

구조적 손상추정 방법의 실험적 비교

Experimental Comparison of Structural Damage Detection Methods

임현우* · 문영종** · 이종현*** · 이인원****

Lim, HyunWoo · Moon, YeongJong · Lee, JongHeon · Lee, InWon

1. 서론

토목 및 건축 구조물은 긴 공용수명 동안, 외적 혹은 내적원인에 의해 필연적으로 손상을 입게 된다. 주기적 계측을 통해 구조물의 손상을 초기에 찾아내는 것은 공용수명 연장과, 대형 인명 및 재산 피해 예방을 위해 반드시 필요한 일이다. 이와 같은 이유로 인해 health monitoring, 손상추정기법 등이 최근에 많은 관심을 끌고 있고, 각 분야에서 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 지급현재 실무에 사용되고 있는 기법도 있다. 이렇듯 다양한 방법들을 실제로 사용하기 위해서는 각각의 특성 및 적용성을 알아야 한다. 본 논문에서는 손상추정기법 들의 실제 적용에 중점을 두고, 각 기법들이 어떠한 특징 및 장, 단점을 가지고 있는지 실험을 통해 비교하고자 한다.

2. 실험의 내용

2.1 재료 및 장비

실험에 사용된 재료는 알루미늄 빔이고, 제작한 빔의 제원은 길이, 폭, 두께가 각각 600mm×40mm×4mm 이며, 탄성계수 $E = 70 \text{ Gpa}$, 밀도 $= 2710 \text{ kg/m}^3$ 이다. 실험장비는 B&K에서 제작된 FFT Analyzer, 가속도계, PCB에서 제작된 impact hammer, 진동기등을 사용한다. 실험장비의 구성은 그림 1과 같다.

표 1. 가속도계의 제원 (type4507)

Reference Sensitivity	10.04mV/ms ⁻² (98.5mV/g)
Frequency Range	Amplitude (±10%) : 0.3Hz to 6kHz
	Phase (±5°) : 2Hz to 5kHz
Measuring Range	±700 ms ⁻² peak (71g peak)

2.2 과정

손상은 그림 2와같이 빔 양쪽 폭의 감소로 나타나며 크기는 0%, 5%, 10%, 20%, 30%이다. 위치는 켈틸레버의 지점에서 1/4, 2/4, 3/4의 3곳으로, 총 13가지의 손상형태가 정확히 동일하게 제작된 13개의 알루미늄빔에 주어지게 된다. 손상의크기와 위치를 찾아내기 위해 일반적으로 널리 알려져 있고, 실험이 가능한 대표적인 3가지 방법인 고유진동수를 이용한 방법, 모드형상을 이용한 방법, 파동의 전

* 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 석사과정 · E-mail: hyuncom2@kaist.ac.kr - 발표자
 ** 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사과정 · 공학석사 · E-mail: oonehe78@kaist.ac.kr
 *** 정회원 · 경일대학교 토목공학부 교수 · 공학박사 · E-mail: honey55@hosanna.net
 **** 정회원 · 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 교수 · 공학박사 · E-mail: lwlee@kaist.ac.kr

파를 이용한 방법을 이용 켄틸레버 빔의 실험을 수행하며, 그 결과로 세 방법의 성능을 비교한다.



그림 1. 실험장비의 구성



그림 2. 빔의 손상형태

3. 고유진동수를 이용한 방법

모든 구조물은 고유의 진동수를 가지고 있다. 이러한 구조물에 발생한 손상은 일반적으로 강성의 감소로 이어지고 결론적으로 고유진동수의 변화를 초래하게 된다. 이러한 고유진동수의 변화를 측정함으로써 강성의 감소를 추측한다는 것이 이 기법의 기본적인 내용이다. 구조물의 고유진동수를 구하는 것은 비교적 간단한 일이며, 비용이 적게 들기 때문에 실제로도 흔히 쓰이고 있는 방법이지만, 손상 이외에도 구조물의 고유진동수 변화에 영향을 미치는 변수(온도, 습도, 하중조건 등)들이 있으므로, 단지 이 방법만으로 손상을 확신 하기는 어렵다는 단점이 있다.

