

# 강부재의 손상발견을 위한 모달실험 기법

## Damage Detection of a Steel Member Using Modal Testing

장 정 환<sup>1)</sup> · 이 정 휘<sup>1)</sup> · 김 성 곤<sup>2)</sup> · 장 승 필<sup>3)</sup>  
*Jang, Jeong Hwan Lee, Jung Whee Kim, Sung Kon Chang, Sung Pil*

**요 약 :** 모달실험 기법의 강부재 손상발견 적용성에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 단경간 및 2경간 강재보에 손상을 모사한 단계적인 절단을 가하면서 모달실험을 반복하고, 손상 정도에 따른 모달 파라미터의 변화를 관찰하였으며, 실험 결과를 검증할 목적으로 수치해석을 병행하였다. 고려한 모달 파라미터는 고유진동수(Frequency), 변위 모드형상(Displacement Mode Shape), 변형률 모드형상(Strain Mode Shape)이며, 이들 모달 파라미터를 구하기 위하여 가속도계와 변형률계를 사용한 모달실험을 실시하였다.

각각의 손상단계에서 손상에 의한 변위 모드형상과 변형률 모드형상의 변화를 위치에 대해 정량적으로 나타내기 위하여, CoMAC과 Modal Vector Error를 사용하였다.

고유진동수는 손상의 정도가 심해짐에 따라 감소하는 경향을 보였으며, 손상의 위치를 발견하는 데에 가장 효과적으로 사용될 수 있는 것은 변형률 모드형상이었다.

**ABSTRACT :** A series of experimental tests have been performed on a tube beam in which artificial damage is applied in order to address damage detectability using modal analysis. Modal parameters considered are frequency, displacement mode shape and strain mode shape. CoMAC (Coordinate Modal Assurance Criterion) and Modal Vector Error have been adopted for presenting the change of displacement mode shape and strain mode shape. It is revealed strain mode shape is the most sensitive to damage.

**핵심용어 :** 모달실험, 손상발견, 고유진동수, 변위 모드형상, 변형률 모드형상, CoMAC, 모달 벡터 에러

---

1) 서울대학교 토목공학과 박사과정  
2) 한국도로공사 책임연구원  
3) 서울대학교 토목공학과 교수

---

본 논문에 대한 토의를 1998년 5월 31일까지 학회로 보내 주시면 토의 회답을 게재하겠습니다

KEYWORDS : Modal Testing, Damage Detection, Frequency, Displacement  
Mode Shape, Strain Mode Shape, CoMAC, Modal Vector Error

## 1. 서 론

교량을 비롯한 구조물에 있어서, 현재의 상태를 파악하고 향후의 거동을 예측함으로써 불의의 재난을 방지하기 위하여 구조물의 모니터링 및 손상의 조기 발견이 반드시 필요하다. 이를 위한 방법은 크게 두가지로 대별할 수 있는데, 그 첫째는 전문가에 의하여 이루어지는 육안조사이며 두 번째는 센서를 사용한 모니터링이다. 육안조사는 전문인력의 부족, 상시 관측의 어려움, 접근성의 문제 등을 가지고 있기 때문에 이러한 문제점을 극복하기 위하여 센서를 사용한 모니터링과 병행되는 것이 바람직 하다. 센서를 사용한 모니터링은 다시 몇가지 방법으로 나눌 수 있는데, System Identification, Neural Network, Knowledge Based System, Modal Testing 등의 기법을 사용하는 방법이 그것이다. (1, 2, 4, 5, 6, 9)

손상발견에 모달실험의 기법을 사용하기 위해서는 모달실험에 의해 얻어지는 모달 파라미터들이 구조물에 발생하는 손상에 대하여 민감하게 변화하여 이러한 변화를 관찰함으로써 손상의 위치와 정도를 파악하는 것이 가능하여야 한다. 기존의 모달실험은 주로 가속도계를 사용하여 고유진동수, 모드 형상, 감쇠율등의 모달 파라미터를 구하였으나, 변형률계를 사용하여 모달실험을 할 경우에는 가속도계를 사용하여 얻을 수 있는 모달 파라미터 이외에 변형률 모드 형상이라는 또 하나의 모달 파라미터를 얻을 수 있다. 만일 이 변형률 모드 형상이 가속도계를 사용하여 얻을 수 있는 모달 파라미터에 비해 손상에 민감하게 변화한다면, 변형률계를 사용한 모달실험이 구조물의 모니터링과 손상발견에 더욱 효과적인 방법이 될 수 있을 것이다.

본 연구에서는 모달실험 기법의 손상발견에의 적용성을 검토하기 위한 기본실험과 그에 따른 수치해석을 실행하였다. 실험에는 가속도계와 변형률계를 사용하였으며, 이를 통하여 고유진동수, 변위 모드 형상, 변형률 모드 형상을 구하였다. 손상에 대한 이들 모달 파라미터의 변화를 실험 및 수치해석을 통하여 비교, 관찰 하였다.

