

## 사장교의 구조식별을 위한 가진실험 데이터분석<sup>#</sup>

### FVT Signal Processing for Structural Identification of Cable-stayed Bridge

윤 자 결<sup>†</sup> · 이 정 휘<sup>\*</sup> · 김 정 인<sup>\*\*</sup>

Jah Geol Yoon, Jung Whee Lee and Jung-In Kim

(2004년 1월 12일 접수 : 2004년 9월 15일 심사완료)

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

#### 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 neuralnetwork. 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. 서 론

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.<sup>(1~4)</sup>

이에 이번 연구에서는 삼천포 대교의 완공 이후 개통 직전에 수행한 초기제하시험의 결과를 사용하여 인공신경망을 사용한 구조물 손상감지 기법의 실용 적용성을 확인해 보고자 한다. 대상 교량에 대한 3차원 수치해석 모델의 작성 및 시뮬레이션 데이터를 사용한 부가질량의 위치관별에 대한 모의시험 결과는 이전의 문헌에 발표된 바 있으며,<sup>(5)</sup> 이 논문에서는 보다 단순화 된 2차원 수치해석 모델의 보정과정 및 그 결과에 대하여 기술하였다. 모델의 보정에는 구조물의 고유진동수가 사용되었으며, 경계조건을 비롯한 주탑, 보강형의 강성, 보강형의 질량 등의 파라미터를 조정하여 수치해석의 결과와 실측 결과 사이의 오차가 최소화되도록 하였다.<sup>(6)</sup>

손상 시나리오에 따른 수치해석 결과로부터 얻어지

<sup>†</sup> 책임저자 : 정희원, 대림산업주식회사 기술연구소

E-mail : yoonjg@dic.co.kr

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

<sup>\*</sup> 서울대학교 지진공학연구센터

<sup>\*\*</sup> 서울대학교 지구환경시스템공학부

<sup>#</sup> 이 논문은 2003 추계학술대회에 우수발표논문으로 추천되었음.

는 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 436 m(중앙경간 230 m)의 3경간 연속 강합성 사장교이다.(Fig. 1) 80본의 사장케이블과 2기의 콘크리트 주탑, 그리고 합성형 바닥판으로 구성되어 있으며, 2003년 4월 개통하여 현재 공용 중에 있다.

### 2.2 초기재하시험

초기재하시험은 2003년 4월 17일 구조계 완성직후에 시행하였으며, Fig. 2와 Table 1에 나타난 바와 같이 총 8가지 하중 경우에 대하여 정적 처짐과 동적 가속도 응답을 측정하였다. 하중으로는 각 하중 경우

별로 2~6대의 만재된 덤프트럭(각 29.7 ton)을 사용하였으며, 정적 처짐의 측정을 위해 수순측량을 실시하였고, 동적 응답의 측정을 위해 1대의 만재된 덤프트럭을 급정거시키는 방법을 사용하였다.

가속도 측정은 구조물의 대칭성을 고려하여 Fig. 3에 나타난 바와 같이 PY5 주탑측 절반에 대해서만 실시하였으며, 총 14개의 가속도계가 사용되었다. 가

Table 1 Loading cases

Case ID	Loading location	Weight (ton)	Number of trucks
M1	Excitation only		
M2	Center span L/2	59.4	2
M3	Center span L/2	118.8	4
M4	Center span L/2	178.2	6
T2	Center span L/2	178.2	6
S2	Center span L/4	178.2	6
S3	Center span L/8	178.2	6
S4	Side span L/2	89.1	3

