

# 동특성을 이용한 켄틸레버형 구조물의 손상추정

°천영수\*, 김홍식\*\*, 김하근\*\*\*, 강경완\*

## Damage Detection of Cantiler-type Structure by using Modal Parameters

Young-Soo Chun, Heung-Sik Kim, Ha-Geun Kim, Kyeong-Wan Kang

### ABSTRACT

Identification of damage of structures has recently received considerable attention in the light of maintenance and safety assessment. In this respect, the vibration characteristics of buildings have been applied steadily to obtain a damage index of the whole building, but it cannot be established as a practical method until now. A practical method for the estimation of structural damage using the first natural frequency and mode shape of building is proposed in this paper. The effectiveness of the proposed method is verified by numerical and experimental tests. From the results, it is observed that severity and location of damage can be estimated with a relatively small error by using modal properties of building.

### 1. 서론

구조손상은 균열이나 재료의 노후화 등 다양한 이유로 발생할 수 있으며, 손상이 발생하면 구조계의 물리적인 변수들과 함께 모달변수들이 변화하게 되므로 구조계의 물리적인 변수들과 모달변수들은 손상추정을 위한 지표로서 사용될 수 있다. 이러한 개념은 최근 많은 연구들에 응용되어 다양한 구조물의 손상추정에 사용되고 있다[1-4]. 이 경우, 대부분의 기법들은 고유진동수나 모드형태와 같이 단지 측정된 모달변수에 대한 제한된 정보만을 구조손상의 확정 또는 손상도의 정량화를 위해 요구한다. 그러나, 지금까지 어떠한 기술도 실제

구조물에 대하여 이러한 기능들을 신뢰성있게 제공하지 못하고 있는데, 특히 건축물과 같은 대형 구조물의 경우 더욱 그러하다. 이는 아마도 적용 대상에 따른 실험상의 제약, 부적절한 방법론의 사용, 그리고 실제 구조물을 대상으로 한 검증 기회의 결여 때문일 것이다. 건물과 같은 대형구조물의 경우 고려해야만 하는 수많은 부재들로 인해 해석되어야 하는 자유도 수가 너무 많다는 점 또한 적용상의 큰 난점이라 할 수 있다.

본 연구에서는 이러한 시도의 일환으로써 켄틸레버형 구조물인 아파트건물을 대상으로 실용적인 관점에서 현장실험상의 난점을 고려하여 1차모드의 진동특성만을 이용하고, 건물을 층 단위로 단순 모델링하여 손상을 추정하는 방법을 제시하고, 그 유용성을 검증해 보고자 한다.

\* 정희원, 대한주택공사 연구원

\*\* 정희원, 대한주택공사 환경친화연구센터장,  
수석연구원

\*\*\* 정희원, 대한주택공사 선임연구원

## 2. 손상추정 방법

본 연구에 적용된 손상추정 방법은 요소의 Flexibility를 이용한 방법으로 현장추정 모달정보를 바탕으로 다층 아파트건물의 층별 강성변화를 이용하여 국부적인 손상을 찾는 방법이며, 단지 1차모드의 고유진동수와 모드형태만이 입력정보로써 요구된다. 여기서, 국부적이란 말은 개개 부재단위를 의미하는 것이 아니라 층 단위를 이야기하는 것이며, 구조손상이란 개개 부재들의 손상으로 인한 층 강성의 감소를 의미한다. 그러므로, 손상된 건물의 층 강성은 손상지수와 무손상 상태 건물의 층 강성의 곱과 같다고 가정한다.

