

제한된 출력자료를 이용한 구조물의 손상도 추정 Identification of Structural Damage with Limited Output Measurement

최영민* 조효남** 황윤국*** 김정호*
Choi, Young-Min Cho, Hyo-Nam Hwang, Yoon-Koog Kim, Jung-Ho

ABSTRACT

In the previous study, an improved QRD (QR Decomposition)-ILS(Iterative Least-Squares) method is proposed to estimate the structural parameters at the element level using response data alone without using any information of excitation measurements for the assessment of local damages and deterioration in complex and large structural systems. But for a complex and large structural system, where response measurement at every dynamic degree of freedom(DDOF) is not possible, the absence of some observation points of responses and its effect on the proposed SI method must be studied. In the paper, a QRD-ILS technique that utilizes the known intact stiffness information estimated based on the visual inspection, field measurements and/or NDT tests is proposed to identify local damages of fracture critical members using measured responses only at limited DDOFs. A numerical example is used to illustrate the application of this technique. The results indicate that the proposed SI technique is very simple but efficient, since no input information are required with only limited observations.

1. 서 론

본 연구자의 기존연구^{(1),(2)}에서 제안한 개선된 QRD 반복최소자승법(ILS)을 적용하여 크기와 위치에 대해 완전 미지의 입력가진 자료로부터 구조물의 모든 구조모수를 추정하는 기법에 대해서 제시한 바 있다. 그러나 실 토목구조물에 구조계특성 추정기법을 적용함에 있어 입력가진 외에도 매우 많은 동적 자유도를 가지는 실 구조물에 대해서 전체 동적 자유도에 대한 응답값을 일시에 계측하는 것은 현실적으로 불가능하다. 따라서 본 논문에서는 육안점검이나 기본적인 정기점검과 같은 기초 조사의 결과를 바탕으로 요소수준의 국부 파괴위험 구조부재의 노후손상도계수를 제한된 동적 응답계측값과 이전 연구에서 제안하는 개선된 QRD 반복최소자승법을 이용하여 추정하는 기법을 개발, 제안하고자 한다.

* 정회원·한국건설기술연구원 선임연구원
** 정회원·한양대학교 토목·환경공학과 교수
*** 정회원·한국건설기술연구원 수석연구원

이러한 기법에 대한 연구는 실용적 개념의 구조계특성 추정기법(System Identification; SI)을 위해 반드시 필요하다고 사료된다. 특히 본 연구의 방법이 실용적인 의미를 갖는 것은 이미 발표한 완전 미지의 입력하중과 더불어 제한된 국부적인 동적 응답계측값만을 이용하여 구조물의 지배적인 손상도를 경제적이고 간단하면서 효율적으로 추정할 수 있으며 앞으로 상시 또는 자동 계측모니터링 자료로부터 실시간으로 구조물의 손상도를 추정할 수 있는 기법으로의 활용이 기대되기 때문이다.

이미 기존의 연구^{(3),(4)}에서도 제한된 응답계측값을 이용한 구조계특성을 추정하는 기법을 초보적이거나 제한한 바 있다. Wang은 단순 반복최소자승법에 의해 수치적으로 입력가진값의 크기를 추정한 후에, 생성된 입력가진값과 부분적인 동적 응답계측값을 이용하여 이미 일반화된 Extended Kalman Filter-Weighted Global Iteration(EKF-WGI) 기법을 적용하여 모든 구조모수를 추정할 수 있는 방법을 제안하였다. 즉, Wang의 연구에서는 2단계로 구조물의 구조모수를 추정하고 있음을 알 수 있다. 그러나 Wang이 제안한 기법은 전단형 골구조물과 같이 1개의 절점에 1개의 동적 자유도가 존재하며 한 절점에 두 개의 부재만이 연결되는 특수한 경우에만 수행할 수 있다는 것이다. 따라서 일반적인 구조형태인 보, 트러스나 라멘 등의 경우에도 제한된 응답계측값을 이용하는 기법을 적용할 수 있는 일반화된 기법이 요구된다.

