

지진하중에 의한 사장교의 비선형 동적 응답

임 성 순
(서울시립대학교 토목공학과)

Nonlinear Dynamic Responses of Cable-Stayed Bridges subject to Earthquake Excitation

Yhim, Sung Soon

ABSTRACT

Cable-supported bridges consist of cables with high flexibility and girders with good stiffness. Typical models among these bridges are cable-stayed bridges and suspended bridges. In general, structural system composed of members with different strength presents very complex responses. Because cables with low stiffness cause geometrical non-linearity and entire structure shows up the non-linearity. When it subjects to earthquake excitation especially, the responses of cable-supported bridges are very complex. In this paper, Olympic grand bridge, typical cable-stayed bridge on Han-river in Seoul, is used as analytical model and cable is idealized as nonlinear Ernst's cable element. This paper presents the distribution of nonlinear dynamic responses of cable-stayed bridges subject to earthquake excitation.

Keywords: cable-stayed bridge, earthquake excitation, nonlinear dynamic responses, elastic catenary cable, nonlinear truss, Ernst's cable element.

1. 서론

건설기술의 발전으로 사장교 또는 현수교와 같은 장대교가 널리 사용되고 경량화, 고층화구조물이 널리 적용되면서 경량 케이블 구조 사용이 증가하고 있다. 한강상 교량 중에도 올림픽대교와 신행주대교가 이미 사장교로 건설되어 있으며 앞으로 가설될 제2 성산대교도 사장교를 채택하고 있다. 올림픽 대교는 1988년 서울올림픽을 기념하고 강동지역의 교통량증가에 대응하여 1990년에 준공한 특수교이다. 이러한 사장교와 같은 케이블 지지교량은 장대 경간을 사용하는 장점뿐만 아니라 주변환경과 잘 어울리고 미적으로 우수하다는 점에서 널리 애용되는 교량 형식이기도 하다.

이와 같은 구조적인 장점에도 불구하고 그 동안 널리 적용되지 못한 이유는 케이블 부재라는 비선형성이 강한 구조재가 주요 부재를 형성하고 있기 때문이다. 케이블 부재의 강한 비선형성은 교량 전체 구조계의 비선형성을 야기하여 반드시 비선형 구조해석을 수행하여야 하는 어려움을 나타내고 있다. 또한, 케이블 부재를 적절히 묘사할 수 있는 적당한 도구가 없었기 때문에 실무에 손쉽게 적용하지 못하는 계기가 되었다.

그러나 컴퓨터의 발전으로 비선형 문

제는 손쉽게 해결할 수 있으며 다양한 케이블 부재의 해석방법이 제시되고 있다. 대표적인 케이블 부재해석을 위한 유한 요소로는 고전적인 비선형 트러스 요소를 비롯하여, 휨 저항능력이 거의 없는 비선형 보 요소도 사용할 수 있으며 등매개변수 보 요소 등도 이용되고 있다. 그러나 이러한 요소들은 유한요소의 분할 수를 증가시켜야 하는 어려움이 있으므로 케이블 부재를 적절히 나타낼 수 있는 유한요소의 개발이 요구되어 왔다. 이러한 요구에 따라 Ernst는 사장교에서 사용할 수 있는 케이블 요소를 완성하였다. 보다 유연한 케이블 부재를 해석하기 위한 요소로는 포물선 곡선식이나 탄성현수선 케이블 요소 등이 사용되기도 한다. 지금까지의 연구결과를 보면 사장교 해석에 가장 유효 적절하다고 알려진 요소는 Ernst의 케이블 요소이다.

그러므로 본 연구에서는 Ernst의 케이블 요소를 이용하여 사장교를 이상화하였으며 해석 대상은 한강상 교량 중에 가장 대표적인 올림픽 대교를 해석 모델로 설정하였다. 올림픽대교는 1997년부터 케이블의 장력변화를 지속적으로 측정하기 위한 계측시스템을 장착하였으며 이로부터 교량의 안정성을 모니

터링하는 중요 교량이다. 케이블 지지교량은 외부 하중을 케이블로 전달하는 구조 형식이므로 케이블이 장력에 대한 저항능력을 상실할 경우 전체 교량구조물에 지대한 영향을 나타내는 구조물이다. 그러나 계측한 대부분의 장력 변화는 이동차량하중에 의한 동적 응답들과 일부 풍 하중에 의한 동적 응답이 혼합되어 나타나고 있으며 지진에 의한 동적 응답이 얼마나 되는지 전혀 검토된 바가 없다. 그러므로 본 연구는 인공적인 지진하중이 작용하는 사장교에 대하여 동적 응답이 어떻게 분포하는가를 보이는 것을 연구목적으로 한다.

