

# 상시 온도변화 효과를 고려한 모드 유연도행렬 기반의 교량의 손상탐색기법

## Damage Detection in Bridges Using Modal Flexibility Matrices Under Temperature Variation

구 기 영\* · 이 종 재\*\* · 윤 정 방\*\*\*

Koo, Ki-Young · Lee, Jong-Jae · Yun, Chung-Bang

---

### ABSTRACT

Changes in measured structural responses induced by a damage could be significantly smaller than those by environmental effects such as temperature and temperature gradients. It is highly desirable to develop a methodology to distinguish the changes due to the structural damage from those by the environmental variations. In this study, a novel method to extract the damage-induced deflection under temperature variations is presented using the outlier analysis on the deflections obtained using the modal flexibility matrices. The main idea is that temperature change in a bridge would produce global increase or decrease in deflections over the whole bridge while structural damages may cause local variations in deflections near the damage locations. Hence, the correlation between the deflection measurements may show high abnormality near the damage locations. A series of laboratory tests were carried out on a bridge model with a steel box girder for 14 days. It has been found that the damage existence assessment and localization can be carried out for a case with relatively small damage under the temperature variations.

**Keywords:** damage detection, temperature variation, bridge structure, modal flexibility, outlier analysis.

---

### 1. 서 론

교량구조물의 진동특성에 기반한 손상탐색기법은 수많은 기법들이 연구 개발되어 왔으나, 현장에서 발생하는 온도변화효과 및 측정오차 등의 몇 가지 중요한 문제는 여전히 해결해야 할 난제이다. 특히, 온도변화효과는 손상탐색기법에 있어서 가장 중요한 문제로서, 온도변화로 인해 발생하는 진동특성의 변화량이 손상으로 인하여 발생하는 변화량에 비해 현저하게 크다고 알려져 있다. 실제적으로 손상이 발생하더라도 온도변화에 의한 변화에 쉽게 묻혀서 구분하기 힘든 상황이다. 이를 극복하기 위해서, 손상과 온도변화에 의한 진동특성의 변화를 체계적으로 구분할 수 있는 기법이 절실히 요구되고 있다. 기존의 연구들은 온도를 측정하여 진동특성과의 상관관계를 규명하고 이를 보상하는 기법이 연구된 바가 있으나, 신뢰성있는 상관관계를 확

---

\* 학생정회원 · 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사과정 Email: kykoo@kaist.ac.kr

\*\* 정회원 · 스마트사회기반시설 연구센터 연구교수 Email: jongjae@kaist.ac.kr

\*\*\* 정회원 · 스마트사회기반시설 연구센터 소장 Email: ycb@kaist.ac.kr

특하기 어렵다는 단점을 가지고 있다. 최근에는 온도측정 없이 구조응답만으로 온도변화효과를 고려하고자 하는 연구가 시도되고 있으며, 본 연구에서는 온도측정 없이, 모드 유연도 행렬을 사용하여 교량 구조물의 변위를 추정하고, 이를 바탕으로 온도효과를 배제하여 손상의 위치를 탐색할 수 있는 기법을 제안하였다.

## 2. 이 론

### 2.1. 모드 유연도 행렬을 이용한 변위추정

강성행렬 (Stiffness matrix)  $\mathbf{K}$ 의 역행렬로 정의되는 유연도행렬 (Flexibility matrix)  $\mathbf{G}$ 는 다음과 같은 하중-변위 관계를 가지고, 이를 통해 임의의 하중상태에서 구조물의 처짐량을 추정할 수 있다.

$$\mathbf{u} = \mathbf{G}\mathbf{f} \quad (1)$$

여기서,  $\mathbf{u}$ 는 변위벡터이고  $\mathbf{f}$ 는 하중벡터이다.

