

## FEM과 HGA의 조합을 이용한 외부 긴장재의 손실 긴장력 평가: II. 실험적 검증 및 현장적용

Evaluation on the Lost Prestressing Force of an External Tendon Using the  
Combination of FEM and HGA: II. Experimental Verification and Field Applications

장 한 택\*  
Jang, Hang-Teak

노 명 현\*\*  
Noh, Myung-Hyun

박규식\*\*\*  
Park, Kyu-Sik

박 대 효\*\*\*\*  
Park, Taehyo

### Abstract

This paper introduces an experimental verification and a field application of the proposed technique using the combination of FEM and HGA about the loss prestressing force of an external tendon by above same authors. The vibration tests have been conducted by using a laboratory models and the externally prestressed tendon at the field and the natural frequencies are extracted from the vibration tests. The proposed technique based on the extracted natural frequencies is applied. It is seen that the errors in the tension and lost prestressing force by proposed technique are about 4% from a laboratory model test. For the model verification at field, exact modeling has been made with Rayleigh damping. It is seen that the error in the tension by proposed technique is less than 1% and the estimated lost prestressing force converges less than the exact value.

### 요 지

본 논문은 이론으로 개발된 FEM과 HGA의 조합을 이용한 외부 긴장재의 손실 긴장력 평가에 대한 실험적 검증과 현장 적용에 대하여 소개한다. 외부 긴장된 텐던에 대한 모형실험과 현장실험을 통하여 진동 실험이 수행되었고, 진동실험으로부터 고유진동수를 획득하였다. 추출된 고유진동수를 기반으로 제안된 기법이 적용되었고, 모형실험으로부터 추정장력과 추정 긴장 손실량은 4%이내의 오차를 보여주었다. 또한 현장실험에서는 Rayleigh 댐핑이 고려된 현장 시스템에 대한 정확한 모델이 모사되었다. 제안된 기법을 적용하여 1%이내의 장력이 추정되었고, 추정된 긴장 손실량은 실제값보다 작은 값으로 수렴되었다.

**Keywords** : Hybrid genetic algorithm, System identification, Externally prestressed tendon, Tendon force, Rayleigh damping ratio

**핵심 용어** : 하이브리드 유전 알고리즘, 시스템 인식, 외부 긴장 텐던, 긴장력, 레일리 감쇠비

\* 정회원, 한양대학교 산업과학연구소 연구원

\*\* 정회원, 한양대학교 토목공학과 박사과정

\*\*\* 정회원, RIST 토목연구본부 선임연구원

\*\*\*\* 정회원, 한양대학교 토목공학과 교수, 교신저자

E-mail : cepark@hanyang.ac.kr 02-2220-0321

• 본 논문에 대한 토의를 2009년 10월 31일까지 학회로 보내주시면 2010년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

## 1. 서론

콘크리트 교량의 내하성능 및 보강성능을 효과적으로 향상시킬 수 있는 방법 중의 하나인 고강도 긴장재를 사용한 외부 긴장 공법은 부재 내부에 긴장재를 배치하여 설계시공하는 내부 긴장 공법에 비해 시공이 상대적으로 간편하여 최근 장경간화가 요구되는 신설교량과 노후화가 진행되어 보강이 요구되는 기존교량에 각광받고 있는 공법이다.

이 긴장공법은 고도의 긴장력을 순간적으로 도입하여 교량의 내하 및 보강성능을 향상시키는 데 매우 효과적인 것으로 알려져 있지만, 외부 긴장재가 온도 변화가 극심한 환경에 노출되어있거나, 긴장재의 정착부에 결함이 발생하여 긴장재 전체 구조가 미소한 변화가 생긴 경우, 최초 도입된 긴장력의 손실은 불가피하다. 또한, 긴장재 보호를 위해 주입하는 그라우트제가 쉬스관에 불충분하게 충전된 경우 공극이 발생하여 반복 하중작용에 따라 그라우트 파손이 야기되며, 외부 긴장재의 특성상, 이 부위로 수분침투가 허용되면 긴장재는 부식되어 불연속적인 강선 파단으로 긴장력 손실이 야기된다. 이러한 긴장력 손실에 대한 구체적 원인은 정밀진단 없이 정확하게 파악하기란 현실적으로 곤란하다. 그러나 본 논문의 주요 관심사는 긴장력 손실 원인이라기보다는 긴장재 결함 등이 원인이 되어 초래되는 손실 긴장력 그 자체이다. 긴장력 손실 원인에 대한 구체적인 정보 없이도 손실된 긴장력을 통해 간접적으로 긴장재에 대한 건전성을 평가할 수 있고, 이로부터 정밀진단 필요여부 등의 대책을 마련할 수 있기 때문이다.

본 논문은 긴장력 손실 여부를 비파괴적 방법으로 편리하게 평가하기 위한 방법으로, 계측된 고유 진동수를 기반으로 긴장재의 기하학적 형상과 모드 형상 확인을 통해 유한요소법(Finite Element Method, FEM)으로 모델링한 후, 향상된 시스템 인식(System Identification, SI)기법의 하나인 하이브리드 유전 알고리즘(Hybrid Genetic Algorithm, HGA)을 통해 긴장력을 반복적으로 추정해 가는 기법을 제안한다. 본 논문은 FEM과 HGA의 조합을 이용한 외부

긴장재의 손실 긴장력 평가의 이론 제안과 수치적 검증을 실험적 모델을 이용하여 검증하고, 현장 적용성을 평가하기 위한 것이다.

본 논문에서는 제안된 손실 긴장력 추정기법을 적용하기에 앞서 시스템 인식과정에서 역 절차의 목적함수의 기준값으로 사용되는 고유진동수를 추출하기 위한 임의가진 시험법의 특징을 간략히 소개하고, 계측된 시간이력 가속도 신호로부터 고유진동수를 추출하는 과정과 긴장재 시스템의 지점 모델링을 위해 확인하는 모드형상을 추출하는 과정을 간략히 소개한다. 또한, 제안기법을 실험적으로 검증하기 위하여 외부 긴장재에 대한 실험모델로부터 본 기법의 적용결과를 소개한다. 마지막으로 제안 기법의 현장 적용성 검증을 위하여 서해대교에서 직접 계측한 가속도 시간이력 자료로부터 손실 긴장력을 추정한 결과를 소개한다.