2. 기본이론

본 논문에서 다루고 있는 사장교는 기본적으로 비선형 구조해석 문제이므로 수 계산은 전혀 불가능하다. 그러므로 일반적인 교과서에 수록된 유한요소법을 기본개념으로 하고 케이블 부재만을 Ernst의 방법을 적용, 이를 전산화하여 비선형 구조해석을 수행하였다. 특히, 사장교는 케이블의 장력이 상당히 큰 값을 나타내는 인장재 구조이므로 초기 장력이 결정된 후 거의 선형 구조계를 나타내는 대표적인 구조물이다. 본 연구에서는 초기장력을 가진 케이블과 교량

구조계가 정적 평형을 이룰 때까지 비선형 해법인 Newton-Raphson 법을 적용하였고 그 이후에는 거의 선형계라고 가정하였다. 자유진동해석은 부영역반복법을 적용하였으며 지점운동에 대한 강제진동해석은 Newmark- β 방법이라는 점진 시간적분법을 사용하였다

2.1 케이블 부재

고전적인 방법으로 케이블 부재를 나타내는 방법으로는 비선형 트러스 요소, 휨에 대한 저항 능력이 전혀 없고 축력이 작용하는 보 요소, 축력을 고려한 등매개변수 보 요소 등을 사용할 수 있다. 그러나 이러한 요소들은 케이블 전체를 하나의 요소로 사용하는 것이 아니라 하나의 케이블 부재를 여러 개의 유한요소로 분할하여 사용하는 방법으로서 케이블 부재의 해석에는 그리 적절한 방법이 아니다.

케이블 부재를 하나의 요소로 나타내고 케이블의 구조거동을 적절히 묘사할 수 있는 유한요소는 없겠는가? 이러한 요소개발의 필요성으로 지금까지 연구해 온 케이블 요소 중 가장 대표적인 요소가 Ernst의 케이블 요소이다. 특히, Ernst의 케이블 요소는 sag 가 크지 않고 장력이 상대적으로 매우 큰 경사 케

이블로부터 식을 유도한 것이므로 사장교 케이블에 가장 적절한 것으로 알려져 있다. 그러므로 본 연구는 사장교의 케이블을 Ernst의 케이블 요소로 이상화하였다. Ernst의 케이블 요소에 대한 유도과정을 간단히 요약하면 다음과 같다.

Ernst의 케이블 요소는 sag의 효과를 고려한 등가접선 탄성계수를 기본 개념으로 하고 있으며 이를 그림으로 나타내면 그림1과 같다. 그림1을 참조하여 Ernst의 케이블 등가접선 탄성계수는 식(1)과 같이 나타낸다.

$$E_{eq}^{bar} = \frac{E^{cable}}{1 + \frac{(\rho g L_x)^2}{12\sigma^3} E^{cable}} \quad (1)$$

여기서 E^{cable} 은 케이블의 탄성계수, ρ 는 케이블의 밀도, g 는 중력가속도, L_x 는 케이블을 수평선에 투영한 거리, 그리고 σ 는 케이블의 장력을 나타낸다.

2.2 교량 구조

사장교는 크게 3가지의 부재 즉, 교량의 거더 또는 상판을 지지하는 보 부재, 케이블을 거치하여야 하는 타워 또는 파이론, 그리고 거더에 작용하는 하중을 타워 단부로 전달하는 케이블 부재로

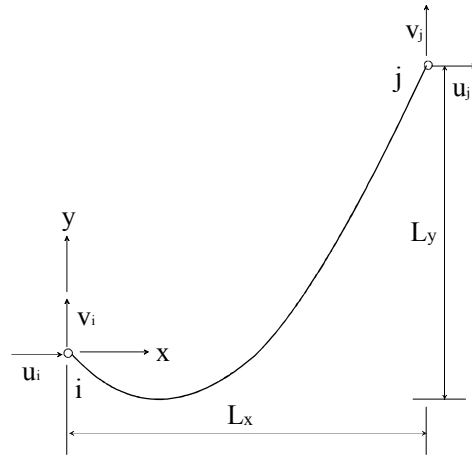


그림 1 케이블 형상

구성되어 있다. 전술한 바와 같이 케이블 부재는 휨 강도가 전혀 없고 인장력에 대한 저항 능력이 있으며 기하학적 비선형성이 매우 강한 구조재이다. 반면에 파이론이나 거더는 휨 강도가 매우 높은 부재들이다. 이와 같이 사장교는 휨 강도가 매우 큰 부재들과 기하학적 비선형성이 매우 강한 두 가지 종류의 구조재로 구성되어 있다.

본 연구에서는 지진하중을 받는 사장교의 동적 응답이 어떻게 분포하는가에 주요 관점을 두므로 교량구조물을 간단히 2차원 평면구조물로 이상화하기로 한다. 그리고 거더와 파이론은 일반적인 유한요소법에 대한 교재에서 쉽게 찾아볼 수 있는 평면 보 요소로 가정하기로 한다. 특히 기하학적 비선형 해석을 할 때 보 부재에 대한 단면력은 Updated -

Lagrange 방법을 이용하여 단면력을 누적시켜 현 상태의 단면력을 산정하는 방법을 적용하기로 한다.

