

사장교의 구조식별을 위한 가진실험 데이터분석

FVT Signal Processing for Structural Identification of Cable-Stayed Bridge

윤자걸* · 이정휘** · 김정인***
Jah Geol Youn, Jungwhhee Lee and Jung-In Kim

Key Words : 신호변형지수(Signal Anomaly Index), 인공신경망(Artificial Neural Network), 패턴인식(Pattern Recognition), 구조식별(Structural Identification), 사장교(Cable-Stayed Bridge), 모델보정(FE-Model Calibration)

ABSTRACT

In this research, Forced Vibration Test(FVT) on a cable stayed bridge was conducted to examine the validity of the frequency domain pattern recognition method using signal anomaly index and artificial neural network. The considering structure, Samchunpo Bridge, located in Sachun-Shi, Kyungsangnam-Do, is a cable stayed bridge with the 436 meter span. The excitation force was induced by a sudden braking of a fully loaded truck, and vertical acceleration signals were acquired at 14 points. The initial 2-dimensional FE-model was developed from the design documents to prepare the training sets for the artificial neural network, and then the model calibration was performed with the field test data. As a result of the model calibration, we obtained the FFT spectrums from the model simulation, which was similar to those from the vibration test. These tests and the simulation data will be used for the structural identification using arbitrarily added masses to the bridge.

1. 서론

최근 교량 등의 중요 구조물의 유지관리 기법에 대한 관심이 국내외적으로 고조되고 있다. 특히 교량 구조물의 상태평가 및 손상감지를 위한 SI(System Identification) 기법에 대해 다양한 연구가 수행되고 있으나, 현재까지 수치해석 모델 또는 실내에서의 단순한 모형 구조물에 대한 실험에 대해서만 그 성능이 확인된 수준이며, 실제 교량을 대상으로 한 적용성에 대하여는 검증된 바가 미미한 실정이다⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾.

이에 이번 연구에서는 삼천포 대교의 완공 이후 개통 직전에 수행한 초기재하시험의 결과를 사용하여 인공신경망을 사용한 구조물 손상감지 기법의 실고 적용성을 확인해 보고자 한다. 대상 교량에 대한 3 차원 수치해석 모델의 작성 및 시뮬레이션 데이터를 사용한 부가질량의 위치판별에 대한 모의시험 결과는 이전의 문헌에 발표된 바 있으며⁽⁴⁾, 이 논문에서는 보다 단순화 된 2 차원 수치해석 모델의 보정과정 및 그 결과에 대하여 기술하였다. 모델의 보정에는 구조물의 고유진동수가 사용되었으며, 경계조건을 비롯한 주탑, 보강형의 강성, 보강형의 질량 등의 파라미터를 조정

하여 수치해석의 결과와 실측 결과 사이의 오차가 최소화되도록 하였다⁽⁵⁾.

손상 시나리오에 따라 수치해석 결과로부터 얻어지는 손상이 발생한 이후의 구조물에 대한 모의 응답은 인공신경망의 학습을 위해 사용되며, 인공신경망 기법을 사용한 부가질량의 위치판별에 대하여는 현재 연구가 진행되고 있다.

2. 대상교량 개요 및 초기재하시험

2.1 삼천포대교 개요

이 연구의 대상 구조물인 삼천포대교는 경남 사천시와 창선도를 잇는 창선-삼천포대교의 일부로, 총 경간장 436m (중앙경간 230m)의 3 경간 연속 강합성 사장교이다 (그림 1). 80 분의 사장케이블과 2 기의 콘크리트 주탑, 그리고 합성형 바닥판으로 구성되어 있으며, 2003년 4월 개통하여 현재 공용 중에 있다.

2.2 초기재하시험

초기재하시험은 2003년 4월 17일 구조계 완성 직후에 시행하였으며, 그림 2와 표 1에 나타난 바와 같이 총 8 가지 하중경우에 대하여 정적 처짐과 동적 가속도 응답을 측정하였다. 하중으로는 각 하중경우 별로 2~6 대의 만재된 덤프트럭 (각

