

제한된 모드형상을 이용한 개선된 손상평가 알고리즘

Improved Damage Assessment Algorithm Using Limited Mode Shapes

이 종 순[†] 조 효 남^{*} 허 정 원^{**} 이 성 칠^{***}
Lee, Jong Soon Cho, Hyo-Nam Huh, Jungwon Yi, Sung Chil
(논문접수일 : 2001년 8월 9일 ; 심사종료일 : 2001년 12월 4일)

요 지

본 논문은 교량 구조물의 손상위치 및 손상정도를 평가하기 위해 제한된 모드형상을 사용한 손상지수 방법에 기초한 실용적이며 개선된 손상평가 알고리즘을 제안한다. 손상평가 알고리즘에서 손상전·후의 구조물로부터 획득한 모드벡터의 민감도 비에 근거한 손상지수를 사용하여 손상위치의 파악 및 손상정도를 평가한다. 그러나 모드형상의 진폭이 거의 영의 값을 가지는 요소에 손상이 존재하면 모드벡터 민감도 비는 무한대의 값을 가지게 되며, 이는 손상평가를 불가능하게 한다. 따라서 본 논문에서는 구조물의 모드형상과 비례하는 민감도 필터를 도입한 개선된 기법을 적용함으로써, 이러한 문제점을 극복하였으며 또한 기존의 방법보다 손상위치와 손상정도 평가에 있어 상당한 정확도의 향상을 구현하였다. 제안된 알고리즘을 검증하기 위해 단순보와 2경간 연속보에 대해 손상평가를 수행하였으며, 기존의 방법에 의한 결과와 비교하였다.

핵심용어 : 손상 평가, 모드형상, 모드벡터 민감도, 손상지수

Abstract

This paper presents a practical damage detection algorithm based on damage index method that accurately assesses both the location and severity of the localized detriment in a bridge structure using only limited mode shapes. In the algorithm, the ratio of the modal vector sensitivity of an undamaged structure to that of a damaged structure is used as an indicator of damage. However, a difficulty arises when the damaged element is located at a node of mode where the amplitude of modal vector is close to zero, leading the singularity of the ratio (i.e., division-by-zero). This singularity problem is overcome by introducing a parameter denoted as a sensitivity filter, a function of mode shape of the structure, in modal vector sensitivity. Using this concept, an improvement can be considerably achieved in the estimation of both degree of severity and location of damage. To verify the proposed algorithm, its numerical implementations are conducted for a simply supported beam and a 2-span continuous beam.

Keywords : damage assessment, mode shape, modal vector sensitivity, damage index

[†] 책임저자. 한양대학교 토목·환경공학과 석사과정
전화: 031-400-4027; Fax: 031-406-5660
E-mail: jslee726@ihanyang.ac.kr
^{*} 정회원 · 한양대학교 토목·환경공학과 교수
^{**} 한양대학교 토목·환경공학과 BK21 연구교수
^{***} 한양대학교 토목·환경공학과 박사과정

• 이 논문에 대한 토론을 2002년 6월 29일까지 본 학회에 보내주시면 2002년 9월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

최근 발생한 교량구조물 붕괴(성수대교, 1994) 및 조기철거(당산철교, 1996)는 교량구조물 안전진단 및 유지관리의 중요성에 대한 국내의 사회적 인식변화의 전환점이 되었으며, 관련 기술에 대한 연구를 촉진시키는 계기가 되었다. 교량의 적절한 유지관리를 위해서는 공용중인 교량의 효과적이며 정확한 손상평가가 선행되어야 한다. 구조물의 손상에 대한 평가는 일상점검을 통한 육안점검이나 정밀진단을 통해 주로 이루어진다. 그러나, 육안점검을 통해서만 가시적인 큰 폭의 균열이나 손상정도가 큰 손상만을 감지할 수 있으며, 구조물의 열화에 따른 구조부재의 강성저하에 대한 평가는 거의 불가능하다. 또한, 현재 사용되는 정밀진단은 전체 구조물에 대한 열화정도의 개괄적인 정량화는 가능하지만, 구조물의 경미한 손상이나 국부적인 부재단위의 손상평가가 어려운 실정이다.

국내·외적으로 많은 연구자들이 실제 구조물에 대한 정적 및 동적응답을 이용하여 구조물에 존재하는 손상을 탐지하기 위한 연구들이 활발히 진행되어 왔으나, 현재까지도 손상위치 및 정도의 평가를 위한 효율적이며 광범위한 적용성(범용성) 및 높은 정확도를 제공하는 평가기법에 대한 연구는 개선의 여지가 많으므로 이에 대한 연구가 향후 상당기간동안 지속적으로 수행되어질 것으로 판단된다. 실제 구조물의 응답을 이용한 손상평가의 기본적인 개념은 구조물에 존재하는 손상으로 인해 손상 전·후에 구조물의 응답이 변화하는 것에 기초한다. 손상지수(damage index) 기법^{1)~4)}은 구조물로부터 획득한 모드정보⁵⁾를 이용하는 방법으로서 구조물의 손상을 요소 강성의 저하로 정의하고 손상으로 인한 구조물의 동특성^{6)~8)}의 민감도 변화를 이용하여 손상위치 및 정도를 평가한다.