2.3 비선형 정적해석

케이블의 경우 초기 인장력에 의해 강도가 결정되며 인장력의 증가는 강도를 증가시킴으로서 거의 탄성체와 유사한 구조거동을 한다. 상대적으로 인장력이 큰 대표적인 구조물로는 사장교가 있으며 사장교의 케이블은 초기 정적 평형을 이룬 후부터는 마치 트러스와 같은 선형탄성거동을 한다. 반면에 케이블 지지교량의 또다른 형식인 현수교의 경우 케이블과 행어에 의해 작용하중을 전달하므로 사장교와 달리 기하학적 비선형이 나타난다. 본 연구의 해석 대상인 사장교의 경우에도 초기 인장력이 주어지면 정적 평형을 얻기까지 기하학적 비선형 해석을 필요로 한다.

비선형 해석을 위한 수학적인 알고리즘은 접선강도 매트릭스를 이용하는 방법이 가장 널리 적용되고 있으며 본 연구에서도 이 방법을 적용하여 전산화하였다. 접선강도 매트릭스는 비선형 연립 미분방정식을 미소구간으로 분할하여 부분선형화한 선형대수식을 반복연산을 이용하여 해를 찾아가는 방법이다. 이러

한 방법을 Newton-Raphson 방법이라고도 한다. 접선 강도법은 그림2와 같고 수평축은 보통 변위, 수직축은 하중을 나타낸다. 임의의 하중이 작용하는 경우 그 하중에 대응하는 변위는 그림에서와 같이 누적시켜 계산한다.

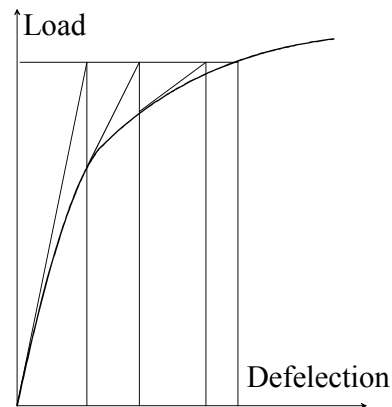


그림 2. 접선강도 접근법

2.4 지진하중

지진자료는 지진이 발생한 시간에서부터 지진이 끝날 때까지 측정한 가속도들로 구성되어 있다. 지진이 작용하고 있는 시간은 매우 작으므로 시간간격을 0.01초 정도마다 가속도 크기를 기록하고 있다. 널리 알려진 지진자료 중에서 시간에 따른 속도 또는 변위에 대한 데이터는 가속도를 주어진 시간동안 적분함으로써 얻어진 자료들이다. 그러므로 가장 신뢰할 수 있는 자료들은 시간에

따른 가속도 자료들이다. 일반적으로 가장 널리 사용하는 지진기속도 이력곡선은 엘센트로 지진자료로서 그림 3과 같다.

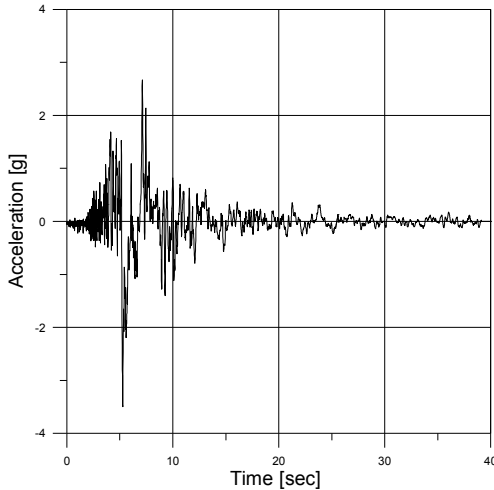


그림 3 지진가속도 이력곡선

본 논문에서는 사장교의 지진응답분포를 보이는 것이 연구 목적이므로 실무 또는 연구목적으로 가장 널리 사용하는 엘센트로 지진자료를 사용하기로 한다. 국내 지방서에서 지진가속도의 크기를 0.154g로 제한하고 있으므로 그림 3과 같은 지진가속도 이력곡선의 가장 큰 값이 0.154g에 해당하도록 크기를 조절하여 사용하기로 한다. 이러한 값은 원형 지진자료를 입력하고 프로그램 내부에서 이 값들을 변환시켜 구조물에 적용하는 방법을 선택하였다.

3. 지진해석 및 프로그램 구성

3.1 지배방정식

본 연구에서는 지진해석과정만 간단히 요약, 정리하기로 한다. 일반적인 교량구조물의 동적 평형 방정식을 매트릭스 식으로 나타내면 식(2)와 같다.

$$[M]\{\ddot{X}\} + [C]\{\dot{X}\} + [K]\{X\} = \{0\} \quad (2)$$

여기서 $[K]$ 는 강도 매트릭스, $[M]$ 은 질량 매트릭스, $[C]$ 는 감쇠 매트릭스이며 $\{\ddot{X}\}, \{\dot{X}\}, \{X\}$ 는 각각 가속도, 속도, 변위 벡터이다. 지점운동에 대한 자유도에 대하여 지점운동 변위벡터가 $\{Y\}$ 라면 상대변위 $\{U\} = \{X\} - \{Y\}$ 로 나타낼 수 있다.

