

용접 및 볼트 연결부 균열을 고려한 사장교 케이블 정착부의 동특성 해석

Dynamic Characteristics of Cable-Stayed Anchorage considering Cracks at Bolt and Welding Connection

김 철 영¹⁾ · 김 성 보²⁾ · 정 우 태³⁾

Kim, Chul Young Kim, Sung Bo Jung, Woo Tai

요 약 : 용접 및 볼트 연결부 균열이 사장교 케이블 정착부의 동특성에 미치는 영향을 파악하여, 국부적으로 취약한 케이블 정착부의 손상을 현장에서 쉽게 탐지할 수 있는 가능성을 제시하였다. 해석대상 구조물로서 현재 서해안고속도로의 일부로 시공되고 있는 서해대교 케이블 정착부를 선택하였다. 케이블과 정착부의 연결판을 케이블요소 및 셸요소로 함께 모델링하여 자유진동해석을 수행하였다. 해석결과 케이블 정착단에서 용접부 균열이 발생한 경우, 연결판의 고유진동수가 균열이 발생하지 않은 경우에 비하여 최대 16%정도 작아짐을 확인하였다. 따라서, 연결판의 고유진동수를 측정하여 케이블 정착부의 손상을 충분히 파악할 수 있다고 판단된다.

ABSTRACT : Damage detection methods which utilize the change in dynamic characteristics are very hard to apply to large civil structures since local damage hardly affects global dynamic characteristics. But, if there is a very important and critical member and we focus only on the local behavior of it, it would be possible to detect damage from the change in local dynamic characteristics, such as natural frequencies and mode shapes.

In this study, the cable anchorage part of a cable-stayed bridge under construction is modeled and analyzed by commercial finite element program, ABAQUS. It has both welding and bolting connections with a cable and a stiffening plate, and has a possible high stress concentration portions in it. Several damage scenarios such as crack through the welding or crack through the bolting connection are examined.

1) 정회원, 명지대학교 토목공학과 부교수
2) 정회원, 충북대 토목공학과 전임강사
3) 명지대학교 토목공학과 석사과정

본 논문에 대한 토의를 2000년 2월 29일까지 학회로 보내주시면 토의회답을 게재하겠습니다.

The result shows that the local natural frequencies of the damaged member decrease up to 16% compared with that of the undamaged member. It is concluded that there is quite a high feasibility that the damage of the cable anchorage can be detected by measuring local dynamic characteristics.

핵심용어 : 손상 탐지, 연결부 균열, 서해대교, 사장교, 케이블 정착부, 고유진동수, 모드형상

KEYWORDS : damage detection, crack, welding connection, bolting connection, cable-stayed bridge, cable-anchorage, natural frequency, mode shape

1. 서론

최근 사회간접시설 확충의 필요성에 따라 교량 건설이 날로 증가되고 있으며, 또한 기존 교량의 안전도 평가 및 유지보수에 대한 중요성이 날로 커지고 있다. 신설되는 교량도 점차 장대화됨에 따라 현수교 및 사장교와 같은 형식의 교량이 많이 시공되는 추세이다. 이러한 케이블 지지형식의 교량에서 케이블이 강형에 정착되는 정착부는 국부적으로 큰 응력이 집중되는 취약한 구조로서 교량의 상시점검에 있어서 크게 주의를 기울여야 되는 부분이다. 최근 들어 강구조물의 손상을 탐지하는 방사선투과법, 자분탐사법 등과 같은 여러 가지 비파괴검사법이 개발되고 있으나, 현장에서 실제 교량에 적용하기에는 여러 가지 어려움이 따르고 경제성 또한 문제점으로 대두되고 있다.

구조물의 손상을 탐지하는 방법 중의 하나로서 사용중인 구조물의 동특성을 계측하여 고유진동수 및 고유모드의 변화를 측정·비교하여 손상의 유·무 및 그 정도를 파악하는 기법이 있다.¹⁾²⁾³⁾⁴⁾ 그러나, 개별 부재의 손상이 전체 구조물의 동특성 변화에 미치는 영향은 매우 미소하여 계측에 의한 탐지가 어려우나, 국부적인 구조부재의 손상은 해당부재의 동특성 변화에는

큰 영향을 미치기 때문에 구조물의 국부적인 손상 파악에 널리 활용되고 있다.

본 논문에서는 용접 및 볼트 연결부 균열이 사장교 케이블 정착부의 동특성에 미치는 영향을 수치해석에 의해 파악하여, 국부적으로 취약한 케이블 정착부의 손상을 현장에서 탐지할 수 있는 가능성을 제시하고자 한다. 해석대상으로는 현재 서해안고속도로의 일부로 시공되고 있는 서해대교 케이블 정착부를 선택하였다.

2. 서해대교 케이블 정착부

서해대교 사장교 구간은 서해안고속도로의 평택-당진간을 연결하는 교량의 일부로서, 그림 1과 같이 중앙경간 470m, 측경간 200m인 3경간 연속 합성형 사장교이다⁵⁾⁶⁾(그림 1 참조). 교폭 34m의 합성형 강형은 총 72개의 케이블에 의해 182m 높이의 주탑에 연결되어 지지되고 있다. 케이블 장력, 수평경사각 등은 각 케이블 정착지점에 따라 다르며, 본 논문에서 해석 대상으로 선택한 케이블 정착부는, 사하중과 설계활하중에 의한 케이블 장력이 가장 크게 계산된 측경간 5번째 케이블의 정착부이다.

