

# 유전자 알고리즘을 이용한 모드기반 교량의 해석모델개선

## Modal based Structural Model Modification Using Genetic Algorithm

윤정방\*

Yun, Chung-Bang

이진학†

Yi, Jin-Hak

이종재\*\*

Lee, Jong-Jae

이정석\*\*\*

Lee, Jung-Seok

전귀현\*\*\*\*

Juhn, Gui-Hyun

(논문접수일 : 2004년 6월 24일 ; 심사종료일 : 2004년 11월 29일)

### 요지

이 연구에서는 교량의 모드자료를 이용한 구조해석모델의 개선에 관하여 연구하였다. 교량의 초기해석모델은 도면 및 현장조사결과를 바탕으로 작성되므로, 시간에 따라 손실된 강성의 영향 및 경계조건 등을 합리적으로 반영하기 어려우며, 따라서 구조물에 대한 정직 혹은 동적실험을 수행하고, 그 결과를 반영하여 해석모델을 개선하는 것이 바람직하다. 이 연구에서는 구조물의 고유주파수 및 모드형상 등의 모드특성을 바탕으로 추계론적 최적화 기법인 유전자 알고리즘을 이용하여 해석모델을 개선하고자 하였다. 임진강교 및 행주대교에 대한 동적실험 자료를 이용하여 교량의 모드특성을 추정하였으며, 추정된 모드특성을 바탕으로 유전자 알고리즘을 이용하여 수치해석모델을 개선하였다. 개선된 모델을 사용하여 해석한 결과, 초기해석모델에 의한 해석결과보다 실험으로 추정한 모드특성에 가까움을 확인하였고, 이로부터 개선모델의 합리성을 검증하였다.

**핵심용어 :** 유전자 알고리즘, 해석모델개선, 모드계수추정

### Abstract

This study presents the structural model modification based on the modal data such as natural frequencies and mode shapes. Preliminary structural model can be obtained using design drawings and field measurement, and therefore the deteriorated stiffness of a structure and the effect of the boundary conditions are difficult to be evaluated in preliminary analysis model, and the preliminary model can be modified using structural response data including static and/or dynamic characteristics. In this study, the structural model is modified based on the structural modal data using genetic algorithm. Modal testing were carried out for Imjin River Bridge and Hangjoo Bridge, the modal properties were estimated using modal identification techniques, and finally the structural models were updated using genetic algorithm. The modified structural model could give us more reliable structural analysis results and therefore those can be used for structural performance evaluation such as load carrying capacity and seismic capacity.

**keywords :** *genetic algorithm, structural model modification, modal identification*

### 1. 서 론

진동기반 건전성 모니터링 시스템은 대형구조물에 대한 경제적인 안전성 평가를 위하여 매우 효과적으로 이용될 수 있다. 이러한 건전성 모니터링은 신호기반방법과 모델

기반방법으로 크게 나누어 생각할 수 있는데, 신호기반방법의 경우 탄성파, 초음파, 레이더 계측등 구조물의 국부적인 응답을 계측하고, 구조손상에 의하여 계측신호에 어떠한 형태의 변화가 발생하는 경우, 이러한 경향을 평가하여 부재의 이상유무를 감시하는 방법이며, 모델기반

\* 책임저자, 정회원 · 한국과학기술원 스마트사회기반시설연구센터  
연구조교수  
전화: 042-869-8293 ; Fax: 042-869-8290  
E-mail: yijh@kaist.ac.kr

\*\* 정회원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 교수  
\*\*\* Univ.of California, Irvine 박사후 연구원

\*\*\*\* 한국시설안전기술공단 연구개발팀 차장  
\*\*\*\*\* 한국시설안전기술공단 연구개발팀 실장

• 이 논문에 대한 토론을 2005년 3월 31일까지 본 학회에 보내주시면 2005년 6월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

방법의 경우 구조물의 모드특성, 정적변위 등을 계측 또는 추정한 후, 그 결과를 해석모델의 결과와 비교함으로써, 현재 구조물의 상태를 평가할 수 있는 방법이다. 전자의 신호기반 방법의 경우, 해석적으로 응답신호를 분석하기 어려운 경우에 해석모델 없이 기존의 신호의 경향만으로 평가를 하기 때문에, 센서를 설치하고 난 이후부터 모니터링을 수행할 수 있으며, 후자의 모델기반 방법의 경우, 신뢰성 있는 해석모델을 구축하였다면 해석모델로부터 구한 응답 특성과 계측값을 비교함으로써, 간접적으로 구조물의 내하성능, 내진성능 등을 평가할 수 있게 된다. 이 연구에서는 모델기반 구조물의 성능 평가와 관련하여 매우 중요한 절차인 신뢰성 있는 해석모델의 구축에 관한 연구를 수행하였다. 신뢰성 높은 구조해석모델을 구축하기 위해서는 구조물의 응답을 계측하여, 그 결과와 구조모델의 해석결과가 일치하도록 하는 것이 필요하며, 이러한 과정을 해석모델개선(model updating), 구조수정(structural modification), 또는 모델검증(model validation) 등으로 부르고 있다. 이러한 방법은 구조계 규명기법(structural identification)의 한 적용분야가 되며, 이러한 구조모델개선을 위하여 다양한 최적화 기법이 적용할 수 있다. 기존에는 주로 민감도를 이용한 최적화 기법이 많이 사용되었으나, 최근에는 유전자 알고리즘(genetic algorithm),<sup>1)~3)</sup> 시뮬레이티드 어닐링(simulated annealing)<sup>4),5)</sup>과 같이 추계론적 최적화 기법(stochastic optimization)의 적용이 증가하고 있다. 민감도기법의 경우, 정해진 경로를 통하여 최적해를 구하기 때문에 항상 같은 해를 구할 수 있지만, 추계론적인 최적화 기법은 탐색 도중 해가 개선될 수 있는 가능성을 평가하고, 확률을 고려하여 무작위로 탐색하기 때문에, 중간 탐색경로가 달라질 수 있다. 그러나 국부해가 많은 문제에서는 민감도법과 같은 해석적 방법보다 유전자 알고리즘과 같은 추계론적인 방법이 보다 효율적인 것으로 알려져 있다. 일반적으로 이러한 방법이 계산상의 효율면에서는 민감도에 근거한 방법보다 불리한 면이 있으나, 최근 급속히 발전하고 있는 전산기의 계산속도 개선으로 인하여 계산상에 있어서의 단점은 상당히 극복되고 있다고 할 수 있다. 또한 유전자 알고리즘은 민감도 분석을 수행하지 않으므로 기존의 SAP2000와 같은 상용프로그램을 이용하여 쉽게 수치해석모델을 개선할 수 있는 장점이 있다. 이 연구에서는 이러한 추계론적 최적화 기법의 대표적인 기법이라 할 수 있는 유전자 알고리즘을 이용하여 임진강교와 행주대교에 대한 해석모델을 개선하였다.

이전까지 유전자 알고리즘은 주로 구조물의 최적설계를

위하여 이용되어져 왔다. Manoharan and Shamuganathan<sup>6)</sup>는 트러스 구조물에 대한 최적화를 위하여 유전자 알고리즘을 적용하였으며, Hadi and Arfiadi<sup>7)</sup>은 포장설계를 위하여, Kim and Ghaboussi<sup>8)</sup>는 제어기 설계를 위하여 유전자 알고리즘을 적용한 바 있다. 한편, 구조계수 추정 및 손상추정을 위한 최적화 기법의 적용과 관련하여 Chou and Ghabassi<sup>9)</sup> 그리고 Mares and Surace<sup>10)</sup>등은 이진형 유전자 알고리즘을 손상추정에 적용한 바 있다. 비록, 이진형 유전자 알고리즘이 토목공학의 구조 문제를 해결하기 위하여 성공적으로 적용되어 왔지만, 이러한 이진형 유전자 알고리즘이 실수 문제를 주로 다루게 되는 상황에서 개선의 여지가 있으며, 최근에는 이러한 실수형 문제에 대하여 효율성을 높이기 위하여 실수형 유전자 알고리즘이 개발, 적용되고 있다.<sup>11),2)</sup> 이 연구에서도 이진형 유전자 알고리즘이 아닌 실수형 유전자 알고리즘을 이용하여 수치해석모델을 개선하였다.

교량 구조물의 수치해석모델 개선을 위하여 임진강교와 행주대교의 진동계측 결과를 이용하여, 구조물의 모드계수를 주파수응답함수와 추계론적 부공간 규명법을 이용하여 추정하였고, 추정된 교량의 모드특성을 이용하여 실수형 유전자 알고리즘으로부터 해석모델을 개선하였으며, 개선 모델에 의한 해석결과가 초기해석모델에 의한 해석결과보다 계측값에 더 잘 일치하고 있음을 보였으며, 이로부터 개선된 모델의 합리성을 간접적으로 제시하였다. 이러한 연구를 통하여 합리적으로 추정된 교량의 해석모델은 추후 내하성능 및 내진성능 등 교량의 성능평가에 매우 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 동특성 추정기법

#### 2.1.1 주파수응답함수 방법

충격시험에 의한 모드계수 추정을 위하여 입력 하중인 충격신호와 구조물의 응답인 가속도신호를 이용하여, 각 계측지점에서의 주파수응답함수(Frequency Response Function, FRF)를 구한 후, 이로부터 구조물의 모드를 추정할 수 있는데, 그 대상구조물이 교량, 빌딩과 같은 대형구조물의 경우 몇 가지 단점이 있다. 우선, 충격시험과 같은 강제진동실험의 경우 여러 번의 반복실험을 수행하게 되는데, 이러한 다수의 계측기록으로부터 각각의 주파수응답함수를 분석하는 것은 상당히 번거로운 일이며, 몇몇 계측지점은 특정 모드에 대해 가진이 되지 않을 수도 있으므로

이 지점의 주파수응답함수를 이용하여 유용한 정보를 얻기는 힘들다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 이 연구에서는 Felber and Cantieni<sup>11)</sup>가 사용한 ANPSD(averaged normalized power spectral density)의 개념을 FRF에 도입하여, 다음 식 (1)과 같이 ANFRF(averaged normalized frequency response function)를 정의하여 모드를 추정하는데 활용하였다.<sup>12)</sup>

$$ANFRF = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{FRF_i}{A_i} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{FRF_i}{\text{Area of } FRF_i} \quad (1)$$

여기서,  $FRF_i$ 는  $i$  번째 실험으로부터 구한 FRF이며,  $A_i$ 는  $FRF_i$ 의 총면적, 그리고  $N$ 은 충격시험의 반복횟수이다. ANFRF는 여러 번의 충격시험으로부터 구한 각각의 FRF를 해당되는 주파수 영역에 대하여 면적으로 나눈 후, 각각의 FRF의 평균을 취하는 것으로 간단히 이해할 수 있고, 이러한 방법을 사용함으로써 쉽게 대형구조물의 모드를 추정할 수 있다.