## 2. 본론

제안 기법은 현 상태의 긴장력을 포함하는 시스템의 인식변수 값을 반복적으로 추정해가는 역해석 기법으로 FE모델로부터 고유진동수를 계산하는 전향 절차(Forward Procedure)와 HGA를 통해 반복적으로 시스템을 인식해가는 역절차(Inverse Procedure)의 조합으로 구성된다. 본 논문에서는 역절차 과정의 목적함수 값을 계산하는 데 사용되는 고유진동수의 기준값을 시간이력 가속도의 분석을 통해 추출하는 과정과 FE모델의 지점 모델링을 위해 모드형상을 추출하는 과정을 간략히 설명한다. Fig. 1은 대상 긴장재에 대한 가속도 신호 계측 및 신호 분석 절차를 비롯하여 긴장재의 FE모델과 HGA를 조합하여 손실 긴장력을 평가하는 과정을 나타낸다.

### 2.1 계측 및 신호분석 절차

#### 2.1.1 임의가진 시험

목적함수 값 계산에 이용되는 고유진동수 기준값을 추출하기 위해 대상 긴장재 구조물의 가속도 시

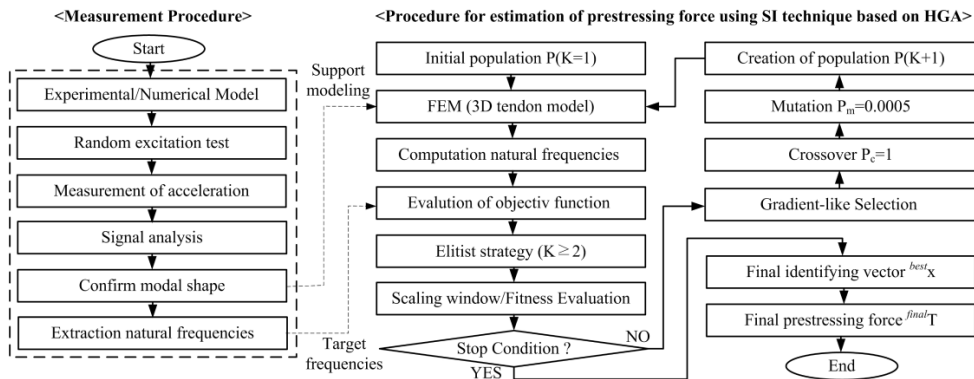


Fig. 1 A procedure for estimating the lost prestressing force using the proposed technique

간이력 신호가 계측되어야 한다. 고유진동수는 계측된 시간이력 가속도 신호를 FFT(Fast Fourier Transform)분석하면 쉽게 추출된다. 이때, 외부 긴장재의 시간이력 가속도는 외부 긴장재를 덮고 있는 쉬스관 부위에 가속도계를 부착하여 쉽게 계측할 있지만, 공용중인 교량 현장에서 긴장재에 가해지는 강제 가진력을 정량화하기란 용이치 않다. 따라서 본 연구에서는 입력정보를 배제한 출력 응답 신호만으로 고유진동수를 추출할 수 있는 임의가진(random excitation) 시험과 신호 분석기법을 계측 신호 분석에 적용한다. 임의가진 시험은 입력운동(시간, 크기와 위치)의 정보를 완전히 배제한 입력 가진을 인위적으로 도입한 후, 입력정보는 고려하지 않고 단지 출력신호에만 의존하여 동특성을 추출하는 시험이다.

### 2.1.2 고유진동수 추출

본 연구에서는 출력신호에만 의존하여 동특성 추출기법 중 PP(Pick-Picking)법을 사용하여 긴장재의 고유진동수를 추출하여 역 절차의 기준값으로 사용한다. 추출된 고유진동수를 토대로 각 고유진동수가 존재하는 주파수영역대의 모드형상을 Kim et al. (2005)이 제안한 TDD(Time Domain Decompostion)법을 활용하여 시간영역에서 직접 추출하고 모드형상의 단부를 확인한 후, FE모델의 지점모델링을 위한 정보로 사용된다.

PP법에서 고유진동수는 정규화된 PSD의 평균인 ANPSD(Averaged Normalized Power Spectral Density)의 첨두점을 찾아 결정한다. ANPSD는 기본적으로 계측된 임의의 진동 가속도 신호를 DFT(Discrete Fourier Transform)를 이용하여 주파수 영역으로 변환함으로써 획득된다. PP법은 추출된 고유진동수의 정확성이 이용된 주파수 분해능에 크게 의존하고 감쇠 추정 신뢰성이 떨어지지만, 비교적 간단하고 빠른 연산을 수행하여 고유진동수를 추출할 수 있기 때문에 외부 긴장재의 고유진동수 추출에 널리 적용되고 있다. 임의의 하중에 노출된 다자유도계에서  $i$ 번째 위치에서의 가속도 응답의 푸리에변환,  $\ddot{\mathbf{X}}_i(\omega)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\ddot{\mathbf{X}}_i(\omega) = \omega^2 \sum_{j=1}^n \Phi_{ij} \mathbf{Y}_j(\omega) \quad (1)$$

$\Phi_{ij}$ 는  $i$ 번째 위치의  $j$  모드형상,  $\mathbf{Y}_j(\omega)$ 는  $j$  모드의 구조계 모드응답의 푸리에변환을 나타낸다. 식 (1)로부터  $j$  모드의 고유진동수를 결정할 수 있다. 가속도계로부터 획득된 가속도 신호를 FFT 분석하여 PSD(Power Spectral Density)의 첨두점을 찾아 긴장재의  $j$  모드의 고유진동수( $\omega_j$ )를 추출한다. 다자유도계에서 모든 측정점의 PSD를 개별적으로 해석하는 데에 상당한 작업이 소요된다는 점과 가속도 응답 측정점이 특정 모드의 절점이 되거나 가까운 위치일 경우 PSD의 정점은 잘 나타나지 않

는다는 단점 때문에 다음과 같은  $l$ 개의 정규화된 PSD의 평균인 ANPSD(Average Normalized Power Spectral Density)를 사용하여 보다 정확한 고유진동수를 구하게 된다.

$$ANPSD(f_n) = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^l NPSD_i(f_n) \quad (2)$$

### 2.1.3 지점 모델링을 위한 모드형상 추출

모드형상(Mode shape)은 변형곡선의 기저(Basis)로 모드형상의 단부를 살펴보면 실험체의 경계조건 및 자유도를 확인할 수 있다. 즉, 외부 긴장재의 모드형상이 정현파를 이루는 경우 정착부 지점에서 회전 발생하여 힌지 지지단인 것으로 고려할 수 있다. 이를 토대로 본 논문의 긴장재 유한요소모델의 지점 가정조건을 결정할 수 있게 된다. 일반적으로 모드형상은 측정점간에 위상차를 갖기 때문에 다음과 같이 전달함수( $T$ ), 위상함수( $PW$ ), 코히런스함수( $CW$ )를 모두 고려한  $MRF$ (Modal Ration Function)를 사용하여 다음 식에 의해 추출한다.

