

동특성을 이용한 벽식구조 아파트건물의

손상도 추정

°천영수*, 김홍식**, 김하근***, 강경완*

Damage Detection of Apartment Buildings using Modal Properties

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 under service loads. In buildings, the current techniques of safety assessment largely depend on partial experiments such as visual inspection, destructive and nondestructive tests which lead to overconsumption of time and cost as well as higher labor intensity. Therefore, a new trial for safety assessment is urgently needed today. 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. This study is aimed at investigating the application of damage identification methods using vibration characteristics of building. Numerical tests are performed on a apartment building. From the test results, it is observed that severity and location of damage can be estimated with a relatively small error by using natural frequency and mode shape data.

1. 서론

최근 건축물이 대형화·고층화됨에 따라 이들 구조물에 대한 안전성 요구가 증대되고 있다. 건물에 대한 안전진단은 건물이 계속하여 안전한 서비스를 제공할 수 있는지 여부를 확인하기 위한 것으로, 이를 위한 현재의 기술은 주로 시각적인 관측이나 파괴 또는 비파괴시험에 의한 국부적인 안전 검사방법에 의존하고 있는 실정이다. 이 경우, 검사의 질은 검사자 개인의 경험이나 지식에 의해

영향을 받게 되며, 직접적인 관찰이 애매한 영역이나 실제로 접근이 불가능한 부재들은 건물의 상태평가에 계속적으로 어려움을 제공하게 된다. 또한, 건물의 어느 한 부분에 대한 국부적인 검사 결과가 다른 부분의 상태도 대표할 수 없기 때문에 전체 건물의 상태를 잘 나타내기 위해서는 방대한 양의 측정이 필연적이다. 결국, 이러한 제약 조건들은 현재의 방법이 시간이 많이 소요되고, 노동집약적이며, 비용이 많이 든다는 것을 의미한다. 이러한 문제의 제기는 연구자들로 하여금 검사를 위한 새로운 도구를 찾도록 독려하였으며, 최근 구조물의 진동특성을 이용하여 이를 실현하려는 시도가 꾸준히 계속되고 있다. 하지만, 대상 구조물

* 정회원, 대한주택공사 연구원

** 정회원, 대한주택공사 환경진화연구소센터장, 수석연구원

*** 정회원, 대한주택공사 선임연구원

이 건물과 같이 대형 구조물일 경우 아직까지 실용적인 방법론이 제시되고 있지 못한 실정이다.

본 연구에서는 이러한 시도의 일환으로써 아파트 건물을 대상으로 고유진동수와 모드형태와 같은 진동특성을 이용한 손상추정 방법을 제시하고, 그 유용성을 검증해 보고자 한다.

2. 손상추정 방법

본 연구에서는 다층 아파트건물의 층별 강성변화를 이용하여 국부적인 손상을 찾는 방법을 제시하고자 한다. 여기서 국부적이란 말은 개개 부재단위를 의미하는 것이 아니라 층 단위를 이야기하는 것이며, 구조손상이란 개개 부재들의 손상으로 인한 층 강성의 감소를 의미한다.

2.1 손상의 정의

강성의 관점에서 건물의 손상은 대부분의 경우 탄성계수나 요소의 단면2차 모멘트와 같은 구조계의 물리적인 변수들의 감소로 표현될 수 있음으로 정량적인 손상모델은 구조계의 물리적인 변수들의 변화를 통하여 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\Delta K = \sum_{j=1}^N \alpha_j K_j \quad (1)$$

여기서, α_j 는 j 번째 요소의 손상지수이며, K_j 는 전체 강성행렬에 대한 j 번째 요소의 기여도이고, N 은 전체 구조요소의 수이다. 손상지수 α_j 는 손상위치 뿐 아니라 구조물의 손상도에 관한 정보도 제공할 수 있다.

2.2 손상추정 알고리즘

손상추정을 위하여 본 연구에서는 Perturbation Method에 의한 2가지 알고리즘을 적용하였다. 첫 번째 알고리즘은 고유진동수의 변화를 이용하는 방법(이하 방법 1이라 함)으로, 실험적으로 정보를 얻기 용이하다는 이유로 이를 이용한 많은 손상추정기법들이 소개되고 있다. 이 중, 비교적 적은 수

의 모드만을 활용하여 손상추정이 가능한 기법이 최근 Hassiotis 등[3]에 의해 제안되었다. 이 알고리즘은 고유진동수의 민감도 조건하에서 최적화기법을 적용한 것으로 다음과 같이 요약될 수 있다.

$$\text{Minimize } \frac{1}{2} \delta K^T Q \delta K + \delta K^T c$$

$$\text{subject to } D\delta K = \delta\lambda \text{ and } \delta K \leq 0 \quad (2)$$

여기서, c 와 Q 는 각각 민감도 조건하에서 부재와 관련된 벡터와 행렬이며, δK 와 $\delta\lambda$ 는 각각 부재의 손상과 고유진동수의 변화량을 의미한다. 이 알고리즘에 대한 보다 자세한 내용은 참고문헌[3]에 제시되어 있다.

