

System Identification의 활용 사례

- 교량의 구조식별과 손상추정의 관점 -



김 정 태

1. 서 론

국내·외에서 대형구조물의 손상도 예측과 구조 안전도 평가를 위한 첨단 기술의 개발은 중요한 과제로 인식되고 있다. 산업사회로 발전하는 과정에서 교량, 터널, 항만, 공항, 발전소, 댐 등 대형 기간시설물의 건설이 급증하였다. 이들 대형구조물은 설계 및 시공과정에서의 결함 또는 설계 당시에 고려되지 못하였던 각종 하중 조건과 환경 요인으로 인해 구조손상 발생의 위험성에 노출되어 있으며, 사용기간의 경과와 함께 발생하는 구조손상이 이들 구조물의 안전에 중대한 위협을 낳고 사용연한의 단축을 초래하는 경우들이 발생하고 있다. 또한, 약 조건하에서 발생한 치명적인 구조손상이 최악의 구조물 붕괴로 이어진 불행한 사고들이 발생하고 있다. 국내에서는 성수대교의 붕괴사고와 삼풍백화점의 참사 이후 대형 구조물의 구조적 안전성 확보에 대한 관심이 증가하고 있으며, 이를 계기로 첨단 구조물 손상평가시스템에 대한 필요성이 대두되고 있다. 이와 같은 첨단의 손상평가 기술은 기간시설물의 안전에 대한 시민의 신뢰 회복과 안정된 시민사회를 위해 반드시 확보되어야 한다. 경제적으로는 적절한 손상추정기술의 확보를 통해 구조 신뢰성과 안전성이 보장될 때 이들 구조물의 작동성이 유지되어 경제적·산업적인 가치 및 기여도가 증대된다. 또한, 구조손상 추정결과로부터 정확한 구조물 잔여수명의 추정이 가능해 지며 이를 통해 효율적인 구조물 유지·관

리와 구조물 수명을 극대화 하려는 노력이 가능하게 된다. 학문적·기술적 측면에 있어서도 기존의 정밀안전진단기술을 대체할 새로운 기술의 개발은 중요하다. 통상적으로 대형구조물의 안전진단에 사용되어오고 있는 비파괴검사법을 통한 외관조사방법은 많은 비용과 시간이 소요된다. 또한, 시각적으로 나타나지 않는 문제점들을 발견하기 어려우며 이로 인하여 구조계의 전역적 변화와 구조물의 안전에 치명적인 결함의 위치와 크기를 감지하기 어렵다. 그러므로, 첨단의 계측기술을 사용하여 전역적인 구조응답특성을 계측하고, 시스템 식별(system identification)기법을 사용하여 구조손상을 전역적으로 추정하는 대형 구조물 손상추정기술의 개발은 매우 중요하다.¹⁾⁻¹⁶⁾

이 글에서는 교량 구조물의 손상추정의 관점에서 시스템식별(SID)기법의 활용사례를 간략히 정리하였다. 먼저, 시스템식별의 일반 개념과 구조공학적인 개념을 설명하였다. 다음으로, 시스템식별 기법의 적용을 통한 교량 구조물의 손상추정 기술에 대해 설명하였다. 마지막으로, 실제로 시스템식별 기법이 교량 구조물의 손상추정에 활용된 국·내외 사례들을 요약하였다.

2. SID의 기본 개념

시스템식별(system identification)은 물리적 실제 시스템의 입력과 출력 자료를 사용하여 그 시스템의 수학적 모델을 식별하는 과정이다. 통상 SID로 불리는

* 부경대학교 해양공학과 스마트구조공학연구소

시스템식별의 여러 기법들이 과학과 공학 분야에서 시스템의 다양한 물성(물리적 특성)을 추정하는데 사용되고 있다. 대부분의 경우, 실제 시스템으로의 입력은 하중이며 출력은 하중에 의한 구조거동으로 변위 속도 가속도 등이다. 시스템식별 과정을 통해 시스템을 대표하는 모델을 구할 때 반드시 만족해야 하는 조건은 모델의 입·출력 재현성이다. 즉, 같은 입력 조건에 대해 시스템의 출력이 거의 일치하도록 모델을 식별해야 함을 의미한다. 이와 같은 모델을 식별하기 위해서 시스템식별 기법을 적용하는 과정은 크게 세 단계로 구분된다.

◎ SID 기법의 적용단계별 구성

- 시스템 모델 파라미터의 결정
- 동일한 입력조건에서 시스템과 모델의 응답이 일치하는지를 판별할 기준함수의 결정
- 모델과 실제 시스템의 차이를 최소화 하도록 시스템 파라미터를 수정할 알고리즘의 선정

시스템식별 기법이 구조공학 분야에 적용되는 경우 구조식별(structural identification)이라고 부른다. 구조식별 개념은 대략 1970년대 중반 Liu와 Yao(1978)에 의해 구조공학분야에 소개되었다. 그림 1은 구조식별의 개념과 역할을 설명하고 있다. 시스템 식별과 손상 추정은 구조공학 문제들만의 독특한 특성들과 관련하여 설명될 수 있다. 기본적으로, 구조공학적인 관심대상은 구조물의 운동방식을 대표할 수학적 모델의 식별과 함께 구조 손상도와 신뢰도를 추정하는 것이다. 다시 말하면, 실험 데이터와 시스템식별 기법을 사용하여 구조물의 수학적 모델을 개선하는 구조식별 작업으로부터 구조 손상도와 신뢰도를 추정할 수 있다.