$$MRF_{a,b}(f) = |T_{a,b}(f)|PW(f)CW(f) \quad (3)$$

그러나 식 (3)을 사용하는 경우 주파수 영역에서 전달함수, 위상함수, 코히런스함수를 계산하여 모드형상을 찾아야하므로 모드변수 추출과정이 번잡하다. 반면 FFT분석하여 PSD의 첨두점을 찾아 추출된 고유진동수를 기반으로 Kim et al.(2005)이 제안한 TDD기법을 이용하면 푸리에변환을 거치지 않고 시간영역에서 모드형상을 직접 추출할 수 있게 된다. TDD기법에 의한 모드형상 추출기법은 먼저, 디지털 대역통과 필터(digital band pass filter)를 이용하여 PP(Pick Picking)기법을 통해 추출한  $i$ 번째 고유진동수 값이 존재할 것으로 예상되는 주파수 영역대를 선택하고  $i$ 번째 진동수 성분만을 갖는 ( $p \times N$ ) 크기의 모드 격리 응답가속도 시간이력 데이터 행렬  $\mathbf{Y}_i$ 를 다음 식으로 계산한다.

$$\mathbf{Y}_i = \boldsymbol{\phi}_i \ddot{\mathbf{c}}_i^T + \sum_{j=1}^{p-1} \boldsymbol{\psi}_j \ddot{\mathbf{d}}_j^T \quad (4)$$

여기서  $p$ 와  $N$ 은 각각 가속도 센서와 시간샘플의 개수를 의미하고,  $\boldsymbol{\phi}_i = \{\phi_{1i}, \dots, \phi_{pi}\}^T$ 는 ( $p \times 1$ )의  $i$ 번째 모드형상벡터,  $\ddot{\mathbf{c}}_i = \{\ddot{c}_i(1), \dots, \ddot{c}_i(N)\}^T$ 는 ( $N \times 1$ )의 가속도 시간응답에 대한  $i$ 번째 모드 기여벡터,  $\boldsymbol{\psi}_j = \{\psi_{1j}, \dots, \psi_{pj}\}^T$ 는 ( $p \times 1$ )의  $j$ 번째 직교 노이즈 기저벡터,  $\ddot{\mathbf{d}}_j = \{\ddot{d}_j(1), \dots, \ddot{d}_j(N)\}^T$ 는 ( $N \times 1$ )의  $j$ 번째 노이즈 기여벡터를 의미한다. 다음으로  $i$ 번째 모드 격리 응답가속도 시간이력 데이터 행렬  $\mathbf{Y}_i$ 에 대한 ( $p \times p$ ) 크기의 에너지 상관행렬(energy cross-correlation matrix)  $\mathbf{E}_i$  즉, 가속도 센서 위치에서의  $i$ 번째 모드의 에너지 상관행렬은 다음과 같이 계산된다.

$$\mathbf{E}_i = \mathbf{Y}_i \mathbf{Y}_i^T \quad (5)$$

다음으로 계산된 에너지 상관행렬  $\mathbf{E}_i$ 의 특이치 재구성(Singular Value Decomposition, SVD)을 다음 식과 같이 수행한다.

$$\mathbf{E}_i = \mathbf{U} \boldsymbol{\Omega} \mathbf{U}^T \quad (6)$$

여기서  $\mathbf{U} = [\boldsymbol{\phi}_i, \boldsymbol{\psi}_1, \dots, \boldsymbol{\psi}_{p-1}]_{p \times p}$ 는  $\mathbf{Y}_i$ 의 특이치 벡터 행렬이고  $\boldsymbol{\Omega} = \text{diag}[q_i, \sigma_1, \dots, \sigma_{p-1}]_{p \times p}$ 는  $\mathbf{Y}_i$ 의 특이치 값을 나타내는 대각행렬을 의미한다. 따라서  $i$ 번째 모드형상은  $\mathbf{U}$ 의 첫 번째 모드 형상을 추출한 다음 행벡터를 통해서 얻을 수 있다.

$$\boldsymbol{\phi}_i = \{\phi_{1i}, \dots, \phi_{pi}\}^T \quad (7)$$

식(7)을 기하학적으로 도시한 후, 단부 형상을 관찰하여 대상 긴장재의 FE모델 지점조건을 가정한 다.

## 2.2 실험적 검증

### 2.2.1 실험 개요

FEM과 HGA를 조합한 외부 긴장재의 손실 긴장력 평가 기법을 실험적으로 검증하고자 Fig. 2와 같

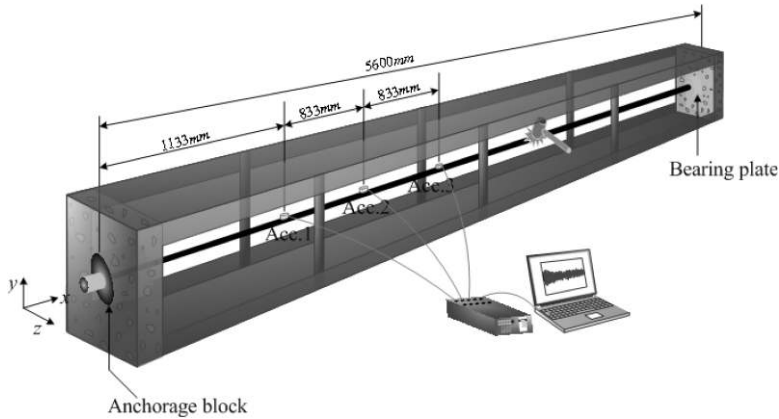


Fig. 2 The external tendon model and Random excitation test and location of accelerometer

