

# 전단빌딩 구조물의 손상탐지를 위한 개선된 Damage-Induced Deflection 방법 Improved Damage-Induced Deflection Method for Damage Detection of Shear Building structures

성 승 훈\* · 박 중 웅\*\* · 정 형 조\*\*\* · 구 기 영\*\*\*\*

Sung, Seung-Hun · Park, Jong-Woong · Jung, Hyung-Jo · Koo, Ki-Young

## 요 약

본 논문에서는 상시진동에서의 응답을 통해 구성된 모드유연도에 의해 추정되는 손상유발 변위를 이용하여 전단빌딩의 손상을 탐지하는 진동기반의 손상탐지 방법을 제시하였다. 이 방법은 전단빌딩의 층간변위를 활용하여 오직 손상이 존재할 때에만 발생하는 Damage-induced inter-story deflection (DI-ID)을 통해 손상탐지를 수행하는 방법이다. 구조물의 전체 자유도에 양의 전단력을 발생시킴으로써 층간변위를 분명히 파악할 수 있도록 하는 양전단력 탐색하중(Positive Shear Inspection Load)을 통해 DI-ID를 산정한다. 제안된 방법의 검증을 위해 5층의 전단빌딩 축소모형을 대상구조물로 선정하여 수치모의실험을 수행했다. 단일손상과 다중손상의 모사를 위해 1층과 3층의 휨강성을 각각 10% 씩 저감시켰고, 수치모의실험 결과, 단일손상과 다중손상 모두 정확히 손상발생 구역을 확인했다.

**keywords** : 구조물 건전도 모니터링, 전단빌딩, 모드유연도, Damage-induced inter-story deflection

## 1. 서 론

구조물의 건전도 모니터링은 구조물의 응답을 분석함으로써 수행되며, 그 응답의 범위에 따라 크게 전역적 손상확인 방법과 국부적 손상확인 방법으로 나뉜다. 소위 진동기반의 구조물 건전도 모니터링이라 불리는 전역적 손상확인 방법은 상시진동 하에서 얻어진 응답을 통해 구한 고유진동수, 모드형상, 모드형상의 곡률, 모드유연도 등의 손상 전·후의 변화를 비교함으로써 손상을 추정하는 방법이다. 특히, 모드유연도를 이용한 손상탐지 방법은 다른 방법들에 비해 상대적으로 손상추정이 용이하다는 것이 검증됐으며, 이러한 방법은 무선센서 네트워크의 분할 손상확인에 적용이 가능하기 때문에 차후 상시 진동 기반의 손상확인 방법 중 가장 중요한 역할을 수행할 것으로 예측된다. 이 방법은 Pandey와 Biswas (1994)에 의해 처음 제안되었고, Toksoy와 Aktan (1994), Zhang 과 Aktan (1995)에 이어 초기유한요소 모델과 Damage Locating Vector를 이용하는 방법을 제시한 Bernal에 이르기까지 활발한 연구가 진행되었고, 최근 Koo (2008)등은 양모멘트 탐색하중 하에서의 손상유발 변위를 이용한 손상탐지방법을 제안했다. 마지막으로 언급된 방법은

\* 학생회원 · KAIST 건설 및 환경공학과 박사과정 tmdgns-sh@kaist.ac.kr

\*\* 학생회원 · KAIST 건설 및 환경공학과 박사과정 jwp@kaist.ac.kr

\*\*\* 정회원 · KAIST 건설 및 환경공학과 부교수 hjung@kaist.ac.kr

\*\*\*\* Dept. of Civil and Structural Engineering University of Sheffield 박사후연구원 k.koo@sheffield.ac.uk

손상과 손상유발 변위와의 상관관계가 명시적으로 증명되며, 잡음에 취약한 곡률계산이 필요 없다는 장점을 지닌다. 본 연구에서는 양전단력 탐색하중 하에서의 모드유연도에 의해 얻어진 손상유발 변위를 이용한 진단건물의 손상탐지 방법을 제시하고, 수치모의실험을 통해 제안된 방법의 타당성을 검증했다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1. 손상유발 변위의 일반식

일정한 외력 하에서 발생한 손상은 구조물의 강성행렬( $K_0$ )과 변위( $u_0$ )에 영향을 주며, 식(1)과 같이 손상유발 변위( $\Delta u$ )는 건전한 구조물에 작용하는 손상등가 하중( $\Delta F$ )에 의해 발생한 변위로 판단된다.

$$\begin{aligned} F &= (K_0 - \Delta K)(u_0 + \Delta u) \\ \Delta u &= G_D(\Delta K u_0) = G_D \Delta F \end{aligned} \quad (1)$$

식(1)에서 진단빌딩의 경우, 손상등가 하중은 식(2)로 표현된다. 이때의 손상등가하중은 오직 손상 발생구역에 추가적인 변위를 유발하는 하중이다.

$$\Delta F = \Delta K u_0 = \begin{Bmatrix} 0 \\ \alpha_e f_e \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (2)$$

여기서,  $\Delta K = \text{diag}(0, \alpha_e k_e, 0)$ ;  $\alpha_e$  ( $0 < \alpha_e < 1$ )는 손상지수,  $k_e$ 는 손상 구역에서의 손상 전에 표현된 요소강성행렬,  $f_e = k_e u_e = \{V, M - V, M\}$ 는 잔류응력이다.