2. 제한된 응답계측값을 이용한 구조계특성 추정

본 연구자가 제안하는 개선된 QRD 반복최소자승법은 입력 제한조건의 누락이나 수치적인 불량조건(ill-condition) 등에 따른 해의 수렴성 저하를 방지하면서 보다 나은 결과를 얻을 수 있는 방법임을 검증하였다^{(1),(2)}. 따라서 이전 연구에서 제안한 기법을 기초로 하여 본 연구에서는 외관조사나 정기점검과 같은 기본조사의 결과를 기초로 국부 파괴위험 부재에 대한 노후손상도를 추정하고자 할 때 제한된 측정점에서의 부분적인 동적 응답계측값을 이용하여서도 성공적으로 국부 부재 손상도를 추정할 수 있는 기법으로 확장하여 제안하고자 한다.

본 연구에서 제안하고자 하는 제한된 동적 응답계측값을 이용한 구조계특성 추정기법의 기본개념은 다음과 같다. 먼저, 기본조사의 결과로부터 손상도를 추정해야될 국부 파괴위험 부재가 선정되면 그 부재를 중심으로 부재번호와 절점 자유도번호를 부여한다. 이때 고려대상 부재는 손상도를 추정하고자 하는 부재의 양단 절점에 직접 연결되는 부재만을 포함시키며 절점은 이들 부재의 원단 절점까지를 포함시킨다. 이는 계측을 위한 측정점도 이들 절점에 대해서만 수행됨을 의미한다. 그림 1에는 앞서 설명한 내용을 구조물별로 적용하여본 개략적인 개념도를 나타낸다. 이와 같이 제한된 부재와 절점, 즉 제한된 동적 응답계측값을 고려할 수 있는 근거는 다음과 같다.

그림 1과 같이 손상도 추정대상 국부 부재를 중심으로 부재번호와 절점 자유도번호를 부여하고 질량을 집중(lumped) 질량행렬로 가정하면 총 동적 자유도 개수가 N 인 구조물의 손상도 추정대상 부재의 절점 자유도와 계측 자유도를 타부분과 분리(decoupling)시킨 형태로 나타낸 일반 절점 운동방정식의 전개형은 식(1)과 같다.

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & m_2 & \cdots & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & m_a & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & \cdots & m_r & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 & \cdots & m_N \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1(t) \\ \ddot{x}_2(t) \\ \vdots \\ \ddot{x}_q(t) \\ \vdots \\ \ddot{x}_r(t) \\ \vdots \\ \ddot{x}_N(t) \end{Bmatrix} +$$

