

고정하중을 받는 다경간 현수교의 예비해석을 위한 케이블 부재의 초기평형상태 해석

최동호* · 나호성** · 권순길***

Choi, Dong-Ho*, Na, Ho-Sung**, Gwon, Sun-Gil***

Initial Equilibrium State Analysis of Cable Members for Preliminary Analysis of Multi-span Suspension Bridge under Dead Load

ABSTRACT

This paper proposes a method to determine the initial equilibrium state of cable members for preliminary analysis of multi-span suspension bridge under dead load. The proposed method is simpler and more practical than the previous methods used in other studies. The proposed method can be applied to three-span or multi-span suspension bridges. To verify the proposed method, a three-span model as well as four-span models such as New Millennium Bridge in Korea and Yingwuzhou Bridge in China are analyzed. In the verification results, the initial coordinates and tensions of the members calculated by the proposed method are in good agreement with those in the previous study for the three-span model and those in the design data of New Millennium Bridge. In addition, the proposed method gives the initial values to keep the initial configuration of Yingwuzhou Bridge.

Key words : Multi-span suspension bridge, Initial equilibrium state, Dead load, Cable tension

초록

본 연구에서는 고정하중을 받는 다경간 현수교의 예비해석을 위한 케이블 부재의 초기평형상태 해석방법을 제안한다. 본 연구에서 제안한 초기평형상태 해석 알고리즘은 타 연구들에서 사용된 기존 방법들보다 간편하고 실용적이며, 3경간 현수교 및 다경간 현수교에 적용 가능하다. 제안 방법의 타당성을 검증하기 위해, 3경간 현수교 예제모델과 4경간 현수교인 국내의 새천년대교 및 중국의 Yingwuzhou Bridge 모델을 사용하여 초기평형상태 해석을 수행하였다. 검증 결과, 본 연구에서 제안한 초기평형상태 해석방법에 의한 결과가 3경간 예제모델의 선행 연구결과 및 새천년대교의 설계값과 잘 일치하는 경향을 나타내었으며, 제안 방법은 Yingwuzhou Bridge에 대한 초기형상을 잘 유지하는 초기값들을 도출하였다.

검색어 : 다경간 현수교, 초기평형상태, 고정하중, 케이블 장력

* 중신회원 · 교신저자 · 한양대학교 건설환경공학과 교수, 공학박사 (Corresponding Author · Hanyang University · samga@hanyang.ac.kr)

** 삼성엔지니어링 토목사업부 과장, 공학박사 (Samsung Engineering · hosung1.na@samsung.com)

*** 정회원 · 한양대학교 건설환경공학과 박사과정 (Hanyang University · verysoon@hanyang.ac.kr)

Received July 31, 2013/ revised May 28, 2015/ accepted December 31, 2015

1. 서론

교량 계획에 있어, 해협 횡단 교량과 같이 해상 교각 시공이 어려운 지역에서는 현수교 및 사장교와 같은 장경간 교량이 요구되는 경우가 많다. 현재, 장대교량 설계 및 시공 분야의 선진국은 물론이고, 우리나라에서도 현수교와 사장교와 같은 전통적인 형식의 케이블 교량뿐만 아니라 다경간 현수교와 같은 발전된 형태의 케이블 교량이 계획 또는 시공 중에 있다. 다경간 현수교는 중앙부에 주경간을 2개 이상 가지는 현수교로서, 기존의 현수교와는 확연히 구별되는 구조적 거동을 가지며, 다른 새로운 형식의 케이블 교량에 비해 시공성이나 경제성 측면에서 현실성이 높아 해외 시공사례 및 국내 설계사례가 증가하고 있는 추세에 있다.

일반적인 3경간 현수교와 마찬가지로 다경간 현수교의 설계시 주요부재들을 설계하기 위해서는 고정하중 상태에서 주케이블의 새그 및 거더의 캠버와 같은 주어진 설계조건을 만족하는 초기평형상태를 결정하는 것이 선행되어야 한다. 초기평형상태를 얼마나 정확히 구현하는가는 결국 현수교의 전체적인 구조적 거동의 해석 정확도를 좌우한다. Kim and Lee (2003)의 연구결과에서는 초기 평형상태 해석결과에 따라 도입장력의 오차가 20% 정도 발생할 경우, 저차모드의 고유주기는 약 12% 정도 차이가 발생하고, 도입장력의 오차에 따라 계산된 주기의 오차는 최대 60%에 이를 수 있다는 결과를 보여준 바 있다. 이처럼 현수교의 정확한 해석과 효율적인 설계를 위해서는 정확한 초기평형상태에 대한 해석 방법이 필요하다.

현수교의 초기평형상태 해석 방법으로는 시산법(Trial & Error), 초기부재력법, 그리고, Target Configuration Under Dead load (이하 TCUD) 해석법 등이 있다.

시산법은 방법의 특성상 케이블 장력을 알기 위해 많은 시간과 노력이 필요한 점에 비해 정확한 초기평형상태를 구현하기 어려운 단점이 있다(Karoumi, 1999).

초기부재력법은 초기장력이 도입되지 않은 상태에서의 케이블을 포함한 비선형해석에서 얻어진 내력을 초기장력으로 도입하고, 그 후 단계부터는 전 단계 비선형 해석을 통하여 얻어지는 부재력을 초기부재력으로 도입하여 비선형 해석을 반복한다. 이때, 원하는 초기형상을 만족하면 반복해석을 종료하는 해석방법이다. 초기부재력법은 다양한 연구자들에 의해 연구되었는데, 최초로 Wang et al. (1993)은 초기부재력법을 이용하여 케이블 구조물의 초기형상을 결정하였다. 이때 케이블의 장력은 Emst의 등가트러스요소를 사용하여 보정하였다. 이후 Kim and Chang (1999)은 탄성현수선 케이블요소와 박벽보-기둥요소를 사용하여 모델링하고 실제에 가까운 초기 장력값을 구하여 케이블 구조물의 초기형상을 결정하는 개선된 초기부재력법을 개발하였다. Kim (1993) and Lee (1998)

는 탄성현수선 케이블요소를 이용한 초기부재력법을 개발하여 자정식 현수교의 초기평형상태 해석을 수행하였다. 그러나, 초기부재력법을 이용한 해석법은 초기에 도입하는 장력크기에 민감하므로 주의가 요구된다.

