구조물을 대상으로 상시진동에 의한 가속도 응답만으로 고유진동수 및 모드형상을 추출하고 이를 건전성 평가에 활용하는 방법을 연구하였다. 대상 구조물은 50.4m 경간의 트러스 구조물로서 3차원 수치해석 모델을 이용하였으며, 상시진동을 모사하여 각 절점에서의 가

† 교신저자 : 정희원, sypark@hhu.ac.kr 051)410-4588

속도 응답을 계산하였다. 계산된 가속도 응답 중 한 절점에서의 가속도 응답을 고정점으로 하여 각 절점에서의 상대적인 모드 변위의 크기와 위상각을 구하고, 이렇게 구한 전달함수로부터 모드분석을 통하여 고유진동수와 모드형상을 추출하였다. 제안한 방법으로 얻은 모드형상은 3차원 수치해석 모델의 고유치 해석으로 계산된 모드형상과 비교하여 그 정확성을 검증하였으며, 모의 손상을 통하여 기존에 개발된 트러스 손상평가기법에 적용하여 타당성을 입증하였다.

## 2. 수치해석 모델을 이용한 상시진동 모드분석

### 2.1 대상구조물 및 수치해석 모델

본 연구에 사용된 대상구조물은 Fig. 1과 같이 건물과 건물의 연결통로로 사용하고 있는 Sky Bridge로 구조형식은 철골트러스이며, 전체 스패의 길이는 50.4m이다. 트러스는 단위길이 5.04m의 총 10개 격자로 구성되어 있으며, 트러스의 경사재는 강봉을 사용하여 인장만을 받을 수 있도록 설계된 프랫 트러스(pratt truss)이다. 트러스의 바닥은 165mm 깊이의 콘크리트 슬래브로 마감되어 있다. 트러스에 사용된 단면크기 및 사용재료는 Table 1에 수록하였다.

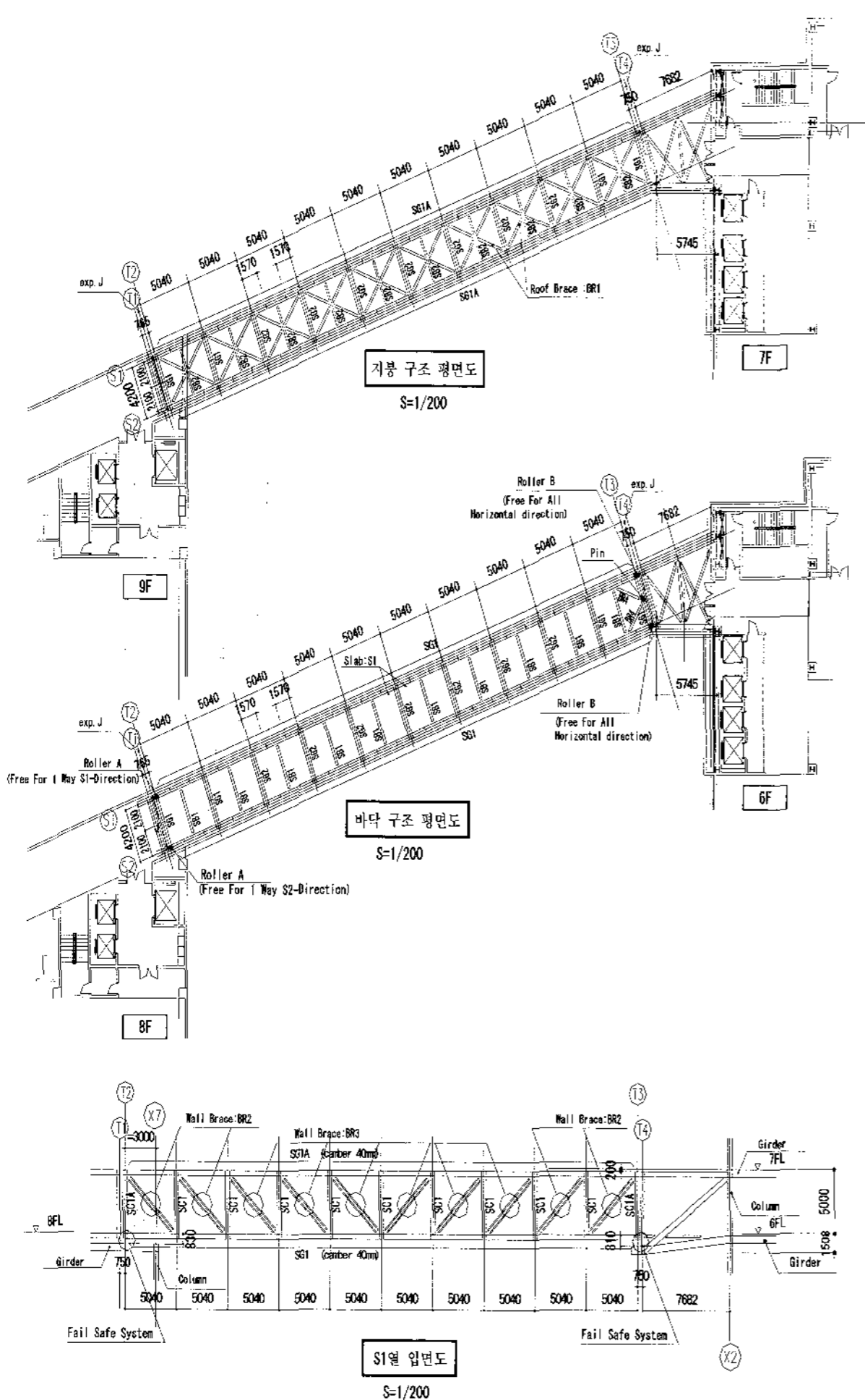


Fig. 1 Truss structure

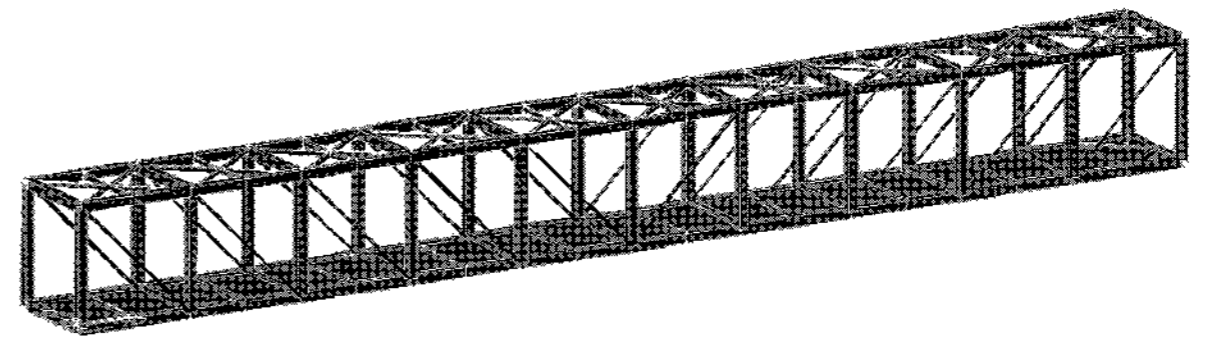


Fig. 2 3-D analytical model of truss

Table 1 Sectional property of truss

구분	단면크기	재질
상현재	H-400x400x13x21	SM490A
하현재	H-400x400x13x21	SM490A
수직재	H-400x400x13x21	SM490A
사재	2-φ70(강봉)	Semalloy 460
수평재	H-400x400x13x21 H-390x300x10x16	SM490A
수평보조재	H-346x174x6x9(바닥) H-194x150x6x9(지붕)	SS400
브레이싱재	H-200x200x8x12(바닥) H-150x150x7x10(지붕)	SS400

상시진동을 모사하여 트러스 각 절점에서 가속도 응답을 구하기 위하여 대상 트러스 구조물에 대한 3차원 수치해석 모델을 Fig. 2와 같이 구성하였다. 수치해석 모델은 상용프로그램인 MIDAS(2002)를 사용하였으며, 모델은 239개의 요소와 95개의 절점으로 구성되어 있다.