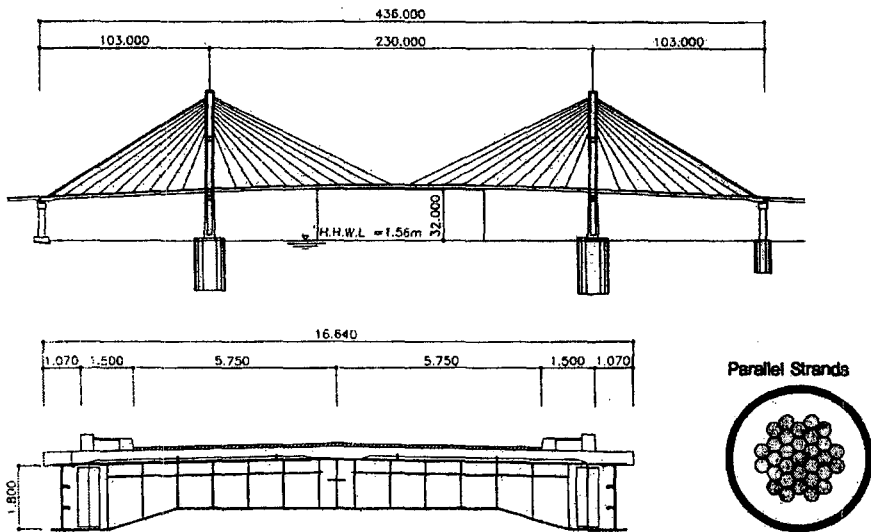


Fig. 1 Side & section view of Samchunpo Bridge

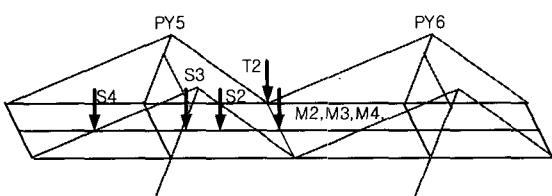


Fig. 2 Loading locations

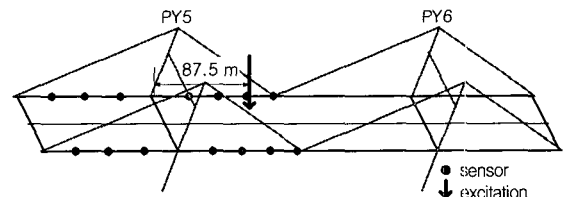


Fig. 3 Measuring and excitation locations

속도의 수집빈도(sampling rate)는 50 Hz로 설정하여 25 Hz까지의 분석이 가능하도록 하였으며, 이는 대상 구조물의 주요한 모드에 대한 고유진동수 범위를 고려할 때 충분한 값이다.

### 3. 고유진동수 및 모드형상의 추출

구조물의 각 위치에서 측정된 가속도 신호는 가진 지점을 중심으로 적절한 종류와 길이의 윈도우 함수를 적용한 뒤, FFT(fast Fourier transform)을 통하여 주파수영역의 응답으로 변환된다. Fig. 4에는 대표적인 FFT magnitude spectrum의 예를 나타내었다.

각 측정위치에 대한 주파수영역의 응답은 기준점 응답(reference signal)에 대한 상관성(coherence) 분석, 위상(phase angle) 분석, 잡음제거(noise filtering) 등의 과정을 거친 뒤, 동적특성치의 추출에 사용된다.<sup>(6)</sup>

기존의 잡음제거 기법을 개선하기 위해 노이즈플로어 윈도우 함수(noise floor window function)을 사용하였다. 이 방법은 주파수 영역에서 노이즈에 묻힌 것으로 판단되는 성분들을 소거하기 위하여, 스펙트럼 상에서의 이동평균법으로 계산된 노이즈 플로어에 비하여 탁월한 성분만을 남기는 역할을 한다. 노이즈플로어 윈도우 함수는 기존 연구자들이 제안한 위상차 윈도우 함수와 코히런스 윈도우 함수를 이용하여도 소거되지 않는 주파수 성분을 제거할 수 있다. 식 (1)에 평균진폭스펙트럼(averaged Fourier magnitude spectrum, AFM)에서 가지 윈도우 함수를 곱하여 수정평균진폭스펙트럼(modified averaged Fourier magnitude spectrum, MAFM)을 얻는 과정을 나타내었다.