본 논문에서는 기존의 손상지수기법을 개선하여 손상위치 및 정도 추정의 정확성을 향상시켰다. 무 손상상태의 구조물에 대한 모드특성이 미지인 경우에도 적용할 수 있도록 제안된 손상평가 알고리즘에서는 SI(system identification) 개념을 도입하여 기준모형을 결정하였고, 이 기준모형에 대한 고유치 해석을 통해 구조물의 손상발생 전의 동특성을 수치해석적으로 도출하였다. 또한 기존 연구들에서 손상평가 알고리즘을 전단변형을 무시한 Bernoulli-Euler 보 모델^{2),3)}에 적용하였으나, 본 논문에서는 실 교량 구조물에서의 전

단변형에 의한 처짐의 영향을 고려하기 위해 Timoshenko 보 모델을 적용하였다. 개선된 손상지수기법을 검증하기 위해 단순보와 2경간 연속보 모델을 대상으로 수치해석적으로 수행하였다.

2. 손상 평가 알고리즘

2.1 개선된 손상지수기법

구조계의 운동방정식 해는 조화함수로 가정할 수 있으며, 이는 고유치 문제로서 구조물의 고유진동수와 고유벡터는 질량과 강성의 함수로 정의된다. 따라서 구조계의 질량 또는 강성의 변화는 고유진동수 및 고유벡터의 변화를 유발하므로 구조계의 고유진동수 및 고유벡터의 변화로부터 구조물의 손상발생 여부를 판단할 수 있다. 구조계의 강성 변화는 고유진동수의 변화를 초래하지만 동일한 고유진동수 변화를 유발시키는 손상의 경우는 무수히 많이 존재하므로 고유진동수의 변화로부터 손상위치를 탐색하기 위해서는 번거로운 최적화 기법이 필요할 뿐만 아니라 고유진동수는 강성저하에 그다지 민감하게 반응하지 않는다는 연구결과¹⁰⁾도 보고된 바 있다. 그러므로 본 연구에서는 구조계의 강성과 고유벡터만을 고려한 개선된 손상지수기법을 제안하며, 알고리즘을 간략히 살펴보면 아래와 같다.

요소수가 NE 개이고 절점수가 N 개인 손상전 구조물의 i 번째 진동모드의 모드강성 k_i 는 다음과 같다.

$$k_i = \Phi_i^T K \Phi_i \quad (1)$$

여기서 Φ_i 는 i 번째 모드벡터이며, K 는 구조계의 강성행렬이다. i 번째 진동모드의 모드강성에 대한 j 번째 요소의 기여도 k_{ij} 는 다음과 같다.

$$k_{ij} = \Phi_i^T K_j \Phi_i \quad (2)$$

여기서, K_j 는 전체 강성행렬에 대한 j 번째 요소의 기여도이다. j 번째 요소의 강성은 재료적 강도 특성(C_j)과 기하학적 양(K_{j0})으로 구분할 수 있으며, (즉 $K_j = C_j K_{j0}$), i 번째 진동모드의 모드에너지에 대한 j 번째 요소의 기여도, 즉 민감도 F_{ij} 는 다음과 같다.

$$F_{ij} = \frac{k_{ij}}{k_i} \quad (3)$$

손상후의 구조물에 대해 이상의 식들을 기술하면 다음과 같다.

$$k_i^* = \Phi_i^{*T} K^* \Phi_i^*, \quad k_{ij}^* = \Phi_i^{*T} K_j^* \Phi_i^*,$$

$$K_j^* = C_j^* K_{j0}, \quad F_{ij}^* = \frac{k_{ij}^*}{k_i^*} \quad (4)$$

여기서, *는 손상 구조물의 경우를 나타낸다.

국부적인 손상이 발생한 손상구조물의 진동모드형상은 손상발생 전의 진동모드형상과 거의 같거나 또는 편차가 있다고 하더라도 미소하며, 편차가 발생하는 범위는 손상요소의 근방에 한정된다.¹¹⁾ 따라서 손상정도가 크지 않은 경우, 각각의 요소에 저장되는 모드변형에너지는 구조물 손상발생 전·후에 동일하다고 가정할 수 있으며, 다음 식(5)가 성립한다.

$$F_{ij}^* \approx F_{ij} \quad (5)$$

그러나 식(5)의 F_{ij} 와 F_{ij}^* 는 일반적으로 1보다 매우 작은 값이므로 손상에 의한 k_{ij}^* 의 미소한 변화는 큰 편차를 유발한다. 특히 고유벡터의 진폭이 작은 부위에 위치한 요소의 경우에 그 편차는 더욱 커지게 되며, 이에 따라 위의 가정은 타당성을 상실하게 된다. 따라서 본 연구에서는 식(5)의 안정성을 유지시키기 위하여 민감도 필터 ϵ 을 도입한 아래 식(6)을 사용하였다.

$$\frac{F_{ij}^* + \epsilon_{ij}}{F_{ij} + \epsilon_{ij}} = 1 \quad (6)$$

여기서, ϵ_{ij} 는 i 번째 진동모드에 대한 j 번째 요소의 민감도필터이다.

위 식에서 민감도 필터를 크게 취할수록 관계식은 보다 안정되지만, 과도한 필터의 사용으로 인해 손상에 의한 고유벡터의 변화가 반영되지 못하는 문제점이 발생할 수 있으므로 적절한 민감도 필터의 선택이 매우 중요하다. 기존 연구^{2),3)}에서 민감도 필터를 일정한 값으로 사용하였을 때 지점과 가까운 부분에서는 손상이 과소 평가되고 지간의 중앙부에서는 과대 평가되는 문제점이 있다. 본 연구에서는 이 문제점을 해결하기 위해 민감도필터를 지간의 위치에 따라 고유벡터의 값과 같은 비율로 변화도록 수치해석을 통하여 결정하였으

며, 다음절에서 보다 상세히 설명되어진다.

