

자연진동을 이용한 건물의 건전도 평가

Damage Detection of Building Structures Using Ambient Vibration Measurements

김 상 윤* 권 대 홍* 유 석 형**
 Kim, Sang Yun Kwon, Dae Hong Yoo, Suk Hyeong
 노 삼 영*** 신 성 우****
 Noh, Sam Young Shin, Sung Woo

Abstract

Numerous non-destructive tests(NDT) to assess the safety of real structures have been developed. System identification(SI) techniques using dynamic responses and behaviors of structural systems become an outstanding issue of researchers. However the conventional SI techniques are identified to be non-practical to the complex and tall buildings, due to limitation of the availability of an accurate data that is magnitude or location of external loads. In most SI approaches, the information on input loading and output responses must be known. In many cases, measuring the input information may take most of the resources, and it is very difficult to accurately measure the input information during actual vibrations of practical importance, e.g., earthquakes, winds, micro seismic tremors, and mechanical vibration. However, the desirability and application potential of SI to real structures could be highly improved if an algorithm is available that can estimate structural parameters based on the response data alone without the input information. Thus a technique to estimate structural properties of building without input measurement data and using limited response is essential in structural health monitoring. In this study, shaking table tests on three-story plane frame steel structures were performed. Out-put only model analysis on the measured data was performed, and the dynamic properties were inverse analyzed using least square method in time domain. In results damage detection was performed in each member level, which was performed at story level in conventional SI techniques of frequency domain.

키워드 : 건전도 평가, 자연진동, 구조계 식별, 비파괴 검사

Keywords : Integrity Estimation, Ambient Vibration, System Identification(SI), Nondestructive Evaluation(NDE)

1. 서 론

구조물의 유지관리에 관한 기술로써 기존의 비파괴 조사 방법(NDE)에 이어 최근에는 구조물의 동적거동 계측 자료를 바탕으로 구조물의 동특성 및 구조적 특성을 포함하는 수학적 모델을 구성함으로써 손상된 상태를 조사하고자하는 구조물 시스템 판별법(System Identification, 이하 SI)이 최근에 건설기술 분야에서 주목을 받고 있다. 당초 우주 항공기술 분야에서 활용되어 사용되던 SI기법은 20-30년 전부터 토목분야에 활용되어 적용되기 시작하다가 최근에 건축구조물에 적용하기 위한 연구가 초기 단계로 시작되고 있다. SI기법을 통하여 구성되는 구조물

에 대한 해석 모델은 구조물의 물리적인 손상을 반영할 수 있어야 하며, 이 분야의 발전배경에는 실측자료로부터 구조계를 파악하는 다양한 역해석 문제해법의 발전과 신호처리 기술의 발전 등이 있다.⁽¹⁾ 따라서 기존의 유지관리 기술로서 NDE를 점차적으로 대신하여 SI기법이 활발하게 적용될 것으로 예상된다.

그러나 이 방법은 매우 유용한 것이지만 실용화에 있어서는 몇 가지 문제가 있다. 역해석 과정에서 고려되지 않으나 실구조물에 존재하는 비 구조요소(조적벽, 경량벽체 및 마감재 등)의 강성이나 질량이 동적거동에 미치는 영향, 가속도 계측 시 센서 및 계측장비로부터 발생하는 노이즈의 문제 및 동적거동 계측 위치의 제한 등 실구조물 적용 시 해결하여야 할 문제점들이 계속적인 과제로 남아 있다. 또한, 대부분의 SI 기법은 입력하중과 출력 응답 값을 알아야 한다. 대부분의 경우 실제의 지진이나 바람에 의한 미

* 주저자, 한양대학교 건축환경공학과 석사과정

** 교신저자, 한양대학교 BK21 계약교수 (piter31@hanyang.ac.kr)

*** 한양대학교 건축학부 조교수

**** 한양대학교 건축학부 교수, 친환경건축연구센터 소장

세진동이나, 기계적 진동 등의 입력값을 측정하기란 매우 어려운 일이다. 따라서 실제구조물에서 입력하중에 대한 정보 없이 응답치만으로 구조계를 판별 할 수 있는 알고리즘이 개발된다면 실구조물의 유지관리를 위한 손상검출을 위하여 SI기법을 유용하게 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