$$MAFM_i(f) = AFM_i(f) \cdot PW_i(f) \cdot CW_i(f) \cdot NW_i(f) \quad (1)$$

여기서,  $AFM_i(f)$ 는 평균진폭스펙트럼으로 각 측정점  $i$ 에서 여러 번 측정된 시간이력 신호로부터 얻어

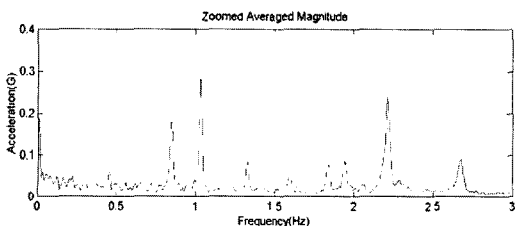


Fig. 4 FFT magnitude spectrum

진 진폭스펙트럼(fourier magnitude spectrum)을 측정 횟수에 대하여 평균을 취한 것이며,  $PW_i(f)$ 는 위상차 윈도우 함수로, 식 (2)와 같이 평균위상차(averaged phase difference, APD)의 크기에 따라 0 또는 1의 값을 갖는다. 그리고, 코히런스 윈도우 함수  $CW_i(f)$ 는 식 (3)과 같이 평균코히런스(averaged coherence, AC)의 크기에 따라 0 또는 1의 값을 갖는 함수이다. 위상차 윈도우 함수와 코히런스 윈도우 함수에는 측정오차 등을 고려하여  $\gamma_c^2$ ,  $\theta_c$ 의 허용범위를 두었다.

$$PW_i(f) = 1 \text{ if } \gamma_c^2 \leq APD_i(f)^2 \leq 1 \\ 0 \text{ if } 0 < APD_i(f)^2 < \gamma_c^2 \quad (2)$$

$$CW_i(f) = 1 \text{ if } 0 \leq AC_i(f) \leq \theta_c \\ 0 \text{ if } \theta_c < AC_i(f) < 180 - \theta_c \\ -1 \text{ if } 180 - \theta_c < AC_i(f) < 180 \quad (3)$$

노이즈플로어 윈도우 함수는 식 (4)와 같이 정의되며, 평균진폭스펙트럼(AFM)의 이동평균 및 이동표준편차를 사용하여 계산된다.

$$NW_i(f) = 1 \text{ if } AFM(f) \geq NF\_AFM(f) \\ 0 \text{ if } AFM(f) < NF\_AFM(f) \quad (4)$$

여기서,

$NF\_AFM(f) = \{ma(AF M(f)) + C \times mstd(AF M(f))\}$ ,  $ma()$ 는 이동평균함수(moving average function),  $mstd()$ 는 이동표준편차함수(moving standard deviation function)이고,  $C$ 는 공차계수이다.

이와 같은 과정을 통하여 얻어진 수정평균진폭스펙트럼(MAFM)을 평균하여 전체 구조물에 대한 대표 스펙트럼을 산출하며, 이에 peak picking법을 적용하여 구조물의 고유진동수와 모드형상을 얻었다.

Table 2 Measured natural frequencies

Frequency (Hz)	Period (sec)	Modeshape
0.46	2.17	1 <sup>st</sup> bending
0.65	1.54	2 <sup>nd</sup> bending
0.85	1.18	1 <sup>st</sup> torsional
1.04	0.96	3 <sup>rd</sup> bending
1.60	0.63	3 <sup>rd</sup> torsional
1.84	0.54	5 <sup>th</sup> bending
2.37	0.42	4 <sup>th</sup> torsional
2.68	0.37	5 <sup>th</sup> torsional
3.05	0.33	7 <sup>th</sup> bending

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

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

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

### 4. 수치해석모델의 작성 및 보정

#### 4.1 수치해석모델의 작성

삼천포대교의 수치해석모델은 구조계산서<sup>(7)</sup> 및 설계도면을 참고하여 2차원으로 작성하였으며, 범용 구조해석 프로그램인 SAP2000<sup>(8)</sup>을 사용하였다.

보강형과 주탑의 모델링에는 보 요소를 사용하였으며, 케이블에는 양단 모멘트 연결이 해제된 보 요소

를 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.<sup>(8)</sup>

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.

Fig. 6은 최종적으로 작성된 초기해석모델을 나타낸 것으로, 233개의 요소와 270개의 절점<sup>o</sup> 사용되었다.