은 외부긴장 실험체의 임의가진 시험을 수행하였다. 가속도 신호 계측을 위해 Fig. 2와 같이 총 3개의 가속도계와 데이터 수집기인 TML® DRA-30A가 사용되었다. 실험체는 대칭을 이루므로 3개의 가속도계가 중앙을 기점으로 긴장단 방향으로 차례로 설치되었다. 외부 긴장 실험체는 긴장단의 지압판으로부터 고정단의 지압판까지의 길이가 5.6m이므로 이를 긴장재의 유효길이라고 고려한다. 적용된 긴장재는 7×9 PC긴장재로 유효 공칭직경이 15.2mm이고, 피복을 포함한 경우 유효공칭직경은 15.7mm이다. 피복을 제외한 단위 길이당 질량은 1.18kg/m이고, 피복을 포함한 경우는 1.3kg/m이다. 가속도 신호를 얻기 위한 샘플링 빈도는 10msec로 가속도 데이터의 샘플 개수는 300sec 동안  $3 \times 10^4$ 개이다. 긴장재의 가진은 충격망치를 통해 임의의 위치에서 임의의 힘으로 가진하였지만, 가진신호는 수집되지 않는 임의가진 시험을 채택하였다. 임의가진 시험은 Table 1과 같이 긴장력 손실 유무에 따라 2회 수행되었다. 본 실험에서는, 외부 긴장재의 경우, 온도와 같은 환경의 영향, 부재의 구조적 결함 등 외부의 기하학적 영향, 긴장재 또는 그라우팅 재료의 결함 등 내부적인 영향으로 긴장력 손실이 불가피하게 발생할 수 있으므로 이에 대한 특성을 고려한 실험을 수행하였다. 본 실험에서는 내부적 결함이 원인이 되어 긴장력 손실이 발생한 상황을 모사하기 위해 실험체의 긴장단으로부터 약 550mm의 위치에 Y축 방향으로

Table 1 Summary of numerical experiment

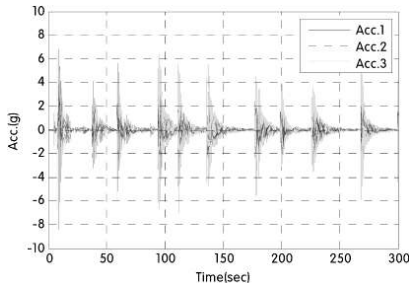
No. of test	Prestressing force ( $P$ )	Lost prestressing force ( $\Delta P$ )
RE-1	30.0 kN	0.0 kN
RE-2	27.5 kN	2.5 kN

Table 2 Extracted natural frequencies

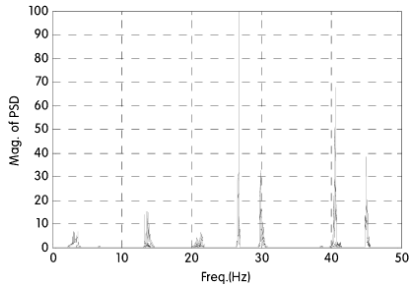
No. of test	Extracted natural frequencies ( $f_i^*$ ) (Hz)		
	1st	2nd	3rd
RE-1	13.583	27.334	41.421
RE-2	13.217	26.760	40.610

하나의 연선에 대하여 25%의 단면손실(깊이1.5mm, 폭1.0mm)을 인위적으로 부과한 후, 손실된 긴장력을 측정하고 이에 따른 긴장력 손실 원인은 알려지지 않은 것으로 간주하였다. 그 이유는 공용 중 긴장손실에 대한 구체적 원인은 정밀진단 없이 정확하게 파악할 수 없기 때문이다. 2가지 경우의 실험을 통해, 공용 중 예상치 못한 긴장력 손실이 발생한 경우에 대한 긴장력 평가가 수행되었다.

Fig. 3에 실험 RE-2 외부 긴장재 실험체에 대한 임의가진 시험으로부터 획득된 시간이력 가속도와 이로부터 구한 PSD가 제시된다(NFFT=8192, Hannig window). 또한, 계측된 가속도 데이터로부터 제안 기법의 역 절차의 목적함수의 기준값(선행논문 I. 이론, 식(37)  $f_i^*$ )으로 사용되는 고유진동수를 전술



(a) Acc. time history



(b) PSD

Fig. 3 Acceleration time history and Power spectral density

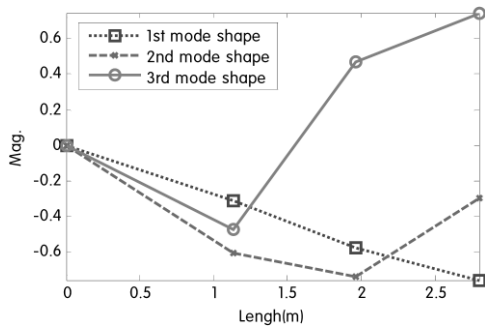


Fig. 4 Extracted modal shapes of the test model

한 PP법을 통해 추출한 결과가 Table 2에 제시되어 있다. 한편, 긴장재 FE모델의 경계조건을 결정하기 위해 TDD법을 통해 추출된 모드형상이 Fig. 4에 제시된다. 외부 긴장재의 모드형상이 정현파를 이루므로 경계조건(외부 긴장재의 정착부)은 회전이 발생함을 알 수 있으며 FE모델링 시 힌지 지지 단으로 고려할 수 있음이 확인된다.

외부 긴장 유한요소 모델변수 중 긴장력 변화에 민감한 영향을 미치는 시스템 인식변수를 다음과 같

이 3개가 선택된다.

$$\mathbf{x} = [x^1, x^2, x^3]^T = [P, d, m]^T \quad (8)$$

여기서,  $P$ 는 현 상태의 긴장력을 의미하며,  $d$ 는 긴장재의 유효직경을 의미하고,  $m$ 은 긴장재의 단위길이당 질량을 의미한다.

### 2.2.2 실험 결과 및 고찰

Table 3에 외부 긴장 실험의 인식변수벡터 성분들의 추정범위가 주어진다. 긴장력의 경우는 장력이 0kN인 경우, 동적해석이 가능하나 유효공칭직경은 0mm인 경우, 수치 해석상 오류가 발생되므로 1mm의 최소값을 부여한다. 한편, 유효질량의 경우 피복을 포함한 경우를 최대값으로, 피복이 포함되지 않은 값이 최소값으로 지정된다.

외부 긴장재 시험체에 대한 손실 긴장력 평가를 수행한 결과 200세대까지 진화 후 추정된 고유진동수 값이 Table 4에 제시된다. Table 5는 200세대 진화 후, 실험 RE-1과 RE-2에 대한 인식변수들의 최종 추정값과 추정오차를 나타낸다. 여기서 공칭직경의 경우 실질적으로 긴장력에 영향을 미치는 유효직경은 피복을 제외한 부분이기 때문에 15.2mm를 참값으로 고려한다.