식(6)에 식(1)~(4)를 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{C_j^*}{C_j} \frac{\left(\Phi_i^{*T} K_{j0} \Phi_i^* + \frac{\epsilon_{ij}}{C_j^*} \sum_{k=1}^{NM} \Phi_i^{*T} K_k^* \Phi_i^* \right) \Phi_i^{*T} K \Phi_i}{\left(\Phi_i^T K_{j0} \Phi_i + \frac{\epsilon_{ij}}{C_j} \sum_{k=1}^{NM} \Phi_i^T K_k \Phi_i \right) \Phi_i^{*T} K^* \Phi_i^*} = 1 \quad (7)$$

구조계의 질량행렬은 구조물의 형상, 재원 및 재료적 성질로부터 결정될 수 있으므로 Φ_i^* 를 구조물의 질량에 대해 정규화(mass normalization)하면 다음 식의 관계가 성립한다.

$$\Phi_i^{*T} K^* \Phi_i^* = \omega_i^{*2} \quad (8)$$

여기서, ω_i^* 는 손상구조물의 i 번째 진동모드의 고유진동수이다.

식(8)을 식(7)에 대입하고, j 번째 요소의 손상위치지표 β_j 는 진동모드가 NM 개 존재하는 경우 아래 식(9)로 표현되며, 그 값은 1보다 크다.

$$\beta_j = \frac{C_j}{C_j^*} = \frac{\sum_{i=1}^{NM} \left\{ \left(\Phi_i^{*T} K_{j0} \Phi_i^* + \sum_{k=1}^{NE} \epsilon_{ki} \Phi_i^{*T} K_{k0} \Phi_i^* \right) \Phi_i^{*T} K \Phi_i \right\}}{\sum_{i=1}^{NM} \left\{ \left(\Phi_i^T K_{j0} \Phi_i + \sum_{k=1}^{NE} \epsilon_{ki} \Phi_i^T K_{k0} \Phi_i \right) \omega_i^{*2} \right\}} \quad (9)$$

위의 손상위치지표 β_j 는 구조물 임의의 모든 위치에서 발생 가능하므로 랜덤변량으로 고려하는 것이 합리적이며, 이에 따라 표준정규화(standard normalization)하면 식(10)과 같다.

$$\beta_j^n = \frac{\beta_j - \bar{\beta}_j}{\sigma_j} \quad (10)$$

여기서, β_j^n 는 정규화된 β_j , $\bar{\beta}_j$ 는 β_j 의 평균, σ_j 는 β_j 의 표준편차이다.

손상위치는 가설검정을 이용하여 결정한다. 가설검정은 검정 신뢰수준 95%($Z=1.96$)로 하여 $\beta_j^n \geq (Z=1.96)$

이면 귀무가설 (H_1 : 요소에 손상존재)을 채택하고 $\beta_j^* < (Z = 1.96)$ 이면 대립가설 (H_0 : 요소의 무손상)을 채택한다.

구조물의 손상에 의한 강성의 저하 정도는 식(11)로 계산되는 손상정도지표 α_j 에 의해 식(12)를 사용하여 결정한다.

$$\alpha_j = \frac{1}{\beta_j} - 1, \quad -1 < \alpha_j < 0 \quad (11)$$

$$C_j^* = C_j(1 + \alpha_j) \quad (12)$$

2.2 민감도 필터

손상전·후 구조물의 고유벡터 민감도 식(5)를 안정시키기 위해 기존의 방법에서는 식(5)의 분모 분자에 1 또는 일정한 상수를 더했으나, 제안된 방법에서는 부재의 위치에 따라 변화하는 상수를 적용한다. 이때 분자 분모에 더해주는 상수는 마치 신호처리에서 필터(이하 민감도 필터)와 같은 역할을 하게 된다. 따라서 민감도 필터의 크기를 적절히 결정해야만 정확한 손상추정이 가능하다. 민감도 필터의 값이 클수록 고유벡터 민감도 식은 안정되지만 너무 큰 경우 손상에 의한 민감도 벡터의 변화가 필터 값에 지배되어 손상평가가 매우 어렵게 된다.

본 논문에서는 식(5)의 민감도가 i 번째 진동모드의 모드변형에너지에 대한 j 번째 부재의 모드변형에너지이므로 j 번째 부재의 민감도 필터는 i 번째 모드형상과 밀접한 관계가 있으므로 진동모드의 최대 값에 근거하여 필터 값을 결정하며, 한 진동모드에 대한 민감도 필터의 최대 값은 다음과 같이 결정할 수 있다. 먼저 손상평가에 사용하고자 하는 구조물의 i 번째 진동모드의 최대 값이 발생하는 요소 위치를 먼저 수치 해석적으로 파악한 후, 그 요소에 손상이 존재할 때 가장 정확한 손상평가 결과를 주는 민감도 필터를 결정한다. 최대 민감도 필터의 크기가 결정되면 각 요소별 민감도 필터의 크기는 각 요소 위치에서의 모드형상 크기에 비례하도록 변화시키면 된다. 이렇게 결정된 민감도 필터는 그 크기에 따라 손상 정도가 민감하게 되므로 진동모드 진폭의 최대 값(P)을 적용하였을 때와 그보다 작은 값(0.5P, 0.8P etc)들을 적용하였을 때에 대한 손상 추정 결과에 대해서는 다음 절에서 기술한다. 기존의 방

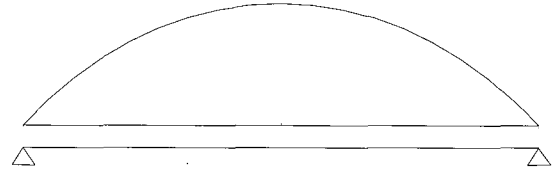


그림 1 단순보에서의 민감도 필터

표 1 단순보 및 2경간 연속보의 최대 민감도 필터

구분	1차 진동모드	2차 진동모드	3차 진동모드	4차 진동모드
단순보	2/NE	1.75/NE	1.3/NE	1.1/NE
2경간 연속보	2.25/NE	1.3/NE	2.3/NE	1.3/NE

법에 의해 진동 모드의 진폭이 작은 위치에서 손상위치를 찾지 못하거나 손상 정도 추정 오차가 크게 발생하는 지점부 근처에서도 적용할 수 있음을 살펴본다.