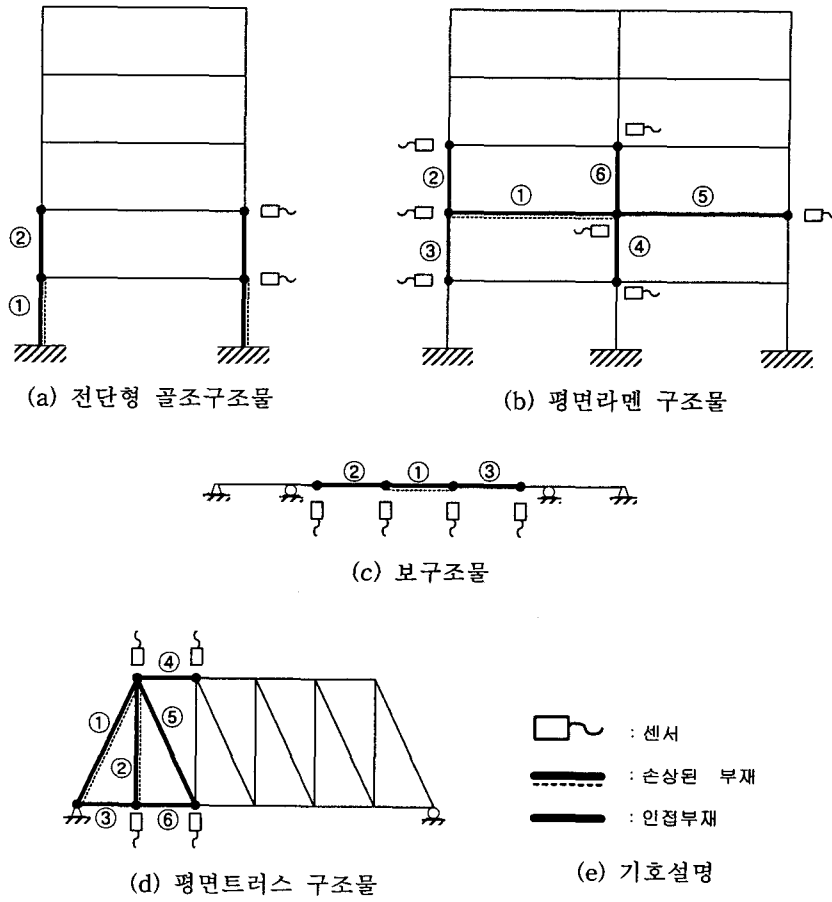


그림 1. 손상도 추정대상 부재와 계측 절점의 선정 개념도

$$\begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1q} & \cdots & c_{1r} & \cdots & 0 \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2q} & \cdots & c_{2r} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{q1} & c_{q2} & \cdots & c_{qq} & \cdots & c_{qr} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{r1} & c_{r2} & \cdots & c_{rq} & \cdots & c_{rr} & \cdots & c_{rN} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{N1} & c_{N2} & \cdots & c_{Nq} & \cdots & c_{Nr} & \cdots & c_{NN} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ \vdots \\ \dot{x}_q(t) \\ \vdots \\ \dot{x}_r(t) \\ \vdots \\ \dot{x}_N(t) \end{Bmatrix} +$$

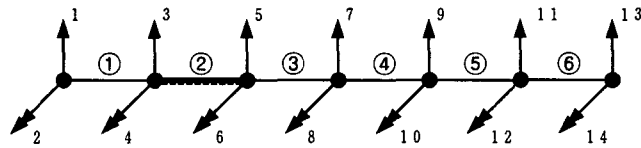
$$\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \cdots & k_{1q} & \cdots & k_{1r} & \cdots & 0 \\ k_{21} & k_{22} & \cdots & k_{2q} & \cdots & k_{2r} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{q1} & k_{q2} & \cdots & k_{qq} & \cdots & k_{qr} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{r1} & k_{r2} & \cdots & k_{rq} & \cdots & k_{rr} & \cdots & k_{rN} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{N1} & k_{N2} & \cdots & k_{Nq} & \cdots & k_{Nr} & \cdots & k_{NN} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_q(t) \\ \vdots \\ x_r(t) \\ \vdots \\ x_N(t) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_1(t) \\ f_2(t) \\ \vdots \\ f_q(t) \\ \vdots \\ f_r(t) \\ \vdots \\ f_N(t) \end{Bmatrix} \quad (1)$$

여기서, N 은 구조물의 총 동적 자유도 개수를, q 는 손상도 추정 부재의 총 절점 자유도 개수를, r 은 손상도 추정 부재의 총 절점 자유도 개수(q)와 이 부재 양단 절점에 연결된 모든 인접 부재들의 원단 절점의 절점 자유도 개수를 합한 총 개수를 나타낸다.

