

**손상지수법과 구조식별(SID) 기법을 통한  
균열된 강판형 모형의 손상검색**  
Damage Detection in Cracked Model Plate-Girder  
using Damage Index Method and System Identification Technique

백종훈\*      류연선\*\*      김정태\*\*\*      조현만\*\*\*\*  
Baek, Jong-Hoon    Ryu, Yeon-Sun    Kim, Jeong-Tae    Cho, Hyun-Man

---

ABSTRACT

An integrated damage identification system (IDIS) and system identification (SID) technique using modal information to detect damage in structures is presented. The objective is to detect damages in cracked model plate-girder without baseline modal parameters. The theory of damage localization and system identification is outlined. Experiments on a model plate-girder was described and a baseline model representing the experimental modal characteristics of the model plate-girder is updated using the system identification technique. Finally, damage inflicted in the model plate-girder is predicted using the IDIS software.

---

1. 서 론

대형구조물들은 사용기간이 경과함에 따라 노후화 되거나, 외부로부터 물체의 충돌이나 피로하중, 부식작용 등으로 인하여 구조손상이 발생되며, 이러한 결과로 구조물의 안전성이 크게 위협을 받는다. 공용 중에 있는 기존 구조물의 안전성의 확보를 위하여 지난 수십 년간 구조물의 손상도 검색 및 노후화의 진단, 잔류수명 추정 및 안전도 평가의 연구가 수행되었으며 현재에도 연구 중에 있다. 최근, 교량의 안전도 모니터링 및 Modal Parameters의 변화를 이용한 구조물의 손상검색 등의 연구들이 수행되고 있으나, 현존하는 구조물들의 대부분이 초기의 진동모드 특성치 즉, Baseline Modal Parameters의 부재와 제한된 적은 수의 진동모드만을 신뢰할 수 있음 등으로 인해 어려움이 있다. 그러므로 적절한 손상검색 방법의 적용과 구조식별 (System Identification) 기법을 통한 합리적인 유한요소해석 모델링이 필요하다.

본 논문의 목적은 손상 후 측정된 모드 특성들만을 사용하여 즉, 초기의 진동모드 특성치가 없는 모형 강판형 구조물의 손상위치와 손상크기를 검색하는데 있으며, 다음과 같은 세부연구를 수행하였다. 첫째, 손상검색체계의 배경으로서 손상검색 이론과 구조식별 기법이 정리되었다. 둘째, 손상된 모형 강판형교의 동적특성계측실험을 바탕으로 유한요소 모델링을 수행하고, 구조식별 기법으로 초기의 진동모드 특성치를 구하였다.

---

\* 부경대학교 해양공학과 석사과정  
\*\* 정회원 부경대학교 해양공학과 교수  
\*\*\* 정회원 부경대학교 해양공학과 부교수  
\*\*\*\* 정회원 부경대학교 해양공학과 박사수료

마지막으로 각각의 실험 데이터를 손상검색 프로그램인 IDIS Software에 적용하여 모형 강판형교의 손상을 검색하였다.

## 2. 손상검색체계

### 2.1 손상검색 이론

손상지수법과 구조식별기법에 의한 손상검색 체계가 그림 1에 예시되었으며, 손상지수법에 대한 이론적 배경이 아래에 요약되었다. 이들 방법들은 선형 구조계의 진동모드 민감도 이론에 근거하였다. NE개의 요소와 N개의 절점을 가지는 선형 구조물을 가정하면, 몇 개의 모드(NM)를 사용한 j번째 손상지수  $\beta_j$ 는 다음과 같다. [1]

$$\beta_j = \frac{\sum_{i=1}^{NM} \left\{ \left( \Phi_i^{*T} C_D \Phi_i^* + \sum_{k=0}^{NE} \Phi_i^{*T} C_{k0} \Phi_i^* \right) K_i \right\}}{\sum_{i=1}^{NM} \left\{ \left( \Phi_i^T C_D \Phi_i + \sum_{k=0}^{NE} \Phi_i^T C_{k0} \Phi_i \right) K_i \right\}} \quad (1)$$

여기서,  $\Phi_i$ 는 i번째 모드형상벡터, C는 강성도 행렬, K는 Modal 강성이며, 별표 \*는 손상 구조계를 나타낸다.