### 2.1.2 추계론적 부공간 규명법

추계론적 부공간 규명법(Stochastic Subspace Identification, SSI)은 응답값의 상관행렬을 요소로 가지는 블록 행렬행렬을 특이치분해(Singular Value Decomposition, SVD)함으로써 모드계수를 추정하는 방법으로, Overschee and De Moor<sup>13)</sup>에 의하여 소개된 후로 Peeters and De Roeck,<sup>14)</sup> Hermans and Van Der Auweraer<sup>15)</sup> 등에 의하여 대형구조물의 상시진동계측결과를 이용한 모드계수 추정에 효과적으로 이용된 바 있으며, 최근 많이 이용되고 있는 시간영역 모드계수 추정기법의 하나이다. 이는 다음의 식 (2)와 같이 하중을 랜덤정규분포하중으로 고려한 경우의 이산상태방정식으로부터, 식 (3)과 같이 상호상관행렬( $R(k)$ )을 구하면 결과적으로 상호상관행렬이 시스템행렬인  $A$ ,  $C$ ,  $G$ 로 표현됨을 알 수 있다. 따라서, 식 (4)와 같이 상호상관행렬을 요소로 갖는 블록 행렬행렬을 구성하면, 이는 마지막 등호관계와 같이 가관측성 행렬(observability matrix)과 확장 가제어성 행렬(extended controllability matrix)로 분해할 수 있음을 알 수 있고, 이는 식 (5)에서와 같이 행렬을 Q-R 분해함으로써 이들 행렬을 구할 수 있게 된다.

$$\begin{aligned} z(k+1) &= Az(k) + w(k) \\ y(k) &= Cz(k) + v(k) \end{aligned} \quad (2)$$

$$R(k) = E[y(k+m)y(m)^T] = CA^{k+1}E[z(m+1)z(m)^T] = CA^{k+1}G \quad (3)$$

$$\begin{aligned} H_{n_1, n_2} &= \begin{bmatrix} R_1 & \cdots & R_{n_2} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{n_1} & \cdots & R_{n_1+n_2-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} CG & \cdots & CA^{n_2-1}G \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ CA^{n_1-1}G & \cdots & CA^{n_1+n_2-2}G \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} C \\ \vdots \\ CA^{n_1-1} \end{bmatrix} [G \quad \cdots \quad A^{n_2-1}G] = O_{n_1} C_{n_2}^{ext} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} H_{n_1, n_2} &= [U_1 \quad U_2] \begin{bmatrix} \Sigma_1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^T \\ V_2^T \end{bmatrix} \approx U_1 \Sigma_1 V_1^T \Leftrightarrow O_{n_1} C_{n_2}^{ext} \\ \therefore O_{n_1} &= U_1 \Sigma_1^{1/2} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서,  $A$ ,  $C$ 는 시스템행렬이며,  $z$ 는 상태벡터,  $y$ 는 계측벡터이다.  $G \triangleq E[z(m+1)y(m)^T]$ 이며,  $w(k)$ 와  $v(k)$ 는 각각 서로 상관관계가 없는 랜덤 정규분포 하중벡터와 관측변수에 대한 노이즈벡터이다. 그리고,  $n_1$ ,  $n_2$ 는 모드추정에 사용된  $R$ 행렬의 개수를 의미한다. 또한, 가관측성행렬( $O_{n_1}$ )과 확장 가제어성 행렬( $C_{n_2}^{ext}$ )은 각각  $O_{n_1} \triangleq [C^T \cdots : (C, A^{n_1-1})^T]^T C_{n_2}^{ext} \triangleq [G \quad \cdots \quad A^{n_2-1}G]$ 과 같다. 최종적으로, 가관측성 행렬로부터 시스템 행렬  $A$ ,  $C$ 를 구할 수 있고, 구조물의 모드계수는 시스템 행렬  $A$ 를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} A\Psi &= M\Psi \quad (M = diag(\mu_1, \dots, \mu_N)) \\ \text{and } \Psi &= [\psi_1 \quad \cdots \quad \psi_N] \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \lambda_k &= \frac{1}{\Delta t} \ln \mu_k, \quad \xi_k = -\operatorname{Re}(\lambda_k) / |\lambda_k| \\ \omega_k &= -\operatorname{Im}(\lambda_k) / \sqrt{1 - \xi_k^2}, \quad \Phi_k = C\Psi_k \end{aligned} \quad (7)$$

여기서,  $\lambda_k$ ,  $\omega_k$ ,  $\xi_k$ ,  $\Phi_k$ 는 각각 구조물의  $k$  번째 모드의 고유치, 고유진동수, 모드감쇠비 및 모드형상이다.

## 2.2 수치해석모델 개선을 위한 실수형 유전자 알고리즘

유전자 알고리즘(Genetic Algorithm, GA)은 자연진화와 자연유전의 메카니즘을 공학문제에 적용한 것으로써, 가장 큰 특징은 하나의 탐색경로를 가지는 것이 아닌 동시에 여러 탐색경로를 거쳐 최적해를 구한다는 점이다. 이는 하나의 해를 탐색하는 데 사용되는 개체를 복수로 사용함으로써 가능하며, 이 때 사용되는 여러 개의 개체 특성 중 우수한 성질을 유전시킴으로써, 최적해에 도달하도록 하는 방법이다. 유전자 알고리즘에서 흔히 사용되는 방법은 이

진문자열을 이용하는 것으로 0 또는 1로 표현된 하나의 정보를 유전자로 하여, 이러한 이진문자열을 실수형으로 변화하기 위하여 십진코드(decimal coding) 또는 그레이 코딩(gray coding)을 이용한다. 비록 이진형 유전자 알고리즘이 실수형 문제에도 적용되고 있지만, 최적해 부근에서의 국부적인 탐색성능이 저하되는 단점이 지적되어 왔다. 따라서, 이러한 이진형 유전자 알고리즘의 단점을 극복하기 위하여 실수형 유전자 알고리즘이 제안되었는데, 이러한 실수형 유전자 알고리즘에서는 유전자의 개념이 사라지고, 하나의 물리량을 나타내는 염색체가 최소 단위가 된다. 실수형 유전자 알고리즘은 교배(crossover)와 돌연변이(mutation)등 유전자 단위에서의 작동을 제외하고는 기본 유전자 알고리즘의 절차와 같다. 실수형 유전자 알고리즘에서의 교배는 다음 식 (8)과 같이 부모해  $p_1$ 과  $p_2$ 가 있을 때, 식 (9)와 같이 교배함으로써, 자손해  $c_1$ ,  $c_2$ 를 구할 수 있다. 여기서, 교배가 일어나는 변수의 앞과 뒤에 있는 변수 값을 서로 교차배치시키며, 교배가 일어나는 변수는 다음 식 (10)과 같이 부모 양쪽의 성질을 랜덤하게 취할 수 있도록 고려할 수 있다.<sup>1),2)</sup>

$$\begin{aligned} p_1 &= \{x_1^{(p_1)}, \dots, x_{i-1}^{(p_1)}, x_i^{(p_1)}, x_{i+1}^{(p_1)}, \dots, x_N^{(p_1)}\} \\ p_2 &= \{x_1^{(p_2)}, \dots, x_{i-1}^{(p_2)}, x_i^{(p_2)}, x_{i+1}^{(p_2)}, \dots, x_N^{(p_2)}\} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} c_1 &= \{x_1^{(p_1)}, \dots, x_{i-1}^{(p_1)}, x_i^{(c_1)}, x_{i+1}^{(p_2)}, \dots, x_N^{(p_2)}\} \\ c_2 &= \{x_1^{(p_2)}, \dots, x_{i-1}^{(p_2)}, x_i^{(c_2)}, x_{i+1}^{(p_1)}, \dots, x_N^{(p_1)}\} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} x_i^{(c_1)} &= x_i^{(p_1)} + \delta \times step_k & x_i^{(c_2)} &= x_i^{(p_2)} - \delta \times step_k \\ \delta &= r_1 x_i^{(p_1)} - r_2 x_i^{(p_2)} & r_1, r_2 &= R(0,1) \\ step_k &= step_0 \times (\Delta step)^k \end{aligned} \quad (10)$$

여기서,  $R(0,1)$ 은 0과 1사이의 난수이며,  $\Delta step$ 은 총 세대가 지난 후의  $step_k$ 가 되도록 정할 수 있다. 또한, 돌연변이는 다음과 같이 고려할 수 있다. 우선 식 (11)과 같이 한 개체( $p$ )를 선택한 후 개체 내의  $i$ 번째 변수에서 돌연변이가 발생한다면, 그 외의 변수는 그대로 복사하고, 해당되는 변수는 식 (13)과 같이 임의의 난수를 발생하여 그 수를 고려함으로써, 이진형 유전자 알고리즘에서의 돌연변이를 모사하게 된다.

$$p = \{x_1^{(p)}, \dots, x_{i-1}^{(p)}, x_i^{(p)}, x_{i+1}^{(p)}, \dots, x_N^{(p)}\} \quad (11)$$

$$c = \{x_1^{(p)}, \dots, x_{i-1}^{(p)}, x_i^{(c)}, x_{i+1}^{(p)}, \dots, x_N^{(p)}\} \quad (12)$$

$$x_i^{(c)} = \begin{cases} x_i^{(p)} + \delta, & \text{if } \delta \leq 0.5 \\ x_i^{(p)} - \delta, & \text{if } \delta > 0.5 \end{cases}, \quad \delta = r \times (0.5 \times x_i^{(p)}) \quad r = R(0,1) \quad (13)$$

