

## 진동기초 통합 손상검색 시스템

### Vibration-Based Integrated Damage Identification System

김정태\* · 이영규\*\* · 김재현\*\*\* · 류연선\*\*\*\*

Kim, Jeong-Tae · Lee, Young-Kyu · Kim, Je-Heon · Ryu, Yeon-Sun

#### Abstract

In this study, an integrated damage identification system (IDIS) using modal information to detect damage in structures is presented. The main objective is to develop a system of softwares that facilitates detecting damage locations and estimating damage severities in bridges. Firstly, theoretical background for IDIS is outlined. Secondly, a GUI-based IDIS software scheme are programmed. Finally, the feasibility and applicability of the IDIS software are experimentally demonstrated using small-scaled plate-girder models.

#### 1. 서 론

대형구조물의 정확한 안전진단을 위해서는 적절한 실험계측을 통한 구조거동의 모니터링, 구조 손상을 역학적으로 분석하는 기술 및 구조시스템의 구조손상을 모델화하는 해석기술을 통한 진단 기술이 요구되고 있다. 적절한 안전진단기술의 확보를 통해 대형 기간시설물 등의 구조 신뢰성이 유지되고 작동성이 확보되며 안전성이 보장될 때 이들 구조물들의 안전에 대해 고조되어 있는 사회적 불안감이 해소되고 구조물의 경제적·산업적인 가치 및 기여도가 증대되리라 생각한다. 그러므로 첨단 계측기술을 사용한 구조물 거동의 측정과 구조해석 기술의 응용을 통해 구조손상을 검색하는 대형구조물 안전진단기술의 개발이 요망된다.

본 논문의 목적은 교량구조물에 존재하는 구조손상을 발견하기 위하여 진동모드 특성치를 활용하는 GUI구현 손상검색 프로그램을 개발하는 것이다. 즉, 구조물 진동모드의 변화를 계측하고, 진동모드 민감도이론과 시스템식별(system identification)이론을 이용하여 측정된 진동반응의 변화를 분석하여, 대상 구조물의 구조결합 위치 및 결합의 크기를 추정할 수 있는 통합 소프트웨어를 개발하는 것이다. 이와 같은 목적을 달성하기 위하여 다음과 같은 3 단계의 세부연구를 수행하였다. 먼저, 손상검색체계의 배경으로서 손상검색이론과 진동계측법의 기본개념을 요약하였다. 다음으로, GUI 구현 손상검색체계를 설계하였다. 이를 위해 대상구조물의 진동계측체계로부터

\* 정회원 부경대학교 해양공학과 조교수 (E-mail: idis@mail.pknu.ac.kr)  
\*\* 부경대학교 해양공학과 석사과정 (E-mail: yklee@woongbi.pknu.ac.kr)  
\*\*\* 부경대학교 해양공학과 석사과정 (E-mail: beokgu21@hanmail.net)  
\*\*\*\* 부경대학교 해양공학과 교수 (E-mail: ysryu@mail.pknu.ac.kr)

터 손상검색 자동화체계까지의 전체 과정을 구성하였다. 또한, GUI 구현 손상검색 소프트웨어를 프로그래밍 하였다. 마지막으로, 강판형교 축소모형을 사용한 실험을 통하여 개발된 GUI 구현 손상검색 프로그램의 적합성과 적응성을 검토하였다.

## 2. 진동기초 손상검색체계의 이론적 배경

### 2.1 손상검색 이론

구조식별 이론에 의한 손상검색체계가 그림 1에 예시되었다. 손상위치발견 알고리즘과 손상크기 추정 알고리즘에 대한 이론적 배경이 아래에 요약되었다. 이들 방법들은 기존의 선형 구조계 진동모드 민감도 이론에 근거하였다. Euler-Bernoulli 보로 모델링 하였을 때 손상위치지수와 손상크기지수는 다음과 같이 유도된다. [1] 먼저  $i$ 번째 모드와  $j$ 번째 요소의 손상위치지수  $\beta_{ji}$ 는 다음과 같다.

$$\beta_{ji} = \frac{(\int_j (\phi_i^{*''})^2 dx + \int_0^L (\phi_i^{*''})^2 dx)}{(\int_j (\phi_i^{*''})^2 dx)} \frac{(\int_0^L (\phi_i^{*''})^2 dx)}{(\int_0^L (\phi_i^{*''})^2 dx)} = \frac{NUM_{ji}}{DEN_{ji}} \quad (1)$$

여기서,  $\phi_i$  는  $i$ 번째 모드의 모드형상벡터이고, 별표 \*는 구조물 손상상태를 의미한다.