상대속도와 변위벡터 $\{\dot{U}\} = \{\dot{Y}\} = \{0\}$ 이므로 동적평형 방정식 (2)는 식(3)과 같이 표현할 수 있다.

$$[M]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = -[M]\{\ddot{Y}\} \quad (3)$$

그러므로 식(3)이 지진해석에 대한 구조물의 지배방정식이 된다. 식(3)의 우변의 벡터 $\{\ddot{Y}\}$ 는 지방서에서 규정한 자료값이나 경험적인 인공가속도 이력곡선으로부터 얻어지는 값이 된다. 대형지

진에 대한 경험이 없는 우리나라의 인공가속도 이력곡선은 기존 외국 지진 자료를 시방서에서 규정한 최대치를 넘지 않는 범위에서 인위적으로 가공한 지진자료를 사용하고 있다.

3.2 동적해석방법

동적 해석은 자유진동해석과 강제진동 해석으로 구분한다. 자유진동해석은 외력이 작용하지 않는 구조물에 대하여 이 구조물만이 가지고 있는 고유한 진동 특성치를 얻어내는 과정이다. 그러므로 자유진동해석을 고유치 문제라고도 한다. 고유치 문제는 전체 자유도 만큼의 고유치를 계산하는 방법과 지배적인 몇 개의 고유치만을 선별적으로 산정하는 방법이 있다. 계산의 효율이나 구조공학적 측면에서 고차의 고유치는 구조계에 큰 영향을 주지 못하므로 지배적인 몇 개의 고유치 계산방법이 가장 널리 사용되고 있다. 본 연구에서도 지배적인 몇 개의 고유치만을 결정할 수 있는 부영역 반복법을 사용하였다.

강제진동해석은 지배 방정식 자체를 그대로 해석하는 직접법과 지배방정식을 변환시켜 손쉽게 해를 찾을 수 있는 간접법이 있다. 간접법은 시간영역이 아닌 주파수영역으로 주어진 방정식을 변

환하고 변환된 방정식으로부터 해를 구한 후 다시 역변환하여 지배방정식의 해를 찾는 방법이다. 이와 같이 간접법은 지배방정식을 변환하여 사용하므로 이를 변환법이라고도 한다. 강제진동해석에서 사용하는 간접법은 모드중첩법이 널리 사용되고 있으며 고유치문제를 해석한 후 빠른 속도로 근을 구할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 고유치문제를 먼저 해결하여야 하고 선형문제에만 사용할 수 있다는 단점이 있다.

반면에 직접법은 지배방정식을 점진적으로 시간에 따라 적분하여 특정시간에서의 진동 변위, 속도, 가속도를 결정하는 방법이다. 이 방법은 점진적인 적분과정으로 해를 결정하는데 많은 시간이 요구된다는 단점이 있지만 선형이건 비선형 문제이건 해석할 수 있다는 장점이 있다. 본 연구에서는 직접 및 간접법을 모두 사용하였으며 직접법은 수치적으로 안정하다는 Newmark β 방법을 사용하였다.

본 연구에서 작성한 프로그램의 계산 과정을 간단히 요약하면 그림 4와 같다.

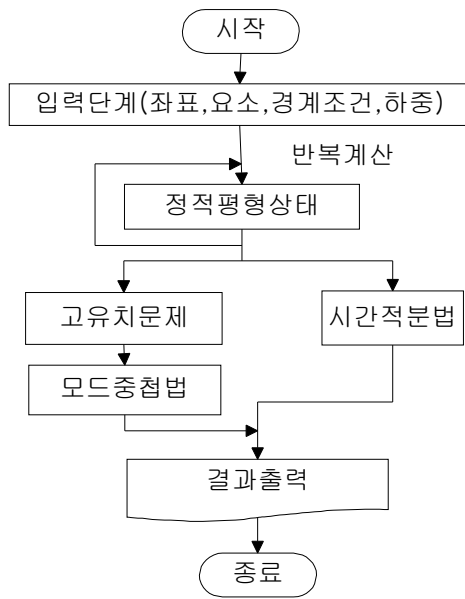


그림 4 프로그램 구성

림5,6과 같다. 파이런의 정면도 및 단면도는 그림7,8과 같다.

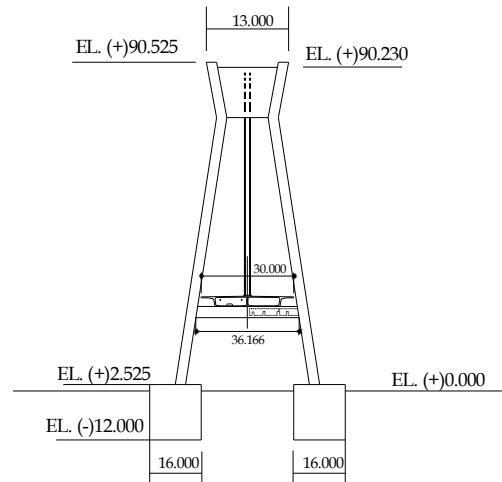


그림7 파이런의 정면도

4. 해석 예 및 결과

4.1 해석모델

본 연구의 해석대상은 한강상 교량인 올림픽대교이며 올림픽대교는 1988년 서울올림픽을 기념하고 강동지역의 원활한 교통량 수송을 위해 1990년 준공된 사장교이다. 매 상판에서 케이블간과 케이블의 간격은 10m 간격이며 주주탑은 기초상단으로부터 높이 88m로 설계되어 있다. 올림픽대교의 전체적인 측면도와 거더단면도를 표시하면 각각 그