TCUD 해석법은 초기부재력 방법과는 달리, 케이블의 무응력길이를 변수로 추가하고 그 개수에 해당하는 절점변위를 구속하여 초기형상해석을 수행하는 방법이다(Kim and Lee, 2001; Cho et al., 2006). TCUD 해석법은 거더의 수직처짐과 주탑상부의 수평변위를 제어할 수 있으며, 수렴속도가 빠르고 초기 장력크기에 민감하지 않지만 거더와 주탑의 압축력으로 인한 변위를 제어할 수 없다. 이후, Kim et al. (2003)은 TCUD해석법과 초기부재력법을 효과적으로 결합시킨 개선된 TCUD 해석법을 제시하기도 하였다. 또한 최근에는 Chen et al. (2013)이 최적화법을 이용하여 현수교의 가설단계에서의 평형상태해석을 수행하였고, Lonetti and Pascuzzo (2014)는 최적화법을 이용하여 사장현수교에서의 초기평형상태해석을 수행한 바 있다.

그러나, 현수교의 초기형상해석과 관련된 기존의 많은 연구에서는 그 방법에 따라서는 비선형 해석시 수렴성이 문제가 되거나, 실제 현수교 설계에 적용하는 과정이 복잡하다. 또한 3경간 현수교의 경우 MIDAS 등과 같은 전용 해석프로그램으로 초기평형상태해석이 가능하지만, 다경간 현수교와 같이 설계 사례가 많지 않은 구조체에 대한 초기평형상태해석을 위해서는 실무자가 별도의 프로 그래밍을 하는 것이 필요한 실정이다. 그리고 현수교의 초기평형상태해석을 위한 기존의 범용 구조해석 프로그램의 경우 전체 구조물의 모델링과 구조요소의 재료 및 단면 특성을 입력하는 데에 많은 시간이 소요될 뿐만 아니라, 실무에서는 경제성 및 경관적인 이유에 의해 그 구조계 및 세부 제원이 수시로 변화하므로, 복잡한 비선형해석을 통한 초기평형상태해석은 효율성이 떨어지기가 쉽다.

따라서, 본 연구에서는 고정하중을 받는 다경간 현수교의 예비해석을 위한 케이블 부재의 간편하고 실용적인 초기평형상태 해석방법을 제안한다. 본 연구에서 개발된 알고리즘은 기존의 연구결과와 비교함으로써, 정확성과 타당성을 검증하였다. 또한, 다경간 현수교의 수치예제에 대한 해석결과를 통해 개발된 알고리즘의 적용성을 검증하였다.

2. 제안방법의 원리

본 연구에서는 현수교의 초기평형상태시 주케이블 및 행어의 초기장력과 무응력장, 그리고 완성계해석의 기준이 되는 초기형상 좌표를 각 경간별로 산정함으로써, 다경간 현수교와 같이 비슷한 경간이 연속되는 케이블 교량에 대해 초기평형상태 해석을 손쉽게 할 수 있는 방법을 제안하였다.

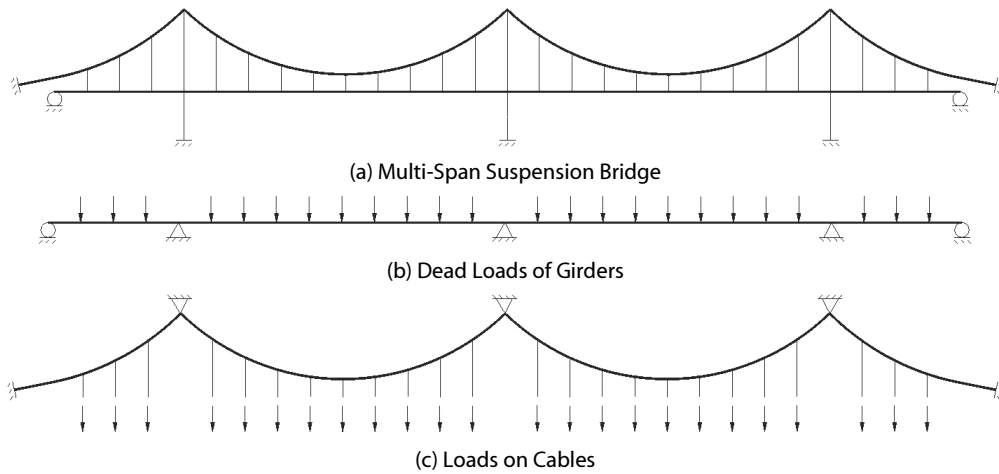


Fig. 1. Principle of Initial Equilibrium State Analysis

현수교의 초기평형상태해석에서 주어지는 기하학적 제한조건은 행어와 주탑의 수평방향 위치와 거더의 종단선형, 주케이블 정착점 위치, 그리고 주경간의 새그이다. 초기평형상태해석으로부터, 케이블 부재의 무응력장과 행어에 연결된 주케이블의 연직좌표를 결정할 수 있다.