긴장력 손실 유무에 상관없이 긴장력은 4% 이내

Table 3 True values and search ranges of identification parameters

$x_i$	True values	Search ranges
$x_1(P)$ kN	30.0 kN (RE-1) 27.5 kN (RE-2)	[0 50] kN
$x_2(d)$ mm	15.2 mm	[1 20] mm
$x_3(m)$ kg/m	1.3 kg/m	[1.18 1.3] kg/m

Table 4 Estimated frequencies (200 generations)

No. of test	Extracted natural frequencies ( $f_i^*$ ) (Hz)		
	1st	2nd	3rd
RE-1	13.5830	27.3880	41.4213
RE-2	13.2795	26.7607	40.6098

Table 5 Final identifying results of identification parameters (200 generations)

xi	RE-1	RE-2
$x_1$ (P) kN	29.39(-2.03)	26.47(-3.75)
$x_2$ (d) mm	14.99(-1.39)	15.16(-0.27)
$x_3$ (m) kg/m	1.27(-1.98)	1.20(-7.77)
$\Delta P$	0.6084(-)	3.5316(-)

( ) : error(%)  
- : none

의 추정오차로 정확히 수렴된다. 긴장력 손실이 발생한 RE-2는 긴장력 손실 원인은 정확히 알아내기는 어렵지만 손실 긴장력은 3.5316kN으로 추정되었다. 이 값은 예상된 손실력인 2.5kN 보다 1kN 더 큰 손실력으로, 이 차이는 실험과 수치모델사이의 모델오차 때문이거나 다른 원인에 의해서 긴장재에 손실이 더 발생했기 때문인 것으로 고려된다. 유효직경의 경우, 실험 RE-1과 RE-2는 모두 2%이내의 오차로 실제 실험체의 공칭 직경보다 작지만 유사한 값으로 추정되었다. 유효 공칭직경이 작게 추정되는 이유는 외부 긴장재 실험체의 경우 단면이 꼬아진 불충실단면이지만 유한요소해석 모델은 충실단면이 적용되기 때문이다. 따라서, 실제 실험체의 공칭 직경보다 유효 공칭직경이 작게 추정되는 것은 합리적인 결과로 볼 수 있다. 한편 유효질량의 경우는 RE-2의 경우에서 다소 작게 추정되었는데, 유효질량은 긴장력 손실과 상관없이 보존되어야 하므로, 유효질량에 큰 차이가 발생하면 진동특성이 크게 달라지는 현상이 수반된다. 하지만, 본 실험에서는 0.07kg/m의 작은 차이를 보이므로 추정되는 인식변수 값에 큰 영향을 미치지 않는다.

Fig. 5는 RE-2가 200세대 진화하는 동안 최적 목적함수 값과 평균 목적함수 값의 수렴 추이를 보여준다. 목표 목적함수 값은 0으로 지정되고, 가로축은 진화세대수를 세로축은 목적함수의 값을 나타낸다. 최적 목적함수 값은 RE-2의 경우 40세대 이후 목적함수 값이 목표값인 0에 근접한 수렴을 보인다. Fig. 6은 RE-2의 200세대 진화과정에서 시스템 인식변수들의 최종값으로의 수렴 추이를 나타낸다. 세대가 진화할수록 인식변수 값들이 대체로 안정적

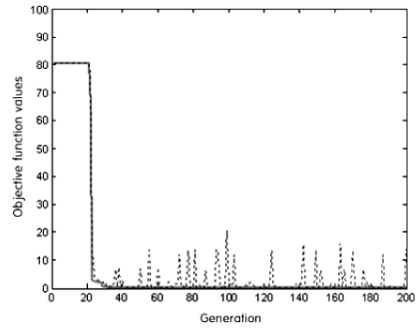


Fig. 5 The change of the objective function values due to each generation (NE-3)

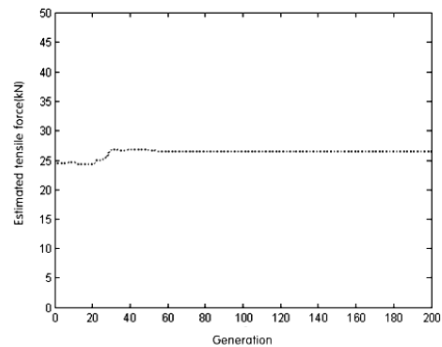


Fig. 6 The change of the estimated tensile force according to each generation (NE-3)

인 값으로 수렴되어짐을 알 수 있다.

이상의 외부 긴장재에 대한 실험연구부터 FEM과 HGA를 조합한 제안기법은, 여러 가지 원인에 의해 긴장손실이 발생할지라도 실제로 변화된 긴장재 장력을 정확히 추정해낼 수 있음이 실험적으로 입증되었다.

## 2.3 현장 적용성

### 2.3.1 실험 개요

본 절에서는 제안된 기법의 현장 적용성을 평가하기 위하여, 서해대교의 외부긴장 텐던을 대상으로 실험되었다. 서해대교는 총연장 7,310m, 폭원 31.41m, 주탑높이 182m의 PSM, FCM, 사장교로 구성된 복합교량으로서 서해안 고속도로 중 평택시와 송악면

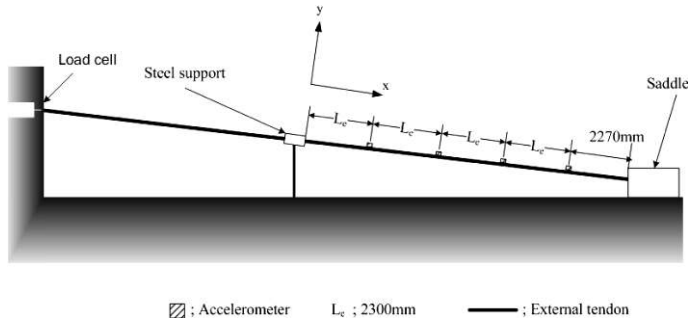


Fig. 7 The external tendon of Seohae Bridge

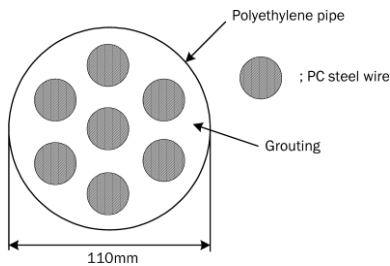


Fig. 8 The inner part of external tendon



Photo 1 The picture of field test(Seohae Bridge)

을 연결한다. 현장실험은 서해대교 PSM 교량구간 중 서울방향 Pier 53번을 대상으로 2008년 3월 4일 수행되었다. Photo 1은 현장실험 전경을 제시한다.

