

현수교 시스템의 초기형상 결정을 위한 개선된 초기부재력법

An Improved Initial Force Method

for Determining the Initial Configuration of Suspension Bridges

김 민¹⁾ · 김 호 경²⁾ · 김 문 영³⁾
Kim, Min Kim, Ho Kyung Kim, Moon Young

요약 : 현수교의 초기평형상태를 결정하기 위한 개선된 초기부재력법을 제시한다. 먼저 현수교의 주케이블과 행어가 만나는 절점에서 힘의 평형조건을 이용하여 초기평형상태를 결정한 뒤, 이 때 계산된 주 케이블의 절점좌표와 각 케이블 부재의 무응력장을 입력 값으로 하여 초기부재력을 도입한 비선형 해석을 수행하였다. 일반적인 초기부재력법의 경우 각 단계에서 계산된 부재력을 통하여 케이블의 무응력장을 재산정하지만, 본 연구에서는 각 케이블 부재의 무응력장을 매 계산 단계에서 고정된 값으로 취한다. 2차원 및 3차원 현수교 모델에 공통적으로 적용할 수 있다. 수치예제 결과 값의 비교를 통하여 연구의 타당성을 검증하였다.

ABSTRACT : This paper presents an improved initial force method for determining the initial shape of suspension bridges. After determining the initial shape factors through the force equilibrium conditions of each hanging point, the initial force method was applied with the computed values, each node's coordinates, and unstrained lengths of the cable element as inputs. The unstrained length of each cable element was regarded as a fixed value in each iteration step, unlike in the typical initial force method. This method can be applied to 2D and 3D suspension bridge models. The validity of the present method was demonstrated by comparing the results of the numerical examples.

핵심 용어 : 현수교, 초기형상해석, 재료변위법, 유한요소 해석, 기하학적 비선형해석

KEYWORDS : suspension bridge, initial shape analysis, zero displacement method, FEM, geometric nonlinear analysis

1. 서론

현수교는 지간이 매우 큰 경우에 적합한 교량으로서 케이블의 이점을 충분히 활용하고 있으며, 구조물의 외관이 아름다워 그 지역을 대표하는 구조물이 되고 있다. 하지만, 현수교의 설계와 시공에 있어서는 케이블 구조물만의 유연한 거동 특성 그리고 주탑과 자정식 현수교의 보강거더에 발생하는 큰 압축력 등의 기하학적 비선형 특성 때문에 정밀한 구조해석에 어려움이 존재한다.

고정하중에 활하중을 추가한 해석 혹은 현수교의 시공단계 해석을 위해 가장 먼저 수행하는 것이 고정하중에 의한 교량의 초기형상 결정이다. 여기서 초기형상의 결정이라 함은 완

성된 구조계에서 고정하중에 의해 발생하는 주형 및 주탑의 휨모멘트와 변위를 최소화하면서 고정하중과 평형을 이룰 수 있는 케이블의 장력과 무응력길이를 결정하는 것을 말한다.

현재까지 개발된 초기형상결정법으로는 시산법(Karoumi, 1999), 초기부재력을 도입한 비선형해석법(김호경, 1993; 이명재, 1998;), Target Configuration under Dead load(이하 TCUD)해석법(Kim과 Lee, 2001), 그리고 TCUD 해석법과 초기부재력법을 효과적으로 결합시킨 개선된 TCUD 해석법(김문영 등, 2003; 조경식 등, 2006) 등이 있다. 특히, Kim 등(2002)에 의해 탄성현수선 케이블요소를 이용하여 개발된 초기부재력법은 자정식 현수교의 초기평형상태해석에 적용되기도 하였다. 최근에 김민 등(2010)은 Kim 등(2002)의 절점 평형법을 보완한 주케이블 및 행

1) 성균관대학교 초고층·장대교량학과, 석사과정(kimo1599@naver.com)
2) 서울대학교 건설환경공학부, 부교수(hokyungk@snu.ac.kr)
3) 교신저자. 성균관대학교 초고층·장대교량학과, 정교수
(Tel: 031-290-7514, Fax: 031-290-7549, E-mail: kmye@skku.edu)

본 논문에 대한 토의를 2011년 10월 31일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

어의 초기형상결정법에서 행어의 장력과 무응력길이를 구하는 방법을 제시하였다.

본 연구에서는, 김민 등(2010)의 계산법에 근거하여 개선된 초기부재력법을 제시하고자 한다. 즉, 고정하중 하에서 행어와 만나는 보강거더 정착부의 영변위법과 현수교 주탑의 케이블 정착부 및 주 케이블과 행어가 만나는 절점에서 힘의 평형조건을 이용하여 케이블장력 및 초기형상 그리고 케이블 부재의 무응력길이를 결정한 후, 이 결과를 초기부재력법에 적용하였다. 즉, 역학적인 발상에 기초를 둔 간단한 수치해법으로 정밀도 있는 초기형상을 결정하고 그때의 주케이블의 좌표 및 무응력 길이 등을 초기부재력법의 초기입력 값으로 적용하여 해석을 수행하였다. 수치예제의 해석결과 비교를 통하여 해석 알고리즘의 타당성과 정확성을 검증한다.

2. 기하학적 비선형 해석을 위한 3차원 탄성 현수선 케이블 및 프레임 요소

본 절에서는 현수교 시스템의 기하비선형해석을 수행하는데 필요한 탄성현수선 케이블요소(안상섭, 1991; 김문영 등 1998)와 프레임요소(김문영, 1993)를 간략히 요약한다.

2.1 탄성현수선 케이블요소

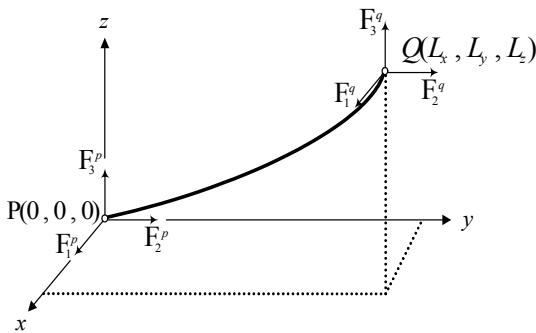


그림 1. 자중을 고려한 탄성현수선 케이블요소

그림 1은 전체좌표계 x, y, z 에서 무응력길이가 L_0 인 케이블이 자중 w 을 받아 평형을 이루는 케이블요소를 나타낸 것이다. Irvine(1981)은 탄성현수선 케이블의 신장을 고려한 엄밀한 해를 처음 유도하였고, 이것을 3차원으로 일반화시킨 적합방정식(안상섭, 1991)은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} L_x &= -\frac{F_1^p}{EA}L_0 + \frac{F_1^q}{w} \{ \ln(F_3^p - wL_0 + T_b) - \ln(F_3^p + T_a) \} \\ L_y &= -\frac{F_2^p}{EA}L_0 + \frac{F_2^q}{w} \{ \ln(F_3^p - wL_0 + T_b) - \ln(F_3^p + T_a) \} \\ L_z &= -\frac{F_3^p}{EA}L_0 + \frac{wL_0^2}{2EA} + \frac{1}{w}(T_b - T_a) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, $EA =$ 축강성; $T_a = \sqrt{(F_1^p)^2 + (F_2^p)^2 + (F_3^p)^2}$;

$$T_b = \sqrt{(F_1^q)^2 + (F_2^q)^2 + (F_3^q - wL_0)^2} \quad (2)$$

식 (1)은 케이블요소의 두 절점의 상대적인 위치 즉, L_x, L_y, L_z 이 결정되면 무응력길이 L_0 가 주어지는 경우에 Newton 반복법으로 F_1^p, F_2^p, F_3^p 를 구할 수 있다. 이제 케이블의 접선강도행렬을 얻기 위하여 식 (1)을 증분식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} dL_x \\ dL_y \\ dL_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} \\ f_{31} & f_{32} & f_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dF_1^p \\ dF_2^p \\ dF_3^p \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서 f_{ij} 는 유연도 행렬성분이다.