기존의 연구에서 모드 형상의 변화를 부재의 위치에 따라서 정량적으로 나타내기 위해 Coordinate Modal Assurance Criterion (CoMac)을 사용한 예를 찾을 수 있었으므로<sup>(4)</sup>, 본 연구에서도 이 값을 사용하여 모드 형상의 변화를 나타내어 보았으며, 또한 일반적으로 수치의 차이를 나타내는데에 사용되는 오차의 개념을 벡터로 확장한 Modal Vector Error (MVE)를 사용하여 두 결과를 비교하였다.

실험 및 수치해석에 사용된 모델은 직사각형의 강 각관으로 양단이 지지된 경우와 중앙에 지점이 추가된 경우가 있다. 부재에 가해지는 손상은 전기톱을 사용한 절단으로 하였으며, 양단이 지지된 경우에는 경간중앙의 하단에, 중앙에 지점이 추가된 경우에는 중앙지점의 상단과 첫번째 경간중앙의 하단에 각각 손상을 가하였다.

## 2. 변형률 주파수 응답함수 (Strain Frequency Response Function)

구조계의 변화는 고유진동수, 감쇠율, 모드형상 등 여러 가지 모달 파라미터에 영향을 미치게 된다. 이러한 모달 파라미터들은 frequency response function (FRF: 주파수 응답함수)으로부터 추출된다.<sup>(7, 8)</sup> 주파수 응답함수는 가진력과 변위사이의 관계를 진동수 축에 대하여 나타낸 것으로 식(1)과 식(2)에 나타낸 바와 같다.

$$\{X\} = [a(\omega)]\{F\} \quad (1)$$

$$\alpha_{jk}(\omega) = \sum_{r=1}^N \frac{\phi_j \cdot \phi_k}{m_r(\omega_r^2 - \omega^2 + i2\zeta_r\omega_r\omega)} \quad (2)$$

여기서,  $m_r, \omega_r, \zeta_r, \phi_i$ 는 각각 모달 질량, 고유진동수, 모달 점성감쇠비, 그리고  $r$ 번째 모드형상벡터의  $i$ 번째 성분이다.

구조물의 동적특성치는 주파수응답함수(FRF)로부터도 얻을 수 있지만, 변형률 주파수 응답함수(Strain Frequency Response Function: SFRF)로부터도 얻을 수 있다. (3, 9, 11)

$\{\varepsilon\}$ 과  $\{x\}$ 가 구조물 내의 한 지점에서의 변형률과 변위를 나타내는 벡터라고 하면, 다음의 식(3)에 의해 변형률과 변위사이의 관계를 정의할 수 있다.

$$\{\varepsilon\} = [\theta]\{x\} \quad (3)$$

여기서,  $[\theta]$ 는 구조물의 형상과 지지조건에 따라서 달라지는 행렬이다.

가진력과 변위사이의 주파수 응답함수가 식(1), 식(2)와 같으므로, 식(1)과 식(3)으로부터 가진력과 변형률 사이의 관계식을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \{E\} &= [\theta][a(\omega)]\{F\} \\ &= [a^S(\omega)]\{F\} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서,  $\{E\}$ 는 다음의 식에 의해서 정의되며,  $[a^S(\omega)]$ 는 변형률 주파수 응답함수(SFRF)이다.

$$\{\varepsilon\} = \{E\} e^{i\omega t} \quad (5)$$

만일 구조계의  $p$ 지점을 가진하고,  $q$ 지점에서

측정한다면, 이 때 얻을 수 있는 변형률주파수 응답함수의 성분  $\alpha_{qp}^S$ 는 식(2)와 식(4)에 의해 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\alpha_{qp}^S = \sum_{r=1}^N \sum_{i=1}^N \theta_{qi} \phi_i \phi_p e_r \quad (6)$$

위의 식에서  $e_r$ 은

$$e_r = \frac{1}{m_r(\omega_r^2 - \omega^2 + i2\zeta_r\omega_r\omega)} \quad (7)$$

이다.

또한, 변형률 모드형상  $[\hat{\varepsilon}]$ 을 모드형상  $[\phi]$ 를 사용하여 표현하면,

$$[\hat{\varepsilon}] = [\theta][\phi] \quad (8)$$

과 같이 되며,  $r$ 번째 변형률 모드형상의  $q$ 번째 성분은

$$r \hat{\varepsilon}_q = \sum_{i=1}^N \theta_{qi} \phi_i \quad (9)$$

가 된다.

식(6), 식(7)과 식(9)를 조합하면 최종적으로 다음과 같은 변형률 주파수 응답함수의 식을 얻을 수 있다.

$$\alpha_{qp}^S = \sum_{r=1}^N \frac{r \hat{\varepsilon}_q \cdot \phi_p}{m_r(\omega_r^2 - \omega^2 + i2\zeta_r\omega_r\omega)} \quad (10)$$

위의 변형률 주파수 응답함수의 식은 구조물의  $p$ 지점을 가진하고,  $q$ 지점에서 변형률을 측정할 경우에 해당되는 식이다.

변형률 주파수 응답함수는 주파수 응답함수보다 많은 정보를 포함하고 있다. 이것은 주파수 응답함수의 분자가 가진점에서의 변위 모드형상의 성분과 측정점에서의 모달변형률의 곱으로 이루어져 있기 때문이다. 따라서, 고유진동수와 모달감쇠비, 변위모드형상은 주파수응답함수(FRF)와

변형률주파수응답함수(SFRF)에서 모두 구할 수 있지만, 변형률 모드형상은 변형률 주파수 응답함수로부터만 구해질 수 있다.