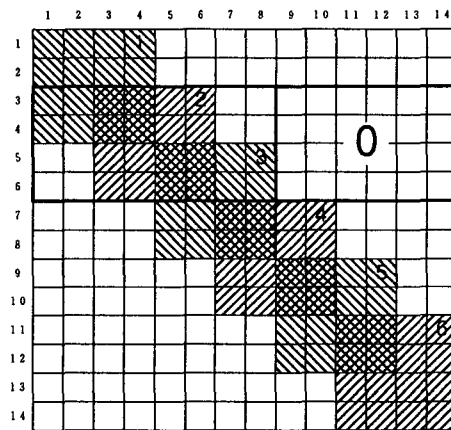
손상도 추정 부재의 양단 절점에 관련되는 절점 운동방정식은 나머지 절점 운동방정식과 분리(decoupling)되므로 식(1)의 파선과 같이 분할하면 다음과 같은 간략형으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 & \left[\begin{array}{c|c} [m_A]_{q \times r} & 0 \\ \hline 0 & [m_D]_{(N-q) \times (N-r)} \end{array} \right] \left\{ \begin{array}{c} \{\ddot{x}_A\}_{r \times 1} \\ \{\ddot{x}_B\}_{(N-r) \times 1} \end{array} \right\} + \\
 & \left[\begin{array}{c|c} [c_A]_{q \times r} & 0 \\ \hline [c_C]_{(N-q) \times r} & [c_D]_{(N-q) \times (N-r)} \end{array} \right] \left\{ \begin{array}{c} \{\dot{x}_A\}_{r \times 1} \\ \{\dot{x}_B\}_{(N-r) \times 1} \end{array} \right\} + \\
 & \left[\begin{array}{c|c} [k_A]_{q \times r} & 0 \\ \hline [k_C]_{(N-q) \times r} & [k_D]_{(N-q) \times (N-r)} \end{array} \right] \left\{ \begin{array}{c} \{x_A\}_{r \times 1} \\ \{x_B\}_{(N-r) \times 1} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{c} \{f_A\}_{q \times 1} \\ \{f_B\}_{(N-q) \times 1} \end{array} \right\} \quad (2)
 \end{aligned}$$

각각 분리된 구조모수행렬의 우측 상단행렬이 모두 영(零)행렬임을 알 수 있는데 이는 손상도 추정대상 부재의 양단에 직접 연결된 부재들의 원단 절점을 제외한 다른 모든 절점의 자유도는 운동방정식에 조합(assembly)되지 않기 때문이다. 이에 대한 간단한 예가 보구조물에 대해 그림 2에 제시되어있다.



(a) 보구조물의 절점번호



(b) 보구조물의 강도행렬 구성도

그림 2. 보구조물의 강도행렬

만약 ②번 부재를 손상도 추정대상 부재라 가정하면 이 부재의 절점 자유도인 3, 4, 5, 6에 대해 그림 2b의 강도행렬에서 해당 행성분(굵은 실선에 포함된 행)을 선정하면 열성분에는 3, 4, 5, 6 외에 인접 부재의 원단 절점인 1, 2, 7, 8 절점 자유도에 해당하는 강도행렬 성분이 포함되어 있음을 알 수 있다. 그리고 그 외의 절점들에 대해서는 모두 행렬요소가 '0' 임을 확인할 수 있다.

식(2)를 분해해서 손상도를 추정해야 하는 구조모수의 부행렬과 응답계측 부분만을 다시 정리하여 축소된 운동방정식을 나타내면 다음과 같다.

$$[m_A]_{q \times r} \{\ddot{x}_A\}_{r \times 1} + [c_A]_{q \times r} \{\dot{x}_A\}_{r \times 1} + [k_A]_{q \times r} \{x_A\}_{r \times 1} = \{f_A\}_{q \times 1} \quad (3)$$

따라서, 식(2)에서 아랫 분할행렬에는 손상도를 추정하여야 하는 대상 부재의 구조모수가 포함되지 않고 있으므로 식(3)만을 적용하여 해당 구조모수를 추정할 수 있을 것이다. 식(3)을 보다 상세한 행렬로 나타내면 식(4)와 같다.

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & m_2 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & m_q & \cdots & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1(t) \\ \ddot{x}_2(t) \\ \vdots \\ \ddot{x}_q(t) \\ \vdots \\ \ddot{x}_r(t) \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1q} & \cdots & c_{1r} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2q} & \cdots & c_{2r} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ c_{q1} & c_{q2} & \cdots & c_{qq} & \cdots & c_{qr} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ \vdots \\ \dot{x}_q(t) \\ \vdots \\ \dot{x}_r(t) \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \cdots & k_{1q} & \cdots & k_{1r} \\ k_{21} & k_{22} & \cdots & k_{2q} & \cdots & k_{2r} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ k_{q1} & k_{q2} & \cdots & k_{qq} & \cdots & k_{qr} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_q(t) \\ \vdots \\ x_r(t) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_1(t) \\ f_2(t) \\ \vdots \\ f_q(t) \end{Bmatrix} \quad (4)$$

식(4)에서 알 수 있는 바와 같이 동적 응답계측값을 r 개 절점 자유도, 즉 고려대상 부재의 인접 부재들의 원단에 해당하는 절점에 대해서만 필요하게 되므로 본 연구에서 제안하는 제한된 동적 응답계측값의 개념에 적합하게 된다. 예를 들면 그림 2a와 같은 보구조물의 경우 ②번 부재를 손상도 추정대상으로 하면, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8의 절점자유도에 대한 계측만 수행하면 되는 것을 의미한다.

