

# 손상지수법을 이용한 트러스 교량의 손상추정

## Damage Identification in Truss Bridges using Damage Index Method

이 봉 학<sup>1)</sup> · 김 정 태<sup>2)</sup> · 장 등 일<sup>3)</sup>  
*Lee, Bong Hak · Kim, Jeong Tae · Chang, Dong Il*

요 약 : 소수의 진동특성치가 실측된 삼차원 트러스 교량을 대상으로 기존의 손상추정법이 실험되었다. 첫 번째 단계로 진동모드 민감도 해석과 패턴인식기법을 사용하여 초기구조모델(baseline model)이 구성되었고, 다음 단계로 수개의 손상시나리오 수치 예를 초기구조물에 시뮬레이션하고 이를 손상지수와 패턴인식기법을 이용하여 손상위치를 예측하였다. 총 211개 요소에 11개의 부 구조계를 갖는 트러스 구조에 대하여 진동모드가 2개인 경우에 한하여 분석, 검토한 결과 손상발견 알고리즘의 적합성이 입증되었다.

ABSTRACT : An existing Damage Index Method is verified to demonstrate its feasibility for detecting structural damage in truss bridges (1) for which modal parameters are available for a few modes of vibration and (2) for which baseline modal information is not available from its as-built state. The theory of approach to detect locations of damage and to identify baseline modal model is summarized on the basis of system identification theory and modal sensitivity theory. The feasibility of the Damage Index Method is demonstrated using a numerical example of a truss bridge with 11 subsystems of 211 members and for which only two modes of vibration were recorded for post-damaged state.

핵심용어 : 손상지수, 초기구조모델, 모드 민감도, 진동모드, 고유진동수

KEYWORDS : damage index, baseline modal model, mode sensitivity, vibration mode, natural frequency

### 1. 서론

건물, 교량, 댐, 해양 구조물, 원자력 발전소등

과 같은 대형 구조물은 각종 공용하중, 외부 물체에 의한 충격, 지진, 풍하중, 파랑하중, 부식 등에 지속적으로 노출되어 있어서, 이들로부터 구조

1) 정회원 강원대학교 토목공학과 교수  
2) 정회원 부경대학교 해양공학과 조교수  
3) 정회원 한양대학교 지구환경건설공학부 교수

본 논문에 대한 토의를 1998년 12월 30일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

물의 안전을 확보하는 문제는 경제, 사회적으로 지대한 관심의 현안이 되고 있다. 이들 대형 구조물들의 정확한 안전진단을 위해서는 적절한 실험 계측을 통한 구조거동의 모니터링과 구조손상을 역학적으로 분석하는 기술 및 구조시스템의 구조손상을 모델화하는 해석기술을 통한 진단기술이 요구된다.

구조물의 손상을 발견하기 위하여 사용되고 있는 기술은 재료적인 비파괴 검사법과 더불어 정변위 측정법 및 진동특성 측정법 등이 사용되고 있다. 이들 정변위 측정 및 진동특성치를 이용한 구조손상 추정방법은 System Identification 기법으로 구조계의 거동을 실측하고 이를 구조 해석적으로 모델화하여 구조물 특성치를 추정하는 방법이다. 이들 방법은 기타의 방법에 비하여 (1) 초기 구조물(baseline structure) 모델의 정확성, (2) 단기간 내에 구조계 전체에 대한 진동측정의 용이성, (3) 구조적으로 치명적인 손상의 발견 등의 장점이 있다. 이 같은 손상추정기술은 1970년대에 해양구조물의 노후화를 진단하는데 적용되기 시작한 이후로 기계 및 우주항공 등의 분야에서 실제로 많이 적용되고 있다. 한편, 토목구조물들과 같은 대형 구조계의 손상도 추정에 대한 연구도 국내, 외에서 활발히 수행되고 있다.

선형 구조계에 대한 안전진단을 위한 손상추정의 연구로는, 1980년대 이후 구조물에 존재하는 구조손상을 비파괴적으로 발견하려는 노력의 일환으로 구조물의 진동특성치(고유진동수, 진동형상, 감쇄계수)를 이용하는 연구들이 활발히 진행되어 왔다. 구조 진동특성을 사용한 이같은 비파괴적 손상발견 분야의 연구는 대형 토목구조물의 구조안전도 측정에 응용하려는 연구로서 발전되어 왔는데, 예를 들어, Biswas<sup>(1)</sup> 등은 진동특성치의 변화로부터 교량구조물 강성도의 변화를 직접 모니터 하는 시도를 하였으며, Idichandy 등<sup>(2)</sup>은 해양 자켓플랫폼 축소모형을 사용한 실험으로부터 진동특성치의 변화와 구조결합과의 관계를 예측하는 연구를 수행하였다. 한편, Chen<sup>(3)</sup> 그리고

Stubbs 등<sup>(4)</sup>은 다자유도 구조물의 진동특성의 변화를 사용한 선형 민감도 해석을 통해 항공우주 구조물과 같은 대형 구조체계의 구조특성치의 변화를 예측하는 이론을 제시하였다. 최근에는 Shephens과 Yao<sup>(5)</sup>, Aktan<sup>(6)</sup>, Yun<sup>(7)</sup>, Stubbs와 Kim<sup>(8-10)</sup>의 연구로서, 민감도 행렬법, 모드에너지법, 모드 신경망법 등을 사용하여 실물 강판형(steel plate-girder)교와 철근콘크리트 슬래브교, 강 트러스교, 축소모형 철근콘크리트 Deck 구조물, 그리고 초기 구조물의 진동특성치가 측정되지 않은 연속보 또는 다자유도 구조물 등의 구조손상도를 추정하는 연구를 수행하였다.

그 동안의 연구결과 개발된 기존의 손상추정체계<sup>(8-10)</sup>를 대형구조물에 적용하기 위하여 극복되어야 할 몇 가지 과제로는 (1) 여러 기능의 구조부재를 포함하는 복합 구조물(예를 들어 트러스교나 현수교)의 부재 민감도 해석방법의 개선, (2) 소수의 측정된 진동모드 민감도와 손상지수를 사용한 손상추정 알고리즘의 개선, (3) 신뢰할 수 있는 초기 구조물 유한요소 모델링 기법의 개발, (4) 진동반응 측정 및 데이터 처리상의 오류에 의한 손상추정 결과의 불확실성을 산정하는 문제 등이다.