#### 4.2 수치해석모델의 보정

인공신경망을 사용한 주파수영역 패턴인식 기법은 기본적으로 수치해석모델에 의존하는 방법으로, 대상 구조물의 실제응답과 충분히 유사한 응답을 보이는 수치해석모델의 구성이 기본적이고 필수적인 요소이다.<sup>(2)</sup>

수치해석모델의 보정을 위해 Table 2에 나타난 고유진동수 중 비틀림모드를 제외한 6개 횡모드에 대한

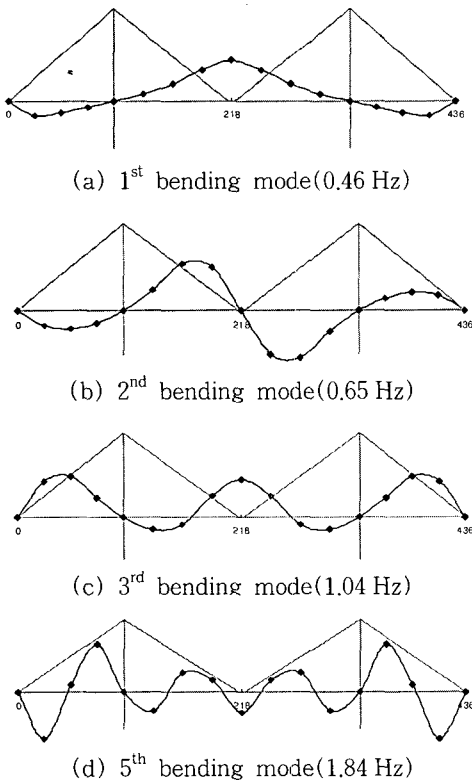


Fig. 5 Measured modeshapes

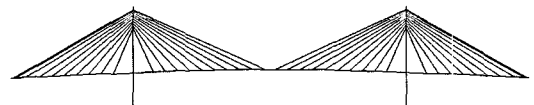


Fig. 6 2-Dimensional FE-model

Table 3 Variables for model updating

Variable	Basis of selection
E of pylon	Material uncertainty
Stiffness of girder	Material uncertainty Effective width uncertainty
Gross weight of girder	Unknown loads
Stiffness of end-spring	Uncertainty of boundary condition
Stiffness of pylon-spring	Uncertainty of boundary condition

고유진동수를 사용하였으며, 보정이 완료된 해석모델의 정적 응답을 실측 정적처짐과 비교하여 타당성을 확인하였다.

사장교의 모델보정에는 지점부 회전스프링의 추가가 필수적임이 이전의 연구에서 밝혀진 바 있으며,<sup>(6)</sup> 따라서 이 연구에서도 이를 포함하여 Table 3에 열거한 바와 같은 5개의 변수를 사용하였다.

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

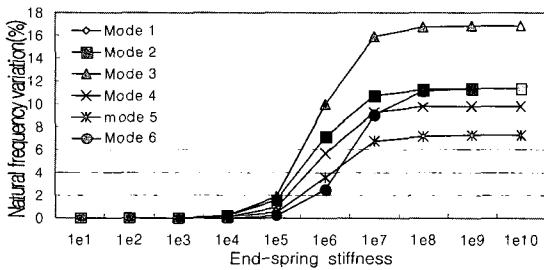


Fig. 7 Natural frequency variation due to end-spring stiffness change

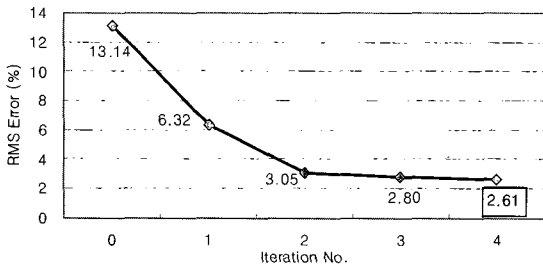


Fig. 8 Reduction of RMS error

Table 4 Change of variables due to model update

Variable	Initial value	Updated value
E of pylon	2.80E6 (tonf/m <sup>2</sup> )	2.80E6 (tonf/m <sup>2</sup> )
Stiffness of girder	0.392~1.286(m <sup>4</sup> )	0.392~1.286(m <sup>4</sup> )
Gross weight of girder	10,583(ton)	11,485(ton)
Stiffness of end-spring	0	10.80E6 (tonf-m/rad)
Stiffness of pylon-spring	0	1.56E6 (tonf-m/rad)

Fig. 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.