기존 연구^{(1),(2)}에서 제안한 개선된 QRD 반복최소자승법을 적용하기 위하여 식(4)를 미지와 기지의 항으로 분류하여 간략하게 나타내면 식(5)와 같다. 특히 질량은 모두 기지의 값으로 하였으며 식(4)에 포함된 동적 응답값은 계측에 의해 구할 수 있으므로 모두 기지의 값이다.

$$[m_a : 0] \{\ddot{x}_a : \ddot{x}_b\}^T + [c_a : c_b] \{\dot{x}_a : \dot{x}_b\}^T + [k_a : k_b] \{x_a : x_b\}^T = \{f\}$$

또는,

$$[c_a] \{\dot{x}_a\} + [k_a] \{x_a\} = \{\{f\} - [m_a] \{\ddot{x}_a\} - [c_b] \{\dot{x}_b\} - [k_b] \{x_b\}\} \quad (5)$$

여기서, $[\mathbf{m}_a]$ 는 $(q \times q)$ 크기의 집중 질량행렬이고, $[\mathbf{k}_b]$, $[\mathbf{c}_b]$ 는 각각 인접 부재에 대해 전체 구조좌표계로 나타낸 $[q \times (r-q)]$ 크기의 절점 강도행렬 및 절점 감쇠계수행렬이고 이 값은 기지의 값으로 한다. 왜냐하면, 인접 부재의 구조모수는 알고 있는 것으로 가정하기 때문이다. $[\mathbf{k}_a]$, $[\mathbf{c}_a]$ 는 $(q \times q)$ 행렬로서 각각 미지 부재의 구조모수를 포함하는 관련 강도, 감쇠계수행렬을 나타내고 미지의 값이다. 또한 $\bar{\mathbf{x}}_a$, $\dot{\mathbf{x}}_a$, \mathbf{x}_a 는 $(q \times 1)$ 크기의 벡터로서 구조모수를 추정하는 부재의 절점 자유도에 해당하는 가속도, 속도, 변위벡터를 나타내고, $\bar{\mathbf{x}}_b$, $\dot{\mathbf{x}}_b$, \mathbf{x}_b 는 $[(r-q) \times 1]$ 크기의 벡터로서 인접 부재의 절점 자유도에 해당하는 가속도, 속도, 변위벡터를 나타내며 이는 계측에 의해 구할 수 있으므로 기지의 값이 된다.

식(5)의 왼쪽 항은 미지의 구조모수행렬과 기지의 응답계측값벡터로 구성되어 있고 오른쪽 항은 외부 입력하중을 제외한 나머지 항은 모두 기지값이기 때문에 기존 연구^{(1),(2)}의 기본식과 완전히 같은 형식이 된다.

따라서, 임의의 t 시간에서 r 개의 동적 자유도에 대한 기지의 응답행렬과 미지의 구조모수벡터의 적으로 재구성하면 다음과 같다.

$$[\mathbf{A}(t)]_{q \times L'} \{\mathbf{P}\}_{L' \times 1} = \{\mathbf{F}(t)\}_{q \times 1} \quad (6)$$

여기서, $[\mathbf{A}(t)]$: 제한된 절점 자유도의 속도, 변위에 관한 응답행렬, $\{\mathbf{P}\}$: 손상도 추정대상 부재의 구조모수(강도, 감쇠계수)벡터, $\{\mathbf{F}(t)\}$: 외부 입력하중, 관성력 및 인접 부재의 기지의 구조모수로 부터 추정된 감쇠력(damping force), 탄성력의 합벡터, q : 손상도 추정대상 부재의 양단 절점의 동적 자유도의 개수, L' : 손상도 추정대상 부재의 총 미지 구조모수의 수($\leq 2 \times q + 1$)

모든 m 개의 샘플링 시간에 대해 식(6)을 확장하여 재구성하면 다음 식(7)과 같다.

$$[\mathbf{A}]_{(m \times q) \times L'} \{\mathbf{P}\}_{L' \times 1} = \{\mathbf{F}\}_{(m \times q) \times 1} \quad (7)$$

식(7)의 최종 식은 기존 연구^{(1),(2)}의 일반식 형태로 유도됨으로써 이 이후의 과정은 본 연구자가 제안했던 개선된 QRD 반복최소사승법의 알고리즘을 이용하여 그대로 적용하면 된다.