케이블과 강형의 연결은 그림 2a에서와 같이 강형 복부판에 전체길이 11.0 m, 두께 50mm인 연결판이 다수의 볼트로 연결되어있는 형태이다.

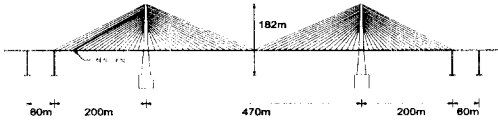


그림 1. 서해대교 사장교 구간

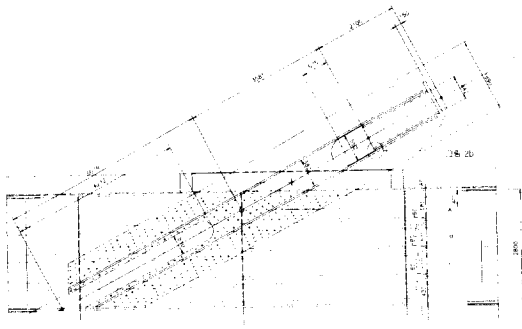


그림 2a. 케이블 정착부 전체

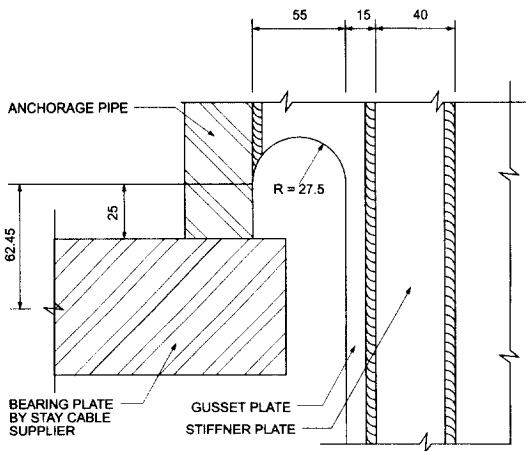


그림 2b. 케이블 정착파이프 응력전이구간 상세

연결판의 중앙부에는 지름이 442 mm 인 정착 파이프가 연결판에 용접되어 있어서 정착파이프 끝단에서 케이블을 정착시키고 있다(그림 2b). 또한, 연결판과 정착파이프와의 용접부 상·하 단에는 폭 250mm, 두께 40mm의 보강판이 연결판 전체 길이에 걸쳐서 면외방향으로 부착

되어 있다. 정착파이프 끝단에 케이블이 정착되는 부분은 케이블 장력이 직접적으로 작용하는 부분으로서, 연결판으로의 응력전달을 효과적으로 하기 위하여 그림 2b와 같이 원형절단된 응력전이구간이 설치되어 있다.

3. 유한요소 해석모델

연결판과 복부판은 그림 2a에서와 같이 다수의 볼트로서 연결되어 있기 때문에, 강형 복부판 최상단의 볼트연결부를 고정단으로 가정하고, 연결판을 구성하는 각각의 부재들을 4-절점 shell element를 사용하여 유한요소 해석모델을 작성하였다. 케이블 부재는 2-절점 케이블 요소를 사용하여 이상화시켰으며, 케이블 부재의 시작 절점은 정착파이프 끝단에 위치한 베어링 플레이트의 중앙절점과 일치시켰다. 케이블 부재의 끝 절점은 주탑 정착부에 위치하며, 케이블 장력은 사하중과 활하중 재하시 발생하는 케이블 장력 698 ton을 케이블의 주탑정착단에 초기 축력으로서 작용시켰다. 사용된 강재와 케이블의 탄성계수 및 밀도는 다음과 같고 완성된 유한요소해석모델은 그림 3과 같다. 해석은 상용유한요소 프로그램인 ABAQUS⁷⁾를 이용하였다.

· 강재 :

$$E = 205800 \text{ N/mm}^2, \quad \rho = 7.85 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$$

· 케이블 :

$$E = 189140 \text{ N/mm}^2, \quad \rho = 7.85 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$$