* 대림산업주식회사 기술연구소 과장

E-mail : yoonjg@dic.co.kr

Tel : (02) 2011-8279, Fax : (02) 2011-8267

** 서울대학교 지진공학연구소 박사후연구원

*** 서울대학교 지구환경시스템공학부 석사과정

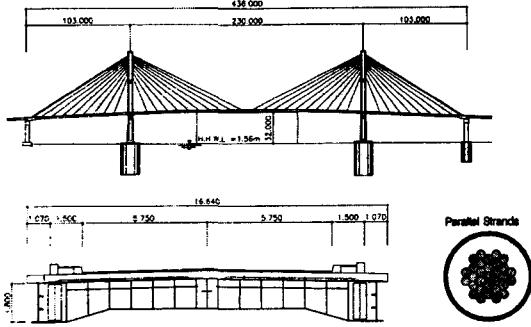


Fig. 1 삼천포대교 측면도 및 단면도

29.7ton)을 사용하였으며, 정적 처짐의 측정을 위해 수준측량을 실시하였고, 동적 응답의 측정을 위해 1 대의 만재된 덤프트럭을 급정거시키는 방법을 사용하였다.

가속도의 측정은 구조물의 대칭성을 고려하여 그림 3 에 나타난 바와 같이 PY5 주탑측 절반에 대해서만 실시하였으며, 총 14 개의 가속도계가 사용되었다. 가속도의 수집빈도(Sampling rate)는 50Hz 로 설정하여 25Hz 까지의 분석이 가능하도록 하였으며, 이는 대상구조물의 주요한 모드에 대한 고유진동수 범위를 고려할 때 충분한 값이다.

표 1. 하중경우

| Case ID | 재하위치 | 하중크기 (ton) | 재하트럭 수 |
|---------|----------|------------|--------|
| M1 | - | 가진트럭 | |
| M2 | 중앙경간 L/2 | 59.4 | 2 |
| M3 | 중앙경간 L/2 | 118.8 | 4 |
| M4 | 중앙경간 L/2 | 178.2 | 6 |
| T2 | 중앙경간 L/2 | 178.2 | 6 |
| S2 | 중앙경간 L/4 | 178.2 | 6 |
| S3 | 중앙경간 L/8 | 178.2 | 6 |
| S4 | 측경간 L/2 | 89.1 | 3 |

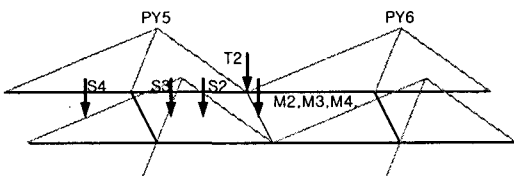


Fig. 2 각 하중경우별 재하위치

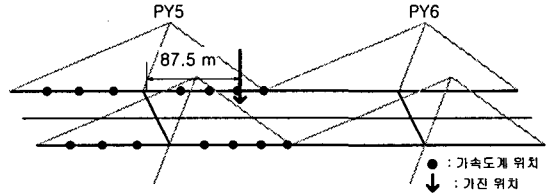


Fig. 3 가속도계 설치위치 및 가진위치

3. 고유진동수 및 모드형상의 추출

구조물의 각 위치에서 측정된 가속도 신호는 가진 시점을 중심으로 적절한 종류와 길이의 윈도우 함수를 적용한 뒤, FFT(Fast Fourier Transform)을 통하여 주파수영역의 응답으로 변환된다. 다음의 그림 4 에는 대표적인 FFT Magnitude Spectrum 의 예를 나타내었다.

각 측정위치에 대한 주파수영역의 응답은 기준 점응답(Reference Signal)에 대한 상관성(Coherence) 분석, 위상(Phase angle) 분석, 잡음제거(Noise filtering)등의 과정을 거친 뒤, 동적특성치의 추출에 사용된다. 신호처리에 대한 자세한 내용은 참고문헌 (5)에 기술되어 있다.

표 2. 실측 고유진동수

| 고유진동수(Hz) | 고유주기(sec) | 모드형상 |
|-----------|-----------|---------|
| 0.46 | 2.17 | 수직 1 차 |
| 0.65 | 1.54 | 수직 2 차 |
| 0.85 | 1.18 | 비틀림 1 차 |
| 1.04 | 0.96 | 수직 3 차 |
| 1.60 | 0.63 | 비틀림 3 차 |
| 1.84 | 0.54 | 수직 5 차 |
| 2.37 | 0.42 | 비틀림 4 차 |
| 2.68 | 0.37 | 비틀림 5 차 |
| 3.05 | 0.33 | 수직 7 차 |
| 3.45 | 0.29 | 수직 7 차 |