행어에 재하되는 외부하중은 거더의 자중으로, Fig. 1(a)의 다경간 현수교에서의 거더 자중만을 나타내면 Fig. 1(b)와 같다. 이러한 거더 자중을 Fig. 1(c)와 같이 행어의 끝에 재하되는 하중으로 치환하고, Fig. 1(c)와 같이 탑정부에 지점조건을 도입하여, 전체 현수교 구조를 케이블 구조로만 고려하여 초기평형상태 해석을 수행하게 된다. 본 연구에서는 케이블 부재의 초기평형상태를 결정하는 방법을 제안하므로, 이러한 탑정부 지점조건을 도입하여 초기평형상태에서의 주탑의 연직변위는 무시하였다. 또한 간편하고 실용적인 해석을 위하여 케이블의 기하비선형 효과는 무시하였다. 케이블을 단순 트러스요소로 고려하였을 경우와 현수선요소로 고려하였을 경우의 실제 계산된 연직좌표의 차이는 매우 미소하므로 (Kim et al., 2002), 본 연구에서는 상세해석이 아닌 예비해석을 위한 해석시에는 케이블의 기하비선형 효과를 무시하여도 충분하다고 판단하였다. 더불어, 기존의 초기평형상태해석법에서와 같이 Newton-Raphson 법 등의 복잡한 비선형 풀이법을 사용하지 않고, 간편하고 실용적으로 사용될 수 있는 단순하고 반복적인 좌표수정 방법을 제시하였다.

3. 초기평형상태 해석의 알고리즘

3.1 주경간의 초기평형상태 해석

주경간의 초기평형상태 해석은 크게 여섯 단계로 나눌 수 있으며, 해석절차는 다음과 같다.

3.1.1 수평장력값의 가정

주케이블에는 등분포 하중과 집중하중이 불규칙하게 작용하고 있어 그 형상이 포물선도 현수선도 아니게 되므로, 수식에 의해 정확한 수평장력을 얻기가 어렵다. 따라서, 주케이블 수평장력에 대한 근사값을 대입하여 초기평형상태를 구하고 이때 새그점에서의 좌표값이 목표로 하는 새그값을 만족할 때까지 반복계산하여 최종 수평장력을 구한다.

본 연구에서, 수평장력의 초기 가정값의 하한치 H_L 은, 주케이블에 거더의 자중이 등분포로 작용한다고 가정하여, 목표 새그값 f , 경간장 l 및 거더의 단위길이당 자중 γ_G 로부터 산출한 Eq. (1)의 H_0 를 사용하고, 초기 가정값의 상한치 H_U 는 이 값의 3배로 설정하였다. 수평장력의 최초 가정값은 Eq. (2)와 같이 Eq. (1)에서 가정된 하한치 H_0 와 상한치 $3H_0$ 의 중간값으로하여 초기평형상태 해석을 수행하였다.

$$H_0 = \frac{\gamma_G l^2}{8f} \quad (1)$$

$$H_x = \frac{(H_U + H_L)}{2} \quad (2)$$

3.1.2 초기좌표값의 가정

초기평형상태 해석시 최초의 주케이블 좌표는 설계시에 주어지는 B, C, D 점을 연결하는 Fig. 2와 같은 포물선 형상으로 가정하였다. 최초의 케이블 좌표는 직선 또는 임의의 좌표로 가정이 가능하나, 초기에 가정된 좌표값은 반복계산 횟수에 영향을 미치므로 포물선 형상을 가지는 케이블 좌표로 가정하였다.

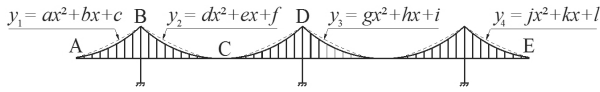


Fig. 2. Initial Ordinate of the Main Cable

3.1.3 행어 장력, 무응력장, 자중 산출

주케이블과 행어가 만나는 점에서의 불평형력을 산출하기 위해서는 행어의 장력, 무응력장, 자중이 계산되어야 한다. 케이블의 임의의 절점 i 에 작용하는 행어에 의한 아래방향 하중은 거더의 자중, 소켓 및 기타 부속물의 자중과 행어의 자중을 포함하며, Eq. (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_{HA}(i) = w_G(i) + w_S(i) + w_{HA}(i) \quad (3)$$

여기서, w_G 는 거더의 자중, w_S 는 소켓 및 기타 부속물의 자중, w_{HA} 는 행어의 자중이다. 거더의 자중은, 해당 행어에서 양쪽 인접 행어까지의 거리의 합의 절반만큼을 해당 행어가 담당하는 거더의 자중으로 고려함으로써 계산된다. 그리고 행어의 자중은 행어의 무응력장을 이용하여 계산하여야 하며, Eq. (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$w_{HA}(i) = \gamma_{HA} L_{0HA}(i) \quad (4)$$

여기서, γ_{HA} 는 행어의 단위길이당 중량이고, L_{0HA} 는 Eq. (5)와 같이 행어의 응력변형을 관계에 의해 결정된 행어의 무응력장이다.

$$L_{0HA}(i) = \frac{L_{HA}(i)}{1 + \frac{T_{HA}(i)}{E_{HA}A_{HA}}} \quad (5)$$

여기서, E_{HA} 는 행어의 탄성계수이고, A_{HA} 는 행어의 단면적이며, L_{HA} 는 행어의 자중, 거더의 자중 및 행어에 작용하는 기타 고정하중에 의해 늘어난 행어의 길이이다. Eqs. (3) and (4)를 이용하여 Eq. (5)를 정리하면, Eq. (6)과 같이 행어의 무응력장에 대한 2차 함수식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\gamma_{HA}}{E_{HA}A_{HA}} L_{0HA}(i)^2 + \left(1 + \frac{w_G(i) + w_S(i)}{E_{HA}A_{HA}}\right) L_{0HA}(i) - L_{HA}(i) = 0 \quad (6)$$

