

크로스빔 구조물의 손상진단을 위한 진동감시 Vibration monitoring for damage detection of crossbeam

*김진영¹, #김성렬¹, 김철민¹, 류호연¹

*J. Y. Kim¹, #S. Y. Kim(sungrkim@kitech.re.kr)¹, C.M.Kim¹, H.Y. Ryu¹

¹한국생산기술연구원

Key words : Vibration monitoring, 3D FE analysis, Damage evaluation, Frequency analysis

1. 서론

일반적으로 구조물의 손상여부 검사는 육안검사와 장비를 이용한 고급검사로 나눌 수 있다. 육안검사는 가장 널리 이용되는 비파괴검사의 한 방법으로 편리하고 신속하며 간편하여 구조물의 손상진단에 널리 사용되고 있지만, 사람의 경험이나 숙련도에 따라 손상여부의 판단기준이 모호하여 신뢰성이 떨어지는 단점이 있다. 따라서 이런 문제점을 보완하기 위한 방법으로 초음파, 와전류 스캐닝, 자기장 검출, 이크스 선촬영법, 음향방출(Acoustic Emission) 시험, X-ray 검사 등이 사용되고 있다. 그러나 이러한 방법들은 대부분 손상이 예상되는 지점에 대한 국부적인 검사에 국한되어 있지만, 구조물의 진동특성 변화를 기반으로 한 손상감지는 구조물 전체의 상태를 평가하는 방법이다. 진동검사 기법은 구조물의 질량과 강쇠, 강성으로부터 결정되는 모달 파라미터(진동수, 모드형상, 모드 감쇠)가 구조물의 손상전후에 변화한다는 사실에 기인한 것으로서, 최근에 노쇠해 가는 구조물이 증가함에 따라 구조물 전체에 대한 진단과 신뢰성 있는 검사방법의 요구에 부합되는 방식이다.

본 연구에서는 손상이 난 철도구조물의 크로스빔 부분의 보수 전후 진동감시에 의한 진동특성과 해당 구조물의 구조해석을 통한 손상전후의 진동특성 변화를 살펴보았다.

2. 보강 전후의 진동감시

본 연구대상의 철도구조물 크로스빔 균열은 2008년에 발견되어, 2009년에 보강이 시행되었다. Fig. 1에서 보이는 바와 같이 균열 길이는 약 835mm이며, 균열주변부의 응력변화 측정 결과, 차량하중에 의한 압축응력과 용접잔류응력에 의한 압축방

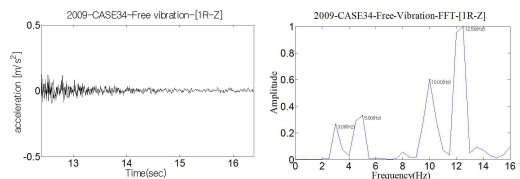
향으로의 응력집중, 또는 주기적인 하중에 의한 높은 응력집중에 의해 균열이 발생한 것으로 사료된다.



Fig. 1 Damages of crossbeam

진동감시를 위해 측정은 크로스빔의 균열 발견 직후인 2009년에 55번이 실시되었고, 그 이후에 균열발생부의 보강이 이루어졌다. 그리고 2010년에는 보강완료 상태에서 차량이 완전히 통과할 때까지 53번의 진동검출을 실시하였다. 교량의 고유진동수를 알아보기 위하여, 진동 응답 데이터에서 열차 통과후의 자유진동 파형데이터만을 추출하여 파워스펙트럼을 계산하였다. Fig. 2는 자유진동 응답의 대표적인 파형과 FFT 결과로서 3Hz, 5Hz, 10Hz, 12.5Hz에서 지배적 주파수를 확인할 수 있다.

Fig. 3은 보수 전후의 측정지점 [1R-Z]에서의 53회에 걸친 파워스펙트럼 결과를 나타낸 것으로 해당 구조물의 지배적 주파수는 3~5Hz 근방에서



(a) Free vibration response

(b) Power Spectrum

Fig. 2 Signal analysis results on 1/4 down line side main girder ([1R-Z])

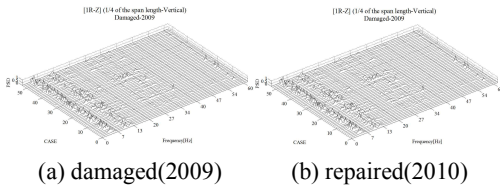


Fig. 3 Power Spectrum of fifty-three cases on [1R-Z]

나타남을 알 수 있으며 보강 전후의 뚜렷한 차이는 드러나지 않았지만, 파워 스펙트럼의 값을 정규화한 후 평균을 낸 결과, 특정모드에서의 진폭변화가 나타남을 확인할 수 있었다.