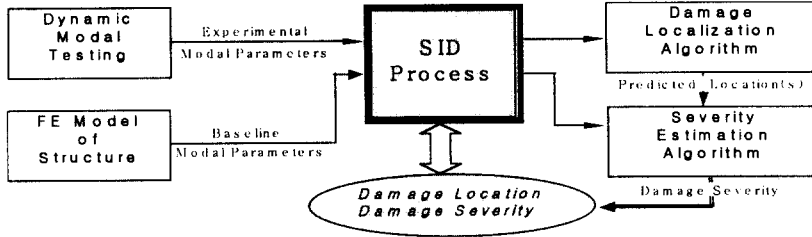


그림 1. SID에 의한 손상검색체계

또한, 손상위치가 예측된  $i$ 번째 모드와  $j$ 번째 요소의 손상크기지수  $\alpha_{ji}$ 는 다음과 같다.

$$\alpha_{ji} = 1/\beta_{ji} - 1 \quad (2)$$

복수의  $NM$  진동모드가 측정된 경우, 손상위치지수  $\beta_j$ 은 식(3)과 같다. 또한,  $\beta_j$ 가 정규분포 특성의 랜덤변수인 경우, 정규손상지수  $Z_j$ 는 식(4)와 같이 계산한다.

$$\beta_j = \sum_i \frac{NUM_{ji}}{DEN_{ji}} \quad (3)$$

$$Z_j = (\beta_j - \bar{\beta}) / \sigma_\beta \quad (4)$$

여기서  $\bar{\beta}$ 와  $\sigma_\beta$ 는  $\beta_j$ 의 평균 및 표준편차이다. 최종적으로 손상분류알고리즘인 “ $Z_j \leq 3$  이면 부재  $j$ 는 비손상” 또는 “ $Z_j > 3$  이면 부재  $j$ 는 손상”을 사용하여 부재의 손상 여부가 판정한다.

## 2.2 진동모드 계측법

진동모드의 계측은 크게 신호취득(Signal Acquisition), 신호변환(Signal Transform), 모드분석(Modal Analysis)의 세 단계로 구성된다.[7] 제 1단계인 신호취득은 신호를 전달·수집하는 과정으로서 신호의 특성이 왜곡되지 않도록 신뢰성 있는 수집과 전달이 보장되어야 한다. 제 2단계인 신호변환은 수집·전달된 보통 전기저항 신호를 공학적 의미를 갖는 단위로 변환하는 것이다. 즉, 시간영역의 진동모드 데이터를 주파수영역의 데이터로 변환하는 과정이다. 마지막으로 모드분석과정은 전 과정에서 추출된 공학적 인자를 바탕으로 구조 공학적 계산을 수행하여 모드 특성치를 추출하는 과정이다.

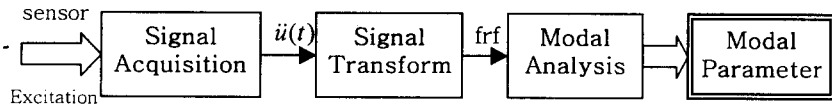


그림 2. 진동모드 계측 체계

## 3. 손상검색 자동화체계의 설계

교량구조물의 손상검색 자동화체계(Integrated Damage Identification System)로서 본 연구에서는 그림 3과 같은 계통도를 설계하였다. 이 IDIS 체계는 크게 진동모드계측체계와 손상검색체계로 구분된다. 먼저, 진동모드계측체계는 대상구조물과 계측장치의 설치에 관한 Structural Model과 Sensing 부분, Spectrum 신호분석기의 설치 및 신호취득 및 변환에 관한 Response Model과 Frequency Response 부분, 그리고 모드분석과 모드데이터 취득에 관한 Modal Model과 Modal Parameters 부분으로 구성되었다. 진동모드의 계측은 다음의 6개 과정으로부터 수행되는데, 이는 (a) 계측위치, 계측방향 및 계측기의 설정 (b) 가진 시스템 설정 (충격해머법, 진동가진법, 및 교통하중법 중 선택), (c) 신호/주파수 분석기의 설정, (d) 진동모드 분석 소프트웨어의 설정, (e) 시간영역 가진 및 진동계측, 주파수응답 취득 및 모드분석, (f) 계측된 모드 데이터의 송출을 포함한다. 다음으로, 손상검색체계는 대상구조물에 적합한 손상발견모델의 설정, 계측모드 데이터의 취득 및 손상발견모델에 적합하도록 데이터의 후처리, 구조식별기법과 패턴인식에 의한 손상위치추정 및 손상크기추정으로 구성된다. 본 논문에서는 진동모드계측체계와 손상검색체계를 VB(Visual Basic)으로 Interface하여 통합 IDIS 소프트웨어라고 하였다. 그림 3의 IDIS 체계는 진동모드계측체계에서의 Structural Model과 Sensing 부분, Response Model과 Frequency Response 부분, 그리고 모드분석과 모드데이터 취득에 관한 Modal Model과 Modal Parameters 부분 등 모든 과정을 IDIS 소프트웨어의 단계별 입력창으로 설계하였다. 그리고 손상검색체계의 손상발견모델, 계측모드 데이터의 취득 및 데이터의 후처리, 그리고 손상위치추정 알고리즘, 손상크기추정 알고리즘의 내용들은 출력결과 화면으로 구성하였다.

