

정적변위를 이용한 교량의 손상도 평가기법

A Damage Assessment Technique for Bridges Using Static Displacements

최 일 윤¹⁾ · 조 호 남²⁾
Choi, Il Yoon · Cho, Hyo Nam

요 약 : 본 논문에서는 정적 처짐데이터를 이용한 교량의 강성추정에 관한 기법을 개발하였다. 제안된 기법은 주기적으로 교량의 자중에 의한 처짐을 계측하여 이들 처짐값의 변화량을 이용하여 손상의 진행정도를 규명하는 기법으로써 재하시험이 필요하지 않으며, 최근 활발히 진행되고 있는 계측모니터링 시스템으로부터 획득된 계측데이터를 정량적으로 분석하는 기법으로 활용이 가능하리라 판단된다. 손상평가를 위한 정식화과정에서 부재의 손상은 강성의 저감으로 표현하였으며, 부재의 질량과 초기강성은 실측 또는 도면을 통하여 획득이 가능하다고 가정하였다. 제안된 기법의 타당성 검증을 위하여 수치모형을 통한 손상도 추정결과를 제시하였으며, 기존의 손상도 추정기법 중 비교적 손상에 대한 민감도가 높은 모드형상을 이용한 기법과 손상도 추정결과를 비교하였다. 또한, 손상추정결과를 정확도를 감소시키는 노이즈의 영향을 분석하기 위하여 정적응답자료에 백색잡음을 추가하여 손상도를 추정하였으며, 손상부재의 수가 손상추정 결과에 미치는 영향을 검토하였다.

ABSTRACT : A new damage detection technique using static displacement data was developed, in order to assess the structural integrity of bridge structures. In conventional damage assessment techniques using dynamic response, the variation of natural frequencies is intrinsically insensitive to the damage of the bridge; thus, it is usually difficult to obtain them from the measured data. The proposed detection method enables the estimation of the stiffness reduction of bridges using the static displacement data that are measured periodically, without requiring a specific loading test. Devices such as a laser displacement sensor can be used to measure static displacement data due to the dead load of the bridge structure. In this study, structural damage was represented by the reduction in the elastic modulus of the element. The damage factor of the element was introduced to estimate the stiffness reduction of the bridge under consideration. Likewise, the proposed algorithm was verified using various numerical simulations and compared with other damage detection methods. The effects of noise and number of damaged elements on damage detection were also investigated. Results showed that the proposed algorithm efficiently detects damage on the bridge.

핵심용어 : 손상도추정, 정적처짐, 모니터링, 모드형상, 손상계수

KEYWORDS : damage assessment, damage identification, static displacement, system identification, mode shape, damage factor

1. 서론

교량의 안정성에 대한 위협은 경제적, 사회적 문제는 물론 소중한 인명의 손실을 유발할 수 있으므로, 교량에 대한 주기적인 조사와 안전도평가는 매우 중요한 과제이다. 국내의 경우, 중요 시설물의 안전성 확보와 유지관리를 위하여 안전점검, 정밀안전진단 등을 수행하도록 「시설물의안전관리에관한 특별법」에 규정하였으며, 최근 특수교량 등에 계측모니터링 시스템을 도입하는 등 교량의 안전성 확보를 위한 많은 노력

과 관심이 집중되고 있다.

기존의 교량 안전성 평가기법은 외관조사와 비파괴시험법 또는 재하시험 방법에 기초하고 있으나, 최근 System Identification 기법을 이용한 손상부재의 위치와 손상정도를 정량적으로 평가하고자 하는 접근이 시도되고 있다. System Identification 기법은 동적 특성의 변화를 주로 이용하고 있으며, 특히 주파수영역에서 모드특성을 이용하여 손상을 추정하는 알고리즘에 대한 개발이 주로 이루어져 왔다.(Doebing⁽¹⁾)

Cawley⁽²⁾ 이후, Hassiotis⁽³⁾, Fabrizio⁽⁴⁾와 Lee^{(5),(6)}

1) 정회원, 한국철도기술연구원 주임연구원

2) 정회원, 한양대학교 토목환경공학과 교수

본 논문에 대한 토의를 2003년 4월 30일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

등은 고유진동수를 이용한 손상도 추정기법을 개발하였으나, 고유진동수의 변화는 손상에 대해 민감하지 않은 단점이 있다. Stubb⁽⁷⁾, Kim⁽⁸⁾ 과 Khaled⁽⁹⁾ 등은 비교적 손상에 대한 민감도가 높은 것으로 알려진 모드형상을 이용한 손상추정기법을 제시하였다. 또한, Yun⁽¹⁰⁾, Wang⁽¹¹⁾, Cho⁽¹²⁾와 Choi⁽¹³⁾ 등은 시간영역의 손상추정기법에 대한 연구를 수행하였다.