이 같은 구조식별 개념이 구조공학분야에 도입된 이후, 많은 연구자들에 의해 연구되었으나, 아직까지는

구조물의 설계 및 유지관리의 실무적인 응용에서 보편화 되지 않은 실정이다. 이 구조식별 개념이 적절히 활용된다면 구조물 상태판정의 정확도와 신뢰성이 향상될 수 있을 것이다.

구조공학에서 구조식별 기법을 적용하는 일차적인 목적은 구조물 특성을 가장 잘 대표할 수 있는 모델을 얻는 것이다. 이 같은 구조식별의 기본 목적은 구조모델의 어떤 특성을 식별하는 지에 따라 다음과 같이 구분된다.

◎ 구조식별의 구분

■ 구조응답 식별

- 외력에 대한 구조계의 고유의 거동을 추정
- (시간영역) 변위, 속도, 가속도,
- (주파수 영역) 주파수응답, 고유진동수, 모드형상, 감쇠계수

■ 구조물성 식별

- 구조계의 형상·치수, 재료특성, 경계조건, 적합조건을 추정
- 강성도행렬, 유연도행렬, 질량행렬

이들 구조식별 기법은 구조물 설계 및 유지·관리 전 단계에서 적용할 수 있다. 예를 들어, 구조물 설계 변수의 변화에 따른 주파수응답특성의 변화를 감지하고, 시스템식별 기법을 사용하여 구조 설계의 신뢰도를 평가할 수 있다. 구조물 유지의 관점에서, 공용중인 구조물의 실시간(real-time)응답의 변화 또는 주파수응답의 변화를 모니터링하고 이를 시스템식별 기법으로 분석하여 손상위치와 손상크기 또는 구조물의 안전도를 추정할 수 있다. 또한, 보강부재가 구조물의 하중재하 능력과 안전도에 미치는 영향을 정량적으로 평가하기 위해 구조물 보강의 관점에서 활용될 수 있다. 아래의 내용은 구조식별 기법이 구조손상을 추정하는데 적용되는 경우에 대해서 간략히 정리한 것이다.

3. SID를 통한 손상추정기술의 개념 및 연구 동향

3.1 SID를 통한 손상추정기술의 개념

최근 개통된 영종대교와 광안대교 등 대형 교량에는 여러 종류의 계측장치들과 교량 모니터링시스템이 설치되어 있으며, 이는 대형 교량의 유지관리를 위한 높은 관심도를 반영하는 것이다. 또한, 최근 국내·외에서는 구조 이상 유·무를 스스로 감지하고 대처하는

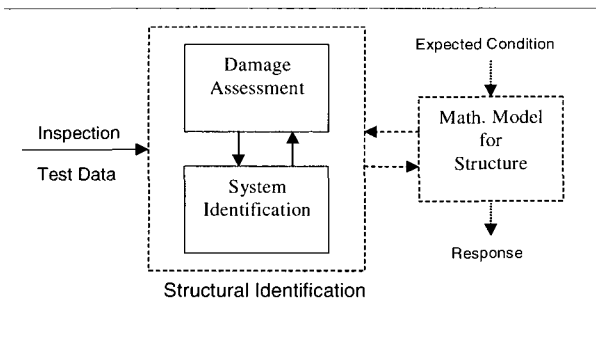


그림 1 Structural Identification의 개념과 역할

기능을 갖는 스마트 구조물에 대한 연구가 활발해지고 있다. 이러한 관심과 논의의 핵심은 주어진 대상 구조물에 적합한 손상추정시스템이 어떤 것인지를 파악하고, 연구 투자를 통해 이를 개발하여, 현장에 적용하는데 있다. 시스템식별 기법을 통한 대형 교량의 손상추정에 대한 보다 활발한 연구논의가 필요하다고 생각한다.

구조물의 손상을 발견하기 위해 사용되고 있는 기술은 재료적인 비파괴검사법과 더불어 정변위 측정법 및 진동특성 추정법 등이 있다. 통상적으로 대형구조물의 정밀안전진단에 사용되고 있는 비파괴시험에 의한 조사 방법은 국부적 시험의 특성상 많은 비용과 시간이 소요된다. 손상추정의 정확도가 비파괴시험장비의 정밀도와 이를 다루는 기술자의 경험에 좌우된다. 또한, 시각적으로 나타나지 않는 구조계의 전역적 변화를 감지하기 어렵다. 교량의 지점 또는 이음부 등 구조물의 안전에 매우 민감한 부분에 발생한 잠정적 문제(예를 들면, 잔류응력의 증감)를 상대적으로 잘 감지하기 어렵다. 하지만 시각적으로 구조물 국부위치의 손상(균열 등의 형상변화)을 감지하여도 이 손상이 구조물의 하중재하능력과 전체 안전도에 미치는 영향이 무엇인지를 직접적으로 제시하지 못한다는 점이 비파괴시험법의 가장 큰 제약이다. 이와 같은 문제점을 극복하기 위해 전역적인 구조응답특성을 계측하고, SID 기법을 사용하여 구조응답에 대한 구조물의 민감도를 식별하여 이를 통해 구조손상을 전역적으로 추정하려는 기술이 개발되고 있다.