3.1 실험과정

켄틸레버 빔의 지점 부근에 충격을 가한 후, 가속도계를 이용하여 자유단의 가속도를 측정한다. Impact hammer로 측정된 충격과 가속도 데이터를 이용하여 FFT Analyzer로 주파수 응답함수(Frequency Response Function)를 구하고, 이것으로 각 빔의 고유진동수를 구하게 된다. 우선 제작된 13개의 빔들이 정확하게 동일한지 확인하기 위해, 손상을 가하기 전 빔들의 고유진동수를 측정한다. 이론적으로는 정확히 같은 고유진동수가 측정되어야 하나, 실제 실험에서는 많은 오차의 요인으로 인해 동일한 빔이라도 고유진동수의 차이가 발생한다. 오차요인으로는 지점을 고정시키는 상태, 충격의 위치와 세기, 가속도계와 연결된 선의 무게, 온도 등이 있을 수 있다. 많은 실험을 통하여 확인된 오차의 크기는 최대 0.5%였으며, 결과적으로 손상에 의한 고유진동수의 변화는 최대 오차수준인 0.5%를 초과해야만 의미있는 결과가 된다.

3.2 실험결과

표 2에서 보는바와 같이 5%, 10% 손상된 빔의 경우 건전한 빔과의 고유진동수 차이가 거의 오차수준인 0.5% 이내이므로, 이 경우는 손상추정이 불가능 하다. 표 2와 그림 3에서와 같이 20% 이상 손상된 빔의 첫번째 고유진동수를 비교해 보면 1/4위치에 손상이 있을 경우 그 차이가 가장 크다. 이 결과는 휨모멘트가 가장 큰 곳에 손상이 있을 경우 고유진동수의 차이가 가장 커짐을 나타낸다. 이와 같이 두

번째 고유진동수는 2/4위치에, 세번째 고유진동수는 1/4위치에 손상이 있을 때, 가장 차이가 크다. 두 번째 고유진동수에서 3/4의 위치는 nodal point에 근접하므로 이 위치에서의 손상에 의한 고유진동수의 변화는 거의 없다. 전체적으로 손상이 커짐에 따라 고유진동수의 차이 또한 커지는 경향을 나타내고 있으므로, 이러한 사실을 이용하여 손상의 크기를 추정 할 수 있다. 여러 실험중 가장 손쉽게 결과를 얻을수 있는 방법이지만, 실험실에서의 절제된 조건하에서도 미세한 손상은 찾아 내기 어렵고, 위치또한 정확히 찾아내는 것이 불가능 하다.

표2.건전한빔과손상을입은빔의고유진동수비교(%)

크기 위치	첫 번째 고유진동수			두 번째 고유진동수			세 번째 고유진동수		
	10%	20%	30%	10%	20%	30%	10%	20%	30%
1/4	0.8	1.1	1.5	0.3	0.5	0.6	0.3	0.7	0.8
2/4	0.4	0.8	0.1	0.1	0.8	0.9	0.3	0.3	0.4
3/4	0.3	0.3	0.7	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.7