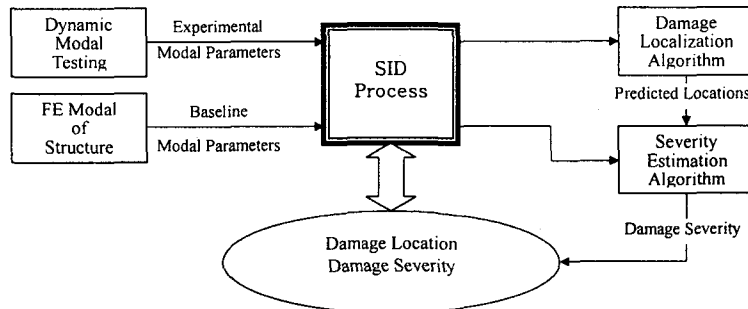


그림 1 손상지수법과 구조식별기법(SID)에 의한 손상검색체계

다음으로, 손상위치를 판별하기 위해 통계적 가설검증을 설정한다. 즉, 손상지수  $\beta_j$ 의 집합을 모집단으로 하여  $\beta_j$ 의 값들을 Random 변수  $\beta$ 로서 취급하면 정규화된 손상지수는 다음과 같이 주어진다.

$$Z_j = (\beta_j - \bar{\beta}) / \sigma_\beta \quad (2)$$

여기서,  $\bar{\beta}$ 와  $\sigma_\beta$ 는 각각 지수  $\beta$ 들의 평균과 표준편차이다. j번째 부재강성의 분수적 변화가  $\alpha_j$ 로서 주어진다면 손상크기는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\alpha_j = \frac{\Phi_i^T C_D \Phi_i}{\Phi_i^{*T} C_D \Phi_i^*} \frac{K_i^*}{K_i} - 1 \quad (3)$$

### 2.2 구조식별(System Identification) 기법

구조식별 기법은 계측된 진동모드 특성치를 토대로 시스템의 해석적 또는 물리적 모형을 추정하는 것으로

현재 구조물의 거동, 상태 등을 가장 근접하게 나타낼 수 있는 수학적 모델을 만드는 것이다. 본 연구에서 사용되고 있는 SID기법은 Stubbs (1990)에 의해 개발되었으며, 초기에는 구조시스템의 강성 변화에 의한 손상 위치 탐사를 위하여 사용되었다. 이후에는 초기 실험치가 없는 토목 구조물에 적용하여 Baseline-Structure의 동적 특성을 추출하기 위해 사용하였으며, 시간의 경과에 따른 구조계의 평균 강성의 변화를 예측하는데도 이용되었다. [2]

본 논문에서 사용된 SID기법의 주요 목적은 두 번째에 해당하는 손상 전 상태의 모드 특성치가 주어지지 않은 조건에서 손상 전 상태에 해당하는 Baseline-Model을 구하여 초기의 진동모드 특성치를 정량화 하는 데 있다. SID기법은 구조계의 강성변화에 대한 고유치의 민감도 분석으로, 반복연산을 통하여 해를 구하는 것이며, 간단히 소개하면 다음과 같다.

M개의 고유치를 알고있는 NE개의 구조요소로 구성된 어떤 선형 구조물에서 미지의 j번째 부재의 강성을  $k_j^*$ 라하고, 이에 대응된 유한요소 모델을 구성하여 j번째 부재의 강성을 이미 알고 있는 값  $k_j$ 라 하면 미지 구조계의 강성과 기지 구조계의 강성의 관계는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$k_j^* = k_j(1 + \alpha_j) \quad (4)$$

여기서,  $\alpha_j$ 는 두 시스템간의 분수적 강성 변화이다. NE개 부재의 분수적 강성 변화는 다음 식에서 얻을 수 있다.