SID 기법을 사용하여 구조물의 동적 특성의 변화를 감지하여 구조 손상의 위치와 크기를 검색하는 것을 구조손상식별(structural damage identification)이라고 하며, 1970년대에 해양구조물의 노후화를 진단하는데 적용되기 시작한 이후로 토목, 기계 및 우주항공 등의 분야에 적용되고 있다. SID 기법은 구조계의 거동을 실측하고 이를 구조 해석적으로 모델화하여 구조 특성을 추정하는 방법으로서 기타 방법에 비하여 다음과 같은 장점이 있다.

◎ SID를 통한 구조손상식별의 장점

- 단기간의 진동특성 계측을 통한 전역적인 구조기동 모니터링
- SID 모델링으로부터 국부 및 전역적인 손상식별
- 손상식별과 동시에 손상이 구조특성에 미치는 영향 제시
- 구조물의 안전에 치명적인 손상을 발견

실용화의 측면에서 활발히 연구된 SID 기법으로 소위 모드변형에너지법과 인공신경망기법, 유연도법, Extended Kalman Filter법 등이 있다. 구조손상추정을 위한 SID 기법에 대한 분류는 참고문헌[18]의 표 1에 자세히 정리되어 있다. 각 기법의 특성파라미터가 무엇인지 그리고 선형 및 비선형 구조계에 대한 상대적인 적용성 및 장·단점이 무엇인지에 대해서는 참고문헌[18]을 참고하길 바라며, 추후에 학술기사를 통해 이에 대해 자세히 다루었으면 한다.

3.2 SID를 통한 손상추정기술의 연구동향

대형 교량구조물을 대상으로 진동특성의 변화를 계측하고 구조식별기법을 사용하여 손상을 추정하는 기술에 대한 국내·외의 연구 동향은 아래와 같이 요약된다.

◎ 국내의 연구동향

- 대형구조물 붕괴사고 이후 종래의 방법에 대한 개선의 필요성 인식
- 외국의 손상평가기술의 수입, 진동모니터링 시스템의 운영기술 전수
- 진동모니터링 시스템의 적용사례 증가, 계측자료를 분석하는 손상평가기술의 미흡
- 실험실 규모의 진동모니터링 및 SID 손상평가모델 개발에 관한 연구

◎ 국외의 연구동향

- 진동특성치의 변화와 구조특성치의 관계 규명을 통한 구조손상 추정 기술
- 구조물 내진 성능 향상에 대한 중요성의 증대로 SID 기법의 개발과 응용
- 상시진동모니터링을 통한 진동특성의 실시간 계측 및 분석
- 구조물의 거동특성에 기초한 SID 모델을 통해 구조물 거동 분석/예측 체계
- 진동모니터링과 SID 손상검색체계를 통합하는 대형구조물의 정보 시스템 구축

4. SID를 통한 교량의 손상추정 과정

그림 2는 모드변형에너지법^{(9),(15)}을 사용하는 구조손상추정체계를 개념적으로 도시한 것이다. 크게 3단계

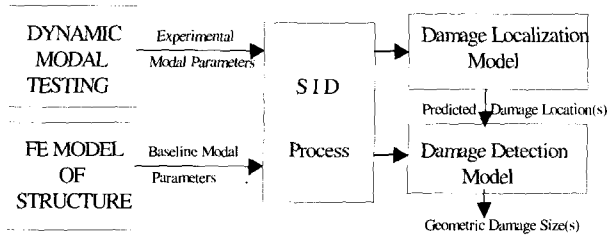


그림 2 SID 기법을 통한 손상추정체계

로서 진동특성의 계측 및 분석, 구조식별, 손상위치 및 손상도 추정의 과정으로 이루어진다. 이 3단계 과정을 부경대학교 스마트구조공학연구소(<http://structure.pknu.ac.kr>)에서 연구된 강관형교 모형의 SID 적용 및 손상추정 결과를 예로 간략히 소개하고자 한다.

4.1 진동특성의 계측 및 분석

SID 기법을 사용하여 교량의 손상을 추정하기 위한 진동모니터링 체계는 그림 3과 같다. 강관형교 모형을 대상으로 실험하였는데, 한쪽 거더에는 균열을 주었다. 그림 4는 강관형교 모형에 대한 상시진동실험 장면이다.