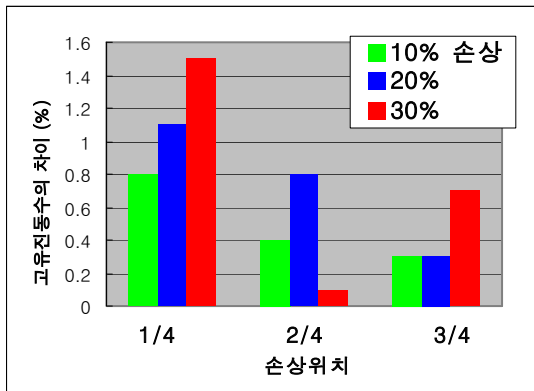


그림3.첫 번째 고유진동수의비교

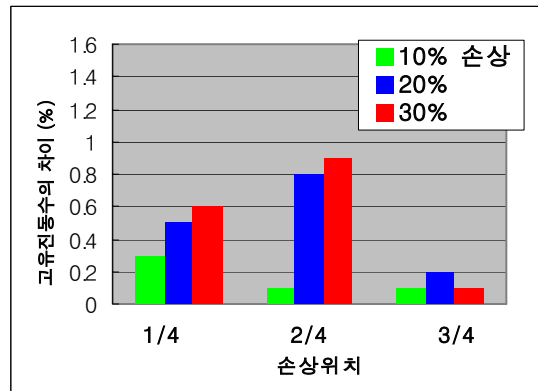


그림4.두 번째 고유진동수의비교

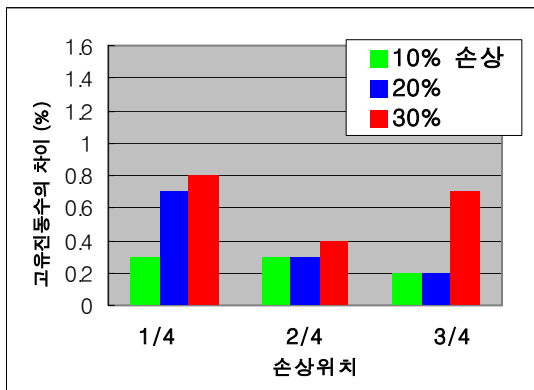


그림5.세 번째 고유진동수의비교

4. 모드형상을 이용한 방법

구조물이 특정진동수로 진동을 할 경우, 일정한 형상을 유지하게 되는데, 이것을 모드형상 이라고 한다. 구조물에 손상이 생기면, 손상부위의 강성이 감소하게 되고, 따라서 해당부위의 모드형상이 미소하게 변화를 일으키게 된다. 이러한 변화를 이용하여 손상을 추정하는 것이 이 기법의 기본적인 내용이다. 건전한 상태의 데이터가 없어도, 손상추정이 가능하다는 장점이 있으나, 실제 모드형상을 구하기 위해서는 많은 센서가 필요하고, 방법또한 복잡하므로 비경제적이라는 단점이 있다.

4.1 실험과정

그림 1과 같이 캔틸레버빔의 자유단에 진동기를 부착한 후, 빔의 고유진동수에 맞추어 진동을 가한다. 진동하고 있는 빔의 자유단에서부터 지점까지 센서를 등간격으로 움직이며 최대변위를 측정하고, 측정된 변위값을 연결하여 캔틸레버 빔의 모드형상을 구하게 된다. 빔과 진동기의 부착상태에 의해 변위의 오차가 발생할 수 있으므로 주의해야 한다. 일반적으로 측정지점의수가 많을수록 정확한 모드형상을 구할 수 있으며, 본 실험에서는 총 60개의 점에서 변위를 정밀하게 측정하였다.

4.2 실험결과

그림 6은 2/4위치에 손상이 있는 경우의 두번째 모드형상이다. 5%, 10%손상의 경우는 건전한 빔의 모드형상과 거의 일치하여 손상추정이 불가능 하나, 20%, 30%손상의 경우는 손상이 증가함에 따라 모드형상의 진폭이 커지는 것으로, 손상의 확인이 가능하다. 손상의 위치를 추정하기 위한 방법으로 wavelet 변환법과, 최근에는 신경망을 이용한 방법도 제시되고 있다. 본 실험에서는 wavelet 변환법을 수행하였으나, 가장 큰 30%손상의 경우에도 위치추정은 실패하였다. 실험에서 사용된 빔을 유한요소로 모델링 하여 수치해석을 수행한 결과로는 매우 작은 손상의 위치도 쉽게 찾아 낼 수 있었다. 이는 모델의 요소 수가 충분히 많아, 손상의 위치에서 미세하지만 급격하게 변하는 모드형상을 찾아 낼 수 있기 때문이다. 실험에서도 충분히 많은 수의 점에서 매우 정밀한 모드형상을 측정한다면 정확한 손상의 위치추정이 가능 할 수 있지만, 실제 적용하기에는 비경제적이다.