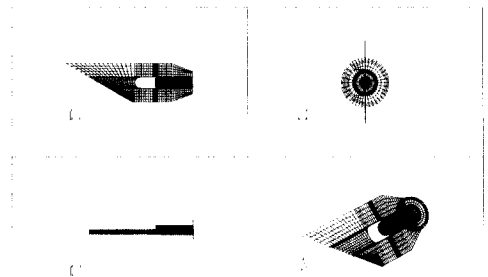


그림 3a. 유한요소 해석모델 전체

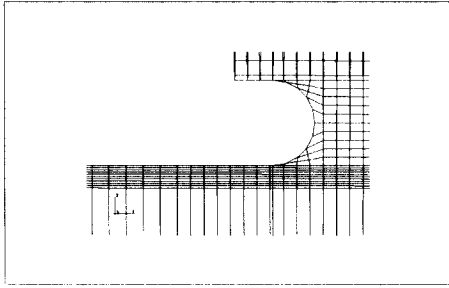


그림 3b. 유한요소 해석모델 중 응력 전이구간

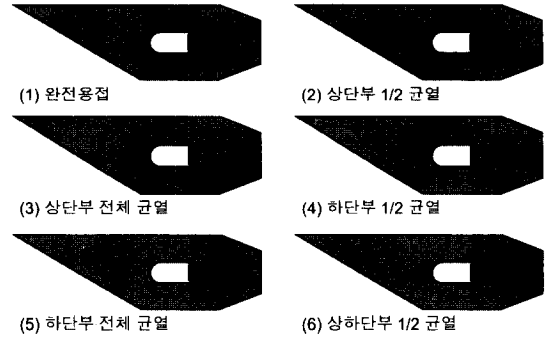


그림 4. 용접부의 균열 예측 경우

4. 자유진동해석

케이블 정착부의 자유진동해석은, 전장에서 수행된 정적해석의 결과를 근거로 하여 정착파이프와 연결판 사이에서 발생할 수 있는 용접균열을 고려하여 수행하였다. 즉, 그림 4와 같이 정착파이프와 연결판 사이에서, 1) 균열이 발생하지 않는 경우, 2) 파이프 상단부 용접길이의 절반에서 균열이 발생한 경우, 3) 파이프 상단부 전체 용접길이에서 균열이 발생한 경우, 4) 파이프 하단부 용접길이의 절반에서 균열이 발생한 경우, 5) 파이프 하단부에서 전체 용접길이에서 균열이 발생한 경우, 6) 파이프 상·하단부 용접길이의 절반에서 균열이 발생한 경우에 대하여, 케이블과 연결판을 함께 유한요소 모델링하고 케이블 장력을 도입한 후, 연결판의 고유진동수 및 진동모드를 계산하였다. 용접부의 균열이 그림 4에서 도시된 바와 같이 발생한 경우에 대하여, 케이블의 고유진동수를 계산하여 그 결과를 표 1 및 그림 5에 나타내었다. 케이블의 고유진동수는 용접 균열의 유·무에 관계없이 면내진동과 면외진동에 대하여 고유진동수가 거의 일치함을 확인하였다. 따라서, 케이블의 고유진동수를 측정하여, 그림 5와 같은 정착단의 용접부 균열발생 상황을 파악하기는 불가능하다고 판단된다.

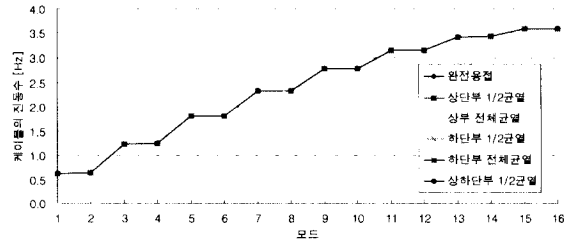


그림 5. 용접부의 균열이 발생한 경우에 대한 케이블의 고유진동수 변화

한편, 초기 인장력을 받는 케이블의 고유진동수에 대한 엄밀해는 다음과 같다.⁸⁾

$$\omega_n = n \pi \sqrt{\frac{H}{mL^2}}$$

여기서,

m = 단위길이당 질량

H = 수평장력

L = 케이블의 길이

윗 식으로 구한 케이블진동수를 표 1의 유한요소해석결과와 표 2에서 비교하였다. 전체 케이블 부재를 10개의 케이블요소로 이산화하여 자

표 1. 용접부의 균열이 발생한 경우에 대한 케이블의 고유진동수 변화 (Hz)

Mode	완전용접	상부 1/2 균열	상부 전체 균열	하부 1/2 균열	하부 전체 균열	상하부 1/2 균열
1	0.628	0.627	0.627	0.627	0.627	0.627
2	0.631	0.631	0.631	0.631	0.631	0.631
3	1.237	1.236	1.236	1.236	1.236	1.236
4	1.243	1.243	1.243	1.243	1.243	1.243
5	1.809	1.809	1.809	1.809	1.808	1.809
6	1.817	1.817	1.817	1.817	1.817	1.817
7	2.328	2.327	2.327	2.327	2.327	2.327
8	2.336	2.336	2.336	2.336	2.336	2.336
9	2.777	2.776	2.776	2.776	2.776	2.776
10	2.784	2.784	2.784	2.784	2.784	2.784
11	3.142	3.142	3.142	3.142	3.142	3.142
12	3.147	3.147	3.147	3.147	3.147	3.147
13	3.412	3.412	3.412	3.412	3.412	3.412
14	3.415	3.415	3.415	3.415	3.415	3.415
15	3.578	3.578	3.578	3.578	3.578	3.578
16	3.579	3.579	3.579	3.579	3.579	3.579