기존의 SI기법에서 주로 계측데이터를 분석할 때 사용하는 방식은 주파수영역에 바탕을 둔 시스템 분석이었으며, 이의 장점은 많은 양의 데이터를 사용하는 대신 mode shape, 고유주기, 그리고 damping ratios등 비교적 간단한 양의 데이터로 구조계의 강성 및 동적특성을 판별할 수 있다는 점이다. 그러나 이러한 장점에도 불구하고 주파수 영역에 바탕을 둔 접근은 상당한 결함이 있다. 이러한 접근에서 구조물은 거시적 차원에서 다루어지며, 아주 소수의 저차모드만이 시스템 식별에 활용될 수 있다. 따라서 구조물을 구성하고 있는 개별적인 모든 부재의 구조적 특성을 추정하는 것은 어렵다. 심지어 매우 심하게 손상된 부재의 위치와 손상정도를 파악하는 것조차 불가능하다. 또한 구조부재가 상당한 부분 손상되어도 고유주기의 변화는 2%미만으로 발생되어 고유주기로서 손상검출을 할 경우 민감도가 매우 낮으며, 동적인 특성은 손상의 유형을 구분 할 수 없다. 즉 균열로 인한 강성의 감소와 철근의 부식으로 인한 강성과 질량의 변화를 구분 할 수 없다. 그러나 구조물의 동적운동방정식을 시간영역에서 직접 역해석을 수행하면 구조물의 개별부재의 강성을 직접고려하게 되므로 부재 수준에서 손상검출이 가능하게 된다. 본 연구에서는 상시미진동에 의한 구조물 동적거동 계측자료를 이용하여 시간영역에서 역해석을 수행함으로써 부재수준의 손상검출이 가능한 방법을 실용화하기 위하여 축소된 3층 평면 골조구조물의 진동대 실험을 수행하고 이를 개선된 QRD 최소자승법을 이용하여 손상을 검출하고 결과를 비교함으로써 합리적인 구조물 유지관리를 위한 기초자료를 제시하고자 한다.

2. 손상검출 알고리즘

2.1 단순반복 최소자승법

Wang⁽²⁾은 시간영역에서 입력하중에 대한 정보 없이 시스템 판별을 할 수 있는 기법을 제안 하였는데, 이는 유한요소법과 선형탄성해석에 바탕을 두고 있다. 선형탄성해석은 상시미진동하에서 구조물이 선형탄성 거동할 것으로 예상되기 때문에 가능한 방법이며, 시간영역에서 구조물 운동방정식의 해석은 매우 많은 양의 데이터를 처리하여야 하므로 컴퓨터의 활용을 위해 유한요소법에 기초한 것이다. 따라서 이 방법은 실용적이고 경제적이며 합리적으로 기존 구조물의 평가를 위해 유용하게 활용될 수 있다.

또한 부재 수준에서 강성을 직접 고려하여 손상검출을 수행하므로 신뢰성을 높일 수 있고, 지속적으로 정기적인 평가가 실행되면 구조물의 손상 속도를 알 수 있다. 게다가, 이 방법은 어떠한 구조형식과, 재료로 구성된 구조물이든지 사용될 수 있다. 이 방법은 보수보강을 통한 구조물의 기능개선의 정도를 파악할 수 있을 뿐만 아니라 손상된 부분을 찾고 손상정도를 파악하는 것이 가능하다. 단순반복 최소자승법을 개략적으로 소개하면 다음과 같다. 먼저 손상된 구조물의 운동방정식은 다음과 같다.

$$M\ddot{X}(t) + C\dot{X}(t) + KX(t) = f(t) \quad (1)$$

M=질량행렬; C=감쇠 행렬; K=강성 행렬; X, 및 X', 및 X''=가속도, 속도, 및 변위; 그리고 f(t)=힘 벡터. M을 알려진 질량의 대각 행렬이라고 한다면 식(1)은 다음과 같다.

$$[C \quad M] \begin{bmatrix} \dot{X}(t) \\ X(t) \end{bmatrix} = f(t) - M \ddot{X}(t) \quad (2)$$

N-DDOF system의 경우, 이 방정식은 다음과 같이 재 정리 될 수 있다.

$$A_{N \times L} P_{L \times 1} = F(t)_{N \times 1} \quad (3)$$

여기서 A는 N×L 행렬로서 속도와 변위의 구조계 응답행렬이고 L(≤2N)은 미지의 구조계 변수의 총 숫자이다. P는 L×1 행렬로서 damping 계수와 강성 등 미지의 구조계 변수로 구성 되었으며 부재수준으로 표현되어야 한다. 그리고 F(t)는 N×1 행렬로서 임의시간 t에서 입력하중과 관성력의 합이다.