단순보의 경우 1차 진동모드벡터의 최대진폭은 그림 1에서 보는 바와 같이 단순보의 중앙에서 발생한다. 중앙 위치의 요소에 손상이 존재할 때 정확한 손상평가 결과를 주는 민감도 필터크기는 단순보의 경간길이와 전체 요소 수(NE)를 바꾸면서 수행한 결과 경험적으로 약 2/NE가 됨을 알 수 있었다. 따라서 1차 진동모드의 모드형상을 손상평가에 사용할 경우 단순보의 각 요소 위치에서 민감도 필터의 크기는 1차 진동 모드형상에 비례하여 변화하도록 결정한다. 단순보의 2차~4차 진동모드에 대한 최대 민감도 필터 및 2경간 연속보의 최대 민감도 필터의 크기도 위의 절차와 동일하게 구할 수 있으며 결과는 표 1과 같다.

3. 수치해석을 통한 손상평가

3.1 단순보의 손상평가

개선된 손상평가 알고리즘을 검증하기 위해 먼저 단순보에 대해 손상평가 알고리즘을 적용하였다. 보 요소의 모델은 진단변형의 영향 유무에 따라 보통 Bernoulli-Euler 보 모델과 Timoshenko 보 모델로 고려할 수 있는데, 실제 교량에서 전단이 처짐에 미치는 영향을 고려하기 위하여 본 연구에서는 Timoshenko 보 모델을 사용하였다. 최대 민감도 필터의 크기를 결정하기 위해 경간장, 요소 수 및 손상정도를 변화시키면서 수행한 결과, 최대 민감도 필터의 크기는 경간 길이에는

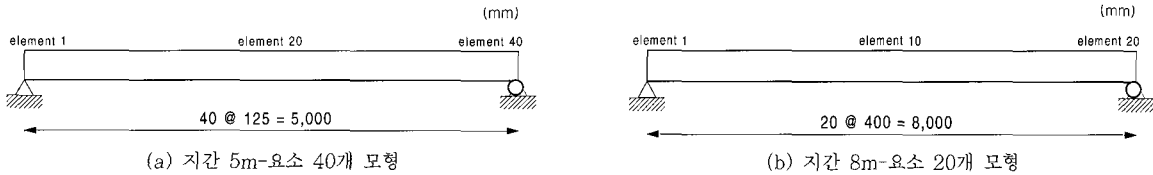


그림 2 단순보에 사용된 모형

표 2 해석모형의 단면 및 재료의 특성

구 분	높이 $H(\text{mm})$	단면적 $A(\text{m}^2)$	단면 2차 모멘트 $I(\text{m}^4)$	탄성계수 $E(\text{tonf}/\text{m}^2)$	단위중량 $\rho(\text{tonf}/\text{m}^3)$
물 성 치	200	2.716×10^{-3}	1.84426×10^{-5}	2.100×10^7	8.002×10^{-1}

무관하며 요소 수만의 함수로 표현될 수 있음이 판명되었으며 그 결과가 표 1에 표시하였다. 기존의 손상평가 알고리즘에서는 식(5)의 안정화를 위한 민감도 필터 값으로 1 또는 임의의 상수를 고려대상 요소의 위치와 무관하게 일률적으로 사용하였다. 이 경우 진동모드의 진폭이 작은 부위에 손상이 존재하는 경우 손상평가 정확도가 떨어진다. 본 논문의 개선된 손상평가 알고리즘에서는 1차 모드만을 고려할 경우 민감도 필터의 크기는 최대 $2/NE$ 에서 최소 0까지 요소의 지점에 대한 기하학적 상대위치에 따르는 고유벡터의 크기에 비례하는 값으로 선택하였다. 수치해석을 통한 손상평가는 경간장 5m, 요소 수 40개로 분할한 경우와,

경간장 8m, 요소 수 20개로 분할한 경우에 대해 손상평가를 실시하였다. 수치해석에 사용한 보 모델은 그림 2와 같고 물성치는 표 2와 같다.

수치해석에 있어 부재의 손상은 요소 단면의 감소를 통한 강성을 저하시킴으로써 도입하였고, 손상평가 알고리즘의 검증을 위해 손상정도는 -5%와 -20%로 취하였다. 구조물의 모드형상과 고유진동수는 범용구조해석 프로그램인 SAP2000을 사용하여 구하였다.