진동모니터링 체계를 구성하려면 센서, 신호취득 및 분석기 및 모드분석 소프트웨어가 확보되어야 한다. 통상 교량에 사용되는 가속도계 센서는 압전형(piezoelectric)

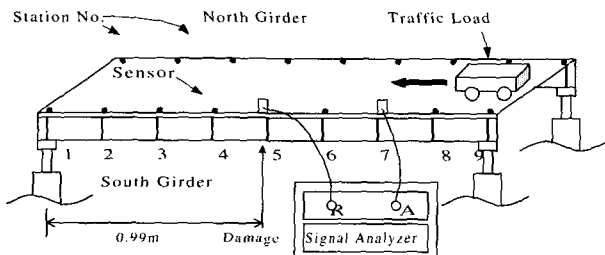


그림 3 교량의 진동특성 모니터링 예

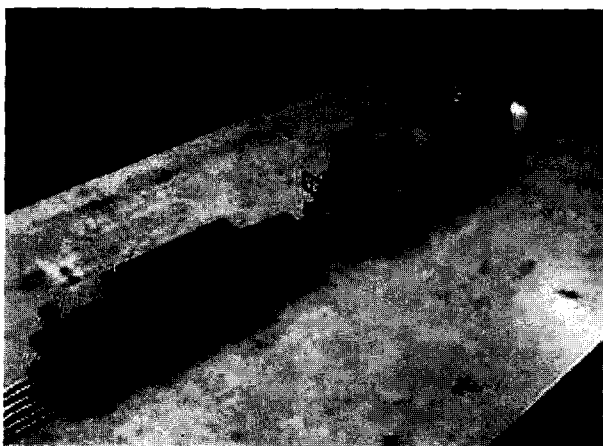


그림 4 교량모형의 상시진동실험

의 저주파대역 고감도 타입이며, 미국과 일본 회사의 제품이 많이 사용되고 있다. 신호취득기는 다채널의 완전한 시스템으로 구성된 제품들을 구입하는 것이 좋지만, 예산상의 제약이 있다면 저렴한 모듈들을 구입하여 조립하여 사용하는 것도 가능하다. 이 경우에는 SCSX형 Analog Signal Input 모듈과 A/D모듈을 하드디스크 용량이 큰 휴대용 노트북과 연결하여 구성하는 형태가 일반적으로 사용되고 있다. 저주파대역 가속도계를 통해 감지된 신호가 SCSX 모듈을 통해 입력되어 A/D모듈을 통해 노트북에 디지털 신호로 전달되어 저장된다. 입력된 디지털 신호는 실시간분석(real time analysis)와 주파수분석(frequency analysis)을 거치게 되는데, Matlab과 Labview 등의 소프트웨어를 사용하여 이 과정을 프로그래밍 하게 된다. 대부분의 대형 교량의 진동응답은 저주파대역에서 분석되는데, 이를 위해 디지털 신호 분석(digital signal process)기법과 모드분석기법에 대한 이해를 통해 sampling rate와 filtering 기법 그리고 적절한 진동모드 추출기법이 적용되어야 한다.^{19)~21)} 아래에는 대형구조물에 대한 적용성이 검증된 진동특성치 분석기법과 분석소프트웨어 및 관련 웹사이트를 요약하였다. 이를 참고하면 유용한 정보를 얻을 수 있으리라 생각한다. 특별히 주의할 점은, 대형 교량은 특성상 대부분 출력 응답신호만이 계측 가능한 Output Only 시스템이며 또한 센서 기준점을 복수로 사용하는 MIMO (Multi-Input and Multi-Output) 시스템을 채택해야 한다는 점인데, 이 두 가지 사항을 지원하는 하드웨어, 분석기법 및 소프트웨어를 구성하는 것이 유리하다.

◎ 진동특성치 분석기법

- (시간영역) Random Decrement법,²²⁾ ITD(Ibrahim time domain)법,²³⁾ SSI(Stochastic Subspace Identification)법²⁴⁾
- (주파수영역) Curve-Fitting & Pick-Picking법,^{20),21)} FDD(Frequency Domain Decomposition)²⁵⁾

◎ 분석소프트웨어

- Labview(<http://www.ni.com>), Matlab(<http://www.mathworks.com>)를 이용한 프로그래밍
- 상용 소프트웨어 STAR(<http://www.sd-star.com>), ME'scope(<http://www.vibetec.com>)
- (Free Ware) DIAMOND(http://ext.lanl.gov/projects/damage_id/)

4.2 구조식별

모드변형에너지 기법을 이용한 구조식별에 관한 이론적인 기초는 참고문헌[10,11]에 상세히 기술되었다. 모드변형에너지 기법을 이용한 구조식별 과정은 두 단계로서 아래와 같다.

- ◎ 1 단계 : 구조계 모델 설정 및 진동모드 해석
 - 구조계 기하학적 형상 및 경계조건, 재료 특성의 수집
 - N 절점과 NE 요소(부재) 구조계의 구조 강성도 계산
 - 구조계의 i번째 진동모드의 진동모드 추출

- ◎ 2 단계 : 진동모드 민감도 계산
 - i번째 진동모드의 총 변형에너지의 계산 :

$$K_i = \int_0^L k(x) [\phi_i(x)]^2 dx$$

- i번째 진동모드의 j번째 요소 변형에너지의 계산 :

$$K_{ij} = k_j \int_0^L [\phi_i(x)]^2 dx$$

- 진동모드민감도 계산 : $F_{ij} = K_{ij} / K_i$

4.3 손상위치 및 손상도 추정

앞서 정의된 진동모드 민감도를 사용하여 손상위치와 손상크기 추정이 4 단계로 수행된다. 자세한 내용은 참고문헌[10,11]을 참고하기 바란다.