구조물의 반응이 모든 DDOF에서 m×Δt의 시간동안 측정되었다고 가정해보자. m 은 측정횟수이고, Δt는 단위 계측시간이다. 따라서 m의 값을 알면 계측 data의 총량을 알 수 있어서 (3)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$A_{(m \times N) \times L} P_{L \times 1} = F_{(m \times N) \times 1} \quad (4)$$

식(4)에서의 A는 다음과 같이 표현된다.

$$A = [A(t_0), A(t_1), \dots, A(t_m)]^T \quad (5)$$

A(t₀), A(t₁), ..., A(t_m) 들이 각 시간 T₀, T₁, ..., T_m에 따른 각 DDOF에서 계측된 반응량이다. 그와 유사하게 F도 다음과 같이 표현된다.

$$F = [F(t_0), F(t_1), \dots, F(t_m)]^T \quad (6)$$

모든 NDDOF에서 임의의 t_i에서의 F(t_i) 값은 다음과 같이 나타난다.

$$F(t_i) = [(f_1(t_i) - m_1 \ddot{x}(t_i), f_2(t_i) - m_2 \ddot{x}(t_i), \dots, f_N(t_i) - m_N \ddot{x}(t_i))]^T \quad (7)$$

수학적 편의를 위해 (4)는 다음과 같이 표현 된다.

$$\sum_{s=1}^L A_{rs} P_s = F_r \quad r=1, 2, \dots, m \times N \quad (8)$$

\hat{p}_s 를 판별해야할 구조계의 변수에 대한 가정치라 한다 면, 식(8)의 좌항은 $A_{rs} \hat{p}_s$ 이다. 모든 구조계 변수 L에 대하여 오차의 총합 E는 다음과 같다.

$$E = \sum_{r=1}^{m \times N} (F_r - \sum_{s=1}^L A_{rs} \hat{p}_s)^2 \quad (9)$$

오차를 최대한 감소시키기 위해서는 (9)를 각각의 매개 변수별 예측값으로 편미분하였을 경우 '0'이 되어야 한다. 이로부터 식 (10)을 유도할 수 있다.

$$\frac{\partial E}{\partial \hat{p}_s} = \sum_{r=1}^{m \times N} (F_r - \sum_{s=1}^L A_{rs} \hat{p}_s) A_{rs} = 0 \quad q = 1, 2, \dots, L \quad (10)$$

$$\sum_{r=1}^{m \times N} (\sum_{s=1}^L A_{rs} \hat{p}_s) A_{rq} = \sum_{r=1}^{m \times N} F_r A_{rq} \quad q = 1, 2, \dots, L \quad (11)$$

$$\hat{P}_{L \times 1} = \arg \min_{\theta} \|F - AP\|_2 = (A_{L \times (m \times N)}^T A_{(m \times N) \times L})^{-1} A_{L \times (m \times N)}^T F_{(m \times N) \times 1} \quad (12)$$

- 1) 전체 동적 자유도에 대해서 측정된 m개의 모든 샘플링 시간에 대한 속도 및 변위로 구성된 응답행렬 $[A](m \times N) \times L$ 을 식 (5)와 같이 구성한다.
- 2) $p(\ll m)$ 개의 샘플링 시간에 대해서 전체 동적 자유도에 대한 외부 입력하중 $f_i(t_j)$, $i=1, 2, \dots, N$, $j=1, 2, \dots, p$ 를 추정한다. 이때 외부 입력하중이므로 우선 $f_i(t_j)=0$ 으로 가정한다. 그리고 외부 입력하중과 관성력으로 이루어진 $F(p \times N) \times 1$ 를 단계 3.)과 같이 구한다. 여기서, 식 (12)의 해가 특이해(singular)가 되지 않게 하기위해서 $p \times N \geq L$ 을 만족하는 것으로 제한한다.
- 3) m개의 모든 샘플링 시간에 대해서 전체 동적 자유도에 대한 응답값을 획득 하였으므로, p개의 샘플링 시간에 대해서 식(6)의 $F(t_j)$ 를 구한다. 이 값을 이용하여 $F(p \times N) \times 1$ 를 구성할 수 있다.
- 4) 동적 응답행렬 $[A_{rs}](p \times N) \times L$ 가 획득되었으므로 식(11)을 참조하여 L개의 연립 방정식을 풀어서 구조모수 \hat{p} 를 구한다. 이때, $F(p \times N) \times 1$ 값은 단계 3.)에서 구한

값이고, 연립방정식의 해는 식(12)에서 m대신 p개의 샘플링 시간에 대해서 적용하여 추정하였다.