3. 수치예

2장에서 기술한 방법의 타당성을 검증하기 위해 단순한 형식의 구조물인 전단형 골조구조물에 대해 적용하였다. 먼저, N층의 전단형 골조구조물에서 1층의 구조모수만을 추정하고자 할 때 제한된 동적 응답계측값만을 이용하여 추정할 수 있는 방법을 식(5)에 기초하여 질량, 감쇠계수, 강도행렬을 구성하고 이를 바탕으로 수치예제를 적용하고자한다.

전단형 골조구조물의 1층에 대한 동적 자유도는 1개이므로 $q=1$ 이 된다. 또한 1층 부재의 절점에 직접 연결된 인접 부재는 1개이고 원단의 절점 자유도도 1개이므로 $r=2$ 이다. 따라서 전단형 골조구조물의 손상도 추정대상 부재에 대한 식(5)에 나타낸 운동방정식의 해당행렬을 나타내면 다음과 같다.

$$[\mathbf{m}_a] = \{m_1 \ 0\}, \quad [\mathbf{c}_a] = \{c_1 + c_2 \quad -c_2\}, \quad [\mathbf{k}_a] = \{k_1 + k_2 \quad -k_2\}$$

표 1. 가정한 구조물의 구조모수

층	구조모수	질 량(M)	감쇠계수(C)	강도(K)
1		75.0	550.0	24000.0
2		65.0	850.0	22000.0
3		65.0	450.0	21000.0
4		60.0	500.0	19500.0
5		75.0	650.0	18000.0
6		80.0	550.0	16000.0

표 2. 기준값과 초기값으로 가정한 구조모수

구조모수		감쇠계수(C)		강도(K)		
		기준값	가정값 %오차	기준값	가정값 %오차	
1	구조모수 제1형 가정	550.0	550.0	24000.0	24000.0	
			0.000%			0.000%
	구조모수 제2형 가정		350.0		14000.0	
			36.364%		41.667%	
2*		850.0	850.0	22000.0	22000.0	
			0.000%		0.000%	

* 인접 부재는 기지의 값으로 가정하여야 하므로 정확한 확정값을 적용

여기서는 6층 전단형 골조구조물에 대해 하부 1, 2층의 제한된 동적 응답값만을 이용하여 손상부재로 가정하는 하부 1층의 구조모수를 추정하였다. 적용하고자 하는 구조물의 구조모수는 표 1과 같고 본 예제에서는 이중 음영 처리된 1층의 구조모수를 추정하고자 한다. 초기값으로 가정한 구조모수는 두 가지 형태로 적용하였으며 표 2와 같다. 여기서 손상도 추정대상 부재와 인접부재를 제외한 다른 부재의 구조모수는 고려되고 있지 않음을 주의하여야 한다. 즉, 본 연구에서 제안하는 기법은 모든 부재의 구조모수를 고려하는 것이 아니고 부분적인 구조모수만을 고려하는 실용적인 기법임을 확인할 수 있다. 또한 제한된 동적 응답계측값을 이용할 때에는 손상도를 추정하고자 하는 부재의 인접 부재의 구조모수는 아는 것으로 가정하고 있으므로 가정값이 아닌 확정적인 값을 주고 있음도 주의해야 한다.

입력가진값에 대한 어떠한 가정도 두지 않는다. 다만 초기값으로 가정한 표 2의 구조모수 값을 이용하여 본 연구의 방법에 의해 최종적으로 구조모수를 추정한 결과는 표 3에 요약, 정리하였다.