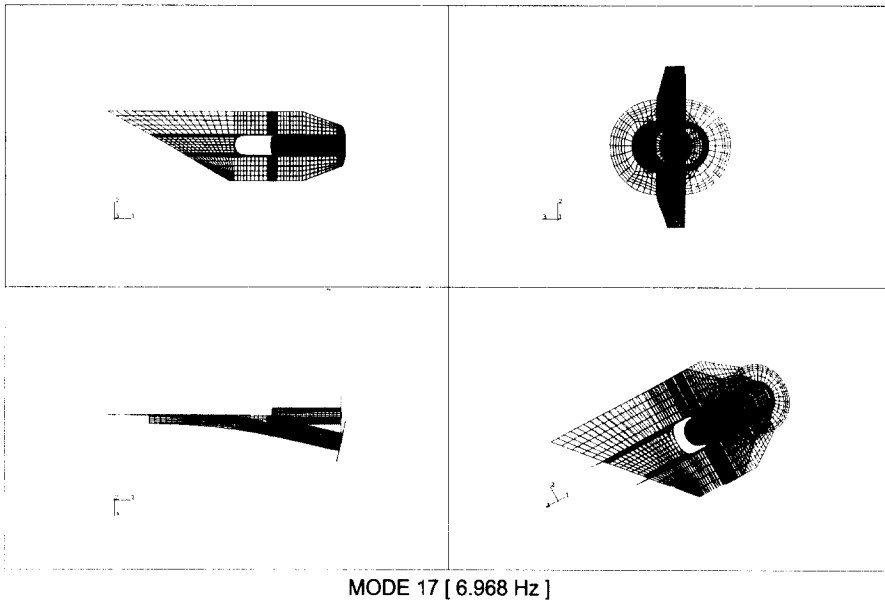
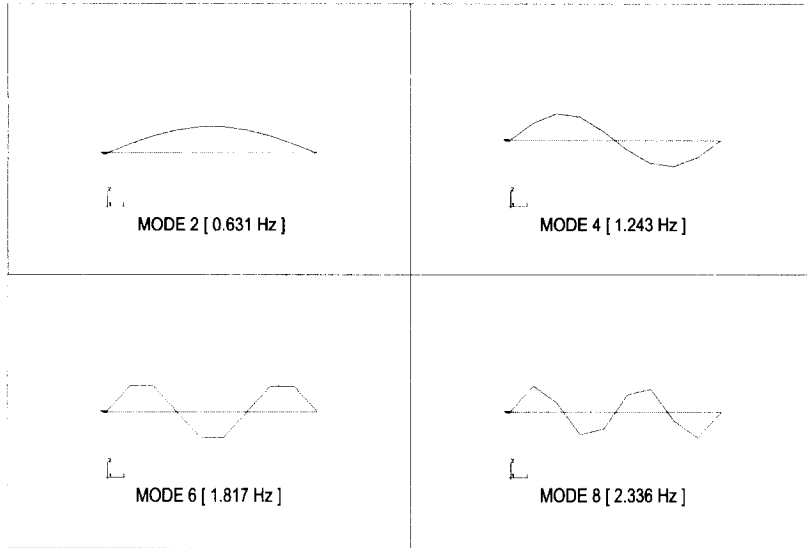
표 2. 초기 인장력을 받는 케이블의 고유진동수

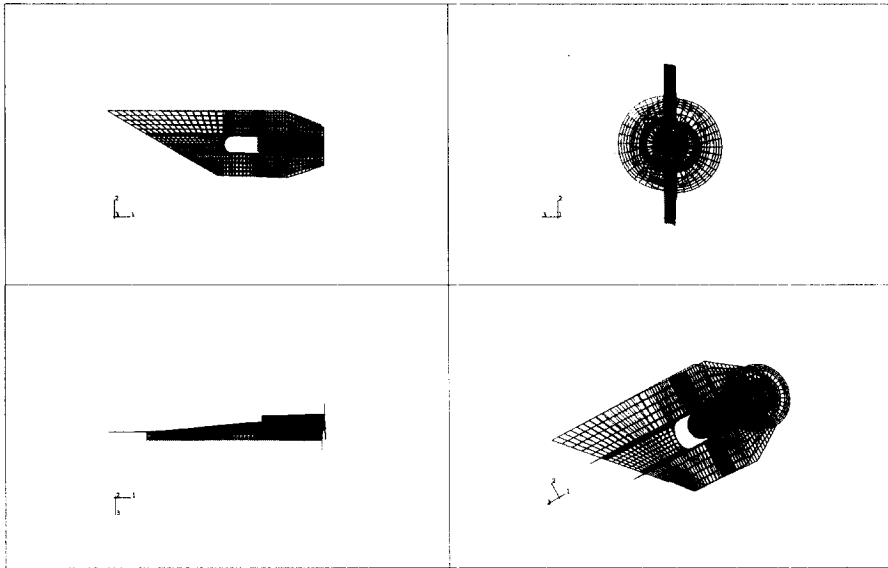
Mode	Analytic solution (Hz)	Finite element solution (Hz)	Percent error (%)
2	0.627	0.631	0.58
4	1.236	1.243	0.54
6	1.808	1.817	0.47
8	2.327	2.336	0.38

유진동해석을 수행하였음에도 불구하고 첫 번째 모드의 경우 엄밀해와의 상대오차가 0.6 % 이내로서 엄밀해와 잘 일치함을 확인하였다. 그림 6에서 케이블의 자유진동 모드가 도시되어 있는데, 여기서 모드 1, 3, 5, 7은 1-3 평면상에서의 모드로서 형상은 각각 모드 2, 4, 6, 8과 동일하며 모드 9이상의 고차모드는 절점수가 부족하여 형상을 제대로 나타낼 수 없어서 생략하였다.