두 번째 알고리즘은 건물의 모드형태 변화로부터 직접 손상의 위치와 정도에 대한 정보를 얻을 수 있는 방법(이하 방법 2라 함)으로, 이 방법이 갖는 특징은 해석에 있어서 오직 모드형태만이 필요하며, 단지 몇 개의 모드만으로 손상의 위치와 크기를 알 수 있다는 점이다. 이 알고리즘의 경우 손상은 i 번째 진동모드에 대한 j 번째 부재의 손상지수 β_{ji} 로부터 추정되며, 이를 요약하면 다음과 같다.

$$\beta_{ji} = \frac{E_j}{E_j^*} = \frac{\Phi_i^{*T} C_{j0} \Phi_i^*}{\Phi_i^T C_{j0} \Phi_i} \frac{K_i}{K_i^*} \quad (3)$$

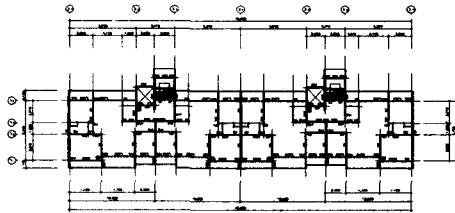
여기서, Φ_i 는 i 번째 모달벡터, K_i 는 전체 강성행렬에 대한 i 번째 부재의 기여도, C_{j0} 는 K_i 값의 기하학적인 양만을 포함하는 행렬이며, (*)는 손상 구조물에 대한 값이다. 이 알고리즘에 대한 자세한 내용은 참고문헌 [4]에 제시되어 있다.

3. 손상추정 방법 검증

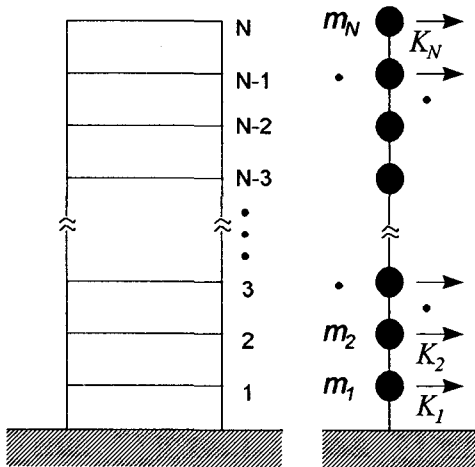
제시된 알고리즘과 손상에 대한 정의를 바탕으로 아파트건물의 손상을 추정하기 위한 구체적인 방법과 절차가 다음 절에서 소개될 것이며, 예제를 통하여 유용성이 검증될 것이다.

3.1 연구대상 건물

예제건물은 현재 국내에서 널리 사용되고 있는 일자형 평면의 아파트로서 규모는 84 m²-40세대-10층이다(그림 1 참조).



(a) 평면도



(b) 단순화 모델

그림 1 예제 건물 및 자유도

해석의 단순화를 위하여 건물을 구성하는 모든 부재들은 균일한 것으로 가정한다. 본 예제에서는 손상 전 건물에 대한 완전한 해석모델이 구축되었다고 가정한다. 또한, 손상평가는 개개 부재레벨이 아닌 층 단위레벨의 손상평가를 대상으로 한다.

3.2 손상추정 절차

1 단계

먼저, 3.1절의 가정에 따라 건물을 그림 1과 같

이 층 단위로 n 개의 자유도를 갖는 단순 시스템으로 변환한다. 이 때, 층별 강성은 FEM 프로그램 등을 이용하여 각 층에 단위하중을 적용하여 얻을 수 있다.

2 단계

손상추정에 필요한 손상변수(고유진동수, 모드형태)를 실험을 통하여 얻는다. 본 예제의 경우 임의의 층에서의 구조손상은 유한요소 해석모델의 강성을 감소시킴으로서 얻을 수 있으며, 고유치해석을 통하여 손상 전·후 건물에 대한 모달정보를 얻을 수 있다. 이 경우, 고유치해석을 통하여 얻은 모달정보의 변화량은 현장실험을 통하여 알고 있는 데이터라고 가정하고, 임의의 층에서의 손상 역시 가정된 손상시나리오에 따른 것으로 한다.