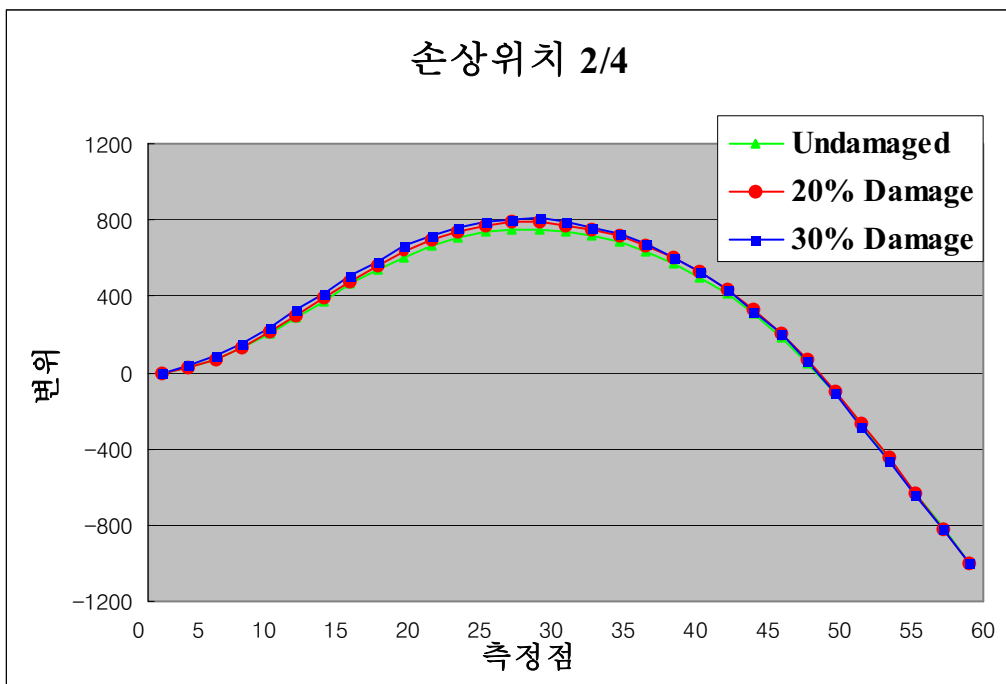


그림6. 두번째 모드형상비교(손상위치 1/2)

5. 파동의 전파를 이용한 방법

빔에 충격을 가하게 되면 발생한 파동은 일정한 속도로 빔을 따라 이동하게 되고, 장애물이 있는 경우에는 그 일부가 반사되어 돌아오게 된다. 이러한 성질을 이용, 손상부분에서 반사되어 오는 파동의 도달시간을 측정하여, 손상의 위치를 추정하게 된다. 특정한 한 점에서의 가속도를 측정함으로써 쉽게 결과를 얻을 수 있다는 장점이 있으나, 균일단면이외의 복잡한 구조물에는 적용하기가 어렵다는 단점

이 있다.

5.1 실험과정

그림 1과 같이 켈틸레버의 자유단에 가속도계를 부착시킨 후 지점부근에 impact hammer를 사용하여 충격을 가한다. 파동이 자유단에 도달한 후, 다시 지점에 반사되어 올 때 까지의 시간동안 가속도를 측정한다.

5.2 실험결과

그림 7은 손상이 없는 빔에 충격을 가한 후 자유단에서의 가속도를 측정 한 그래프이다. 처음 파동이 자유단에 도달 한 후, 이것이 다시 지점에 반사되어 오기 전까지 부드러운 가속도 곡선이 나타난다. 그림 8은 20%의 손상이 지점에서 1/4위치에 있을 때의 가속도 그래프로, 파동이 지점에 반사되어 오기 이전에 손상부위에서 반사되어온 파동의 간섭으로 인해 생긴 작은 불연속 지점이 확인된다. 이 불연속 지점의 위치를 이용하여 손상의 위치를 추정 할 수 있다. 실험결과 5%, 10%의 작은 손상을 찾아 낼 수 없었다. 실험실에서 사용한 매우 균질한 알루미늄빔이 아닌, 실제 비균질하고 복잡한 구조물에 적용할 경우, 여러가지 변수로 인해 가속도 데이터만으로 손상을 확신하기는 어려울 것이다. 그러나 이 방법은 손상의 위치를 쉽고, 정확하게 찾아 낼 수 있기 때문에, 앞으로 많은 발전이 있을 것이다.