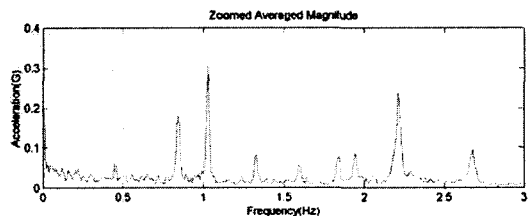


Fig. 4 FFT Magnitude Spectrum

대상구조물로부터 측정된 실측 가속도를 사용하여 최종적으로 결정된 고유진동수와 모드형상의 일부를 다음의 표 2와 그림 5에 나타내었다. 측정점의 수와 가진력 특성으로 인해 7차까지의 진동모드를 판별할 수 있었다.

그림 3에 나타낸 바와 같이 가속도계는 교량의 동측 1/2부분에만 설치되어 있으므로 모드형상의 판별에는 구조물의 대칭성을 고려하였다.

이 연구에서는 2차원 수치해석모형을 사용하였으므로, 실측된 동적특성치 중 비틀림모드를 제외하고, 수직모드만을 사용하여 모델보정을 수행하였다.

4. 수치해석모델의 작성 및 보정

4.1 수치해석모델의 작성

삼천포대교의 수치해석모델은 구조계산서⁽⁶⁾ 및 설계도면을 참고하여 2차원으로 작성하였으며, 범용 구조해석 프로그램인 SAP2000⁽⁷⁾을 사용하였다.

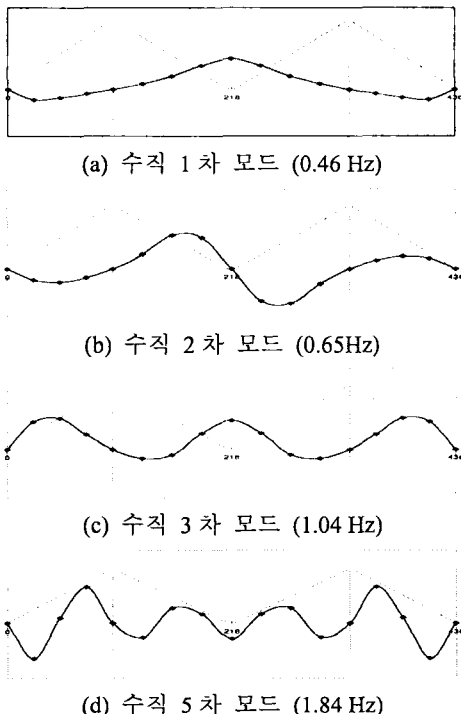


Fig. 5 실측 모드형상

보강형과 주탑의 모델링에는 보 요소를 사용하였으며, 케이블에는 양단 모멘트 연결이 해제된 보 요소를 사용하였고, 지점부에 부분적으로 회전 스프링 요소를 사용하였다.

보강형의 강성 계산을 위해 콘크리트 바닥판을 등가의 강성을 갖는 강재로 환산하여 사용하였으며, 유효폭은 적용하지 않고 전폭을 사용하였다. 또한 케이블의 강성계산에는 초기장력 및 기하형상을 고려하는 Ernst의 등가트러스 이론을 사용하였다⁽⁸⁾.

질량의 계산에는 주탑 및 합성형 바닥판의 콘크리트 단면, 강 주형 및 기타 강재, 사장케이블, 케이블 정착구, 포장 등을 고려하였다.

주탑과 보강형의 연결은 면내회전이 자유로운 힌지 연결조건을 사용하였으며, 보강형 양 단부는 각각 1단 힌지, 1단 롤러 조건을 적용하고, 각 지점부에는 4.2절에 기술된 모델보정에 사용하기 위한 회전 스프링을 두었다.

그림 6은 최종적으로 작성된 초기해석모델을 나타낸 것으로, 233개의 요소와 270개의 절점이 사용되었다.

4.2 수치해석모델의 보정

인공신경망을 사용한 주파수영역 패턴인식 기법은 기본적으로 수치해석모델에 의존하는 방법으로, 대상구조물의 실제응답과 충분히 유사한 응답을 보이는 수치해석모델의 구성이 기본적이고 필수적인 요소이다.