- 5) 단계 4.)에서 추정된 구조모수 추정값 \hat{p} 를 선형 지배 운동방정식인 식(3)에 대입하여 전체 m개의 샘플링 시간에 대하여 미지의 입력가진값 $f_i(t_j)$ 를 구한다.
- 6) 단계 5.)에서 추정한 모든 입력가진값에 대하여 이미 알고 있는 것으로 가정된 모든 입력 제한조건을 적용한다. 그리고 나서 다시 식(6)을 이용하여 전체 m개의 샘플링 시간에 대하여 $F(p \times N) \times 1$ 를 구성한다.
- 7) 단계 6.)에서 전체 m개의 샘플링 시간에 대하여 추정한 최종 입력가진값과 식(12)를 이용하여 다시 구조모수 \hat{p} 를 추정한다. 이때, 동적 응답행렬은 $[A](m \times N) \times L$ 이다.
- 8) 단계 7.)에서 추정한 구조모수 \hat{p} 를 다시 선형 지배 운동방정식인 식(3)에 대입하여 p개의 샘플링 시간에 대하여 미지의 입력가진값 $f_i(t_j)$ 를 구한다.
- 9) p개의 샘플링 시간에 대한 미지 입력가진값이 일정한 정도를 가지고 수렴할 때까지 단계3.)~단계8)을 반복한다. 이렇게 해서 수렴하게 되면 최종적으로 추정되어진 \hat{p} 가 바로 추정하고자 하는 미지의 구조모수이다.

2.2 개선된 QRD 최소자승법

단순반복 최소 자승법에서는 입력하중에 대한 초기조건(2단계 참조)이 가정 되었다. 그러나 이러한 가정은 실 구조물과 분명한 차이가 있어 신뢰성이 부족하다. 따라서 개선된 QRD 최소자승법은 다음과 같은 방법으로 입력하중을 산출함으로써 신뢰성을 높일 수 있다.

- 1) 구조물의 정보를 나타내는 변수 (강성과 감쇠계수)를 가정된다. 최초에 가정된 구조변수는 어떠한 값을 가정하여도 손상검출 결과에 영향을 미치지 않으므로 임의로 가정이 가능하다.
- 2) 동적응답 데이터 $A(Mn)L$ (식 (5))와 1단계에서 가정된 구조물 변수를 식(1)의 운동방정식에 대입하여 입력하중을 얻을 수 있다.
- 3) 2단계에서 구한 변수를 m개의 sampling time에서 적용하면 모든 NDDOF에서의 입력하중이 계산되어질 수 있다. 따라서 이는 단순반복 최소자승법에서 가정된 입력하중의 문제를 개선할 수 있을 것이다.
- 4) 계산된 입력치 $f(t_i)$ 는 최소자승법의 2번째 단계에 적용된 후 2번째에서 7번째 단계까지 반복되는 과정을 통하여 구조계 변수 \hat{p} 를 구한다. 단순반복 최소자승법에서 \hat{p} 를 계산하기위한 위한 가우스 방식은 Niu⁽³⁾

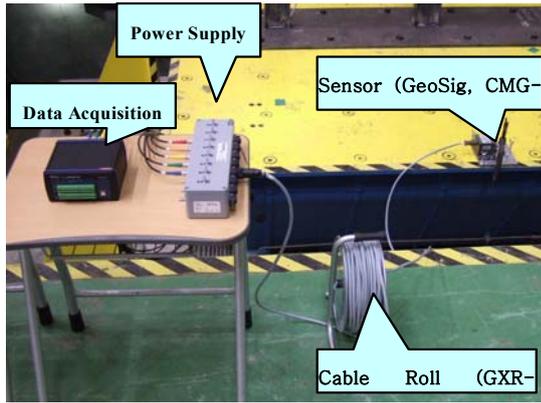


그림 1. 측정 장비

에 의해 제안된 QRD Method of Multiple Model Least-Squares(MMLS)로 치환될 수 있다.