케이블의 배치형태는 최대 66.5도에서 최소 24.6도로 기울어진 팬형 배열이며 주탑을 중심으로 대칭구조를 이루고 있다. 본 연구에서는 주탑에서 가까운 케이블을 1번으로 정하고 총 12번 케이블로 명명하였다. 케이블은 $\phi 15.7$ mm짜리 7개가 다발로 구성되었고 다발수가 37, 45, 48, 53, 61개인 5종류가 사용되었다.

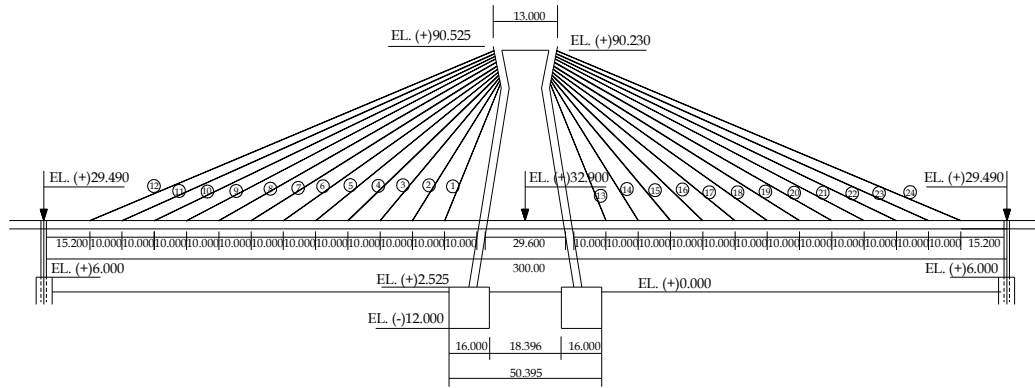


그림 5 측면도

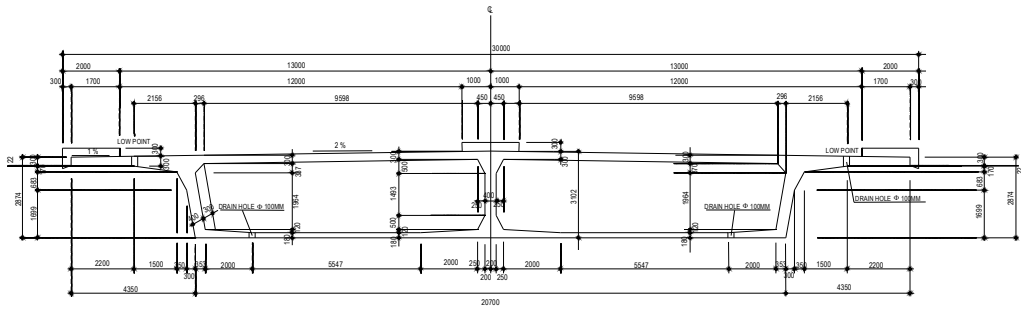


그림 6 거더의 단면도

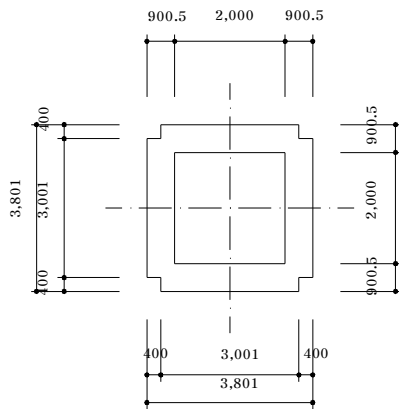


그림8 파이런 단면도

표1 케이블의 초기장력

순번	각도 (°)	장력 (KN)
1	66.5	6590
2	58.9	6950
3	52.4	7090
4	47.0	7494
5	42.5	7795
6	38.8	7981
7	35.6	8496
8	32.9	8994
9	30.7	9997
10	28.8	11001
11	27.1	11081
12	25.6	10013

케이블에 대한 제원 중 케이블 기울기와 초기장력만을 정리하면 표1과 같다.

주탑은 SWS51 강재를 사용하였으며 주탑의 상하부 단면이 변단면으로 제작되었다. 주탑 중앙부의 대표적인 단면이 그림6과 같다. 사장교구 간의 상판은 프리스트레스트 콘크리트로 제작되었으며 압축강도가 350 kgf/cm^2 이다.