본 논문에서는 고정하중에 의한 정적 처짐을 이용한 손상도 추정기법을 제시하였다.

2. 정식화

본 연구에서 제안된 기법은 정적응답에 기초하고 있으며, 지배방정식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$K u = F \quad (1)$$

여기서, K : 강성행렬
 u : 변위벡터
 F : 하중벡터

일반적으로 System Identification 기법에 있어서, 손상 전후에 질량의 변화가 없다고 가정하거나 또는 질량을 기지의 값으로 가정한다. 그러므로, 고정하중에 의한 하중벡터는 기지의 값이 되며, 구조부재에 발생한 손상은 강성행렬과 변위 벡터에만 영향을 미치게 된다.

손상전후의 강성행렬 및 변위 벡터의 관계식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$K_d = K_0 - \Delta K = (1 - \alpha) K_0 = \beta K_0 \quad (2)$$

$$u_d = u_0 + \Delta u \quad (3)$$

여기서, K_0 : 초기상태의 강성행렬
 K_d : 손상후 강성행렬
 u_0 : 초기상태의 변위벡터
 u_d : 손상후 변위벡터
 α : 손상계수 ($0 \leq \alpha \leq 1$)
 β : 유효강성비

손상후의 평형방정식은 다음 식으로 표현될 수 있으며,

$$K_d u_d = F \quad (4)$$

초기강성행렬을 기준치로 가정하고, 식 (2), 식 (3)와 식 (4)를 조합하면, 다음과 같이 표현된다.

$$(1 - \alpha) K_0 (u_0 + \Delta u) = F \quad (5)$$

$$u_0 = K_0^{-1} F \quad (6)$$

일반적으로, 강성행렬은 요소강성행렬을 합성하여 식 (7)과 같이 표현되므로, 부재별 손상계수의 향으로 분리하면 식 (8)과 같다.

$$K = \sum_{i=1}^{nl} B_i^T k_i B_i \quad (7)$$

여기서, nl : 부재수
 B_i : i -번째 요소의 Boolean Matrix
 k_i : i -번째 요소강성행렬

$$F = \sum_{i=1}^{nl} (1 - \alpha_i) S^i u_d \quad (8)$$

$$R = [S^1 u_d \quad S^2 u_d \quad \dots \quad S^i u_d] \quad (9)$$

$$\beta = [(1 - \alpha_1) \quad (1 - \alpha_2) \quad \dots \quad (1 - \alpha_i)]^T \quad (10)$$

$$R \beta = F \quad (11)$$

여기서, S^i : i 번째 요소의 요소강성행렬

따라서, 식 (11)의 해를 구함으로써, 손상부재의 위치와 크기를 규명할 수 있다.

3. 수치모형

본 연구에서는 개발된 기법의 타당성 검증에 위하여 수치모형을 이용하였다. 우선, 손상이 처짐변화량에 미치는 영향을 분석하기 위하여, 실제 강상형 유도상화 철도교를 쉘 요소로 모델링하였으며, 손상정도에 따른 사하중에 의한 처짐값 변화량과 설계 활하중에 의한 처짐값 변화량을 ABAQUS 프

로그그램을 이용하여 구하였다. 단면2차 모멘트는 $1.4m^4$ 이며, 단면적은 $0.649m^2$ 이다



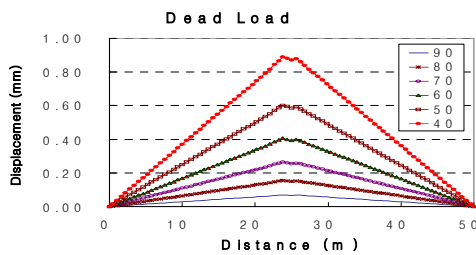
그림 1. 강상형 유도상화 철도교 모델링

그림 1과 같이 중앙부재에 손상을 도입하여, 강성을 최대 60%까지 저감시킨 경우에 대해 처짐의 변화량을 고찰하였다.(그림 2 참조) 이 결과로부터 손상의 크기가 동일한 경우, 사하중에 의한 처짐증가의 효과가 설계활하중에 의한 처짐 변화량보다 약 3배 이상 크게 나타남을 알 수 있었다. 일반적으로, 재하차량의 하중효과는 설계활하중 효과보다 작게 나타나므로, 장경간의 교량의 경우 사하중에 의한 처짐값 변화에 대한 모니터링이 효과적인 방안이 될 수 있을 것으로 판단된다.