만일 측정점의 위치가 고정되어 있다면, 다시 말해서 한 개의 변형률계만을 고려한다면( $q$ =고정), 변위 모드형상은 각 지점에서의 변형률 주파수 응답함수 값의 크기에 비례하게 될 것이다. 반면에, 여러개의 변형률계를 사용하고 한 지점만을 가진하게 되면( $p$ =고정), 각 측정점에서의 변형률 모드형상(SMS : Strain Mode Shape)을 얻을 수 있다.

그렇지만 주파수응답함수의 경우는 이와 달라서 측정점을 고정하고 가진점을 이동하는 경우와 가진점을 고정하고 여러개의 센서를 사용하는 경우 모두 같은 변위 모드형상을 얻게 된다.

변형률 주파수 응답함수로부터 추출된 변형률 모드형상(SMS : Strain Mode Shape)은 각 측정점 사이의 변형률의 상대적 크기를 나타낸다. 물리적으로 한 모드에서의 변형률 모드형상은 해당되는 모드의 변위 모드형상과 같은 변위가 일어났을 때의 변형률의 상태를 나타낸다.

변형률계를 사용하여 모달실험을 하는 경우, 가속도계를 사용하는 경우에 비하여 진폭이 미세한 진동을 감지하기 어려우며, 200Hz이상의 고진동수 영역의 응답을 얻어내기 어려웠다. 따라서, 구조물의 진동에 의한 변형의 크기가 변형률계에 의해 측정 가능한 범위에 있고, 구조물의 중요한 고유진동수가 고진동수 영역에 있지 않은 구조물에 있어서는 변형률계에 의한 모달실험 기법을 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

### 3. Modal Test

#### 3.1 실험 모델

실험에 사용된 부재는 가로 5.08 cm (2.0 in.) 세로 2.54 cm (1.0 in.), 두께 0.3175 cm (0.125 in.)인 직사각형 강 각판이며, 길이는

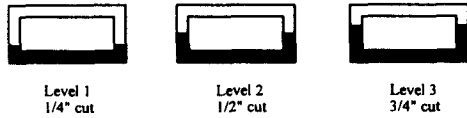
3.7 m (12 ft.) 이다. 실험은 3가지 경우로 하였으며, 각 경우에 대한 실험 내용을 표1에 정리하였다.

첫번째 경우에는 세 개의 가속도계와 한 개의 변형률계를 사용하여 진동수와 변위 모드형상을 측정하였다. 손상은 보 중앙의 하단에서 세 단계로 나누어 가하였다. 두번째 경우에는 보의 중앙에 지점을 추가하고, 중앙지점 상단으로부터 세단계로 손상을 가하여 부모멘트 부에서 발생할 수 있는 휨균열을 모사하였다. 세번째 경우에는 두번째 경우의 세번째 단계의 손상이 가해진 상태에서 다른 위치에 추가로 손상을 가하였다. 추가 손상의 위치는 우측 지점에서 76.2 cm (30 in.) 지점으로 사하중 상태에서 정모멘트를 받게되는 부분이다. 추가적인 손상은 그림2에 나타낸 바와 같이 보의 하단으로부터 3단계로 나누어 가하였다. 각각의 경우에서 손상은 모두 3단계로 나누어 가하였으며, 그 단계는 모두 그림2에 나타낸 것보다 크게 다르지 않다.

표 1. 각 경우별 실험 내용

		case1	case2	case3
지점 위치		양단	양단 + 중앙	
센서수량	가속도계	3	2	
	변형률계	1	10	
손상 위치		L/2(하단)	L/2(상단)	L/2(상단), 5L/24(하단)
손상단계	d11	1/8 in.	3/8 in.	1/4 in.
	d12	1/2 in.	1/2 in.	1/2 in.
	d13	7/8 in.	3/4 in.	3/4 in.
측정 모달 파라미터		f, DMS	f, DMS, SMS	

양단의 지점은 C-클램프로 고정하였다. 이러한 지점은 고정단과 회전단의 중간상태가 되기 때문에 이를 수치모델에 적용하기 위하여 회전 스프링 요소를 사용하였다. 중앙의 지점은 양단 지점보다 약간 높게 설치하여 충격실험시 부재가 튀어오르는 것을 방지하였다.



damage level 1 : 1/4" cut from the bottom (  $I_{dl1} / I_{intact} = 36.2\%$  )  
 damage level 2 : 1/2" cut from the bottom (  $I_{dl2} / I_{intact} = 12.5\%$  )  
 damage level 3 : 3/4" cut from the bottom (  $I_{dl3} / I_{intact} = 2.4\%$  )

그림 1. 단계별 손상정도 (case3)

### 3.2 실험 장비

신호 수집/처리장치로는 HP 3566A/3567A PC Spectrum/Network Analyzer가 사용되었으며, 이 장비는 IBM호환 기종의 개인용 컴퓨터에 연결되어 사용되었다.