본 예제에서는 손상정도와 손상위치에 따른 모달특성의 변화와 제시된 추정기법의 효용성을 확인하기 위하여 5개의 손상 시나리오가 구성되었다. 일반적으로 기존연구에서는 대부분 제시된 알고리즘의 효용성을 가시화하기 위하여 손상도가 매우 큰 경우를 대상으로 적용성이 검토되었으며, 사용된 고유진동수와 모드형태 역시 현실적으로 얻기 어려운 고차모드까지 적용이 고려되었다. 하지만, 실제로 노후된 건물에서 나타날 수 있는 내재적인 손상은 이 보다 훨씬 적을 수 있으며, 이러한 손상의 발견이 실무적인 차원에서 보다 효용성이 있는 것으로 사료된다. 또한, 건물의 경우 실측을 통하여 얻을 수 있는 진동모드의 수는 매우 제한적이며, 그 신뢰도 또한 많은 제약을 갖고 있으므로 본 예제에서는 경량의 손상(10%)을 대상으로 1차 모드만을 사용한 경우와 신뢰성 있는 결과를 얻기 위하여 필요한 진동모드 수에 대한 검토결과를 제시하고자 한다. <표 1>은 손상시나리오를 정리하여 나타낸 것이다.

<표 1> 손상 시나리오

구분	손상요소(층)	손상정도	사용진동모드
Case 1	1층	강성 10% 저하	1차 모드
Case 2	5층	강성 10% 저하	1차 모드
Case 3	9층	강성 10% 저하	1차 모드
Case 4	10층	강성 10% 저하	1차 모드
Case 5	5층(또는 10층)	강성 10% 저하	1차~5차 모드

<표 2> 손상 추정결과(고유진동수를 이용한 경우)

구분	실제 손상		추정된 손상	
	손상요소(층)	손상정도	손상요소(층)	손상정도
Case 1	1 층	- 10%	1 층	- 11.0%
Case 2	5 층	- 10%	5 층	- 5.6%
Case 3	9 층	- 10%	9 층	- 8.6%
Case 4	10 층	- 10%	10 층	- 8.0%
Case 5	5 층	- 10%	5 층	- 9.4%

<표 3> 손상 추정결과(모드형태를 이용한 경우)

구분	실제 손상		추정된 손상	
	손상요소(층)	손상정도	손상요소(층)	손상정도
Case 1	1 층	- 10%	1 층	- 10.2%
Case 2	5 층	- 10%	5 층	- 8.0%
Case 3	9 층	- 10%	9 층	- 10.2%
Case 4	10 층	- 10%	-	-
Case 5	10 층	- 10%	5 층	- 8.9%

3 단계

2.2절에서 제시된 알고리즘에 따라 강성의 감소를 역 계산한다. 이 경우, 손상추정의 정확도는 사용 진동모드 수, 손상의 위치와 정도 등에 따라 달라질 수 있다. 그러므로, 역 계산된 강성의 감소량에 따라 제시된 방법의 유용성을 검토할 수 있다.

3.3 손상추정 결과

손상위치에 따른 추정결과를 알아보기 위하여 계획된 손상시나리오에 따라 1층, 5층, 9층, 10층을 대상으로 각각 10%의 강성감소가 유도되었으며,

방법 1과 방법 2에서 제시된 알고리즘에 따라 손상의 위치와 정도가 계산되었다. <표 2>와 <표 3>은 각각 그 결과를 나타낸 것이다. 이 경우 사용된 진동모드의 수는 최대 5차까지이다.

방법 1의 경우, <표 2>의 결과로부터 1차 진동모드만을 사용한다면 5층 손상의 경우를 제외하고는 모든 층에서 손상위치 탐색이 가능하다는 것을 알 수 있다(그림 2 참조). 하지만, 손상의 추정도는 위치에 따라 다소 차이가 있어 동 조건하에서는 정확한 손상추정이 어려운 것으로 판단된다. 그러나, 이러한 문제점은 이전 연구결과에서와 같이 고차모드를 고려하므로써 개선될 수 있다. 그림 3은

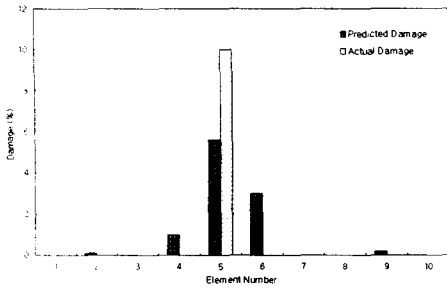


그림 2 손상추정결과 (방법 1, Case 2)