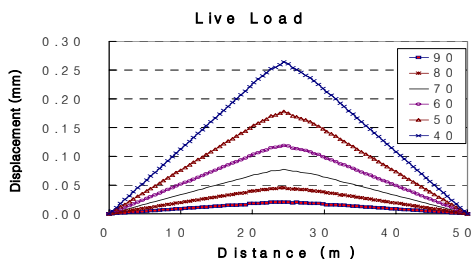
한편, 제안된 기법의 검증 및 비교를 위하여 비교적 손상에 대한 민감도가 높은 것으로 알려진 모드형상을 이용한 손상도 추정기법 중 하나인 Wirat¹⁴⁾이 제시한 손상도 추정기법을 프로그래밍하여 그 결과를 비교하였는데, Wirat이 제시한 기법의 기본적인 알고리즘은 그림 3과 같다.

최적화문제에 있어서, 구조변수는 다음 식으로 표현된다.

$$\bar{X} = (K_1, K_2, \dots, K_n) \quad (12)$$



(a) 사하중에 의한 처짐값의 변화량



(b) 설계활하중(LS-22)에 의한 처짐값 변화량

그림 2. 유효강성비 β 에 따른 처짐값 변화량

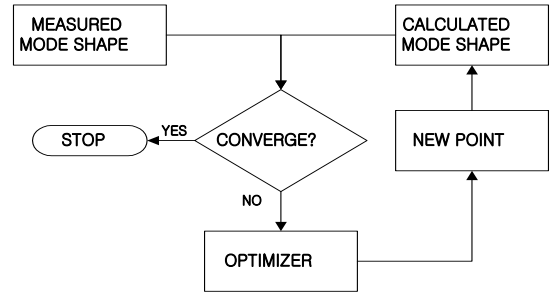


그림 3. 손상추정 알고리즘(Wirat)

그리고, 목적함수는 식 (13)으로 나타낼 수 있다.

$$F(X) = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n |\phi_{ij}^M - \phi_{ij}^C| \quad (13)$$

여기서, ϕ_{ij}^M : i번째 노드의 j번째 측정모드형상

ϕ_{ij}^C : i번째 노드의 j번째 계산모드형상

또한, 구속조건은

$$0 \leq K_i \leq K_i^{ini} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (14)$$

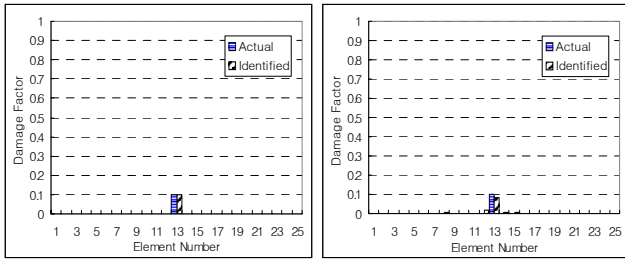
와 같고, 최적화문제의 해를 구하기 위하여 ALM (Augmented Lagrange Multiplier)기법과 Golden Section 기법을 이용하였다.

일반적으로, 모드형상을 이용하는 기법에서의 손상추정 결과는 저차모드는 물론 고차모드까지 이용할수록 손상추정 결과의 정확성이 향상된다. 그러나, 교량에서의 고차모드는 측정 용이하지 않다는 제약이 있다.

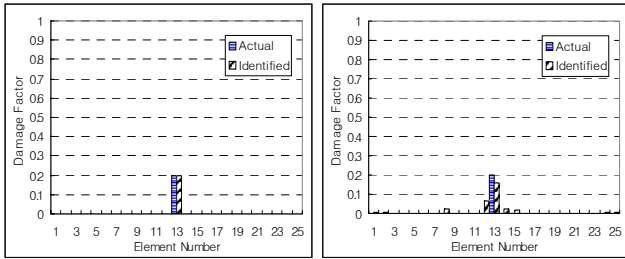
본 논문의 수치예제에서 이용되는 모드형상기법에 의한 손상추정 예제에서는 1차 모드형상부터 4차 모드형상까지 총 4개의 모드형상을 이용하여 구조부재의 손상도를 추정하였다.