### 2.2 상시진동 모사 및 가속도 응답

트러스의 상시진동은 수직진동과 수평진동으로 나누어 모사하였다. 수직진동은 트러스 하부 중앙부근의 두 절점에서, 수평진동은 트러스 상부 중앙부의 한 절점에서 약 ±100N의 범위로 난수를 발생하여 사용하였다(Fig. 4 참조). Fig. 3은 사용한 수직진동 시간이력의 일부분으로 0.025초 간격으로 16,384개의 데이터를 포함하고 있으며, 총 가진 시간은 409.6초이다. 수평진동도 이와 유사하게 모사하였다. 본 연구에서 대상 구조물로 사용한 Sky Bridge 같은 경우의 상시진동은 사람의 이동 보행하중이나 바람하중, 혹은 인접도로의 교통하중 등에 의해 유발되는 미세진동이다. 이러한 진동원의 가진력은 계측하기 힘들 뿐 아니라 수치해석 모델에서도 모사하기 어렵기 때문에 앞에 설명한 세 절점에서의 시간이력이 상시진동의 진동원이라고 가정하였다.

각 절점에서의 가속도 응답을 구하기 위하여 수직진동과 수평진동의 가진력을 동시에 가하고 선형 시간이력해석을 수행하였다. 응답의 계산은 모드 중첩법을 사용하였으며, 저차 20개의 모드를 고유치 해석을 통하여 선수행하여 사용하였다. 이때 모든 모드의 감쇠비는 2%로 가정하였다. 모드 분석을 위한 가속도 응답은 Fig. 4에서와 같이 격자 트러스의 각 절점 44개(상부 절점 22개, 하부 절점 22개)에서 x, y, z축의 3방향 가속도를 구하였다. 또한 각 절점에서의 모드의 상대변위와 상대위상차를 계산하기 위한 고정점(reference point)에서도 가속도 응답을 계

산하였다. 고정점의 위치는 트러스 상부 중앙부근으로 Fig. 4에 표시하였으며, 수직방향(z축)의 가속도 응답만을 계측한 것으로 가정하였다. Fig. 5는 고정점에서의 z축 방향의 가속도 응답이며, Fig. 6은 최대 진동이 발생하는 트러스 상부 중앙부 절점(절점 17)의 3방향 가속도 응답이다. 그림에서와 같이 트러스의 최대 가속도 응답은 y축 방향으로 약  $\pm 0.003g$ , z축 방향으로 약  $\pm 0.002g$  정도이다. 이러한 수준의 진동은 보행자가 거의 감지하지 못하거나 약간 감지할 수 있는 정도의 미세한 진동으로, 본 연구에서는 이러한 미세진동의 가속도 응답만으로 고유진동수와 모드형상을 추출하고자 한다.

다. 첫 번째 방법이 더 정확성이 높으나, 대부분의 진동계측 시스템은 한정 된 수의 채널로 이루어져 한번에 계측할 수 있는 자유도의 수가 제한되어 있다. 따라서 계측하고자 하는 절점의 수 혹은 자유도의 수가 계측시스템의 채널 수보다 많은 경우에는 두 번째의 방법을 사용할 수밖에 없다. 이때 유의해야 할 점은 고정점 응답은 모든 세트에서 계측해야 된다. 왜냐하면 상시 진동원의 크기가 달라 계측하는 세트마다 상대 응답의 크기가 달라질 수 있으며, 위상각 또한 세트마다 달라질 수 있기 때문이다. 본 연구에서는 모든 응답을 동시에 계측하였다고 가정하였다.