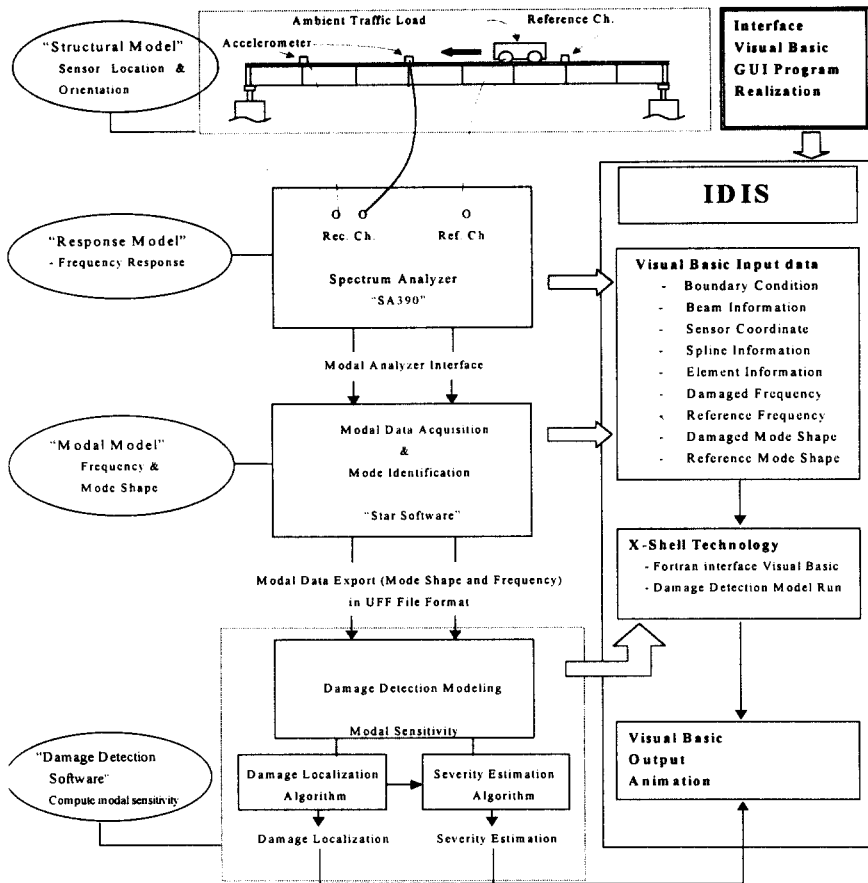


그림 3. 손상검색 자동화체계 계통도

#### 4. GUI 손상검색 프로그램의 개발

손상검색 프로그램의 구성은 아래의 그림 4와 같다. 모든 입력데이터들은 VB Interface를 통해 시각적으로 구현하였다. IDIS 손상검색 프로그램은 전체 3단계로 구분된다. 제 1단계는 프로그램의 입력단계이며, 이 단계에서 프로그램의 전처리가 수행되며 손상발견 알고리즘을 충족시킬 수 있는 입력자료를 생성한다. 제 2단계는 입력자료를 손상발견 알고리즘과 VB Interface하여 손상 검색을 실행하는 과정을 포함한다. 이 과정은 다른 컴퓨터 언어를 연동시키는 X-Shell Technology를 사용한다. 마지막으로 제 3단계는 후처리 과정으로서 제 1단계 및 제 2단계의 결과들을 시각적으로 처리하여 출력창으로 나타낼 수 있도록 하였다.