전술한 바와 같이 구조물의 응답을 이용하여 구조해석모델을 작성하고, 이로부터 구조물의 성능을 평가하는 것에 관한 관심이 증가함에 따라 합리적인 수치해석모델의 중요성이 부각되었다. 신뢰성 높은 해석모델을 개발하는 것은 구조계 추정기법의 한 적용분야가 되며, 이 때 해석모델은 측정자료를 통한 확인 및 개선이 필요하다. 구조물의 계측자료로부터 정적 및 동적특성을 분석한 후, 수치해석모델로부터 계측결과에 가까운 해석결과를 얻을 수 있도록 해석모델을 개선해 줄 수 있는데, 이 경우 다양한 최적화 기법을 도입할 수 있다. 이 연구에서는 유전자 알고리즘을 사용하였으며, 최적화 문제는 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{Minimize } f(\mathbf{x}) &= \sum_{i=1}^m \{A_i - B_i(\mathbf{x})\}^2 \\ \text{subjected to } \mathbf{x}_l &\leq \mathbf{x} \leq \mathbf{x}_h \end{aligned} \quad (14)$$

여기서  $\mathbf{x}$ 는 경계조건과 강성변화를 포함하는 구조수정계수(structural correction coefficient)이고,  $\mathbf{x}_l$ ,  $\mathbf{x}_h$ 는 각각 변수의 하한값과 상한값이며,  $A_i$ 는  $i$ 번째 모드의 동특성, 즉 모드계수이다.  $B_i(\mathbf{x})$ 는 구조계수가  $\mathbf{x}$ 일 때의 수치해석모델로부터 구할 수 있는  $i$ 번째 모드계수를 의미하며,  $m$ 은 구조계 추정에 사용된 모드의 수이다.  $A_i$ 와  $B_i(\mathbf{x})$ 는 문제 및 사용변수에 따라 결정될 수 있으며, 위의 목적함수가 의미하는 것은 계측값과 해석값의 차이를 정의함으로써 그 차이가 줄어들 수 있도록 최적화를 수행한다는 것이다. 기본적으로 유전자 알고리즘은 환경에 대한 적합도가 높은 개체의 특성이 더 많이 유전되도록 하는 것이므로, 유전자 알고리즘에서는 위와 같이 최소화 문제를 최대화 문제로 변경해 주어야 되는데, 이 연구에서는 1을 위의 목적함수로 나눠줌으로써 그 값을 유전자 알고리즘에서의 적합도 함수(fitness function)로 사용하였다.

### 3. 수치해석모델 개선을 위한 실교량 적용 및 검증

#### 3.1 임진강교

##### 3.1.1 임진강교 현장실험 개요 및 계측신호

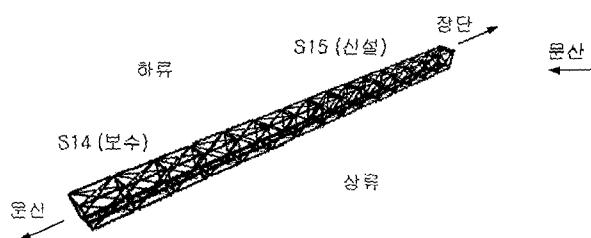
경의선 철도 연결 사업의 일환으로 임진강교에 대한 보수 및 신설사업이 수행된 바 있다.<sup>16)</sup> 임진강교는 그림 1과 같이 강상형 교량 구간과 트러스 교량 구간으로 이루어져

있는데, 이 연구에서는 2경간 연속 트러스 교량 구간에 대한 현장실험결과를 이용하여 구조계 규명(structural identification)을 수행하였다. 대상 구간인 2경간 연속 트러스 구간은 보수 및 신설 경간이 각각 1개씩 있으며, 구체적인 교량의 제원 및 형식은 표 1 및 그림 1과 같다.

표 1 임진강교의 제원

교량명	임진강교
위치	경기도 문산읍 임진각
형식	2경간 연속 트러스
지간	2@63m
교폭	5.2m

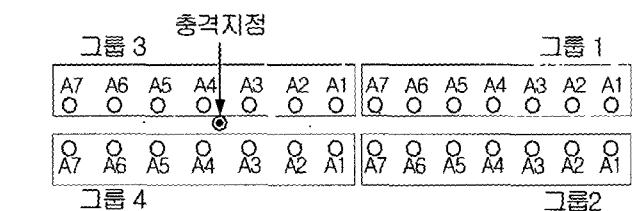
임진강교에 대한 현장실험은 2001년 11월 7일에 수행되었으며, 충격 망치와 7개의 가속도계를 사용하여 충격시험을 수행하고, 충격하중과 가속도응답을 계측하였다. 이 연구에서는 2경간 연속 트러스 교량의 형식과 7개의 가속도계 수량을 고려하여 전체 교량을 4개의 구간으로 나누어 실험하였으며, 연직방향의 가속도계측을 위해 S14, S15 두 경간의 상, 하류측 하현재의 연직방향 가속도를 다음의 그림 2(a)와 같이 4개의 그룹으로 나누어 계측하였으며, 횡방향 가속도 계측을 위해 S14, S15 두 경간의 하류측 하현재의 횡방향 가속도를 그림 2(b)와 같이 2개의 그룹으로 나누어 실험하였다. 200Hz로 10초간 신호를 취득하



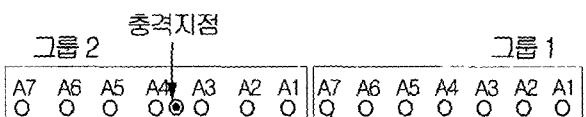
(a) 입체도



### (c) 교량 전경

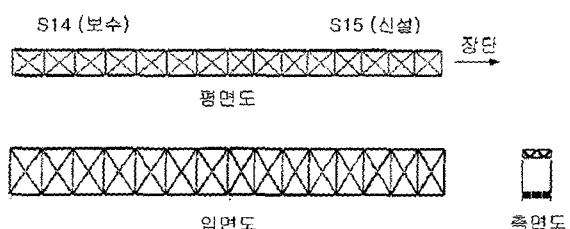


(a) 연직방향 충격시험 및 가속도 계측 위치



(b) 횡방향 충격시험 및 가속도 계측 위치  
그림 2 충격시험 개요

각 구간에서의 계축신호를 살펴보면, 그림 3에 나타난 바와 같이 연직방향의 가속도 계축에서는 충격에 의한 진동이 상시진동에 의한 진동보다 상당히 크게 나타나는 전형적인 충격시현의 신호를 보여주는 반면 횡방향의 가속