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

Table 4에는 이러한 과정을 통해 얻어진 시스템 변수의 값을 보정 전의 초기값과 비교하여 나타내었다.

Table 5는 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.

### 5. 패턴인식을 통한 손상감지방법

이 연구에서 적용하는 패턴인식을 통한 손상감지방법의 개념을 간략히 소개하면 다음과 같다.

구조물에 가해진 손상으로 인해 구조물의 강성 또는 질량에 변화가 생기면, 이는 구조물의 동적특성치(고유진동수, 모드형상 및 감쇠)의 변화를 가져오게 되고, 이것은 곧 주파수 영역의 응답 또는 가속도 스펙트럼의 형태가 변화하게 되는 것을 뜻한다. Fig. 9에 나타난 것은 7번 가속도계에서의 손상전과 손상

Table 5 Change of natural frequencies due to model update

Mode	Initial model		Updated model		Measured (Hz)
	Frequency (Hz)	Error (%)	Frequency (Hz)	Error (%)	
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		

후의 주파수 응답을 수치해석을 통하여 얻은 것이다.

스펙트럼의 변화 정도를 정량적으로 표현하기 위해 신호변형지수(SAI)를 사용하며, 이는 식 (5)와 같다.<sup>(2)</sup> 측정오차, 온도변화 및 기타 불확실성에 의해 결정되는 정상인 구조물에서의 신호변형지수의 한계값은 손상 전 구조물에서 여러 번에 걸쳐 측정된 신호의 통계분석을 통해 얻을 수 있으며, 이 한계값과 현재 측정된 신호로부터 계산된 신호변형지수 값을 비교함으로써 구조계의 변화여부 또는 손상발생 여부를 판단할 수 있다.

$$SAI = \frac{\|FRF' - FRF^0\|}{\|FRF'\|} \quad (5)$$

Fig. 10의 위쪽 막대 그래프는 손상발생 여부를 판단하는 화면으로, 손상 전 구조물의 계측치 통계분석으로 얻은 신호변형지수의 한계값을 0.5에 mapping하여 0.5 이하의 값이 계산되면 손상이 발생한 것으로 판단할 수 있게 한 것이다. 그림에 나타난 30개의 계측치 중 손상 전 계측치인 1~5번 샘플에 대해 0.5 이상, 손상 후 계측치인 6~30번 샘플에 대해 0.5 이하의 값을 나타냄으로써 손상발생 여부를 잘 가려내고 있음을 알 수 있다.

신호변형지수에 의해 정량적으로 표현되는 구조물의 응답 변화는 측정 위치 및 주파수 대역에 따라 그 정도가 다르게 나타나며, 이러한 변화의 양상은 손상의 종류 및 위치에 따라 다르게 나타난다. Fig. 10의 아래쪽 그래프는 이러한 응답변화의 양상을 시각적으로 표현한 것이며 신호변형지수 지도라고 부른다. 그림에서 가로축은 측정치의 채널번호이며 세로축은 주파수 구간의 번호이다. 여러 가지 손상경우에 대하여 여러 번에 걸쳐 측정된 신호를 분석하여 보면, 같은 손상경우의 측정치들은 모두 유사한 패턴의 신호변형지수 지도를 생성함을 확인할 수 있다.

