

사장교 비선형거동과 하모니 서치 알고리즘에 기반한 사장교 구성 단면 결정

마상수¹, 권태윤², 이원홍³, 안진희^{4*}

Determination of Structural Member Section based on Nonlinear Behaviors of Steel Cable-Stayed Bridges and Harmony Search Algorithm

Sang-Soo Ma¹, Tae-Yun Kwon², Won-Hong Lee³, Jin-Hee Ahn^{4*}

Abstract: In this study, a determination method of structural member section based on Nonlinear behaviors of steel cable-stayed bridges and the Harmony Search algorithm was presented. The Harmony Search algorithm determines the structural member section of cable-stayed bridges by repeating the process of setting the initial value, initializing the harmony memory, configuring the new harmony memory, and updating the harmony memory to search for the optimal value. The nonlinear initial shape analysis of a three-dimensional steel cable-stayed bridge was performed with the cross-section of the main member selected by the Harmony Search algorithm, and the optimal cross-section of the main members of the cable-stayed bridge, such as pylons, girders, cross-beams, and cables, reflecting the complex behavior characteristics and the nonlinearity of each member was determined in consideration of the initial tension and shape. The total weight was used as the objective function for determining the cross-section of the main member of the cable-stayed bridges, and the load resistance ability and serviceability based on the ultimate state design method were used as the restraint conditions. The width and height ratio of the girder and cross-section were considered additional restraint conditions. The optimal sections of the main members were made possible to be determined by considering the geometry and material nonlinearity of the pylons, girders, and cross-sections and the nonlinearity of the cable members. As a result of determining the optimal cross-section, it was confirmed that the proposed analysis method can determine the optimal cross-section according to the various constraint conditions of the cable-stayed bridge, and the structural member section of the cable-stayed bridge considering the nonlinearity can be determined through the Harmony Search algorithm.

Keywords: Steel cable-stayed bridges, Member section determination, Nonlinear behaviors, Harmony search algorithm

1. 서 론

사장교는 외부 하중에 직접 저항하는 보강거더와 주탑과 케이블에 의하여 전체 교량시스템을 구성하고 있으며, 보강 거더와 주탑의 휨거동 및 축방향거동 그리고 케이블의 인장 거동이 복합적으로 나타나게 된다(Ren, 1999; Kim et al., 2017). 사장교의 복합적인 거동 특성을 반영하여 사장교를 구성하는 부재의 단면을 결정하기 위해서는 설계하중상태 및 사용하중상태에 대하여 부재의 재료 비선형성과 케이블의 세그먼트, 축력과 모멘트의 조합 및 대변형 효과와 같은 비선형 거동 특성을 고려하여야 한다(Kim et al., 2017; Cong and Kang, 2019). 이러한 사장교의 비선형 거동 특성을 반영하기

위하여 기하비선형해석 등을 이용한 사장교의 극한 거동 해석 및 구조적 안전성에 대한 연구들이 진행되어 왔다(Song et al., 2005; Kim et al., 2010; Song and Kim, 2011; Wu et al., 2015). 또한, 사장교 설계 및 초기 형상 해석을 위하여 필요한 보강거더, 주탑 및 가로보의 부재 단면 제원 등의 결정을 위해서는 다양한 해석적인 검토가 필요하다(Ma et al., 2024). 특히 보강거더 및 주탑 단면 결정을 위해서는 부재의 비선형 거동 이외에도 사장교의 설치 조건과 설계하중 등에 따라 단면 형상이 변화될 수 있으므로 사장교의 교장 및 주탑 높이 등을 고려하여 부재 단면을 사전에 검토하거나 결정할 수 있다면 사장교 설계과정에 보다 합리적으로 활용될 수 있을 것이다.

