

# 축방향 변형을 고려한 사장교의 초기평형상태 해석

## Initial Equilibrium State Analysis of Cable Stayed Bridges Considering Axial Deformation

김 제 춘<sup>1)</sup> · 장 승 필<sup>2)</sup>  
*Kim, Je Choon Chang, Sung Pil*

요 약 : 사장교의 정확한 초기형상을 결정하기 위한 초기평형상태 해석법으로 케이블 장력에 큰 영향을 미치는 축방향 변형을 고려한 반복해석 알고리즘을 제시하였다. 해석의 정확성과 수렴성을 향상시키기 위해 매개변수 해석을 통해 케이블 장력의 초기값을 간단하게 결정할 수 있는 방법을 제안하였으며, 3차원 뼈대요소와 탄성현수선요소를 적용한 해석 프로그램을 개발하여 사장교의 기하비선형 거동을 고려하였다. 실교량 모델을 포함한 해석 예제를 통하여 본 연구에서 제시한 해석 알고리즘의 정확성과 적용성을 검증하였다. 제안된 해석 알고리즘은 부재 제작시 축방향 변형을 제작 캠버량으로 반영하지 않는 경우나 시공중 발생하는 시공오차나 제작오차의 영향을 제거하기 위해 최종장력을 보정하는 경우에 유용하게 적용될 수 있다.

ABSTRACT : The study proposed the initial equilibrium state analysis method that considers axial deformation, in order to accurately determine the initial shape of a cable-stayed bridge. Specifically, the proposed method adopted the successive iteration method. In order to evaluate appropriate initial cable force introduced in the initial equilibrium state analysis, parametric studies were performed and a useful linear analysis method proposed. The geometrically nonlinear static behaviors of cable-stayed bridges were considered, using three-dimensional frame element and elastic catenary cable element. The usefulness and applicability of the analytic method proposed in this study were demonstrated using numerical examples, including a real cable-stayed bridge. The algorithm is applicable in cases wherein axial deformation is not adopted in the fabrication camber, or final cable force is adjusted to eliminate construction and fabrication errors occurring during construction.

핵심 용 어 : 사장교, 초기평형상태, 축방향 변형, 케이블 장력, 반복해석

KEYWORDS : Cable Stayed Bridge, Initial Equilibrium State, Axial Deformation, Cable Force, Successive Iteration Method

### 1. 서론

사장교는 현수교와 더불어 케이블 지지교량의 대표적인 형식으로 장기간 적용시 케이블의 인장특성을 십분 활용하여 구조적 효율성의 극대화가 가능하고 주변경관과의 조화를 통한 경관성과 지역 상징성이 우수하여 세계적으로 그 적용이 급증하고 있으며, 국내에서도 서해대교 건설이후 사장교에 대한 관심이 고조되어 장기간의 연육교뿐만 아니라 중소지간의 교량형식으로도 사장교를 채택하는 사례가 증가하고 있다. 사장교의 건설이 증가함에 따라 이에 대한 연구도 활발히 진행중

에 있으며 특히 설계 및 시공의 정밀성을 높이기 위한 연구의 일환으로 엄밀한 초기형상(초기평형상태)과 단계별 시공형상 결정을 위한 해석프로그램의 개발이 강조되고 있다.

사장교는 처짐형상이 설계형상과 일치할 때 고정하중에 의해 구조물에 발생하는 모멘트의 크기가 최소화되고, 초기평형상태는 시공형상 결정의 근간이 되므로 엄밀한 초기평형상태의 결정은 효율적인 설계 및 시공을 위한 필수요소라고 할 수 있다. 그러나 사장교는 구조 특성상 주탑 및 주형에 큰 압축력이 작용하여 축방향 변형이 발생하고, 처짐 형상이 케이블 장력에 직접적인 영향을 받게 되므로 정확한 초기평형상태의

1) 정회원, (주)대우건설 과장 공학박사

2) 정회원, 서울대학교 지구환경시스템 공학부 교수

본 논문에 대한 토의를 2003년 2월 28일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

산정은 매우 까다로운 작업이라 할 수 있다.

사장교의 초기평형상태 결정은 궁극적으로 구조물의 변형 형상을 설계형상과 최대한 일치시키는 케이블 장력이나 길이를 결정하기 위한 것으로 그 방법은 크게 반복해석법<sup>(1)</sup>, 최적화 방법<sup>(2),(3)</sup>, 초기부재력 도입 방법<sup>(4),(5)</sup>으로 나누어 볼 수 있다. 반복해석법은 고정하중만을 고려한 해석을 우선 수행한 후 계산된 케이블 장력을 초기장력으로 입력하여 재해석을 수행하는 방법으로, 수렴조건을 만족할 때까지 케이블 장력만을 보정해가며 반복해석을 수행하며 수렴성과 정확성이 떨어지는 단점이 있다. 최적화기법을 도입하여 주형의 변형에너지나 응력을 최소화하는 방법은 최근에 많이 연구되고 있는 방법이나 사장교의 비선형성을 고려하기 어렵고 멀티케이블과 같이 변수가 많은 경우 정확성이 낮아 주로 2차원 선형해석에 적용된다. 초기부재력 도입 방법은 부재내에 가상의 초기부재력을 적용하고 비선형 해석을 반복해서 수행하여 엄밀한 초기평형상태를 구현하는 방법으로, 가상의 초기부재력은 제작 캠버량으로 보정하게 된다. 이 방법은 가장 엄밀한 해를 제공하는 방법으로 알려져 있으며 제작 캠버량을 부재 제작시 정확하게 반영해야 한다.