수치해석모델의 보정을 위해 표 2에 나타낸 고유진동수 중 비틀림모드를 제외한 6개 횡모드에 대한 고유진동수를 사용하였으며, 보정이 완료된 해석모델의 정적 응답을 실측 정적처짐과 비교하여 타당성을 확인하였다.

사장교의 모델보정에는 지점부 회전스프링의 추가가 필수적임이 이전의 연구에서 밝혀진 바 있으며⁽⁹⁾, 따라서 이 연구에서도 이를 포함하여 표 3에 열거한 바와 같은 5개의 변수를 사용하였다.

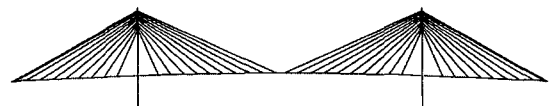


Fig. 6 2차원 초기해석모델

표 3. 모델보정에 사용된 변수

| 시스템 변수 | 선정근거 |
|-----------|---------------|
| 주탑 탄성계수 | 재료 불확실성 |
| 보강형의 강성 | 재료 불확실성 및 유효폭 |
| 보강형의 총 질량 | 불확정 하중요소 |
| 단부 회전스프링 | 지점조건 불확실성 |
| 주탑부 회전스프링 | 지점조건 불확실성 |

각 변수의 미소 변화에 대한 고유진동수값의 변화를 나타내는 영향벡터를 구한 뒤, 이들 영향 벡터를 조합하여 해석 고유진동수 값을 목표 고유진동수 값에 가장 근접하게 하는 계수를 찾는 방법으로 모델 보정을 수행하였다.

그림 7은 단부 회전스프링의 강성 변화에 따른 관심 고유진동수의 변화를 나타낸 것으로, 각각의 모드에 미치는 영향이 같지 않으며, 이 변수의 경우에는 세 번째 모드(수직 3차 휨모드)에 가장 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

그림 8은 반복계산에 따른 오차의 감소를 보이고 있으며, 4회 반복계산 이후 목표 고유진동수와 가장 근접한 값을 갖게 하는 시스템변수의 값을 얻을 수 있었다.

표 4는 모델보정 이전 및 이후 고유진동수 값과 목표 고유진동수(실측값) 및 각각의 경우에 대한 오차를 보이고 있으며, 초기모델에서 13.14%이던 오차가 보정 이후 2.61%로 감소하였다.

4.3 보정된 모델을 사용한 가진실험 Simulation

현재 진행중인 연구에서 사용하고 있는 인공신경망을 사용한 주파수영역 패턴인식 기법은 주파수응답함수(FRF) 또는 FFT를 사용하여 주파수영역으로 변환된 스펙트럼을 입력으로 사용하므로, 해석 및 실험으로부터 얻은 손상 전 구조물에 대한 주파수영역 스펙트럼의 형태가 유사하여야 성공적인 구조식별의 결과를 얻을 수 있다.

따라서, 유사한 형태의 스펙트럼이 얻어지는지의 여부를 확인하기 위하여 현장실험과 같은 조건을 수치해석모델에 가하여 실제 가속도계의 설치 위치와 동일한 위치의 절점에서 가속도응답을 구하였다.

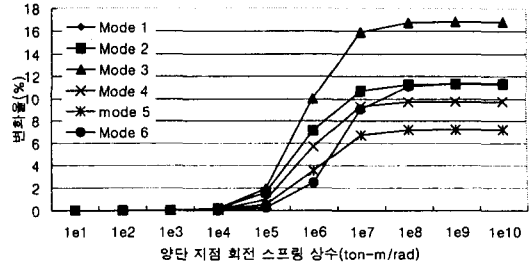


Fig. 7 단부 회전스프링 강성변화에 따른 고유진동수 변화

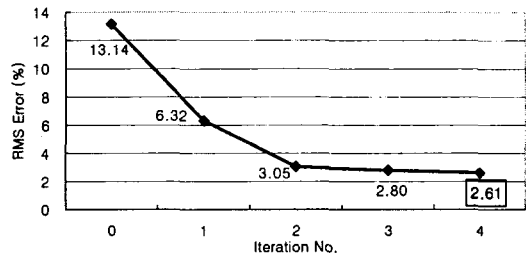
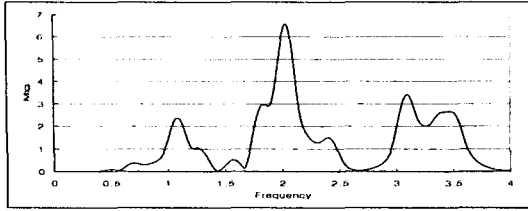