사장교 케이블은 사장교 형상과 보강거더, 주탑 및 초기형상 등에 많은 영향을 미치므로 사장교의 케이블 긴장력 결정과 단면 결정을 위한 연구는 다양하게 진행되어 왔으나(Janjic et al., 2003; Kim and Lee, 2005; Park, 2012; Hassan, 2013; Jung et al., 2016; Atmaca et al., 2020; Zhang et al., 2020; Feng et al., 2022; Guo and Guan, 2023; Wang et al., 2023), 사장교 보강거더 및 주탑 등의 단면 결정과 관련된 연구 등은 상대적으로

¹정회원, 경상국립대학교 건설시스템공학과 박사과정, 국토안전관리원 부장

²정회원, 경상국립대학교 건설시스템공학과 박사과정

³정회원, 경상국립대학교 건설시스템공학과 교수

⁴정회원, 경상국립대학교 건설시스템공학과 교수, 교신저자

*Corresponding author: jahn@gnu.ac.kr

Gyeongsang National University, Jinju, 52725, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2024년 9월 30일까지 학회로 보내주시면 2024년 10월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

으로 부족하다. 하모니 서치 알고리즘을 적용하여 사장교 지간 및 케이블 배치 형태 등 다양한 조건에 따른 케이블 단면과 케이블의 응력 수준을 합리적으로 검토할 수 있도록 연구가 진행되었으나(Ma et al., 2024), 이는 사장교 케이블 단면 결정에 한정된 연구로써 주탑과 보강거더 및 가로보 등의 부재 단면을 결정하지는 못하였다.

사장교 지간 구성 및 케이블 배치 특성 그리고 주탑높이 등에 따른 사장교의 비선형 거동에 따라 사장교 보강거더 및 주탑 단면 형상이 영향을 받을 수 있으므로 보강거더를 비롯한 강사장교 부재단면 결정을 위해서는 설계하중 조건과 사장교의 비선형 거동에 따른 제약조건이 고려되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 사장교의 비선형 거동 특성과 하모니 서치 알고리즘을 이용하여 사장교 구성 부재의 단면 결정 방법을 검토하였다. 강사장교 주요 부재인 보강거더, 주탑, 가로보의 단면 결정을 위하여 강사장교 완성계 형상을 대상으로 고정하중 조건에서 비선형 초기형상 해석을 수행하고, 초기형상 해석에서 결정된 단면을 대상으로 사장교 하중제하 조건 및 사용성 조건 등에 따른 단면의 적절성을 검토하도록 하였다. 이러한 과정들을 반복하여 강사장교 부재 단면이 결정될 수 있도록 하였으며, 공학용 소프트웨어인 매트랩(MATLAB)을 이용하여 하모니 서치 알고리즘에 기반한 강사장교 단면 결정과 강사장교 비선형 거동 해석을 수행하였다.

2. 강사장교 부재 단면 결정 방법

본 연구에서는 강사장교의 지간 및 주탑의 높이 등에 따라 결정될 수 있는 주부재인 보강거더, 주탑 및 가로보와 케이블의 단면 제원을 하모니 서치 알고리즘의 결정변수로 고려하였으며, 각 부재의 단면제원 변화에 따른 영향을 비교하고자 하였다. 강사장교 부재 단면 결정을 위한 목적함수로 다양한 변수가 결정될 수 있으나 강사장교의 부재의 경우 케이블 부재와 달리 상대적으로 강종별 경제성의 차이가 작을 것으로 판단하여 부재 중량을 목적함수로 결정하고 이에 따라 부재 단면을 결정할 수 있도록 하였다. 또한 하모니 서치 알고리즘을 통한 부재 단면 결정과정에서 강사장교의 초기형상 조건 및 하중제하 조건, 그리고 사용성 조건 등에 따른 하중 조건과 강사장교의 비선형 거동에 따른 부재 응력 등이 제약조건으로 작용되도록 하였다. 제약조건의 경우 한계상태설계법에 따라 각 부재 단면에 따른 응력 수준이 검토되어 결정되고 이를 위한 사장교의 비선형 구조해석이 진행될 수 있도록 선택된 모든 단면의 단면계수가 반복 계산되어 초기형상해석과 설계하중 상태에 대한 구조 검토가 진행될 수 있도록 하였다. 제약조건을 만족하지 못하는 부재 단면은 제외되도록 하였다. 이 과정에서 보강거더와 가로보 단면의 폭과 높이의 비율

을 고려할 수 있도록 구성하여 상대적으로 구조적 측면에서 불합리한 단면 변수는 제외되도록 하였으며, 각 부재의 단면 제원은 일정 범위 내에서 생성되는 난수로 결정될 수 있도록 구성하여 적용되는 설계조건에 대한 부재의 단면치수가 너무 크거나 작은 단면 변수는 사전에 제외하여 사장교 부재 단면 결정을 위한 전체 알고리즘이 효과적으로 단면을 결정할 수 있도록 하였다.