먼저, n개의 자유도를 갖는 구조계의 비감쇠 자유진동 운동방정식에 의한 고유치 문제는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$(K - \lambda_i M) \psi_i = 0 \quad (1)$$

여기서,  $\lambda_i$ 는  $i$ 번째 진동모드의 고유치( $= \omega_i^2$ )이며,  $\omega_i$ 와  $\psi_i$ 는 각각  $i$ 번째 진동모드의 고유진동수와 고유벡터(또는 모드형태)이다. 식 (1)을 Flexibility의 관점에서 재구성하면 식 (2)와 같다.

$$[A]^{-1} \{x_i\} = \frac{1}{\omega_i^2} \{x_i\} \quad (2)$$

여기서,  $[A]^{-1} = [M]^{-\frac{1}{2}} [K]^{-1} [M]^{\frac{1}{2}}$ 이고,  $[D] = [K]^{-1} = [\delta_{11} \sim \delta_{1N}, \dots, \delta_{M1} \sim \delta_{MN}]^T$ 로 Flexibility Matrix를 나타내며, 손상지수  $\alpha_i$ 와 요소  $\delta_{ij}$  사이의 관계는 식 (3)과 같다.

$$\delta_{ij} = \sum_{k=1}^N \frac{1}{\alpha_i} \frac{1}{K_i}, \quad \delta_{j+1} = \sum_{i=j+1}^N \frac{1}{\alpha_i} \frac{1}{K_i} \quad (3)$$

$[A]^{-1}$ 의 요소  $a_{ij}$ 를  $a_{ij} = \sqrt{m_i m_j} \delta_{ij}$ 로 정의하면,

$$[A]^{-1} = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{1N} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{M1} & \dots & a_{MN} \end{bmatrix} = [F] \{\delta\} \quad (4)$$

가 되고,  $[F] = \text{diag}[\sqrt{m_i m_j}]$ ,  $i, j = 1, 2, \dots, n$ ,  $[D] = [H] \left\{ \frac{1}{\alpha_i} \right\}^T$ 라 놓으면, 식(2), (3), (4)를 이용하여 다음과 같은 Least Square Solution 문제를 얻게 된다.

$$[C_i][F][H] \left\{ \frac{1}{\alpha_i} \right\}^T = \frac{1}{\omega_i^2} \{x_i\} \quad (5)$$

여기서,  $[C_i] = x_{ij}$ 이다.

## 3. 모형실험

### 3.1 모형 실험체

실험적인 방법에 의하여 제시된 손상추정 방법의 효용성을 검증하기 위하여 그림 1과 같은 모형 실험체를 제작하였다. 모형 실험체는 현재 국내에서 널리 사용되고 있는 일자형 평면의 아파트로서 84 m<sup>2</sup>-30세대-5층 규모 건물의 주요 벽체를 1/10로 축소한 것이다.

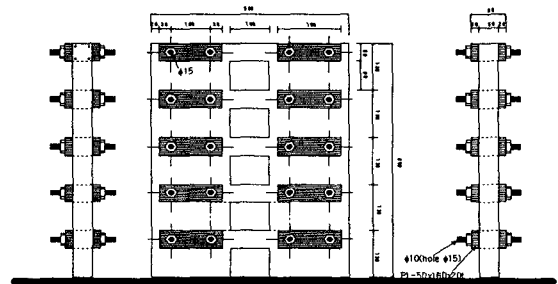


그림 1 모형 실험체

실험체는 2종류로 제작되었는데, SP 1의 경우에는 일반적인 균열에 의한 임의의 손상을 모델링하기 위하여 전층 단면을 동일하게 제작한 후, 균열이 발생하도록 가력하여 균열에 의한 임의의 손상을 도입하고 단면의 일부를 제거하였으며, SP 2의 경우에는 완전히 알고 있는 손상의 경우를 모델링하기 위하여 모형 실험체의 2층 부분을 그림에서와 같이 전단강성이 20% 감소되도록 개구부의 크기를 크게하여 제작하였다. <표 1>은 실험체 일람표를 나타낸 것이다.