이제 강성행렬을 구하기 위하여 유연도행렬의 역행렬을 취한 후 관계식을 나타내면 다음과 같다.

$$\Delta F = k \Delta L \quad (4)$$

여기서, k 는 3×3 강성행렬을 표시한다. 자중을 받는 탄성현수선 케이블요소의 절점력에 대한 평형조건식을 고려하면 탄성현수선 케이블요소의 증분방정식을 얻을 수 있다.

$$\Delta F_c = K_c^t \Delta U_c \quad (5)$$

여기서, $\Delta F_c =$ 증분절점력벡터; $K_c^t =$ 탄성현수선요소의 접선강성행렬; $\Delta U_c =$ 증분변위벡터이며 결과식은 다음과 같다.

$$K_c^t = \begin{bmatrix} k & -k \\ -k & k \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\Delta F_c = [F_1^p \ F_2^p \ F_3^p \ F_1^q \ F_2^q \ F_3^q]^T \quad (7a)$$

$$\Delta U_c = [U_1^p \ U_2^p \ U_3^p \ U_1^q \ U_2^q \ U_3^q]^T \quad (7b)$$

2.2 3차원 프레임 요소

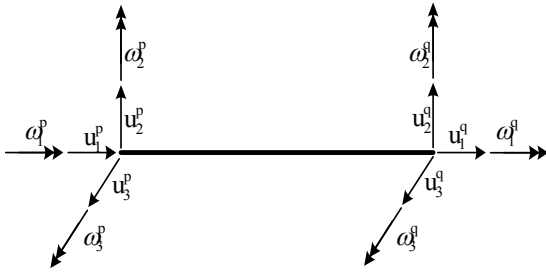


그림 2. 프레임요소의 절점변위벡터

그림 2는 부재좌표계에서 절점당 6개의 자유도를 갖는 프레임요소를 보여준다. 이 요소의 절점변위 및 절점력벡터는 식 (9a), (9b)와 같이 정의되며 접선강성행렬 K_f^t 는 김문영 (1993)의 결과를 참조하여 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\Delta F_f = K_f^t \Delta U_f \quad (8)$$

여기서,

$$\Delta F_f = [F_1^p, F_2^p, F_3^p, M_1^p, M_2^p, M_3^p, F_1^q, F_2^q, F_3^q, M_1^q, M_2^q, M_3^q]^T \quad (9a)$$

$$\Delta U_f = [u_1^p, u_2^p, u_3^p, \omega_1^p, \omega_2^p, \omega_3^p, u_1^q, u_2^q, u_3^q, \omega_1^q, \omega_2^q, \omega_3^q]^T \quad (9b)$$

$$K_f^t = \begin{bmatrix} a & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & -a & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & b_1 & \cdot & \cdot & \cdot & b_2 & \cdot & -b_1 & \cdot & \cdot & \cdot & b_2 \\ \cdot & \cdot & c_1 & \cdot & -c_2 & \cdot & \cdot & \cdot & -c_1 & \cdot & -c_2 & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & d & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & -d & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & c_3 & \cdot & \cdot & \cdot & c_2 & \cdot & c_4 & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & b_3 & \cdot & -b_2 & \cdot & \cdot & \cdot & b_4 \\ \hline \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & a & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & b_1 & \cdot & \cdot & \cdot & -b_2 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & c_1 & \cdot & c_2 & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & d & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & c_3 & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & b_3 \\ \hline \text{s y m .} & & & & & & & & & & & \end{bmatrix} \quad (9c)$$

$$\text{여기서, } b_1 = \frac{12EI_3}{L^3} + \frac{6P}{5L}; \quad b_2 = \frac{6EI_3}{L^2} + \frac{P}{10};$$

$$b_3 = \frac{4EI_3}{L} + \frac{4P}{30}; \quad b_4 = \frac{2EI_3}{L} - \frac{PL}{30};$$

$$c_1 = \frac{12EI_2}{L^3} + \frac{6P}{5L}; \quad c_2 = \frac{6EI_2}{L^2} + \frac{P}{10};$$

$$c_3 = \frac{4EI_2}{L} + \frac{4P}{30}; \quad c_4 = \frac{2EI_2}{L} - \frac{PL}{30};$$

$$a = \frac{EA}{L}; \quad d = \frac{GJ}{L} + \frac{P(I_2 + I_3)}{AL};$$

$EI_2, EI_3, GJ =$ 각각 휨 및 비틀강성; $P =$ 축력

프레임구조의 기하학적 비선형해석에서 각 부재의 증분변위는 Co-rotational 정식화 과정에 따라 강제회전에 대한 증분성분 ($\Delta\gamma_1, \Delta\gamma_2, \Delta\gamma_3$)과 순수변형 증분성분 ΔV 으로 분해하게 된다. 이때 강제회전은 반복계산과정에서 부재좌표계를 새로이 계산하는데 사용되고 순수변형은 부재력증분 ΔS 을 구하는데 이용된다. 강제회전 및 순수변형성분은 식 (10), (11)로 계산할 수 있고

$$\Delta\gamma_1 = \frac{\omega_1^p + \omega_1^q}{2}, \quad \Delta\gamma_2 = \frac{-u_3^q + u_3^p}{L}, \quad \Delta\gamma_3 = \frac{u_2^q - u_2^p}{L} \quad (10)$$

$$\Delta u = u_1^q - u_1^p \quad (11)$$

$$\Delta\theta_{13} = \omega_3^p - \Delta\gamma_3, \quad \Delta\theta_{23} = \omega_3^q - \Delta\gamma_3$$

$$\Delta\theta_{12} = \omega_2^p - \Delta\gamma_2, \quad \Delta\theta_{22} = \omega_2^q - \Delta\gamma_2$$

$$\Delta\omega = \omega_1^q - \omega_1^p$$

부재력증분과 순수변형증분사이의 관계식은 다음과 같다.

$$\Delta S = K_f^t \Delta V \quad (12)$$

여기서,

$$\Delta V = [\Delta u, \Delta\theta_{13}, \Delta\theta_{23}, \Delta\theta_{12}, \Delta\theta_{22}, \Delta\omega]^T \quad (13a)$$

$$\Delta S = [\Delta F, \Delta M_{13}, \Delta M_{23}, \Delta M_{12}, \Delta M_{22}, \Delta M_t]^T \quad (13b)$$

$$k_f^t = \begin{bmatrix} a & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & b_1 & b_2 & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & b_1 & \cdot & \cdot & \cdot \\ \hline \cdot & \cdot & \cdot & c_1 & c_2 & \cdot \\ \text{Sym.} & & & \cdot & c_1 & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & d \end{bmatrix} \quad (13c)$$

여기서, a, b_1, b_2, c_1, c_2, d 는 식 (9c)와 같다.