이상의 연구과제와 관련하여 본 논문에서는 소수의 진동특성치가 실측된 삼차원 트러스 교량을 대상으로 기존의 손상지수법을 실험하였다. 수치 실험 대상으로 삼차원 트러스 교량을 선정하였는데 이는 여러 부재들의 복합적인 거동을 포함하는 높은 복잡성(high complexity)을 지니고, 전체 부재수에 비해 극히 적은 수의 진동모드만이 작은 계측오차 범위에서 측정 가능한 구조물을 대상으로 손상지수법을 검토하고자 하였기 때문이다. 실험과정은 다음의 두 단계로서 (1) 진동모드 민감도 해석과 패턴인식기법을 사용하여 초기 구조모델(baseline model)을 구성하고, (2) 초기 구조모델에 수개의 손상시나리오 수치 예를 시뮬레이션하고 이를 손상지수와 패턴인식기법을 이용한 손상발견 알고리즘을 통해 예측하는 것이다. 최종

단계로서는 각 수치예의 예측된 결과를 정량적으로 분석하여 손상지수법의 알고리즘을 개선하는 것이다.

먼저, 초기 진동특성치가 기록되지 않은 실제 트러스 교량을 위한 손상발견체계의 일부로서의 기본모델을 얻는 방법을 연구하였다. 기본모델화 알고리즘 적용성과 적합성을 검증하기 위하여 공용중의 트러스 교량(초기상태의 실측치는 없는)의 진동모드 실측결과를 사용하였다. 실물의 공용중의 대형 트러스 교량에서는 측정가능한 진동모드 특성이 모드수와 모드형상, 그리고 형상인식에 있어서 매우 제한적이다. 또한, 계측상의 오류 및 모델링의 어려움 등에 기인하여 System Identification이 매우 힘들며 그 정확도가 떨어진다. 이와 같은 이유로 인하여 수치모델이 아닌 실물구조를 대상으로 기본모델화 과정의 적용성을 검토하는 것이다. 다음으로, 트러스 교량에 대한 손상발견 알고리즘의 적용성을 검증하기 위하여 수치실험을 수행하였다. 실물구조물에서 확인가능하게 제어된 손상의 위치 및 크기를 얻을 수 없었으므로, 실험목적으로 손상의 위치 및 크기를 도입하고 후에 예측된 결과와 비교할 수 있는 수치모델을 이용하였다.

## 2. 실험구조물

실험구조물은 미국 캘리포니아 세크라멘토 인근의 Rancho Murieta에 소재하고 있는 삼차원 트러스로서 1908년경에 건설되었다. 본 논문의 저자는 연구진의 일원으로서 1992년도에 대상교량에 대한 진동모드실험과 분석에 참여하였다.<sup>(14)</sup> 그림 1과 같이 이 구조물은 101.6mm(4 in)의 PS 콘크리트 슬래브(pre-cast concrete slab)와 가로보(steel stringer) 및 강 트러스(steel truss) 부재로 구성되었다. 트러스의 지간은 73.15m(240 ft)이며 최대높이는 12.19m(40 ft)이고 5.89m(19 ft - 4 in)의 도로를 지지하고 있다. 그림 2는 트러스의 진동계측 실험체

계이며, 2-채널(Channel) 가속도계(accelerometer)를 통해 계측되었다. 고정 가속도계의 위치는 절점 45 이었고 수직방향으로 설치되었다. 다른 하나인 이동 가속도계는 그림 2와 같이 전체 66 절점인 트러스의 각 연결부에서 x, y 및 z 방향의 운동을 계측하였다. 외부진동(excitation)은 전체 실험 동안에 일정한 위치에서 자유낙하 시킴으로서 가해졌다. 대략 170회의 진동 거동이 기록되어 주파수 응답함수(Frequency Response Function)가 구해졌으며, 이 주파수 응답함수로 부터 진동모드형상(mode shape)과 공명주파수(resonance frequency)가 구해졌다. 초기 2개 진동모드의 진동형상은 그림 3과 같으며 진동모드 1과 진동모드 2의 고유진동수는 각각 2.187 Hz 와 3.50 Hz이었다.