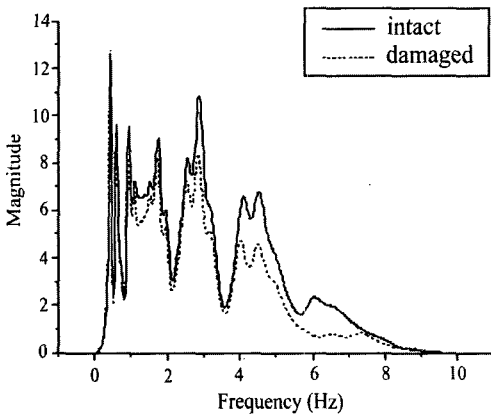


Fig. 9 Spectrum change due to structural damage

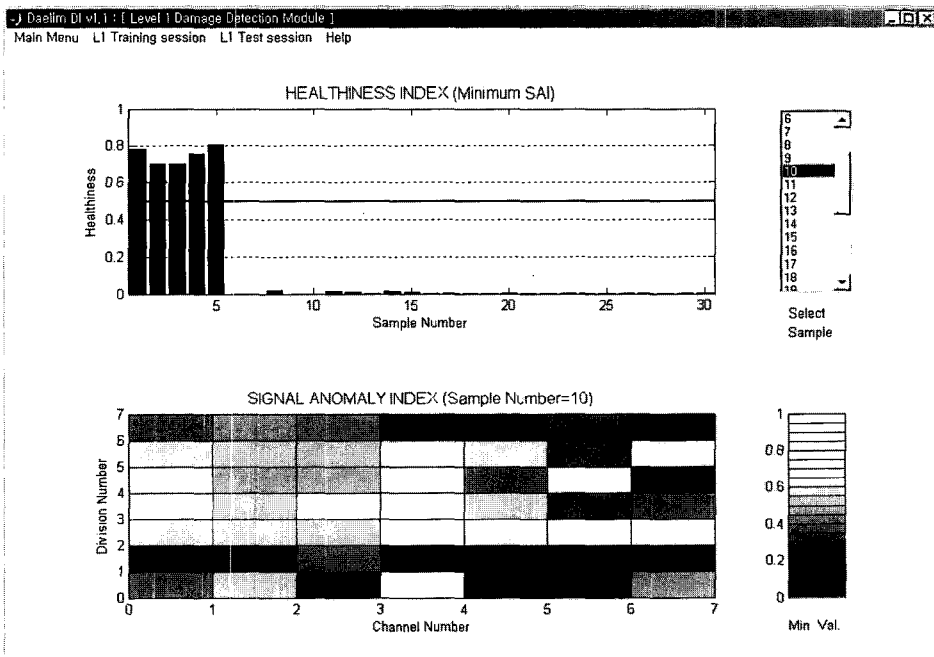


Fig. 10 Screen dump of damage detection program

따라서, 보정이 완료된 수치해석 모델에 미리 정해 놓은 손상 시나리오에 따라 손상을 가하고, 각 손상 경우에 대한 신호변형지수 지도를 생성하여, 이를 인공신경망의 학습자료로 사용하게 된다.

학습이 완료된 인공신경망을 실측자료로부터 계산된 신호변형지수 지도를 사용하여 시험하면 학습시 사용했던 손상 시나리오 중 현재의 신호변형지수 행렬과 가장 유사한 패턴을 보이는 손상 경우를 찾을 수 있다.

## 6. 결 론

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 절차중 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.

## 참 고 문 헌

- (1) 대림산업 기술연구소, 2001, 신호처리에 의한 케이블교량의 건전성 상태평가 연구.
- (2) 이정휘 등, 2002, "인공신경망과 신호변형지수를 사용한 교량구조물의 손상감지", 대한토목학회 학술발표회논문집, pp. 135~138.
- (3) 김성근, 1996, "구조물 손상발견을 위한 신호처리 기법", 대한토목학회논문집, 제 16 권, 제 1-1 호, pp. 81~92.
- (4) 김두기 등, 2001, "교량 구조물의 헬스모니터링을 위한 진동계측", 한국소음진동공학회논문집, 제 11 권, 제 5 호, pp. 108~122.
- (5) 윤자걸 등, 2003, "인공신경망을 이용한 사장교의 손상감지", 한국구조물진단학회 봄 학술발표회논문집, 제 7 권, 제 1 호, pp. 43~48.
- (6) 윤자걸, 2002, "상시진동을 이용한 사장교 유한요소모델의 보정", 서울대학교 박사학위논문.
- (7) 건설교통부, 1999, 삼천포대교 구조계산서.
- (8) Computers and Structures Inc., 1995, SAP2000 User Manual.
- (9) Gimsing, N. J., "Cable Supported Bridge: Concept and Design", 2<sup>nd</sup> edition, John Wiley & Sons, 1997.