이때, Eq. (6)의 양의 근이 행어의 무응력장이 되며, 이 무응력장을 Eq. (4)에 대입하면 행어의 자중을 계산할 수 있고, 계산된 자중값을 Eq. (3)에 대입하면 주케이블과 행어가 만나는 점에서의

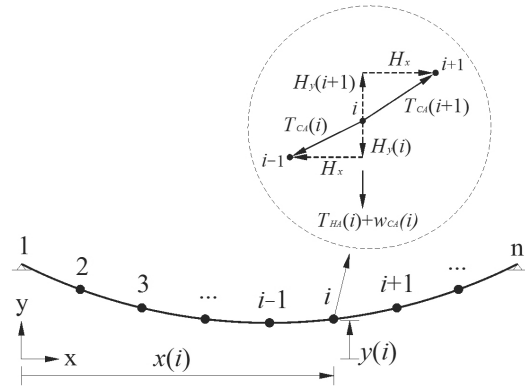


Fig. 3. Loads on Each Node of the Main Cable

거더의 자중, 소켓 및 기타 고정하중, 행어의 자중에 의해 작용하는 연직방향 하중을 산정할 수 있다.

3.1.4 주케이블의 장력, 무응력장, 자중 산출

주케이블의 장력, 무응력장, 자중 산출에 사용되는 주케이블의 임의의 절점에서 하중 작용상태를 나타내면 Fig. 3와 같다.

3.1.1과 3.1.2 단계에서 각각 가정된 주케이블의 수평장력과 좌표로부터, 주케이블의 임의의 절점 i 에서의 주케이블 장력의 연직성분은 Eq. (7)과 같이 계산할 수 있다.

$$H_y(i) = H_x \left[\frac{y(i) - y(i-1)}{x(i) - x(i-1)} \right] \quad (7)$$

여기서, $x(i)$ 와 $y(i)$ 는 각각 주케이블의 임의의 절점 i 에서의 수평 및 연직 좌표이다. 이때, 주케이블 i 번째 부재의 장력 T_{CA} 는 Eq. (8)로부터 계산할 수 있다.

$$T_{CA}(i) = \sqrt{H_x^2 + H_y^2} \quad (8)$$

또한, 주케이블 i 번째 부재의 길이 L_{CA} 는 Eq. (9)로부터 계산할 수 있다.

$$L_{CA}(i) = \sqrt{[x(i) - x(i-1)]^2 + [y(i) - y(i-1)]^2} \quad (9)$$

Eqs. (8) and (9)을 사용하여 주케이블의 무응력장 L_{0CA} 는 Eq. (10)으로부터 계산할 수 있다.

$$L_{0CA}(i) = \frac{L_{CA}(i)}{1 + \frac{T_{CA}(i)}{E_{CA}A_{CA}}} \quad (10)$$

여기서, E_{CA} 는 주케이블의 탄성계수, A_{CA} 는 주케이블의 단면적이다. Eq. (10)의 주케이블 무응력장에 주케이블 단위중량을 곱하여, Eq. (11)과 같이 주케이블의 i 번째 절점에 작용하는 주케이블의 i 번째 및 $i+1$ 번째 부재의 자중을 산정할 수 있다.

$$w_{CA}(i) = \frac{1}{2} \gamma_{CA} (L_{0CA}(i) + L_{0CA}(i+1)) \quad (11)$$

여기서, γ_{CA} 는 주케이블의 단위길이당 중량이다.

3.1.5 주케이블 각 절점에서의 불평형력 산출 및 좌표수정

주케이블의 각 절점에서의 불평형력은 Fig. 3에서 보는 바와 같이 연직방향으로 작용하는 하중의 합으로서, Eq. (12)로 결정할 수 있다.

$$F_{unb}(i) = T_{HA}(i) + w_{CA}(i) + H_y(i) - H_y(i+1) \quad (12)$$

Eq. (7)의 관계를 이용하면, Eq. (12)는 Eq. (13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_{unb}(i) = T_{HA}(i) + w_{CA}(i) + H_x \left[\left[\frac{y(i) - y(i-1)}{x(i) - x(i-1)} \right] - \left[\frac{y(i+1) - y(i)}{x(i+1) - x(i)} \right] \right] \quad (13)$$

3.1.1과 3.1.2 단계에서 각각 가정된 주케이블 수평장력과 좌표로부터 각 절점별 불평형력을 Eq. (13)과 같이 계산하여, 그 값들의 누승합계가 일정범위 안에 들어오지 않는다면, 아래와 같이 각 절점별 좌표를 좌측에서부터 수정한다. Eq. (12)를 임의의 절점 i 에서의 연직 좌표에 대하여 정리하면 Eq. (14)와 같이 나타낼 수 있다.

$$y(i) = \frac{BC}{A} \{F_{unb} - T_{HA}(i) - w_{CA}(i)\} \frac{1}{H_x} + \frac{B}{A} y(i-1) + \frac{C}{A} y(i+1) \quad (14)$$

여기서 $A = x(i+1) - x(i-1)$, $B = x(i+1) - x(i)$, $C = x(i) - x(i-1)$ 이다. Eq. (14)에서의 i 절점의 연직 좌표값 $y(i)$ 은, 인근 절점의 연직 좌표값 $y(i-1)$ 과 $y(i+1)$ 을 고정하여 계산된다.