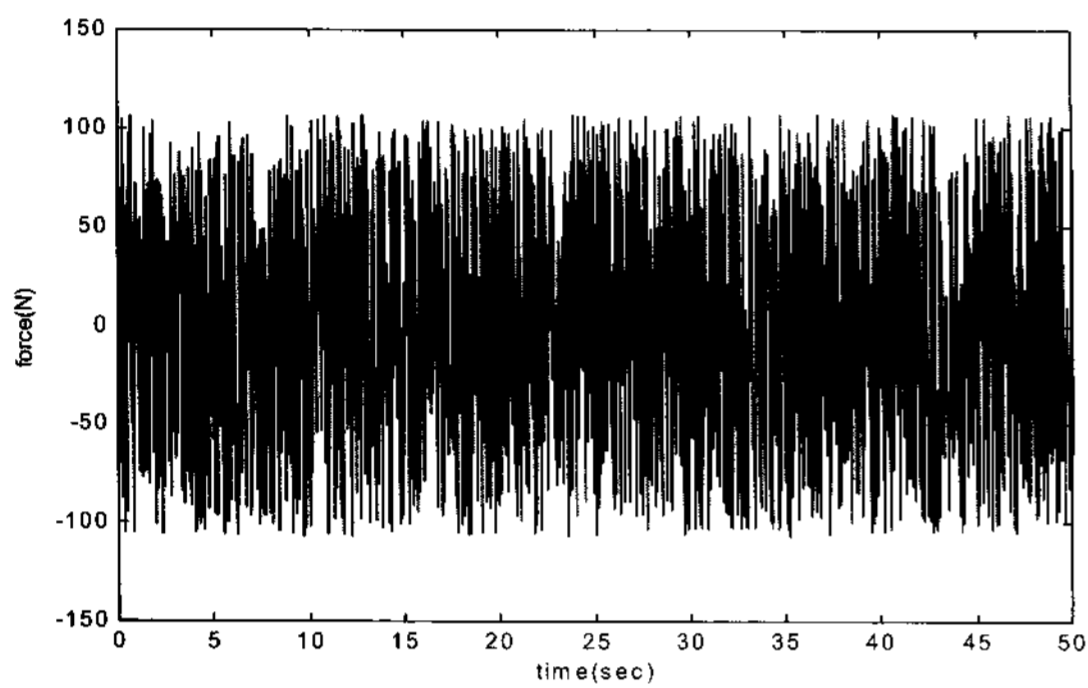


Fig. 3 Time history of exciting force in vertical direction

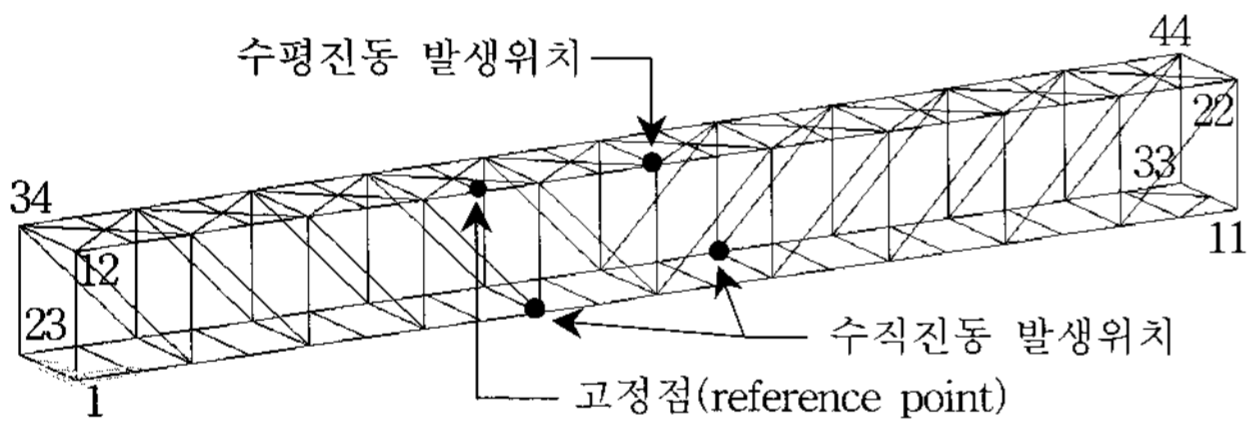


Fig. 4 44-acceleration response points and a reference point

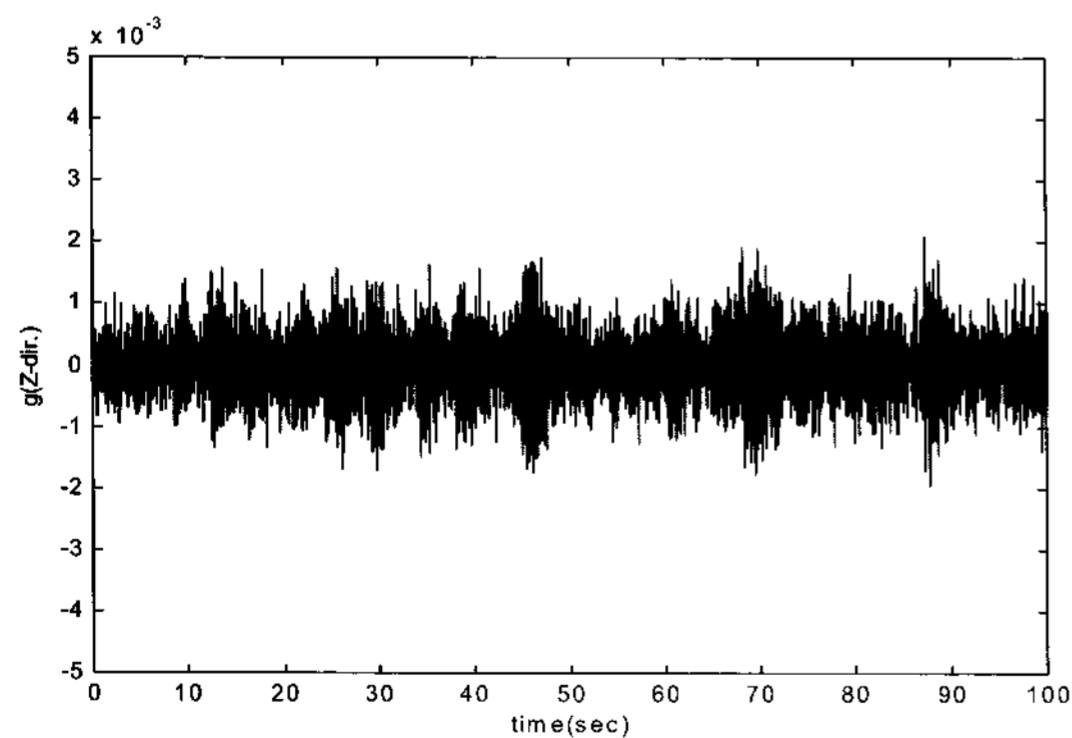
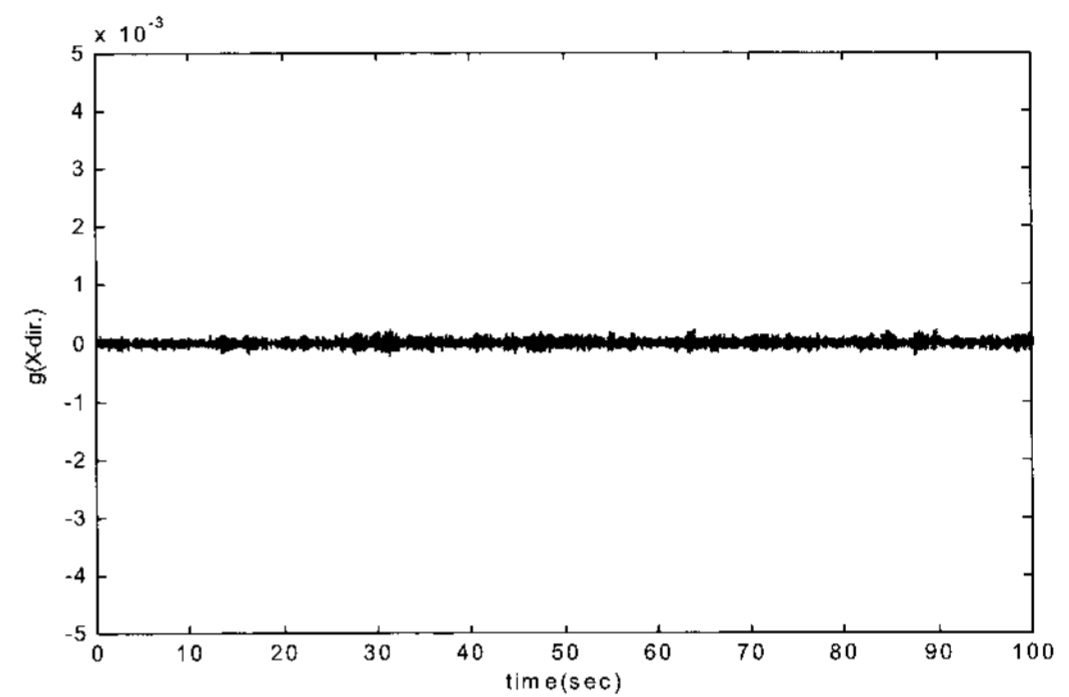
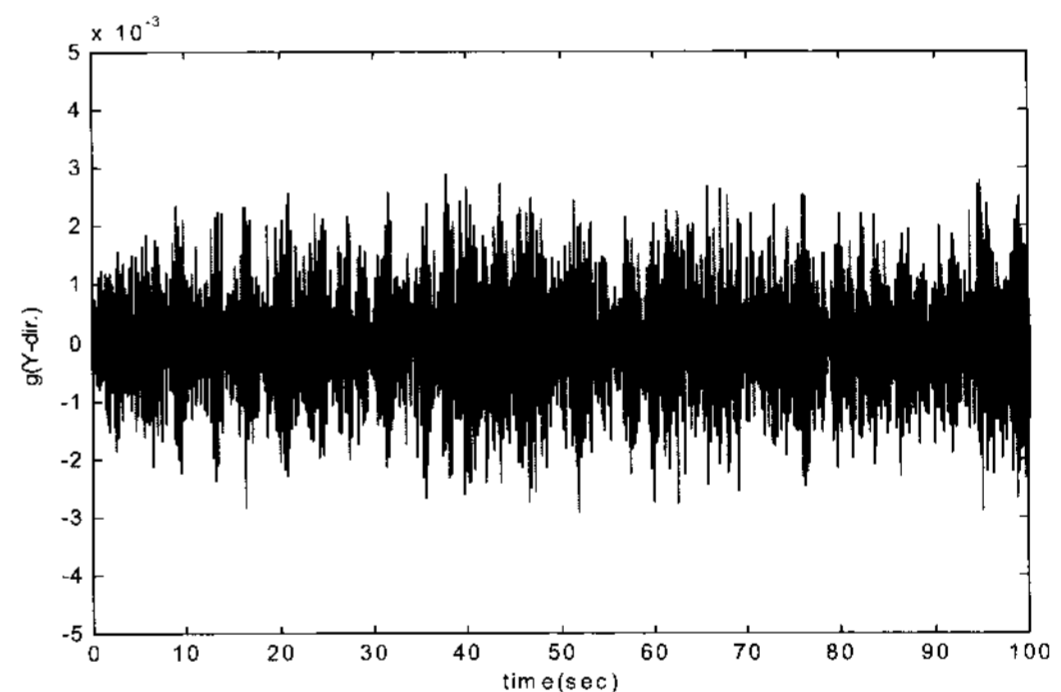