유연도 행렬  $\mathbf{G}$ 는 다음과 같이 모드형상과 고유주파수로 매우 정확하게 근사될 수 있으며, 이를 모드 유연도 행렬  $\mathbf{G}_m$ 이라 한다.

$$\mathbf{G}_m = [\Phi] [\Lambda]^{-1} [\Phi]^T \quad (2)$$

여기서,  $\mathbf{G}_m$ 는 모드 유연도 행렬 (modal flexibility matrix) 이고,  $[\Phi] = [\{\phi_1\}, \{\phi_2\}, \dots, \{\phi_n\}]$ 는  $i$ 번째 모드형상  $\{\phi_i\}$ 들로 이루어진 질량 정규화 된 모드형상 행렬이며,  $[\Lambda]$ 는 대각행렬로써 대각항에  $\omega_i^2$ 를 가진다. 여기서,  $\omega_i$ 는  $i$ 번째 각속도이다.

교량구조물의 동적응답을 측정하여 모드계수를 추출하면 모드 유연도 행렬을 구성할 수 있고, 이를 사용하면 교량 구조물의 손상의 유무와 위치를 추정할 수 있다. 다음 절에서 이에 대해서 자세히 설명하였다.

### 2.2. 정모멘트 하중(Positive Bending Load)와 손상위치탐색기법

정모멘트 하중은 교량 구조계 내부의 특정 영역에서 양의 휨모멘트를 발생시키는 하중을 말한다. 다음 그림 1과 같이 단위크기를 가지는 분포하중은 단순보의 전 영역에 대한 정모멘트 하중이고, 일반적으로 연속교의 경우에 대해서도 정모멘트 하중을 구할 수 있다.

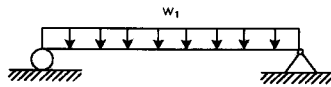


그림 1 단순보 구조에 대한 정모멘트 하중 (Positive Bending Load)

정모멘트 하중은 손상추정과정을 대단히 간략화 시키는 성질을 가지고 있다. 정모멘트 하중이 교량에 제 하되면 손상으로 인해 발생하는 추가 처짐은 손상위치에서 최대값을 가진다. 따라서, 손상의 위치는 추가 처짐의 최대값이 발생하는 위치를 찾음으로써 간단하게 알아낼 수 있다. 자세한 이론적인 배경은 (Koo *et al.*)에 제시되어 있다.

### 2.3. 변위에 대한 온도효과 및 Outlier Analysis를 통한 손상탐색기법

일반적으로 교량구조물의 강성은 온도에 반비례 관계가 있다. 일정한 하중이 교량에 가해졌을 때 온도에 따라 강성이 변하면, 이때 발생하는 처짐은 교량 전체적으로 증가하거나 감소하는 경향을 가진다. 이러한 경향은 임의의 교량내의 임의의 두 지점에서의 처짐 간의 상관관계를 발생시킨다. 실제 측정치로부터 얻어진 결과가 그림 2에 표시되어 있다. 19개의 측정치들이 뚜렷한 양의 상관관계를 가지고 있음을 확인할 수 있다.

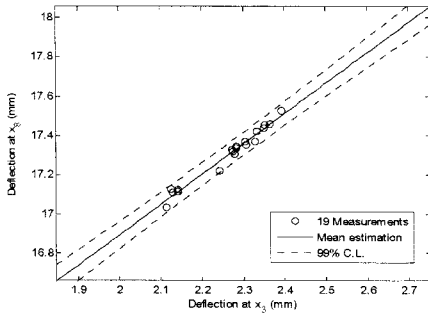


그림 2 온도에 따른 처짐간의 상관관계의 예시

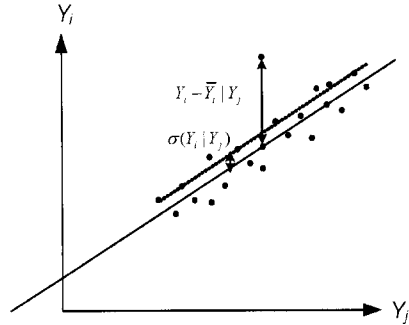


그림 3 손상추정을 위한 Outlier Analysis

이러한 처짐간의 상관관계는 건전상태의 교량의 건전상태의 처짐 거동을 의미한다. 이에 착안하여, 정모멘트 하중과 모드 연성도 행렬을 사용하여 처짐을 산정하고, 온도변화에 따라 발생하는 처짐 간의 상관관계를 구성한 뒤 그림 3에 예시된 바와 같은 다음과 같은 Novelty index를 사용하여 손상탐색을 수행할 수 있다.