본 연구에서는 최근에 국내에서 적용되고 있는 중소지간의 사장교와 같이 제작 캠버량이 작아 부재 제작시 캠버량을 반영하지 않는 경우와 제작오차나 시공오차로 인해 최종장력을 다시 결정할 필요가 있는 경우에도 엄밀한 초기평형상태를 결정할 수 있도록 수정된 반복해석법을 적용한 해석 알고리즘을 제시하고 해석 예제를 통해 그 타당성을 검증하였다.

## 2. 유한요소 프로그램

본 연구에서는 사장교의 비선형 거동<sup>(6)</sup>을 고려한 기하비선형 해석을 수행하기 위해 뼈대요소와 케이블요소를 포함하고 있는 사장교 전용 해석 프로그램(CASBAP)을 개발하여 사용하였다. 비선형 해석은 Newton-Raphson Method를 적용하였으며, 주탑부와 주형은 3차원 뼈대요소를 적용하여 모델링하고, 케이블은 등가트러스요소나 탄성현수선요소를 적용할 수 있도록 하였다. 본 연구에서는 해의 정확도를 높이기 위해 탄성현수선요소를 사용하여 해석을 수행하였다.

### 2.1 뼈대요소

본 연구에서는 그림 1과 같이 뒀변형을 포함한 절점당 7개의 자유도를 갖는 3차원 뼈대요소<sup>(7)</sup>를 적용하였다. 절선강도행렬  $[K_T]$ 는 식 (1)과 같이 선형항인 탄성강도행렬  $[K_E]$ 와 비선형항인 기하강도행렬  $[K_G]$ 의 합으로 나타낼 수 있다.

$$[K_T] = [K_E] + [K_G] \quad (1)$$

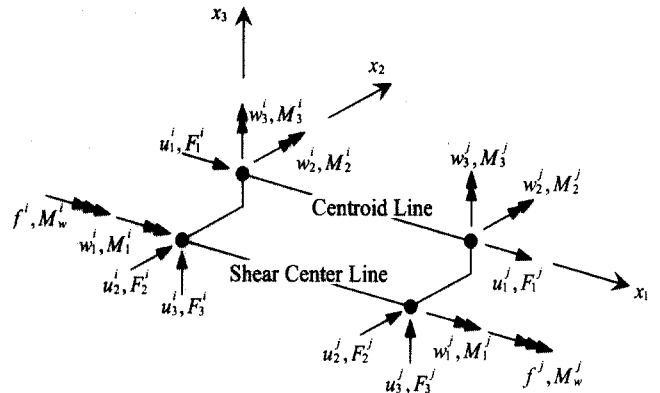


그림 1. 3차원 뼈대요소의 단면력 및 변위 성분

### 2.2 탄성현수선요소

이 요소는 자중을 받는 탄성현수선 식의 정해로부터 유도된 요소로서 사장재를 많은 요소로 분할하지 않고 하나의 요소만으로 모델링하여도 정확하게 케이블 거동을 파악할 수 있다.<sup>(8),(9)</sup> 또한 해석을 통해 케이블의 장력뿐만 아니라 변형전·후의 길이를 모두 구할 수 있다는 장점이 있다.

그림 2와 같이 양단이 지지된, 자중에 의한 케이블의 적합 방정식은 다음과 같이 양단 절점력과 변형전 길이의 함수로 나타낼 수 있다.

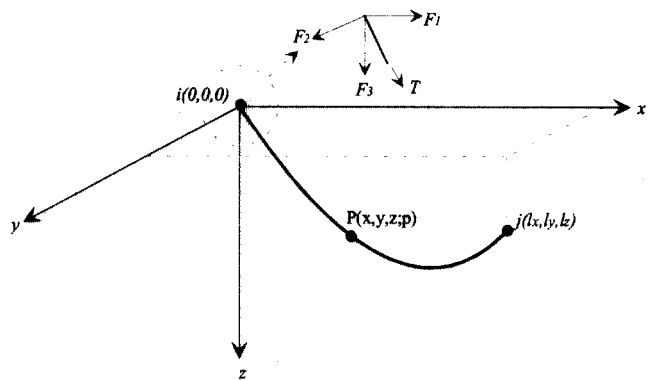


그림 2. 탄성 현수선요소의 형상

$$l_x = \frac{F_1}{EA_0} L_0 - \frac{F_1}{w} \left\{ \sinh^{-1} \left( \frac{F_3}{H} \right) - \sinh^{-1} \left( \frac{F_3 - wL_0}{H} \right) \right\}$$

$$l_y = \frac{F_2}{EA_0} L_0 - \frac{F_2}{w} \left\{ \sinh^{-1} \left( \frac{F_3}{H} \right) - \sinh^{-1} \left( \frac{F_3 - wL_0}{H} \right) \right\} \quad (2)$$

$$l_z = \frac{F_3}{EA_0} L_0 - \frac{F_1}{2EA_0} - \frac{H}{w} \left[ \left\{ 1 + \left( \frac{F_3}{H} \right)^2 \right\}^{1/2} - \left\{ 1 + \left( \frac{F_3 - wL_0}{H} \right)^2 \right\}^{1/2} \right]$$