3.1.6 주케이블 좌표 기준값 검토 및 수평장력 가정치 보정

3.1.1~3.1.5의 단계를 거치게 되면 3.1.1단계에서 가정한 수평장력이 주케이블에 작용할 때의 초기평형상태의 연직 좌표값을 얻게

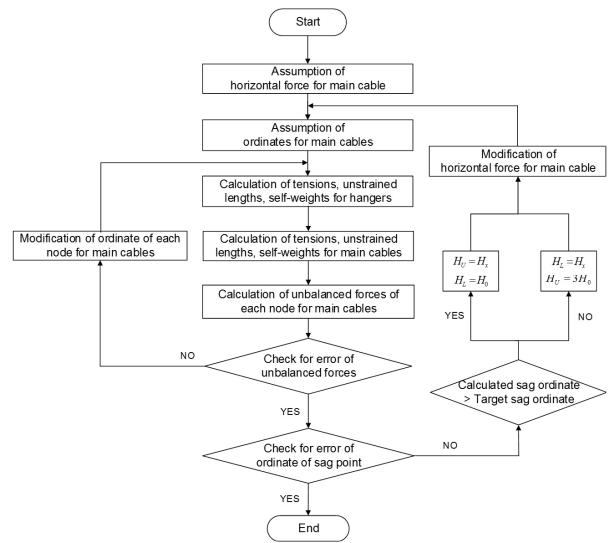


Fig. 4. Analysis Procedure for the Main Span

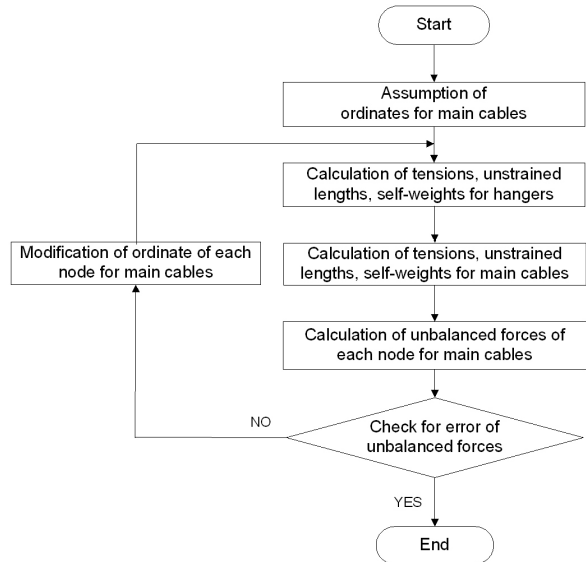


Fig. 5. Analysis Procedure for the Side Span

된다. 이때 주케이블 중앙부에서의 연직 좌표값이 교량 설계시에 목표로 하는 새그점의 좌표값과 일치하여야 한다. 산정된 중앙부 연직 좌표값이 목표 새그 좌표값보다 클 경우에는 3.1.1단계에서 가정한 수평장력값이 큰 경우이므로 $H_U = H_x$ 로 변경하고, 중앙부 연직 좌표값이 목표 새그 좌표값 보다 작을 경우에는 3.1.1단계에서 가정한 수평장력값이 작은 경우이므로 $H_L = H_x$ 로 변경하여, 수정된 하한치와 상한치로부터 Eq. (2)를 이용하여 수평장력을 다시 가정한 후 3.1.3에서 3.1.5단계를 반복한다. 본 연구에서는 해석시간과 설계오차 허용치를 고려하여 새그 오차의 한계를 $10^{-5}m$ ($0.01mm$)이내가 되도록 설정하였다.

Fig. 4는 앞서 설명한 주경간에 대한 초기평형상태 해석단계 3.1.1~3.1.6을 순서도로 나타낸 것이다.

3.2 측경간의 초기평형상태 해석

측경간 해석의 경우, 탑정부에서 주케이블 장력의 수평성분은 평형을 이루어야 하므로, 주경간 해석에서 최종 산정된 수평장력을 측경간의 주케이블 수평장력으로 사용할 수 있다. 따라서, 측경간에서는 주경간에서의 해석단계 중 3.1.6단계를 제외한 3.1.2~3.1.5단계의 반복수행으로 초기평형상태 해석을 수행한다. Fig. 5는 측경간의 초기평형상태 해석 순서도이다.

4. 제안방법의 검증

4.1 예제 수치모델(3경간 현수교)

본 연구에서 제안한 초기평형상태 해석방법의 검증을 위하여, Kim and Kim (2010)의 논문에서 사용된 예제(Fig. 6)를 사용하여 기존의 초기형상해석 방법과 비교하였다. Fig. 6에 나타난 현수교는 타정식 현수교로서, 주경간의 길이는 404m, 측경간의 길이는 128m, 주경간의 새그는 33.3m이며, 주경간에는 31개의 행어, 측경간에는 9개의 행어가 각각 배치되어 있다. 예제 현수교 모델의 부재별 제원을 Table 1에 나타내었다.

Tables 2~4와 Fig. 7은 3경간 현수교 예제 모델에 대한 기존 연구의 해석결과와 본 연구의 해석결과를 비교하고 있다. 기존 연구의 해석결과와의 오차가, 연직좌표는 약 0.85%, 주케이블의 수평장력은 0.027%, 주케이블의 무응력장은 0.001%로, 거의 일치하는 경향을 나타내었다.