가속도의 측정에는 3개 또는 2개의 PCB 393C 가속도계가 사용되었으며, 변형률의 측정에는 1개 또는 10개의 변형률계가 사용되었다.

가진에는 2가지 impact hammer가 사용되었는데, 가속도계를 사용한 실험에는 PCB 086 B05이 사용되었으며, 변형률계를 사용하는 실험에는 PCB SP205이 사용되었다.

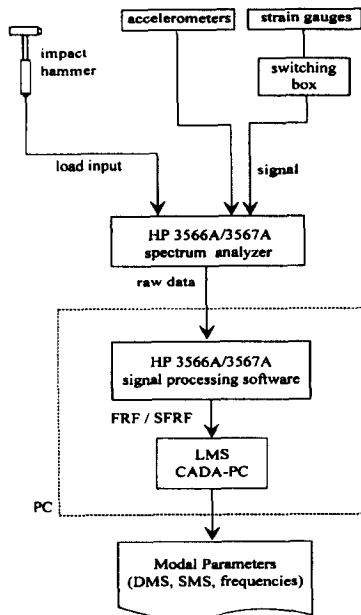


그림 2. 실험장비의 구성도

가속도계와 변형률계로부터 얻은 신호로부터 FRF와 SFRF를 얻는데에는 HP 3566A/3567A Signal Processing Software가 사용되었다. 이 software는 신호 수집/처리장치에 포함되어 있는 것이다. 이로부터 얻은 FRF와 SFRF는 LMS CADA-PC (Revision1.4)에서 처리되어 고유진동수, 변위 모드형상, 변형률 모드형상 등의 모달 파라미터들을 얻었다.

## 4. 실험 결과와 비교,분석을 위한 유한요소 해석

### 4.1 경계조건을 나타내기 위한 스프링 상수의 결정

C-클램프로 고정된 양 끝단의 지점을 모사하기 위해 수치 모델에서 회전스프링을 사용하였다. 스프링 상수의 결정을 위해 스프링 상수를 변화시켜 가며 각 모드별 고유진동수의 첫 번째 모드의 고유진동수에 대한 비를 구하여 이 값이 실험에서 얻은 값과 가장 가까울 때의 스프링 상수를 사용하였다.

단경간 빔의 경우, 스프링 상수가 0이라면 (hinged-hinged) 이 경우는 단순지지와 같게 된다. 이 때, 두 번째 고유진동수는 첫 번째 고유진동수의 4배가 되며, 각 n번째 모드의 고유진동수는 첫 번째 모드의 고유진동수의  $n^2$ 배가 된다. 스프링 상수가 점차로 증가하게 됨에 따라 이 고유진동수의 비는 감소하게 되며, 스프링 상수가 무한대가 되는 경우에는 (fixed-fixed), 두 번째와 첫 번째 고유진동수의 비는 2.76이 된다.

그림3에는 FEM해석에서 스프링 상수를 변화시키면서 구한 두번째 고유진동수의 첫번째 고유진동수비에 대한 비의 곡선과 실험에서 얻은 두번째와 첫번째 고유진동수의 비를 나타내었다. 스프링 상수는 실험으로부터 얻은 값인 직선과 스프링상수를 변화시키면서 얻은 곡선의 교차점의 x값을 읽음으로서 구할 수 있다. 이 실험에서는 처음 6개 모드

의 고유진동수로부터 얻은 5개의 곡선을 사용하였는데, 5개의 곡선에서 모두 100과 200 N-m/deg 사이에 교점이 존재하였다. 교점의 x값은 100과 1000사이에서 곡선을 log함수로 회귀분석하여 구하였으며, 그 결과는 표2에 나타내었다.

표2에 나타나 있는 5개의 스프링상수값의 평균치를 수치 모델에 적용하였으며 그 값은 160 N-m/deg로 하였다.

표 2. 각 모드로부터 얻은 스프링상수

고려한 진동수	스프링 상수 (N-m/deg)
$\omega_2/\omega_1$	128.27
$\omega_3/\omega_1$	146.83
$\omega_4/\omega_1$	163.47
$\omega_5/\omega_1$	188.75
$\omega_6/\omega_1$	174.95

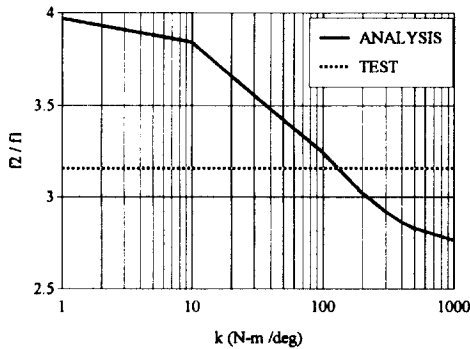


그림 3. 고유진동수비 곡선  
(2번째/1번째 고유진동수)

#### 4.2 손상의 모사

실험 결과와 비교하기 위한 유한요소해석에 사용한 프로그램은 ANSYS(Revision 5.2)이며, 4절점 쉘 요소(shell63), 질량요소(mass21), 그리고 회전스프링 요소(combin14)가 사용되었다. 쉘 요소는 보를 모델링하는데 사용되었고, 질량

요소는 가속도계의 위치에 사용하여 가속도계의 질량에 의한 영향을 반영하였으며, C-클램프의 경계조건을 나타내기 위해 회전스프링 요소를 사용하였다.