여기서, H는 수평장력이며 w는 단위길이당 자중이다. 식 (2)는 간단한 형태로 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} l_x &= f(F_1, F_2, F_3, L_0) \\ l_y &= g(F_1, F_2, F_3, L_0) \\ l_z &= h(F_1, F_2, F_3, L_0) \end{aligned} \quad (3)$$

식 (3)의 양변을 미분하면, 식 (4)와 같은 유연도행렬 [F]를 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} dl_x \\ dl_y \\ dl_z \end{bmatrix} = [F] \begin{bmatrix} dF_1 \\ dF_2 \\ dF_3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

강도행렬은 유연도행렬의 역행렬이므로 식(4)를 이용해 케이블의 접선강도행렬 [K<sub>T</sub>]를 구할 수 있다.

### 3. 초기평형상태 해석

완성된 구조계에서 고정하중에 의해 발생하는 주형 및 주탑의 모멘트와 변위를 최소화하기 위해 고정하중과 평형을 이룰 수 있는 케이블 장력과 길이를 결정하는 것을 초기평형상태 해석이라고 정의할 수 있다. 그러나 모든 조건을 완벽하게 만족하는 초기평형상태를 찾는 것은 사장교가 고차의 부정정 구조이고 주탑을 중심으로 하중이 대칭이 아닌 경우가 많은 점을 감안할 때 거의 불가능한 일이므로 일반적으로 기술자의 공학적 판단에 의해 대상 구조물의 거동 특성에 따른 적절한 초기평형상태를 결정하게 된다. 본 연구에서는 다음의 기본조건을 만족하는 구조물의 형상을 초기평형상태로 정의한다.

- 1) 주형의 처짐이 최소화된 상태
- 2) 주탑부에서는 구조적으로 발생할 수 있는 최소한의 모멘트만 발생한다.
- 3) 주형의 모멘트는 가능한 균등하게 분포한다.

또한 주탑은 케이블이 주로 자유단인 상부에 밀집되어 있어 작은 불균형 하중에 의해서도 주탑 하부에 큰 모멘트가 발생할 수 있고, 케이블은 주탑과 주형의 변형에 직접적인 영향

을 받는 부재이므로 전체 구조물의 모멘트 분포와 처짐의 발생에 가장 민감하게 반응하는 주탑의 수평변위와 케이블의 변형을 초기평형상태 해석의 수렴조건으로 적용한다.

#### 3.1 축방향 변형을 고려한 초기평형상태

사장교에서 주형과 주탑에 발생하는 축방향 변형은 케이블의 장력과 길이를 결정하는데 큰 영향을 미치게 되는데 기존의 연구에서 적용한 방법<sup>(1)</sup>으로는 축방향 변형이 발생한 상태에서의 엄밀한 초기평형상태를 결정하기가 매우 어렵다. 본 연구에서는 엄밀한 초기평형상태를 산정하기 위해 반복해서 비선형 해석을 수행하는 반복해석 방법(Successive Iteration Method)을 적용하여 해석을 수행하게 되는데, 전 단계의 비선형 해석 결과를 이용하여 다음 단계의 해석을 수행할 때 축방향 변형을 제외한 모든 변형을 제거하여 원래의 좌표값으로 복원시키고, 모든 부재의 축력은 유지한 채 다른 단면력 성분은 모두 제거하는 방법을 개발하여 적용하였다. 이때 주탑부의 축방향 변형이 유지되는 상태에서 주탑부와 연결된 주형의 수직처짐은 제거되므로 주탑과 주형의 연결부에서 좌표의 차가 발생하게 되는데 본 연구에서는 이런 좌표의 차이에 따른 영향을 제거하기 위하여 주형의 수직변위에 대한 보정개념을 적용하였다. 이때 적용되는 보정계수는 주탑에 단위 지점침하를 주어 결정하게 되는데 그림 3에서 보는 바와 같이 주탑의