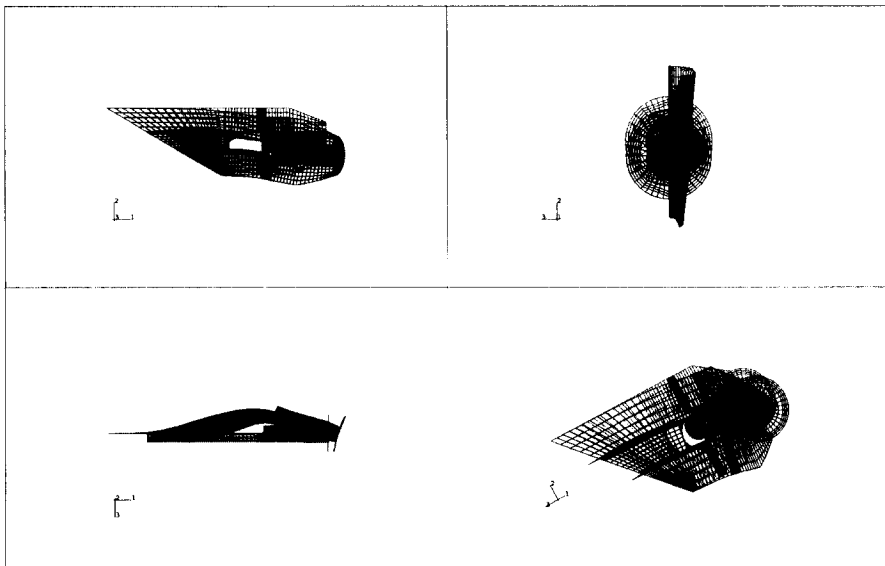
정착파이프 용접부의 균열이 발생하지 않은 경우, 케이블 장력이 도입되었을 때, 연결판의 고유모드를 그림 7에 도시하였다. 그림 7에서 연결판의 고유모드는 면외방향(약축)의 휨모드부터 휨-비틀 모드, 비틀 모드, 면내방향(강축)

의 휨모드의 순서로 나타남을 알 수 있다. 특히, 본 해석모델은 케이블과 연결판을 함께 모델링하여 수행하였기 때문에, 16번 모드까지는 케이블의 고유모드를 나타내고, 17번 모드부터가 연결판의 고유모드에 해당한다. 용접부의 균열이 그림 4에서 도시된 바와 같이 발생한 경우에 대하여, 각 모드 별 연결판의 고유진동수 변화를 표 3에 제시하였다. 용접부의 균열이 발생함에 따라 연결판의 휨 및 비틀강성은 저하되므로 고유진동수가 작아짐을 표 3에서 확인할 수 있다. 한편, 균열이 발생하지 않은 경우의 고유진동수에 대한 용접부 균열이 발생한 경우의 고유진동수 비율을 그림 8에 도시하였다. 연결판의 휨모드에 해당하는 모드 18, 19, 22등은 용접부의 균열이 발생함에 불구하고 고유진동수의 변화는 크지 않음을 알 수 있다. 하지만, 모드 21과 같은 비틀모드의 경우에 정착파이프 상단부 또는 하단부 용접길이의 절반에 걸쳐 균열이 발생된 경우의 고유진동수는, 균열이 발생하지 않은 경우에 비하여 약 11% 정도 작게 나타남을 알 수 있다. 또한, 상·하단부 용접길이의 절반에 걸쳐 균열이 발생된 경우의 고유진동수는, 균열이 발생하지 않은 경우에 비하