##### 4.1 손상검색 프로그램의 입력화면 설계

입력 자료는 그림 5와 같이 기본 구조형상, 경계조건, 센서좌표, 손상발견모델의 좌표, 모드특성 자료 등 총 10 단계로 구성되었다. 1) step 1(그림 6)에서는 경간 및 거더의 수를 콤보박스에

서 선택하고, 각 거더에 대하여 측정 센서의 수와 측정 모드형상의 수를 입력한다. 2) step 2(그림 6)에서는 지점좌표 및 경계조건을 선택한다. 3) step 3(그림 7)에서는 선택한 각 거더에 대하여 센서 좌표 x, y, z 축을 입력하는 대화상자이다. 4) step 4(그림 7)에서는 선택한 각 거더에 손상발견모형을 입력하는 대화상자이다. 5) step 5(그림 8)에서는 부재들을 그룹으로 구분하여 입력데이터를 생성시키도록 하였다. 6) step 6에서(그림 8)에서는 각 그룹의 부재 특성치를 입력한다. 8) step 7, 9(그림 9)에서는 손상과 비손상시의 고유진동수를 입력한다. 9) step 8, 10(그림 9)에서는 손상과 비손상 시의 모드형상벡터를 입력한다.

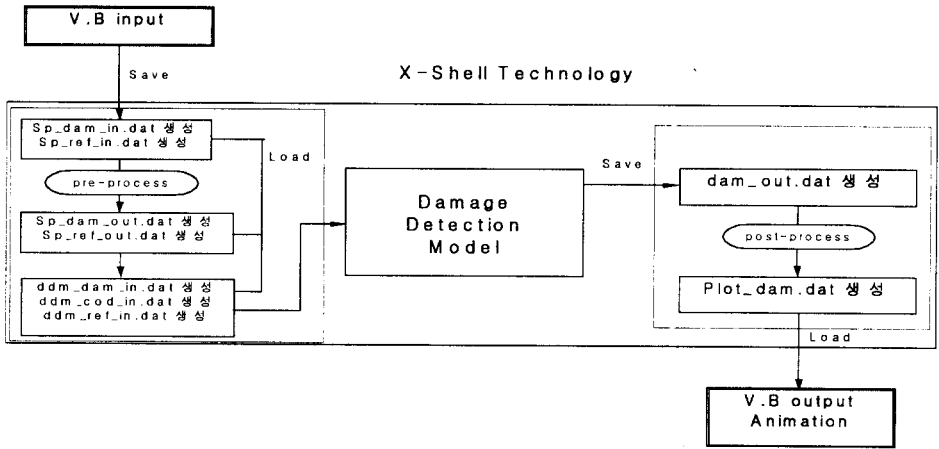


그림 4. IDIS 소프트웨어 체계

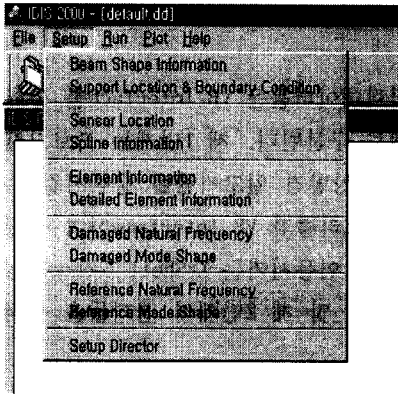


그림 5. Input window

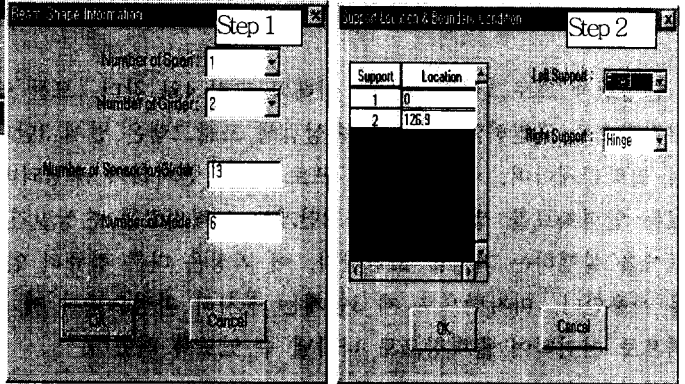


그림 6. Input Windows for Steps 1 and 2

Step 3

Girder 1

	x	y	z
1	0	0	0
2	9.75	0	0
3	19.5	0	0
4	29.25	0	0
5	39	0	0
6	51.225	0	0
7	63.45	0	0
8	76.675	0	0
9	87.9	0	0
10	97.65	0	0
11	107.4	0	0
12	117.15	0	0
13	126.9	0	0