표 3과 4는 지간길이 5m이고 요소 수가 40개인 단순보에 1개소의 손상을 도입한 경우의 손상평가 결과이며, 표 4는 2개소에 손상을 도입한 경우에 대한 결과이다. 표 5와 6은 지간길이 8m이고, 요소수가 20개

표 3 단순보(지간 5m)-1개소 손상

진동 모드 차수	실 제 손 상		추 정 된 손 상								
			기 존 방 법			개 선 한 방 법					
						최대값의 100%			최대값의 50%		
손상 요소	손상정도 (%)	손상 요소	손상정도 (%)	오차 (%)	손상 요소	손상정도 (%)	오차 (%)	손상 요소	손상정도 (%)	오차 (%)	
1차	20번	-5.0	20번	-0.5	-90.0	20번	-4.8	-4.0	20번	-6.3	26.0
1~2차	20번	-5.0	20번	-	-	20번	-3.8	-24.0	20번	-1.9	-62.0
1~3차	20번	-5.0	20번	-0.4	-92.0	20번	-5.2	4.0	20번	-6.6	32.0
1~4차	20번	-5.0	20번	-0.1	-98.0	20번	-2.6	-48.0	20번	-3.1	-38.0
1차	10번	-20.0	10번	-1.3	-93.5	10번	-17.9	-10.5	10번	-5.6	12.0
1~2차	10번	-20.0	10번	-2.5	-87.5	10번	-21.0	5.0	10번	-6.4	28.0
1~3차	10번	-20.0	10번	-1.4	-93.0	10번	-19.2	-4.0	10번	-5.8	16.0
1~4차	10번	-20.0	10번	-0.2	-99.0	10번	-15.4	-23.0	10번	-2.4	-52.0
1차	8번	-5.0	8번	-0.2	-96.0	8번	-4.6	-8.0	8번	-5.2	4.0
1~2차	8번	-5.0	8번	-0.4	-92.0	8번	-4.8	-4.0	8번	-6.3	26.0
1~3차	8번	-5.0	8번	-0.4	-92.0	8번	-5.2	4.0	8번	-6.5	30.0
1~4차	8번	-5.0	8번	-0.2	-96.0	8번	-4.1	-18.0	8번	-5.2	4.0

표 4 단순보(지간 5m)- 2개소 손상

진동 모드 차수	실 제 손 상		추 정 된 손 상					
			기 존 방 법			개 선된 방 법		
	손상요소	손상정도(%)	손상요소	손상정도(%)	오차(%)	손상요소	손상정도(%)	오차(%)
1차	5, 20번	-5.0	5번	-	-	5번	-2.5	-50.0
			20번	-0.5	-90.0	20번	-4.8	-4.0
1~2차	5, 20번	-5.0	5번	-0.2	-96.0	5번	-4.0	-10.0
			20번	-	-	20번	-1.5	-70.0
1~3차	5, 20번	-5.0	5번	-0.3	-94.0	5번	-5.0	0
			20번	-0.4	-92.0	20번	-5.1	2.0
1~4차	5, 20번	-5.0	5번	-0.4	-92.0	5번	-5.3	6.0
			20번	-	-	20번	-2.3	-54.0

표 5 단순보(지간 8m)-1개소 손상

진동 모드 차수	실 제 손 상		추 정 된 손 상					
			기 존 방 법			개 선된 방 법		
	손상위치	손상정도(%)	손상위치	손상정도(%)	오차(%)	손상위치	손상정도(%)	오차(%)
1차	1번	-5.0	1번	-	-	1번	-5.4	8.0
1~2차	1번	-5.0	1번	-	-	1번	-5.5	10.0
1~3차	1번	-5.0	1번	-0.1	-98.0	1번	-5.5	10.0
1~4차	1번	-5.0	1번	-0.1	-98.0	1번	-5.5	10.0
1차	7번	-5.0	7번	-0.7	-86.0	7번	-4.4	-12.0
1~2차	7번	-5.0	7번	-0.7	-86.0	7번	-4.3	-14.0
1~3차	7번	-5.0	7번	-0.1	-98.0	7번	-3.7	-26.0
1~4차	7번	-5.0	7번	-0.5	-90.0	7번	-4.7	-6.0
1차	11번	-5.0	11번	-0.9	-82.0	11번	-4.6	-8.0
1~2차	11번	-5.0	11번	-	-	11번	-5.4	8.0
1~3차	11번	-5.0	11번	-0.7	-86.0	11번	-4.9	-2.0
1~4차	11번	-5.0	11번	-0.2	-86.0	11번	-3.5	-30.0
1차	5번	-20.0	5번	-2.4	-88.0	5번	-17.5	-12.5
1~2차	5번	-20.0	5번	-4.3	-78.5	5번	-20.2	0.0
1~3차	5번	-20.0	5번	-2.8	-86.0	5번	-18.5	-7.5
1~4차	5번	-20.0	5번	-0.8	-96.0	5번	-18.7	-6.5

인 경우 각각에 대한 손상평가 결과이다. 지간길이 5m의 1개소 손상을 고려한 단순보의 경우, 각 진동모드(1, 2 및 3차)의 최대 고유벡터 값의 발생 위치와 일치하는 요소인 20, 10, 그리고 8번의 각 요소에 대하여 수치해석을 수행하였다. 각 요소에 대한 손상을 20번과 8번 요소에 대해서는 원래 부재단면의 5% 그리고 10번 요소는 20%로 가정하였다. 2개소 손상의 경우에는 5번과 20번 요소에 5%의 동일한 손상을 동시에 도입한 경우에 대하여 해석을 수행하였다. 지간길이

8m의 1개소 손상 경우는 이전과 동일하게 11번과 7번 요소에 5% 그리고 5번 요소에 20% 손상을 도입하였다. 그리고 추가적으로 지점부와 연결되는 1번 요소에 5%의 손상을 도입한 경우를 다루었는데, 이는 기존의 손상평가기법이 이 요소에서 많은 오차를 포함하므로 이 문제점에 대한 제안된 기법의 개선정도를 평가하기 위한 것이다. 마지막으로 지간길이 8m의 2개소 손상은 3번과 11번 요소에 5%로 동일하게 도입한 경우를 고려하였다.