총 4개의 TML®제품 ARF\_A 가속도계와 데이터 수집기 TML® 제품 DRA-30A가 사용되었고, 샘플링 빈도는 10msec로 600초 동안  $6 \times 10^4$ 개의 가속도 샘플이 수집되었다.

진동실험의 대상이 되는 외부긴장된 텐던의 종단 면도와 텐던의 단면이 Fig. 7, 8에 각각 제시된다. 현장실험의 실험체 제원은 Fig. 7과 같다. 대상 실

험체는 좌측은 강제기동에 의해, 우측은 세들에 의해 각각 고정된다.

대상 외부긴장 텐던의 피복은 대립폴리에틸렌 110호로 밀도는  $0.953\text{kg/m}^3$ 을 갖고, 공칭직경은 110mm이고 두께는 5.3mm이다. 폴리에틸렌관 내부는 (주)고려제강에서 생산된 공칭직경 15.7mm, 단위길이당 질량  $1.30\text{kg/m}$ 인 PC강연선 7본이 설치되었고, 강연선을 제외한 부분은 그라우팅(Grouting)되어있다.

텐던의 가진은 PCB Piezotronics의 모델 086C42 충격망치를 이용하여 임의 가진(Random excitation)되었고, 가진신호는 수집되지 않았다.

현장 실험의 인식변수는 선행논문(I.이론) 식 (36)과 같다.

여기서, 레일리 감쇠 계수를 인식변수로 선택한 이유는 현장 시스템에 대한 정확한 모델을 모사하고자 함이다.

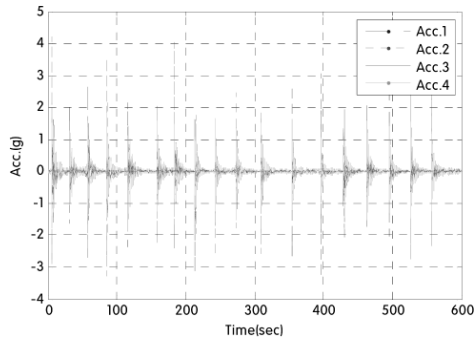
### 2.3.2 실험 결과 및 고찰

현장 실험체의 Y축 방향에 대하여 가속도 센서로부터 획득된 시간이력 가속도를 Fig. 9(a)와 같이 제시된다. 또한 Fig. 9(b)는 PSD(Power Spectral Density)가 제시된다(NFFT=4096, Hannig window).

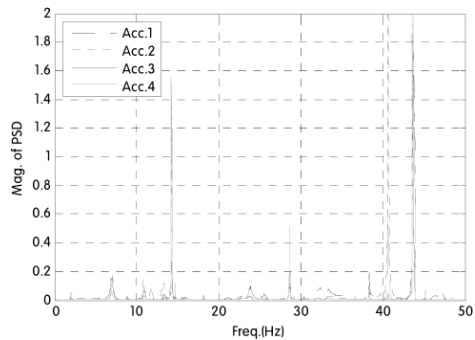
Fig. 10(b)로부터 PP(Pick-Picking)기법을 이용하여 Table 6과 같이 4차까지의 고유진동수가 추출되었다.

추출된 고유진동수를 기반으로 TDD(Time Domain Decomposition)을 이용하여 Fig. 10과 같은 각 모드





(a) Acc. time history



(b) PSD

Fig. 9 Acceleration time history and Power spectral density (y axis)

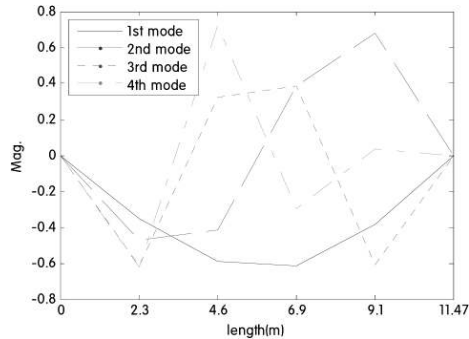


Fig. 10 Extracted modal shapes of the field test (y axis)

에 대한 모드형상이 획득되었다(Kim et al., 2005). 모드형상이 정현파를 이루고 세들(Saddle)과 강제기 등에서 회전각이 발생됨이 확인되었다. 이는 FE모델의 지점 적용시 양단 힌지단으로 가정되어야 함을 의미한다.

Table 6 Extracted and Estimated(1000 eneration) natural frequencies about the field test

No. of test	Extracted	Estimated	Error
	natural frequencies ( $f_i^*$ ) (Hz)		%
1st	6.95	5.80	16.547
2nd	14.31	15.17	-6.010
3rd	28.68	28.75	-0.244
4th	43.67	43.75	-0.183

Table 7 The search ranges of identification parameters

xi	Search ranges
$x_1(P)$ kN	[250 314.14] kN
$x_2(d)$ mm	[100 120] mm
$x_3(m)$ kg/m	[9.10 24.03] kg/m
$x_4(\alpha)$ sec <sup>-1</sup>	[0 5]
$x_5(\beta)$ sec	[10 <sup>-5</sup> 10 <sup>-1</sup> ]

Table 7에서 서해 대교 현장 실험의 인식변수백터 성분들의 추정범위가 제시된다. 긴장력의 경우는 로드셀에 의해 측정된 2007년 3월 장력의 평균값(314.14kN)을 최대치로 하였고, 유효공칭직경의 경우 육안으로 확인되는 직경(110mm)의 ±10mm가 범위로 부여되었다. 또한 유효질량의 경우, 총실 단면인 경우(240.034kg/m)에서부터 그라우팅이 불충분한 경우(PC강연선 7개의 단위길이당 질량)까지가 범위로 지정된다.

Fig. 11은 HGA 1000세대까지의 최적 목적함수값과 평균 목적함수값의 수렴 추이가 제시된다. 목표 목적함수 값은 0으로 지정되었고, 가로축은 진화세대를 세로축은 목적함수의 값을 나타내고, 식(9)는 사용된 목적함수를 제시한다.

$$\text{minimize} \left( Q = - \sum_{i=1}^m \text{ABS}((f_i^*)^2 - (f_i^d(\mathbf{x}))^2) \right) \quad (9)$$

최적 목적함수 값은 108세대 이후 안정된 값을 갖고, HGA 종료 이후 최적 목적함수의 값은 3.95이다. 세대가 증가함에 따라 목적함수의 값이 목표값인 0으로 수렴됨을 Fig. 11로부터 확인된다. HGA 1000세대 이후의 추정 고유진동수를 Table 6에서

제시된다.