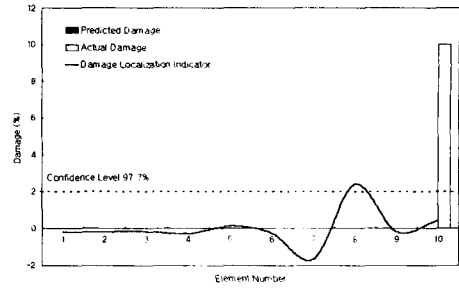


그림 4 손상추정결과 (방법 2, Case 4)

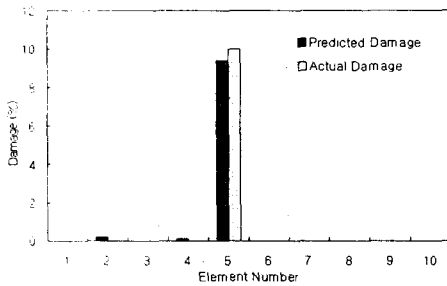


그림 3 손상추정결과 (방법 1, Case 5)

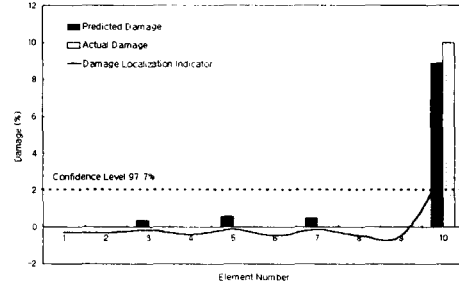


그림 5 손상추정결과 (방법 2, Case 5)

추정도가 가장 낮은 5층 손상을 대상으로 5차모드까지 고려한 경우의 손상추정 결과를 도시한 것으로서(Case 5) 상기의 문제점이 상당히 개선되어 손상의 위치와 크기 모두 잘 예측될 수 있음을 알 수 있다. 이상의 결과로부터 이 알고리즘의 경우 일반적으로 단일 위치에서 경량의 손상도는 5차모드까지의 데이터를 사용한다면 손상위치에 관계없이 모두 잘 예측될 수 있을 것으로 판단된다.

방법 2의 경우, 방법 1과 유사하게 1차 진동모드만을 사용한다면 최상층인 10층 손상의 경우를 제외하고는 모든 층에서 손상위치 탐색이 가능한 것으로 나타났으나, 손상의 추정도는 상부층 손상의 경우 거의 추정이 불가능한 것으로 나타났다(그림 4 참조). 특히, 10층 손상의 경우 전혀 다른 층에서 손상이 발생한 것으로 잘못 해석된 결과를 나타내 손상위치에 따라 손상위치 탐색에 크게 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 또한, 손상도에 대한 추정결과 역시 손상위치 탐색과 유사하게 손상위치

에 따라 영향을 받는 것으로 나타났다. 하지만, 그림 5로부터 이 경우에도 고차진동모드가 고려된다면 이러한 문제점은 상당히 개선될 수 있는 것으로 나타났다.

4. 결론

본 연구에서는 진동특성을 이용한 아파트건물의 손상추정방법과 절차를 소개하였으며, 예제를 통하여 그 유용성을 검증하였다. 수치해석적인 검증을 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 제시된 알고리즘들은 모두 5차까지의 모달특성 변화를 이용한다면 아파트건물의 손상추정이 가능한 것으로 판단된다.
- (2) 실무적인 차원에서 볼 때 현장실험을 통하여 5차의 모드형태를 얻는 것은 실제적으로 많은 어려움이 따르고, 손상도의 추정결과 역시 정확도가 상대적으로 떨어진다는 점에서 방법2 보다는 방법 1이 보다 효과적인 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Chan, G.K., Lin, M.S. and Thambirajah, B. (1995). Damage detection of buildings: Numerical and Experimental studies. *J. Struct. Engrg., ASCE*, 121(8), 1155-1160.
2. Morteza, A.M., Torkamani, and Ahmad, K. Ahmadi. (1988). Stiffness identification of a tall building during construction period using ambient tests. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 16, 1177-1188.
3. Hessiotis, S. and Jeong, G.D. (1993). Assessment of structural damage from natural frequency measurements. *Computers & Structures*, 49(4), 679-691.
4. Kim, J.T. and Stubbs, N. (1995), Mode-uncertainty impact and damage-detection accuracy in plate girder. *J. Struct. Engrg., ASCE*, 121(10), 1409-1417.
5. 김홍식의, 아파트건물의 구조진단용 진동측정시스템 개발(1), 1999 연구개발사업 제1차년도 연구보고서, 건설교통부, 2000.11