$$Z = F\alpha \quad (5)$$

여기서,  $\alpha$ 는 유한요소 모델과 실제 구조물간의 분수적 강성 변화를 포함하는 NE×1 행렬, Z는 두 시스템의 두 시스템의 분수적 고유치 변화를 나타내는 M×1 행렬, F는 분수적 고유치 변화에 대한 분수적 강성 변화에 관계되는 M×NE 강성 민감도 행렬이다. 이와 같은 이론적 배경을 바탕으로 다음과 같은 10단계 알고리즘을 이용하여 실제 구조물의 구조계를 추정 할 수 있다. [3]

- 1 단계 : M개의 고유치를 갖고있는 구조물을 선택한다.
- 2 단계 : 민감도 행렬 F를 구한다.
- 3 단계 : 초기 유한요소 모델을 생성한다.
- 4 단계 : 목표 구조물의 고유치를 실험을 통하여 구한다.
- 5 단계 : 유한요소 모델의 고유치를 구한다.
- 6 단계 : 목표 구조물과 유한요소 모델 고유치의 분수적 변화량을 계산한다.
- 7 단계 : 강성의 변화를 산정한다.
- 8 단계 : 유한요소 모델에 강성의 변화를 반영하여 Update 한다.
- 9 단계 :  $Z \cong 0$  or  $\alpha \cong 0$  즉, 수렴 할 때 까지 5~8단계를 반복한다.
- 10 단계 : 식별된 구조물의 동적 특성치(Modal Parameters)를 생성한다.

### 3. 모형 강판형교의 동적특성 계측실험

본 논문에 사용된 모형 강판형교의 형상은 그림 2와 같으며, 재질은 스테인레스-스틸(Stainless-Steel)이고 탄성계수와 밀도는 각각 210 GPa과 7920 Kg/m<sup>3</sup>이다. 강판형교 모형에 손상을 주기 위해 남쪽 거더의 하부 플랜지를 쇠틱으로 부분 절단하였다.

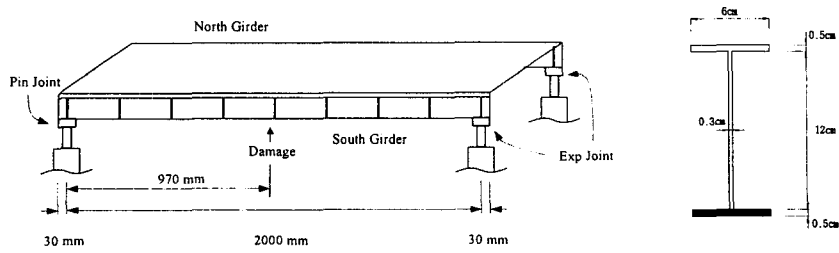


그림 2 모형강판형교와 손상위치

동적 실험은 구조물에 동적하중을 재하하여 구조물의 응답을 계측 및 분석하는 것이다. 여기서, 구조물에 동적하중을 재하 하는 방법으로 충격해머(impact hammer)에 의한 가진 방법으로 실험을 수행하였다. 충격가진법은 부가질량의 효과를 피할 수 있고, 다른 가진법 보다 사용하기 용이하여 교량의 진동 실험에 가장 보편적으로 사용되는 방법이다. 본 연구에서는 가속도 센서를 그림 3의 3번 측정점으로 고정하고 충격해머를 측정점에 따라 이동시키며 가진하는 방법을 사용하였다. 모형 강판형교 실험의 초기 4개 모드의 고유진동수는 표 1과 같고, 모드형상은 그림 4에 나타내었다.