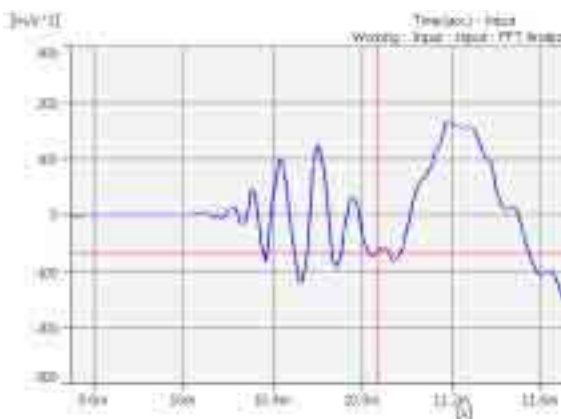


그림 7. 자유단에서의 가속도(건전한빔)

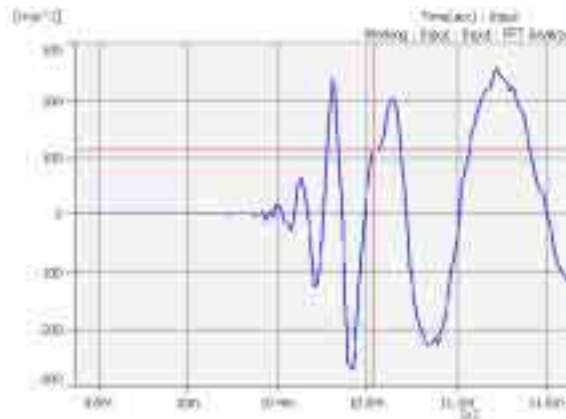


그림 8. 자유단에서의 가속도(20%손상)

6. 결론

본 연구에서는 지금까지 연구, 개발되어온 손상추정기법들의 실제 적용에 중점을 두고, 각기법들을 실험결과를 통해 비교해 보았으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 여러 손상추정기법들의이론이나 수치해석을 통한 결과로는 미세한 손상의 추정이 가능하지만, 실제 실험에서는대부분의 경우 오차 혹은 현실적인 문제에 의해 20%미만의 손상을 찾는 것은 불가능하다.
2. 고유진동수를 이용한 방법은 가장 적은 비용으로 실험을 쉽게 수행 할 수 있다는 장점이 있는 반면, 손상 이외의 온도, 하중조건등 여러 환경조건에 의해 추정에 혼란을 일으킬 수도 있다. 또한 정확한 손상의 위치를 찾는 것이 불가능하다.
3. 모드 형상을 이용한 방법은 다량의 센서가 필요하고, 이것을 이용하여 정밀한 모드형상을 구하는 데에 많은 시간이 소요되므로 실제로 적용하게 될 경우에는 비경제적인 방법이 될 것이다. 정밀하게 측정된 모드형상을 이용해서 손상의 크기를 정량화 할 수 있고, 수치해석을 통해서는 매우 작은 손상의 위치까지 찾아 낼 수 있다. 그러나 현실적으로 제한된 센서개수를 사용하여 충분히 크지않

은 손상의 위치를 찾아내는 것은 매우 어려운 일이다.

4. 파동의 전파를 이용한 방법을 사용하여 간단한 실험을 통해 정확한 손상의 위치를 추정할 수 있다. 실제 적용시에도 비교적 정확한 손상의 위치를 찾아 낼 수 있으리라 예상되나, 복잡한 단면이나, 비균질한구조물에 적용하기에는 많은 보완이 필요할 것이다.

감사의글

본 연구는 2000년도 과학기술부의 국가지정연구실 지원(과제번호:2000-N-NL-01-C-251)으로 이루어진 것으로, 이에 감사의 마음을 전합니다.

참고문헌

1. G.M. Owolabi, A.S.J. Swamidas (2003) Crack detection in beams using changes in frequencies and amplitudes of frequency response functions, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 265, pp. 1-22.
2. S. T. Quek, Q. Wang, L. Zhang, K. H. Ong (2001) Practical issues in the detection of damage in beams using wavelets, *Smart Mater. Struct.*, Vol. 10, pp. 1009-1017.
3. A. V. Ovanosova, L.E. Suarez (2004) Applications of wavelet transforms to damage detection in frame structures, *Engineering Structures*, pp. 39-49.
4. A Chukwujekwu Okafor, A Dutta (2000) Structural damage detection in beams by wavelet transforms, *Smart Mater. Struct.*, Vol. 9, pp. 906-917.
5. Y. Zou, L. Tong and G. P. Steven (2000) Vibration-Based Model-Dependent Damage Identification and Health Monitoring for Composite Structures - A review, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 230(2), pp. 357-378.
6. O. S. Salawu (1997) Detection of structural damage through changes in frequency - A review, *Engineering Structures*, Vol. 19. No.9.