(b) 도면



그림 1 임진강교의 제원 및 형상

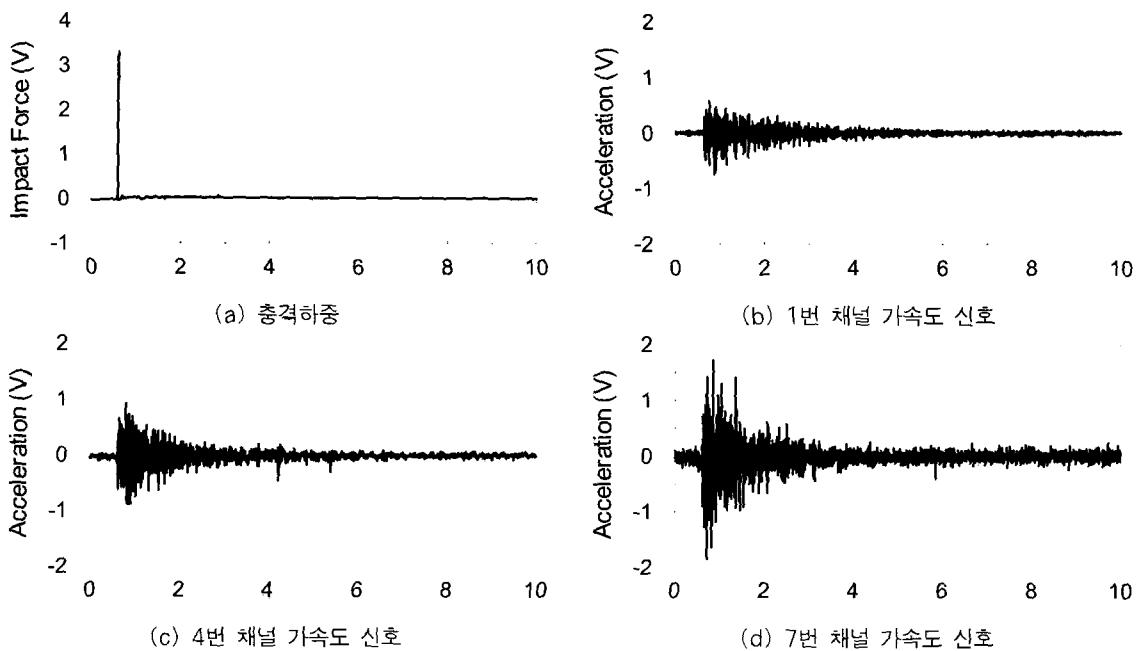


그림 3 연직방향 그룹 1의 가속도 계측신호

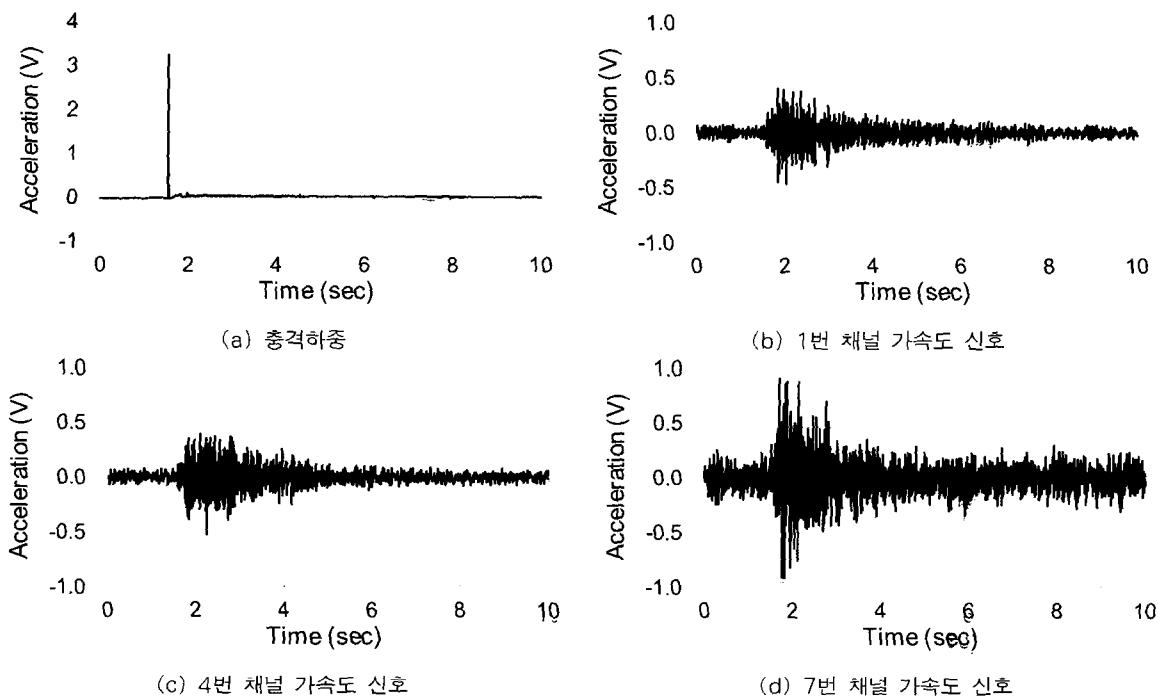


그림 4 횡방향 그룹 1의 가속도 계측신호

도 계측신호는 충격을 가한 S14경간에 대해서는 다소 잘 나타나지만, S15경간에서는 상시진동에 대하여 크게 드러나지 않는 경향을 보이고 있다(그림 4).

### 3.1.2 임진강교의 모드계수의 추정

그림 5~7 및 표 2에서는 4개의 그룹으로 나누어 실험한 모든 계측신호에 대한 ANFRF를 활용하여 모드계수추

정을 수행한 결과를 나타내었다. 4개의 연직방향 흔모드가 비교적 합리적으로 추정되었으나, 세 번째 모드의 경우 모드형상에 많은 계측 및 추정오차가 포함되어 있음을 알 수 있다. 첫 번째 모드는 4.49Hz에서, 두 번째 모드는 5.96Hz에서 찾을 수 있었다.

그림 6에서 알 수 있듯이 1, 2, 4차 모드에 대한 모드형상은 비교적 해석결과와 잘 일치하지만, 3차 모드는 해

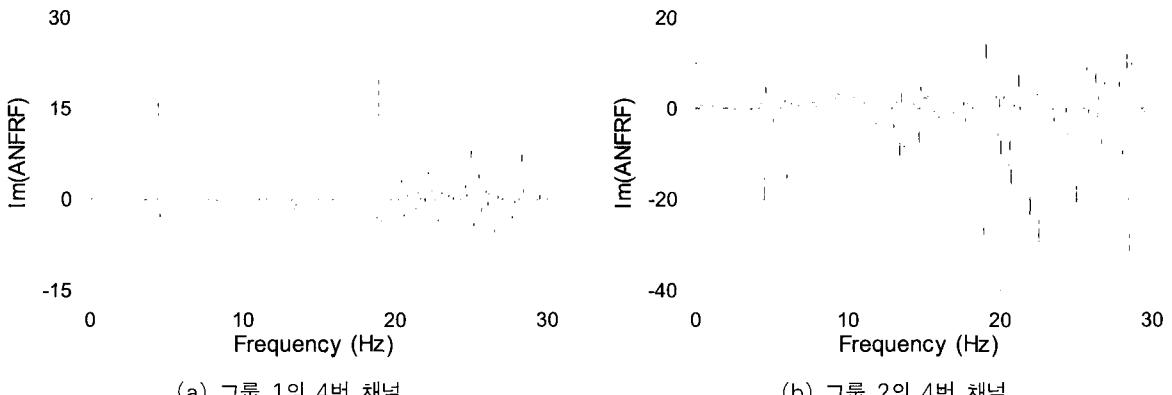


그림 5 S14 및 S15경간 중앙지점에서의 ANFRF

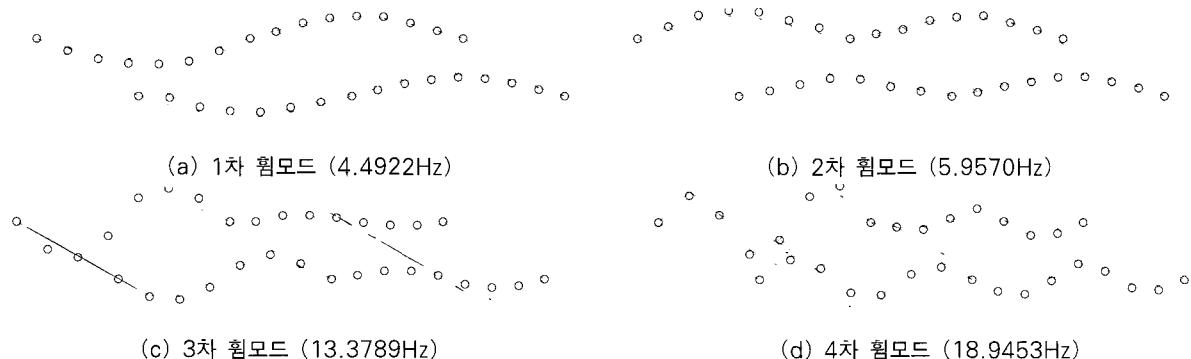


그림 6 ANFRF 방법에 의한 연직방향 모드의 추정 (- : 해석결과; ○ : 추정결과)



그림 7 ANFRF 방법에 의한 횡방향 모드의 추정 (- : 해석결과; ○ : 추정결과)

석결과와 많은 차이를 보이는데, 이는 충격하중이 S14경간 중앙에 근접한 지점에 대하여 이루어졌고, 이러한 충격하중이 S15경간까지 충분히 전달되지 못하였기 때문인 것으로 판단된다. 즉, 충격시험을 수행하기에는 120m이상의 트러스 교량 구간이 적합하지 않은 것으로 판단되며, 이러한 단점을 극복하기 위하여, 가속도 응답자료만을 이용하여 그림 8에서 보인 것과 같이 추계론적 부공간 규명법을 추가로 사용하여 구조물의 모드계수를 추정하였다. 그림 9, 그림 10, 표 2에서는 이러한 추계론적 부공간 규명기법에 의한 모드형상의 추정결과를 제시하였다. 주파수 응답함수를 이용한 결과와 비교할 때 고유주파수에 대하여 약간의 차이가 있으나, 무시할 수준으로 판단되며, 이 때 각 그룹간의 기준 계측지점(reference measurement point)이 없으므로, 해석 결과를 이용하여 각 구간의 모드형상의 크기를 조절하였다. 기준 계측지점을 계측 당시 고려하였

다면 이와 같이 각 구간의 모드형상을 해석결과와 비교하여 조절하는 것은 불필요한 과정이지만, 현재와 같이 충격시험에 의하여 각 구간의 가속도 응답을 계측한 경우 충격하중 자체의 신뢰성 문제로 인하여 기준이 상실되었기 때문에 어느 정도의 합리성을 가지고 있다고 판단할 수 있다. 다만 이러한 경우 주파수응답함수를 이용한 모드계수 추정에 있어서도 같은 조건을 만족할 수 있도록, 주파수응답함수로 구한 모드형상 역시 해석결과와 비교하여 모드형상의 크기를 조절하였다. 이와 같이 두 가지 방법으로 구한 모드형상을 해석결과와 비교할 때, 추계론적 부공간 규명기법으로부터 구한 모드형상의 MAC값이 주파수 응답함수를 이용하여 구한 MAC값 보다 전반적으로 크게 계산되었는데, 이는 정확한 수치모의실험을 수행한 것이 아니기 때문에 어느 방법이 보다 정확한 방법이라고 할 수는 없지만, 추계론적 부공간 규명기법의 결과가 상대적으로 높은

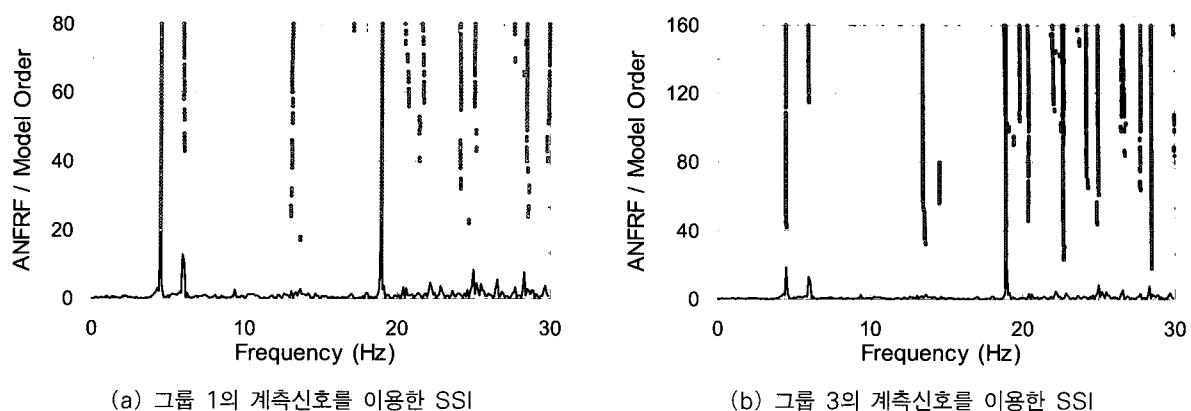


그림 8 안정화도(Stabilization Chart)