표 6 단순보(지간 8m)-2개소 손상

진동 모드 차수	실 제 손 상		추 정 된 손 상					
			기 존 방 법			개 선 된 방 법		
	손상위치	손상정도(%)	손상위치	손상정도(%)	오차(%)	손상위치	손상정도(%)	오차(%)
1차	3, 11번	-5.0	3번	-	-	3번	-2.6	-48.0
			11번	-0.9	-82.0	11번	-4.5	-10.0
1~2차	3, 11번	-5.0	3번	-0.5	-90.0	3번	-4.4	-12.0
			11번	-	-	11번	-6.0	10.0
1~3차	3, 11번	-5.0	3번	-0.7	-86.0	3번	-4.7	-6.0
			11번	-0.6	-88.0	11번	-4.5	-10.0
1~4차	3, 11번	-5.0	3번	-0.7	-86.0	3번	-5.0	0
			11번	-	-	11번	-3.7	-26.0

결과는 표 3~6에서 보여주듯이 Timoshenko 보 모델에 대해 기존에 제안된 방법은 손상이 1개소인 경우에 손상의 위치를 비교적 잘 추정하지만 손상정도에 있어서는 오차가 상당히 크다는 사실이 판명되었다. 또한 손상이 2개소에 존재하는 경우 기존의 방법은 손상 정도 추정에 큰 오차가 발생할 뿐만 아니라 정확한 손상 위치의 판별에 실패한 경우가 다수 발생하였다. 한편 본 연구에서 제안한 개선된 방법을 적용한 경우 손상 위치는 거의 완벽하게 추정할 수 있었으며 손상정도도 상대적으로 매우 만족할 만한 범위의 오차를 보여주었다.

한편 최대 민감도 필터 값보다 작은 값(30%, 50%, 80%)을 적용하였을 때에는 최대 민감도 필터 값을 그대로 사용하였을 때보다 손상정도 추정 오차가 커짐을 알 수 있었으며, 최대값의 50%에 대한 결과를 표 3에 제시하였다.

개선된 방법 사용시 손상요소 수가 1개소인 경우에는 1차 진동모드만으로도 비교적 정확한 손상평가를 할 수 있지만, 손상요소 수가 2개소인 경우에는 1차~4차 진동모드를 손상평가에 모두 사용하는 것이 높은 정확도의 손상평가를 보장하는 필요조건임을 알 수 있

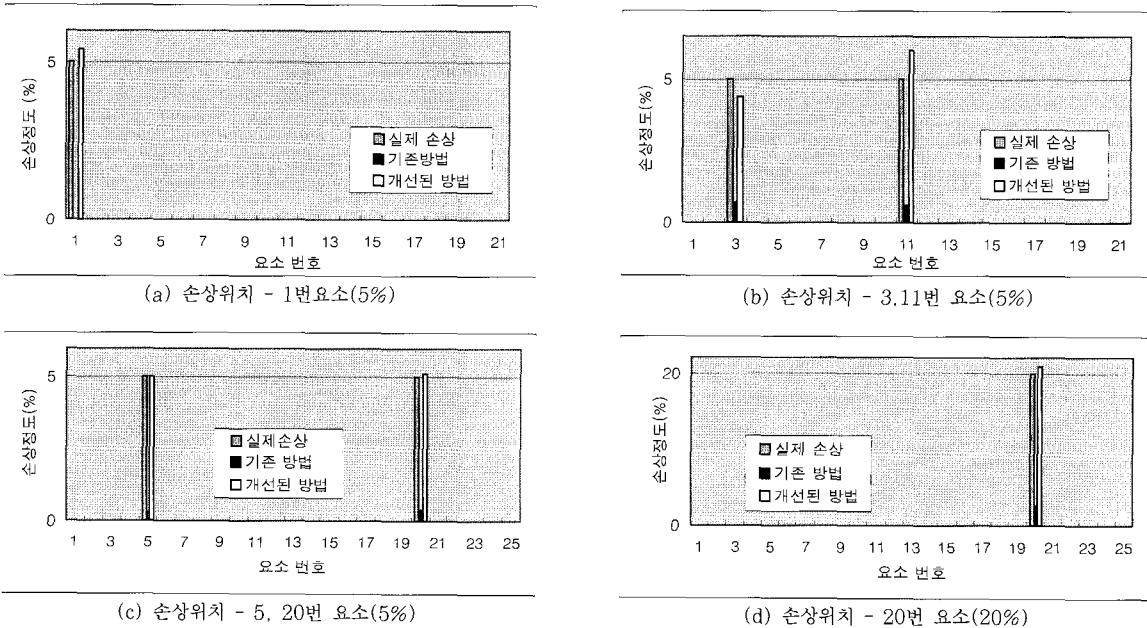


그림 3 8m 단순보의 손상평가 결과 비교

었다. 높은 차수의 진동모드를 포함할수록 기존의 방법은 오차가 크지만 개선된 방법에 의한 손상정도는 오차가 상대적으로 작다.