2.3 구조물 강성 행렬

1) 비례감쇠 구조물

일반적인 비례감쇠 구조물의 운동지배방정식은 다음과 같다.

$$\alpha K \ddot{X}(t) + \beta M \dot{X}(t) + KX(t) = f(t) - M \ddot{X}(t) \quad (13)$$

전체좌표계 K는 다음과 같이 부계좌표계 k로 치환된다.

$$K = \sum_{i=1}^l [k]^i = \sum_{i=1}^l k_i S^i \quad (14)$$

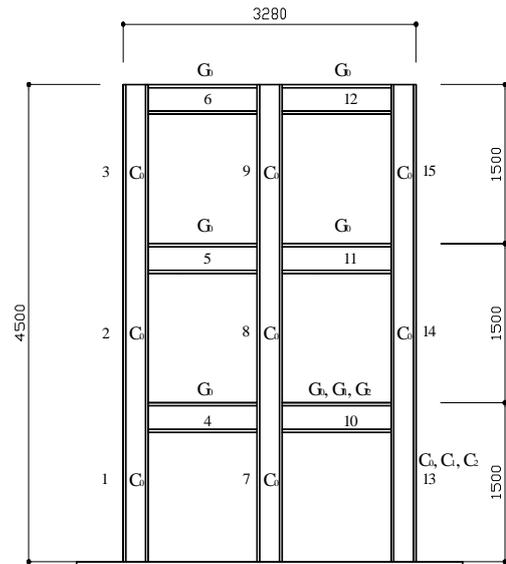


그림 2. 실험체 상세

S^i 는 부계 강성행렬로서 $N \times N$ 행렬이고, (13)식은 (14)식을 이용하여 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$k_1 S^1 X(t) + k_2 S^2 X(t) + \dots + k_l S^l X(t) + \alpha k_1 S^1 \dot{X}(t) + \alpha k_2 S^2 \dot{X}(t) \cdot \alpha k_1 S^1 \ddot{X}(t) + \alpha k_2 S^2 \ddot{X}(t) + \dots + \alpha k_l S^l \ddot{X}(t) + \beta M \dot{X}(t) = f(t) - M \ddot{X}(t) \quad (15)$$

(15)식은 식(4)의 형태로 정리하면 다음과 같다.

$$A(t) = [S^1 X(t) S^2 X(t) \dots S^l X(t) S^1 \dot{X}(t) S^2 \dot{X}(t) \dots S^l \dot{X}(t) M \ddot{X}(t)] \quad (16)$$

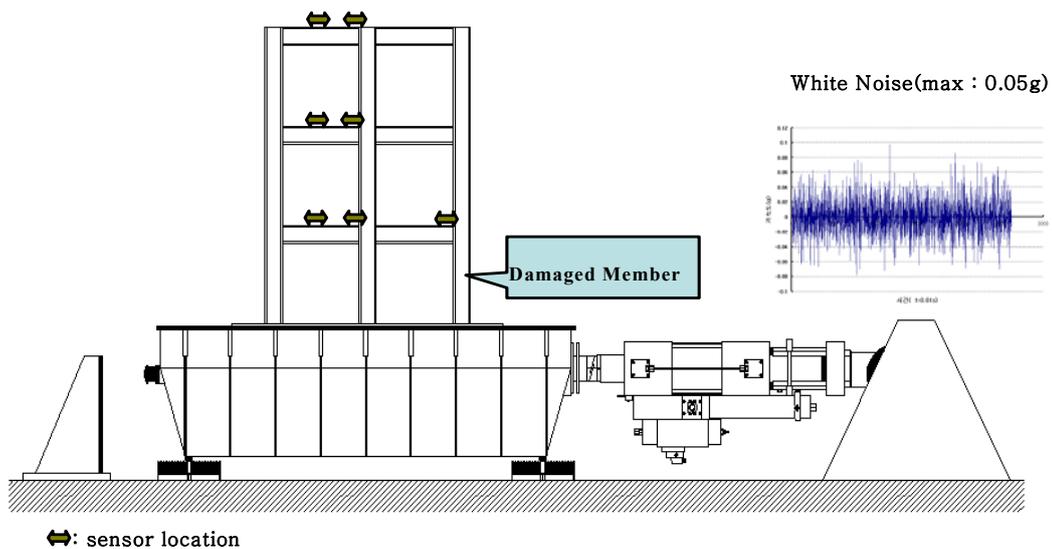


그림 3. 진동대 실험체 설치

$$P = \{k_1 k_2 \cdots k_l : k_1 k_2 \cdots \alpha k_l : \beta\}^T \quad (17)$$

$$F(t) = \begin{pmatrix} f_1 - m_1 \ddot{x}_1(t) \\ f_2 - m_2 \ddot{x}_2(t) \\ M \\ f_3 - m_3 \ddot{x}_3(t) \end{pmatrix} \quad (18)$$