- 초기 상태의 i번째 진동모드와 j번째 요소의 진동모드 민감도 계산 : $F_{ij} = K_{ij} / K_i$
- 손상 발생 후의 i번째 진동모드와 j번째 요소의 진동모드 민감도 계산 : $F_{ij}^* = K_{ij}^* / K_i^* = F_{ij} + \delta F_{ij}$
- 손상 발생 전·후의 진동모드 민감도의 상대적 변화를 계산 : $\delta F_{ij} = \frac{\delta K_{ij}}{K_i} - \frac{K_{ij} \delta K_i}{K_i^2}$
- 패턴인식 기법에 의한 손상부재와 비 손상부재로의 분류

4.3 통합손상추정시스템(IDIS)

그림 5는 교량모형에 대해 진동모니터링, 구조식별, 손상위치 및 손상도 추정이 통합적으로 운영되는 과정을 도시한 것이다. 이 시스템은 부경대학교 스마트구조공학연구소(<http://structure.pknu.ac.kr>)에서 개발된 IDIS

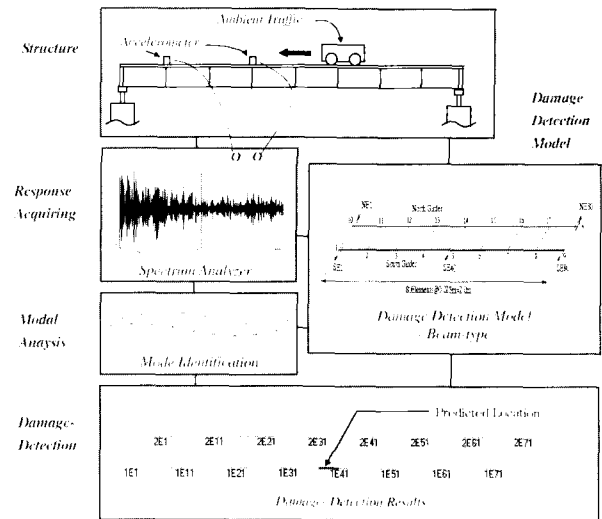


그림 5 IDIS를 이용한 진동계측, 구조식별, 손상추정 과정

(Integrated Damage identification System)이며, 다섯 단계로 구성되었다. “Structure”단계에서는 측정하고자 하는 진동특성에 적합하도록 센서의 위치를 선정하였다. “Response Acquiring”에서는 구조물 초기와 손상시의 시간영역과 주파수영역의 응답스펙트럼이 계측 및 변환되었다. “Modal Analysis”에서는 모드분석 소프트웨어를 사용하여 진동모드특성이 분석되었다. “Damage Detection Model”에서는 손상위치검색 알고리즘과 손상크기검색 알고리즘이 프로그래밍 되었는데, 손상지수법^{15),16)}이 사용되었다. 마지막으로, “Damage Detection”에서는 손상위치예측알고리즘과 손상크기검색 알고리즘으로부터 손상위치와 손상크기가 추정되었으며, 시각적으로 예측 위치와 손상도를 표시하였다.

5. SID를 통한 실물 교량의 손상추정 사례

5.1 통합손상추정체계 IDIS의 적용사례 : 3경간 실물 강관형교 I-40 Bridge²⁶⁾

그림 6과 그림 7은 1993년도에 철거된 미국 뉴멕시코 주 I-40 고속도로 상의 3경간 실물 강관형교이다. 철거를 앞둔 1993~1994년도에 미국 내 여러 대학과 연구기관이 공동으로 진동계측과 구조손상 추정에 관한 연구를 수행하였다. 손상은 가운데 지간 중앙부의 북측 거더의 단면을 부분 절단하여 도입되었다. 3경간 구간의 두 주형의 북부에 가속도계를 설치하였는데, 전체 26개 위치에 설치하였다. 교량에 대한 가진은 두 가지를 사용하였는데, 외측 지간의 고정된 위치에서 서보유압식 가진기를 사용한 경우와 상시 교통하중을 사용한