$$Z(i, j) = \frac{Y_i - \bar{Y}_i | Y_j}{\sigma(Y_i | Y_j)}$$

여기서,  $Y_i$ 는 정모멘트 하중 재하 시  $i$ 번째 노드에서의 변위를 나타내며,  $\bar{Y}_i | Y_j$ 는  $Y_i$ 의  $Y_j$ 에 대한 conditional mean을 의미하며,  $\sigma(Y_i | Y_j)$ 는  $Y_i$ 의  $Y_j$ 에 대한 conditional standard deviation이다.

위 novelty index가 특정 점에서 threshold 값을 넘으면  $Z(i^*, j^*) > Z^{Threshold}$  그때의  $i^*$  위치가 손상의 위치가 된다.

### 3. 실내실험을 통한 검증

제안된 기법을 검증하기 위하여 모형교량에 대한 실내실험을 수행하였다. 모형교량은 양단 롤러로 지지된 총 10m의 단경간 강박스 교량으로써 2m짜리 세그먼트 5개를 볼트 체결하여 제작되었다(그림 4). 총 21개의 가속도계가 한쪽 거더 상부에 배치되었으며, 그림 5와 같이 Impact hammer를 사용하여 연속적으로 가진함으로써 자유진동을 유발하였고, 100Hz의 sampling frequency로 실험 당 10분간 계속되었다. 건전상태의 교량에 대해 2일 동안 상시 온도 변화에 노출된 상태에서 총 19회 측정을 수행하였다. 표 1에 나타난 바와 같은 두 가지 손상경우에 대하여 총 6일 동안 51회의 측정을 수행하였다(표 2). 총 4개의 모드형상과 고유진동수를 사용하여 모드 연성도 행렬을 구성하였으며, 그림 8에 나타난 바와 같은 정모멘트 하중을 사용하여 변위를 추정하였다. 상시온도변화에 노출된 건전상태의 19회의 측정에 대한 변위가 그림 9에 나타나 있다.

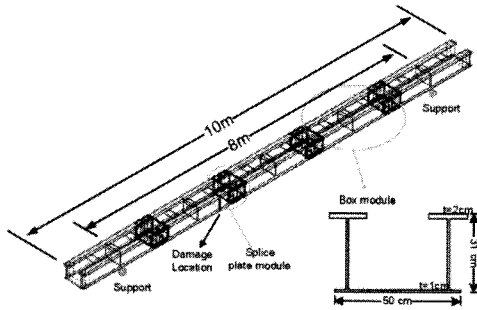


그림 4 강박스 모형교량

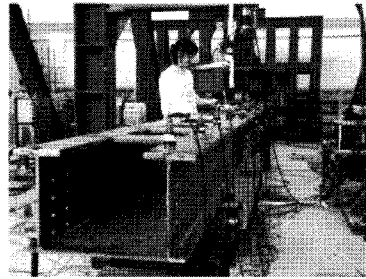


그림 5 실험체 전경

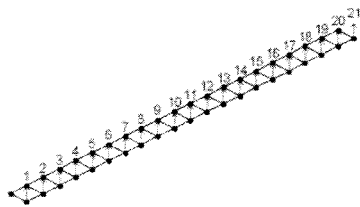


그림 6 가속도 센서 배치도 (등간격 21개소)



그림 7 전기톱을 사용한 손상유발

표 1. 손상 시나리오

손상경우	손상 #1	손상 #2
단면형상		
세부사항	좌측 플랜지 절단(4cm)	좌측 웹 9cm 절단 하부 플레이트 15cm 절단
단면이차모멘트	4% 감소	13% 감소
면적	3% 감소	14% 감소

표 2. 실험 수행 내용

실험	총 측정회수 (날짜)	실험#
건전	14 (2006년 5월 23)	1~14
	5 (2006년 5월 24)	15~19
손상 #1	2 (2006년 5월 24)	20~21
손상 #2	2 (2006년 5월 24)	22~23
	2 (2006년 5월 25)	24~25
	45 (2006년 6월 5-6)	26~70