Fig. 12에서는 인식변수들의 세대별 수렴 추이가 제시된다. 이때 가로축은 진화세대를 세로축은 인식

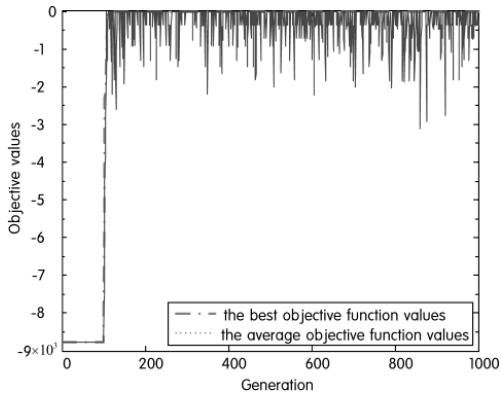
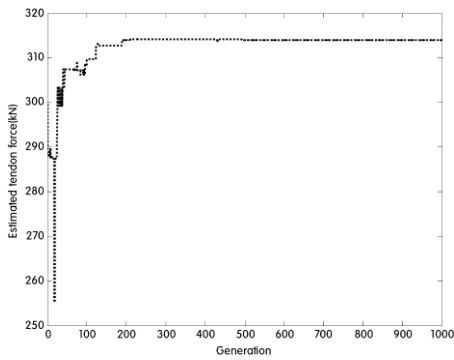
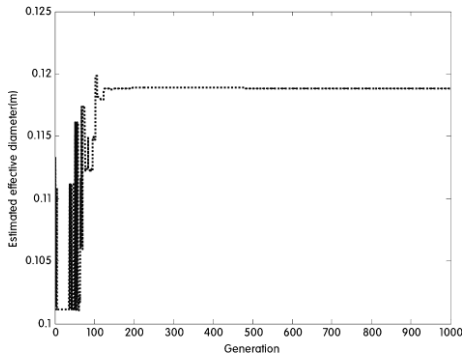


Fig. 11 The change of the objective function values due to each generation (Field Test)

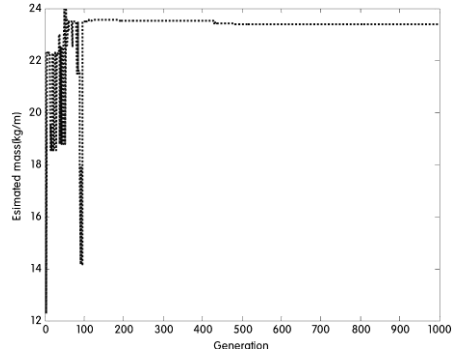


(a) The change of the estimated values of tension

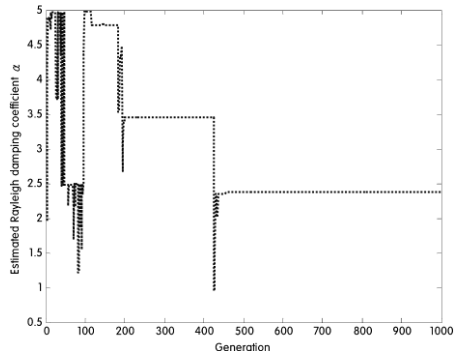


(b) The change of the estimated values of effective diameter

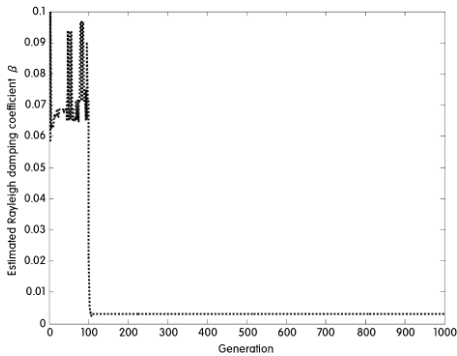
변수의 각 인식변수의 추정값이 제시된다. Fig. 12 (a)는 추정장력의 변화가 제시되고, 314세대 이후



(c) The change of the estimated values of mass



(d) The change of the estimated values of Rayleigh damping coefficient  $\alpha$



(e) The change of the estimated values of Rayleigh damping coefficient  $\beta$

Fig. 12 The change of the estimated values of identification parameters according to each generation (field test)

안정된 값으로 수렴이 제시된다. (b)의 경우, 추정 유효직경의 변화가 제시되고, 135세대 이후 수렴된다. (c)의 경우, 추정 단위길이당 질량의 변화가 제시되고, 119세대 이후 빠른 수렴이 진행된다. (d), (e)의 경우, 추정 Rayleigh 댐핑 계수  $\alpha$ ,  $\beta$ 의 변화 추이가 제시된다.  $\alpha$ 의 경우 464세대 이후,  $\beta$ 의 경우 107세대 이후 안정된 수렴을 보인다.

Table 8에서는 HGA 1000세대 수행 후의 최종 인식변수의 값이 제시된다. 1000세대 수행 후의 추정 고유진동수와 추출된 고유진동수와의 추정오차가 Table 6에서 정리되었다. 추정장력의 경우 313.989 kN으로, 현장실험 당시(2008년 3월 4일)의 로드셀로부터 계측된 장력(312.69kN)과의 오차가 -0.415 %를 보인다.

추정 유효공칭 직경의 경우, 폴리에틸렌관의 공칭 직경인 110mm보다 큰 값에서 수렴되었고, 추정 단위길이당 질량의 경우, 그라우팅에 의해 완전 충전된 경우(24.034kg/m) 보다 작은 값으로 수렴된다. 그러나 유효공칭직경과 단위길이당 질량의 경우, 정확해가 미지의 값이기 때문에 추정오차는 제시되지 않았다.

Table 9에서는 현장실험을 통해 제안된 기법을 적용하여 추정된 손실 긴장력이 정리 되었다. 실제 1년간 손실 긴장력은 1.442kN이었으나, 추정 손실

Table 8 Final identifying results of identification parameters (1000 generations)

xi	Field Test	Error(%)
$x_1(P)$ kN	313.969	-0.415
$x_2(d)$ mm	118.80	-
$x_3(m)$ kg/m	23.389	-
$x_4(\alpha)$ sec <sup>-1</sup>	2.380	-
$x_5(\beta)$ sec	0.0031	-

- : none

Table 9 Summary of field test

test	Prestressing force (P)	Estimated Lost prestressing force ( $\Delta P$ )	Exact Lost prestressing force ( $\Delta P$ )
FE	314.14 kN	0.151 kN	1.442kN

긴장력은 0.151kN으로 1kN 이상의 차이를 보인다. 이는 현장실험체와 수치모델 사이의 모델오차 때문으로 고려된다.