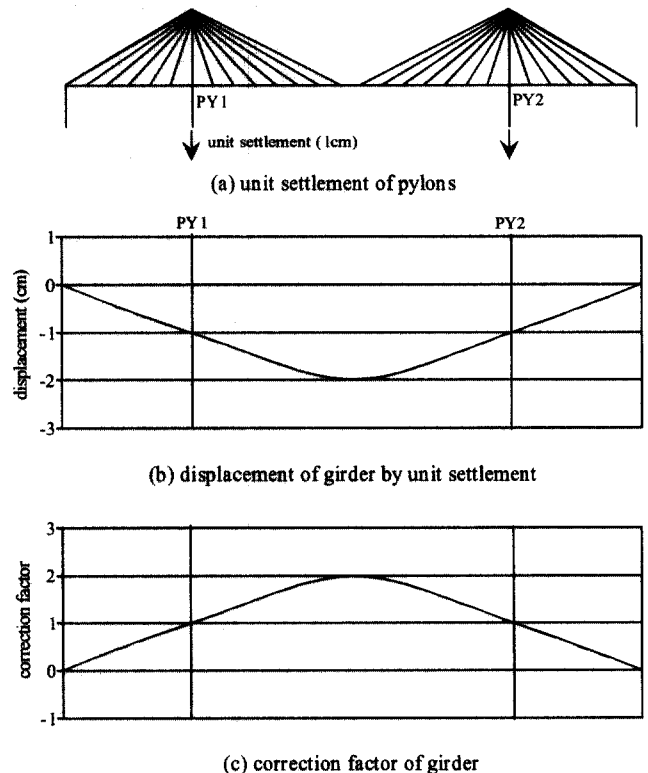


그림 3. 보정계수의 산정방법

단위 침하량에 따른 주형의 수직변위를 역으로 적용하여 주형의 수직좌표를 보정하기 위한 보정계수를 산정하게 된다.

자세한 해석 과정은 다음과 같으며 해석 알고리즘은 그림 4에 나타내었다.

- 1) 고정하중이 모두 재하된 상태에서 비선형 해석을 수행한다.
- 2) 비선형 해석을 통해 얻은 부재력 성분 중에서 축력을 제외한 모든 성분을 초기화하여 뼈대요소와 케이블의 축력만을 유지한다.
- 3) 모든 절점에서 부재의 축방향을 제외한 다른 자유도의 변형에 의해 발생한 좌표의 변화량을 초기화하여 그림 5(a)와 같이 주탑과 주형의 축방향 변형만을 유지시킨다.

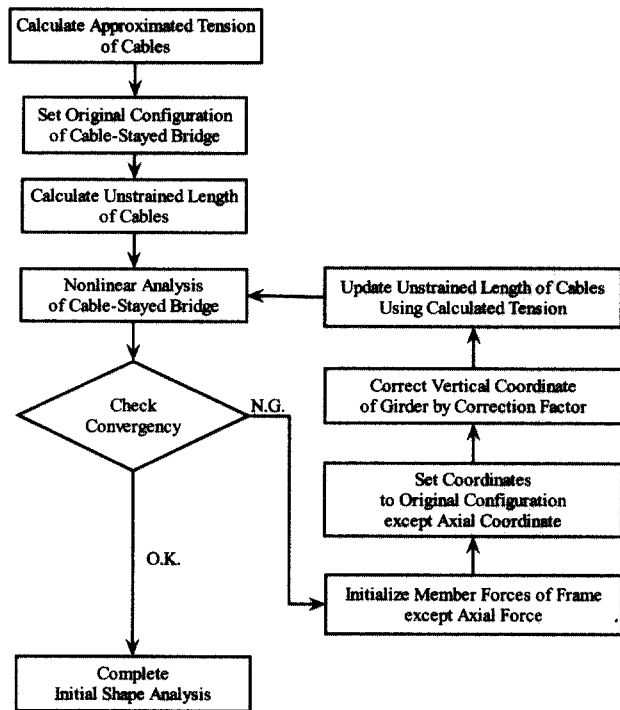


그림 4. 초기평형상태 해석 알고리즘

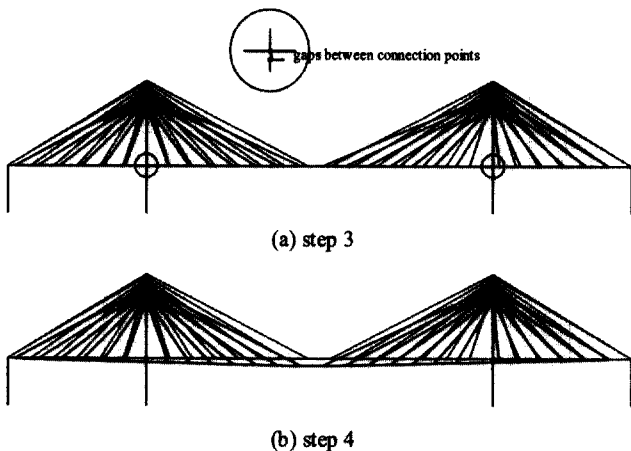


그림 5. 반복계산시의 구조물 좌표의 보정

다. 이때 주형의 수직좌표 값을 초기화하므로써 주탑과의 연결점에 수직좌표의 차가 발생한다.

- 4) 수직좌표의 차에 의한 영향을 제거하기 위하여 그림 5(b)와 같이 수직좌표 차에 보정계수를 곱하여 주형의 새로운 수직좌표를 구한다.
- 5) 변화된 구조물에 대한 비선형 해석을 다시 수행한다.
- 6) 해석결과가 초기평형상태에 대한 수렴조건을 만족할 때까지 2)단계부터 반복하여 해석을 수행한다.