또한, 개선된 방법에 의한 손상평가지 손상 정도 추정에 있어서 진동모드형상의 절점 위치에 손상요소 존재하는 경우 상대적으로 오차가 커지는 경향이 있다. 이는 다른 요소에 손상이 존재할 때에 비해 손상정도 평가의 정확도가 비록 다소 감소하나, 추정되는 손상위치 및 손상정도는 충분한 신뢰도 범위 이내라고 판단된다. 그림 3은 여러 결과 중 일례로서, 8m 단순보에 대해 1차 진동모드만을 손상평가에 사용한 경우 기존 방법과 본 연구에서 제안한 기법을 비교한 것이다. 그림 3(a)에서 손상이 지점부에 존재하는 경우에는 기존의 방법으로는 거의 손상을 검출할 수 없지만, 개선된 방법을 적용하면 이를 충분히 극복할 수 있음을 보여주고 있다.

3.2 연속보의 손상 평가

개선된 손상평가기법의 다경간 연속보에 대한 적용 예로서 아래 그림 4에 보여지는 경간 길이가 8m인 2경간 연속보에 대한 손상평가를 수행하였다. 그림 4는 수치해석에 사용된 2경간 연속보를 나타내며, 요소 수는 한 경간당 20개씩 총 40개의 요소로 구성하였다. 연속보에 대한 물성치는 단순보에 대해 적용하였던 표 2와 동일한 값을 사용하였다.

1개소 손상의 경우 5번, 15번과 20번 요소에 5% 손상을 도입하였으며, 1경간 중앙부인 10번 요소에는 20%의 손상을 도입하였다. 2개소 동시 손상평가를 위해 1경간의 중앙부 10번과 중앙 지점부인 20번 요소에 각각 5%의 손상을 도입하였다. 여기서 손상평가의 요소는 각 진동모드의 최대 값이 위치한 요소를 선택하였으며, 연속보에서는 내부 지점부가 취약하므로 내부 지점부인 20번 요소에서의 손상을 평가하였다.

2경간 연속보에 대한 손상평가 결과는 표 7에 나타내었다. 단순보에 대한 평가 결과와 유사하게 기존의 기법은 손상정도를 추정하는데 상대적으로 매우 낮은

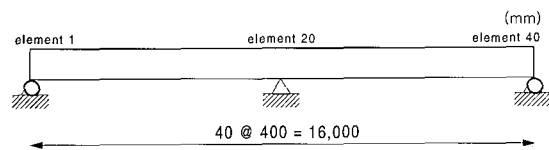


그림 4 2경간 연속보 수치해석모형

정확도를 보이며, 높은 차수의 진동모드를 평가에 포함할수록 오차가 크지만 개선된 방법을 사용한 경우에는 손상위치와 손상정도를 정확히 그리고 정밀하게 추정한다. 또한 기존의 방법은 실제 손상의 정도가 5%에서 20%로 증가하면 손상정도를 평가하는 정확도가 조금 향상되지만 여전히 추정오차는 상당히 큼을 알 수 있다. 그러나, 개선된 방법을 사용하면 손상이 비교적 작은 경우에서도 손상정도와 위치를 정확하게 추정할 수 있다. 따라서, 초기 손상의 발견이 중요한 실제 구조물의 유지관리에 있어 개선된 방법의 적용타당성 및 효율성과 기존방법에 대한 우위성을 입증하였다고 판단된다.

2경간 연속보에 대한 비교 결과 중 1개소 손상에 대한 평가와 2개소 손상에 대한 평가의 일례를 그림 5에 나타내었다. 그림 5(a)에서 실제 손상이 1경간의 중앙부 10번 요소에 20%로 도입된 경우 기존의 방법에 의한 손상정도평가의 정확도가 매우 낮으나, 개선된 방법에 의해서는 실제 손상정도에 매우 가깝게 평가됨을 알 수 있다. 그림 5(b)는 10번과 20번 요소에 동시에 5%의 손상이 존재할 경우에 대한 손상평가를 나타내는데, 이 경우에 있어서도 기존의 방법에 비해 개선된 방법이 훨씬 정확한 손상정도 추정치를 제시함을 알 수 있다.

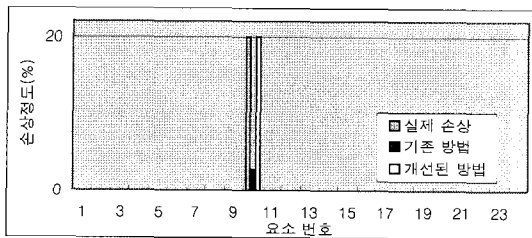
4. 결 론

손상에 의한 고유벡터의 민감도 변화를 이용하여 구조물의 손상을 평가하는 기존의 방법에 대해 개선된 민감도 필터를 도입함으로써 손상위치 및 손상정도 평가의 정확도를 향상시켰다. 그리고 개선된 손상평가기법의 검증에 위해 단순보 및 2경간 연속보에 대해 적용하여 그 타당성을 입증하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

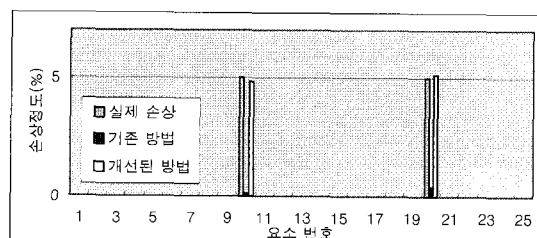
- (1) 기존의 손상지수기법에 대해 손상전·후의 민감도 변화 관계식에 개선된 민감도 필터를 도입함으로써 기존 손상지수기법의 정확도를 향상시켰다. 민감도 필터가 구조물의 진동모드 형상에 비례하도록 결정될 때 정확한 손상평가가 이루어짐을 밝혔다.
- (2) 개선된 손상지수기법은 민감도 필터의 최대 값만 결정하면 추가적인 계산 없이 적용가능하며, 비교적 작은 손상에 대해서도 손상이 발생한 위치에 관계없이 정확히 탐지하므로 실제 구조물의 초기 손상 판별에 효과적으로 이용될 수 있다고 판단된다.