손상을 모사하기 위해 부분적으로 그림4에 나타낸 것과 같은 조밀한 유한요소망을 구성하였다. 유한요소망의 폭은 절단된 위치에서 튕날의 폭과 같은 1.3 mm로 하였으며, 절단된 부분의 요소를 없애는 방법을 사용하였다.

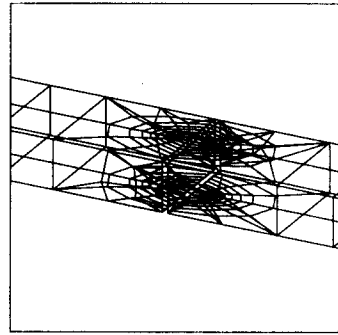


그림 4. 손상 모사를 위한 조밀한 유한요소망

### 5. 실험 결과의 비교 및 분석

본 절에서는 손상에 따른 모달 파라미터의 변화를 나타내었다. 실험결과와 비교하기 위하여 유한요소해석의 결과를 함께 사용하였다.

#### 5.1 고유 진동수의 변화

손상단계에 따른 가속도계로부터 얻은 고유진동수의 변화를 그림5와 표3에 나타내었다. 손상의 정도가 심해질수록 고유진동수가 낮아지며, 일반적으로 높은 모드의 고유진동수가 낮은 모드의 고유진동수에 비해 변화의 폭이 큰 것을 알 수 있다. 첫번째 경우에는 손상의 위치가 보의 중앙이기 때문에 이 위치에서 모드형상의 변위가 0

에 가까운 2,4번째 모드(symmetric modes)는 고유진동수의 변화가 거의 없음을 알 수 있다. 가장 변화가 큰 5번째 모드의 경우 손상 전과 3단계 손상 후의 고유진동수의 차이는 약 13 Hz 정도가 되었다.

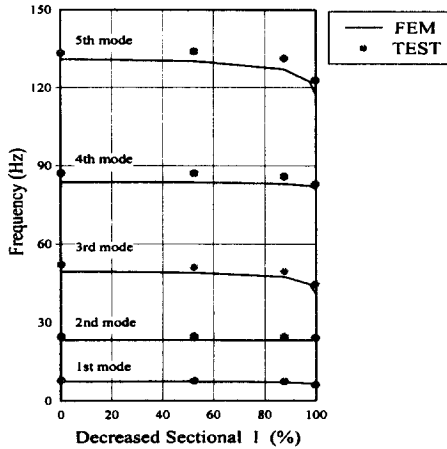


그림 5. 고유진동수의 변화 (case1)

표 3. 손상 단계별 고유 진동수의 변화 (가속도계, case1)

		손상 단계			
		손상 전	1	2	3
1st Mode	FEM (Hz)	7.53	7.48	7.25	6.01
	TEST (Hz)	7.85	7.73	7.47	6.29
	Error (%)	4.1	3.2	2.9	4.5
2nd Mode	FEM (Hz)	23.32	23.31	23.28	23.12
	TEST (Hz)	24.77	24.82	24.67	24.13
	Error (%)	5.9	6.1	5.6	4.2
3rd Mode	FEM (Hz)	49.53	49.13	47.52	41.24
	TEST (Hz)	52.07	51.26	49.73	44.71
	Error (%)	4.9	4.2	4.4	7.8
4th Mode	FEM (Hz)	83.76	83.63	83.10	81.26
	TEST (Hz)	87.15	87.06	85.92	82.96
	Error (%)	3.9	3.9	3.3	2.0
5th Mode	FEM (Hz)	130.99	130.21	127.14	117.55
	TEST (Hz)	133.49	134.20	131.32	122.88
	Error (%)	1.9	3.0	3.2	4.3

표4에는 변형률계로부터 얻은 고유진동수의 변화를 수치해석의 결과와 비교하여 나타내었다. 변형률계를 사용하여서는 처음 4개의 고유진동수를 측정할 수 있었다. 손상에 의한 고유진동수의 변화는 가속도계를 사용한 경우와 마찬가지로 손상의 정도가 심해짐에 따라 고유진동수가 낮아지는 경향을 나타내고 있으며, 실험치와 수치해석의 결과도 잘 일치하고 있다. 변형률계를 사용한 경우에는 가속도계를 부착하지 않았으므로, 수치해석 모델에서 질량요소를 사용하지 않았으며, 따라서 가속도계를 사용한 경우와 고유진동수가 다르다. 또한, 가속도계의 질량의 영향이 없으므로, 구조물이 완전히 대칭이 되고, 따라서 대칭모드의 고유진동수가 거의 변화하지 않음을 확인할 수 있다. 그림6에는 변형률계로부터 얻은 고유진동수의 변화를 손상 전 고유진동수에 대한 비로 나타내었다. 고차 모드의 경우 고유진동수 자체의 변화는 저차 모드에 비하여 크지만, 이를 손상 전 고유진동수에 대한 비로 나타내어 보면, 일반적으로 고차 모드가 저차 모드에 비해 손상에 민감하다고 말하기는 어렵다.