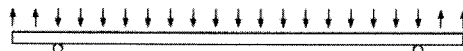


그림 8 처짐 산정에 사용된 정모멘트 하중

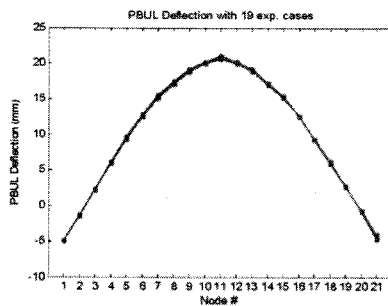


그림 9 상시온도변화에 따른 변위값의 변화

그림 9에서 온도변화에 따라서 약간의 변위변화가 유발됨을 관찰할 수 있다. 건전상태와 손상상태의 변위에 대한 Outlier Analysis의 대표적인 결과는 그림 10에 나타난 바와 같다. 건전상태 영역의 99% C.L. (Confidence Level)은 점선으로 표시되어있고, 각 손상경우의 변위는 건전상태영역에서 손상이 진행됨에 따라 멀어짐을 관찰할 수 있다.

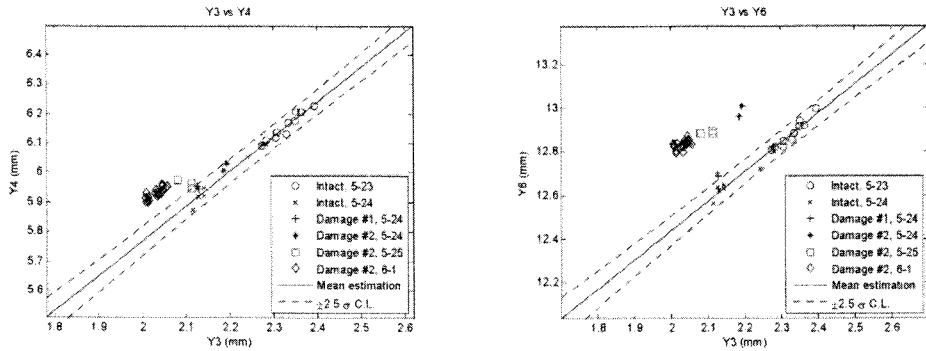


그림 10 추정된 변위를 사용한 Outlier Analysis의 대표적 결과

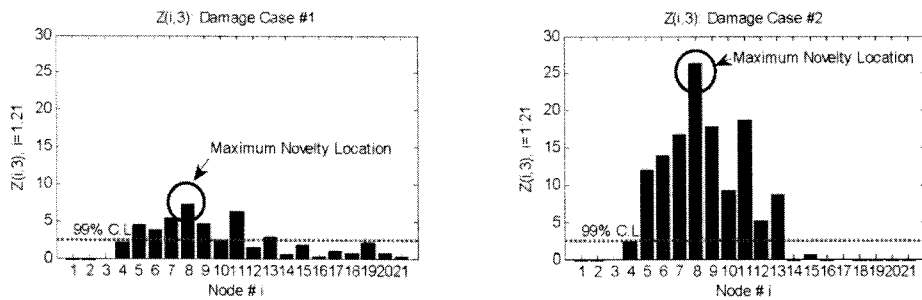


그림 11 각 손상경우에 대하여 추정된 Novelty Index  $Z(i,3)$

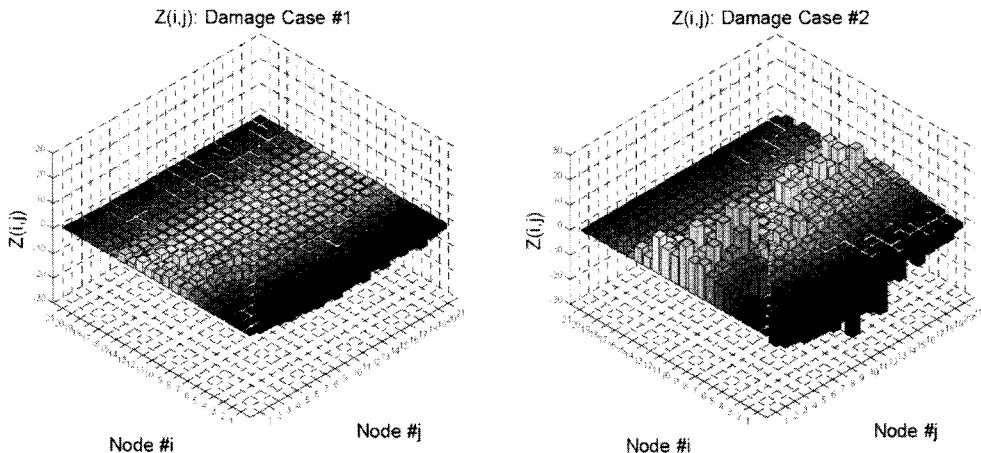


그림 11 각 손상경우에 대하여 추정된 Novelty Index  $Z(i,j)$

이를 통하여 구해진 novelty index의  $Z(i,3)$ 가 그림 11에 나타나있고, 전체 novelty index  $Z(i,j)$ 가 그림 12에 나타나 있다. 그림 11의 손상 #1에서 관찰되는 바와 같이 8번 노트에서 최대의 novelty index가 관찰되고 손상위치로 판단된다. 이는 실제 손상위치와 일치한다. 손상#2의 경우는 더욱 큰 C.L.로 8번 노트에 손상이 있음을 판정하고 있다. 그림 12에서는 마찬가지로 8번 노트에서 최대 novelty index가 관찰된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 상시온도 변화로 인하여 유발되는 진동특성 변화로부터 손상으로 인한 변화를 체계적으로 구분하기 위하여 모드 연성도 행렬을 사용한 새로운 손상탐색기법을 제안하였으며 결과는 다음과 같이 정리 될 수 있다.

- 정모멘트 하중 (Positive Bending Load) 개념이 새로 제안되었다. 정모멘트 하중과 모드연성도 행렬을 사용하여 변위를 추정하면 손상의 위치를 매우 간단히 찾을 수 있다.
- 상시 온도 변화가 교량구조물의 변위응답에 미치는 영향이 규명되었다. 온도변화에 따라서 동일한 하중이 재하 될 때의 교량 처짐은 전체적으로 증가하거나 감소하기 때문에 이로부터 임의의 두 지점에서의 변위는 강한 상관관계를 가진다. 이로부터 교량 처짐거동의 건진상태를 설정할 수 있었다.