우선, 손상의 크기가 손상도 추정결과의 정확도에 미치는 영향을 분석하기 위하여, 단일 부재에 도입된 손상의 크기를 변화시켜 손상도를 추정하였다.(그림 4 참조) 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이, 두 기법은 도입된 손상의 크기와 관계없이 손상위치와 정도를 정확하게 추정하였으나, 제시된 기법의 손상추정결과가 모드형상을 이용한 기법과 비교하여 다소 우수함을 알 수 있다.

일반적으로 손상 부재의 수가 증가함에 따라 손상도 추정 결과에 오차를 수반하게 되는데, 이러한 영향을 조사하기 위하여 여러 부재에 동시에 손상을 도입하여 손상도를 추정하였다. 그림 5에 나타난 바와 같이 제안된 기법은 손상위치와 손상의 정도를 정확하게 추정하고 있다. 그러나, Wirat이 제시한 모드형상기법은 손상부재의 수가 증가할수록 손상추정결과의

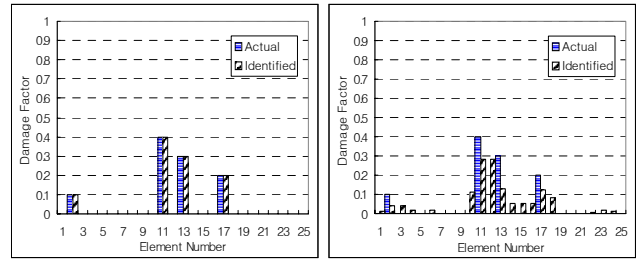


(a) 제시된 기법 (b) 모드형상기법

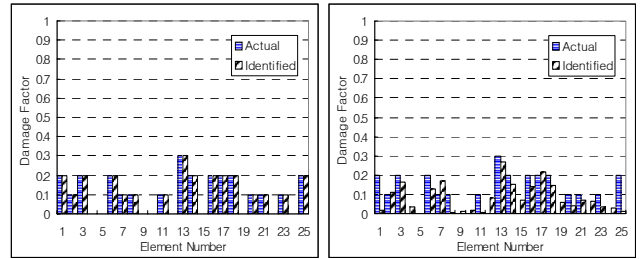


(c) 제시된 기법 (d) 모드형상기법

그림 4. 중앙 1개 부재가 손상된 경우 손상도 추정결과

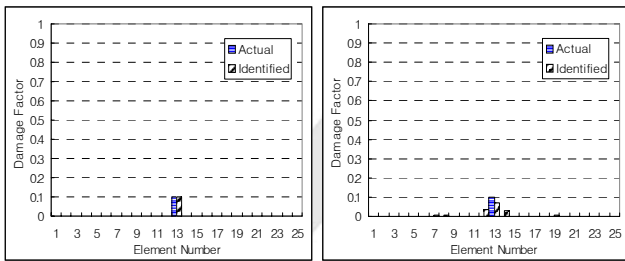


(a) 제시된 기법 (b) 모드형상기법

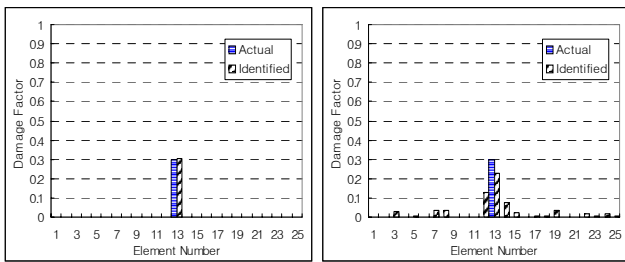


(c) 제시된 기법 (d) 모드형상기법

그림 5. 여러 부재가 손상된 경우 손상도 추정결과

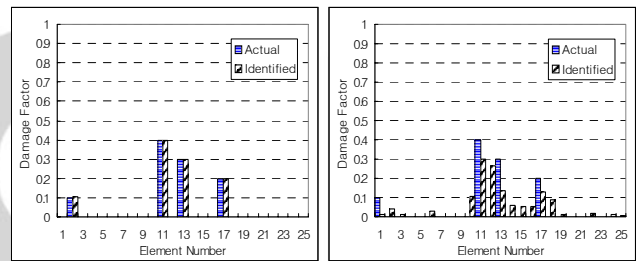


(a) 제시된 기법 (b) 모드형상기법