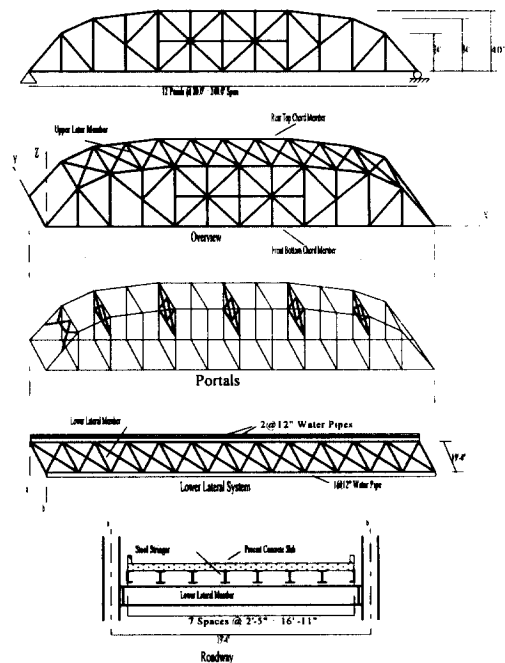


그림 1. 3차원 트러스교 모형도

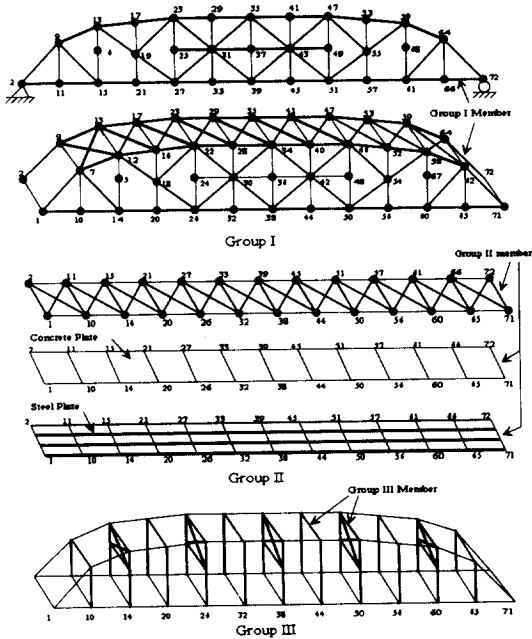


그림 2. 트러스교의 유한요소모델 개형도

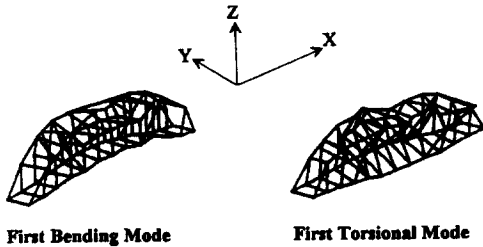


그림 3. 실험구조체의 추정모드 형상

### 3. 기본모델 추정

#### 3.1 기본모델 추정과정

본 과정에서는 그림 4의 기본모델 추정체계가 사용되었다. 먼저, 초기 유한요소 모델은 66 절점과 211 요소로 구성되었다. 초기 유한요소 모델의 역학적 특성치는 다음과 같이 추정되었다. (1)

트러스 부재로 모델된 상현재(upper chord members), 중현재(middle chord members), 하현재(lower chord members), 수직재(vertical members), 상부 횡부재(upper lateral members), 사재(diagonal members) 및 교문(portal)부재의 경우: 포아송 비  $\nu=0.3$ , 탄성계수  $E=200GPa(29 \times 106psi)$ , 선형질량밀도  $\rho=7,850kg/m^3(7.33 \times 10^{-4} lb \cdot s^2/in^4)$ , (2) 파이프로 모델된 송수관의 경우:  $\rho=1,070kg/m^3(1.0 \times 10^{-4} lb \cdot s^2/in^4)$ ,  $E=0$ , 파이프 반경  $r=152mm(6 in)$ , (3) plate로 모델된 PS 콘크리트 슬래브의 경우,  $E=24.8GPa(3.6 \times 106psi)$ ,  $\rho=2,450kg/m^3(2.26 \times 10^{-4} lb \cdot s^2/in^4)$ ,  $\nu=0.15$ , plate 두께  $t=102mm(4 in)$ , (4) plate로 모델된 바닥 가로보의 경우,  $\nu=0.3$ ,  $E=200GPa(29 \times 106psi)$ ,  $t=5mm(0.2 in)$ . 이상에서 선정된 초기유한요소모델에 대하여, 상용 구조해석 소프트웨어인 ABAQUS를 사용하여 모드해석(modal analysis)을 수행하여 66 절점과 2개의 진동모드에 대한 진동특성치를 구하였으며 부록 A의 민감도식을 사용하여 2개 진동모드와 211 요소에 대한 진동모드 민감도를 계산하였다.

기본모델 추정을 위하여 3개의 요소그룹으로서 그림 2와 같은 Group 1, Group 2 및 Group 3을 선택하였다. Group 1의 요소들은 구조특성치 데이터를 설계도로부터 자세히 얻을 수 있는 부재들로서 상현재, 중현재, 하현재, 수직 경사재, 상부 횡 경사재 등을 포함한다. 기본모델화 과정에서 Group 1에 대한 특성치 추정을 하지 않았는데 이는 데이터를 설계도로부터 자세히 얻을 수 있었고 사용가능한 진동모드수에 대비하여 추정해야 할 부구조계의 숫자를 줄이기 위해서이다. Group 2 및 Group 3 요소들은 유한요소 모델링 과정에서 구조특성치 데이터가 비교적 불명확한 슬래브, 바닥 가로보, 송수관, 교문 부재 등을