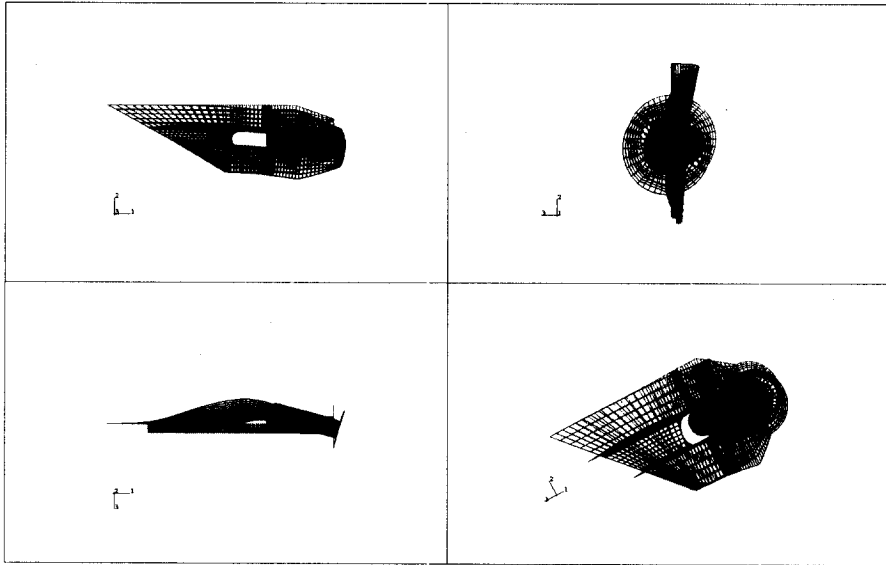




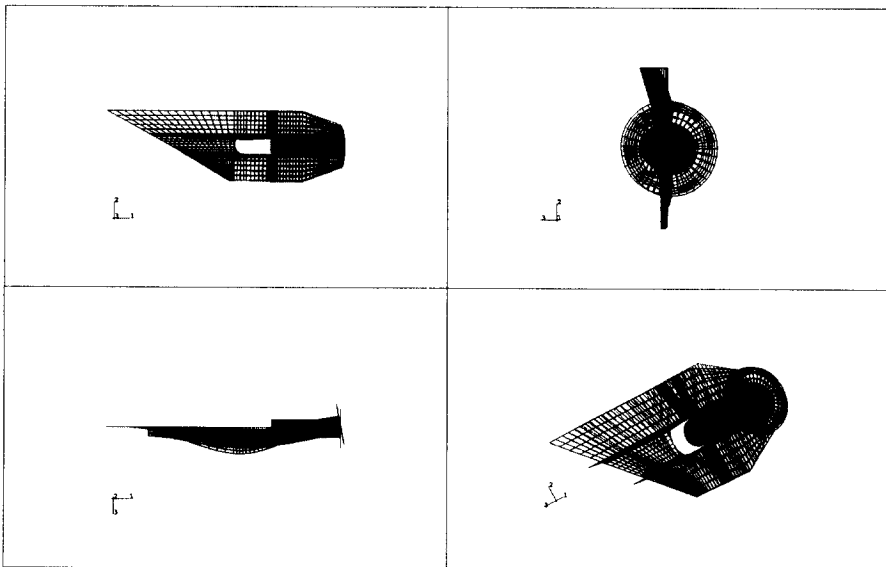
MODE 18 [9.928 Hz]



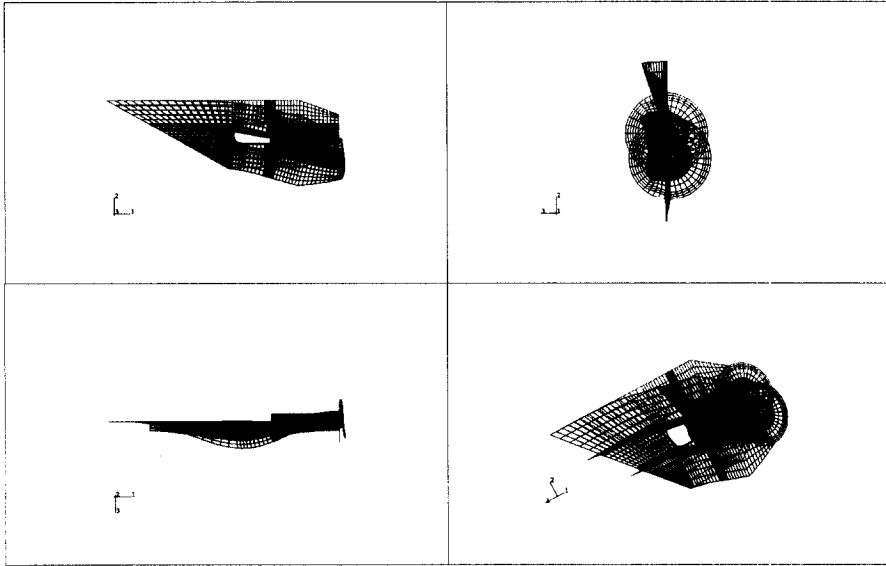
MODE 19 [19.57 Hz]



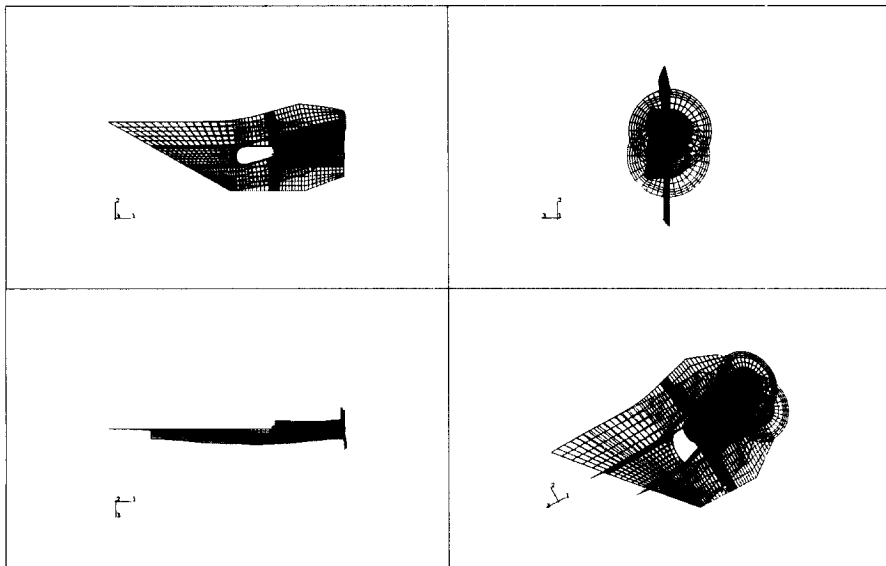
MODE 20 [28.65 Hz]