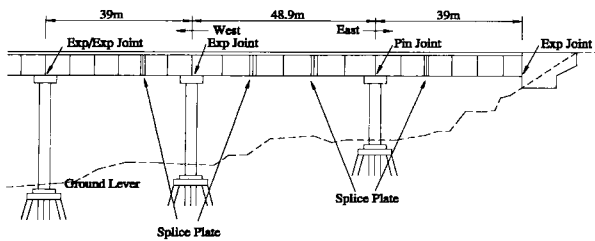


그림 6 미국 뉴멕시코주 I-40 교량의 3경간

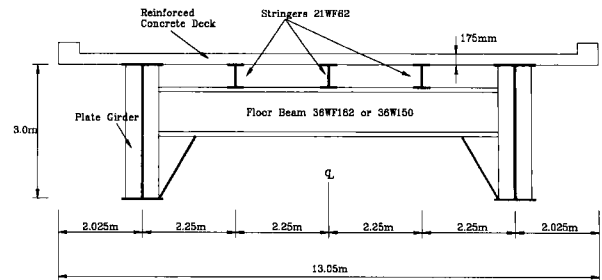


그림 7 미국 뉴멕시코주 I-40교량의 단면

경우이다. 예측된 가속도 응답과 가진기 입력신호를 분석하여 주파수 스펙트럼, 전달함수, 고유진동수 및 모

드형상이 측정되었다. 그림 8~13은 IDIS 시스템을 적용하여 진동모드인식, 구조식별, 손상추정을 수행한 결과의 일

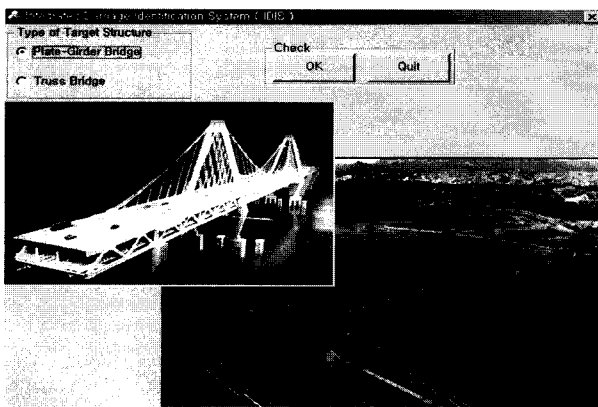


그림 8 IDIS 초기화면

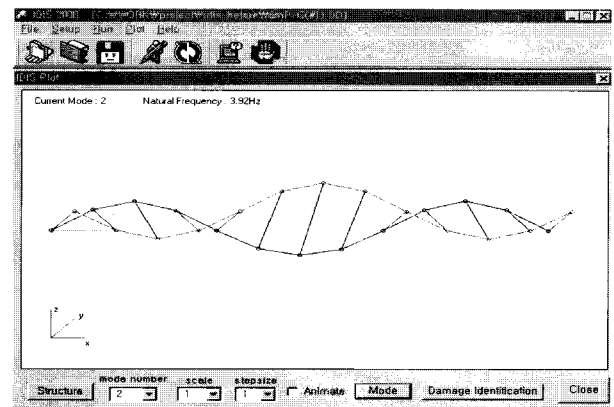


그림 11 계측·식별된 진동모드 #2

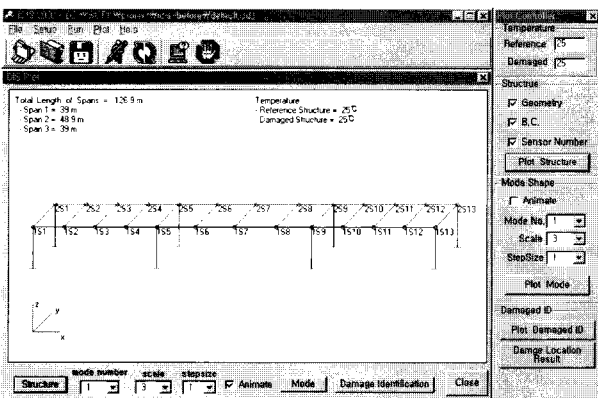


그림 9 구조형상 및 손상추정모델 식별

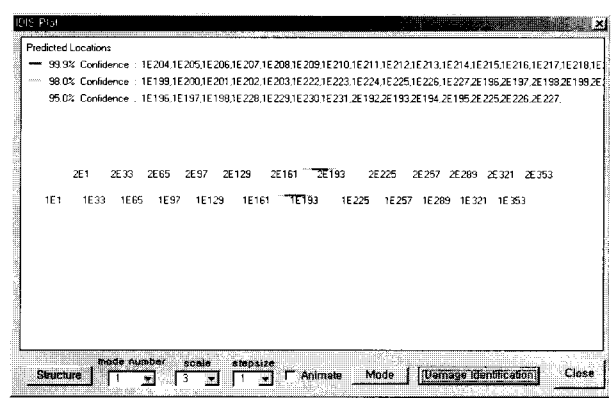


그림 12 정확한 손상예측 손상 #1

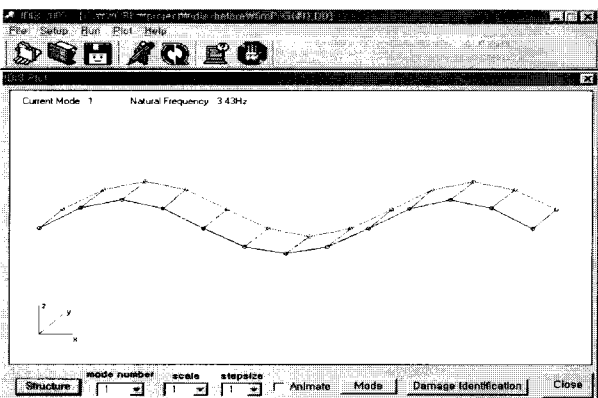


그림 10 계측·식별된 진동모드 #1

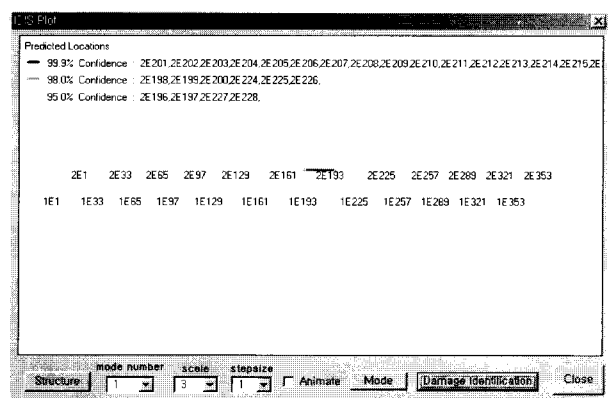


그림 13 정확한 손상예측 손상 #3

부이다. 매우 높은 손상예측 정확도를 보이고 있다. 자세한 관련 자료는 필자의 연구실(<http://structure.pknu.ac.kr>) 또는 스마트기반시설연구타(<http://www.sistec.re.kr>) 등을 통해 문의하길 바란다.

5.2 국내·외 대형구조물 손상추정 관련 사례 및 연구진

5.3.1 외국의 관련 사례 및 연구진

아래에는 미국과 유럽의 관련 연구진 중에서 인터넷을 통해 실험, 분석, 출판 자료를 얻을 수 있는 일부 연구진들과 그들의 대형 교량 진동모니터링과 손상추정 사례를 요약하였다. 이외에도 여러 대학과 연구소에서 매우 활발한 연구를 수행하고 있다.

- ◇ 미국 Los Alamos National Laboratory의 Dr. Farrars 연구진(<http://www.la-dynamics.com>)
 - I-40 Bridge(http://ext.lanl.gov/projects/damage_id/I40.htm)
 - Alamosa Canyon Bridge(http://ext.lanl.gov/projects/damage_id/alamosa.htm)
- ◇ 미국 Drexel 대학의 Aktan 교수 연구진(<http://www.di3.drexel.edu/>)