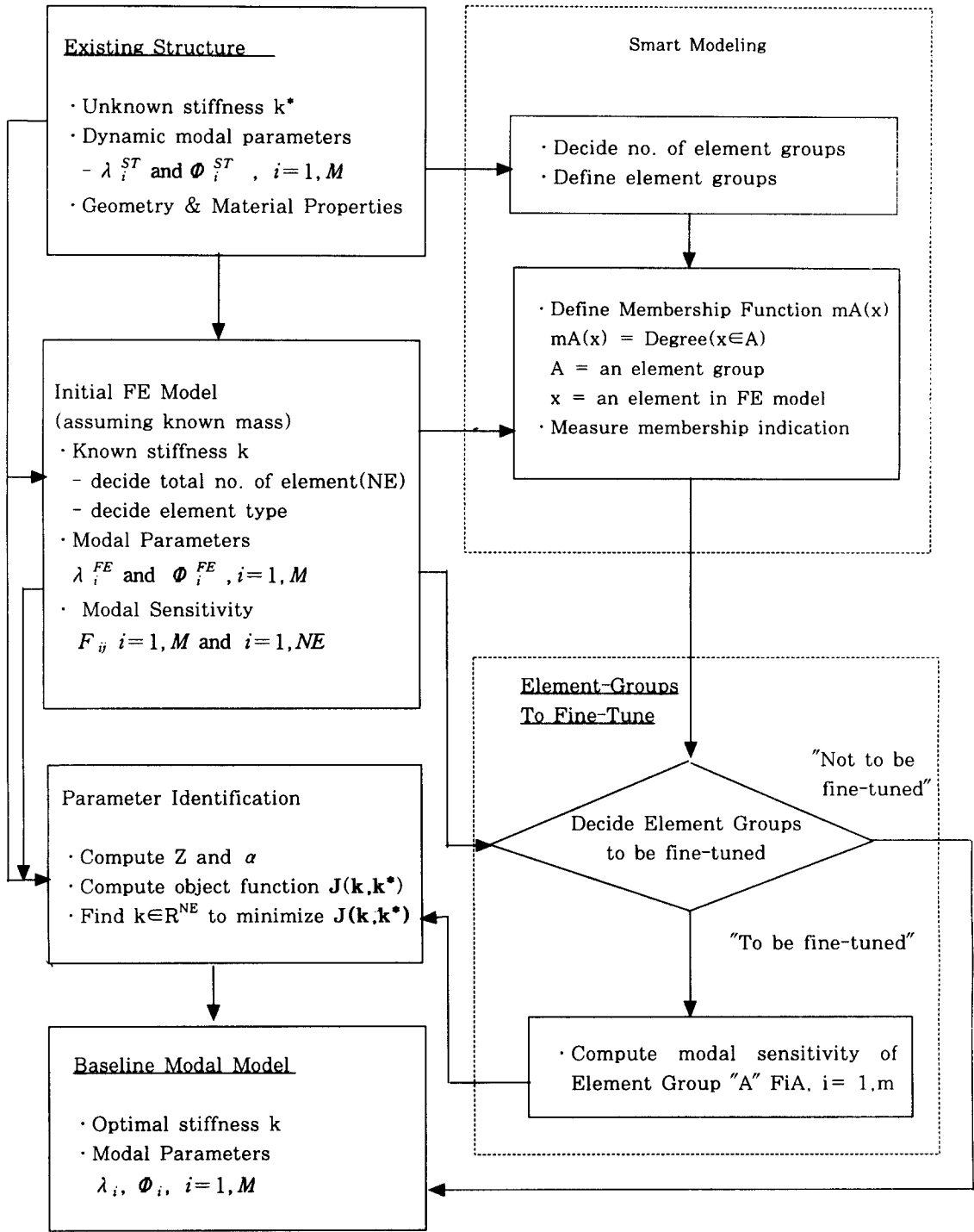


그림 4. 기본모델 체계도

포함한다.

표 1은 요소그룹 Group 2와 Group 3의 두 진동모드에 대한 민감도를 요약하였다. Group 2의 Membership 함수는 "IF  $X^1$  IS VL AND  $X^2$  IS VS, THEN X BELONGS TO Group 2"로 정의하였다. 즉, Group 2는 모드 1에 대하여는 매우 큰(VL: very large) 민감도를 보이고 모드 2에는 매우 작은(VS: very small) 민감도를 보인다. Group 3의 Membership 함수는 "IF  $X^1$  IS RS AND  $X^2$  IS RL, THEN X BELONGS TO Group 3"으로 정의하였다. 즉, Group 3은 모드 1에 대하여는 비교적 작은(RS: relatively small) 민감도를 보이고 모드 2에 대하여는 비교적 큰(RL: relatively large) 민감도를 보이고 있다.

표 2는 두 진동모드와 두 요소그룹에 대하여 계산된  $2 \times 2$  민감도 행렬이며 각 민감도는 특정 요소그룹이 주어진 진동모드의 변형에너지에서 차지하는 비율을 의미하고 있다. 예를들면, Group 2의 민감도는 1번 모드에 대해서 0.5609이며 2번모드에 대해서는 0.0913이다. 1번모드에 대한 민감도가 2번모드에 대한 민감도 보다 상대적으로 6.14배(즉, VL)크다. 표 3과 표 4는 유한요소 모델의 최적화 반복과정에서 고유진동수의 변화와 구조특성치의 변화를 나타내고 있다. Group 2의 강성도 특성치로서 휨강성(flexural rigidity)이 사용되었으며 Group 3의 경우에는 비틀림 강성이 사용되었다. 5회 반복과정의 결과로서 고유진동수가 목표치(target value: 실험구조물의 실측치)의 1% 오차 범위 내로 추정되었으며, Group 2와 Group 3의 강성도 특성치는 수렴되었다. 이때의 유한요소 모델을 기본모델로 선정하였으며, 고유진동수는 2.194 Hz(모드 1)와 3.4761 Hz(모드 2)이며 그림 5의 모드형상과 같다.

표 1. 진동모드에 대한 요소그룹의 Membership함수

GROUP \ MODE	Mode 1 (First Bending)	Mode 2 (First Torsional)
Group Two	VL	VS
Group Three	RS	RL

표 2. 유한요소 모델에 사용된 모드 민감도

Mode	Sensitivity	
	Group Two	Group Three
1 (First Bending)	0.5609	0.4391
2 (First Torsion)	0.0913	0.9087

표 3. 모델최적화 과정의 고유진동수 변화

Mode	Iteration Number						
	Initial-Guess	1	2	3	4	5	Target
1	2.3730	2.2268	2.2042	2.1982	2.1958	2.1946	2.1850
2	2.7854	2.9955	3.2445	3.3797	3.4462	3.4761	3.5000

표 4. 모델최적화 과정의 탄성계수(GPa) 변화

Element Group	Iteration Number					
	Initial-Guess	1	2	3	4	5
Group Two	200	35.26	20.78	17.01	15.57	14.84
Group Three	200	361.28	521.35	624.81	680.05	706.62

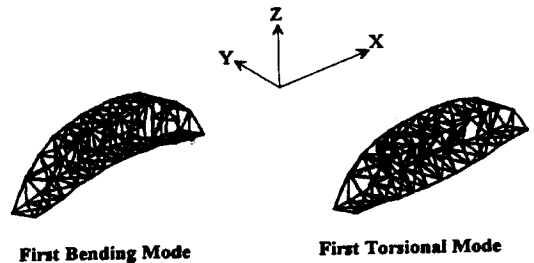


그림 5. 유한요소 모델의 모드형상

### 3.2 기본모델 추정결과의 검토

추정된 기본모델의 정확도를 정량적으로 산정하기 위하여 Sensitivity Assurance Criteria(SAC)를 사용하였다.(8)

$$SAC(u, v) = 1 - \frac{(u, v)^2}{(u, u)(v, v)} \quad (1)$$

여기서 기본모델의 모드 민감도 벡터는  $u \in R^N$ 이며 실험구조물의 모드 민감도는  $v \in R^N$ 이고  $R^N$ 는 NE-Order Space이다. 이 식에서는  $u$ 와  $v$ 의 차이를 산정하며  $SAC=0$  일 때 벡터  $u$ 와  $v$ 는 동일하다.