Fig. 5 Acceleration response at reference point

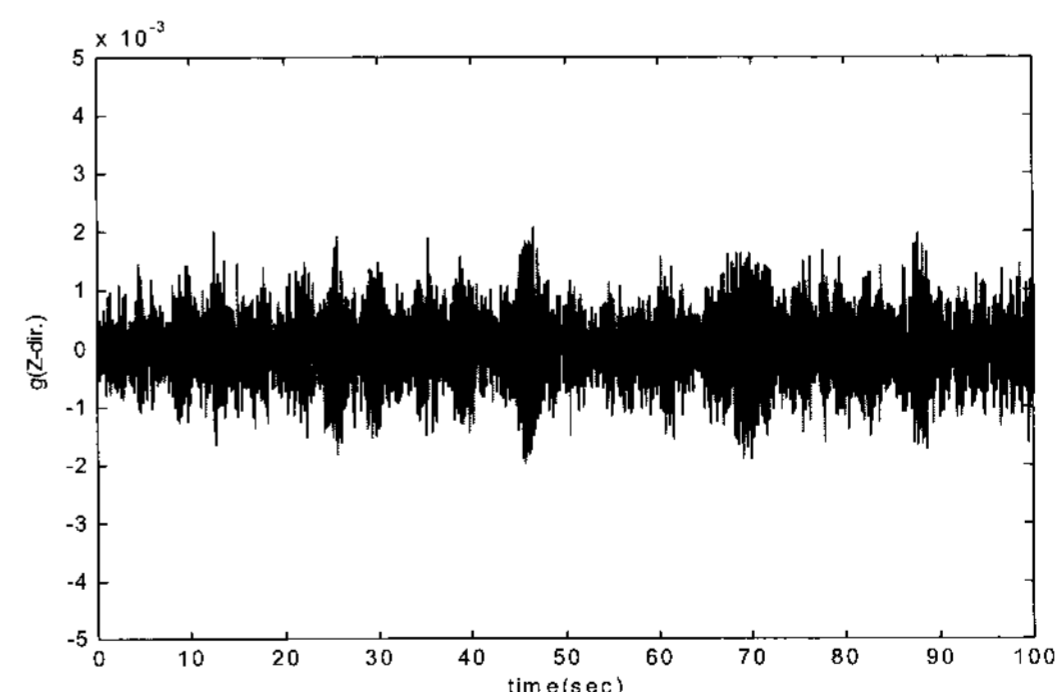
2개 이상의 자유도를 가진 구조물의 모드형상을 구하기 위해서는 계측한 모든 절점의 상대적 모드변위의 크기와 위상각이 정확해야한다. 실제 구조물에서의 계측방법은 두 가지로 나눌 수 있는데, 첫 번째는 모든 응답을 동시에 획득하는 것이고, 두 번째 방법은 몇 개의 세트(set)로 나누어 응답을 계측하는 것이



(a) Acceleration response in X-direction



(b) Acceleration response in Y-direction



(c) Acceleration response in Z-direction

Fig. 6 Acceleration response at the point 17

### 2.3 고유진동수 및 모드형상 추출을 위한 모드분석

고유진동수, 모드형상, 감쇠율과 같은 구조물의 동적특성은 일반적으로 계측한 주파수 응답함수로부터 모드분석을 통하여

얻을 수 있다. 만일 가진력과 이에 상응하는 구조물의 응답을 동시에 계측하였다고 가정하면, 전달함수인 주파수 응답함수는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$H_j(\omega) = \frac{X_j(\omega)}{F(\omega)} \quad (1)$$

여기서,  $H_j(\omega)$ 는 자유도  $j$ 의 주파수 응답함수,  $X_j(\omega)$ 는 자유도  $j$ 에서 구조물 응답(변위 혹은 가속도)의 푸리에 변환(Fourier transform) 벡터,  $F(\omega)$ 는 가진 함수의 푸리에 변환 벡터,  $\omega$ 는 진동수이다. 즉, 주파수 응답함수는 주파수 영역에서 가진에 대한 응답의 비로 표현되고 진동수에 따라 크기와 위상각을 갖게 된다. 주파수 응답함수에서 피크(peak)가 발생한 진동수가 구조물의 고유진동수이고, 그 진동수에서 주파수 응답함수의 크기와 위상각으로 모드형상을 결정할 수 있다. 식 (1)은 가진과 응답 모두 주기적으로 반복되는 진동에만 가능하다. 상시진동과 같이 가진과 응답 모두 반복되지 않는 임의진동(random vibration)인 경우, 푸리에 변환 조건에 맞지 않기 때문에 식 (1)은 직접 사용할 수 없다. 이 경우 가진과 응답의 스펙트럼 비를 이용한 스펙트럼 분석을 이용하여 주파수 응답함수를 구할 수 있다(Ewins, 1984).

$$H_j(\omega) = \frac{G_{fx_j}(\omega)}{G_{ff}(\omega)} \quad (2)$$

혹은

$$H_j(\omega) = \frac{G_{xx_j}(\omega)}{G_{x,f}(\omega)} \quad (3)$$

여기서,  $H_j(\omega)$ 는 자유도  $j$ 의 주파수 응답함수,  $G_{fx_j}(\omega)$ 와  $G_{x,f}(\omega)$ 는 가진과 자유도  $j$ 에서 구조물 응답의 크로스 스펙트럼(cross spectrum),  $G_{ff}(\omega)$ 와  $G_{xx_j}(\omega)$ 는 각각 가진 함수와 자유도  $j$ 에서 구조물 응답의 오토 스펙트럼(auto spectrum)이다.

해양구조물이나 대형 교량과 같이 가진이 불가능하거나 가진력을 쥘 수 없는 경우에는 식 (1)과 (2), (3)을 이용한 주파수 응답함수는 구할 수 없다. 이 경우 시간영역의 응답을 주파수 영역의 스펙트럼으로 치환하여 주파수 응답함수에서와 마찬가지로 피크에서 고유진동수를 구할 수 있으나 모드형상은 구할 수 없다. 본 연구에서는 식 (2) 혹은 (3)에서 가진 함수 대신 고정점에서의 응답을 사용하여 주파수 응답함수를 구하고 이로부터 모드형상을 추출하고자 한다. 즉, 고정점의 응답을 기준으로 구조물의 각각의 절점의 응답을 상대적으로 비교하여 고정점의 움직임에 대한 상대적 모드변위의 크기와 위상각을 결정하는 것이다.

트러스 수치해석 모델에서 계산한 44개 절점과 고정점에서의 가속도 응답을 사용하여 각 절점과 고정점 응답간의 크로스 스펙트럼 및 각 절점에서의 오토 스펙트럼을 계산하였다. 한 개의

절점은 세 개의 자유도를 가지고 있으므로 총 132개의 크로스 스펙트럼과 132개의 오토 스펙트럼을 구하였다. 스펙트럼 계산 시 시간영역 16,384개의 데이터를 약 40개의 샘플로 나누어 평균값을 사용하였고, 1개의 샘플은 1,000개의 데이터로 구성하였으며 이 중 600개의 데이터는 겹쳐 사용하였다. 따라서 스펙트