3. 개선된 초기부재력법을 이용한 현수교 시스템의 초기형상 결정법

이 연구에서 제시하는 현수교의 개선된 초기형상 결정법은 다음의 두 단계로 구분한다. 3.1 절에서는 주 케이블과 행어

로 구성되는 케이블 시스템의 초기형상과 무응력길이를 산정한다. 3.2 절에서는 전 절에서 결정한 주케이블의 초기형상과 무응력길이를 이용하여 전체 현수교 시스템의 비선형 유한요소해석을 수행한다. 수렴이 된 경우에 보강형과 주탑의 축방향력을 초기 축력으로 고려하여 원래의 형상으로 돌아가 보강형과 주탑의 축방향 변위가 사라질 때까지 비선형해석을 반복한다.

3.1 '절점 평형법'에 의한 주케이블 시스템의 초기형상 및 무응력길이 산정법

고정하중을 받는 현수교의 초기형상 해석 시 기본가정은 다음과 같다.

- 1) 주 케이블 상에 행어와 맞닿는 절점 사이의 주 케이블 부재는 탄성 포물선 거동을 한다고 가정한다.
- 2) 그림 3의 현수교에서 주 케이블 및 행어를 x-z 평면에 투영시키는 경우, 행어의 보강거더 정착부와 주 케이블 교차점의 x좌표는 같고 고정된 값을 갖는다.
- 3) 중앙경간 주 케이블의 새그 크기는 설계 값으로 미리 주어진다.
- 4) 주탑 탑정부의 수평 및 수직변위는 영이다.
- 5) 보강거더 각 요소절점의 z좌표 값은 캠버가 없는 경우는 영, 캠버를 고려하는 경우는 완공 시 캠버량으로 설정.
- 6) 그림 2에서 보는 바와 같이, 두 주 케이블의 좌측시점부 절점의 중앙점을 구조계의 좌표원점으로 한다. 또한 전체 형상은 x-z 평면에 대하여 대칭구조이다.
- 7) 두개의 주 케이블은 탑정부의 중앙에 모였다가 다시 분기된다.
- 8) 각 행어는 x-z평면에 투영시켰을 때 서로 평행하고, 거더의 행어 정착부의 y축 방향 좌표성분은 y_0 로 같다.

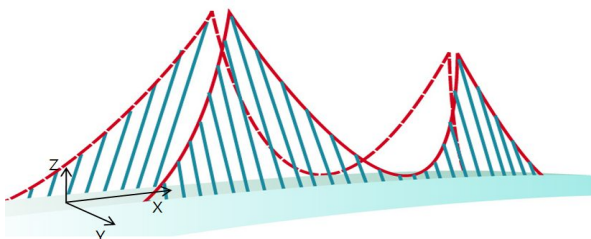


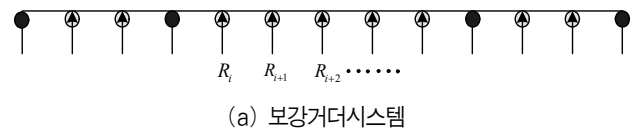
그림 3. 3차원 현수교의 초기형상 및 좌표계

김민 등(2010)의 연구를 참조하여 고정하중을 받는 현수교의 3차원 케이블시스템의 초기형상은 다음의 방법으로 결정한다.

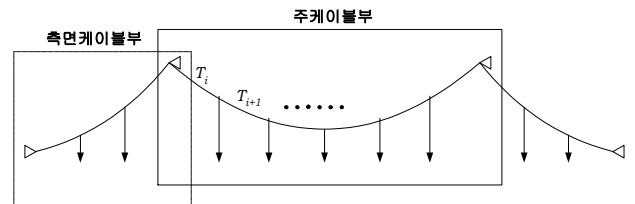
단계 1) 행어 정착부를 가상지점으로 가정하고 고정하중

하에서 캠버를 고려한 연속보의 지점반력 R_i 을 산정한다 (그림 4(a) 참조).

그림 3의 3차원 현수교 형상을 x-y평면 및 x-z평면에 투영시켜 케이블시스템과 보강거더시스템을 분리한 후, 보강거더의 연속보해석을 수행한다. 여기서 R_i 는 행어 정착점을 가상 지점부로 가정한 상태에서 고정하중 하에서 연속보해석을 통하여 얻는 가상 지점의 z방향 반력을 나타낸다.



(a) 보강거더시스템



(b) 주 케이블 시스템

그림 4. 현수교의 분리된 시스템

단계 2) 보강거더의 정착부 절점의 수직방향 평형조건으로부터 행어의 장력(= $R_i / \sin \alpha_i$)을 산정한다. 이때 행어의 장력은 연직성분은 지점반력 R_i 와 같다.

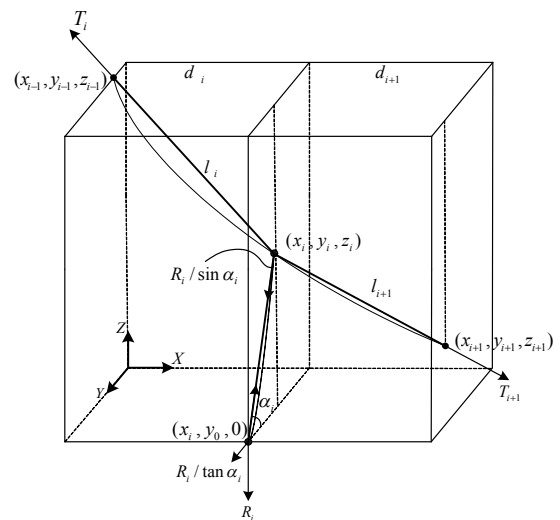


그림 5. 3차원 현수교의 주 케이블과 행어의 연결부

그림 5는 그림 3에서 3차원 형상을 갖는 오른쪽 주 케이블의 행어연결부와 행어정착부의 평형조건을 나타낸다. 여기서 l_i 는 i 번째 주 케이블의 직선부재 길이이다. 이제 R_i 을 고정하중을 받는 보강거더의 연속보해석에 의한 수직반력으로

나타내면, i 번째 행어의 장력 값은 $R_i / \sin\alpha_i$ 가 된다. 여기서 α_i 는 행어의 경사각을 표시한다.

단계 3) 포물선 케이블 식을 이용하여 주 케이블의 좌표와 장력 값을 가정한다. : 식 (14)의 비선형 연립방정식의 해를 반복법으로 풀기 위해서는 적절한 초기 값이 필요한데, 일반적인 포물선 방정식의 결과를 이용하여 중앙경간과 측경간의 주 케이블 형상에 대한 y, z 좌표의 초기 값을 가정한다.

단계 4) 행어와 주 케이블 연결부의 평형조건식 (3)으로부터 주 케이블의 초기형상 및 장력을 산정한다.

주 케이블의 절점 i 에서 평형방정식을 다음과 같다.

$$\frac{H}{d_i}(y_{i-1} - y_i) - \frac{H}{d_{i+1}}(y_i - y_{i+1}) = R_i \frac{y_0 - y_i}{z_i} \quad (14a)$$

$$\begin{aligned} & \frac{H}{d_i}(z_{i-1} - z_i) - \frac{H}{d_{i+1}}(z_i - z_{i+1}) \\ &= \frac{1}{2}(W_{c_i} + W_{c_{i+1}}) + R_i + \frac{1}{2} W_{h_i} \end{aligned} \quad (14b)$$

여기서, $T_i = i$ 번째 주 케이블 부재의 공칭장력; $H = T_i$ 의 x 축 수평방향성분; $y_0 =$ 보강거더에 정착된 행어 정착부의 y 축 좌표성분; $d_i = i$ 번째 주 케이블 부재의 x 축 방향의 길이성분; $z_i = i$ 번째 연결점의 수직좌표; $W_{c_i} = i$ 번째 구간에서 주 케이블 부재의 중량; $W_{h_i} = i$ 번째 절점에서 행어의 중량을 나타낸다.