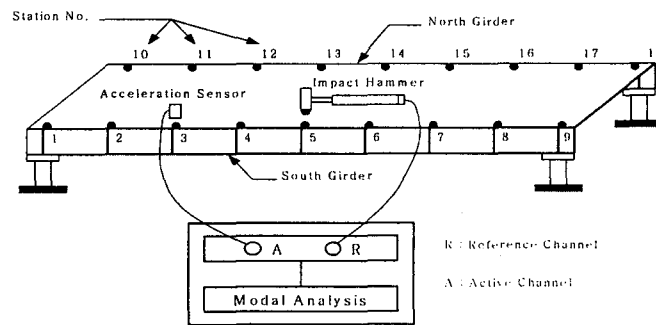


그림 3 실험체계

표 1 모형강판형교의 모드별 계측 주파수

Mode	Freq.(Hz)
1	67.39
2	93.60
3	194.39
4	280.49

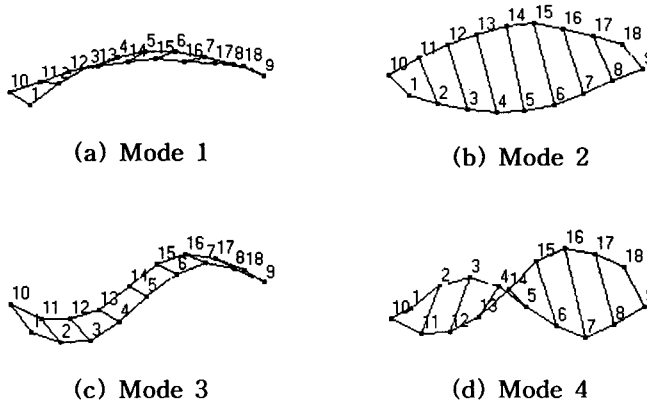


그림 4 계측에 의한 모형 강판형교의 모드형상

#### 4. 유한요소해석 모델을 이용한 구조식별

본 논문에서는 유한요소 해석 프로그램으로 범용 구조해석 프로그램인 ANSYS 버전5.5를 사용하였으며 초기 유한요소해석 모델의 탄성계수는 3절에 언급된 바와 같이  $210 \text{ GPa}$ 로 산정 하였다. 실제 구조물과 근사하게 묘사하기 위해 4절점 3차원 쉘 요소를 사용하여 모델링하였다. 그림 5는 3차원 쉘 요소를 사용하여 모델링한 모형 강판형교의 유한요소 모델을 나타내고 있다.

교량의 고유주파수 성분을 얻기 위한 Modal 해석에 있어 교량의 지점조건을 최대한 실제와 유사하게 묘사하는 것이 매우 중요하다. 모형 강판형교는 탄성받침에 의해 지지되어 있으므로 지지점에 수직방향 즉,  $z$ 축 방향으로 Axial Spring 요소를 설치하여, Spring 요소의 강성은  $3.0e9 \text{ N/m}$ 로 하였다. 유한요소 모델링의 해석결과를 표 2에 나타내었으며, 그림 6은 모형 강판형교의 모드별 형상을 나타낸 것이다.



그림 5 모형 강판형교의 유한요소 모델

표 2 유한요소 해석에 의한 모형 강판형교의 모드별 주파수

Mode	Freq.(Hz)
1	86.30
2	107.51
3	249.78
4	369.04

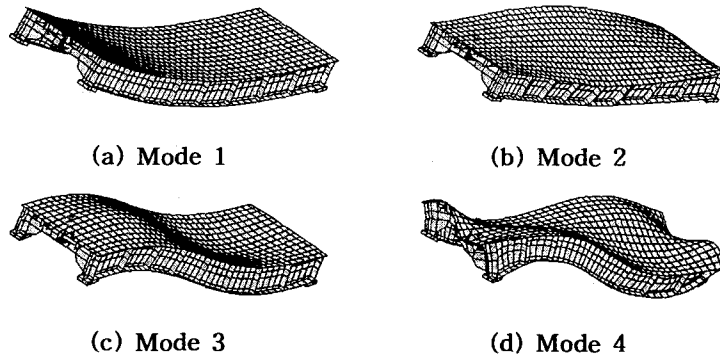


그림 6 유한요소 해석에 의한 모형 강판형교의 모드형상

구조식별(System Identification)을 수행하기 위해 먼저, 유한요소 모델의 각 요소는 4개의 그룹으로 나누어졌으며 그룹별 부재는 표 2와 같다.

표 2 그룹별 부재

Group	부재
1	Girder, Stiffener
2	Deck
3	Bracing, Stringer
4	Shoe, Spring

다음은 3절에서 언급한 바와 같이 유한요소 모델로 강성 민감도 행렬  $F$ 를 해석적으로 구하였다. 이는 기지의 양만큼 그룹별 강성을 감소시켜 분수적 고유치 변화에 대한 분수적 강성 변화를 계산하여 구하였으며, 강성민감도 행렬  $F$ 는 표 3과 같다.