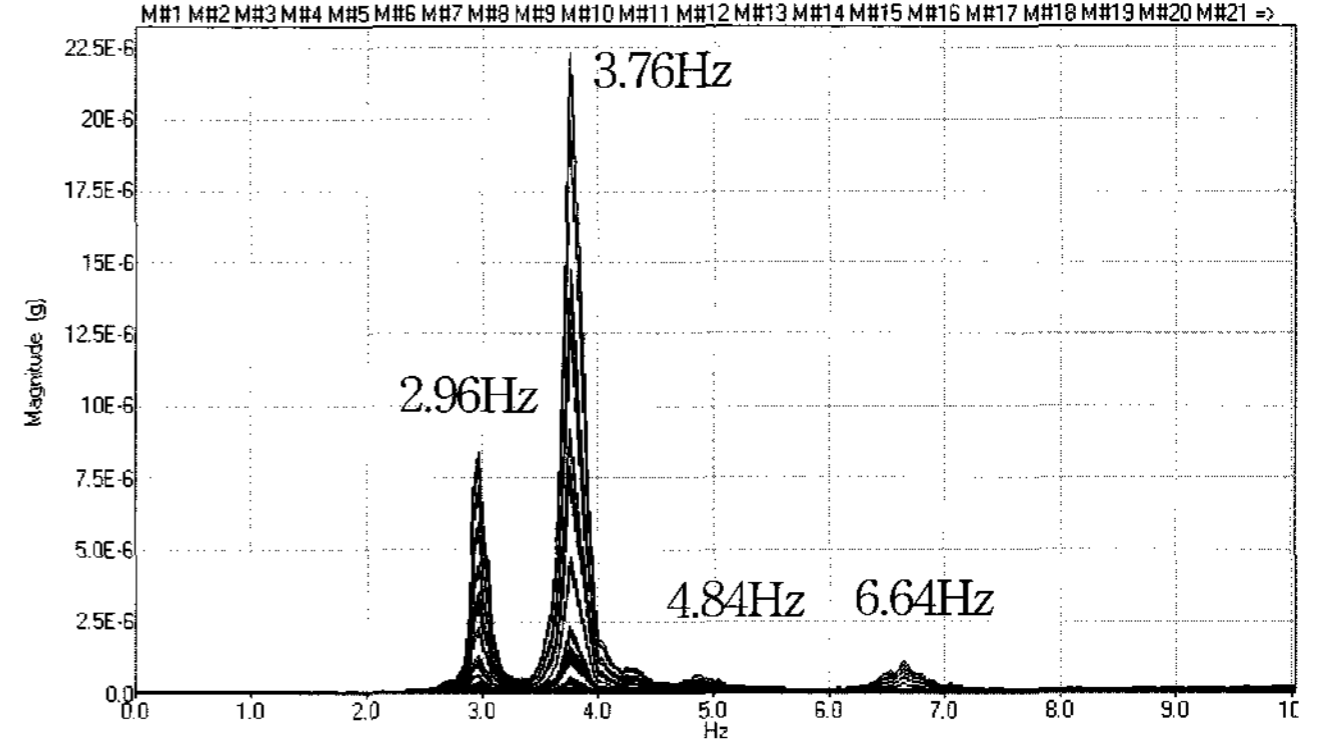
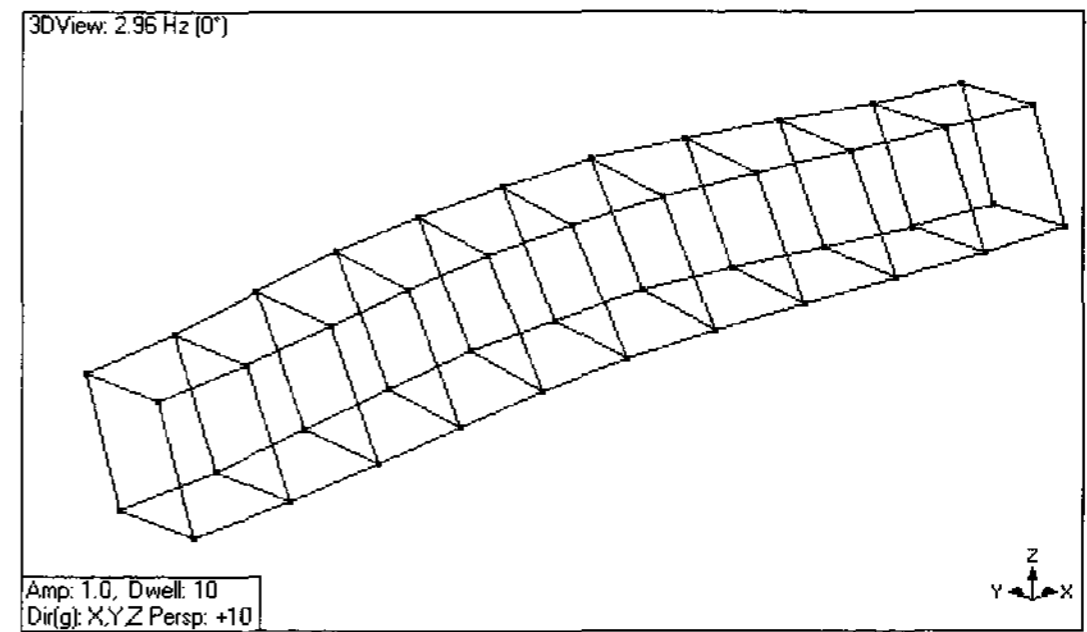
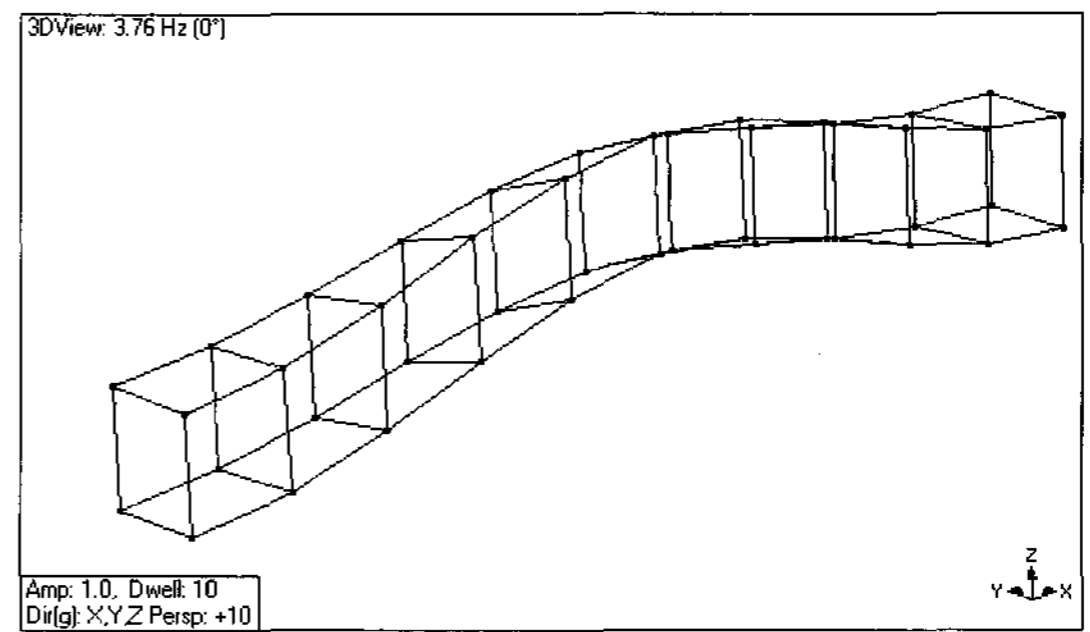