평형조건식 (3)은 행어절점부 개수만큼의 비선형 연립방정식을 나타내고, 통상 Newton-Raphson 방법을 적용한다. 주 케이블과 행어 연결점의 수직좌표 z_i, \dots, z_n (중앙새그의 위치는 제외)의 초기 입력 값은 포물선 방정식을 이용하여 구한 값으로 가정하고, 이후의 입력 값은 반복계산 단계마다 재산정한다. 이때 주케이블의 중량 W_{c_i} 와 행어의 중량 W_{h_i} 또한 매 단계마다 재산정한 값을 적용한다.

결과적으로 식 (3)은 비선형 연립방정식을 구성하며, 이 식을 풀어서 3차원 현수교의 초기형상에 부합하는 수평장력 H 값과, 각 행어와 연결되는 주 케이블의 좌표 (x_i, y_i, z_i) 를 결정할 수 있다.

단계 5) 행어와 주 케이블 부재의 무응력길이 L_o 를 산정한다.

단계 4에서 주 케이블의 수평장력 H 가 결정되면, 식 (2b)을 이용하여 모든 주 케이블 부재에 작용하는 공칭장력 T_i 을

산정할 수 있다. 이때 주 케이블 부재의 무응력길이 L_{oi} 는 다음의 식으로 결정할 수 있다.

$$T_i^3 + \frac{EA_o}{L_{oi}}(L_{oi} - L_i)T_i^2 - \frac{EA_o(wL_{oi})^2}{24} = 0 \quad (15)$$

여기서, w 는 단위길이 당 주 케이블 자중으로, 부재의 현(chord)에 대한 직각방향 성분이다.

3.2 절점 평형법에 의한 주케이블의 초기값을 이용한 현수교 시스템의 초기부재력법

일반적으로 기하학적 비선형 유한요소 해석은 총 하중벡터를 몇 개의 증분단계로 나누어서 단계적으로 해석을 수행한다. 이때 각각의 증분단계별 반복계산은 Newton-Raphson 방법을 사용하여 불평형하중을 구하고, 평형조건을 만족할 때까지 반복해석을 행하게 된다.

본 연구의 현수교 시스템의 경우는 고정하중을 일시에 재하하게 되는데, 주케이블 및 행어의 무응력길이와 형상에 대한 입력좌표는 3.1의 결과 값을 적용하게 된다. 식 (16)은 Newton-Raphson 반복법에 근거하여 고정하중 R 을 일시에 받는 현수교의 기하학적 비선형 해석과정을 나타낸 것이다. 특히, 첫 번째 반복계산에서 모든 프레임요소의 부재력은 영이지만 케이블요소는 초기 장력을 갖게 되므로 구조물의 절점력벡터는 영벡터가 아니다 그리고 모든 반복계산 과정에서 각 케이블요소의 무응력길이는 3.1 절의 값을 그대로 유지시킨다는 점에 유의해야 한다.

$$\begin{aligned} & {}^1K_i^{(i-1)} \Delta U^{(i)} = R - {}^1F_c^{(i-1)} - {}^1F_f^{(i-1)} \\ & U^{(i)} = U^{(i-1)} + \Delta U^{(i)} \quad \text{for } k = 1; i = 1, 2, \dots \\ & L_o^{(i)} = L_o^{(i-1)} \end{aligned} \quad (16)$$

$$\text{초기조건 : } U^{(o)} = 0 ; {}^1F_c^{(o)} \neq 0 ; {}^1F_f^{(o)} = 0$$

여기서, $K_i =$ 구조물의 접선강성행렬; 첨자 $i = i$ 번째 반복 계산 과정; U 와 $\Delta U =$ 구조물의 총 절점변위와 증분 절점변위벡터; $R =$ 고정하중벡터; $F_c =$ 케이블요소 장력으로 인한 절점력벡터; $F_f =$ 프레임요소의 부재내력 및 지점반력으로 인한 절점력벡터를 나타내며 초기부재력법의 첫 번째 루프(Istep=1, Iter=1)에서는 영벡터가 된다.

현수교의 목표형상(target configuration)에 가장 근접하는 초기형상을 결정하기 위하여 식 (17)의 기하학적 비선형 해석 방법을 적용한 결과를 고찰해 보자. 이 경우에 필연적으

로 발생하는 주케이블의 큰 장력으로 인하여 현수교의 주탑은 연직변위, 자정식의 경우에 보강형은 수평방향의 변위를 수반하게 된다. 이 때문에 설계목적에 부합하는 목표형상과 비선형해석의 결과는 다소의 차이를 유발시킨다.

따라서 현수교에 적용하는 초기부재력법은 이러한 주탑, 주형의 축방향변위가 거의 영이 되도록 하기 위하여 이전단계의 비선형해석에서 수렴된 각 프레임요소의 축방향력만을 취하여 '초기부재력'으로 고려하고 재차 비선형 반복해석에 의하여 증분변위에 의한 증분부재력 ΔS 을 구하여 이를 누적시킴으로써 총 부재력벡터를 구한다. 이렇게 이전단계의 기하학적 비선형 반복해석의 결과로부터 '프레임요소의 축방향력'과 3.1절에서 얻은 '케이블요소의 장력'을 다음 반복계산 시작단계의 초기부재력으로 사용하고, 나머지 프레임요소의 부재력(휨모멘트, 비틀모멘트)과 모든 절점 변위는 영으로 취한 상태에서 새로이 평형상태를 만족하도록 비선형해석을 재차 수행하게 된다. 이와 같은 과정을 몇 번 반복하면 주탑의 수직 처짐과 주형의 수평변위는 거의 영이 되고 주형, 주탑의 휨모멘트도 크게 감소하여 완성계의 목표형상에 근접하는 해를 얻을 수 있다. 이 경우도 3.1절에서 결정된 각 케이블요소의 무응력길이를 매 반복계산에서 고정된 값으로 취한다는 것에 유의해야 한다. 아래 식(17)은 본 연구의 개선된 초기부재력법의 비선형해석 과정을 나타낸 것이다. 또한 그림 6은 개선된 초기부재력법의 흐름도를 나타낸 것이다.

$${}^k K_t^{(i-1)} \Delta U^{(i)} = R - {}^k F_c^{(i-1)} - {}^k F_f^{(i-1)}$$

$$U^{(i)} = U^{(i-1)} + \Delta U^{(i)} \quad \text{for } k = 2, 3 \dots ; i = 1, 2 \dots$$

$$L_o^{(i)} = L_o^{(i-1)}$$

(17)

초기조건 : ${}^k U^{(0)} = 0 ; {}^k F_c^{(0)} = 1 F_c^{(0)} ; {}^k F_f^{(0)} \neq 0$

여기서, 위첨자 k = 초기부재력법에 근거하여 고정하중을 다시 재하하는 횟수이며, 그림 6의 Istep을 나타낸다; ${}^k F_c^{(0)}$ = 3.1 절의 결과로부터 얻을 수 있는 케이블 장력으로 인한 등가의 절점력; ${}^k F_f^{(0)}$ = 이전 고정하중 계산루프 ($k-1$ 번째 단계)에서 수렴된 프레임요소의 축방향력에 대응하는 등가의 절점력벡터 즉, 변형이 영인 상태에서 입력된 절점좌표에 연결된 각 프레임요소의 초기 축방향력의 등가 절점력을 나타낸다. 이후 매 반복계산에서는 이러한 축방향력에 의한 초기부재력에 증분반력 및 증분휨모멘트 등을 포함하는 증분부재력이 누적되어 얻어지는 총 부재력이 산정된다.