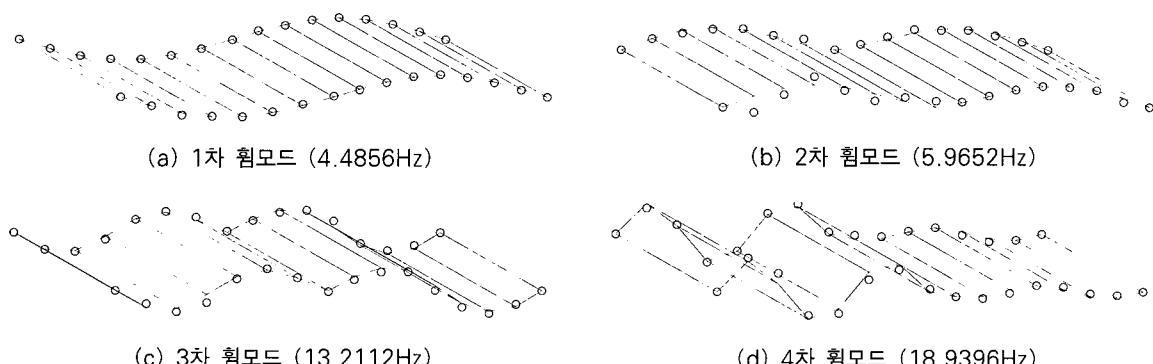


그림 9 SSI 방법에 의한 연직방향 모드의 추정 (- : 해석결과; ○ : 추정결과)

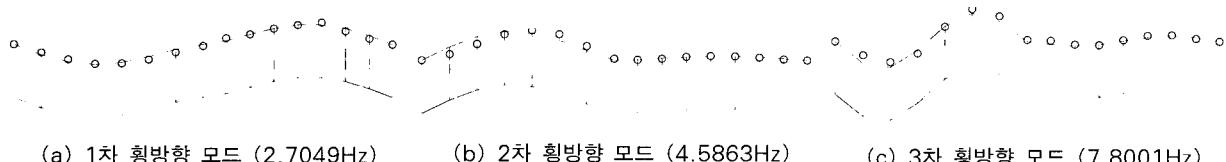


그림 10 SSI 방법에 의한 횡방향 모드의 추정 (- : 해석결과; ○ : 추정결과)

표 2 수치해석 및 충격시험을 통하여 구한 임진강교의 고유주파수 및 MAC 값

구 분	모드번호	수치해석결과		충격시험 결과	
		SAP 2000	ANFRF 이용	SSI 이용	
연직방향 모드	1	4.1106	4.4922 (0.9951)	4.4856 (0.9989)	
	2	5.4971	5.9570 (0.9949)	5.9652 (0.9553)	
	3	12.6205	13.3789 (0.9640)	13.2112 (0.9802)	
	4	17.8257	18.9453 (0.9626)	18.9396 (0.9733)	
횡방향 모드	1	2.3654	2.5391 (0.6200)	2.7049 (0.9893)	
	2	2.9491	4.5898 (0.9190)	4.5863 (0.9680)	
	3	5.5020	7.71481 (0.8921)	7.8001 (0.9681)	

주) 괄호안의 값은 경간별로 모드형상의 크기를 조절한 후 구한 MAC 값임.

신뢰성을 가지고 있다고 할 수 있다. 특히 이러한 결론은 횡방향 모드에 대한 추정결과로 부터 확인할 수 있는데, 횡방향 첫번째 모드에 대한 MAC값이 0.7미만으로 신뢰성이 매우 낮은 것으로 평가할 수 있다. 따라서, 향후 해

석모델 개선을 위한 구조물의 동특성으로는 주파수응답함수의 결과를 이용하지 않고, 추계론적 부공간 규명기법의 결과를 이용하는 것이 보다 합리적인 것으로 평가된다.

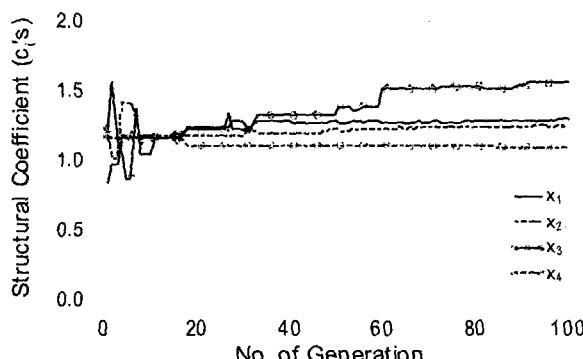
### 3.1.3 유전자 알고리즘에 의한 수치해석모델의 개선

추정된 교량의 동특성을 활용하여 임진강교의 수치해석모델을 개선하였다. 초기의 해석모델은 도면을 바탕으로 SAP2000으로 모델링하였는데, 이 때 레일과 침목, 점검로 등의 고정하중을 고려하기 위하여, 구조계산서를 참고하여 종방향 거더에 추가질량을 도입하였고, 2차 부재에 의한 지역적 모드를 배제하기 위하여 2차 부재는 고려하지 않았으며, 주형의 자중에 대한 부가 고정하중의 영향 역시 고려하지 않았다.

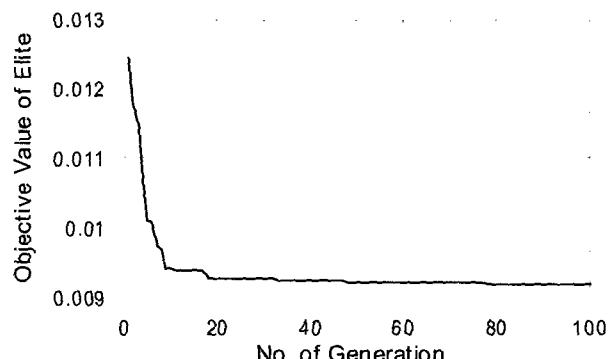
3.1.2절에서 추정한 구조물의 동특성 즉, 모드계수를 기반으로 유전자 알고리즘을 활용하여 해석모델을 개선하였다. 이 때, 해석모델의 개선에서 모든 요소의 축방향 강성을 개별적으로 고려하는 것은 공학적으로 합리적이지 못하며, 충분히 같은 상태로 고려할 수 있는 단위로 나누어 최소의 추정변수를 결정하는 것이 중요하다. 여기서는 S14, S15 두 개의 경간의 상/하현재의 축방향 강성, 레일의 축방향 강성 및 기타 부재의 축방향 강성을 추정변수로 결정하였으며, 다음의 식 (15)와 같이 최적화 문제를 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{Minimize } f(x) &= \sum_{i=1}^m \left[ \alpha_i \left\{ \frac{f_i^{\exp} - f_i^{\text{cal}}(\mathbf{x})}{f_i^{\exp}} \right\}^2 + \beta_i \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left\{ \frac{|\phi_j^{\exp} - \phi_j^{\text{cal}}(\mathbf{x})|}{\phi_j^{\exp}} \right\}^2 \right] \\ \text{Subjected to } 0.5 \leq x_k &\leq 2.0 \quad \text{for } k = 1, \dots, 4 \end{aligned} \quad (15)$$

여기서,  $X_1$ 은 S14경간의 상/하현재의 축방향 강성,  $X_2$ 는 S15경간의 상/하현재의 축방향 강성,  $X_3$ 은 레일의 축방향 강성,  $X_4$ 는 기타 부재의 축방향 강성을 나타내는 변수이다.  $f_i^{\exp}$  와  $f_i^{\text{cal}}$ 은 각각 추정된 고유주파수 및 계산된 고유주파수이며,  $\phi_i^{\exp}$  와  $\phi_i^{\text{cal}}$ 은 각각 추정된 모드형상 및 계산된 모드형상이다.  $\alpha_i, \beta_i$ 는 각각  $i$ 번째 고유주파수와 모드형상에 대한 가중치이다. 이 연구에서는 추정된 모드계수의 신뢰성과 관련하여 연직방향의 모드만을 이용하여 수치해석모델을 개선하였으며,  $\alpha_i = 5, \beta_i = 1$ 의 값을 사용하여 고유주파수에 대하여 모드형상보다 큰 가중치를 부여하였다. 이러한 가중치는 고유주파수 및 모드형상의 추정값의 변동량 혹은 신뢰도를 기준으로 결정할 수 있는데, 이 연구에서는 정량적으로 신뢰도를 분석하지 않고, 정성적으로 분석한 결과를 바탕으로 이러한 가중치를 결정하였다.

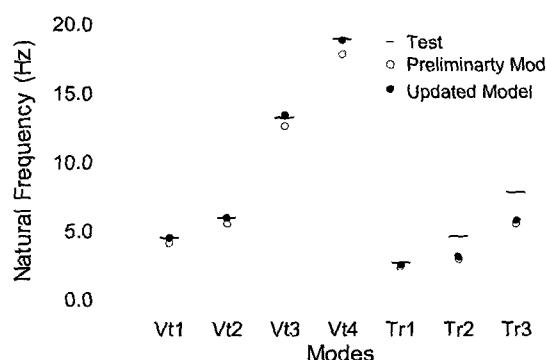


(a) 구조계수 추정값의 변화

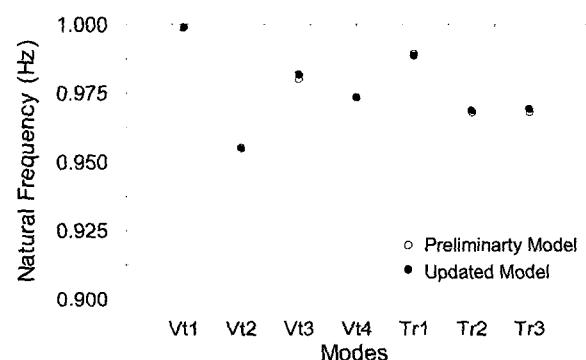


(b) 목적함수의 변화

그림 11 유전자 알고리즘에 의한 구조계수의 추정



(a) 모델개선 전후의 고유주파수 비교



(b) 모델개선 전후의 모드형상의 MAC값 비교

그림 12 모델 개선 결과에 대한 비교

유전자 알고리즘의 실행을 위하여, 총 개체의 수는 20개, 총 세대수는 100회로 제한하였으며, 교배확률과 돌연변이 확률은 시산법을 통하여 각각 0.9, 0.1로 결정하였다. 한편, 상한치와 하한치를 각각 2.0과 0.5로 사용하였는데(표 3), 상한치와 하한치의 결정은 해의 수렴과정에 영향을 주지 않도록 충분한 여유를 주어 결정하거나 혹은 육안조사 등을 바탕으로 합리적인 수준에서 결정하여야 하는데, 이 연구에서는 수렴과정에 영향을 주지 않을 정도의 여유를 두어 이들 값을 결정하였다. 수렴과정에서 이러한 상, 하한치에 근접하지 않는 것을 다음의 결과를 통하여 알 수 있다.