 - Commodore Barry Bridge(<http://www.di3.drexel.edu/>)
- ◇ 벨기에 KU Leuven 대학교의 Roeck 교수 연구진(<http://www.bwk.kuleuven.ac.be/bwm>)
 - Z-24 Bridge(<http://www.kuleuven.ac.be/bwm/>)
- ◇ 덴마크 Aalborg 대학교의 Brincker 교수 연구진(<http://www.civil.auc.dk/i6>)
 - Queensborough Bridge(<http://www.civil.auc.dk/i6>)

5.3.2 국내의 관련 연구소

- ◇ 스마트사회기반시설연구센터 SISTeC(<http://www.sistec.re.kr>)
- ◇ 지진공학연구센터 KEERC(<http://keercis.snu.ac.kr>)
- ◇ 한국시설안전기술공단 KISTEC(<http://www.kistec.or.kr>)
- ◇ 한국건설기술연구소 KICT(<http://www.kict.re.kr>)

6. 결론 및 미래의 과제

System Identification의 활용 사례를 교량의 구조식

별과 손상추정의 관점에서 기술하였다. 먼저 시스템식별의 개념과 구조식별의 개념을 설명하였고, 구조식별을 통한 손상추정기술의 개념 및 연구 동향을 기술하였으며, 교량 구조물의 경우에 대하여 시스템식별 기법의 적용 과정과 결과를 예로 들어 설명하였다. 또한, 실제 교량을 대상으로 수행한 진동모니터링과 손상추정의 과정과 결과를 보였다. 마지막으로 국내·외의 관련 연구진들과 그들의 대형 교량 진동모니터링과 손상추정 사례를 요약하였다.

미래의 과제는 대략 두 가지 각도로 구분된다. 첫 번째는 진동모니터링 기법의 개선과 구조식별 기법의 개선을 통해 SID 기법의 정확성을 높이는 것이다. 이와 동시에, 두 번째는, 다양한 구조물로의 적용성을 확대하기 위하여 구조형식과 특성 및 환경 및 조건에 맞도록 진동모니터링 기법과 SID 기법을 다양 시키고, 손상검색의 국부적 정밀도를 높이기 위해 적용 가능한 비파괴(nondestructive evaluation)기법과의 연계 방안을 찾는 것이다. 이 두 가지는 동시에 성취되어야 하는 연구과제이며, 대형 교량구조물에 대한 연구는 시급한 과제로 대두되어 있다. 장래에는 국내에서 관련한 분야에서 우수한 연구결과들이 모아지고 많은 우수한 인력이 양성되어 대형 교량을 포함한 기반시설물의 유지·관리 분야에서 선도적으로 기여할 수 있기를 기대한다.