2.1 하모니 서치 알고리즘(Harmony Search Algorithm)

1970년대부터 Simulated Annealing(SA), Taboo Search(TS), Neural Network(NN), Genetic Algorithm(GA) 등 발견적 탐색법으로 알려진 최적화 알고리즘들이 개발되었으며, 국내에서는 화음탐색법인 하모니 서치(Harmony Search, HS) 알고리즘이 개발되었다. 대부분의 발견적 탐색법이 자연현상의 관찰을 통해 만들어졌으나, 하모니 서치는 화음(harmony)이라는 인공적인 현상에서 영감을 얻어 최적화 알고리즘으로 제안되었다(Geem et al., 2001). 하모니 서치는 가능해 영역에서 반복과정을 통해 최적해를 탐색하는 면에서 SA나 GA 등의 다른 발견적 탐색법들과 유사성을 가진다. 하모니 서치는 광대한 영역을 통한 군탐색을 실시한다는 점에서는 SA나 TS와 차이가 있으나, 과거의 경험을 축적하고 있다는 측면에서는 TS의 특징을, 해가 꼭 최적이지 아니라도 어느 정도 좋은 범위에 들면 경험의 집합에 추가한다는 점에서는 SA의 특징도 지니고 있는 탐색기법이다. 또한, 군탐색의 특징을 가지고 있는 GA의 경우 새로운 해를 생성할 때 오직 부모세대의 두 유전자만이 새로운 유전자에 영향을 주며 양 부모의 경험만이 새로운 유전자의 정보가 되지만, 하모니 서치는 과거의 모든 화음에서부터 경험을 얻기 때문에 새로운 해가 상대적으로 풍부한 정보를 바탕으로 구해질 수 있다(Geem et al., 2001; Kim and Kwon, 2013; Lee et al., 2016). 또한, 하모니 서치는 원리가 간단하고 제약조건이 있는 최적화 문제에서도 빠르게 동작한다는 장점이 있어 토목, 컴퓨터, 에너지, 의료, 수질 공학 등 다양한 분야의 최적화 문제에 적용되고 있으며(Kim et al., 2021; Geem, 2022), 구조분야에서 부재의 설계 등 구조설계 최적화 등에 적용되고 있다(Kim and Kwon, 2013; Kim, 2015; Jung et al., 2017; Kim et al., 2018).

하모니 서치에서도 다른 최적화 기법과 같이 몇 가지의 인자들을 사용하며, HM(Harmony Memory), HMCR(Harmony Memory Considering Rate) 및 PAR(Pitch Adjusting Rate) 등으로 구성된다. HM은 연습과정을 통해 경험한 화음 중에서 좋았다고 생각되는 화음들을 모은 집합으로 새로이 나타난 화음이 기존의 HM에서의 최악의 화음보다 좋다면 이 화음이 HM에 추가되며 기존의 화음 중 최악의 것은 HM에서 탈락하게 되는 것이다. HS에서는 탐색하고자 하는 각 매개변수를 악

기라 하고, 매개변수의 값을 약기의 음조라 하면 HS에서는 가장 잘 어울리는 약기의 소리조합을 탐색하는 것이다. 이때 화음의 어울림 정도는 GA에서와 같이 적합도 함수로 판단하게 된다. HMCR이란 새로운 화음을 만들 때, HM에 있는 화음을 바탕으로 만들어 낼 것인가 아니면 전체 정의영역에서 무작위로 만들어 낼 것인가에 대한 확률이다. HMCR의 기능은 해가 국지해에 빠지지 않고 더 나은 곳으로 찾아갈 수 있는 가능성을 부여하는 것이라고 할 수 있다. PAR은 좋은 화음을 만들기 위해 각 약기의 음조(Pitch)를 조절하는 것과 같이 우수한 해를 찾기 위해 기존 해와 이웃하는 값을 고려함으로써 HS의 성능을 향상시키는 인자이다.