### 2.2. 양전단력 탐색하중

DI-ID는 손상 시, 외력(F)에 의해 유발되는 잔류응력( $f_e$ )에 의해 발생한다. 그러나 특별한 경우,  $i$  번째의 상층부의 외력의 합이 '0' 이 된다면,  $i$  번째의 잔류응력도 '0' 이 되기 때문에 손상이 발생하더라도 잔류응력에 의한 DI-ID는 발생하지 않는다. 본 연구에서는 그림 1과 같이 모든 층에서 양의 전단력이 발생하도록 하는 양전단력 탐색하중을 제안했으며, 이러한 하중 하에서는 모든 층에서 양의 전단력이 발생하기 때문에 DI-ID를 명확히 확인할 수 있다. 최상층부에 단위하중을 가하더라도 모든 층에서 양의 전단력이 발생하지만, 최상층부의 센서는 다른 층에 비해 상대적으로 잡음이 많이 발생하기 때문에 이에 대응되는 모드유연도 행렬의 열벡터는 상대적으로 큰 오차가 발생한다. 즉, 제안된 양전단력 탐색하중은 모든 층에서 양전단력을 발생시키는 동시에 층별로 발생하는 잡음의 영향을 averaging 할 수 있기 때문에 손상탐지의 정확도를 높일 수 있다.

### 2.2. DI-ID에 의한 손상탐지

위에서 언급한 바를 종합하여 요약하면, 진단빌딩에 발생한 손상은 DI-ID의 발생유무를 통해 확인할 수 있으며 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$i \text{ 번째 층에서의 손상} \Leftrightarrow \Delta u^{IS}(i) > 0 \text{ under PSIL} \quad (3)$$

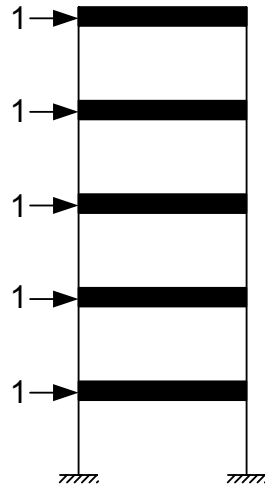


그림 1 양전단력 탐색하중

### 3. 수치모의실험

제안된 방법의 타당성을 검증하기 위해서 5-DOF의 전단빌딩에 대한 수치모의실험을 수행하였고, 사용된 구조물의 제원은 표 1과 같으며, 단일손상 및 다중손상모사는 표 2와 같다. 손상 전후의 고유치 해석을 통해 얻어진 모드 계수를 이용하여 수치모의실험을 수행하였고, 이에 대한 결과는 그림 2와 같다.

표 1 구조물 제원

Parameters	Value
Mass (m)	16.09 kg
Damping (c)	3.27 Ns/m
Mass density ( $\rho$ )	7850 kg/m <sup>3</sup>
Poisson's ratio ( $\nu$ )	0.28
Elasticity modulus (E)	200 GPa
Bending stiffness (EI)	20 Nm <sup>2</sup>
Length (L)	34.3 cm

표 2 손상모사

Case	Damage Location	Reduction of EI
Intact	None	None
Damage 1	1 <sup>st</sup> Floor	10%
Damage 2	1 <sup>st</sup> Floor and 3 <sup>rd</sup> Floor	10%

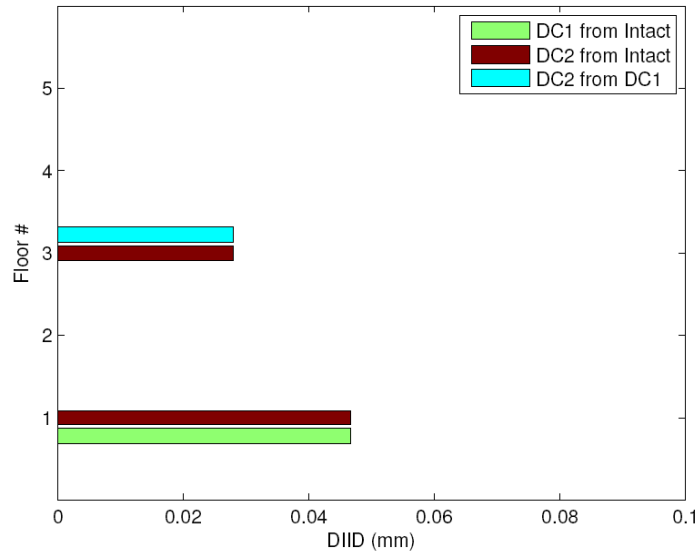


그림 2 DI-ID under PSIL

그림 2에서와 같이 제안된 방법은 단일손상과 다중손상 모두에서 정확히 손상발생 구역을 확인할 수 있다.

### 감사의 글

본 연구는 지식경제부의 지원(과제번호 2008-F-044-01)으로 수행되었으며, 저자들은 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

- Pandey,A. and Biswas,M.**(1994) "Damage detection in structures using changes in flexibility," Journal of Sound and Vibration, Vol. 169, pp.3-17
- Toksoy,T. and Aktan, A.**(1994) "Bridge-condition assessment by modal flexibility," Experimental Mechanics Vol. 34, pp.271-278
- Zhang,Z. and Aktan, A.**(1995) "The damage indices for the constructed facilities," 13th International modal analysis conference, pp.1520-1529
- Bernal,D.**(2002) "Load Vectors for Damage Localization," Journal of Engineering Mechanics ,Vol. 128, pp.7-14
- Koo K.Y, Lee J.J, Yun C.B and Kim, J.T.**(2008) "Damage Detection in Beam-Like Structures Using Deflections Obtained by Modal Flexibility Matrices," Advances in Science and Technology,Vol. 56, pp.483-488
- K.Y Koo, S.H Sung, J.W Park and H.J Jung.**(submitted) "Damage Detection of Shear Buildings Using Deflections Obtained by Modal Flexibility," Smart Materials and Structures