감사의 글

본 글에서의 연구 중의 일부는 한국과학재단이 지원 하는 스마트사회기반시설 연구센터 연구사업에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. Lie, S. C., and Yao, J. T. P., "Structural Identification Concept", *Journal of the Structural Division, ASCE*, Vol. 104, No. ST12, 1978, pp.1845~1858
2. Yao, J. T. P., "Damage Assessment and Reliability Evaluation of Existing Structures", *Engineering Structures*, Vol. 1, 1979, pp.245~251
3. Yao, J. T. P., "Identification and Control of Structural Damage", *Solid Mechanics Archives*, Vol. 5, No. 3, 1980, pp.325~345
4. Stubbs, N., "A General Theory of Non-Destructive Damage Detection in Structures", *Structural Control*,

- H. H. H. Leipholz, Ed., 1985, pp.694~713
5. Yao, J. T. P., "Identification of Structural Damage in Civil Engineering", *Application of System Identification in Engineering*, ed. H. G. Natke, CISM Courses and Lectures No. 296, International Center for Mechanical Science, Springer-Verlag, New York, 1988, pp.349~390
 6. Natke, H. G., and Yao, J. T. P., "System Identification Methods for Fault Detection and Diagnosis", *International Conference on Structural Safety and Reliability*, ASCE, New York, 1990, pp.1387~1393
 7. Agabian, M. S., Masri, S. F., Miller, R. F., and Caughey, T. K., "System Identification Approach to Detection of Structural Changes", *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 117, No. 2, 1991, pp.370~390.
 8. Stubbs, N., Kim, J. T., and Topole, K., "An Efficient and Robust Algorithm for Damage Localization in Offshore Platforms", *ASCE 10th Structural Congress '92*, San Antonio, Texas, 1992
 9. Kim, J. T and Stubbs, N., "Model Uncertainty and Damage Detection Accuracy in Plate-Girder Bridges," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 121, No. 10, 1995, pp.1409~1417
 10. Aktan, A. E., Helmicki, A. J., and Hunt, V. J., "Instrumentation and Intelligence Issues in Bridge Health Monitoring", *Proceedings of North American Workshop on Bridge Instrumentation and Vibration Analysis of Highway Bridges*, Cincinnati, Ohio, 1995
 11. Stubbs, N., and Kim, J. T., "Damage Localization in Structures Without Baseline Model Parameters", *AIAA Journal*, AIAA, Vol. 34, No. 8, 1996, pp. 1644~1649
 12. Aktan, A. E., Farhey, D. N., Helmicki, A. J., Brown, D. L., Hunt, V. J., Lee, K. L., Levi, A., "Structural Identification for Condition Assessment: Experimental Arts", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol 123, No. 12, 1997, pp.1674~1684
 13. Hjemstad, K. D., and Shin, S., "Damage Detection and Assessment of Structures from Static Response", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 123, No. 6, 1997, pp.180~188
 14. Yun, C. B., and Lee, H. J., "Damage Estimation of Structures Incorporating Substructural Identification", *Journal of Structural Safety*, Vol. 19, No. 1, 1997, pp.121~140
 15. Kim, J. T and Stubbs, N., "Improved Damage Identification Method Based on Modal Information," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 252, No. 2, 2002, pp.223~238
 16. Kim, J. T., Ryu, Y. S., Cho, H. M., and Stubbs, N., "Damage Identification in Beam-Type Structures: Frequency-Based Method Vs Mode-Shape-Based Method," *Engineering Structures*, Vol. 25, No. 1, 2003, pp.57~67
 17. Yun, C. B., Kim, W. J., and Ang, A. H. S., "Damage Assessment of Bridge Structures by System Identification", *Proceedings of the 5th ICOSSAR*, San Francisco, USA, 1989
 18. 윤정방, 이형진, "System Identification 기법을 이용한 교량의 안전진단방법", *대한토목학회지*, Vol. 45, No. 3, 1997, pp.74~82
 19. Fuerst, L., *Introductory Digital Signal Processing with Computer Application*, John Wiley & Sons, New York, 1998
 20. Ewins, D. J., *Modal Testing: Theory and Practice*, B&K, Research Studies Press LTD., England, 1985
 21. Randall, R. B., *Frequency Analysis*, B&K, Denmark, 1987
 22. Vandiver, J. K., Dunwoody, A. B., Campbell, R. B., and Cook, M.F., "A Mathematical Basis for the Random Decrement Vibration Signature Analysis Technique", *Journal of Mechanical Design*, Vol. 104, pp.307~313, 1982
 23. Ibrahim, S. R., "Time-Domain Quasilinear Identification of Nonlinear Dynamic Systems", *AIAA Journal*, Vol. 6, No. 6, pp.817~823, 1984
 24. Overschee, Van P., and B. De Moor, "Subspace Identification for Linear Systems", *Kluwer Academic Publishers*, 1996
 25. Brincker, R., Zhang, L., and Anderson, P., "Modal Identification from Ambient Responses using Frequency Domain Decomposition", *Proceedings*

of the 18th International Modal Analysis Conference, San Antonio, Texas

26. Farrar, C., and Cornwell, P. J., "Structural Health

Monitoring Studies of the Alamosa Canyon and I-40 Bridges", Technical Report LA-13635-MS, Los Alamos National Laboratory, USA, 1998 