하모니 서치 알고리즘의 전체적인 최적화 과정은 초기값이 설정된 이후 HM 초기화, New HM 구성 및 HM 업데이트 과정을 반복함으로써 최적값을 탐색하게 된다. 초기값 설정 단계에서는 각 설계변수 특성에 따라 크기 및 범위를 설정하고 HM size와 HMCR 그리고 PAR의 값을 설정하며, 최적값 탐색을 위한 반복횟수와 종료조건을 설정한다. 일반적으로 HMCR은 0.7 ~ 0.9, PAR은 0.2 ~ 0.5 수준으로 적용한다. HM 초기화 단계에서는 사전 설정된 HM size 만큼 초기변수를 생성하게 되며 제약조건을 모두 만족하도록 검토되므로 최적해에 빠르게 접근하게 된다. 이와 같이 생성된 HM은 Eq. (1)과 같이 표현될 수 있다. 여기서, nd 는 설계변수의 수를 의미한다.

$$HM = \begin{bmatrix} x_1^1 & x_2^1 & \cdots & x_{nd}^1 & f(x^1) \\ x_1^2 & x_2^2 & \cdots & x_{nd}^2 & f(x^2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_1^{HMsize} & x_2^{HMsize} & \cdots & x_{nd}^{HMsize} & f(x^{HMsize}) \end{bmatrix} \quad (1)$$

New HM 구성 및 HM 업데이트 단계에서는 HMCR에 따라 HM을 바탕으로 New HM을 생성 또는 무작위 선택방법으로 New HM을 생성하게 되며, 전자에서는 다시 한번 PAR에 따라 BW(Band width)만큼 변수의 값을 조정한다. 이와 같은 New HM 생성방법은 Eq. (2)와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 위첨자 RS 는 무작위 선택방법으로 생성된 New HM, HMC 는 HM을 바탕으로 생성된 New HM, PA 는 HM을 바탕으로 피치조정을 통하여 생성된 New HM을 의미한다.

$$New\ HM \begin{cases} x_i^{RS} \in [x_i^{Lower}, \dots, x_i^{Upper}] \\ \quad \quad \quad w.p. 1 - HMCR \\ x_i^{HMC} \in [x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^{HMsize}] \\ \quad \quad \quad w.p. HMCR \times (1 - PAR) \\ x_i^{PA} = x_i^{HMC} \pm BW \\ \quad \quad \quad w.p. HMCR \times PAR \end{cases} \quad (2)$$

이후 New HM과 HM을 목적함수에 대한 값으로 나열하여 나쁜 값을 우선순위로 HM size를 초과하는 만큼 제거하여 HM size를 일정하게 유지한다. 이와 같은 과정을 반복하여 최적값을 탐색하고 초기값 설정 단계에서 설정된 반복횟수에 도달하거나 종료조건에 도달하는 경우 최종 업데이트된 HM에서 목적함수에 대한 값이 가장 좋은 설계변수를 최적값으로 제시하게 된다.

본 연구에서는 하모니 서치 방법을 이용하여 사장교를 구성하는 부재단면을 결정하기 위하여 부재 단면 치수를 설계변수로 설정하였으며, 사장교의 제원 및 지간과 주탑높이 변화에 따라 한계상태설계법을 바탕으로 제약조건을 설정하였다. 또한 결정된 단면이 충분한 신뢰성을 가지도록 반복횟수 도달에 의한 종료되지 않고 종료조건을 만족하는 경우 종료되도록 반복횟수를 충분히 크게 설정하였으며, 종료조건은 제약조건을 만족하는 New HM을 100번 찾는 동안 최적값이 변화하지 않는 경우 하모니 서치 알고리즘이 종료되도록 하였다. 추가적으로 최적값으로 도달할수록 특정부재가 항복에 도달하지 않는 경우의 수가 증가하게 될 것이므로 특정부재가 제약조건을 만족하지 않고 제외되어 New HM을 찾지 못하고 무한히 반복되는 것을 방지하기 위하여 New HM이 제약조건을 만족하지 않아 제외되는 경우가 연속적으로 100번 반복되는 경우에도 종료되도록 하였다. 따라서 최종적으로 제시되는 최적값은 하모니 서치 알고리즘을 통하여 생성된 설계변수 중 한계상태설계법에 따른 제약조건을 만족하며 목적함수에 따른 값이 최적인 설계변수가 결정되도록 하였다.

2.2 제약조건 및 목적함수

본 연구에서는 하모니 서치 알고리즘의 제약조건으로 한계상태설계법을 바탕으로 하중저항능력과 사용성에 대한 제약조건식을 적용하였다. 목적함수로는 구조물의 전체 중량을 고려하였으며, 보강거더와 가로보 단면의 폭과 높이의 비율을 추가적인 제약조건으로 고려하여 합리적인 최적단면이 결정될 수 있도록 하였다.