3. 유한요소 해석에 의한 진동분석

크로스 빔의 보강 전후 교량의 고유진동수 변화 결과를 고찰하기 위하여, 3차원 실측 구조물 데이터를 작성하여 구조해석 소프트웨어인 ABAQUS로 손상이 있는 구조물과 손상이 없는 구조물의 고유진동수 해석을 실시하였다. 해석 모델은 Fig. 4 (a)에 나타내었다. 크로스빔 구조물을 포함한 모델 전체는 SM400 재질로서 탄성계수는 210,000 ton/mm², 밀도 7.86ton/mm³, 포아송비 0.3으로 설정하였다. 3차원 실측 모델에 실제 크랙 발생부와 같은 위치에 Fig. 4 (b)와 같이 크랙의 발생 상황을 고려, 크로스빔과 메인 거더부의 연결을 단순 분리하여 손상모델로 설정하였다.

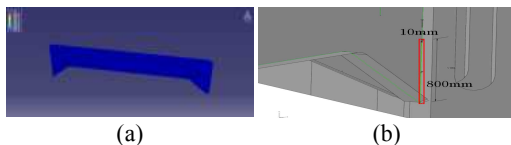
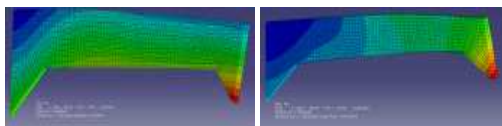


Fig. 4 FE model of crossbeam by ABAQUS

손상 이전의 모델의 1차, 2차 고유치 해석 결과를 Fig. 5에 나타내었다.

Table 1은 단순분리 전의 정상모델과, 단순분리 후의 손상모델의 고유치해석 결과로서, 진동계측을 통한 결과와 많은 부분에서 일치하였다. 손상 전후의 모델의 고유진동수의 변화는 크지 않으나,



(a) 1st mode (b) 2nd mode

Fig. 5 Mode shape of FE model

Table 1 Natural frequency of intact and damaged model

Mode no.	Normal model	Damaged model	difference
	(Hz)	(Hz)	
1	3.433	3.429	0.004
2	4.772	4.754	0.018
3	5.915	5.902	0.014
4	8.675	8.674	0.001
5	8.965	8.965	0.000
6	9.740	9.737	0.003
7	10.287	10.283	0.004
8	10.632	10.593	0.039
9	11.519	11.515	0.004
10	12.113	12.108	0.006

2, 3, 8 모드에서 고유진동수 변화가 나타났으며, 특히, 모드 8은 전체 1~10까지의 모드 중에서 가장 고유진동수 변화가 크게 나타났다.

4. 결론

본 논문에서는 손상된 철도 구조물의 보강 전후의 진동감시를 통한 진동 특성 변화에 대한 분석을 실험하였다. 그 결과로써 보강 전후의 지배적 주파수의 차이는 나타나지 않았으나, 2차, 3차 모드에서 보수작업 전후에 진폭변화가 나타났음을 알 수 있었다. 또한 3차원 실측모델의 유한요소해석을 통하여 실측결과와 비교 분석을 하였고, 특정 방향에서 모드 2와 모드3의 유효질량이 손상전후에 다르게 나타났음을 확인하였다. 손상이전의 모델에 비하여 손상이후 구조물의 모드 2 유효질량은 감소한 반면 모드 3의 유효질량은 증가하였다. 특정모드의 유효질량의 변화는 계측결과에서 나타난 특정 진동수의 진폭변화와 밀접한 관계가 있으며, 이러한 사실을 토대로 진동감시는 크로스빔 구조물의 손상을 진단할 수 있다.

참고문헌

1. Salawu, O. S. (1997). Detection of structural damage through changes in frequency: A review. *Engineering Structures*, 19(9), 718-723.
2. Doebling, S.W, Farrar, C.R, Prime, M.B. (1998). A summary review of vibration-based damage identification methods *Shock and Vibration Digest*, Volume30, Issue 2, Pages 91-105.