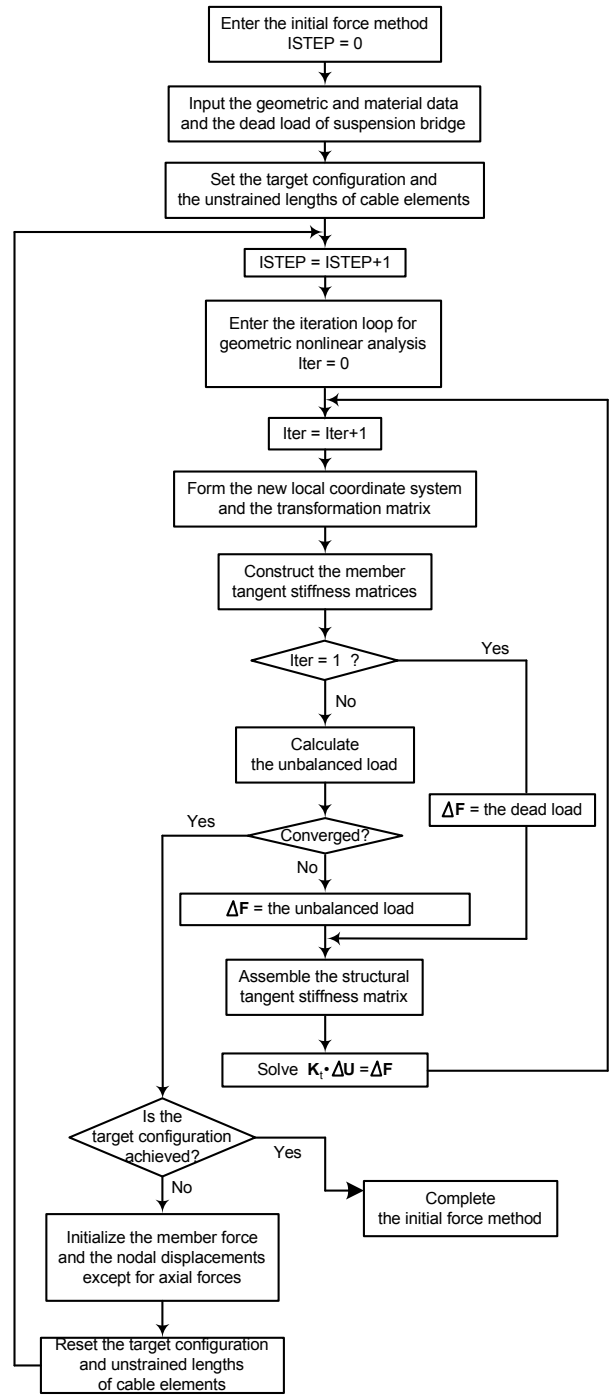


그림 6. 개선된 초기부재력법 알고리즘

4. 수치 예제

3장에서 제시한 개선된 초기부재력법의 타당성 검증을 위해 국내 대표적인 3개의 현수교 모델의 초기형상해석을 수행하였으며 결과를 개선된 TCUD법과 비교하였다. 이 때 주케이블은 탄성현수선요소, 행어는 트러스, 그리고 보강형과 주탑은 프레임요소를 적용하였다.

4.1 2차원 타정식 현수교(남해대교)

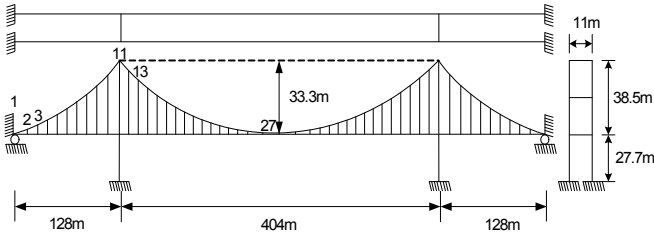


그림 7. 2차원 타정식 현수교(i)

그림 7은 남해대교의 모델로써, 메인케이블이 x-z 평면상에 놓여있는 2차원 타정식 현수교이다. 중앙경간과 측경간의 길이는 각각 404m, 128m이며 중앙경간의 새그는 33.3m이다. 각 행어 연결점의 x좌표는 측경간 및 중앙경간을, 주케이블 부재의 개수만큼 등분할하여 할당하였으며 측경간에는 9개의 행어가, 중앙경간에는 31개의 행어가 분포하고 있다. 주 케이블의 시점부와 종점부를 비롯한 주형의 모든 행어 연결점의 z좌표 값은 영이다. 주탑은 지반에 직접적으로 고정 지지되어 있으며, 주형과 주탑의 교차부분은 볼러로 연결되어 있다. 새그부분 행어의 설계 길이는 5.2m이다. 교량의 단면상수와 물성값은 표 1에 나타나 있다.

표 1. 타정식 현수교(i)의 단면상수 및 물성값

부재	E (Gpa)	A (m ²)	I ₂ (m ⁴)	I ₃ (m ⁴)	w (KN/m)
Main cable (Center)	196.20	0.0836	-	-	6.780
Main cable (Side)	196.20	0.0836	-	-	6.780
Hanger	127.53	0.0021	-	-	0.038
Stiffening Girder	206.01	0.2204	3.2667	0.1316	41.539
Tower	206.01	0.1046	0.0913	0.1080	736.233

먼저 절점평형법을 통하여, 수립된 z좌표 값 및 각 케이블 부재의 무응력길이를 결정한 뒤, 이를 초기입력값으로 하여 초기부재력법을 적용한 비선형 해석을 수행한다. 아래의 표 2에 절점평형법(김민 등, 2010)으로 결정한 각 케이블 부재의 무응력장과 개선된 TCUD법을 적용한 무응력장 결과를 비교하였다. 여기서 본 연구의 개선된 초기부재력법의 무응력장은 절점평형법의 값과 동일하다는 점에 유의하여야 한다.

1~10번까지의 부재가 측경간의 주케이블 부재이며, 11~26번까지의 부재가 중앙경간의 주케이블 부재이다. 1번 절점은 교량의 시점, 11번 절점은 주탑의 상부, 27번 절점은

주케이블의 새그지점이다. 주케이블 1번 부재란 절점 1과 2를 연결하는 부재를 말하며 26번 부재는 26번 절점과 27번 절점을 연결한다. 위의 표를 보면 절점평형법으로 상당히 정확한 무응력장의 결정이 가능하다는 점을 확인할 수 있고, 개선된 TCUD법에 의한 결과와도 거의 일치하는 모습을 보이고 있다.