초기평형상태에 대한 수렴조건으로 본 연구에서는 식 (5)와 (6)과 같이 주탑의 최대 수평변위와 케이블 길이의 증분율을 적용하였으며 두 개의 수렴조건 중 한 개 이상을 만족하는 상태를 초기평형상태로 결정한다.

$$\epsilon_d \geq |U_{max}^i| \quad (5)$$

$$\epsilon_r \geq \left| \frac{\Delta L_c^i}{L_c^i} \right|_{max} \quad (6)$$

여기서,

- $\epsilon_d, \epsilon_r$  = 변위 및 케이블 길이 증분율에 대한 수렴기준
- $U_{max}^i$  = i번째 반복계산에서 주탑부에 발생하는 최대 수평방향 변위
- $\Delta L_c^i$  = i번째 반복계산에서 케이블 길이의 증분량
- $L_c^i$  = i번째 반복계산에서 케이블의 길이

### 3.2 케이블 장력의 초기값 산정

사장교는 시공시 케이블을 긴장하게 되는데 이 때의 긴장력은 외부하중의 개념이므로 해석시 케이블에 초기 장력값을 입력해야 한다. 초기평형상태 해석을 위해 입력되는 케이블의 초기 장력값이 적절한 값을 가질 때 수렴이 빠르고, 보다 정확한 결과를 얻을 수 있다. 적절한 입력값 산정을 위해서는 정확한 고정하중의 산정과, 각 케이블에 분배되는 고정하중의 크기를 계산하는 과정이 선행되어야 한다. 그러나 일반적으로 적용되고 있는 탄성지지된 연속보 개념으로는 주탑에 의해 반대편 케이블에 전달되는 비대칭 하중(Unbalanced Load)의 영향을 고려할 수 없고, 케이블을 트러스로 모델링하여 고정하중에 대한 선형해석을 수행한 후 트러스에 발생하는 축력을 초기 장력값으로 사용하는 방법은 주탑 및 주형의 휨강성이 클수록 많은 오차를 내포하게 된다. 이는 주탑 및 주형의 휨강성이 커질수록 부재의 하중분담율이 증가하여 케이블이 받아 주어야 할 하중이 실제에 비해 과소평가 되기 때문이다.

본 연구에서는 케이블 장력에 영향을 미치는 주형 및 주탑의 휨강성과 케이블을 포함한 모든 부재의 축방향 강성의 영향을 고려하여 적절한 케이블 장력의 초기값을 얻을 수 있는 모델링 방법을 검토하였다. 해석은 케이블을 트러스로 모델링한 후 선형해석을 수행하였으며 주형의 모델링시 주형에 작용하는 고정하중이 가능한 모두 케이블로 전달되도록 케이블 지지점과 지점에만 질점을 부여하였다. 검토 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 고정하중하에서 주형 및 주탑의 축방향 변형은 케이블 장력에 큰 영향을 미치므로 부재의 축방향 강성을 키워 축방향 변형에 의한 영향을 최소화한다.
- 2) 주탑을 중심으로 반대편 경간으로 전달되는 비대칭 고정하중의 영향을 케이블이 주로 받도록 주탑의 휨강성을 줄여 휨저항을 최소화한다.
- 3) 케이블의 변형은 케이블간 장력의 분포에 큰 영향을 미치므로 케이블의 강성을 조정하여 적절한 장력 분포를 유도한다.

본 연구에서는 케이블의 초기장력 결정시 검토 결과를 반영하여 주형 및 주탑의 축방향 강성과 주탑의 휨강성을 각각 원래 강성(Original Stiffness)의  $10^3$ 배와  $10^{-2}$ 배로 변화시켜 적용하였다. 케이블 강성의 증가계수는 지지 케이블(Back-Stay Cable)이 지점에 위치할 때  $10^3$ 을 적용하고, 지점과 이격되어 있을 경우에는 20을 적용하였다.

#### 4. 수치해석 예제

제안한 해석 알고리즘의 정확성과 적용성을 검증하기 위해 2차원 예제와 실교량을 적용한 3차원 예제를 선정하여 해석을 수행하였다.

##### 4.1 2차원 예제

본 예제에서는 그림 6과 같이 32개의 케이블로 지지되는 2차원 사장교 모델을 적용한 해석을 수행하였다. 해석모델의 단면상수 및 물성값은 표 1에 나타내었다. 주형과 주탑의 교

차점은 스프링요소를 사용하여 연결하였으며 종방향 변위에 대한 1점 고정방식을 적용하였다. 그림 7은 주형에 대한 보정계수를 나타내고 있다.