2) 평면골조구조물

질량은 다음과 같이 절점에만 집중되는 것으로 가정한다.

$$M^i = \text{diag} \left[\frac{\bar{m}_i}{2} \left(1 \ 1 \ \frac{L_i}{39} \ 1 \ 1 \ \frac{L_i}{39} \right) \right] \quad (19)$$

여기서

\bar{m}_i : i번째 부재의 질량

L_i : I번째 부재의 길이

부재좌표계로 표현되는 평면골조 구조물의 부재 강성행렬은

$$k^i = \frac{E_i I_i}{L_i} \begin{bmatrix} A_i / I_i & 0 & 0 & -A_i / I_i & 0 & 0 \\ 0 & 12 / L_i & 6 / L_i & 0 & -12 / L_i & 6 / L_i \\ 0 & 6 / L_i & 4 & 0 & -6 / L_i & 2 \\ -A_i / I_i & 0 & 0 & A_i / I_i & 0 & 0 \\ 0 & -12 / L_i & -6 / L_i & 0 & 12 / L_i & -6 / L_i \\ 0 & 6 / L_i & 2 & 0 & -6 / L_i & 4 \end{bmatrix} \quad (20)$$

이를 전체좌표계로 변환하면

$$k^i = T^T \bar{k}^i T = T^T k_i k T = k_i s^i \quad (21)$$

여기서 S^i 는 전체좌표계로 표현되는 i번째 부재의 강성행렬.

3. 진동대 실험

개선된 최소자승법의 검증을 위해, 평면골조 구조물에 대한 진동대 실험을 수행하였다. 계측장비는 그림 1과 같이 저주파대 계측에 적합한 force balance type의 센서와 케이블, 전원 공급장치 그리고 data수집 장비들로 구성되었다. 실험체는 철골구조 3층 평면 골조로서 그림 2와 같다. 총 6개의 실험체가 제작 되었으며 1개의 기준실험체(3R0)는 표 1에 나타난 바와 같이 G0과 C0으로 구성되었으며 4개의 실험체는 보나 기둥 중 1곳에 손상이 발생된

표 1. 부재치수

Member		$I_x(\text{cm}^4)$	$A(\text{cm}^2)$	$E(\text{kg}/\text{cm}^2)$	Inertial moment ratio
G0	C0	820	21.83	2.1×10^6	1
G1	C1	666	17.85	2.1×10^6	0.81
G2	C2	487	23.66	2.1×10^6	0.59

것으로 가정하여 표 1과 같이 G1,C1 및 G2,C2로 구성되었다. 마지막 실험체(3RG2C2)는 기둥과 보에 동시에 손상된 것으로 손상부재는 G2와C2를 사용하였다. 실험체의 진동대 설치 상황 및 계측 위치는 그림 3과 같다. 실험체는 상시미진동의 구현을 위해 white noise를 사용하여 가력 하였다.

4. 손상검출

진동대 실험을 통하여 계측된 가속도 자료를 이용하여 개선된 최소자승법에 의한 역해석을 수행함으로써 구한 각 구조 부재의 강성을 산출하여 정리하면 표 2와 같다. 표 2에서 error는 역해석 결과로 구한 단면2차모멘트 I_x 를 표 1의 표준 단면2차모멘트 I_x 로 나눈 값이다. 표 2에 나타난 바와 같이 계산된 값과 표준치와의 오차가 전체적으로 4%~9% 범위로 나타났으며, 손상된 부재의 감소된 강성예측에서도 오차가 적게 나타나 본 연구에서 제시하는 개선된 최소자승법에 의한 역해석 알고리즘은 구조물의 손상검출에 유용하게 활용될 수 있는 것으로 판단된다. 또한 3RG2C2 실험체와 같이 복합손상이 발생한 구조물의 경우 주파수영역에서의 손상검출은 단일손상에 비해 손상검출의 신뢰도가 매우 낮아지는데 반해 본 연구에서와 같이 시간영역에서는 복합손상의 경우에도 손상검출의 신뢰도가 낮아지지 않는 것으로 나타났다. 또한 본 연구의 손상검출 기법은 부재의 강성을 손상지수로서 직접적으로 고려함으로 손상의 물리적 정보를 구체적으로 파악할 수 있다. 따라서 본 연구의 손상검출 알고리즘은 자연진동을 이용하여 구조물의 손상을 개별부재 수준까지 검출하는데 유용하게 활용될 것으로 판단된다.