4.2 해석결과

사장교는 케이블의 초기장력과 교량의 자중만으로 정적 평형이 유지되도록 설계하고 있다. 먼저 self-equilibrium을 이루는 정적 비선형 해석결과로부터 케이블 장력을 구하면 표2와 같다.

표2 정적 평형상태에서 케이블의 장력

각도(°)	좌측케이블	우측케이블
	장력(KN)	장력(KN)
66.5	9727.09	7850.28
58.9	10880.08	9839.66
52.4	10775.80	10378.95
47.0	9661.57	9679.12
42.5	8597.10	8848.43
38.8	8002.56	8332.02
35.6	7383.96	7638.13
32.9	6886.90	7016.12
30.7	6338.40	6364.38
28.8	5846.94	5826.51
27.1	6173.11	6161.78
25.6	7224.12	7200.62

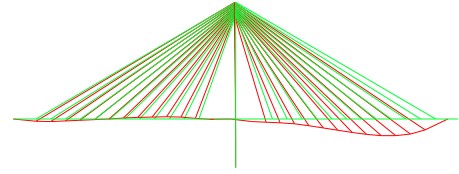


그림9 정적평형상태

자유진동 해석결과로부터 고유진동수 6개만을 정리하면 표3과 같다.

표3 고유진동수

순	고유진동수(Hz)	모드형상
1	0.267	Anti-Sym.
2	0.493	Sym.
3	0.735	Anti-Sym.
4	0.799	Sym.
5	0.908	Anti-Sym.
6	1.085	Sym.

엘센트로 지진을 가진력으로 한 강제진동해석결과로부터 거더의 1/4, 3/4지점의 연직 처짐과 교탑의 수평 처짐에 대한 변위응답을 도시하면 그림10과 같다. 그림 10에서 순서대로 거더의 1/4점, 3/4점, 그리고 교탑 정부의 변위를 시간에 따른 변화에 FFT로 분석한 결과를 도시한 것이다. 변위에 대한 스펙트럼을 보면 거의 동일한 주파수에서 첨점을 이루고 있음을 알 수 있다.