Fig. 8 반복계산에 따른 오차의 감소

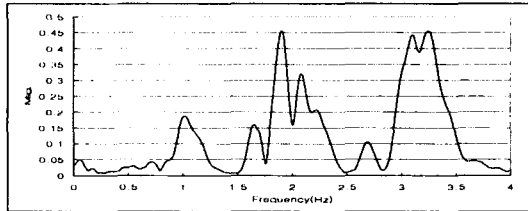
다음의 그림 9에는 3번 가속도계로부터 수집한 실측 가속도 스펙트럼과 같은 위치의 절점에서 얻어진 해석결과를 비교하였다. 고유진동수를 사용하여 모델보정을 수행하였으므로 첨두값의 위치가 일치함은 물론이고, 그림에 보이는 바와 같이 유사한 형태의 스펙트럼을 얻을 수 있었다.

표 4. 모델 보정 결과

| Mode | 초기 모델 | | 최종 보정 모델 | | 실측값 (Hz) |
|---------------|----------|--------|----------|--------|----------|
| | 진동수 (Hz) | 오차 (%) | 진동수 (Hz) | 오차 (%) | |
| 1 | 0.408 | -11.3 | 0.482 | 4.7 | 0.46 |
| 2 | 0.569 | -12.5 | 0.647 | -0.4 | 0.65 |
| 3 | 0.893 | -14.2 | 1.042 | 0.2 | 1.04 |
| 4 | 1.561 | -15.2 | 1.768 | -3.9 | 1.84 |
| 5 | 2.657 | -12.9 | 3.064 | 0.5 | 3.05 |
| 6 | 3.021 | -12.4 | 3.507 | 1.7 | 3.45 |
| RMS ERROR (%) | 13.14 | | 2.61 | | |



(a) 실측 가속도 응답



(b) 해석 가속도 응답

Fig. 9 주파수영역 가속도 스펙트럼 비교

5. 결론

이 연구에서는 인공신경망에 기초한 구조물 손상감지 기법의 사장교 손상 감지에의 적용성과 타당성을 확인하기 위하여 삼천포 대교를 대상으로 초기재하 및 가진 실험을 수행하고 삼천포 대교의 구조 해석 모델을 작성하였다.

가진 실험으로부터 추출한 대상 교량의 동특성을 이용하여 미리 작성된 2D 해석 모델을 보정하는 과정을 거쳤고, 이를 통해서 실 구조물과 유사한 동특성을 가지는 해석 모델을 작성할 수 있었다. 모델 보정은 인공신경망을 이용한 손상감지 절차 중 해석 모델을 이용한 인공신경망의 학습에 필수적인 선행 절차로 이번 연구에서 매우 중요한 과정이라 할 수 있다.

이상의 결과를 바탕으로, 교량상의 추가 질량에 따른 구조계의 변화를 식별하기 위하여, 신호 변형지수의 산정과 인공신경망의 학습을 통한 패턴 인식 등의 본격적인 연구가 수행 과정중에 있다.

참고문헌

- (1) 대림산업 기술연구소, 2001, 신호처리에 의한 케이블교량의 건전성 상태평가 연구
- (2) 이정휘 등, 2002, "인공신경망과 신호변형지수를 사용한 교량구조물의 손상감지", 대한토목학회 학술발표회 논문집, pp. 135 ~ 138
- (3) 김성근, 1996, "구조물 손상발견을 위한 신호처리 기법", 대한토목학회 논문집, 제 16 권 제 1-1 호, pp. 81~92
- (4) 윤자결 등, 2003, "인공신경망을 이용한 사장교의 손상감지", 한국구조물진단학회 봄. 학술발표회 논문집, 제 7 권 1 호, pp. 43~48
- (5) 윤자결, 2002, 상시진동을 이용한 사장교 유한요소모델의 보정, 서울대학교 박사학위논문
- (6) 건설교통부, 1999, 삼천포대교 구조계산서
- (7) Computers and Structures Inc., 1995, SAP2000 User Manual
- (8) Gimsing, N. J., "Cable Supported Bridge: Concept and Design", 2nd edition, John Wiley & Sons, 1997.