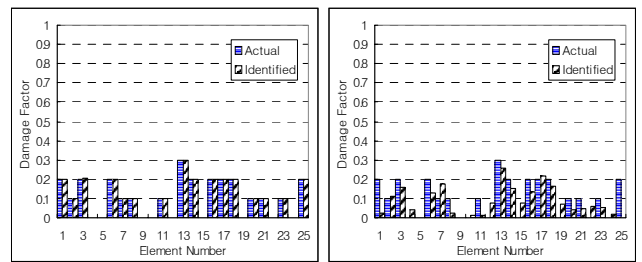


(c) 제시된 기법 (d) 모드형상기법

그림 6. 0.001mm 노이즈가 포함된 경우 손상도 추정결과



(a) 제시된 기법 (b) 모드형상기법



(c) 제시된 기법 (d) 모드형상기법

그림 7. 0.001mm 노이즈가 포함된 경우 손상도 추정결과

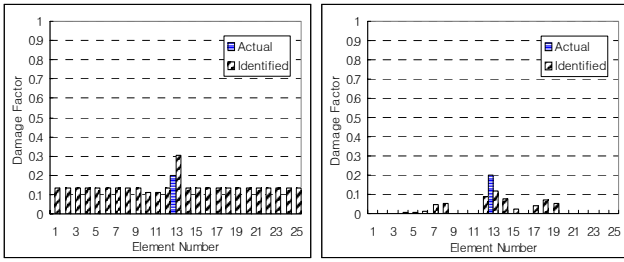
오차가 다소 증가하였으며, 특히 지점부 근처 부재의 손상을 규명하지 못하였다.

손상도 평가를 위하여 계측데이터를 획득할 경우, 계측데이터 획득과정에서 다소의 노이즈(noise)가 포함되는 것은 불가피하다. 일반적으로, 계측데이터에 포함된 노이즈는 손상도 추정과정을 불확실하게 만들게 되며, 추정결과의 정확도에 많은 영향을 미치게 된다. 따라서, 손상도 추정기법의 검증에 있어서 노이즈의 영향의 검토는 필수적인 항목이며, 본 연구에서도 계측데이터에 노이즈가 포함된 경우에 대한 손상도 추

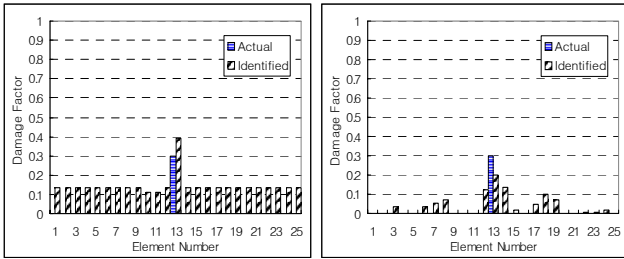
정, 즉, 손상부재의 위치 및 정도를 추정하였다.

계측과정에서 수반되는 노이즈가 포함된 경우, 제안된 기법의 적용성을 검토하기 위하여 응답에 백색잡음(White noise)을 추가하였다. 이때, 노이즈의 표준편차를 0.001mm와 0.01mm로 구분하여 노이즈의 크기가 손상추정 결과에 미치는 영향을 분석하였다.

그림 6의 단일 부재에 손상을 도입하고, 0.001mm 표준편차의 노이즈가 포함된 경우에 대한 손상도 추정결과, 노이즈가 포함되지 않은 경우와 마찬가지로 두 기법 모두 정확하게