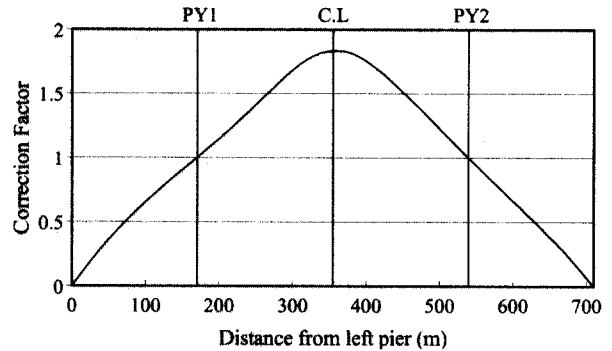


그림 7. 2차원 모델의 보정계수

표 1. 2차원 모델의 단면상수 및 물성값

설계 변수	계 수	단위
주형 및 주탑의 단위중량	11.0	tf/m <sup>3</sup>
케이블의 단위중량	7.85	
주형 및 주탑의 탄성계수	2.10E7	tf/m <sup>2</sup>
케이블의 탄성계수	1.95E7	
주형의 단면 2차 모멘트	1.48	m <sup>4</sup>
주탑의 단면 2차 모멘트	6.10~8.87	
주형의 단면적	1.07	m <sup>2</sup>
주탑의 단면적	1.54~1.76	
케이블의 단면적	0.015~0.025	
주형의 부가고정하중	5.0	tf/m

표 2. 2차원 모델의 케이블 장력

케이블 번호	초기장력(tf)	최종장력(tf)	장력차(tf)
1	976.72	971.45	-5.27
2	848.84	849.55	0.71
3	695.71	699.00	3.29
4	661.42	665.17	3.75
5	593.18	596.69	3.51
6	531.28	534.51	3.23
7	418.87	419.91	1.04
8	493.78	480.12	-13.66
9	498.21	484.10	-14.12
10	416.39	417.28	0.89
11	531.66	533.35	1.69
12	593.23	592.12	-1.11
13	660.16	657.63	-2.53
14	701.36	699.51	-1.85
15	824.49	825.50	1.01
16	994.93	1003.29	8.36

그림 6 2차원 모델의 구조제원

초기평형상태 해석의 수렴조건은 주탑의 교축방향 최대변위로 1mm를, 케이블 길이의 증분율로  $10^{-5}$ 을 각각 적용하여 해석을 수행하였다.

축방향 변형을 고려한 초기평형상태 해석을 위한 케이블의 초기장력은 최종장력과 함께 표 2에 정리하였으며 해석 결과의 변형 형상과 모멘트 분포는 그림 8에 도시하였다. 주형에 발생하는 최대 수직처짐은 중앙에서 -2.6cm로, 중앙경간이 370m이고 주탑과의 연결부에서 주탑의 압축변형에 의한 처짐이 -0.9cm 발생한 점을 고려하면 주형의 수직처짐이 케이블에 도입되는 장력으로 인해 완전히 제거되었다고 볼 수 있다. 케이블 장력에 의한 주형의 축방향 변위는 우측 끝단에서 최대 -6.7cm가 발생하였는데 축방향 변형에 의한 변위는 제작캠버로 반영되어야만 제거가 가능하다. 모멘트 분포를 살펴보면 주탑부에서 최대 181(tfm)의 모멘트가 발생하였으며, 주형에서는 주탑 연결부와 중앙부를 제외하면 전반적으로 균등한 분포를 보이고 있는 것을 확인할 수 있다. 그림 9는 제안된 알고리즘에 의한 반복계산을 수행하지 않았을 경우의 케이블 초기값에 대한 단순 비선형해석의 결과로서 그림 8의 결과와 비교하여 처짐량이 크고 주탑 상부에 발생한 변위의 영향으로 하부에 2376(tfm)의 모멘트가 발생하였으며 주형의 경우 전반적으로 균등한 모멘트 분포를 보이고 있으나 초기평형상태 해석결과에 비해 모멘트가 50%이상 증가하였다. 초기평형상태 해석 알고리즘에 의한 반복계산의 회수는 3회로, 축방향 변형을 보정하지 않고 케이블 장력만을 보정하는 기존의 방법<sup>(1)</sup> 적용시 반복회수 20회에서도 수렴하지 않는 것에 비해 탁월한 수렴속도를 보임으로써 제안한 해석알고리즘의 정확성과 적용성을 확인할 수 있다.

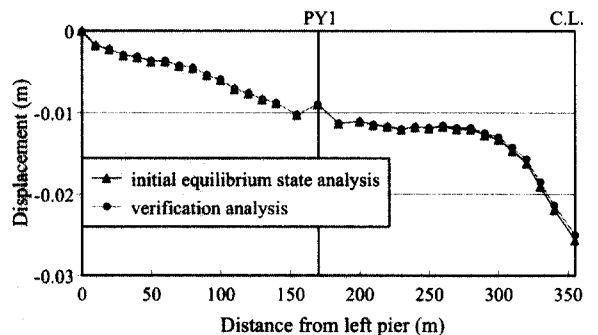
해석 알고리즘을 검증하기 위하여 해석을 통해 얻은 초기평형상태를 만족하는 케이블의 변형전 길이를 구하여 원래의 해석 모델에 적용한 후 비선형 해석을 수행하여 그 결과를 초기평형상태와 비교하여 보았다. 검증 결과는 그림 10에 도시하였는데 그림에서 보는 바와 같이 반복계산을 통해 얻은 초기평형상태와 이를 만족시키는 케이블의 변형전 길이를 적용한 검증해석의 결과가 거의 일치함을 확인할 수 있다.