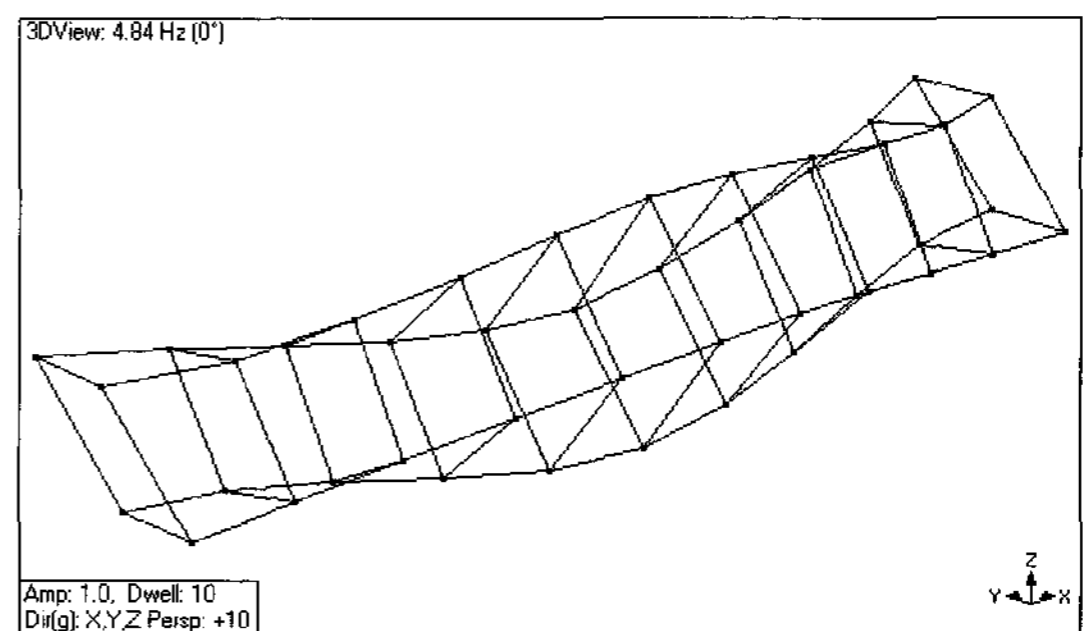
Fig. 7 Frequency response functions



(a) 1st mode shape in lateral direction(2.96Hz)



(b) 2nd mode shape in vertical direction(3.76Hz)



(c) 3rd mode shape in torsion(4.84Hz)

Fig. 8 Extracted mode shapes from frequency response functions

럼의 주파수 해상도는  $1/(1,000 \times 0.025 \text{초}) = 0.04 \text{Hz}$ 이다. 또한 푸리에 변환 시 발생할 수 있는 누수오차를 줄이기 위하여 샘플마다 해닝윈도우(Hanning window)를 적용하였다. Fig. 7은 가속도 응답만으로 계산한 주파수 응답함수의 크기를 보여주고 있다. Fig. 7은 132개의 주파수 응답함수를 한꺼번에 겹쳐놓은 것으로 구조물의 고유진동수를 나타내는 피크를 쉽게 식별할 수 있다. 10Hz 범위 내의 피크는 2.96Hz, 3.76Hz, 4.84Hz, 6.64Hz에서 발생하였다.

계산된 주파수 응답함수로부터의 모드형상 추출은 모드분석 상용프로그램인 ME'scope version 2.0(2001)을 사용하였다. 모드형상 추출은 분수 다항식을 이용한 RFP(rational fraction polynomial)방법을 사용하여 저차 3차까지의 모드를 추출하였으며 추출된 모드형상을 Fig. 8에 나타내었다.

### 3. 검증

본 절에서는 시간영역의 가속도 응답만을 이용하여 주파수 응답함수로부터 구한 고유진동수 및 모드형상의 결과를 수치해석 모델의 고유치 해석을 통하여 얻은 값과 비교하여 정확성을 검증하고, 모의 손상을 통한 기존의 트러스 손상평가 기법에 적용하여 본 연구에서 제안한 모드 분석의 타당성 및 활용성을 입증하고자 한다.

#### 3.1 고유진동수 및 모드형상 비교

본 연구에서 제안한 모드 분석의 기법을 이용하여 주파수 응답함수로부터 구한 3차 모드까지의 고유진동수와 수치해석 모델의 고유치 해석을 통한 고유진동수를 Table 2에 비교하였다. 고유치 해석에 의해 계산된 진동수를 정확해라고 가정하면, 주파수 응답함수에서 구한 3개의 고유진동수 모두 스펙트럼의 해상도 오차 범위인 0.04Hz를 벗어나지 않고 정확하게 추출되었음을 알 수 있다. 스펙트럼의 해상도는 계측시간에 좌우되며, 해상도를 높이기 위해서는 더 많은 양의 데이터 및 시간이 소요된다는 것을 의미한다.

**Table 2** Comparison of frequencies

모드	고유진동수(Hz)		
	주파수 응답함수	고유치 해석	Error(%)
1차(수평모드)	2.960	2.971	0.37
2차(수직모드)	3.760	3.773	0.34
3차(비틀림모드)	4.840	4.843	0.06

**Table 3** Modal assurance criteria

모드		주파수 응답함수로부터 추출한 모드		
		1차모드	2차모드	3차모드
고유치 해석 모드	1차모드	0.8144	0.0020	0.0888
	2차모드	0.1089	0.9085	0.0129
	3차모드	0.0564	0.0012	0.9264

모드형상의 검증은 모드형상의 일치도를 정량적으로 표시할 수 있는 MAC(modal assurance criteria)을 계산하여 비교할 수 있다. MAC은 두 모드의 상관관계를 나타내는 값으로 두 모드가 완전히 일치하면 1이 되고, 전혀 관계가 없으면 그 값은 0에 가깝게 된다. MAC을 구하는 식은 다음과 같다(Ewins, 1984).

$$MAC(E, F) = \frac{\left| \sum_{k=1}^N (\Phi_E)_k (\Phi_F)_k \right|^2}{\left( \sum_{k=1}^N (\Phi_E)_k (\Phi_E)_k \right) \left( \sum_{k=1}^N (\Phi_F)_k (\Phi_F)_k \right)} \quad (4)$$

여기서,  $\Phi_E$ 는 고유치 해석을 통하여 얻은 모드형상,  $\Phi_F$ 는 주파수 응답함수로부터 추출한 모드형상,  $N$ 은 자유도 수이다. Table 3에 고유치 해석을 통하여 얻은 모드형상과 주파수 응답함수로부터 구한 모드형상을 사용하여 계산한 MAC 값을 표시하였다. 표에 나타낸 바와 같이 1, 2, 3차 모드에서 각각 0.8144, 0.9085, 0.9264의 높은 상관관계를 보여주고 있다. 따라서 주파수 응답함수에서 추출한 모드와 고유치 해석을 통하여 얻은 모드는 같은 종류의 모드임을 알 수 있다. 2차와 3차 모드에 비해 1차 모드의 상관도가 작은 이유는, 1차 모드는 수평방향으로 움직이는 수평진동이었으나 고정점에서의 가속도 응답을 수직방향으로만 계측하여 주파수 응답함수를 구하고 모드형상을 추출하였기 때문이다.

#### 3.2 트러스 손상평가기법에의 적용

가속도 응답만으로 추출한 모드형상을 이용하여 구조조건성 평가분야에 활용할 수 있는지를 알아보기 위하여 트러스 손상탐지 알고리즘에 적용하였다. 손상탐지 알고리즘은 트러스 구조물에 대하여 이미 개발하여 쓰이고 있는 손상지수방법(Park et al., 2002)을 사용하였다. 본 연구에서 사용한 손상지수는 트러스의 손상 전과 손상 후의 변형에너지를 이용한 것으로, 손상 전과 손상 후의 강성의 비로 표현되며 트러스 부재에 대한 손상지수는 식 (5)와 같다.

$$\beta_j = \frac{k_j}{k_j^*} = \frac{\left( \sum_{i=1}^{NM} f_{ij}^* \right) + 1}{\left( \sum_{i=1}^{NM} f_{ij} \right) + 1} + 1 \quad (5)$$

여기서,  $\beta_j$ 는 손상지수,  $k_j$ 와  $k_j^*$ 는 손상 전후 트러스 j부재의 축강성,  $NM$ 은 모드 수,  $f_{ij} = (\Delta_{ij})^2 / \sum_{j=1}^{NE} (\Delta_{ij})^2$ ,  $f_{ij}^* = (\Delta_{ij}^*)^2 / \sum_{j=1}^{NE} (\Delta_{ij}^*)^2$ ,  $\Delta_{ij}$ 와  $\Delta_{ij}^*$ 는 i번째 모드에서 손상 전과 손상 후 j부재의 변형,  $NE$ 는 부재수이다. 식 (5)에서 알 수 있듯이 손상지수는 손상 전후 각 부재의 변형으로부터 직접 구할 수 있으며, 각 부재의 변형은 모드형상에서 계산할 수 있다. 이렇게 구한 손상지수는 손상판별을 하기 위한 그룹으로 분류되며, 각 부재로부터 구한 손상지수의 값을 확률변수(random

variable)로 고려하여 표준화된 지표로 치환한다. 손상의 결정은 각 부재의 표준 손상지표가 기준 값 이상일 경우 손상이 있다고 판별하는 가설테스트를 사용하였다(Park et al., 2002).