표 2. 각 케이블 부재의 무응력장(m)

부재번호	1	2	3	4	5	6	7
절점평형법(1)	13.044	13.102	13.163	13.231	13.303	13.381	13.462
조경식 등 (2006) (2)	13.046	13.102	13.164	13.231	13.303	13.380	13.462
(2)-(1)	0.002	-	0.001	-	-	-0.001	-
부재번호	8	9	10	11	12	13	14
절점평형법(1)	13.550	13.643	13.739	13.231	13.154	13.081	13.013
조경식 등 (2006) (2)	13.550	13.642	13.739	13.231	13.154	13.081	13.013
(2)-(1)	-	-0.001	-	-	-	-	-
부재번호	15	16	17	18	19	20	21
절점평형법(1)	12.951	12.893	12.841	12.793	12.751	12.714	12.682
조경식 등 (2006) (2)	12.951	12.893	12.841	12.793	12.751	12.714	12.682
(2)-(1)	-	-	-	-	-	-	-
부재번호	22	23	24	25	26	-	-
절점평형법(1)	12.656	12.635	12.619	12.608	12.603	-	-
조경식 등 (2006) (2)	12.656	12.635	12.619	12.608	12.603	-	-
(2)-(1)	-	-	-	-	-	-	-

표 3은 절점평형법(김민 등, 2010), 본 연구의 단순 기하 비선형해석과 개선된 초기부재력법의 z좌표 결과, 그리고 개선된 TCUD법의 결과를 함께 나타내었다. 특히 표 4는 주케이블의 수평장력과 탑정부의 변위성분을 비교하여 제시하였다. 그 결과는 대체적으로 비슷한 값을 보이고 있으나, 개선된 초기부재력법에 의한 결과가 개선된 TCUD법에 의한 결과에 가장 가까운 모습을 보이고 있음을 확인할 수 있다. 또한, 비선형해석의 경우, 탑정부의 수평 및 수직변위가 발생하였지만 개선된 초기부재력법을 이용하여 탑정부의 변위를 제어할 수 있었다. 특히 개선된 초기부재력법은 절점평형법의 결과에 비하여 개선된 TCUD법의 결과에 더 근접하는 결과를 보였다. 이는 탄성현수선 요소를 적용하는 초기부재력법의 적용으로 실제에 더 부합하는 평형조건을 충족시켰기 때문인 것으로 판단된다.

표 3. 수렴된 주케이블 절점의 z 좌표(m)

주케이블 절점번호	절점평형법 (김민 등, 2010)	고정된 L_0 하에서 비선형해석	개선된 초기 부재력법	개선된 TCUD법
1	0.000	0.000	0.000	0.000
2	2.619	2.6193	2.6199	2.6191
3	5.537	5.5347	5.5357	5.5356
4	8.713	8.7122	8.7133	8.7113
5	12.161	12.1592	12.1601	12.1573
6	15.876	15.8751	15.8756	15.8713
7	19.860	19.8608	19.8606	19.8550
8	24.114	24.1152	24.1144	24.1087
9	28.639	28.6391	28.6387	28.6336
10	33.433	33.4294	33.4342	33.4303
11	38.500	38.4709	38.5000	38.5000
12	34.458	34.4440	34.4563	34.4531
13	30.679	30.6613	30.6761	30.6708
14	27.163	27.1366	27.1584	27.1525
15	23.909	23.8727	23.9028	23.8976
16	20.917	20.8711	20.9095	20.9054
17	18.186	18.1317	18.1781	18.1752
18	15.717	15.6537	15.7077	15.7067
19	13.508	13.4379	13.4989	13.4993
20	11.560	11.4835	11.5508	11.5526
21	9.872	9.7897	9.8626	9.8663
22	8.444	8.3573	8.4348	8.4399
23	7.276	7.1853	7.2668	7.2732
24	6.368	6.2745	6.3591	6.3661
25	5.719	5.6233	5.7101	5.7182
26	5.330	5.2333	5.3214	5.3295
27	5.200	5.1035	5.1921	5.2000

표 4. 주 케이블의 수평장력 및 주탑의 변위 비교

구분	절점평형법 (김민 등, 2010)	고정된 L_0 하에서 비선형해석	개선된 초기 부재력법	개선된 TCUD 법
주케이블의 수평장력(MN)	29.725	29.675	29.785	29.801
탑정의 수평변위(cm)	-	1.1	0	0
탑정의 수직변위(cm)	-	2.9	0	0

4.2 2차원 타정식 현수교(그레이트벨트교)

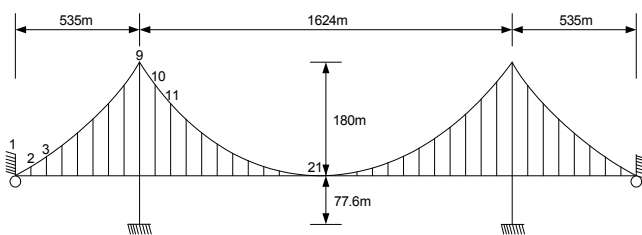


그림 8. 2차원 타정식 현수교(ii)

이 예제는 Karoumi(1999)의 논문에서 인용된 예제로서, 덴마크에 위치한 그레이트 벨트교(Great Belt Bridge)이다.

그림 8에서 보는 바와 같이, 교량의 형식은 타정식 현수교이고 중앙경간과 측경간의 길이는 각각 1624m와 535m이며 중앙경간의 새그는 180m이다. 각 행어 연결점의 X좌표는 측경간 및 중앙경간을, 주케이블 부재의 개수만큼 등분할하여 할당하였으며 측경간에는 7개의 행어가, 중앙경간에는 23개의 행어가 분포하고 있다. 주케이블의 시점부와 종점부를 비롯한 보강거더 행어 연결점의 모든 z좌표 값은 영이다.

주탑은 지반에 직접적으로 고정지지되어 있고 보강거더와 주탑이 교차하는 부분은 볼러로 연결되어 있으며 주 케이블의 새그부분은 보강거더에 직접적으로 고정되어 있다. 또한 주 케이블과 보강거더의 시점부와 종점부는 분리되어 있지만, 그 절점좌표는 동일한 값을 취하였다. 행어의 질량은 주 케이블을 따라 균일하게 분포되었고, 행어의 분포하중은 주 케이블의 단위길이 당 중량에 포함되어있다. 교량의 단면상수와 물성값은 표 5에 제시하였다.

표 5. 그레이트 벨트교 모델의 단면상수 및 물성값

부재	E (Gpa)	A (m ²)	I (m ⁴)	w (KN/m)
Main cable(Center)	210	0.40	-	32.9
Main cable(Side)	210	0.41	-	33.8
Hanger	210	0.025	-	-
Stiffening Girder	210	0.5	1.66	72.4
Tower(-77.6 ~ -2.1m)	40	37.5	750	882.0
Tower(-2.1 ~ 58.6m)	40	32.5	275	764.4
Tower(58.6 ~ 119.3m)	40	30.0	200	705.6
Tower(119.3 ~ 180m)	40	25.0	150	588.0

표 6은 절점평형법(김민 등, 2010)으로 결정한 각 케이블 부재의 무응력장과 개선된 TCUD법을 적용한 김문영 등(2003)의 방법으로 결정한 무응력장을 각각 비교하여 나타내었다. 1~8번까지의 부재가 측경간의 주케이블 부재이며, 9~20번까지의 부재가 중앙경간의 주케이블 부재이다. 표 6에서 남해대교 예처럼 절점평형법을 이용하여 무응력장을 결정한 결과가 김문영 등(2003)의 값과 비교하였을 때 남해대교의 경우와 유사하게 잘 일치함을 알 수 있다.