그림 11에서는 세대에 따른 각 추정변수 및 최적 개체의 목적함수에 대한 수렴과정을 보이고 있다. 표 3에서는 유전자 알고리즘으로부터 추정된 값을 나타내었으며, 개선된 수치해석모델로부터 계산된 모드계수를 표 4 및 그림 12에서 비교하였다. 유전자 알고리즘을 이용하여 수치해석 모델을 수정한 결과, 연직방향 모드의 고유주파수가 실험값과 거의 일치하는 결과를 얻을 수 있으며, 모드 형상의 경우 MAC값이 95% 이상으로 나타났다. 그러나 횡방향모드의 경우 계측오차가 많이 포함되어 있어 목적함수에 포함시키지 않았으며, 이로 인하여 해석모델 개선 후에도 어느 정도의 차이를 가지고 있음을 알 수 있다. 우리나라의 일반적인 교량의 경우 횡방향 물성치에 비하여 연직방향 거동에 영향을 줄 수 있는 물성치의 중요성이 크기 때문에 이 연구에서는 횡방향에 대하여 추가적으로 고려하지 않았으며, 만약 내진성능과 같이 횡방향 거동 특성에 영향을 받는 성능평가를 위해서는 횡방향에 대해서도 보다 면밀한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

표 3 유전자 알고리즘으로부터 추정된 설계변수

	하한	상한	추정치
$x_1$ (S14 경간 상/하현재)	0.5	2.0	1.2801
$x_2$ (S15 경간 상/하현재)	0.5	2.0	1.2335
$x_3$ (레일 부재)	0.5	2.0	1.5469
$x_4$ (기타 부재)	0.5	2.0	1.0808

표 4 개선 전후의 해석모델로부터 구한 임진강교의 고유주파수 및 모드형상의 비교

구분	모드번호	고유주파수 (Hz)			모드형상의 MAC값	
		실험값	개선 전	개선 후	개선 전	개선 후
연직방향 모드	1	4.4856	4.111 (8.360)	4.492 (0.1398)	0.9989	0.9989
	2	5.9652	5.497 (7.847)	5.925 (0.6792)	0.9553	0.9549
	3	13.2112	12.621 (4.471)	13.388 (1.3371)	0.9802	0.9818
	4	18.9396	17.825 (5.881)	18.833 (0.5616)	0.9733	0.9737
횡방향 모드	1	2.7049	2.3654 (12.551)	2.4940 (7.797)	0.9893	0.9887
	2	4.5863	2.9491 (35.698)	3.1219 (31.930)	0.9680	0.9687
	3	7.8001	5.5020 (29.462)	5.7652 (26.088)	0.9681	0.9693

주) 괄호안의 값은 모델개선 전후의 해석모델로부터 구한 고유주파수와 실험값의 차이(%)

추정된 값을 살펴보면, S14경간과 S15경간의 축방향 강성에 대한 수정계수가 각각 1.28, 1.23, 레일에 대하여 1.50, 그리고 기타 부재의 축방향 강성에 대하여 1.08로 추정되었다. 이는 모델에서 제외된 2차 부재의 영향으로도 판단할 수 있으나, 이 영향에 의하여 강성이 20% 이상 증가하는 것으로 판단하기는 어렵다. 따라서 S14경간과 S15경간의 축방향 강성의 초기 해석모델에서 고려한 값보다 실제 큰 값을 가지고 있는 것으로 판단하는 것이 바람직할 것이며, 따라서 보수된 경간(S14경간)과 신설된 경간(S15경간)이 만족할만한 수준의 견전성을 가지고 있는 것으로 판단할 수 있다.

### 3.2 행주대교

#### 3.2.1 현장실험 개요 및 계측신호

행주대교에 대하여 현장시험 및 모드계수추정, 수치해석 모델의 개선의 과정을 수행하였다. 우선, 행주대교 실험 경간의 제원 및 계측위치는 다음의 그림 13과 같다. 총 7 개의 가속도계를 활용하여 각 주형별로 4구간으로 나누어 충격시험을 수행하였으며, 총 28개의 계측지점에 대한 가속도 주파수응답함수를 계측하였다.

#### 3.2.2 ANFRF를 이용한 모드계수의 추정

임진강교의 경우 충격하중과 가속도 응답을 계측하였기 때문에 주파수응답함수 방법과 주계론적 부공간 규명법에 의하여 모드를 추정할 수 있었지만, 행주대교에 대한 현장 실험의 경우 현장에서 사용한 계측장비의 제한으로 가속도 응답을 계측하지 않고 주파수응답함수만을 기록하였다. 따라서, 주계론적 부공간 규명법을 이용하지 못하고, 주파수 응답함수 방법만을 이용하여 모드를 추정하였다. 그러나 지간이 64m이고, 이경간 연속 트러스교인 임진강교의 경우와 달리 행주대교의 실험 경간은 비교적 짧은 30m의 단경간이어서 충격시험이 매우 효율적으로 수행될 수 있으며, 주파수응답함수(ANFRF)만으로도 만족한 모드를 추

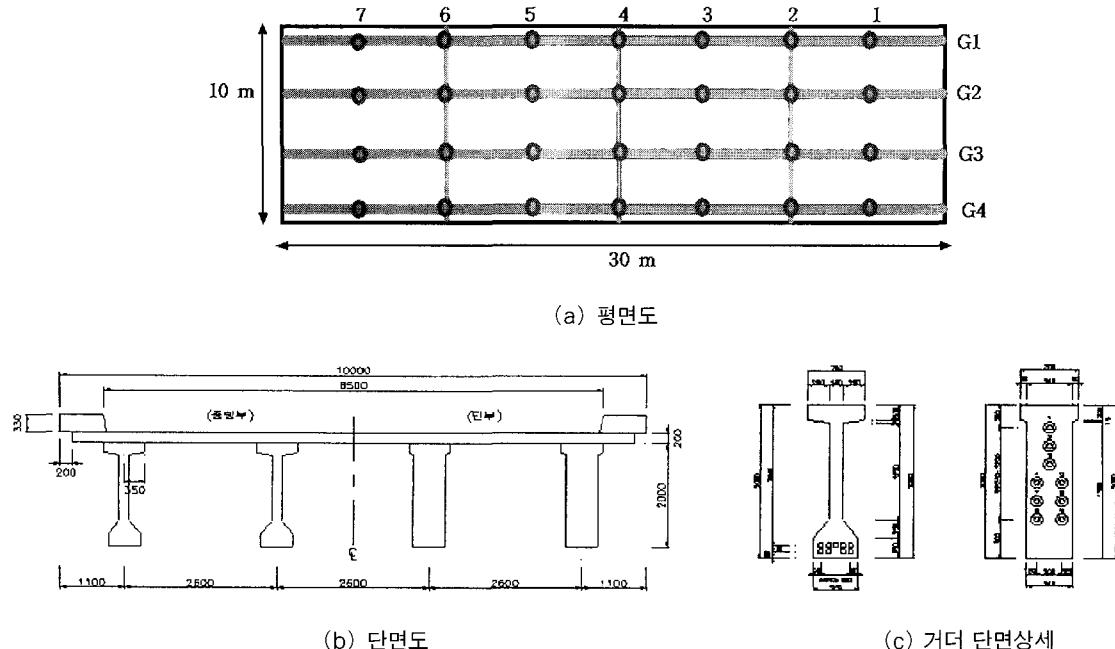


그림 13 행주대교의 제원 및 계측위치

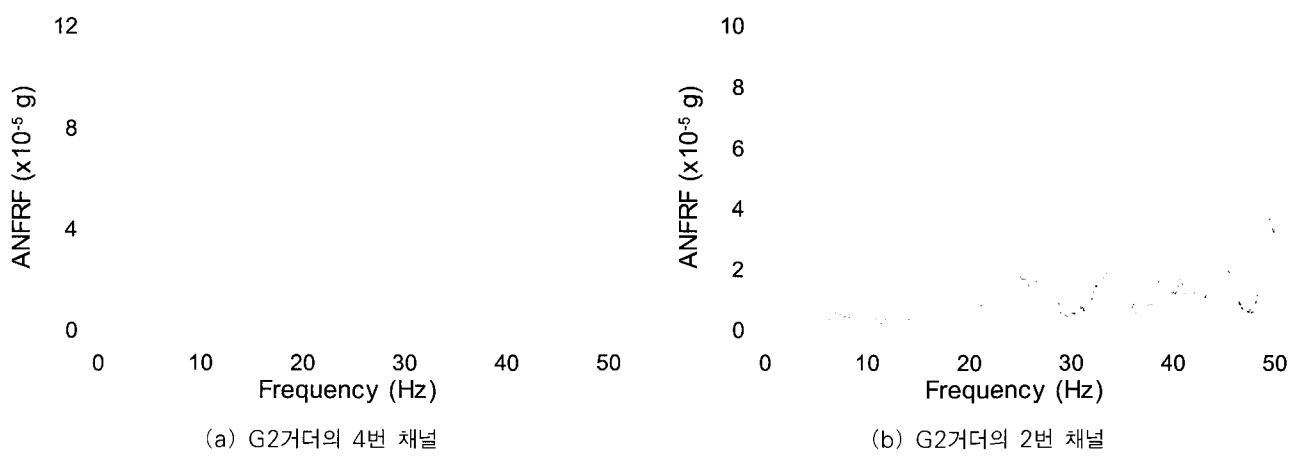


그림 14 ANFRF의 예

정할 수 있었다. 위 그림 13(a)의 G2의 6번과 4번 가속도 응답에 대한 ANFRF를 다음의 그림 14에 제시하였으며, 모드형상의 추정결과를 그림 15에 제시하였다. ANFRF로부터 대략적인 모드가 5, 6, 18, 23Hz 부근에 있음을 알 수 있다.