2개 진동모드와 211 요소(이때의  $N=422$ )일 때 진동모드 민감도가 계산되었으며, 그림 6은 기본모델의 모드 1의 민감도이며 그림 7은 실험구조물의 모드 1의 민감도와 같다. 단, 실제구조물의 모드 민감도는 유한요소모델의 시스템 강성도와 실측 모드벡터를 사용하여 구하였다. 이들로 부터 식(1)에서  $SAC=0.015$ 를 얻었다. 이는 기본모델이 실험구조물과 그 진동거동에 있어서 매우 동일하다는 것을 나타낸다. 주의할 것은, 이 같은 시스템 모드거동의 일치에도 불구하고 몇몇 절점 위치 또는 요소 위치에서는 모드벡터(그림 3과 그림 5의 비교) 및 모드민감도(그림 6과 그림 7의 비교)에서 큰 차이를 보이는 위치들이 있는데

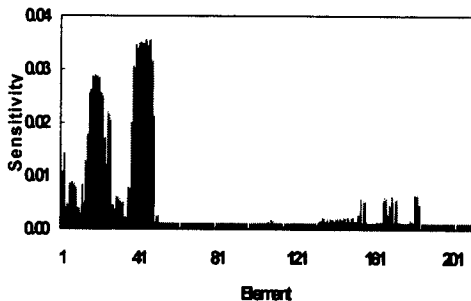


그림 6. 기본 유한요소모델의 모드 민감도 (Mode 1)

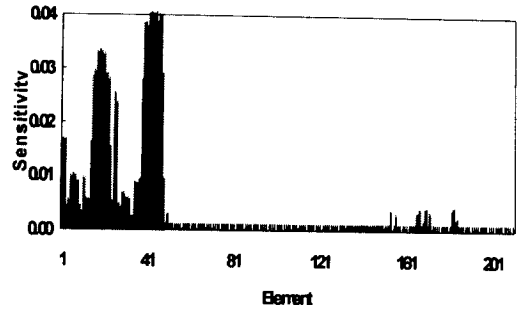


그림 7. 실험 구조물의 모드 민감도 (Mode 1)

(예를 들어 그림 6과 그림 7의 요소 40-46), 이는 실험구조물의 진동계측시에 발생된 몇몇 절점에서의 모드벡터 측정상의 오차 또는 실험구조물의 심각한 구조손상의 영향으로 판단된다.

## 4. 구조손상 위치추정

### 4.1 구조손상 위치추정 과정

앞절에서 추정된 기본모델을 사용하여 구조손상 위치추정 방법의 적용성에 관하여 검토하였다. 먼저, 기본모델의 임의의 위치(부재)에 구조손상을 시뮬레이션하고, 모드해석으로부터 손상된 구조모델의 진동특성치를 얻었다. 다음으로 비손상 기본모델과 손상이 도입된 모델의 진동모드 민감도를 계산하고 구조손상 위치추정을 수행하였다. 본 수치 예에서는 2개의 진동모드를 사용하였으며 211개의 미지 트러스 부재를 대상으로 하였다.

먼저, 전체 20개의 손상시나리오(damage scenarios)가 실험되었는데 표 5에 요약되었다. 구조손상은 주어진 부재의 강도를 감소시켜서 도입하였다. 손상도입 위치 선정은 상현재 3개 위치, 수직재 3개 위치, 하현재 3개 위치, 가로보 3개 위치, 교문 3개 위치로 하였으며 단일위치 15 시나리오와 복수위치 15 시나리오로 전체 30개 손상위치가 선정되었다. 선정된 부재의 강도를 감

소시킴을 위하여 부재강성행렬의 탄성계수를 감소시켰다. 예를들면, 표5의 Stiffness Reduction

표 5. 기본모델의 손상 시나리오 시뮬레이션

Damage Case	Element Number	Nodal Connectivity	Stiffness Reduction
1	30	9-13	25%
2	40	17-23	25%
3	42	29-35	25%
4	26	11-15	25%
5	28	21-27	25%
6	30	33-39	25%
7	93	17-19	25%
8	99	35-37	25%
9	101	41-43	25%
10	198	5-13	25%
11	204	23-14	25%
12	207	35-36	25%
13	51	4-15	25%
14	53	6-27	25%
15	55	8-39	25%
16	38, 40, 42	9-13, 17-23, 29-35	25%, 25%, 25%
17	26, 28, 30	11-15, 21-27, 33-39	25%, 25%, 25%
18	93, 99, 101	17-19, 35-37, 41-43	25%, 25%, 25%
19	98, 204, 207	5-13, 23-24, 35-36	25%, 25%, 25%
20	51, 53, 55	14-15, 26-27, 38-39	25%, 25%, 25%

표 6. 손상구조의 고유진동수(Hz)

Damage Case	Mode 1 (First Bending)	Mode 2 (First Torsion)
Reference	2.1946	3.4761
1	2.1891	3.4738
2	2.1891	3.4695
3	2.1862	3.4681
4	2.1904	3.4761
5	2.1914	3.4761
6	2.1899	3.4749
7	2.1946	3.4755
8	2.1946	3.4685
9	2.1946	3.4740
10	2.1946	3.4760
11	2.1946	3.4758
12	2.1946	3.4755
13	2.1946	3.4760
14	2.1946	3.4781
15	2.1946	3.4760
16	2.1734	3.4596
17	2.1827	3.4748
18	2.1946	3.4657
19	2.1946	3.4750
20	2.1945	3.4759

25%은 탄성계수의 25%를 감소를 의미한다. 다음으로, 모드해석으로 부터 20개 손상의 각각 경우의 진동특성치가 구해졌다. 표 6은 이들의 고유진동수를 요약한 것이다. 한편 이들의 모드형상은 그림 5와 동일한 양상을 보였다.