모의 손상은 Fig. 9와 같이 두 가지의 경우를 고려하였다. 손상 경우 I은 트러스 부재 중 경사재 한 곳에서 손상이 발생하였다고 가정하고 부재번호 44의 강성을 30% 감소하였고, 손상 경우 II는 트러스 상부 두 곳의 브레이싱재에서 손상이 발생하였다고 가정하고 부재번호 113, 114의 강성을 각각 30%씩 감소하였다. 손상탐지 모델의 총 부재 수는 124개이다. 손상은 두 경우 모두 부재의 질량에는 변화가 없는 것으로 가정하였고, 수치해석 모델에서 손상부재의 탄성계수를 감소시켜 모사하였다.

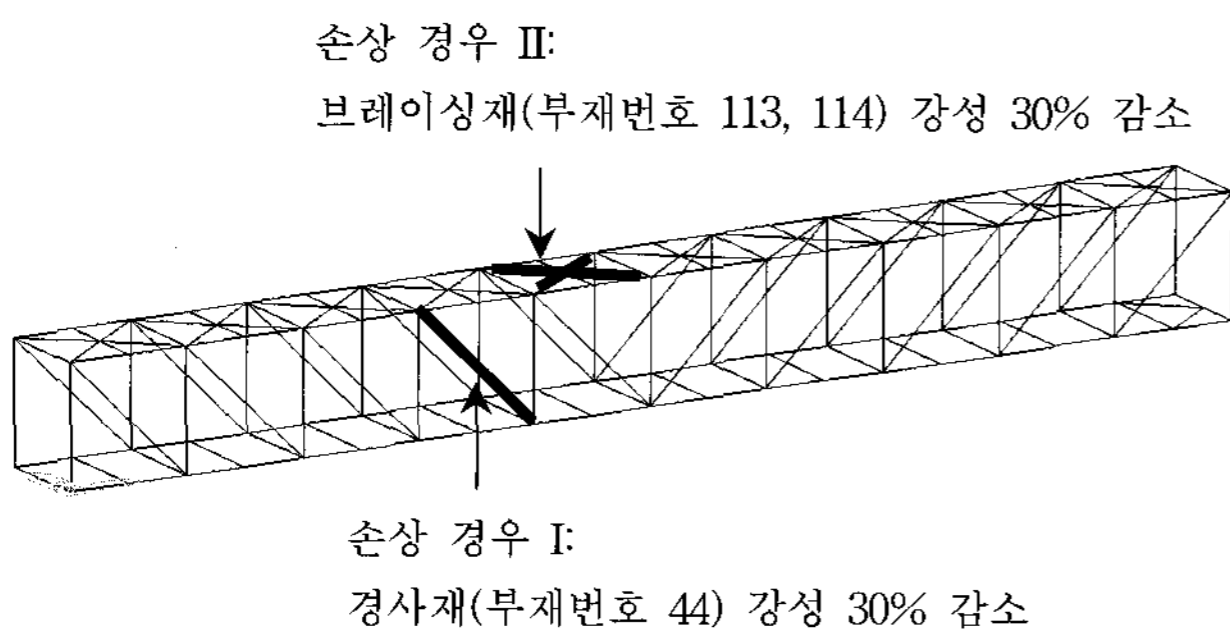
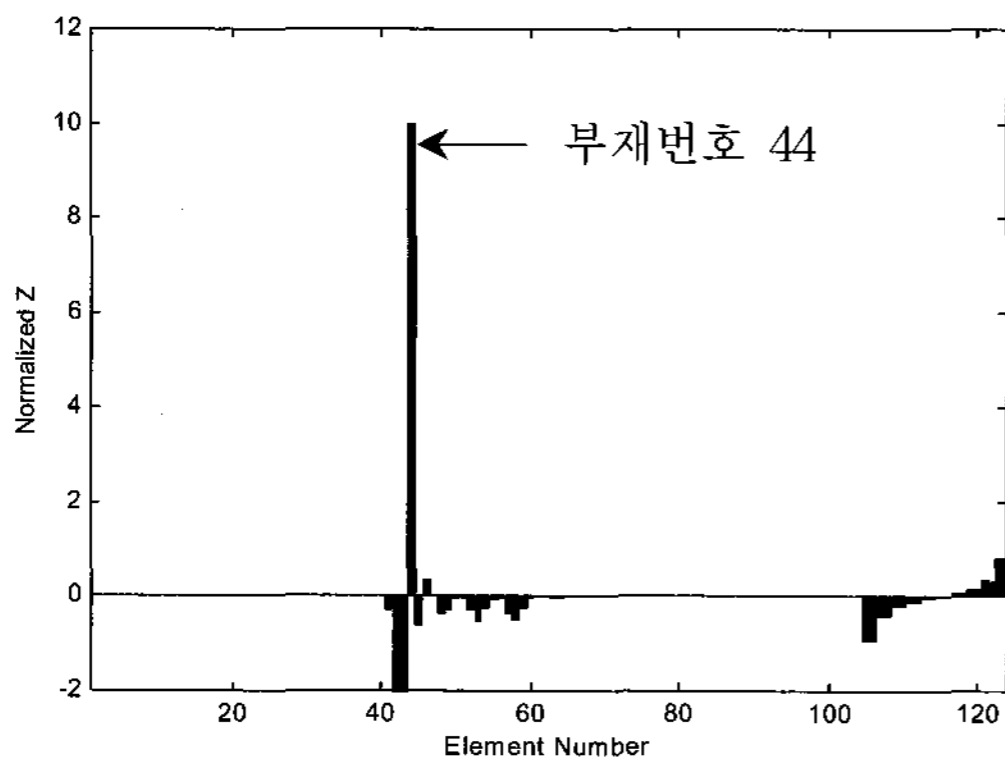
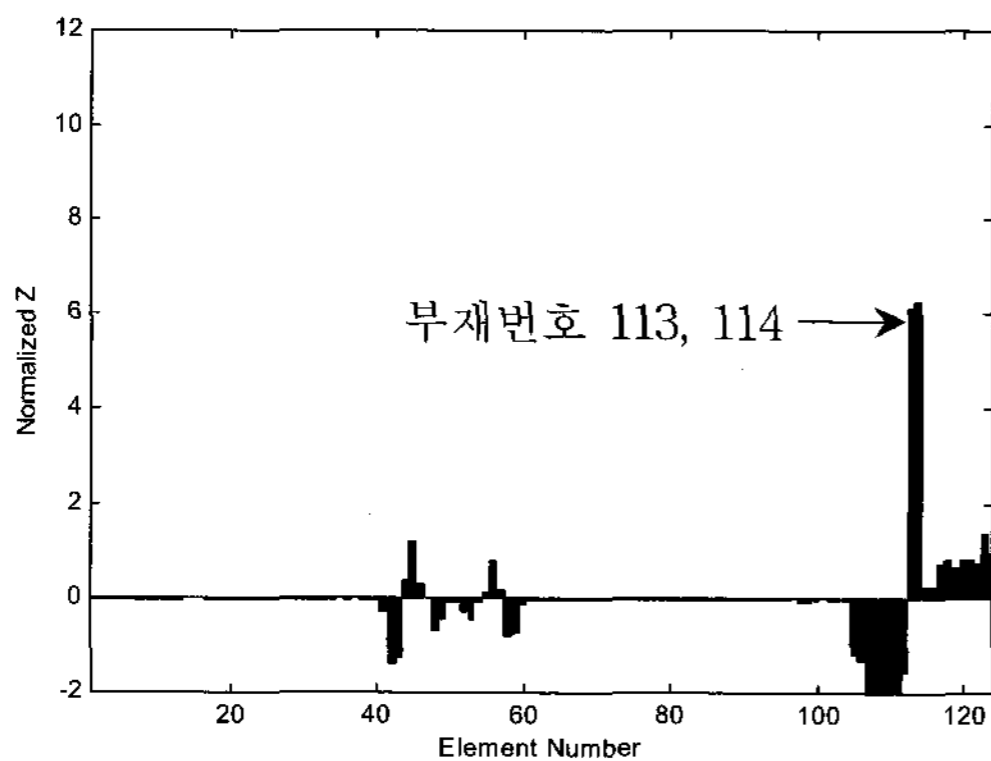