#### 4.2 3차원 실교량 예제

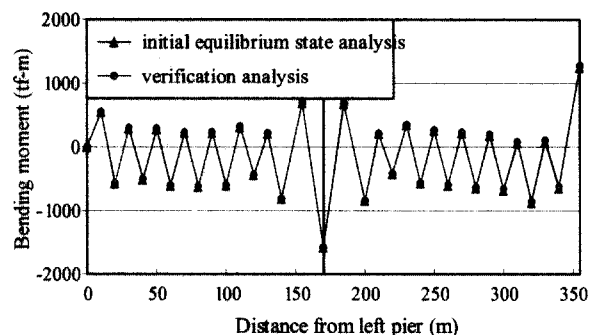
본 예제에서는 3차원 실교량 모델을 적용하여 해석을 수행하였다. 예제로 사용한 영흥대교<sup>(10)</sup>는 110-240-110m의 3경간 강사장교로서 64개의 케이블로 지지되어 있으며 보강형은 강상판 상형단면으로 종방향 거동이 주탑 가로보 상의 탄성받침에 의해 구속되는 2점 탄성지지 방식을 적용하였다. 모델링시 탄성받침의 거동은 계산서<sup>(10)</sup>에 제시된 스프링 상수로

그림 8. 2차원 모델의 초기평형상태 해석 결과

그림 9. 케이블 초기값에 대한 비선형 해석 결과



(a) 처짐형상



(b) 모멘트 분포

그림 10. 2차원 모델의 검증해석 결과

그림 11. 3차원 모델의 구조제원

표 3. 3차원 모델의 대표 단면상수 및 물성값

구조변수	구 분	제 원	단 위
단위중량	주형	13.0	tf/m <sup>3</sup>
	주탑	8.64	
	케이블	9.80	
탄성계수	주형 및 주탑	2.1E7	tf/m <sup>2</sup>
	케이블	2.0E7	
단면적	주형	0.629	m <sup>2</sup>
	주탑	0.628	
	케이블	0.007	
단면2차 모멘트	주형	0.658	m <sup>4</sup>
	주탑	1.117	
부가고정하중	주형	3.86	tf/m

표 4. 3차원 모델의 케이블 장력

케이블 번호*	초기장력(tf)	최종장력(tf)	장력차(tf)
1	292.28	290.13	2.15
2	210.74	207.98	2.76
3	129.96	130.01	-0.05
4	143.34	144.99	-1.65
5	138.94	141.33	-2.39
6	112.29	114.36	-2.07
7	99.34	100.33	-0.99
8	124.70	123.92	0.78
9	125.46	118.63	6.83
10	91.34	88.47	2.87
11	108.69	107.30	1.39
12	135.07	134.01	1.06
13	139.17	138.71	0.46
14	126.87	126.84	0.03
15	214.51	215.61	-1.10
16	282.52	287.66	-5.14

\* 케이블 번호는 맨 좌측으로부터 앞면에 있는 케이블에 순서대로 부여한 번호이다. 교량이 대칭구조이므로 16개만 정리하였다.

모사하였다. 대상교량의 구조제원은 그림 11에 도시하였으며, 대표적인 단면상수 및 물성값은 표 3에 나타내었다. 케이블의 초기장력은 3.2장에서 언급한 방법을 2차원 모델에 적용하여 구하였으며 최종장력과 함께 표 4에 수록하였다. 주형의 보정 계수는 그림 12에 도시하였다.

반복해석의 수렴조건은 주탑에서의 교축방향 최대변위로 1mm를, 케이블 길이의 증분비로 10<sup>-5</sup>을 각각 적용하여 해석을 수행하였다.

해석결과를 도시한 그림 13을 살펴보면, 주형의 최대 수직 변위는 교량의 중앙에서 -1.6cm이며 축방향 변형은 -3.2cm가 발생하였다. 최대 정모멘트는 교량의 중앙에서 834.5(tfm)