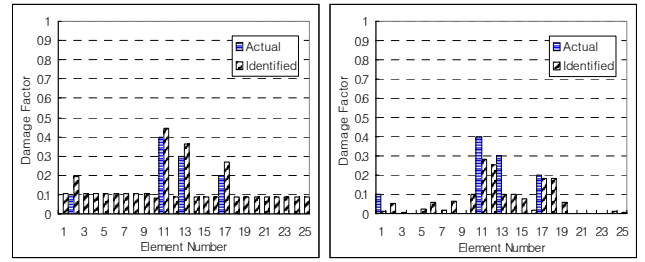


(a) 제시된 기법 (b) 모드형상기법

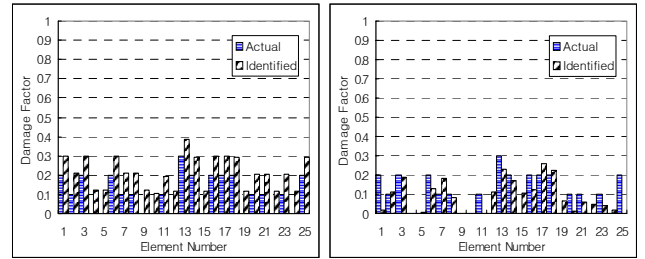


(c) 제시된 기법 (d) 모드형상기법

그림 8. 0.01mm 노이즈가 포함된 경우 손상도 추정결과



(a) 제시된 기법 (b) 모드형상기법



(c) 제시된 기법 (d) 모드형상기법

그림 9. 0.01mm 노이즈가 포함된 경우 손상도 추정결과

손상 위치와 정도를 규명하였으나, 제안된 기법이 보다 우수한 결과를 나타내고 있음을 알 수 있다.

그림 7에는 여러 부재에 손상이 발생한 경우, 계측데이터에 0.001mm의 노이즈가 포함된 손상추정결과를 나타내었다. 제시된 기법에 의한 손상도 추정결과는 모드형상을 이용한 기법보다 손상위치와 손상정도를 정확하게 추정하고 있음을 알 수 있다.

또한, 노이즈의 크기가 증가할 경우, 개발된 기법의 손상추정결과를 분석하기 위하여, 노이즈의 표준편차를 0.01mm로 증가시켜 손상도 추정을 수행하였다.(그림 8, 그림 9 참조) 단일 부재에 손상이 도입된 경우, 제시된 기법과 모드형상기법에 의한 손상도 추정결과는 다소 오차 증가하고 있음을 알 수 있다.(그림 8 참조) 모드형상에 의한 기법의 경우 손상부재의 손상정도를 다소 작게 평가하는 경향이 있으며, 손상이 발생하지 않은 일부 부재들을 손상이 발생한 것으로 추정하고 있다. 한편, 제시된 기법에 의한 손상도 추정결과는 손상부재의 손상정도를 실제값 보다 다소 크게 나타냈으며, 손상이 발생하지 않은 다른 부재들에 대해서 약 10%정도의 손상이 발생한 것으로 평가되었다. 또한, 도입된 손상의 크기가 손상추정결과에 미치는 영향은 거의 없음을 알 수 있다. 그러나, 한 가지 주목할 만한 점은 제시된 기법은 손상 정도를 약간 크게 추정하고 있지만, 추정결과에는 일정한 특성이 있으며 손상부재의 위치를 비교적 정확하게 추정하고 있다는 사실이다. 즉, 무손상 부재를 약 10%정도의 손상이 발생한 것으로 일정하게 추정하고 있으며, 손상부재의 경우에도 10%정도 크게 추정하고 있으므로 손상위치는 어느 정도 판단이 가능하다

는 것이다.

또한, 여러 부재에 손상이 발생한 경우, 0.01mm 표준편차를 갖는 노이즈가 포함된 경우에 대한 손상도 추정결과를 그림 9에 나타내었다.

모드형상기법에 의한 손상추정결과를 살펴보면, 0.001mm 표준편차의 노이즈를 갖는 경우와 비교하여 약간의 추정오차 증가 현상이 발생하고 있으나, 전반적으로 큰 변화는 없으므로 나타났다. 그러나, 그림 9(b)에서 알 수 있는 바와 같이 무손상 부재인 18번 부재를 약 20% 손상이 발생한 것으로 추정하고 있으며, 실제 손상이 30% 발생한 13번 부재의 경우 10% 손상 발생으로 추정하는 등 다소의 오차가 있으며 이러한 손상추정결과도 특정한 일관성을 나타내고 있지 않다.

한편, 그림 9(a)와 (c)에 나타난 바와 같이, 제시된 기법에 의한 손상 추정결과는 단일 부재에 손상이 발생한 경우와 마찬가지로 일관된 특성을 나타내고 있음을 알 수 있다. 즉, 추정된 손상값은 실제값 보다 약 10%정도 크게 추정되었으며, 무손상 부재에 대해서도 약 10%정도 손상이 발생한 것으로 추정되었다. 즉, 제시된 기법에 의한 손상 추정결과는 노이즈가 0.01mm 표준편차를 갖는 경우, 모든 부재에 대해 실제 값보다 약 10% 손상이 더 발생한 것으로 추정하고 있으므로 손상의 정도와 손상의 위치를 비교적 정확하게 규명할 수 있으리라 판단된다.