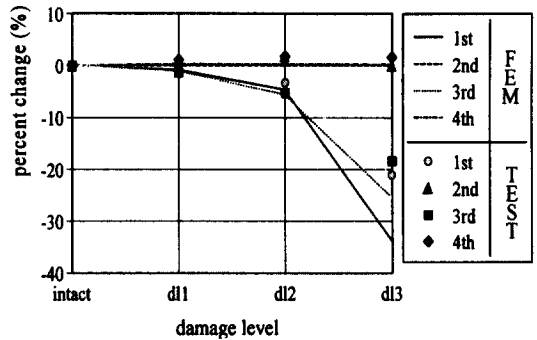


그림 6. 손상 단계별 고유 진동수의 변화율 (변형률계, case1)

표 4. 손상 단계별 고유 진동수의 변화  
(변형률계, case1)

		손상 단계			
		손상 전	1	2	3
1st Mode	FEM (Hz)	8.59	8.52	8.19	5.68
	TEST (Hz)	8.45	8.40	8.17	6.67
	Error (%)	-1.68	-1.45	-0.29	14.77
2nd Mode	FEM (Hz)	26.77	26.77	26.77	26.77
	TEST (Hz)	27.22	27.48	27.72	27.24
	Error (%)	1.64	2.57	3.42	1.72
3rd Mode	FEM (Hz)	56.27	55.68	53.11	41.94
	TEST (Hz)	57.81	57.04	54.79	47.19
	Error (%)	2.66	2.39	3.07	11.13
4th Mode	FEM (Hz)	96.60	96.90	96.90	96.89
	TEST (Hz)	98.53	99.62	100.31	100.1
	Error (%)	1.65	2.73	3.40	3.21

## 5.2 모드 형상 및 변형률 모드 형상의 변화

이전의 연구자료를 보면 구조계의 변화에 따른 모드형상의 변화를 정량화하기 위하여 Coordinate Modal Assurance Criterion (CoMAC) 이 사용된 것을 찾을 수 있다.<sup>(3)</sup>

CoMAC은 본래 두 벡터사이의 직교성을 나타내는 것으로 0과 1사이의 값을 가지며, 서로 같은 두 벡터의 CoMAC을 계산하면 1의 값을, 서로 직교하는 두 벡터의 CoMAC을 계산하면 0의 값을 나타내게 된다. 이 값을 일정한 위치에서의 모드형상의 크기들로 이루어진 벡터에 대해 적용함으로써 손상 전, 후 한 위치에서 모드형상의 변화를 정량적으로 나타낼 수 있다.

만일 손상 전, 후 모드형상의 변화가 전혀 없다면, CoMAC의 값은 모든 위치에서 1의 값을 갖게 될 것이고, 손상에 의해 모드형상의 변화가 생긴다면 두 모드형상 사이의 직교성에 차이가 생기게 되고 따라서 CoMAC값은 1보다 작은 값을 갖게 될 것이다. 손상을 준 위치에서 가까울 수록

모드형상의 변화가 클 것이고, 따라서 CoMAC의 값이 다른 곳에 비해 두드러지게 작은 곳은 손상이 발생했을 가능성이 다른 곳에 비하여 높다고 말할 수 있다.

따라서, 손상의 위치를 파악하는 데에는 각각의 위치에 대한 모드형상의 변화를 나타내는 CoMAC을 사용할 수 있다. 다음의 식(11)은 CoMAC의 정의로, 여기에서  $\psi_{ik}$  와  $\phi_{ik}$  는 비교하고자 하는 두 set의 모드형상이며 (예를 들면 손상 전 모드형상과 손상 후 모드형상),  $L$ 은 고려한 모드의 총 갯수, 아래첨자  $i$ 는 측정위치,  $k$ 는 몇번째 모드인가를 나타낸다.

$$CoMAC_i = \frac{\left( \sum_{k=1}^L \psi_{ik} \phi_{ik} \right)^2}{\left( \sum_{k=1}^L \psi_{ik} \psi_{ik} \right) \left( \sum_{k=1}^L \phi_{ik} \phi_{ik} \right)} \quad (11)$$

또한, 모드형상의 변화를 정량화 하기 위하여 벡터오차라는 개념을 사용하였는데, 이것은 스칼라 양에 대하여 계산하는 오차의 개념을 그대로 벡터 양에 적용한 것으로 이 연구에서는 각 절점별 모드형상의 크기로 구성된 벡터에 적용하여 각각의 절점에서 손상 단계에 따라 모드형상이 얼마나 변화하였는지를 나타내도록 하였다.

$$vector\ error = \frac{|\vec{a} - \vec{b}|}{|\vec{a}|} \quad (12)$$

벡터오차를 모드형상에 적용한 것을 모달벡터 오차(MVE)라고 하고, 앞에서 사용한 변수들을 사용하여 표현하면, 다음의 식과 같다.

$$MVE_i = \left( \frac{\sum_{j=1}^L (\phi_{ij} - \psi_{ij})^2}{\sum_{j=1}^L \phi_{ij}^2} \right)^{1/2} \quad (13)$$



그림7과 그림8에는 세번째 case의 변위 모드 형상과 변형률 모드형상에 대한 CoMAC을 나타내었다. 변위 모드형상의 CoMAC을 계산할 때는 실험과 수치해석에서 모두 처음 6개의 모드를 고려하였으며, 변형률 모드형상에서는 실험에서는 1,3,5,7번째의 모드를, 수치해석에서는 처음 6개의 모드를 고려하였다.