### 3.2 실험체 설치 및 실험방법

실험은 센서와 임팩트 해머, 데이터 수집장치 및 진동분석기 또는 퍼스널컴퓨터로 구성되는 일련의 시스템을 이용하여 수행되며, 먼저 층격자진에 의

<표 1> 실험체 일람표

구분	층수	전체 크기(cm) (폭×두께×높이)	개구부 크기(cm) (폭×두께×높이)	벽체
SP1	5	50×8×100	10(11)×8×10	철근콘크리트 $f_{ck}=300\text{kg/cm}^2$
SP2				
※ SP2 실험체는 SP1과 동일하나, 임의의 손상을 가정하기 위하여 2층 부분의 개구부 크기를 증가시킴. ※ Steel 볼록= 5.0kg/층				

해 모형 실험체로부터 시간영역의 데이터를 얻고, 퍼스널컴퓨터 또는 진동분석기를 이용하여 Transfer function, Power spectra, 그리고 Coherence function 등을 계산함으로써 주파수영역에서의 모달정보를 추정하였다. 그림 2는 이러한 일련의 시스템에 대한 Set-up을 나타낸 것이며, 그림 3은 실제 Setting 상황에 대한 사진을 나타낸 것이다.

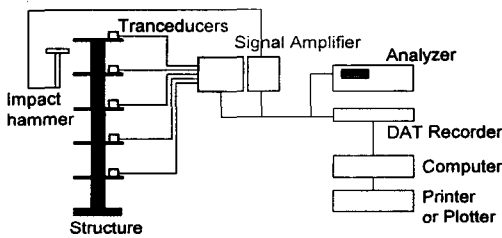


그림 2 모형실험을 위한 Setup

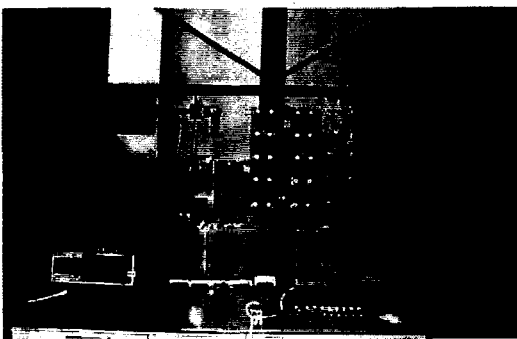


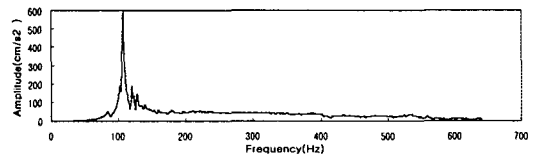
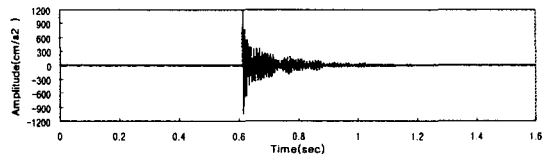
그림 3 실험체 설치상황 사진

실험은 먼저 손상 전 실험체의 층별 강성을 평가하기 위하여 탄성범위 내에서의 정적하중이 수행된 후, 임팩트해머에 의한 모달정보를 얻기 위한 진동실험 순으로 진행되었으며, 오차를 최소화하기

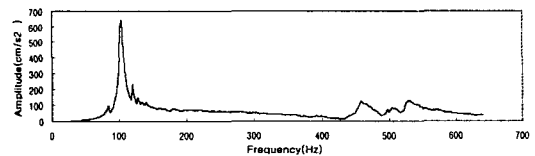
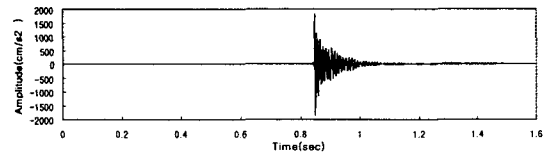
위하여 손상 전·후로 3차례씩 수행하여 그 평균값을 취득하였다.

### 3.3 실험결과

손상 전·후 측정된 SP1 실험체의 5층 가속도 시간이력과 FFT분석결과를 예로서 그림 4에 나타내었다. 고유진동수와 모드형태의 추정은 Transfer Function의 각 Peak점에서 위상정보와 Coherence function을 검토하여 추정하였으며, 그 결과를 <표 2>에 정리하여 나타내었다. 실험결과, 손상 전·후의 고유진동수와 모드형태의 변화가 뚜렷이 나타나 동 정보가 실험체의 손상추정에 좋은 지표가 될 수 있음을 확인할 수 있었다.