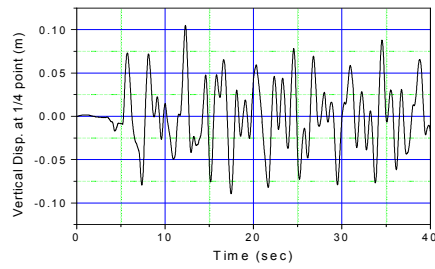
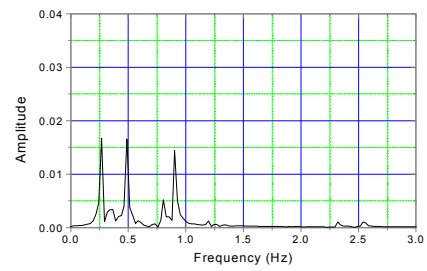
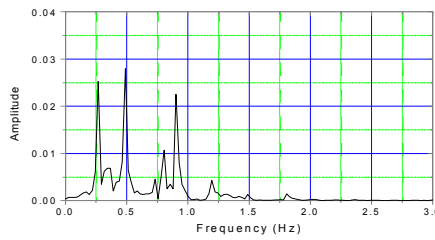
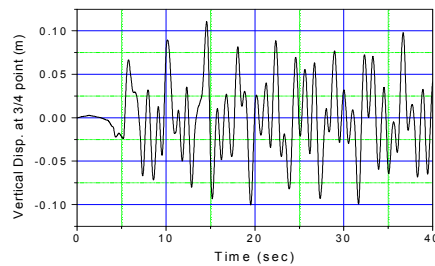
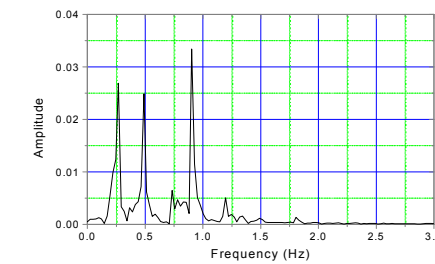
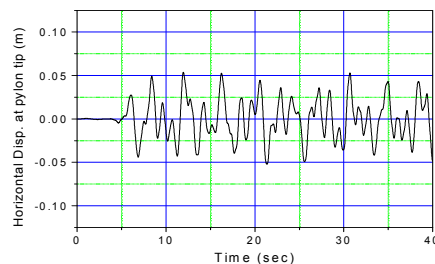
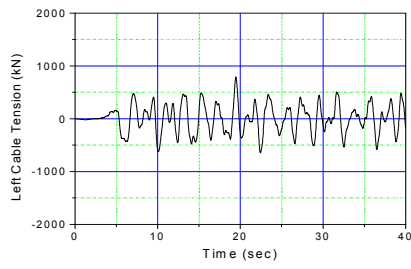
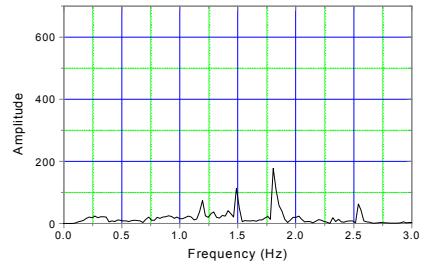
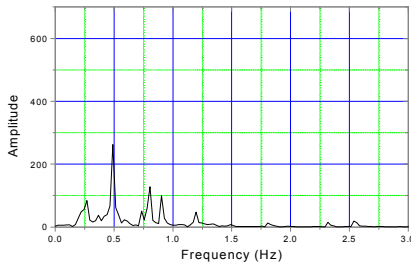
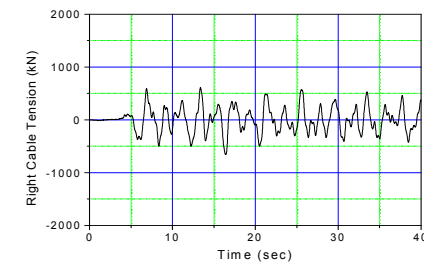
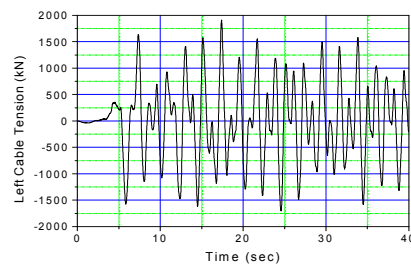
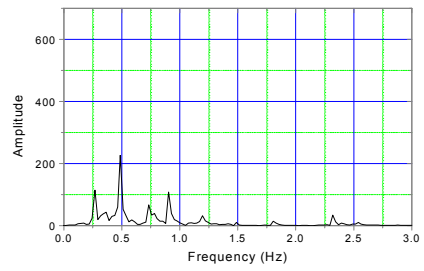
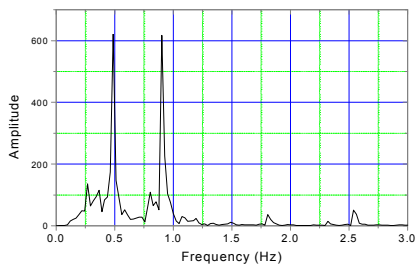
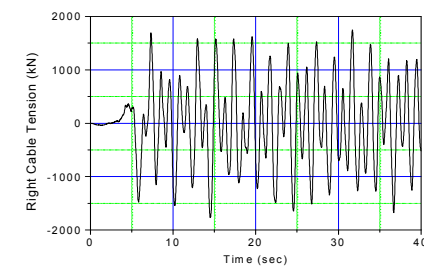
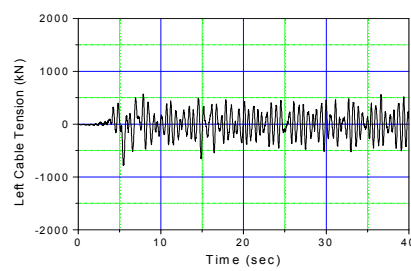
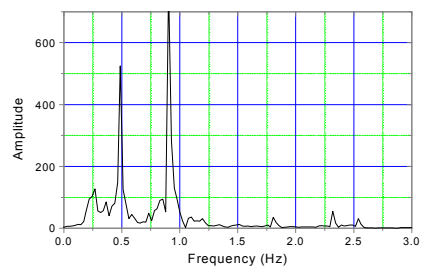


그림10 지진해석에 대한 변위응답곡선



마찬가지 방법으로 케이블 장력 증가량에 대한 시간이력곡선과 이로부터 FFT 분석결과를 도시하면 그림11과 같다. 1번째에서 6번째까지의 그림은 사장교의 좌측편 케이블에 대한 시간대 케이블 장력 증분 응답이며 7번째부터 12번째까지의 그림은 우측편 케이블에 대한 시간에 따른 케이블 장력 증분 응답을 나타냈다. 그림11에서처럼 케이블 장력증분에 대한 스펙트럼을 보면 고유진동수가 부분적으로 나타남을 알 수 있다. 거더의 처짐과 달리 스펙트럼이 일정한 주파수에서 첨점을 이루지 못하는 이유는 케이블 자체가 지니고 있는 비선형성에 강하고 케이블 장력에 따른 지배 고유 진동수가 다르기 때문이다.



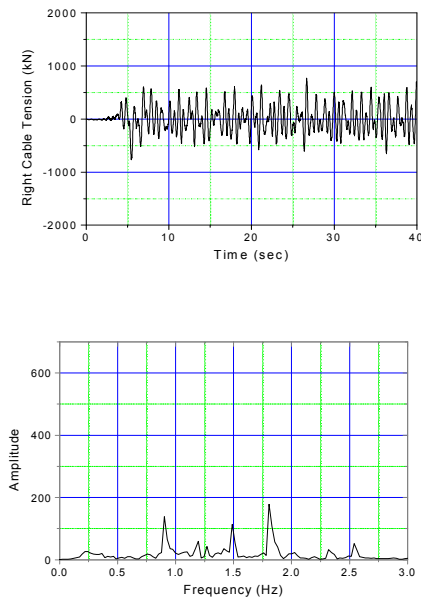


그림11 케이블 장력의 이력곡선

지진에 의한 동적응답은 정적 비선형 해석결과를 Datum으로 하고 있으며 이로부터 케이블 장력의 증분이 동적 효과를 나타낸다. 그러므로 동적효과에 따른 최대 케이블 증분은 약 2000 kN이며 정적 비선형 해석결과로부터 케이블의 최대장력은 10880 kN이다. 그러므로 지진하중이 작용할 때 장력의 최대크기는 약 12880 kN으로 나타난다.