**3.2.3 유전자 알고리즘을 사용한 유한요소 모델수정**  
추정된 모드계수를 바탕으로 유전자 알고리즘을 활용하여 행주대교 실험경간의 해석모델을 개선하였다. 초기의 해석모델은 도면을 바탕으로 SAP2000으로 모델링하였으며, 상부슬라브를 판요소로, 각 주형 및 격벽은 보요소로 모델링하였다.

초기해석모델로부터 계산한 모드계수를 그림 16에 제시

하였으며, 그 값을 계측값과 비교하였다(표 6). 5개의 모드에 대하여 MAC값을 구하였을 때, 2차 모드의 경우 MAC값이 93%로 가장 낮으며, 그 외의 모드에 대해서는 95%이상의 값을 나타내었다. 즉, 모드형상이 합리적으로 추정되었음을 알 수 있다.

수치해석 모델의 개선에 있어 추정변수의 수를 효과적으로 줄이기 위하여 그룹화 기법을 사용하였으며, 모델개선에 사용한 변수로는 각 주형의 휨강성 및 비틀림강성, 지점부 주형의 휨강성 및 비틀림 강성, 격벽의 휨강성, 그리고 지점부의 휨에 대한 스프링강성이다(그림 16).

유전자 알고리즘의 적용을 위하여 최적화 문제를 다음과 같이 정의하였다.

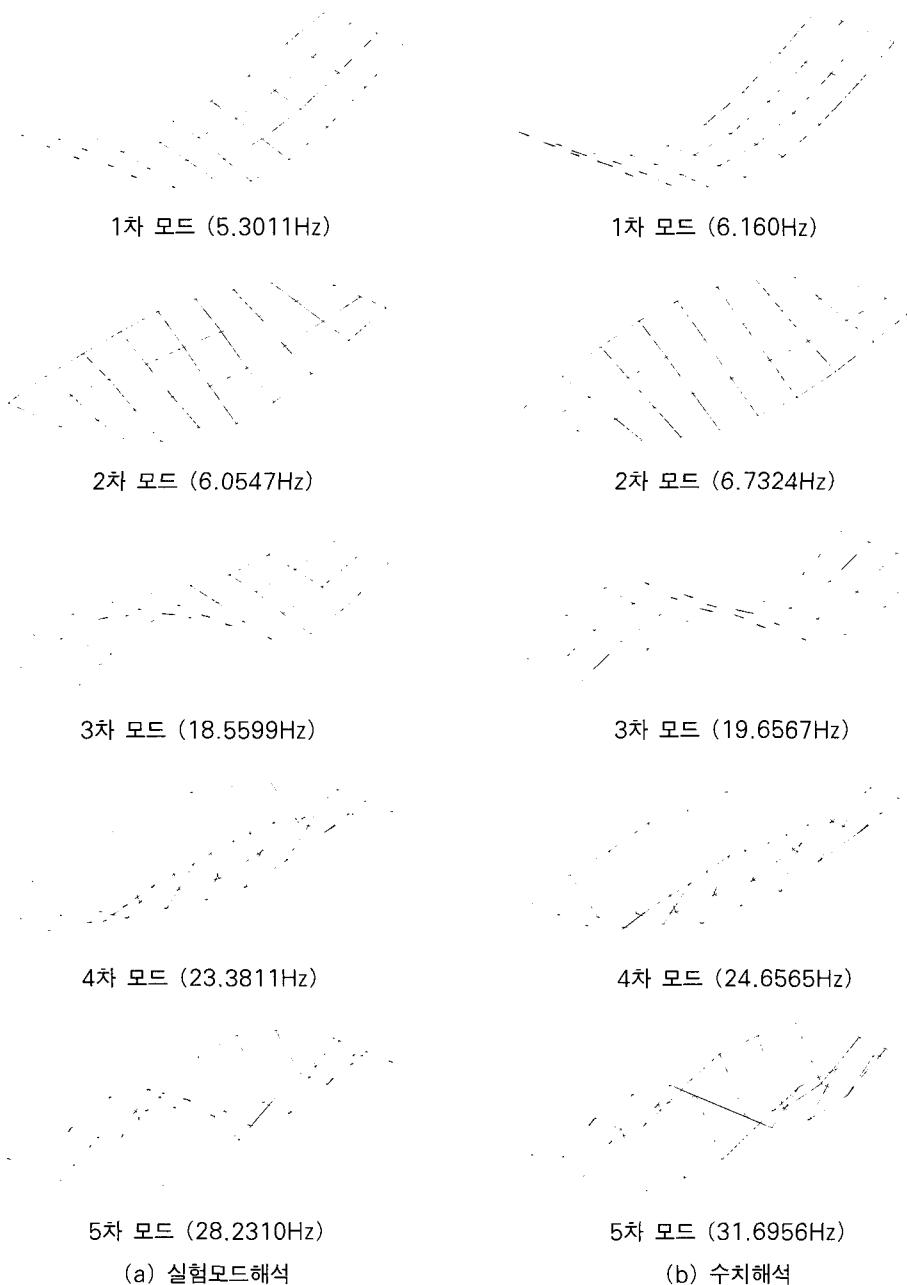


그림 15 충격시험 및 수치해석을 통하여 구한 모드형상

$$\begin{aligned}
 & \text{Minimize } f(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^m \left[ \alpha_i \left\{ \frac{f_i^{exp} - f_i^{cal}(\mathbf{x})}{f_i^{exp}} \right\}^2 + \beta_i \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left\{ \frac{|\phi_{ij}^{exp} - \phi_{ij}^{cal}(\mathbf{x})|}{\phi_{ij}^{exp}} \right\}^2 \right] \\
 & \text{Subjected to} \begin{cases} 0.3 \leq x_k \leq 2.0 & \text{for } k = 1, \dots, 5 \\ 0.0 \leq x_6 \leq 1.0 \end{cases} \quad (16)
 \end{aligned}$$

여기서,  $x_1, x_2$ 는 각각 그룹 1의 휨강성 및 비틀림 강성에 대한 수정계수를,  $x_3, x_4$ 는 각각 그룹 2의 휨강성 및 비틀림강성에 대한 수정계수를,  $x_5$ 는 그룹 3의 휨강성에 대한

수정계수를 의미하며,  $\mathbf{x}_6$ 은 경계스프링의 회전강성에 대한 수정계수를 나타낸다. 지점부의 스프링강성은 축방향강성을 고려하여,  $3EI_L \approx 1.2 \times 10^9 \text{ N mm}$ 을 기준으로 하여 결정하였다. 여기서, E는 강재의 탄성계수, I는 거더의 휨강성, L은 길이를 나타낸다.  $\alpha_i, \beta_i$ 는 각각 i번째 고유주파수와 모드형상에 대한 가중치이며, 이 연구에서는 추정된 모드계수의 신뢰성과 관련하여,  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_4 = 5$ ,  $\alpha_3, \alpha_5 = 1$ ,  $\beta_1, \beta_2, \beta_4 = 1$ ,  $\beta_3, \beta_5 = 0.5$ 의 값을 사용하였다. 유전자 알고리즘을 이용한 모델 개선을 위하여, 총 개체의 수는

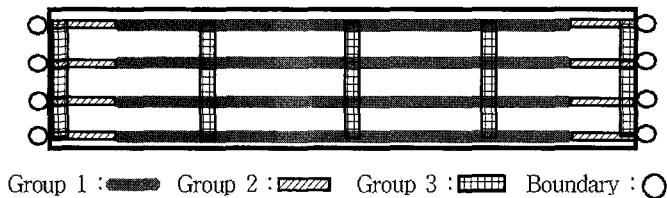


그림 16 유한요소모델 개선을 위한 구조계수의 그룹화

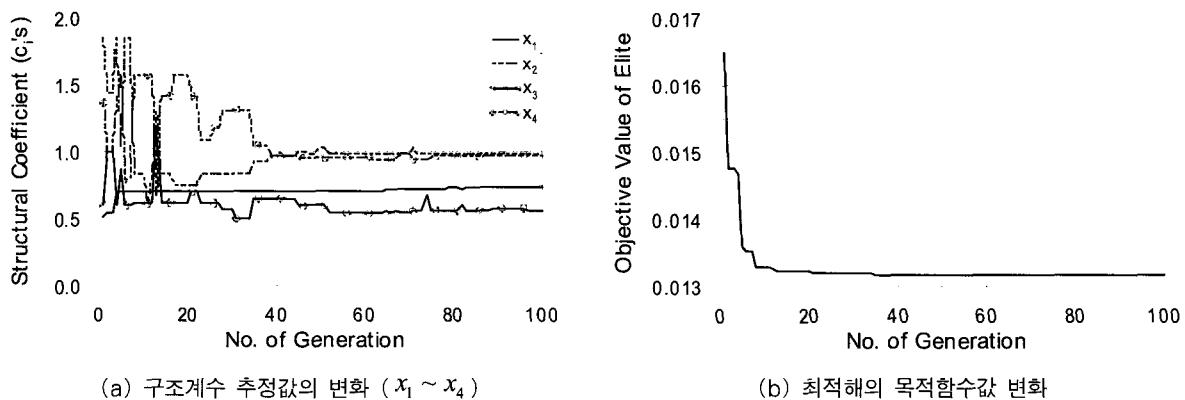


그림 17 유전자 알고리즘에 의한 구조계수의 추정

20개, 총 세대수는 100회로 제한하였으며, 교배 확률과 돌연변이 확률은 각각 0.9, 0.1로 정하였다.