- Outlier Analysis를 사용하여 손상의 위치를 찾아내는 방법을 제안하였다. 실험적 연구로부터 온도에 따라 강한 상관관계를 가지는 두 처짐 간의 Outlier analysis를 사용하여 손상의 유무와 손상의 정도를 신뢰성있게 추정할 수 있음을 보였다.

#### 감사의 글

본 연구는 스마트 사회기반시설 연구센터와 한국표준연구소의 안전계측연구센터의 연구비지원에 의해 수행되었으므로, 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- Koo, K.Y., Lee, J.J. and Yun, C.B. (2007) Damage Detection for Beam-like Structures using Deflections Obtained by Modal Flexibility Matrices, *Experimental Mechanics*, (Submitted)
- Wahab, M. A., and Roeck, G. D. Effect of Temperature on Dynamic System Parameters of a Highway Bridge. *Structural Engineering International*, 4, 266-270.(1997)
- Cornwell, P., Farrar, C. R., Doebling, S. W., and Sohn, H. Environmental Variability of Modal Properties. *Experimental Techniques*, 39(6), 45-48.(1999)
- Kullaa, J. Elimination of environmental influences from damage-sensitive features in a structural health monitoring system. *Structural Health Monitoring - the Demands and Challenges*, Boca Raton, FL, 742-749. (2001)
- Manson, G. Identifying damage sensitive, environment insensitive features for damage detection. *The third International Conference on Identification in Engineering Systems*. (2002)
- Pandey, A. K., and Biswas, M. Damage Detection in Structures Using Changes in Flexibility. *Journal of Sound and Vibration*, 169(1), 3-17.(1994)