2.2.1 사장교 구성 단면 결정을 위한 단면 결정 제약조건

하모니 서치 알고리즘에서 적용된 제약조건은 한계상태설계법에 따른 설계강도에 따라 검토되도록 적용하였으며, 각 부재의 하중조건에 대한 하중저항능력과 차량하중에 대한 처짐 수준을 고려하여 사용성이 검토되도록 하였다. 또한 각 한계상태에 따른 하중계수는 강구조 부재 설계기준(한계상태설계법, KDS 14 31 10, 2017)과 강교 설계기준(한계상태설계법, KDS 24 14 31, 2018)에 따라 적용하였다. 추가적으로 구조적 측면에서 불합리한 설계단면을 제외하고 안정성이 높은 단면을 결정할 수 있도록 보강거더와 가로보의 폭과 높이 비율을

제약조건으로 검토하여 Eq. (3)을 만족하도록 적용하였다.

$$W_b \geq 0.5 W_g \quad (3a)$$

$$H_b \geq 0.5 H_g \quad (3b)$$

여기서, W_b 와 H_b 는 가로보의 폭과 높이를 의미하며, W_g 와 H_g 는 보강거더의 폭과 높이를 의미한다. 따라서 가로보가 보강거더와 비교하여 상대적으로 매우 작은 단면으로 결정되는 설계변수를 제외되도록 하였으며, 보강거더와 가로보가 합리적인 하중저항거동을 할 수 있도록 하였다.

2.2.2 경제성을 고려한 단면 결정 목적함수

본 연구에서 적용된 하모니 서치 알고리즘은 강사장교에 대한 부재 단면 결정이 목적이므로 설계하중에 대한 충분한 하중저항능력을 가지면서 경제성과 고정하중조건 측면에서 유리한 설계변수가 선택될 수 있도록 목적함수를 구조물의 전체 중량을 고려하였으며, 이는 Eq. (4)와 같이 나타낼 수 있다. 따라서 하모니 서치 알고리즘을 통해 결정되는 각 부재 단면변수는 제약조건을 만족하며 목적함수인 구조물의 전체 중량이 최소가 되는 설계변수가 선정되도록 하였다.

$$T.W. = \rho_p \left[\sum_{i=1}^{N_p} (V_p)_i \right] + \rho_g \left[\sum_{i=1}^{N_g} (V_g)_i \right] + \rho_b \left[\sum_{i=1}^{N_b} (V_b)_i \right] + \rho_c \left[\sum_{i=1}^{N_c} (V_c)_i \right] \quad (4)$$

여기서, $T.W.$ 는 구조물 전체의 중량을 의미하며, $(V)_i$ 는 i 번째 부재의 체적, N 은 부재의 개수, ρ 는 단위 체적당 중량을 의미한다. 또한, 아래첨자 p, g, b, c 는 각각 주탑, 보강거더, 가로보, 케이블 부재를 의미한다.

2.3 사장교 구성 단면 결정을 위한 비선형 해석기법

본 연구에서는 한계상태설계법에 의한 제약조건을 검토하기 위하여 사장교 부재의 소요강도를 비선형 해석을 통하여 고려하였으며, 주탑과 보강거더 및 가로보 부재는 각각의 작용모멘트 및 응력 수준을 파악할 수 있도록 하였고, 인장력에 저항하는 케이블 부재의 경우 케이블 새그효과를 고려할 수 있도록 하였다.

2.3.1 주탑 및 보강거더, 가로보 비선형성

사장교를 구성하는 주탑과 보강거더, 가로보의 기하학적인 비선형성을 고려하기 위하여 안정함수를 사용하였으며, 안정함

수는 축방향력의 수준이 휨 강성 변화에 미치는 영향을 고려하기 위한 함수로써 각 부재를 하나 또는 두 개의 요소로 이상화한 프레임 요소에서 기하학적 비선형성을 효과적으로 고려할 수 있는 방법이다(Kim et al., 2003). 이는 부재의 축방향에 직교하는 y, z 축에 대하여 축방향력이 압축인 경우와 인장인 경우를 구분하여 고려할 수 있으며 Eq. (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$P < 0$ 일 경우 (축방향력이 압축력인 경우)