5. 결론

모든 케이블 지지교량은 휨 강성이 전혀 없는 케이블과 휨 강성이 좋은 부재들로 구성되어 있다. 대표적인 케이블 지지교량이 사장교와 현수교이다. 이 교

량들은 휨 강성이 없고 인장에 대한 저항능력만을 발휘하는 케이블에 의하여 거더에 가해지는 하중을 케이블로 분포시키는 구조체들이다. 재료적 성질이 전혀 다른 두 종류의 구조체가 복합적으로 작용하는 구조물이므로 구조해석이 어렵고 복잡하다. 특히, 케이블은 기하학적 비선형성이 매우 강하게 나타나는 특성으로 말미암아 수치적인 방법만으로 구조해석을 수행할 수 있다.

본 연구에서는 올림픽대교를 해석모델로 하여 지진하중을 받는 사장교의 비선형 동적응답을 보였다. 지진하중은 최근 변경된 국내 내진설계에 대한 시방서 규정인 0.154g를 최대가속도 크기로 하는 인공가속도 이력곡선을 사용하였으며 지진이력은 가장 널리 사용되어지는 엘센트로 지진에 대한 가속도 이력곡선을 사용하였다.

해석결과를 보면 사장교의 처짐에 대한 동적응답은 정적 평형을 이룬 후에는 거의 선형 거동을 하고 있음을 알 수 있다. 케이블 부재는 미소한 양단 변위의 증가에도 상당한 크기의 장력 증가를 나타내는 구조적 특징을 지닌 부재이기 때문이다. 그러므로 자중에 의한 평형상태 후에는 거의 선형 동적해석결과와 일치한다. 그러나 케이블 장력은

미소한 양단변위의 감소에 기하학적 비선형 거동을 하므로 장력의 변화가 처짐의 거동과 다른 양상을 보인다. 이러한 변화는 케이블이 갖는 비선형이라는 특성 때문이다.

케이블 교량을 보다 엄밀히 해석하기 위해서는 3차원 해석모델을 설정하여 하며 해석결과에 대한 검증을 모형시험에 의해 검토되어야 한다. 점진적으로 증가 일로에 있는 우리나라 지진 발생 빈도를 보면 사전에 지진에 대한 대비가 요구되며 이를 위한 교량실험이 필수적이라고 판단된다. 또한, 국내에서 발생하는 각종 지진에 대한 자료를 통계학적으로 분석하여 향후 발생할 수 있는 지진에 대비하여야 하며 이로부터 우리나라에 맞는 인공가속도 이력곡선을 유도하여야 한다.

감사의 글

본 논문은 서울시립대학교 해외연구교수 지원금으로 완성되었으며 이에 깊은 사의를 표합니다. 또한, 올림픽 대교에 대한 자료를 제공하여 준 서울시 관계자 여러분께 사의를 표합니다.

<참고문헌>

- [1] 임성순, '나선형 곡선부재의 동적 해석', 서울대학교 박사학위논문, 1987
- [2] 임성순 외 2인, '이동하중을 받는 사장교의 동적 해석에 대한 연구', 대한토목학회논문집 제9권 제 3호, pp. 1-12, 1989
- [3] 임성순 외 1인, '케이블 구조에 대한 유한요소해석', 서울시립대학교 산업기술연구소논문집 제 7집, pp. 103-110, 1999
- [4] 임성순 외 1인, '케이블 보도교의 동적특성', 서울시립대학교 산업기술연구소논문집 제 7집, pp. 110-120, 1999
- [5] 김철영, '지진하중을 받는 사장교의 동적해석', 서울대학교 박사학위논문, 1990
- [6] Abdel-Ghaffar A.M., Nazmy A.S., '3-D Nonlinear seismic behavior of cable-stayed bridges', J. Struct. Engng., ASCE, Vol. 117, No. 11, Nov. 1991, pp. 3456-3476.
- [7] Fleming J.F., Egeseli E.A., 'Dynamic behavior of a cable-stayed bridge', Earthquake Engng. Struct. Dynamics, Vol. 8, 1980, pp.

1-16.

[8] Troitsky, M.S. “Cable-stayed Bridges; Theory and Design”, Crosby-Lockwood, London, England, 1977

[9] Podolny, W.Jr. and Scalzi, J.B., “Construction and design of cable-stayed bridges”, John Wiley & Sons, 1976

[10] Niels, J. Gimsing., “Cable Supported Bridges; Concept & Design”, John Wiley & Sons, 1997