Table 1. Model Properties for 3 Spans (Kim and Kim, 2010)

Member	E (GPa)	A (m ²)	I (m ⁴)	γ (kN/m)
Main cable	196.20	0.0836	-	6.780
Hanger	127.53	0.0836	-	0.162
Girder	206.01	0.2204	0.1316	41.539

Table 2. Ordinate Results of the Main Cables

Node Number	Ordinate(m)		Difference (%)
	This study	Kim and Kim (2010)	
1(Starting)	0.0000	0.0000	-
2	2.6416	2.6192	0.000
3	5.5505	5.5365	0.847
4	8.7273	8.7134	0.253
5	12.1721	12.1606	0.159
6	15.8856	15.8758	0.095
7	19.8682	19.8603	0.062
8	24.1204	24.1144	0.040
9	28.6427	28.6386	0.025
10	33.4357	33.4334	0.014
11(Top)	38.5000	38.5000	0.007
12	34.4580	34.4583	0.000
13	30.6791	30.6793	0.001
14	27.1630	27.1631	0.000
15	23.9090	23.9092	0.000
16	20.9170	20.9171	0.001
17	18.1863	18.1864	0.001
18	15.7168	15.7169	0.000
19	13.5080	13.5081	0.000
20	11.5598	11.5599	0.000
21	9.8719	9.8719	0.000
22	8.4439	8.4440	0.000
23	7.2759	7.2760	0.001
24	6.3676	6.3676	0.001
25	5.7189	5.7189	0.000
26	5.3297	5.3297	0.001
27(sag point)	5.2000	5.2000	0.000

Table 3. Horizontal Force of the Main Cables (Unit : MN)

This study	Kim and Kim (2010)	Difference (%)
29.717	29.725	0.027

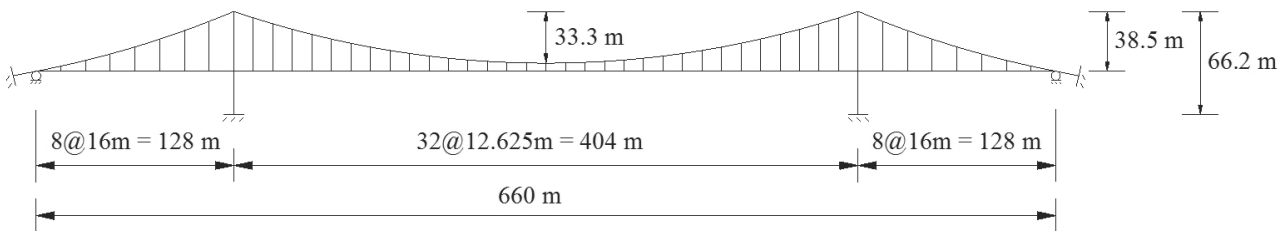


Fig. 6. Example Model for 3 Spans (Kim and Kim, 2010)

Table 4. Unstrained Length of the Main Cables (Unit : m)

	This study	Kim and Kim (2010)	Relative difference (%)
Side span	133.6163	133.6177	0.001
Main span	410.448	410.4479	0.000

Table 5. Model Properties for New Millenium Bridge (ENVICO, 2009)

Member	E (GPa)	A (m ²)	I (m ⁴)	γ (kN/m)
Main cable	200	0.1160	-	8.9320
Hanger	140	0.0062	-	0.5146
Girder	210	0.5966	0.4879	46.5348

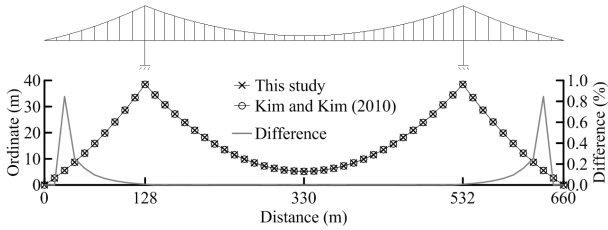


Fig. 7. Ordinates of The Main Cables for 3-Span Model

4.2 다경간 현수교

본 연구에서 제안한 현수교의 초기평형상태 해석방법은 주경간의 초기평형상태 해석을 먼저 수행한 후 그 해석결과에서 얻은 수평장력을 이용하여 측경간의 초기평형상태 해석을 수행함으로써 전체구조계의 초기평형상태를 결정하므로, 다경간 현수교와 같이

주경간이 연속적으로 배치되는 경우에도 적용이 가능하다. 본 연구에서 제안한 초기평형상태 해석방법의 검증을 위하여, 4경간 현수교인 대한민국의 새천년대교와 중국의 Yingwuzhou Bridge 모델을 이용하였다.

Fig. 8는 현재 국내에서 다경간 현수교로서 최초로 설계/시공 중인 신안군 압해도-압태도를 연결하는 새천년대교를 나타내며, 주경간장 650m, 측경간장 225m의 4경간 현수교로 총연장은 1,750m이다(ENVICO, 2009). 주경간의 새그는 81m, 측경간의 새그는 9.9m이며, 주탑 총 높이는 145.45m이다. Table 5에는 각 부재별 재원을 나타내었다. 본 연구에서 제안한 방법을 이용하여 계산된 주케이블의 초기 연직좌표 및 초기장력과 행어의 초기장력을 설계값과 비교하여 Fig. 9에 나타내었다. 비교검토 결과, 새천년

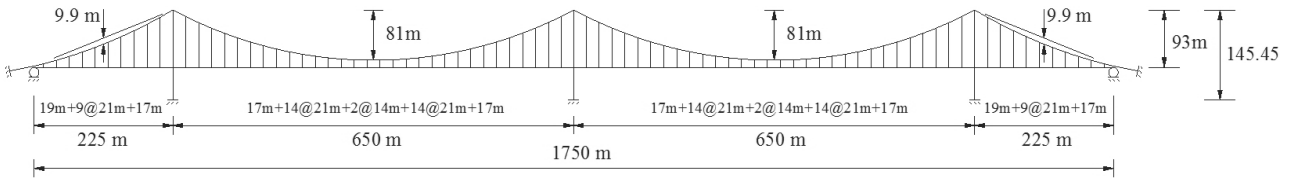


Fig. 8. New Millenium Bridge (ENVICO, 2009)