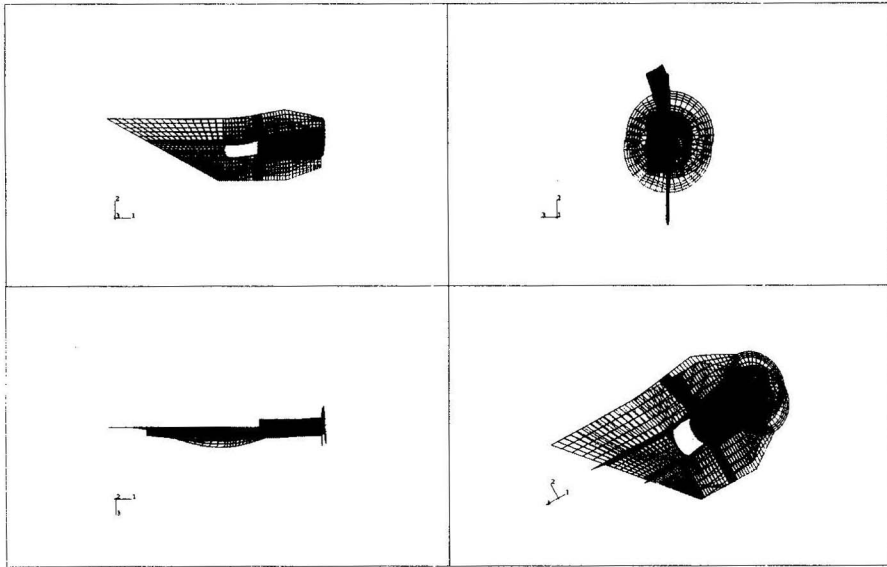
MODE 21 [34.59 Hz]



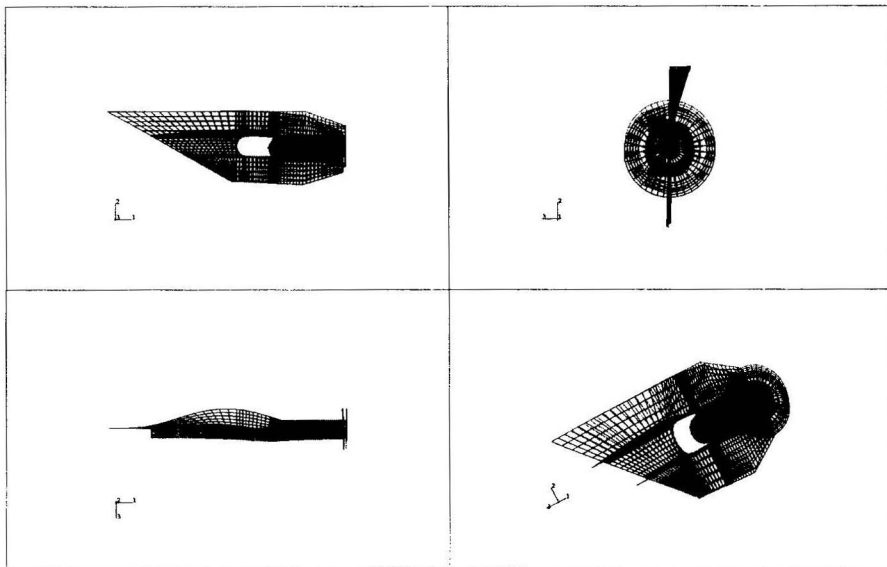
MODE 22 [36.89 Hz]



MODE 23 [39.37 Hz]



MODE 24 [44.05 Hz]



MODE 25 [49.88 Hz]

그림 7. 용접부의 균열이 발생하지 않는 경우에 대한 연결판의 고유모드

표 3. 용접부의 균열이 발생한 경우에 대한 연결판의 고유진동수 변화 (Hz)

Mode	완전용접	상부 1/2 균열	상부 전체 균열	하부 1/2 균열	하부 전체 균열	상하부 1/2 균열
17	6.968	6.874	6.875	6.848	6.652	6.807
18	9.928	9.926	9.923	9.925	9.919	9.920
19	19.57	19.57	19.56	19.56	19.55	19.56
20	28.65	28.64	27.24	28.64	28.61	28.44
21	34.57	31.27	28.64	30.84	29.76	28.69
22	36.89	36.88	36.87	36.87	36.64	36.83
23	39.37	39.13	38.27	38.62	37.09	37.49
24	44.05	44.04	44.02	44.04	43.85	42.73
25	49.88	48.30	44.86	49.87	44.04	44.04

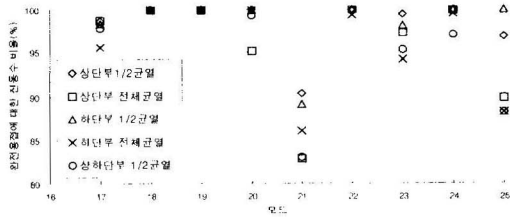


그림 8. 용접부의 균열이 발생한 경우에 대한 연결판의 고유진동수 변화

여 약 16% 정도 작게 나타남을 알 수 있다. 따라서, 연결판의 고유진동수를 측정하여, 그림 4와 같은 정착단의 용접부 균열발생을 충분히 파악할 수 있다고 판단된다.

또한, 그림 9와 같이 연결판과 강형 복부판의 볼트연결 지점에서 균열이 발생한 경우에 대하여도 자유진동해석을 수행하여 손상탐지 가능성을 확인하였다.