표 3 모형 강판형교의 강성 민감도 행렬

Mode	Sensitivity			
	Group 1	Group 2	Group 3	Group 4
1	0.8336	0.1641	0.0215	0.0014
2	0.6135	0.3064	0.0706	0.0294
3	0.6652	0.1333	0.2491	0.0072
4	0.7761	0.1673	0.0514	0.0206

표 4는 두 번의 반복 연산을 통해 수렴한 강성값에 의한 주파수와 오차정도를 나타낸 것이며, 그림 7은 유한요소 모델이 수렴하는 추이를 그래프로 나타낸 것이다.

표 4 모형 강판형교의 System Identification

Mode	Freq. of Initial FE Model	Updated Freq. (Hz)		Freq. of Target Structure	Error (%)
		Iter. 1	Iter. 2		
1	86.29	77.91	56.65	67.62	-16.22
2	107.51	83.08	82.92	93.70	-11.51
3	249.78	234.74	161.89	194.00	-16.55
4	369.04	292.43	253.31	280.50	-9.69

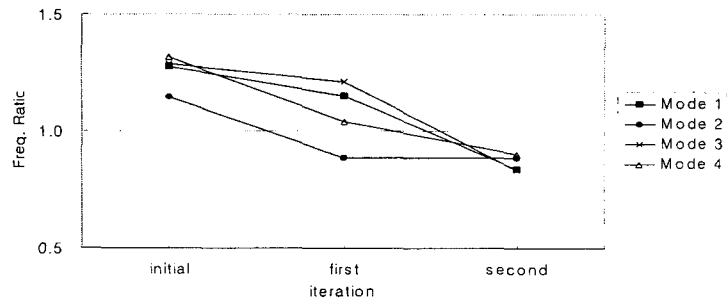


그림 7 모형 강판형교의 수렴추이

### 5. 진동기초 손상검색 방법의 적용

손상검색 프로그램으로는 2.2절에서 설명한 손상검색 알고리즘과 손상검색법의 특징요소를 반영한 IDIS Software를 사용하였다. 이 손상검색 프로그램의 체계는 그림 8과 같으며, 입력 모듈에 해당하는 CD-NAS, MD-NAS, MU-NAS와 주 처리 모듈인 DDM-JTK, 그리고 손상위치 지수와 손상크기 지수의 출력을 담당하는 CHECK-OUT 5개의 모듈로 구성되어있다. 또한, 구조형식에 무관한 공통부분과 구조형식에 따라 변경되는 모듈들을 포함한다.

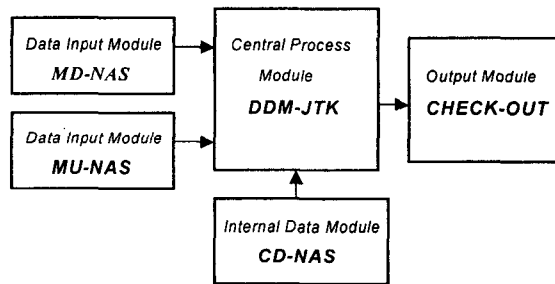


그림 8 손상검색 프로그램의 구성

3절과 4절에서 구한 대상구조물의 실험 값들을 IDIS Software에 입력하여 프로그램을 실행하고, 그림 9, 10에 손상부위를 검색한 결과를 나타내었다. 그림 9에서는 임의  $j$ 부재에 대해 계산된 손상지수 값을 표시하고 있다. 그림 10에는 대상구조물에 대하여 손상정도를 3가지 색상으로 구분하여 도시하고 있으며, 색상의 강약으로 99%의 신뢰도, 98%의 신뢰도 및 95%의 손상검색 신뢰도를 나타내고 있다.