기설의 선형구조계의 진동모드 민감도 이론에 기초한 손상지수(damage index)방법 식들은 다음과 같다. NE부재와 N절점의 선형구조계에 대해,  $i^{th}$  진동모드와  $j^{th}$  부재의 강도변화를 나타내는 손상위치지수  $\beta_{ji}$  와 손상도지수  $\alpha_{ji}$ 는 다음과 같다. (8-10)

$$\beta_{ji} = \frac{(\phi_i^* T C_{jo} \phi_i^* + \sum_{k=1}^{NE} \phi_i^* T C_{ko} \phi_i^*)}{(\phi_i^T C_{jo} \phi_i + \sum_{k=1}^{NE} \phi_i^T C_{ko} \phi_i)} \frac{K_i}{K_i^*} = \frac{A_{ji}}{B_{ji}} \quad (2a)$$

$$\alpha_{ji} = \frac{(\phi_i^T C_{jo} \phi_i)}{(\phi_i^* T C_{jo} \phi_i^*)} \frac{K_i^*}{K_i} - 1 \quad (2b)$$

여기서,  $K_i$  는 비손상 구조계의  $i^{th}$  모드강성도,  $\phi_i$  는  $i^{th}$  고유벡터(eigenvector),  $C_{jo}$  는 비손상부의 기하학적 특성치(단, 포아송비는 포함)를 대표하는 매트릭스 이며, 별표 \* 는 손상 구조계를 표시한다. 식(2)를 NM 진동모드에 대하여 합산하면 jth 부재에 대한 손상위치지수  $\beta_j$  는 다음과 같다.

$$\beta_j = \sum_{i=1}^{NM} A_{ji} / B_{ji} \quad (3)$$

윗 식에서  $\beta_j > 1$  일 때,  $j^{th}$  부재의 손상발생에 의한 강도감소를 의미한다.

통계적인 패턴인식을 통한 손상지수  $\alpha_{ji}$  와  $\beta_j$  의 해석방법으로는,  $\beta_j$  를 확률변수로서 표본집단  $j=1, 2, \dots, NE$  인 경우라고 할 때, 정규(normalized) 손상지수  $Y_{ji}$  와  $Z_j$  는 다음과 같다. 여기



서  $\bar{\beta}$  와  $\sigma_\beta$  는  $\beta_j$  의 평균 및 표준편차이며  $\bar{\alpha}_i$  와  $\sigma_\alpha$  는  $\alpha_{ji}$  의 평균 및 표준편차이다.

$$Y_{ji} = (\alpha_{ji} - \bar{\alpha}_i) / \sigma_\alpha; \quad Z_j = (\beta_j - \bar{\beta}) / \sigma_\beta \quad (4a, b)$$

다음으로, Hypothesis Testing 이론과 정규손상지수  $Y_{ji}$  또는  $Z_j$  를 사용하는 PR-detector (패턴인식 디텍터) 를 사용하여 구조손상의 위치와 정도를 예측한다. (12, 13)

Choose  $H_1$  (jth member is damaged) if  $Z_j \geq K$  (또는  $Y_{ji} \geq K_i$ ) (5)

여기서  $K$  (또는  $K_i$ ) 는 Hypothesis Testing 의 신뢰도를 반영하는 Confidence Level 을 나타낸다. 예로서,  $K=3.0$  은 정규분포도의 One-Tail Test 상의 99.7% 신뢰도를 의미한다.

손상발견모델은 공간트러스 모델로서 각 절점 당 3 자유도 운동에 대한 모드벡터가 입력되었다. 식(2)-식(5)로부터  $i^{th}$  모드와  $j^{th}$  부재에 대한 손상지수  $\beta_{ji}$ ,  $\alpha_{ji}$  및  $\beta_j$  가 계산되었다. 손상지수  $\beta_{ji}$ ,  $\alpha_{ji}$  및  $\beta_j$  의 통계적인 패턴인식을 통하여 손상위치를 예측하였는데 다음의 두 가지 다른 패턴에 대하여 수행하였다. 처음의 Pattern A는 기존의 연구결과이며 현재 구조물의 손상발견에 사용되고 있는 방법이다 (참조: Pattern A는 참고문헌 [8-11]에 자세히 소개되어 있다). 두 번째의 Pattern B는, 1996년 이후에 수행되어 오고 있는 새로운 연구의 일부이며 (참조: 참고문헌 15), 본 연구에서 개량된 방법이다.

Pattern A: " Choose  $H_1$  when  $Z_j \geq K$  " 의 분류를 통해 손상위치가 추정되었으며 그 결과는 표 7과 같다.

Pattern B: " Choose  $H_1$  when  $\bigcap (Y_{ji} >$

$= K_i)$  " 의 분류를 통해 손상위치가 추정되었으며 그 결과는 표 8과 같다.

표 7. 패턴 인식을 사용한 손상예측 결과 : Pattern A

Damage Case	Simulated Damage Element(s)	Predicted Element(s) by Pattern A
1	38	38
2	40	40
3	42	42
4	26	1, 26, 43, 44, 46
5	28	15, 16, 17, 28, 84
6	30	15, 16, 17, 25, 30
7	93	15, 39, 40, 43, 46, 80, 84, -
8	99	17, 18, 19, 40, 42, 43, 44, -
9	101	16, 19, 36, 43, 76, 80, 84, 98, - 102, 195
10	198	15, 43, 80, 102, 194, 198, 199
11	204	23, 36, 68, 69, 74, 76, 83, 84, 98, 195, 196, 204
12	207	19, 36, 76, 84, 102, 207, 208
13	51	15, 39, 40, 43, 51, 76, 84, 195
14	53	19, 43, 53, 84, 202
15	55	19, 36, 55, 84, 16
16	38, 40, 42	38, 40, 42
17	26, 28, 30	15, 16, 17, 26, 30, -
18	93, 99, 101	17, 18, 19, 20, 41, 42, 43, 44, - - -
19	198, 204, 207	17, 19, 39, 43, 194, 198, 204, 207, 208
20	51, 53, 55	40, 51, 53, 55, 76, 195

표 8. 패턴 인식을 사용한 손상예측 결과 : Pattern B

Damage Case	Simulated Damage Element(s)	Predicted Element(s) by Pattern B
1	38	38, 62, 76, 114, 116, 133, 134
2	40	40, 64, 73, 114, 116, 127, 138, 161
3	42	42, 66, 142, 191
4	26	26
5	28	28
6	30	30, 54, 55, 109, 111, 120
7	93	93
8	99	99, 206
9	101	101
10	198	198, 199
11	204	204, 205
12	207	207
13	51	51
14	53	53
15	55	55
16	38, 40, 42	38, 40, 42, 62, 73, 83, 114, 116, 127, 131, 133, 134, 138, 142, 159, 161
17	26, 28, 30	26, 28, 30, 55, 112, 120
18	93, 99, 101	93, 99, 101, 206
19	198, 204, 207	93, 198, 199, 204, 205, 207
20	51, 53, 55	51, 53, 55