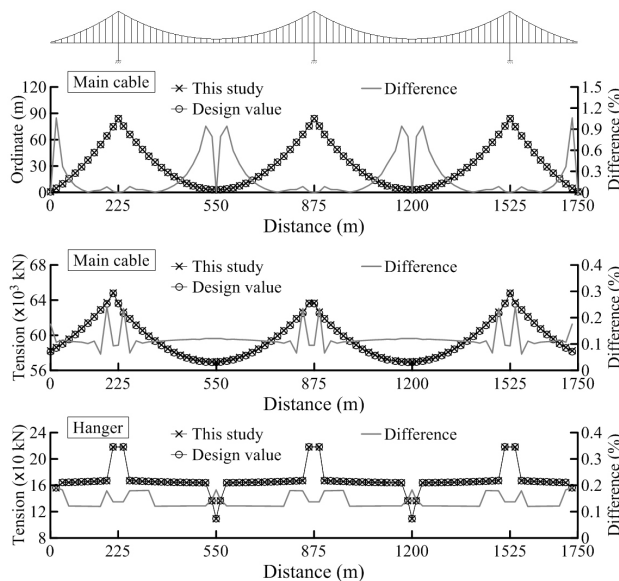


Fig. 9. Ordinates, Tensions of the Main Cables and Tensions of The Hangers for New Millenium Bridge

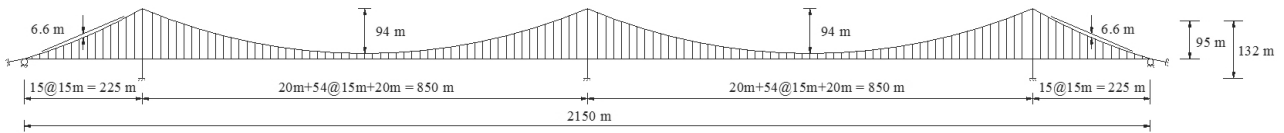


Fig. 10. Yingwuzhou Bridge (Chen et al., 2013)

Table 6. Model Properties for Yingwuzhou Bridge (Chen et al., 2013)

Member	E (GPa)	A (m ²)	I (m ⁴)	γ (kN/m)
Main cable	200	2.1020	-	161.8540
Hanger	140	0.0200	-	1.6600
Girder	210	1.5630	2.091	121.9140

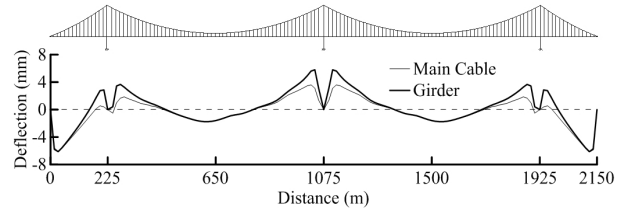


Fig. 12. Deflections of the Main Cable and The Girder for Yingwuzhou Bridge

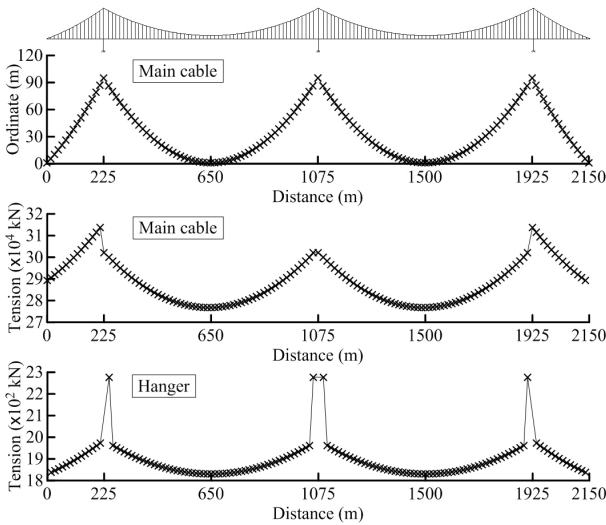


Fig. 11. Ordinates, Tensions of the Main Cables and Tensions of the Hangers for Yingwuzhou Bridge

대교의 설계값과 본 연구에서 수행한 해석결과값이 주케이블의 연직좌표 값은 최대 1%, 주케이블의 장력은 최대 0.24%, 행어의 장력은 최대 0.2%의 오차를 나타내며, 거의 일치함을 알 수 있다.

Fig. 10은 중국 양쯔강에 건설된 Yingwuzhou Bridge를 나타내며, 주경간장 850m, 측경간장 225m의 4경간 현수교로 총연장은 2,150m이다(Chen et al., 2013). 주경간의 새그는 94m, 측경간의 새그는 6.6m이며, 주탑 총 높이는 132m이다. Table 6에는 각 부재별 제원을 나타내었다. 본 연구에서 제안한 방법을 이용하여 계산된 주케이블의 초기 연직좌표 및 초기장력과 행어의 초기장력을 Fig. 11에 나타내었다. 또한, 계산된 초기값들이 적용된 유한요소 모델에서의 주케이블과 거더의 초기 연직변위를 Fig. 12에 나타내었다. Fig. 12에 나타난 바와 같이, 초기연직변위는 최대 6mm로, 이는 제안된 방법에 의해 계산된 초기값들이 Yingwuzhou Bridge의 초기형상을 잘 유지할 수 있음을 의미한다.