표 6. 각 케이블 부재의 무응력장(m)

부재번호	1	2	3	4	5	6	7
절점평형법(1)	68.095	68.681	69.292	70.005	70.794	71.666	72.618
김문영 등 (2003)(2)	68.096	68.682	69.292	70.006	70.795	71.667	72.619
(2)-(1)	0.001	0.001	-	0.001	0.001	0.001	0.001
부재번호	8	9	10	11	12	13	14
절점평형법(1)	73.646	73.385	72.426	71.549	70.754	70.044	69.418
김문영 등 (2003)(2)	73.647	73.385	72.426	71.549	70.755	70.044	69.419
(2)-(1)	0.001	-	-	-	0.001	-	0.001
부재번호	15	16	17	18	19	20	-
절점평형법(1)	68.880	68.429	68.067	67.795	67.614	67.523	-
김문영 등 (2003)(2)	68.880	68.430	68.068	67.796	67.614	67.519	-
(2)-(1)	-	0.001	0.001	0.001	-	-0.004	-

표 7은 절점평형법(김민 등, 2010), 기하비선형해석과 개선된 초기부재력법의 z좌표 결과, 그리고 김문영 등(2003)의 결과를 함께 나타내었다. 그리고 표 8은 주케이블의 수평장력과 탑정부의 변위성분을 비교하여 제시하였다. 무응력장을 고정시킨 상태에서 기하비선형 해석결과 만 다소 차이가 발생하였고 개선된 초기부재력법에 의한 결과와 김 등(2003) 결과는 매우 잘 일치하는 모습을 보여준다.

표 7. 수렴된 케이블 절점의 Z좌표(m)

주케이블 절점번호	절점평형법 (김민 등, 2010)	고정된 L_0 하에서 비선형해석	개선된 초기 부재력법	김문영 등 (2003) 의 결과
1	0.0000	0.0000	0.000	0.000
2	13.6399	13.6362	13.6429	13.6401
3	29.9735	29.9638	29.9761	29.9740
4	48.7240	48.7122	48.7287	48.7247
5	69.9752	69.9603	69.9797	69.9760
6	93.7154	93.6989	93.7196	93.7164
7	119.960	119.943	119.963	119.961
8	148.719	148.705	148.720	148.719
9	180.000	179.964	180.000	180.000
10	151.129	151.111	151.133	151.129
11	124.810	124.782	124.818	124.811
12	101.030	100.995	101.041	101.030
13	79.7793	79.7401	79.7939	79.7797
14	61.0493	61.0061	61.0669	61.0496
15	44.8325	44.7856	44.8526	44.8326
16	31.1220	31.0720	31.1443	31.1220
17	19.9122	19.8597	19.9363	19.9120
18	11.1983	11.1437	11.2238	11.1980
19	4.9767	4.9207	5.0031	4.9764
20	1.2448	1.1879	1.2718	1.2446
21	0.0010	-0.0562	0.0282	0.0010

표 8. 주 케이블의 수평장력 및 주탑의 변위 비교

구 분	절점평형법 (김민 등, 2010)	고정된 L_0 하에서 비선형해석	개선된 초기 부재력법	김문영 등 (2003) 의 결과
주케이블의 수평장력(MN)	193.8	193.6	193.7	193.7
탑정의 수평변위 (cm)	-	0.5	0	0
탑정의 수직변위 (cm)	-	3.6	0	0

4.3 3차원 자정식 현수교(영종대교)

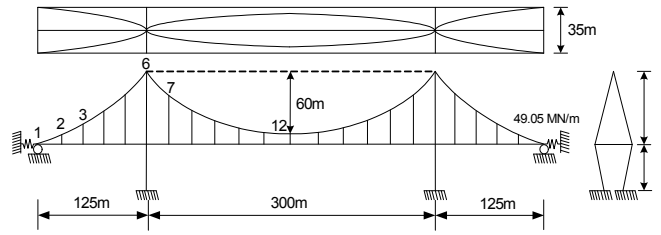


그림 9. 3차원 자정식 현수교

이 예제는 영종대교로서, 그림 9에서 보는 바와 같이 3차원의 자정식 현수교이다. 중앙경간과 측경간의 길이는 각각 300m와 125m이며 중앙경간의 새그는 60m이다. 또한 주케이블 새그부분 행어길이의 설계값은 4m이다. 각 행어 연결점의 X좌표는 측경간 및 중앙경간을, 주케이블 부재의 개수만큼 등분할하여 할당하였으며 측경간에는 8(=4×2)개의 행어가, 중앙경간에는 22(=11×2)개의 행어가 분포하고 있다. 개선된 초기부재력법으로 해석 시 3차원으로 모델링 하였으며 교량의 단면상수와 물성값은 표 9에 나타내었다.

표 9. 3차원 자정식 현수교의 단면상수 및 물성값

부 재	E (GPa)	A (m ²)	I_2 (m ⁴)	I_3 (m ⁴)	w (KN/m)
Main cable (Center)	196.2	0.129	-	-	14.87
Main cable (Side)	196.2	0.129	-	-	14.87
Hanger	196.2	0.017	-	-	1.96
Stiffening Girder	196.2	1.363	217.3 9	24.57	445.18
Tower (-36.5~0m)	196.2	0.891	3.97	2.72	133.23
Tower (0~33m)	196.2	0.656	1.72	1.14	101.04
Tower (33~64m)	196.2	0.656	1.72	1.14	101.04

절점평형법의 경우 1열의 메인케이블만을 모델링 하였고, 실제 보강거더의 단면적인 1.363m²의 절반인 0.6815m²를 적용하였다. 초기부재력법의 경우 3차원으로 모델링 하였으며 이때는 보강거더의 단면적을 1.363m²로 적용하였다. 위의 타정식현수교 모델과는 다르게 자정식 현수교의 경우, 시점부 및 종점부에서 주 케이블의 노드와 보강거더의 노드는 같은 절점으로서 서로 공유된다.

아래의 표 10에 절점평형법으로 결정한 각 케이블 부재의

무응력장과 조경식 등(2006)의 결과를 서로 비교하였다. 경간이 길지 않을 경우 절점평형법의 정확성이 더욱 높아진다. 아래의 표 10의 경우 전반적으로 조경식 등의 결과와 거의 차이가 없다. 다만 절점평형법의 경우 교량의 단부 혹은 주탑 부근의 케이블 부재에서 무응력장의 오차가 다소 발생하였다.

표 10. 각 케이블 부재의 무응력장(m)

부재번호	1	2	3	4	5	6	7
절점평형법(1)	25.679	26.853	28.253	30.049	32.112	31.352	29.378
조경식 등(2006)(2)	25.677	26.849	28.249	30.050	32.127	31.367	29.380
(2)-(1)	0.002	0.004	0.004	0.001	0.015	0.015	0.002
부재번호	8	9	10	11	-	-	-
절점평형법(1)	27.709	26.395	25.483	25.015	-	-	-
조경식 등(2006)(2)	27.706	26.391	25.481	25.015	-	-	-
(2)-(1)	0.003	0.004	0.002	-	-	-	-

표 11과 표 12는 각각 절점평형법(김민 등, 2010), 기하비선형해석과 개선된 초기부재력법의 y, z좌표 결과, 그리고 이에 대응하는 조경식 등(2006)의 결과를 함께 나타내었다. 그리고 표 13은 주케이블의 수평장력과 탑정부, 보강형의 변위성분을 비교하여 함께 제시하였다. 이전 예제와 마찬가지로 기하비선형 해석결과 만이 다소 차이가 발생하였고 개선된 초기부재력법에 의한 결과와 조경식 등(2006) 결과는 매우 잘 일치하는 모습을 확인할 수 있다.