#### 4.2 손상위치 추정결과의 검토

구조손상예측의 정확도를 산정하기 위하여 Hypotheses Test에 의한 Type I error와 Type II error가 측정되었다. 첫 번째 손상위치 정확도 측정식으로 Detection Missing Error (DME)를 사용하였다.<sup>(8,12)</sup>

$$DME = \frac{1}{NT} \sum_{i=1}^N P_i \quad (7)$$

NT 는 실제(true) 전체 손상위치 수,  $P_i$  는 Type I error(존재하는 위치를 발견치 못한 오류)이다. 두 번째 손상위치 정확도 측정식으로 False Alarm Error (FAE)를 사용하였다.

$$FAE = \frac{1}{NF} \sum_{i=1}^N Q_i \quad (8)$$

NF 는 예측된(predicted) 위치 수,  $Q_i$  는 Type II error(예측된 위치가 실제 손상위치가 아닌 오류)이다. 이상의 식(7)과 식(8)을 사용하여 표 7의 Pattern A의 결과와 표 8의 Pattern B의 손상위치 추정 결과들의 정확도를 산정하였으며 그 결과는 표 9와 같다.

표 9. 손상발견 모델과 손상예측 오차

PR-Detector	DME	FAE
Pattern A	0.233	0.823
Pattern B	0	0.590

Pattern A의 결과는 다음과 같이 분석된다. 본 실험구조물인 삼차원 트러스에 있어서 (1) 평균 100개 손상위치중에서 23개 위치는 발견되지 않을 것이며 (2) 예측된 100개 위치 중에서 18개 위치에만 실제 손상이 존재할 것이다. Pattern B의 결과는 다음과 같이 분석된다. 본

실험구조물인 삼차원 트러스의 경우에 있어서 (1) 평균 100개 손상위치중에서 모든 위치가 발견될 것이며 (2) 예측된 100개 위치 중에서 41개 위치에 실제 손상이 존재할 것이다.

이상의 분석의 결과로 Pattern B는 Pattern A에 비교하여 좋은 손상추정의 정확도를 보였으며 복합적인 트러스형 구조물의 손상추정에 적합한 모델임이 입증되었다. 주의할 점은, 이 경우의 실험은 실험구조물이 211 부재의 삼차원 트러스로 단지 2개의 기초 진동모드만이 사용된 경우이며 진동모드 수가 여러 개 추가될 때에 손상예측의 정확도가 보다 더 향상될 것이라는 점이다.

#### 5. 요약 및 결론

본 연구에서는 소수의 진동특성치가 실측된 삼차원 트러스 교량을 대상으로 기존의 손상추정법이 실험되었다. 첫 번째 단계로 진동모드 민감도 해석과 패턴 인식기법을 사용하여 초기 구조모델(baseline model)이 구성되었고, 다음 단계로 수개의 손상 시나리오 수치 예를 초기구조물에 시뮬레이션하고 이를 손상지수와 패턴인식기법을 이용하여 손상위치를 예측하는 실험이 수행되었다. 마지막으로, 각 수치예의 예측된 결과를 정량적으로 분석하여 손상발견 알고리즘의 적합성이 산정되었다.

수치검증의 결과는 다음과 같다. 먼저, 11개의 부 구조계를 3개의 요소그룹으로 통합하고 진동 민감도를 이용한 구조특성치의 최적화 과정에서 기본모델이 추정되었으며 구조물 초기상태의 진동 특성치를 얻었다. 다음으로, Sensitivity Assurance Criterion을 사용하여 추정된 기본모델이 실험구조물과 그 진동 거동에 있어서 매우 동일하다는 것을 검증하였다. 또 다른 수치검증의 결과로, 제시된 구조 손상위치 추정방법을 사용하여 실험구조물의 기본모델에 20개의 손상시나리오(damage scenarios)가 실험되었다. 먼저 손상발견 모델과 손상지수가 계산되었으며, 통계적 패

턴인식방법 Pattern A(기존의 방법)와 Pattern B(개선된 방법)를 이용하여 손상위치가 예측되었다. 다음으로, Hypotheses Test에 의한 Type I error와 Type II error를 사용하여 Pattern A와 Pattern B의 손상에측결과를 비교, 분석하였는데, Pattern B가 Pattern A에 비교하여 좋은 손상추정의 정확도를 보였으며 복합적인 트러스형 구조물의 손상추정을 위하여 사용하기에 적합한 모델임이 입증되었다.

본 연구와 관련하여 수행되어야 할 미래의 연구과제는 다음과 같다. 첫째, 제시된 구조손상 체계는 추정된 기본모델 및 손상발견 모델 각각을 두 단계에 걸쳐서 결정하여야 하므로 처리과정에 많은 시간이 소요된다. 따라서, 기본모델화와 손상발견 모델을 통합적으로 운영하는 방법에 대한 연구가 요망된다. 둘째, 본 연구 결과는 트러스구조의 진동모드가 2개인 경우에 한하여 검토되었다. 따라서, 실측 진동모드 데이터량과 구조손상 체계의 정확도 사이의 불확실성을 산정하는 연구가 요망된다. 셋째, 제시된 손상검색 체계를 현재 공용중인 실물 구조물을 대상으로 실험하여 그 적용성을 검증하는 실험적 연구가 요구된다.