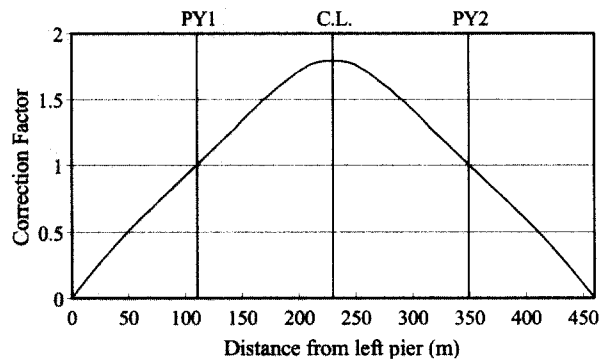


그림 12. 3차원 모델의 보정계수

이고 최대 부모멘트는 지점부에서 632.0(tfm)이 발생하였다. 중앙부의 케이블 지지점간의 간격이 28m로서 다른 케이블 간격인 12m의 2배 이상이므로 교량의 중앙부에서 최대 모멘트가 발생하였다. 주탑부의 경우 최대 114.3(tfm)의 모멘트가 발생하였는데 케이블의 배치와 주경간과 측경간의 하중차이 등을 고려해 보면 적절한 분포를 보이고 있다고 판단된다. 주탑하부에서 모멘트의 부호가 바뀌는 지점은 주탑과 기초가 연결되는 지점을 나타낸다. 수렴을 위한 반복계산의 회수는 4회로 실교량의 3차원 모델에서도 수렴성이 우수한 것을 확인하였다. 그림 14는 초기평형상태의 케이블 변형전 길이를 원래 모델에 적용한 단순 비선형 해석의 결과와 초기 평형상태의 주형의 모멘트를 비교하여 도시하고 있는데 두 결과가 잘 일치하고 있다. 또한 가장 정확한 초기평형상태 해석법인 초기부재력을 도입한 초기평형상태 결정 방법을 이용해 동일한 초기장력과 수렴조건을 적용하여 해석한 결과 주형에

발생하는 최대 정모멘트와 부모멘트가 각각 832(tfm)와 -632(tfm)로 본 연구에서 제안한 방법에 의한 해석 결과와 거의 일치하였다.

### 5. 결론

사장교의 초기평형상태를 정확하게 구현하는 것은 정밀시공의 기본이 될 뿐만 아니라 주형 및 주탑에 발생하는 모멘트를 최소화하여 구조물의 안전성을 최대한 확보할 수 있는 기초가 된다. 본 연구에서는 측방향 변형을 고려한 초기평형상태를 엄밀하게 산정하기 위한 해석 알고리즘을 제시하였다. 제안된 해석 알고리즘은 측방향 변형을 제작 캠버량으로 적용하지 않고 시공하는 경우나 시공오차나 제작오차를 반영하여 최종장력을 결정하는데 유용하게 적용될 수 있는 방법으로, 단성현수선 요소를 적용해 초기평형상태를 만족시키는 케이블의 길이와 장력을 얻을 수 있다. 해석 예제를 통해 본 연구에서 제안한 해석 알고리즘의 타당성과 실교량에 대한 적용성을 검증하였으며, 기존의 방법 중에서 가장 정확한 해를 제공하는 것으로 알려진 초기부재력을 도입하는 방법과 비교하여 결과의 정확도에 차이가 거의 없음을 확인하였다. 또한 수렴성이 좋아 실교량에 대한 적용성이 높은 것으로 판단된다.

### 참고 문헌

1. Wang, P.H., Tseng, T.C., Yang, C.G. (1993). "Initial Shape of Cable-Stayed Bridges", Computer & Structures, Vol 46, No.2, pp.1095-1106.
2. Furukawa, K., Sugimoto, H., Egusa, T., Inoue, K., Yamada, Y. (1987). "Studies on Optimization of Cable Prestressing for Cable-Stayed Bridges", Proceedings of International Conference on Cable-Stayed Bridges, Bangkok, Thailand, pp.723-734.
3. Takagi, R., Nakamura, T. and Nakagawa, K.(1996), "A New Design Technique for Pre-Stressed Loads of a Cable-Stayed Bridge", Computer & Structures, Vol.58, No.3, pp.607-612.
4. 이명재(1998). "초기평형상태를 이용한 현수교의 시공단계 해석 및 시공오차 관리", 박사학위논문, 서울대학교.
5. 김제춘, 장승필(1999). "초기부재력을 이용한 사장교의 초기형상 및 캠버량 결정", 대한토목학회논문집, 제19권, 제I-3호, pp.377-386.
6. Nazmy, A.S., Abdel-Ghaffar, A.M. (1990) "Three-Dimensional Nonlinear Static Analysis of Cable-Stayed Bridges", Computer & Structures, Vol.34, No.2, pp 257-271.

그림 13. 3차원 모델의 초기평형상태 해석 결과

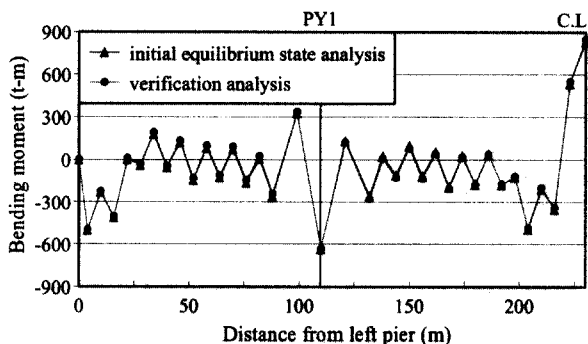


그림 14. 3차원 모델의 검증해석 결과 비교



7. 김철영, 장승필(1991). "비대칭단면 주형을 갖는 3차원 사장교의 고유진동해석", 대한토목학회논문집, 제11권, 제2호, pp.15-26.
8. 안상섭(1991). "3차원 케이블요소를 이용한 3차원 케이블망의 정적 및 동적 비선형해석", 석사학위논문, 서울대학교.
9. 정광섭 (1994). "케이블 모델링에 관한 연구 및 사장교의 매개변수 연구", 석사학위논문, 서울대학교.
10. 한국전력공사(1995). "영흥도 화력발전소 진입도로 및 교량 실시설계 구조계산서".

(접수일자 : 2001년 12월 11일)