표 11. 수렴된 주케이블 절점의 Y좌표(m)

주케이블 절점번호	절점평형법(김민 등, 2010)	고정된 L_0 하에서 비선형해석	개선된 초기부재력법	조경식 등(2006)의 결과
1	17.500	17.500	17.500	17.500
2	15.833	15.819	15.833	15.835
3	13.159	13.136	13.161	13.165
4	9.640	9.614	9.643	9.650
5	5.248	5.230	5.253	5.260
6	0.010	0.010	0.010	0.010
7	4.917	4.886	4.912	4.917
8	8.961	8.918	8.953	8.961
9	12.134	12.093	12.128	12.134
10	14.425	14.393	14.422	14.426
11	15.818	15.794	15.817	15.818
12	16.288	16.268	16.288	16.288

표 12. 수렴된 주케이블 절점의 Z좌표(m)

주케이블 절점번호	절점평형법(김민 등, 2010)	고정된 L_0 하에서 비선형해석	개선된 초기부재력법	조경식 등(2006)의 결과
1	0.000	0.000	0.000	0.000
2	5.832	5.830	5.835	5.827
3	15.408	15.397	15.407	15.393
4	28.217	28.203	28.219	28.194
5	44.419	44.397	44.420	44.398
6	64.000	63.951	64.000	64.000
7	45.608	45.561	45.600	45.583
8	30.598	30.549	30.596	30.569
9	18.948	18.892	18.947	18.925
10	10.639	10.577	10.638	10.627
11	5.659	5.594	5.658	5.656
12	4.000	3.934	4.000	4.000

표 13. 주 케이블의 수평장력 및 주탑의 변위 비교

구분	절점평형법(김민 등, 2010)	고정된 L_0 하에서 비선형해석	개선된 초기부재력법	조경식 등(2006)의 결과
주 케이블의 수평장력(MN)	44.76	37.83	44.81	44.88
탑정의 수평변위(cm)	-	5.6	0	-
탑정의 수직변위(cm)	-	4.9	0	-
보강거더의 축방향변위(cm)	-	7.4	0.1	-

또한, 그림 10은 개선된 초기부재력법에 의한 자정식현수교 보강거더의 휨모멘트도를 나타내고 있다. 행어절점부의 휨모멘트는 측경간 단부에서 최대 28.0MN·m의 값을 보였으며 그 이외의 행어 절점부에서는 24.3MN·m 내외의 균일한 분포를 보였다.

축압축력을 받는 연속보의 해석의 결과 측경간 단부에서 최대 29.3MN·m, 중앙경간에서는 23.2MN·m의 균일한 분포를 보였으며 개선된 초기부재력법의 결과와 비교하여 큰 차이를 보이지는 않았다. 연속보해석의 결과와 비교하여 주탑 부근의 보강거더 절점에서 그 차이가 가장 컸는데, 이는 트러스케이블요소로 구한 주탑 부근 행어의 무응력장 입력 값의 오차로 인하여 발생했다고 볼 수 있다. 따라서 주탑 부근 행어의 무응력장은 좀 더 정확하게 산정할 필요가 있다.

참 고 문 헌

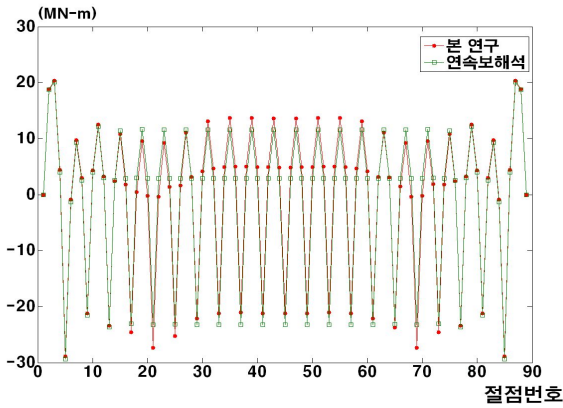


그림 10. 보강거더의 휨모멘트도

5. 결 론

절점평형법(김민 등, 2010)에 근거하여 개선된 초기부재력법을 제시하였고 현수교 해석예제를 통하여 개선된 TCUD법의 결과와 비교 분석하였으며 그 결과 다음의 결론을 얻었다.

- (1) 이론적인 측면에서 현수교의 설계 시 목표형상에 가장 부합하는 초기형상(주탑의 탑정부의 수평 및 수직변위영)에 대한 유일한 해가 존재한다.
- (2) 절점평형법으로부터 행어 및 주케이블의 공칭장력을 구한 뒤, 탄성포물선 케이블 이론식에 근거하여 무응력장을 결정하며 이를 토대로 3차원 기하비선형 반복해석을 수행하는 수렴된 축방향력을 초기부재력으로 고려하여 재해석하는 개선된 초기부재력법은 반복계산시 안정적인 수렴성을 보였다.
- (3) 본 연구의 개선된 초기부재력법은 3차원 현수교 시스템의 주탑 및 보강형의 축방향변형을 제어할 수 있는 효과적인 방법이며, 정해로 간주할 수 있는 개선된 TCUD법에 매우 근접한 해석결과를 보였다.

감사의 글

본 연구는 건설교통기술평가원의 건설기술혁신사업의 초장대교량 사업단 연구과제비(과제번호 : 08기술혁신E01)에 의해 연구되었기에 이에 깊은 감사를 드립니다.

- 경용수, 김호경, 김문영(2007) 사장교의 초기형상해석을 위한 탄성포물선 케이블요소, 한국전산구조공학회 논문집, 한국전산구조공학회, 제20권, 제1호, pp.1-7.
- 김문영(1993) 전단변형을 고려한 공간 뼈대구조의 기하학적인 비선형 해석, 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 제13권, 제4호, pp.39-49.
- 김문영, 김남일, 안상섭(1998) 3차원 케이블망의 초기평형상태 결정 및 정적 비선형 유한요소 해석, 한국전산구조공학회 논문집, 한국전산구조공학회, 제11권, 제1호, pp.182-183.
- 김문영, 경용수, 이준석(2003) 현수교의 개선된 초기형상 해석법, 한국강구조학회 논문집, 강구조학회, 제15권, 제2호, pp.219-229.
- 김민, 김문영(2010) 고정하중을 받는 현수교 시스템의 초기형상 결정법, 강구조학회 논문집, 심사중.
- 김호경(1993) 현수교의 정적 비선형 해석 및 초기 평형상태의 결정, 한국강구조학회 논문집, 강구조학회, 제5권, 제2호, pp.177-186.
- 김호경, 장승필(1997) 초기축력을 도입한 자정식 현수교의 초기형상 결정, 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 제17권, 제I-2호, pp.197-205.
- 안상섭(1991) 탄성현수선 케이블요소를 이용한 3차원 케이블망의 정적 및 동적 비선형해석, 석사학위논문, 서울대학교.
- 이명재(1998) 초기 평형상태를 이용한 현수교의 시공 단계해석 및 시공오차관리, 박사학위논문, 서울대학교.
- 조경식, 김중화, 안남규(2006) TCUD법을 이용한 현수교 해석 프로그램의 개발, 2006년도 학술발표대회 논문집, 한국강구조학회, pp. 268-274.
- Irvine, H. (1981) Cable Structures. MIT Press.
- Karoumi, R. (1999) Some modeling aspects in the nonlinear finite element analysis of cable supported bridges, *Computers & Structures*, Vol. 71, No. 4, pp.397-412.
- Kim, K.S., Lee, H.S. (2001) Analysis of target configurations under dead loads for cable-supported bridges, *Computers & Structures*, Vol. 79, No. 29-30, pp.2681-2692.
- Kim, H.K., Lee, M.J., and Chang, S.P. (2002) Nonlinear shape-finding analysis of a self-anchored suspension bridge, *Engineering Structures*, Vol. 24, No. 12, pp.1547-1559.

(접수일자 : 2010. 12. 14 / 심사일 2010. 12. 17 /

심사완료일 2011. 4. 7)