#### 감사의 말

본 연구는 96년도 한국과학재단 핵심연구비(과제번호 961-1203-015-1) 지원에 의한 연구의 일부로서 한국과학재단의 지원에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

- (1) Biswas, M., Pandey, A.K., and Samman, M.M. (1990). "Modal Technology for Damage Detection of Bridges", NATO Workshop on Bridge Evaluation, Repair and Rehabilitation, A. Nowak, Kluwer Academic Publishers, Maryland, pp. 161-174.
- (2) Idichandy, V.G., and Ganapathy, C (1990). "Modal Parameters for Structural Integrity Monitoring of Fixed Offshore Platforms", *Experimental Mechanics*, Vol. 30, pp. 382-391.
- (3) Chen, J., and Garba, J.A. (1988). "On-Orbit Damage Assessment for Large Space Structures", *AIAA Journal*, Vol. 26, No. 9, pp. 1119-1126.
- (4) Stubbs, N., Broome, T.H., and Osegueda, R. (1990). "Nondestructive Construction Error Detection in Large Space Structures", *AIAA Journal*, Vol. 28, No. 1, pp. 146-152.
- (5) Yao, J.T.P. (1988). "Identification of Structural Damage in Civil Engineering", *Application of System Identification in Engineering*, eds. G.A. Keramidas and C.A. Brebbia, Springer-Verlag Berlin, New York, pp.349-390
- (6) Aktan, A.E. (1993). "Structural Identification on a Steel Stringer Bridge", *Transportation Research Record No. 1393*, National Research Council.
- (7) Yun, C.B., Lee, H.J., and Lee, C.G. (1996). "Efficient Damage Assessment of Structures Using Substructural Identification", *Proc. APCOM '96*, Vol. 2, pp. 1067-1072.
- (8) Kim, J.T., and Stubbs, N. (1995). "Model Uncertainty and Damage Detection Accuracy in a Plate-Girder Bridge", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 121, No. 10.
- (9) Kim, J.T. (1995). "A Robust Damage Localization Algorithm for Highway Plate-Girder Bridges", *Proc. of SPIE*, Vol. 2446, pp. 103-110.
- (10) Stubbs, N., and Kim, J.T. (1996). "Damage Localization in Structures Without Baseline Modal Parameters", *AIAA Journal*, Vol. 34, No. 8, pp. 1644-1649.
- (11) Kim, J.T., and Stubbs, N. (1996). "Smart Baseline Model of 3-D Truss

Bridges for Damage Detection", Proc. of APCOM '96, Vol. 1, pp. 777-782.

- (12) Kosko, B. (1992). Neural Networks and Fuzzy Systems, Prentice-Hall International, USA.
- (13) Schalkoff, R. (1992). Pattern Recognition-Statistical, Structural and Neural Approaches, John Wiley & Sons, USA
- (14) Stubbs, N., Topole, K.G., Kim, J.T., and Madukolam, M. "Nondestructive Damage Assessment of The Cosumnes River Bridge at Rancho Murieta using Modal Parameters", Mechanics of Materials Center, Texas A&M University, Technical Report MM-14792, 1992.
- (15) 김정태, 류연선, 이봉학, 정영화, 박제선, "트러스 교량의 손상추정을 위한 진동모드 민감도의 패턴인식체계", 한국강구조공학회 1997년도 학술발표논문집, pp 17-23, 1997.

#### 부록A. 선형 구조계의 진동모드 민감도 (8,10)

손상되지 않은 NE 부재와 N 절점의 임의의 MDOF 선형 비감쇄계의 특성방정식으로부터

$$\lambda_n = K_n / M_n \quad (1)$$

여기서  $M_n$ ,  $K_n$ ,  $\lambda_n$ 은 각각 nth modal mass, nth modal stiffness 및 nth eigenvalue이다.

임의의 시간이 경과한 후에 MDOF 구조계의 임의의 부재에 손상이 발생하였다면

$$\lambda_n^* = \lambda_n + \Delta\lambda_n = (K_n + \Delta K_n) / (M_n + \Delta M_n) \quad (3)$$

여기서 별표 \* 는 구조물 손상상태를 의미하며  $\Delta\lambda_n$ ,  $\Delta K_n$  및  $\Delta M_n$ 은 각각  $\lambda_n$ ,  $K_n$ ,  $M_n$ 의 변화를 대표한다. 또한 식(3)을 정리하면, modal stiffness의 변화량  $\Delta K_n$ 은

$$\frac{\Delta K_n}{K_n} = \frac{\Delta M_n}{M_n} + \frac{\Delta\lambda_n}{\lambda_n} + \frac{\Delta\lambda_n}{\lambda_n} \frac{\Delta M_n}{M_n} \quad (4)$$

식(4)는 다음과 같이 손상발생 전·후의 eigenvectors인  $\Phi_n$  및  $\Phi_n^*$ 의 항으로 표현된다.

$$\Delta K_n = K_n^* - K_n = \Phi_n^{*T} (K + \Delta K) \Phi_n^* - \Phi_n^{*T} K \Phi_n \quad (5)$$

여기서  $K$ 와  $\Delta K$ 는 각각 시스템 강성도행렬 및 시스템 강성도행렬의 변화량을 나타낸다. 한편, 식(4)와 (5)로부터 식(6)이 구해진다.

$$\frac{\Phi_n^{*T} \Delta K \Phi_n^*}{K_n} = \frac{\Delta\lambda_n}{\lambda_n} + \frac{\Delta M_n}{M_n} + \frac{\Delta\lambda_n}{\lambda_n} \frac{\Delta M_n}{M_n} + \left(1 - \frac{\Phi_n^{*T} K \Phi_n^*}{K_n}\right) \quad (6)$$

식(6)의 우변의 모든 항은 직·간접적으로 실험측정치로부터 결정될 수 있다.  $k^{th}$  부재의  $\Delta K$ 에 대한 기여도를  $\Delta K_k$ 라고 하고  $\Delta K_k = K_k \alpha_k$ 라고 하면 식(6)은 다음과 같다.

$$\frac{\Phi_n^{*T} \Delta K \Phi_n^*}{K_n} = \sum_{k=1}^{NE} \frac{\Phi_n^{*T} K_k \Phi_n^*}{K_n} \alpha_k \quad (7)$$

여기서  $\alpha_k$ 는  $k^{th}$  부재의 상대적 손상을 나타낸다. 또한,  $k^{th}$  부재의 nth modal stiffness에 관한 민감도(sensitivity)  $F_{nk}$ 는

$$F_{nk} = \frac{\Phi_n^{*T} K_k \Phi_n^*}{K_n} \quad (8)$$

여기서,  $F_{nk}$ 는  $k^{th}$  부재에 대한  $n^{th}$  진동모드 변형에너지의 기여도를 의미한다.

(접수일자 : 1998. 2. 9)