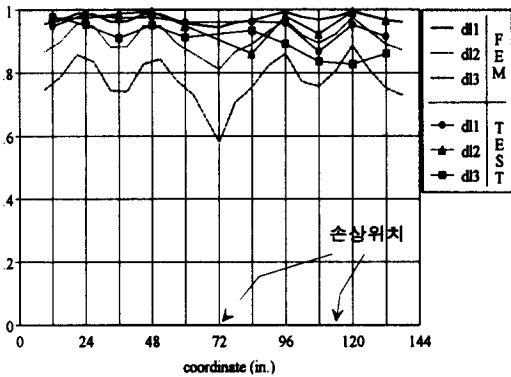


그림 7. case3의 변위 모드형상에 대한 CoMAC

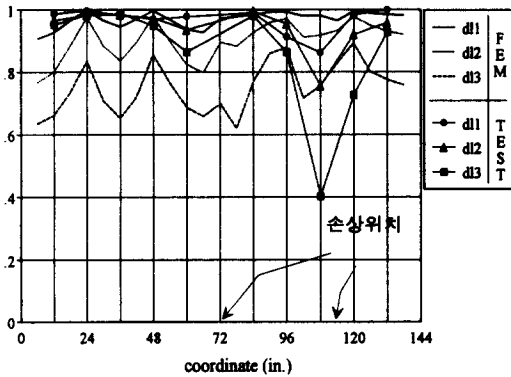


그림 8. case3의 변형률 모드형상에 대한 CoMAC

변위 모드형상의 경우를 보면, 수치해석의 결과는 손상의 위치에서 다른 부분에 비해 낮은 값을 나타냄으로써 이 부분의 손상 존재 가능성이 다른 부분보다 높음을 보여주고 있으나, 실험치의

경우는 해석치에 비해 이러한 경향이 두드러지지 않는다. 이와는 달리 변형률 모드형상에서는 해석치에 비해 실험치에서 더 좋은 결과가 나타났다. 이것은 해석치와 실험치에서 고려한 모드의 수가 다르고, 실험치에 포함된 7번째 모드의 영향이 크기 때문인 것으로 생각된다.

그림9과 그림10에는 앞의 두 결과를 사용하여 계산한 MVE를 나타내었다. MVE는 CoMAC과는 달리 변화가 적을 수록 0에 가까운 값을 갖게 되고, 손상의 발생 확률이 높은 위치에서 다른 부분에 비해 큰 값을 갖게 된다. 변위 모드형상의 경우는 CoMAC에서와 마찬가지로 수치해석에서는 손상의 위치에서 두드러진 값을 보이고 있으나, 실험치는 해석치에 비하여 손상의 위치에서 차이가 두드러지지 않는다. 그러나 변형률 모드형상의 MVE는 CoMAC과는 상당히 다른 모양을 보이고 있다. 변형률 모드형상에 대한 MVE에서는 손상단계 1에서부터 추가 손상을 가한 위치에서 매우 큰 MVE값을 나타내고 있으며, 이것은 이 위치에서 변형률 모드형상의 변화가 심함을 뜻한다. CoMAC의 그래프에서 이와같은 경향이 나타나지 않는 것은, 모드형상이 변화하더라도 직교성에는 큰 영향을 미치지 못하는 경우가 있을 수 있음을 뜻한다.

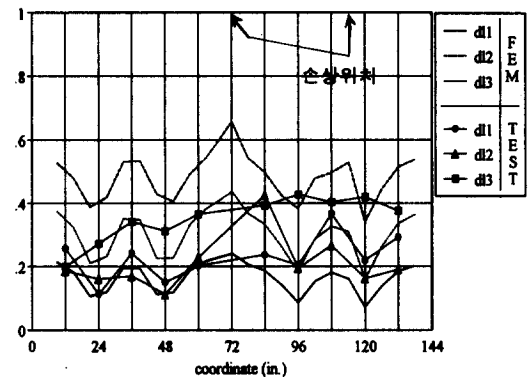


그림 9. case3의 변위 모드형상에 대한 MVE

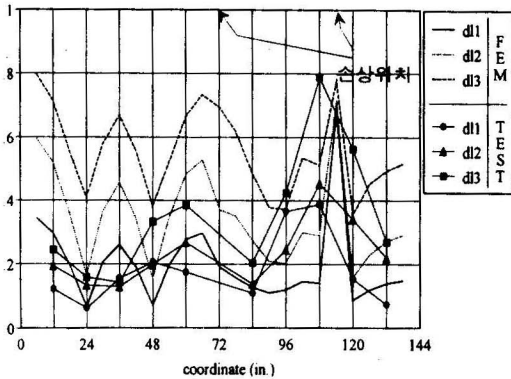


그림 10. case3의 변형률 모드형상에 대한 MVE

## 6. 결 론

본 연구에서는 강부재의 손상발견을 위하여 단경간 및 2경간 강재보에 단계적인 절단을 가하면서 모달실험을 반복하였으며, 손상 정도에 따른 모달 파라미터의 변화를 관찰하였다. 고려한 모달 파라미터는 고유진동수(Frequency), 변위 모드형상(Displacement Mode Shape), 변형률 모드형상(Strain Mode Shape)이다.