Fig. 9 Simulated damage locations



(a) Damage case I



(b) Damage case II

Fig. 10 Damage detection results

손상이 모사된 수치해석 모델을 이용하여 앞 절에서 설명한 같은 방법으로 각 절점 및 고정점에서의 상시진동에 의한 가속도 응답을 계산하였고, 주파수 응답함수를 구하여 저차 3차까지의 고유진동수와 모드형상을 추출하였다. 두 가지 손상 경우의 고유진동수 모두 손상이 없는 경우와 동일한 진동수에서 피크가 발생하였다. 이는 본 연구에서 모사한 트러스의 1개 혹은 2개의 부재에서 발생시킨 손상으로 인한 전체 구조물의 진동수에 미치는 영향이 스펙트럼의 해상도인 0.04Hz보다 작기 때문이다.

또한 손상이 없는 경우와 손상이 있는 경우의 모드형상도 MAC 값을 비교한 결과 3개의 모드 전부 0.9999이상인 것으로 계산되었다. 따라서 손상 전후의 모드형상은 거의 흡사하다고 할 수 있다. 이와 같은 경우는 실제 구조물에서도 발생할 수 있는 현상으로, 구조물의 질량이 거대하여 국부적인 손상이 발생하였을 경우 고유진동수와 모드형상의 변화를 육안으로 확인할 수 없을 수도 있다.

손상 전후 주파수 응답함수로부터 추출한 3개의 모드형상을 식 (5)에 적용하여 손상탐지를 수행하였다. Fig. 10은 식 (5)에서 계산된 손상지수를 확률변수로 가정하고 표준화된 지표로 변환한 것으로 두 가지 손상 경우의 손상탐지 결과를 나타내고 있다. 손상지표는  $Z_j = (\beta_j - \mu_\beta) / \sigma_\beta$  식으로 계산하였으며, 여기서  $\mu$ 와  $\sigma$ 는 각각 손상지수의 평균 값과 표준오차를 나타낸다. 손상 경우 I에서는 부재번호 44의 손상지표(그림에서 Z값)가 10으로 계산되었고, 손상 경우 II에서는 부재번호 113과 114의 손상지표가 각각 6.12와 6.27로 나타났다. 두 개의 손상 경우 모두 모사한 손상위치를 정확하게 탐지하였으며 손상지표가 4 이상인 경우 거의 100%의 신뢰도를 가진다고 할 수 있다. 또한 Fig. 10은 패턴 인식(pattern recognition) 관점에서의 분류체계로도 사용할 수 있다. 즉 그림을 보는 즉시 구조물의 어떤 부재 혹은 부분에서 이상이 발생하였음을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 해양구조물이나 대경간 교량과 같이 진동원이거나 가진력을 계측할 수 없는 대형 구조물의 경우 파랑하중, 바람하중, 또는 교통하중 등의 상시진동에 의한 미세한 응답만으로 구조물의 중요한 진동특성인 고유진동수와 모드형상을 추출하는 방법을 연구하였다. 경간 50.4m의 3차원 트러스 해석모델로 상시진동을 모사하여 트러스 절점 및 고정점에 대한 가속도 응답을 계산하고, 고정점에 대한 각 절점의 상대적 변위 및 위상각을 이용한 스펙트럼 분석을 통하여 주파수 응답함수를 구하였으며 이로부터 저차 3차까지의 고유진동수 및 모드형상을 추출하였다. 제안한 방법으로 얻은 진동특성의 결과는 수치해석 모델의 고유치 해석 결과와 비교하여 정확성을 검증하였고, 기존의 손상평가기법에 적용하여 타당성 및 활용성을 입증하였다. 본 연구를 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

(1) 가진력을 모르거나 계측할 수 없는 대형 구조물의 경우 상시진동에 의한 미세한 가속도 응답만으로도 주파수 응답함수

를 계산할 수 있으며, 이로부터 진동특성을 추출할 수 있다.

(2) 가속도 응답만을 이용하여 제안한 방법으로 얻은 고유진동수와 모드형상을 수치해석 모델의 고유치 해석으로 얻은 정확해와 비교한 결과 오차범위 안에서 잘 일치함을 알 수 있다. 고유진동수의 정확성은 스펙트럼의 해상도와 밀접한 연관성이 있으며, 모드형상의 타당성 및 활용성은 두 가지 모의 손상 경우를 통하여 정확히 손상탐지를 함으로써 입증하였다.

(3) 본 연구에서 제안한 방법은 대형 구조물의 온라인 모니터링 시스템이나 건전성평가에도 손쉽게 적용할 수 있다.

## 후 기

이 논문은 한국해양대학교 신진교수정착연구비 지원에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- [1] Choi, S., Park, S., Bolton, R., Stubbs, N., and Sikorsky, C.(2004), "Periodic Monitoring of Physical Property Changes in a Concrete Box-girder Bridge", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 278, No. 1-2, pp. 365-381.
- [2] Ewins, D. J. (1984), "Modal Testing: Theory and Practice", Letchworth, Hertfordshire, U.K., Research Studies Press.
- [3] Gudmundson, P. (1982), "Eigenfrequency Changes of Structures Due to Cracks, Notches, or Other Geometrical Changes", *J. Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 30, No. 5, pp. 339-353.
- [4] ME'scope TM (2001), "Version 2.0 Operating Manual", Vibrant Technology, Inc., Jamestown, California.
- [5] MIDAS/Gen (2002), "Version 6.3.2", MIDAS Information Technology Co., Ltd.
- [6] Pandey, A. K., Biswas, M., and Samman, M. M. (1991), "Damage Detection from Changes in Curvature Mode Shapes", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 145, No. 2, pp. 321-332.
- [7] Park, S., Bolton, R., and Stubbs, N. (2006), "Blind Test Results for Nondestructive Damage Detection in a Steel Frame", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 132, No. 5, pp. 800-809.
- [8] Park, S., Kim, Y., and Stubbs, N. (2002), "Nondestructive Damage Detection in Large Structures via Vibration Monitoring", *Electronic Journal of Structural Engineering* <http://www.ejse.org/>, Vol. 2, pp. 59-75.
- [9] Stubbs, N. and Osegueda, R. (1990), "Global Non-Destructive Damage Evaluation in Solids", *Int. J. Analytical and Experimental Modal Analysis*, Vol. 5, No. 2, pp. 67-79.

원고접수일 : 2008년 2월 12일

원고채택일 : 2008년 3월 25일