$$S_{1,3} = \frac{\pi \sqrt{\rho} \sin(\pi \sqrt{\rho}) - \pi^2 \rho \cdot \cos(\pi \sqrt{\rho})}{2 - 2\cos(\pi \sqrt{\rho}) - \pi \sqrt{\rho} \sin(\pi \sqrt{\rho})} \quad (5a)$$

$$S_{2,4} = \frac{\pi^2 \rho - \pi \sqrt{\rho} \sin(\pi \sqrt{\rho})}{2 - 2\cos(\pi \sqrt{\rho}) - \pi \sqrt{\rho} \sin(\pi \sqrt{\rho})} \quad (5b)$$

$P > 0$ 일 경우 (축방향력이 인장력인 경우)

$$S_{1,3} = \frac{\pi^2 \rho \cdot \cosh(\pi \sqrt{\rho}) - \pi \sqrt{\rho} \sinh(\pi \sqrt{\rho})}{2 - 2\cosh(\pi \sqrt{\rho}) + \pi \sqrt{\rho} \sinh(\pi \sqrt{\rho})} \quad (5c)$$

$$S_{2,4} = \frac{\pi \sqrt{\rho} \sinh(\pi \sqrt{\rho}) - \pi^2 \rho}{2 - 2\cosh(\pi \sqrt{\rho}) + \pi \sqrt{\rho} \sinh(\pi \sqrt{\rho})} \quad (5d)$$

여기서, S_1 과 S_2 는 부재의 y 축에 대한 단부 모멘트와 비틀림에 대한 안정함수로 $\rho = \rho_y = P/(\pi^2 EI_z/L^2)$ 를 적용하며, S_3 과 S_4 는 부재의 z 축에 대한 $\rho = \rho_z = P/(\pi^2 EI_y/L^2)$ 를 적용한다. 또한 잔류응력을 가지는 재료의 탄성구간~소성구간의 점진적인 항복과정을 고려할 수 있도록 Eq. (6)과 같이 CRC 접선계수를 적용하여 하중 수준에 따라 강성이 점진적으로 항복에 도달하는 과정을 고려하였다(Chen and Lui, 1992).

$$P \leq 0.5 P_y \text{인 경우: } E_t = 1.0 E \quad (6a)$$

$$P > 0.5 P_y \text{인 경우: } E_t = 4 \frac{P}{P_y} \left(1 - \frac{P}{P_y}\right) E \quad (6b)$$

CRC 접선계수는 축방향력을 받는 부재의 점진적 항복과정을 고려하기에는 적절하지만, 축방향력과 휨을 동시에 받는 부재에 적용하기에는 부적절할 수 있다. 따라서, 축방향력과 휨을 동시에 받는 부재의 탄성구간~완전소성구간까지의 점진적인 항복거동을 고려할 수 있도록 Eq. (7)과 같이 연화소성힌지(Softening plastic hinge)를 사용하였다.

$$\alpha \leq 0.5 \text{인 경우: } \eta = 1 \quad (7a)$$

$$\alpha > 0.5 \text{인 경우: } \eta = 4\alpha(1 - \alpha) \quad (7b)$$

여기서, α 는 단면에 작용하는 부재력 수준을 나타내는 함수이며, 강구조 부재 설계기준(한계상태설계법, KDS 14 31 10, 2017)에서는 2축 대칭단면에 대하여 축방향력과 휨의 상관관계를 Eq. (8)과 같이 제시하고 있다.

$$\frac{P}{P_y} \geq 0.2 \text{인 경우} : \alpha = \frac{P}{P_y} + \frac{8}{9} \frac{M_y}{M_{yp}} + \frac{8}{9} \frac{M_z}{M_{zp}} \quad (8a)$$

$$\frac{P}{P_y} < 0.2 \text{인 경우} : \alpha = \frac{P}{2P_y} + \frac{M_y}{M_{yp}} + \frac{M_z}{M_{zp}} \quad (8b)$$