고유진동수는 가속도계를 사용한 경우와 변형률계를 사용한 경우에서 모두 상당히 정확하게 측정할 수 있었다. 또한 손상에 의한 고유진동수의 변화 역시 두 경우에서 모두 측정이 가능하였다.

변위 모드형상과 변형률 모드형상의 변화를 CoMAC(Coordinate Modal Assurance Criterion)과 MVE(Modal Vector Error)를 사용하여 표현하여 보았으며, 손상에 의한 변화는 변위 모드형상에 비해 변형률 모드형상의 쪽이 더욱 큼을 확인할 수 있었다.

구조물의 고유진동수나 변위 모드형상, 변형률 모드형상등 모달 파라미터는 손상에 의하여 변화하며, 이를 실험을 통하여 확인할 수 있었고, 이들 모달 파라미터 중에서 손상의 위치를 발견하는데 가장 효과적으로 사용될 수 있는 것은 변형률 모드형상이다.

변형률 모달실험을 통해 얻는 변형률 모드형상

의 변화를 통하여 간단한 강부재의 손상을 발견하는 것이 가능할 것으로 판단된다.

손상의 정도가 심해짐에 따라 모달 파라미터의 변화량도 커지는 것을 확인할 수 있었으나, 모달 파라미터의 변화량을 통하여 구조물의 손상정도를 파악하는 것은 현 단계에서 어려우며, 향후 연구해야 할 부분이다. 또한, 단일 부재가 아닌 구조계에 본 방법을 적용할 경우, redundancy에 의한 응력의 재분배가 발생하게 되므로, 이에 의한 영향 또한 연구되어야 한다.

## 감사의 글

본 연구는 현대건설 기술연구소의 연구기금지원으로 서울대학교 에너지 자원 신기술 연구소에서 이루어졌으며, 연구기금 지원에 사의를 표합니다.

## 참 고 문 헌

- (1) 김 성곤 [1996] "구조물 손상발견을 위한 신호처리기법", 대한토목학회 논문집, No. 1
- (2) Agbabian, M. S., Masri, S. F., Miller, R. K. and Caughey, T. K. [1991] "System Identification Approach to Detection of Structural Changes" Journal of Engineering Mechanics, Vol.117, No.2, pp. 370-390.
- (3) Bernasconi, O., and Ewins, D. J. [1989] "Application of Strain Modal Testing to Real Structures." Proceedings of the 7th International Modal Analysis Conference, pp. 1453-1464.
- (4) Biswas, M., Pandey, A. K., and Samman, M. M. [1990] "Modal technology for damage detection of bridges", Bridge evaluation, repair and rehabilitation, Kluwer academic publishers, pp. 161-174.
- (5) Chang, K. C., Shen, Z. and Lee, G. C. [1993] "Modal Analysis Technique for

- Bridge Damage Detection", Structural Engineering in Natural Hazards Mitigation, Vol. II, ASCE, pp. 1083-1088.
- (6) Chen, Stuart S. and Kim, Sungkon [1995] "Automated Signal Monitoring using Neural Networks in a Smart Structural System", Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 6, No.4, pp. 508-515.
- (7) Ewins, D. J. [1986] *Modal Testing : Theory and Practice*, Research Studies Press, England.
- (8) Gardner-Morse, M. G., Huston, D. R. [1993] "Modal Identification of Cable-stayed Pedestrian Bridge", Journal of structural engineering, Vol. 119, No. 11, pp. 3384-3404.
- (9) Hjelmstad, K. D. and Shin, S. [1996] "Crack Identification in a Cantilever Beam from Modal Response", Journal of Sound and Vibration, 198(5), pp. 527-45.
- (10) Li, D., Zhuge, H., and Wang, B. [1989] "The Principle and Technique of Experimental Strain Modal Analysis." Proceedings of the 7th International Modal Analysis Conference, pp. 1285-1289.
- (11) Lieven, N. A. J. and Ewins, D. J. [1988] "Spatial Correlation of Mode Shapes, the Coordinate Modal Assurance Criterion (COMAC)", Proceedings of the 6th International Modal Analysis Conference, pp. 690-695.
- (12) Yao, G. C., Chang, K. C., and Lee, G. C. [1992] "Damage Diagnosis of Steel Frames Using Vibration Signature Analysis", Journal of Engineering Mechanics, Vol. 118, No. 9, pp. 1949-1961.
- (13) *ANSYS Manual*, Swanson Analysis System, Inc.
- (14) *CADA-PC user Manual*, LMS software  
(접수일자 : 1997. 9. 30)