표 5에서는 유전자 알고리즘으로부터 추정된 수정계수를 나타내었으며, 그림 17에서는 세대에 따른 계수 및 목적함수의 수렴과정을 보여주고 있다. 한편, 수정된 수치해석 모델로부터 계산한 모드계수를 표 6과 그림 18에서 비교하였다. 유전자 알고리즘을 이용하여 수치해석 모델을 개선한 결과, 3번째와 5번째 고유주파수에서는 5%정도의 차이가 있으나, 전반적으로 실현값에 매우 가까운 해석결과를 얻을 수 있었으며, 모드형상의 경우, MAC값이 90%이상으로 나타났다. 이는 유전자 알고리즘을 이용한 해석모델 개선에서 사용한 고유주파수에 대한 가중치에서 3번째와 5번째 고유주파수에 대한 가중치가 비교적 작은 값을 가지기 때문이며, 큰 가중치를 준 1, 2, 4번째 고유주파수는 실험

값에 더욱 근접한 결과를 얻을 수 있다. 한편, 표 5의 추정된 설계변수를 볼 때 그룹 1과 2의 휨강성계수가 0.74 및 0.56으로 추정되어, 임진강교의 경우와는 달리 강성이 기준에 비하여 줄어들었음을 알 수 있다. 이는 안전문제로 인하여 현재 통행이 차단된 행주대교의 건전성을 진동계측으로부터 간접적으로 평가할 수 있음을 알 수 있다.

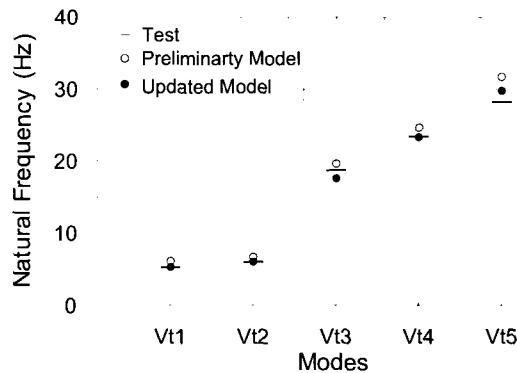
표 5 유전자 알고리즘으로부터 추정된 설계변수

	휩 모드 관련 변수		비틀림 모드 관련 변수	
	하한 / 상한	추정값	하한 / 상한	추정값
그룹 1 (거더 중앙단면)	0.3 / 2.0	0.740	0.3 / 2.0	0.993
그룹 2 (거더 좌우단면)	0.3 / 2.0	0.566	0.3 / 2.0	0.982
그룹 3 (격벽)	0.3 / 2.0	0.856		
경계조건 (경계스프링 요소)	0.0 / 1.0	0.667		

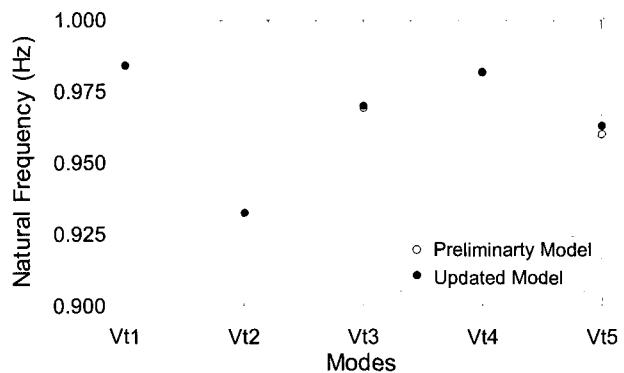
표 6 초기해석모델 및 개선된 모델을 사용한 경우의 모드계수 비교

	추정 고유주파수(Hz)	고유주파수(Hz)		모드형상의 MAC값	
		개선 전	개선 후	개선 전	개선 후
1	5.310	6.160 (16.01)	5.320 (0.19)	0.9840	0.9839
2	6.061	6.732 (11.08)	6.075 (0.24)	0.9326	0.9326
3	18.745	19.657 (4.86)	17.642 (5.89)	0.9693	0.9700
4	23.392	24.657 (5.41)	23.316 (0.32)	0.9817	0.9820
5	28.221	31.696 (12.31)	29.778 (5.52)	0.9601	0.9630

주) 괄호 안의 값은 모델 개선 전과 후의 수치해석결과와 추정된 고유주파수의 오차 (%)



(a) 모델개선 전후의 고유주파수 비교



(b) 모델개선 전후의 모드형상의 MAC값 비교

그림 18 모델 개선 결과에 대한 비교

#### 4. 결 론

이 연구에서는 현장실험 자료를 활용하여 교량의 모드계수 추정 및 수치해석모델 개선을 수행하였다. 강제진동시험 자료를 활용한 모드계수의 추정을 위해서 주파수응답함수와 추계론적 부공간 규명법을 활용하였으며, 추정된 모드계수를 바탕으로 유전자 알고리즘을 이용하여 수치해석모델을 개선하였다.

임진강교의 경우, 4개의 그룹으로 나누어 실현한 모든 계측자료에 대한 ANFRF를 활용하여 모드계수를 추정한 결과, 4개의 연직방향 흔모드 및 3개의 횡방향 모드를 비교적 합리적으로 추정하였으나, 모드형상의 경우 다소 오차가 크게 나타났다. 이는 충격시험을 수행하기에 임진강교의 대상구간이 120m이상의 교량으로 충격하중이 충분히 전달되지 못하였기 때문으로 판단되며, 따라서 입력에 대한 정보를 사용하지 않고, 응답신호만을 사용하여 추계론적 부공간 규명법으로부터 모드계수를 추가적으로 추정하였으며, 그 결과 주파수응답함수를 활용한 모드해석 결과보다 우수한 결과를 얻을 수 있었다. 추계론적 부공간 규명법으로 추정한 모드계수 중, 연직방향의 4개 모드를 활용하여 수치해석모델을 개선하였다. S14경간과 S15경간의 상/하현재의 축방향 강성에 대하여 초기 수치해석모델에서 사용한 강성보다 20%이상 큰 것으로 추정되었으며, 레일 및 기타 부재도 초기 모델에서 사용한 강성보다 큰 것으로 추정되어, 보수 및 신설한 대상 경간이 매우 건전한 상태임을 검증할 수 있었다.

한편, 행주대교에 대한 충격실험의 결과를 이용하여 5개의 연직방향 모드를 추정하였으며, 추정된 모드계수를 활용하여 행주대교의 모델을 개선하였다. 초기의 해석모델은 도면을 바탕으로 SAP2000으로 모델링하였으며, 해석모델의 개선을 위하여 그룹화 기법을 사용하였으며, 각 주

형의 훨강성 및 비틀림 강성, 지점부 주형의 훨강성 및 비틀림강성, 격벽의 훨강성, 그리고 지점부의 훨에 대한 스프링요소의 회전강성을 추정하였다. 유전자 알고리즘을 이용한 유한요소 모델의 수정결과, 3번째와 5번째 고유주파수에서는 약간 차이가 있으나 전반적으로 실험값에 매우 가까운 결과를 얻을 수 있었다.

이와 같이 현장실험자료를 이용하여 교량의 모드를 추정하고, 추정된 모드를 이용하여 수치해석모델을 개선함으로써 실제 교량의 상태를 반영한 수치해석모델을 구할 수 있었다. 이러한 과정을 확장시켜, 추후 교량의 내하성능 및 내진성능을 보다 합리적으로 평가할 수 있는 연구를 수행하고 있으며, 이러한 연구에 의하여 교량과 같은 사회기반시설물에 대한 보다 합리적인 평가가 이루어 질 수 있을 것으로 기대한다.

#### 감사의 글

이 연구는 한국과학재단지정 우수연구센터인 스마트 사회기반시설 연구센터의 연구비 지원으로 이루어졌으며, 저자는 이에 감사를 드립니다.

#### 참고문헌

- 김기화, “유전자 알고리즘”, 전산구조공학 제9권 제2호, 1996, pp.28~35
- 양영순, 김기화, “실수형 Genetic Algorithm에 의한 최적 설계”, 전산구조공학 제8권 제2호, 1995, pp.123~132
- Goldberg, D.E., Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning. Addison Wesley: Reading, MA, USA, 1989
- Kirkpatrick, S., Gelatt Jr C.D., Vecchi, M.P.,

- "Optimization by simulated annealing", Science, Vol. 20, No.4598, 1998, pp.671~690
5. Ceranic, B., Fryer, C., and Baines, R.W., "An application of simulated annealing to the optimum design of reinforced concrete retaining structures", *Computers and Structures*, Vol.79, 2001, pp.1569~1581
  6. Manoharan, S., Shanmuganathan, S. "A comparison of search mechanisms for structural optimization", *Computers and Structures*. Vol. 73, 1999, pp.363~372
  7. Hadi, M.N.S., Arfiadi, Y., "Optimum rigid pavement design by genetic algorithms." *Computers and Structures*, Vol.79, pp.1617~1624
  8. Kim, Y.J., Ghaboussi, J., "Direct use of design criteria in genetic algorithm based controller optimization", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.30, 2001, pp.1261~1278
  9. Chou, J.H., Ghaboussi, J., "Genetic algorithm in structural damage detection", *Computers and Structures*, Vol.79, 2001, pp.1335~1353
  10. Mares, C., and Surace, C., "An application of genetic algorithms to identify damage in elastic structures", *Journal of Sound and Vibration*, Vol.195, No.2, 1996, pp.195~215
  11. Felber, A.J., Cantieni, R., "Introduction of a new ambient vibration testing system - Description of the system and seven bridge tests," EMPA Report No.156, 1996
  12. 심종민 "유전자 알고리즘을 이용한 교량의 구조계수 규명", 한국과학기술원 토목공학과 석사학위논문, 2001
  13. Overschee V.P. De Moor, B., Subspace Identification for Linear Systems, Kluwer Academic Publisher, 1996
  14. Peeters, B. De Roeck, G. "Reference Based Stochastic Subspace Identification for Output Only Modal Analysis", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol.13, No.6, 1999, pp.855 ~878
  15. Hermans, L. Van Der Auweraer, H., "Modal Testing and Analysis of Structures under Operational Conditions: Industrial Applications", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol.13, No.2, 1999, pp.193~216
  16. 한국시설안전기술공단 "동적계측결과를 이용한 교량의 손상도 평가." 한국시설안전기술공단 연구보고서 TS-03-R3-001, 2003