OK CANCEL

Step 4

Interval No.	i	j	No of Interpo.
1	1	2	4
2	2	3	4
3	3	4	4
4	4	5	4
5	5	6	4
6	6	7	4
7	7	8	4
8	8	9	4
9	9	10	4
10	10	11	4
11	11	12	4
12	12	13	4

OK Cancel

그림 7. Input Windows for Steps 3 and 4

Element Information Step 5

Number of Elements: 1

	Number
1	48
2	
3	
4	
5	

OK Cancel

Step 6

Nu	Element	Node	Node	Area	I(y)	I(x)	I(p)	E
1	1	1	2	1.625	1.737	3.993	5.73	3000000
2	2	2	3	1.625	1.737	3.993	5.73	3000000
3	3	3	4	1.625	1.737	3.993	5.73	3000000
4	4	4	5	1.625	1.737	3.993	5.73	3000000
5	5	5	6	1.625	1.737	3.993	5.73	3000000
6	6	6	7	1.625	1.737	3.993	5.73	3000000
7	7	7	8	1.625	1.737	3.993	5.73	3000000
8	8	8	9	1.625	1.737	3.993	5.73	3000000
9	9	9	10	1.625	1.737	3.993	5.73	3000000
10	10	10	11	1.625	1.737	3.993	5.73	3000000
11	11	11	12	1.625	1.737	3.993	5.73	3000000

Filter OK Cancel

그림 8. Input Windows for Steps 5 and 6

Measured Natural Frequency Step 7. 9

Mode	Frequency
1	65
2	130
3	195
4	260
5	325
6	390

OK Cancel

Measured Mode Shape Step 8. 10

Girder 1 Mode 2

Sensor No.	x	y	z
1	0	0	-0.0037
2	0	0	-0.171
3	0	0	-0.258
4	0	0	-0.218
5	0	0	-0.00376
6	0	0	0.433
7	0	0	0.715
8	0	0	0.49
9	0	0	0.016
10	0	0	-0.273
11	0	0	-0.322
12	0	0	-0.246
13	0	0	-0.014

OK Cancel

그림 9. Input Windows for Steps 7-10

## 4.2 손상검색 프로그램의 출력화면 설계

그림 11은 IDIS 프로그램에 입력된 진동모드형상을 애니메이션한 것이다. 그림 12는 대상구조물의 손상발생 시의 고유진동수와 비 손상 시의 고유진동수를 비교한 것이다. 그림 13 및 그림 14에는 대상구조물의 입력 데이터를 바탕으로 손상발견 알고리즘을 실행하여 손상부위를 검색한 결과를 시각적으로 나타내었다. 그림 13에는 임의  $j$  부재에 대해 계산된 손상지수 값을 도시하였다. 그림 14에는 대상구조물에 대하여 손상정도를 3가지 색깔로 구분하여 도시하였다. 색 질감의 강약으로 99%의 신뢰도, 98%의 신뢰도 및 95%의 손상검색 신뢰도를 표현하였다.