Tabel 7 2경간 연속보

진동모드 차수	실 제 손 상		추 정 된 손 상					
			기 존 방 법			개 선된 방 법		
	손상요소	손상정도(%)	손상요소	손상정도(%)	오차(%)	손상위치	손상정도(%)	오차(%)
1차	5번	-5.0	5번	-0.2	-96.0	5번	-4.8	-4.0
1~2차	5번	-5.0	5번	-0.3	-94.0	5번	-4.9	-2.0
1~3차	5번	-5.0	5번	-0.5	-90.0	5번	-4.7	-6.0
1~4차	5번	-5.0	5번	-0.4	-92.0	5번	-4.8	-4.0
1차	15번	-5.0	15번	-0.3	-94.0	15번	-4.2	-16.0
1~2차	15번	-5.0	15번	-	-	15번	-4.1	-18.0
1~3차	15번	-5.0	15번	-0.5	-90.0	15번	-4.4	-12.0
1~4차	15번	-5.0	15번	-0.3	-94.0	15번	-4.2	-16.0
1차	10번	-20.0	10번	-2.7	-86.5	10번	-20.0	0.0
1~2차	10번	-20.0	10번	-1.9	-90.5	10번	-19.9	-0.5
1~3차	10번	-20.0	10번	-0.1	-99.5	10번	-21.1	5.5
1~4차	10번	-20.0	10번	-0.1	-99.5	10번	-11.7	-41.5
1차	20번	-5.0	20번	-	-	20번	-5.4	8.0
1~2차	20번	-5.0	20번	-0.6	-88.0	20번	-8.2	64.0
1~3차	20번	-5.0	20번	-	-	20번	-2.4	-52.0
1~4차	20번	-5.0	20번	-0.4	-92.0	20번	-6.9	38.0
1차	10,20번	-5.0	10번	-0.1	-98.0	10번	-4.8	-4.0
			20번	-0.4	-92.0	20번	-5.1	2.0
1~2차	10,20번	-5.0	10번	-0.2	-96.0	10번	-4.5	-10.0
			20번	-0.3	-94.0	20번	-5.2	4.0
1~3차	10,20번	-5.0	10번	-	-	10번	-5.7	14.0
			20번	-0.2	-96.0	20번	-4.7	-6.0
1~4차	10,20번	-5.0	10번	-	-	10번	-4.5	-10.0
			20번	-0.3	-94.0	20번	-4.9	-2.0



(a) 손상위치 - 10번 요소(20%)



(b) 손상위치 - 10,20번 요소(5%)

그림 5 2경간 연속보의 손상평가 결과 비교

(3) 개선된 손상지수기법의 단순 및 연속보 예제에 대한 적용 결과, 1차 진동모드만으로도 손상평가가 가능하므로, 고차의 진동모드를 얻기가 용이하지 않거나 비록 이용 가능한 진동모드를 얻었다 할지

라도 오차가 많이 포함된다는 실제 교량의 손상평가시의 제약조건을 감안하면, 본 연구에서 제안한 개선된 손상지수기법은 실제 교량의 손상평가에 매우 적합할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적연구과제(1999-2-311-002-5) 지원으로 수행되었으며, 지원에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

1. Farrar, C. R., Doebling, S. C., "Lessons Learned from Applications of Vibration-Based Identification Methods to a Large Bridge Structure", *Proceedings of International Workshop on Structural Health Monitoring*, Stanford University, Stanford, Calif., September, 1997, pp.351~370
2. 김정태, 노리스 스틱스, "개선된 진동기초 손상검색 방법의 유도와 검증", 한국전산구조공학회 논문집 제12권, 제3호, 1999, pp.331~343
3. 김학수, 장동일, "손상지수를 이용한 단순보의 손상 추정 I. 이론 및 수치해석", 한국강구조학회 논문집, 제8권, 제4호, 1996, pp.43~50
4. Stubbs, N., "A General Theory of Non-Destructive Damage Detection in Structures", *Structural Control, 2nd Int. Symposium on Structural Control*, ed. H.H.E. Leipholz, University of Waterloo, Ontario, Canada, 1987, pp.694~713
5. 전준창, "제한된 모드특성을 이용한 보 구조물의 국부적인 손상의 평가", 한양대학교 박사학위 논문, 1998
6. 김학수, 장동일, "무작위 진동 구조물의 동특성 추정", 한국강구조학회지, 제8권, 제1호, 1996, pp.216~224
7. 허광희, 최만용, "계측된 구조물의 동적인자에 의한 손상검출기술", 한국구조물진단학회, 제3권, 제1호, 1999, pp.103~111
8. 정범석, "개선된 시간영역 해석기법에 의한 동특성 추정", 한국구조물진단학회 제3권, 제2호, 1999, pp.147~154
9. Fetis, D. G., *Mechanical and Structural Vibrations*, John Wiley & Sons, New York, N. Y., Inc., 1995
10. Jenkins, C. H., Kjerengtroen, L. and Ostensen, H., "Sensitivity of Parameter Changes in Structural Damage Detection", *Shock and Vibration*, Vol.4, No.1, 1997, pp.27~37
11. Mazurek, D. F. and DeWolf, J. T., "Experimental Study of Bridge Monitoring Technique", *Journal Structural Engineering*, ASCE, Vol. 116, No. 9, pp.2532~2549, 1990