(a) 손상 전



(b) 손상 후

그림 4 SP1 실험체의 진동실험 결과

### 4. 실험결과를 이용한 손상추정방법 검증

<표 3>은 모형진동 실험결과를 이용하여 상기 2절에서 제시한 손상추정 방법에 따른 손상추정 결과를 나타낸 것이다. 표로부터 본 연구에서 제시된

<표 2> 모형실험체 진동실험 결과

구분	Modal Data					
	SP1	주파수(rad/s)	$\omega = 668.69$			
	모드형태	1.0	0.92	0.76	0.55	0.28
SP1*	주파수(rad/s)	$\omega = 647.92$				
	모드형태	1.0	0.92	0.78	0.57	0.27
SP2	주파수(rad/s)	$\omega = 628.42$				
	모드형태	1.0	0.93	0.79	0.60	0.25
SP2**	주파수(rad/s)	$\omega = 451.22$				
	모드형태	1.0	0.96	0.89	0.79	0.59

\* 2층 벽체에 임의의 손상을 도입한 후  
 \*\* 정적가력에 의한 균열 손상 후

손상추정 방법은 1차모드의 고유진동수와 모드형태만으로 아파트건물의 층별 손상을 10% 미만의 오차로 추정이 가능함을 알 수 있다.

<표 2.12> 손상추정 결과

구분		1층	2층	3층	4층	5층
SP1*	추정값	0.99994	0.8225	1.00003	0.99998	1.00001
	실제값	0.98	0.78	1.0	1.0	1.0
SP2**	추정값	0.99832	0.66508	1.0000	0.9998	0.9999
	실제값	1.0	0.68	1.0	1.0	1.0
SP2***	추정값	0.25967	0.66422	0.9998	1.0002	1.0003
	실제값	0.26	0.68	1.0	1.0	1.0

\* 2층 벽체 손상 후 추정값  
 \*\* SP1을 기준으로 2층 개구부 증가에 따른 손상추정값  
 \*\*\* 정적가력 후 추정값

## 5. 결론

본 연구에서는 진동측정 정보를 이용하여 아파트 건물의 층 단위 손상을 추정하는 실용적인 방법론을 제시하였으며, 모형실험을 통하여 제시된 방법론의 효용성을 검증하였다. 상기 연구로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 본 연구에서는 제안한 방법은 층별 강성변화를 추정하는 방법이므로 아파트건물 뿐 아니라 다른 건물에도 적용 가능한 것으로 판단된다.
- (2) 모형실험을 통한 검증결과, 제시된 손상추정 방법은 10% 미만의 오차로 건물의 층별 손상 유·무와 위치 추정이 가능한 것으로 나타났다.

(3) 단, 이러한 결과는 실험실 실험에 의해 비교적 정확한 데이터를 근거로 한 결과이며, 실제 현장측정으로부터 얻어지는 정보는 정보 자체에 상당한 오차를 포함하고 있을 것이 예상되므로 추정결과의 신뢰도는 다소 감소할 것으로 판단된다.

## 참고문헌

1. Natke, N.G. and Yao, J.T.P. (1986). System Identification Approach in Structural Damage Evaluation. *Proc. of ASCE Struct. Engrg. Congress, New Orleans, LA.*
2. Alampalli, S., Fu, G., and Dillon, E.W.(1997). Signal versus Noise in Damage Detection by Experimental Modal Analysis. *J.Struct. Engrg., ASCE, 123(2), 237-245.*
3. Hassiotis, S. (1999). Identification of Damage using Natural Frequencies and System Moments. *J. Engrg. Mech., 8(3), 285-297.*
4. Chen, H.P. and Bicanic, N. (1996). Structural Damage Ddetection from Natural Frequencies. *Proc. of the 5th ACME-UK, London, 64-67.*
5. 김홍식의, 아파트건물의 구조진단용 진동측정시스템 개발(1), 1999 연구개발사업 제1차년도 연구보고서, 건설교통부, 2000.11