시스템의 감쇠 행렬은 질량행렬과 강성행렬의 일차결합으로 표현되는 Rayleigh 감쇠행렬을 이용한다(선행논문 I.이론, 식 (6)).

선행논문(I.이론)의 식(6)과 식 (10)을 이용하여 Rayleigh 감쇠비 곡선과 각 모드의 추정 감쇠비가 계산되어 Fig. 14와 같이 제시된다. Fig. 13에서  $\xi_1$ ,  $\xi_2$ 는 식 (10)의  $\frac{\alpha}{2} \frac{1}{\omega_n}$  과  $\frac{\beta}{2} \omega_n$ 을 각각 의미한다. 추정된 각 모드의 감쇠비는 Table 10과 같이 정리된다.

$$\xi_n = \frac{\alpha}{2} \frac{1}{\omega_n} + \frac{\beta}{2} \omega_n \quad (10)$$

여기서  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 레일리 감쇠계수를 나타낸다.  $n$ 은 모드의 차수를 의미하고,  $\omega_n$ 은  $n$ 차 모드의 고유진동수를 의미한다.

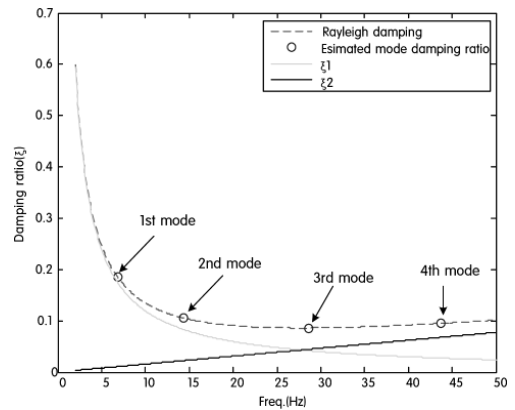


Fig. 13 Estimated Rayleigh damping ratio

Table 10 Estimated Rayleigh damping ratio for each mode

No. of mode	Damping ratio(%)
1	18.43
2	10.53
3	8.59
4	9.49

본 연구에서 추정된 현장 외부긴장 텐던의 감쇠비는 노명현 등(2009;2008)에 의해 추정된 축소모형에서 추정된 감쇠비와 비교할 때 큰 값을 갖는다. 이는 축소모형에서 현장실험으로의 시스템 확장으로, 축소모형에서는 고려되지 않았던 텐던 내부의 Grouting의 효과로 인한 감쇠비의 증가로 추정된다.

### 3. 결론

본 논문은 선행연구의 후속연구로 유한요소모델과 하이브리드 유전알고리즘이 조합된 손실 긴장력 평가기법을 이용하여 실내실험과 현장실험을 통하여 정확성과 적용성 검증을 위한 실험이 수행되었다.

실내실험을 위하여 실험체가 제작되었고, 실험체의부터 임의 가진 진동실험이 수행되었다. 진동실험으로부터 고유진동수가 획득되었고, 추출된 고유진동수로부터 TDD기법을 이용하여 모드형상이 획득되었다. 획득된 모드형상으로부터 지점조건이 확인되었고, 자체 코딩된 FE모델에 지점조건을 적용하였다. HGA를 200세대 수행되었고, FEM과 HGA를 조합한 제안기법은 여러 원인에 의한 긴장력 손실에도 4%이내의 정확한 장력이 추정되었다.

또한 현장실험을 통하여 제안된 기법의 적용성을 검증하였다. 실제 공용중인 서해대교 중 PSM교량 구간의 외부긴장된 텐던을 대상으로 현장실험이 진행되었고, 현장 실험의 정확한 모사를 위하여 인식변수가 확장되었다. 인식변수는 장력, 유효공칭직경, 단위길이당 질량과 Rayleigh 감쇠계수가 포함된다. 감쇠비까지 고려된 모델을 통하여 HGA를 1000세대 수행되었고, 추정된 긴장력은 -0.415%의 추정 오차를 보이며 정확히 추정되었다. 그러나 손실 긴장력 추정의 경우, 로드셀로부터 측정된 손실량에 비하여 큰 값으로 추정되는데, 이는 현장실험체와 유한요소 모델 사이의 모델 오차로 보인다.

모형실험과 현장실험을 통하여, 본 논문에서 제안된 하이브리드 유전 알고리즘과 유한요소모델을 이용한 외부긴장텐던에 대한 시스템 인식기법의 적용성과 정확성이 검증되었다. 또한 제안된 기법은 기

존 유전알고리즘의 문제점인 계산 효율성을 높였고, 제한된 사전정보로부터 정확한 긴장력이 평가될 수 있음이 확인되었다.

### 감사의 글

본 논문의 연구는 “건설핵심기술연구사업(06 건설 핵심 D20)”의 일환으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

### 참고문헌

1. 노명현, 장한택, 이상열, 박대효, 차분 진화 알고리즘 기반의 SI기법을 이용한 외부 긴장된 텐던의 장력추정, 대한토목학회, 제 29권, 제1A호, 2009, pp.9-18.
2. 노명현, 이상열, 박대효, hGA와 FEM을 조합한 외부 비부착 긴장재의 장력 평가기법, 대한토목학회 학술 발표회 논문집, 2008, pp. 307-310.
3. 장한택, 김병화, 박대효, 시스템 인식기법을 이용한 케이블의 장력추정: III. 실험적 검증, 대한토목학회, 제 28권, 제2-A호, 2008, pp. 215-222.
4. Chopra, A.K., Dynamics of Structures : Theory and Applications to Earthquake Engineering . Prentice Hall; Englewood Cliffs, New Jersey, 2007, pp.455-458.
5. Kim, B.H., and Park, T., Estimation of cable tension force using the frequency-based system identification method, Journal of Sound and Vibration, Vol.304, No.3-5, 2007, pp. 660-676.
6. Kim, B.H., Stubbs, N., and Park, T., A new method to extract modal parameters using output-only responses, Journal of Sound and Vibration, Vol.282, No.1-2, 2005, pp. 215-230.

(접수일자 : 2009년 4월 3일)

(1차수정일자 : 2009년 7월 30일)

(심사완료일자 : 2009년 8월 5일)