4. 결론

본 논문에서는 사하중에 의한 처짐 변화량을 이용한 새로

운 손상도 추정기법을 제시하였으며, 실제 철도교 단면 제원을 이용하여 수치모형으로 개발된 기법의 타당성을 검증하였다. 또한, 손상도 추정에 있어서 비교적 민감도가 높은 것으로 알려진 모드형상을 이용한 기존의 기법과 손상도 추정결과의 정확성을 비교하였다. 이 과정에서, 손상 추정의 정확도에 영향을 미치는 인자인 손상 도입 부재의 수와 노이즈의 영향을 분석·비교하였다.

제안된 기법은 노이즈가 크기가 작은 영역에서는 기존의 모드형상을 이용한 기법보다 훨씬 우수한 기법임을 알 수 있었으며, 노이즈의 표준편차가 0.01mm로 증가한 경우에도 손상의 위치를 정확하게 규명하였다. 또한, 추정된 손상 크기도 일관된 특성을 나타내고 있으므로 비교적 정확하게 추정이 가능하리라 사료된다. 그리고, 노이즈 분석결과로부터, 제시된 기법의 활용을 위해서는 정밀한 계측기기의 이용과 계측방법의 정확성 향상이 매우 중요한 요소임을 알 수 있다.

이상과 같이, 제시된 기법은 손상위치의 추정에 매우 효과적이며, 손상의 크기도 비교적 잘 추정함을 알 수 있었다. 제시된 기법은 교량에 대한 손상도 추정은 물론 최근 활발히 수행되고 있는 계측모니터링의 계측데이터 분석의 방안으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. S.W. Doebling, C.R. Farrar, M.B. Prime, D.W. Shevitz (1996), Damage Identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics : a literature review, Los Alamos National Laboratory.
2. Cawley P. and Adams R.D. (1979) The location of defects in structures from measurements of natural frequencies, J. of Strain Analysis, Vol 14, No 2, 49-57
3. Hassiotis, S. (1993), Identification of structural damage from natural frequency measurements, Ph.D. thesis, Purdue University, U.S.A.
4. Fabrizio V. and Danilo C. (2000) Damage detection in beam structures based on frequency measurements, J. of Engineering Mechanics, Vol 126, 7, 761-768
5. Lee, J.S., Choi, I.Y., Moon, D.Y. and Lee, H.H. (2002) A study on the damage detection of the structures using optimization technique in frequency domain (I) - Modeling of damages, J. of KSCE in korean, Vol 22, 1-A
6. Lee, J.S., Choi, I.Y., Cho, H.N. and Paik, S.W. (2002) A study on the damage detection of the structures using optimization technique in frequency domain (II) - Verification, J. of KSCE in korean, Vol 22, 1-A
7. Stubbs, N., J.-T. Kim, and K. Topole, (1992) An efficient and robust algorithm for damage localizaton in offshore platforms, Proceedings of ASCE 10th Structures Congress, 543-546
8. Kim, J.T. and Stubbs, N. (1995) Damage detection in offshore jacket structures from limited modal information, International J. Offshore and Polar Engineering, 5(1), 58-66.
9. Khaled A.A.N. (2000), New method for structural damage identification using experimental modal analysis, Ph.D Dissertation, Dept. of Mechanical, Materials and Aerospace engineering, univ. of Central Florida, Florida.
10. Yun, C.B and Shinozuka, M. (1980), Identification of nonlinear structural dynamic systems, J. of Struct. Mech., Vol.8, No.2, 187-203
11. Wang, D.(1995), Element level time domain system identification technique with unknown input information, Ph.D. Dissertation, Dept. of Civil Engineering and Engineering Mechanics, Univ. of Arizona.
12. Cho, H.N. and Choi, Y.M. (1999), Structural Damage Identification with unknown input and Limited Observation, APSSRA99, pp.184-193
13. Choi, I.Y., Lee,J.S., Moon,D.Y., and Cho, H.N. (2001), "A Study on the Estimation of Global Stiffness and Damping Matrices in the Time Domain". J. of KSCE, in korean, Vol. 21, No. 5-A
14. Wirat, L.(2000), Bridge damage detection using a system identification method, Ph.D. Dissertation, Univ. of Florida.

(접수일자 : 2002년 6월 26일)