그림 9. 강형 복부판 볼트 연결부의 균열 예측 경우

그림 9와 같이 볼트연결 지점부에 균열이 발생한 경우에 대하여, 각 모드 별 연결판의 고유진동수 변화를 표 4에 제시하였다. 지점부의 균

열이 발생함에 따라 연결판의 휨 및 비틀강성은 저하되므로 고유진동수가 작아짐을 표 4에서 확인할 수 있다. 한편, 균열이 발생하지 않은 경우의 고유진동수에 대한 지점부 균열이 발생한 경우의 고유진동수 비율을 그림 10에 도시하였다. 이전의 용접부의 균열발생과 유사하게 모드 18, 19, 20, 24, 25등은 지점부의 균열이 발생함에 불구하고 고유진동수의 변화는 크지 않음을 알 수 있다. 하지만, 모드 17, 20, 21의 경우에 지점부에 81 cm 정도의 균열이 발생된 경우의 고유진동수는, 균열이 발생하지 않은 경우에 비하여 약 7% 정도 작게 나타남을 알 수 있다.

표 4. 지점균열별 고유진동수 변화 (Hz)

Mode	무결합	지점균열 (27cm)	지점균열 (54cm)	지점균열 (81cm)
17	6.968	6.797	6.624	6.471
18	9.928	9.928	9.927	9.926
19	19.57	19.57	19.57	19.57
20	28.65	28.65	28.65	28.64
21	34.57	34.09	33.31	32.10
22	36.89	36.84	35.41	34.50
23	39.37	37.17	36.90	36.89
24	44.05	44.05	44.04	44.04
25	49.88	49.88	49.88	49.87

특히, 모드 23의 경우에 지점부에 27 cm 정도의 적은 균열이 발생된 경우의 고유진동수는, 균열이 발생하지 않은 경우에 비하여 약 6% 정도 작게 나타남을 알 수 있다. 따라서, 연결판의 고유진동수를 측정하여 연결판과 강형 북부판과의 볼트연결 지점부에 균열 발생을 충분히 파악할 수 있다고 판단된다.

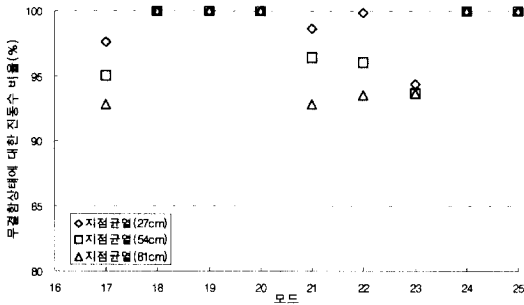


그림 10. 지점균열별 고유진동수 변화

5. 결 론

용접 및 볼트 연결부 균열이 사장교 케이블 정착부의 동특성에 미치는 영향을 수치해석에 의해 파악하여, 국부적으로 취약한 케이블 정착부의 손상을 현장에서 탐지할 수 있는 가능성을 제시하였다. 해석대상으로는 현재 서해안고속도로의 일부로 시공되고 있는 서해대교 케이블 정착부를 선택하였다. 케이블과 정착부의 연결판을 케이블요소 및 셸요소로 함께 모델링하여 자유진동해석을 수행하였다. 해석결과, 용접부 균열이 발생한 경우에 연결판의 고유진동수가 균열이 발생하지 않은 경우에 비하여 최대 16% 정도 작아짐을 확인하였다. 또한, 연결판과 강형 북부판과의 볼트연결 지점부에 균열이 발생한 경우에 대하여, 볼트연결부에 81cm의 균열이 발생하였을 때의 연결판의 고유진동수가 균열이 발생하지 않은 경우에 비하여 최대 7% 정도 작아짐을 확인하였다. 따라서, 연결판의 고유진동수를 측정하여 케이블 정착부의 손상을 충분히 파악할 수 있다고 판단된다.

참 고 문 헌

- (1) Scott W는 형태이다. . Doebbling, Charles R. Farrar, Michael B. Prime and Daniel W. Shevitz, "Damage Identification and Health Monitoring of Structural and Mechanical System from Changes in Their Vibration Characteristics : A Literature Review". Los Alamos, 1996
- (2) C. R. Farrar, T. A. Duffey and P. A. Goldman, "Finite Element Analysis of the I-40 Bridge Over the Rio Grande". Los Alamos, 1996
- (3) M. I. Friswell and J. E. Mottershead, "Finite Element Modal Updating in Structural Dynamics", Kluwer Academic Publishers, 1995
- (4) Charles Farrar and David Jauregui, "Damage Detection Algorithms Applied to Experimental and Numerical Modal Data from the I-40 Bridge", Los Alamos, 1997
- (5) 박찬민, 서해대교 사장교 설계 및 시공, 대한토목학회지, 제47권, 제2호, 1999
- (6) 최원일, 서해대교 설계 및 시공(II), 한국강구조학회지, 제10권, 제2호, 1998
- (7) ABAQUS, User's Manual, Ver. 5.2, Hibbit, Karlsson & Sorensen Inc., 1992
- (8) J. W. Leonard, Tension Structures, McGraw-Hill, 1988

(접수일자 : 1999년 6월 11일)