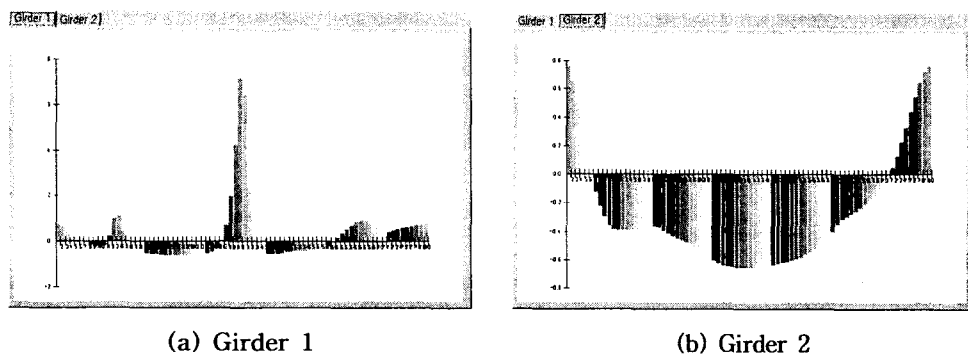


그림 9 손상검색 결과

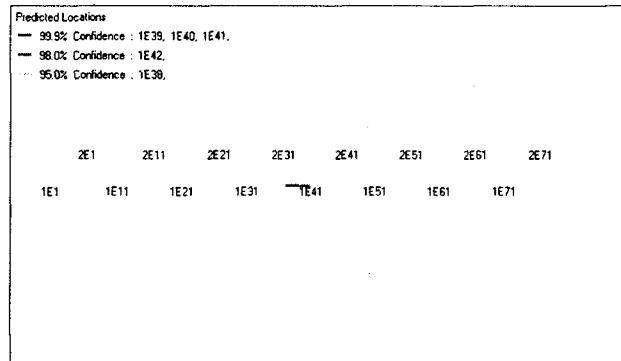


그림 10 손상위치

## 6. 결 론

손상검색 이론과 구조식별 기법을 이용하여 초기의 진동모드 특성치가 없는 모형 강판형교의 손상을 검색하였다. 먼저, 제한된 적은 수의 진동모드 특성치를 사용하여 손상검색을 수행 할 수 있는 손상검색 이론과 초기의 실험 자료 즉, 손상 전의 실험 자료가 없는 교량구조물의 진동모드 특성치를 추출하기 위하여 구조식별 기법을 정리하였다. 다음으로 손상된 모형 강판형교의 동적특성 계측실험을 수행하고, 구조식별을 통한 유한요소 모델의 해석으로 손상 전 상태의 진동모드 특성치를 추출하였다. 마지막으로 손상검색 프로그램인 IDIS Software에 실험 모형 강판형교와 유한요소 모델의 모드실험 데이터를 입력하여 손상검색을 수행하였다. 실험 결과, 손상위치가 정확하게 검색되었으며 그 결과를 IDIS Software의 출력창으로 나타내었다.

## 참고 문헌

1. Kim, J.T., Ryu, Y.S., Stubbs N., "Experimental Verifaicon of a Vibration-Based Damage Detection Algorithm for Full-Scale Bridges". *KSCE Journal*, Vol. 2, No. 4, 1998.
2. Stubbs N., Osegueda. "Global Non-Destructive Damage Evaluation in solids - Experimental Verification". *The International Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis* 5(2), 1990, pp. 67~79.
3. 김연복, "NDT 기법에 의한 기존 RC교량의 하중지지력과 동적거동의 상관성에 관한 연구", 박사학위논문, 토목환경공학과, 고려대학교, 2001.
4. 김정태, 노리스 스티브스, "개선된 진동기초 손상검색방법의 유도과 검증", 한국전산구조공학회 Vol. 12, No. 3, 1999.
5. 이영규, 김제현, 김정태, 류연선, "통합손상검색 시스템의 개발", 한국전산구조공학회 Vol. 13, No. 2, 2000.
6. 윤재웅, 송철민, 김정태, 류연선, "계측온도의 영향을 고려한 강판형교 모형의 진동모드특성", 대한토목학회 학술발표회 논문집, Vol. 1, 2000, pp.557~560.