5. 결론

- 1) 최소자승법에서 가정한 입력하중을 좀더 정확히 가정하도록 개선되었다.
- 2) 주파수영역의 역해석 층 단위 에서나 가능했던 손상 검출이 최소자승법을 이용해서 시간영역에서, 부재 수준에서 손상을 검출하는 것이 가능하였다.
- 3) 개선된 최소자승법을 사용하면, 손상 지수를 구조체의 강성으로써 직접 평가함으로써 신뢰도를 높일 수 있다.
- 4) 개선된 최소자승법에 의한 손상검출 기법을 평면골조

표 2. 부재강성 추정결과

Member	(a) 3R0		(b) 3RG1		(c) 3RG2		(d) 3RC1		(e) 3RC2		(f) 3RG2C2	
	Calculated I_x	Error*	Calculated I_x	Error								
1	795	0.97	776	0.946	751	0.916	730	0.89	731	0.891	770	0.939
2	797	0.972	763	0.93	750	0.915	728	0.888	745	0.909	762	0.929
3	772	0.941	764	0.932	753	0.918	701	0.855	751	0.916	731	0.891
4	790	0.963	771	0.94	761	0.928	750	0.915	770	0.939	740	0.902
5	801	0.977	773	0.943	765	0.933	761	0.928	761	0.928	761	0.928
6	785	0.957	761	0.928	765	0.933	745	0.909	775	0.945	775	0.945
7	789	0.962	785	0.957	769	0.938	759	0.926	736	0.898	729	0.889
8	785	0.957	785	0.928	755	0.92	765	0.933	725	0.884	735	0.896
9	781	0.965	781	0.952	756	0.922	755	0.92	762	0.929	725	0.884
10	780	0.951	591**	0.887	512**	1.051	765	0.933	801	0.977	601**	1.234
11	786	0.959	786	0.959	751	0.916	720	0.878	786	0.959	753	0.918
12	803	0.979	803	0.979	803	0.979	791	0.965	763	0.93	765	0.933
13	781	0.952	810	0.988	762	0.929	560**	0.841	502**	1.03	587**	1.205
14	780	0.951	771	0.94	765	0.933	795	0.97	755	0.921	744	0.907
15	782	0.954	760	0.927	761	0.928	767	0.935	737	0.899	766	0.934
	Average	0.961	Average	0.942	Average	0.937	Average	0.912	Average	0.93	Average	0.956

* Error : 계산된 단면2차모멘트/표준 단면2차모멘트
 ** 손상된 부재

구조물에 대한 진동대 실험으로 검증하였으나, 실용화를 위해 지속적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

auto and cross random decrement techniques and development of a system identification technique for the detection of structural deterioration," PhD thesis, Univ. of Maryland, College Park, Md

감사의 글

본 연구는 한국건설교통기술 평가원에서 위탁시행한 2004년도 건설핵심기술 연구 개발사업 (과제번호:04핵심기술(02-02) 및 과학기술부 우수연구센터 육성사업 (R11-2005-056-01003-0)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Natke, H. G., and Yao, J. T. P., eds. (1988). Structural safety evaluation based on system identification approaches. Friedr, Vieweg & Sohn, Braunschweig, Wies-baden.
2. Duan Wang, Achintya Haldar "ELEMENT-LEVEL System Identification with Un know Input" Journal of Engineering Mechanics, Vol.120, NO.1 January, 1994
3. Niu, S.S., L., and Bjrck, ., "Decomposition Methods for Solving Least-Squares Parameter Estimation,"IEEE Transactions on Signal Processing Vol.4, No. 11, Novemner, 1996
4. Beck, J. L., and Jennings, p. C. (1980). "Structural identification using linear models and earthquake engineering records." Int. J. Earthquake Engrg. Struct. Dynamics,8(2), 145-160.
5. Bedewi, N. E. (1986). "The mathematical foundation of the