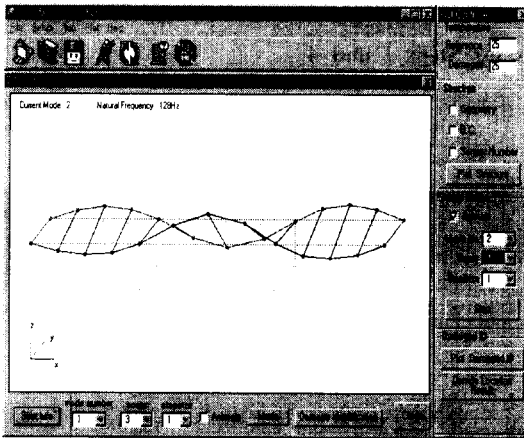


그림 11. Mode Shape Animation

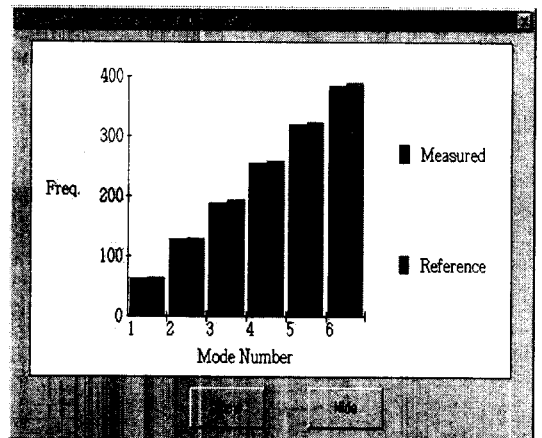


그림 12. 손상 및 비손상 구조의 고유진동수

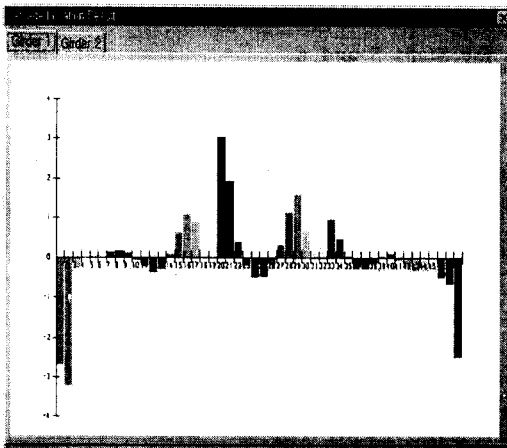


그림 13. Damage Localization Result

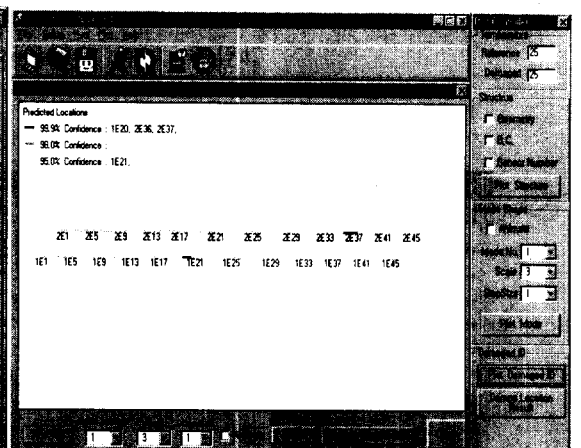


그림 14. Damage-Detection Visualization

## 5. 결 론

교량구조물에 존재하는 구조손상을 검색할 수 있는 GUI 구현 손상검색 프로그램을 개발하였다. 먼저, 손상검색이론과 진동계측법의 기본개념을 요약하였다. 다음으로, 대상구조물의 진동계측체계로부터 손상검색 자동화체계까지의 전 과정을 구성하였다. 마지막으로, 객체지향 언어인 Visual Basic을 사용하여 프로그램을 개발하였다.

실물 강판형교의 모드실험데이터를 적용하여 손상검색 프로그램의 적용성을 검증하였다. 적용 실험 결과, 손상위치가 정확하게 검색되었으며 손상검색의 결과는 시각적으로 판정하기가 용이하였다. 또한 프로그램의 입력창과 출력창은 사용성이 편리하였다. 하지만, 소프트웨어의 작동상 오류를 개선하는 문제와 손상검색체계를 트러스 등의 구조물로 확장하는 연구가 필요하며, 이에 대한 연구가 진행 중이다.

## 감사의 글

본 논문은 건설교통부 '96 산학연 공동연구사업 연구지원하에 수행된 것으로, 연구지원에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. Kim, J.T., Ryu, Y.S., Stubbs, N (1998). "Experimental Verification of a Vibration-Based Damage Detection Algorithm for Full-Scale Bridges". KSCE Journal, Vol. 2, No. 4.
2. 김정태, 노리스 스틱스 (1999). "개선된 진동기초 손상검색방법의 유도과 검증", 한국전산구조공학회 Vol. 12, No. 3.
3. 김선희, 이종석 (1999). "Visual Basic을 이용한 반강접접합부를 가진 강뼈대 구조물의 비선형 거동에 관한 연구", 대한토목학회 학술발표회 논문집, Vol. 1, pp. 231~2341.
4. 이이표, 김병세 (1999). Microsoft Visual Basic Bible 6.0, 삼양출판사
5. Ewins, D.J., Modal Testing: Theory and Practice, Research Studies Press LTD
6. 김창용 (1997). "GUI를 이용한 Planing Hull 설계 프로그램 개발", 석사학위논문, 기계공학과, 부경대학교.
7. 박민석, 김성곤 (1999). "교량계측 모니터링시스템의 통합시스템구축", 대한토목학회논문집, Vol. 1, pp. 49~52.