먼저, 강도와 감쇠계수에 대해 동시에 고려해 보면, 제한된 동적 응답값을 이용한 경우에는 모든 노이즈에 대해서 초기값으로 가정하는 구조모수와 관계없이 완전히 똑같은 결과를 보여주고 있다. 즉, 초기값으로 가정하는 구조모수에 민감하지 않음을 확인할 수 있다. 또한 전체 동적 자유도의 모든 동적 응답값을 이용한 결과와 비교해보면 다음과 같다. 추정오차가 최대로 차이가 나는 10% 노이즈에 대해서만 고려하여 보았다. 감쇠계수의 경우 모든 동적 응답값을 이용하면 최대 추정오차가 6.992~6.993%인데 반해 제한된 동적 응답값을 이용하면 1.726%로 보다 정확하게 추정되고 있으며, 강도의 경우에서도 마찬가지로 모든 동적 응답값을 이용하면 7.169%인데 반해 제한된 동적 응답값을 이용하면 0.709%로 정확하게 추정하고 있는 것을 확인할 수 있다. 이는 비록 단순한 예제이기는 하지만 개념적으로 본 연구에서 제안한 제한된 동적 응답계측값을 이용하는 기법이 잘 적용되고 있음을 알 수가 있다.

표 3. 제한된 응답계측값을 이용한 국부 부재의 구조모수 추정(1층)

종 류		구조모수		감쇠계수(C) (기준값 : 550.00)		강도(K) (기준값 : 24000.00)	
				추정값		추정값	
				제한된 응답값*	모 든 응답값**	제한된 응답값*	모 든 응답값**
0% 노이즈	구조모수		550.00	550.01	24000.11	24000.12	
	제1형 가정		0.001	0.001	0.000	0.000	
	구조모수		550.00	550.41	24000.11	24017.65	
	제2형 가정		0.001	0.074	0.000	0.074	
5% 노이즈	구조모수		545.24	538.77	23927.25	23505.36	
	제1형 가정		0.866	2.041	0.303	2.061	
	구조모수		545.24	539.33	23927.25	23529.63	
	제2형 가정		0.866	1.941	0.303	1.960	
10% 노이즈	구조모수		540.50	511.54	23829.89	22279.55	
	제1형 가정		1.726	6.992	0.709	7.169	
	구조모수		540.50	511.54	23829.89	22279.40	
	제2형 가정		1.726	6.993	0.709	7.169	

4. 고 찰

본 연구에서는 외관조사나 비파괴시험, 정기점검 등과 같은 기본적인 조사결과를 바탕으로 파괴위험 부재를 선정하며 이 부재에 직접 연결된 인접 부재들은 기지의 값으로 가정하고 이 인접 부재들의 절점에 대해서만 동적 응답값을 계측하여 기존 연구^{(1),(2)}에서 제안한 개선된 QRD 반복최소자승법으로 구조모수를 추정하는 기법을 제안하였다. 간단한 예로서 전단형 골조구조물에 적용하여본 결과, 제한된 계측응답만을 가지고도 구조모수를 추정하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 본 연구에서 제안한 제한된 동적 응답계측값을 이용한 개선된 QRD 반복최소자승법을 적용함에 있어 초기값으로 가정하는 구조모수와는 민감하지 않음을 확인할 수 있다. 따라서 실무에서도 기초적인 자료를 가지고 적절히 가정만 하면 합리적인 실 구조모수를 추정할 수 있으므로 본 연구에서 제안하는 기법은 매우 실용성이 높은 효율적인 방법으로 사료된다.

참고문헌

1. Choi, Y.-M. et al, "Structural Identification with Unknown Input Excitation," *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 5, No. 3, 2001, pp.207~213
2. 한국건설기술연구원, 구조물의 내하성능 평가기술 개발, 전기연 2000-084, 경기, 2000, p.191
3. Wang, D., *Element Level Time Domain System Identification Techniques with Unknown Input Information*, Ph.D. Dissertation, Department of Civil Engineering and Engineering Mechanics, Univ. of Arizona, 1995
4. Wang, D. and Haldar, A., "Element-Level system Identification with Unknown Input," *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 120, No. 1, 1994, pp.159~176