케이블 부재는 길이가 증가할수록 새그도 증가하여 기하학적 비선형성이 커지게 되지만, 일반적인 현수교의 행어케이블의 간격이 15~25m 정도이며 인접 행어 사이의 주케이블 수평길이도 이와 같다는 점을 감안한다면, 다양한 현수교에서의 인접 행어 사이의 주케이블의 비선형성은 크게 다르지 않을 것으로 판단된다. 본 논문에서는 케이블의 비선형성을 고려하지 않는 트러스요소를 사용하여 12.6 m (3경간 예제모델), 15 m (Yingwuzhou Bridge), 21 m (새천년대교)의 행어 간격을 가지는 세 모델에 대하여 합리적인 결과를 얻었으므로, 다른 현수교 모델에 적용하여도 본 연구에서 제시한 방법이 예비해석시 충분히 합리적인 결과를 보여줄 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 다경간 현수교의 예비해석을 위한 케이블 부재의 초기평형상태 해석을 효율적으로 수행할 수 있는 방법을 제안하였다. 3경간 현수교 예제모델과 4경간 현수교인 국내의 새천년대교 및 중국의 Yingwuzhou Bridge 모델에 대한 초기평형상태 해석을 수행하였고, 본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 기존의 상용프로그램을 이용한 초기평형상태 해석 방법은 복잡한 비선형 해석을 수행하여야하는 번거로움이 존재하나 본 연구의 제안방법은 범용 프로그래밍 언어나 스프레드시트를 이용하여 간편하게 해석할 수 있다.
- (2) 본 연구에서 제안한 초기평형상태 해석방법은 현수교의 주경간의 초기평형상태 해석을 먼저 수행한 후 이 결과를 이용하여 측경간의 초기평형상태해석을 수행하므로, 여러 개의 반복되는 주경간을 가지는 다경간 현수교의 초기평형상태 해석에도 적용

가능한 방법이다.

- (3) 3경간 현수교에 대한 기존 연구와 제안방법의 비교결과, 초기 형상 좌표값은 약 0.85%, 주케이블의 수평장력은 0.027%, 주케이블의 무응력장은 0.001%로 기존 연구결과와도 잘 일치하는 경향을 나타내었다.
- (4) 현재 국내에서 시공 중인 4경간 현수교인 새천년대교의 설계시 초기평형상태 해석결과와 비교하였을 때, 주케이블의 초기형상 좌표값은 최대 1%, 주케이블의 장력은 최대 0.24%, 행어의 장력은 최대 0.2% 이내로 잘 일치하는 경향을 나타내었다.
- (5) 중국의 Yingwuzhou Bridge 모델에 대한 초기평형상태 해석 결과, 계산된 초기값들이 적용된 유한요소 모델에서의 주케이블과 거더의 초기연직변위는 최대 6mm로, 이는 제안된 방법에 의해 계산된 초기값들이 초기형상을 잘 유지할 수 있음을 의미한다.
- (6) 결론적으로 본 연구에서 제안한 방법은 실무활용도가 높은 현수교의 초기평형상태 해석방법으로서, 손쉽고 정확하며, 효율적으로 초기형상 좌표 및 초기장력을 결정할 수 있고, 각 경간을 분리하여 해석함으로써, 다경간 현수교에도 적용가능한 해석방법이다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단을 통하여 지원된 교육부 이공학개인지 초연구지원사업(NRF-2015R1D1A1A09060113)에 의하여 수행되었습니다. 연구 지원에 감사드립니다.

References

- Chen, Z., Cao, H., Ye, K., Zhu, H. and Li, S. (2014). "Improved particle swarm optimization-based form finding method for suspension bridge installation analysis." *Journal of Computing in Civil Engineering*, ASCE, Vol. 29, No. 3, pp. 1-13.
- Cho, K. S., Kim, J. H. and Ahn, N. K. (2006). "Development of a suspension bridge analysis program using TCUD." *Proceeding of Conference of Korean Society of Steel Construction*, pp. 268-274 (in Korean).
- ENVICO Consultant Co., Ltd. (2009). *The design report of the New Millennium Bridge* (in Korean).
- Karoumi, R. (1999). "Some modeling aspects in the nonlinear finite element analysis of cable supported bridges." *Computers & Structures*, Vol. 71, pp. 397-412.
- Kim, H. K. and Lee, J. H. (2003). "Effects of initial tension on seismic response for a suspension bridge." *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 24, No. 3A, pp. 533-539 (in Korean).
- Kim, H. K., Lee, M. J. and Chang, S. P. (2002). "Non-linear shape finding analysis of a self-anchored suspension bridge." *Engineering Structures*, Vol. 24, pp. 1547-1559.
- Kim, J. C. and Chang, S. P. (1999). "Determination of initial shape and fabrication camber for cable-stayed bridges using initial member force." *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 19, No. 1-3, pp. 377-386 (in Korean).
- Kim, K. S. and Lee, H. S. (2001). "Analysis of target configurations under dead loads for cable-supported bridges." *Computers & Structures*, Vol. 79, pp. 2681-2692.
- Kim, M. Y., Kyung, Y. S. and Lee, J. S. (2003). "An improved method for initial shape analysis of suspension bridges." *Journal of Korean Society of Steel Construction*, Vol. 15, No. 2, pp. 219-229 (in Korean).
- Kim, H. K. (1993). *Three Dimensional Analyses of Suspension Bridges Considering Construction Stages*, Ph.D. Dissertation, Seoul National University (in Korean).
- Kim, M. and Kim, M. Y. (2010). "Initial shape analysis of suspension bridge system under dead load." *Journal of Korean Society of Steel Construction*, Vol. 22, No. 6, pp. 511-521 (in Korean).
- Lee, M. J. (1998). *Construction Stage Analysis and Error Control of Suspension Bridges on the Basis of Initial Equilibrium State*, Ph.D. Dissertation, Seoul National University (in Korean).
- Lonetti, P. and Pascuzzo, A. (2014). "Optimum design analysis of hybrid cable-stayed suspension bridges." *Advanced in Engineering Software*, Vol. 73, pp. 56-66.
- Wang, P. H., Tseng, T. C. and Yang, C. G. (1993). "Initial shape of cable stayed bridge." *Computers & Structures*, Vol. 47, No. 1, pp. 111-123.