여기서 P 와 P_y 는 축방향에 대한 소요강도와 설계강도이며, M_y , M_z 는 y 축과 z 축에 대한 소요휨강도를 의미하고 M_{yp} , M_{zp} 는 설계휨강도를 의미한다. 또한, 전단변형의 영향은 휨과 전단에 대한 유연도 행렬을 더하여 휨과 함께 고려할 수 있도록 하였으며, 연화소성현지와 전단변형을 함께 고려할 경우 부재 강성행렬의 휨과 비틀림에 대한 요소는 Eq. (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$C_{ii} = \frac{k_{ii}k_{jj} - k_{ij}^2 + k_{ii}A_s GL}{k_{ii} + k_{jj} + 2k_{ij} + A_s GL} \quad (9a)$$

$$C_{ij} = \frac{-k_{ii}k_{jj} + k_{ij}^2 + k_{ij}A_s GL}{k_{ii} + k_{jj} + 2k_{ij} + A_s GL} \quad (9b)$$

$$C_{jj} = \frac{k_{ii}k_{jj} - k_{ij}^2 + k_{jj}A_s GL}{k_{ii} + k_{jj} + 2k_{ij} + A_s GL} \quad (9c)$$

여기서, A_s 는 전단 면적을 의미하고 G 는 전단탄성계수, L 은 부재 길이를 의미한다. 연화소성현지를 고려한 k_{ii} , k_{ij} , k_{jj} 는 Eq. (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$k_{ii} = \eta_A \left[S_{1,3} - \frac{S_{2,4}^2}{S_{1,3}} (1 - \eta_B) \right] \frac{E_t I}{L} \quad (10a)$$

$$k_{ij} = \eta_A \eta_B S_{2,4} \frac{E_t I}{L} \quad (10b)$$

$$k_{jj} = \eta_B \left[S_{1,3} - \frac{S_{2,4}^2}{S_{1,3}} (1 - \eta_A) \right] \frac{E_t I}{L} \quad (10c)$$

여기서, E_t 는 Eq. (6)에 따라 결정되는 축방향력에 대한 접선

탄성계수이며, I 는 단면 2차 모멘트, L 은 부재 길이를 의미한다. S_1 , S_2 는 Eq. (5)에 따른 y 축에 대한 안정함수이고 S_3 , S_4 는 Eq. (5)에 따른 z 축에 대한 안정함수이며, η_A 와 η_B 는 부재의 양쪽 단부에서의 부재력 수준에 따라 Eq. (7)로 결정되는 연화소성현지 함수로써, $\eta = 1$ 인 경우 탄성상태를 의미하고 $0 < \eta < 1$ 인 경우 부분적으로 항복상태임을 의미한다. 이와 같이 기하학적 비선형성과 연화소성현지 및 전단변형이 고려된 부재 강성행렬 $[K_{ef}]$ 는 힘 벡터 $\{f_e\}$ 와 변위 벡터 $\{d_e\}$ 와 함께 1 절점 요소좌표계에서 Eq. (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\{f_e\} = [K_{ef}]\{d_e\} \quad (11)$$

2.3.2 케이블 비선형성

케이블 부재의 인장 저항 특성과 자중 및 장력으로 인한 새그(Sag)효과를 비선형해석 과정에서 고려할 필요가 있다. 케이블의 축방향 강성은 케이블 새그의 크기에 영향을 받으므로 새그와 비선형성을 고려한 사장교의 경사 케이블 강성행렬은 등가탄성계수를 가지는 직선 케이블 요소로 적용할 수 있다(Wang et al., 1993). 등가탄성계수는 Ernst가 제안한 개념으로(Ernst, 1965) 하중 재하 전 케이블 도입 장력을 고려한 접선탄성계수(Fleming, 1979)와 하중재하 전후의 장력을 함께 고려한 활선탄성계수(Gimsing, 2012; Nazmy and Abdel-Ghaffar, 1990)를 이용한 방법이 있으며, 본 연구에서는 활선탄성계수를 이용하였고, 활선탄성계수는 Eq. (12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$E_{eq} = E_s = \frac{E}{1 + \frac{w^2 l^2 (T_0 + T_1)}{24 T_0^2 T_1^2} EA} \quad (12)$$

여기서, E_{eq} 와 E_s 및 E 는 케이블 부재의 등가탄성계수와 활선(Secant)탄성계수와 재료 탄성계수이며, A 는 케이블의 단면적, w 는 케이블의 단위중량, l 은 케이블 수평 길이를 의미하고, T_0 와 T_1 은 하중 재하 전후의 케이블에 도입되는 인장력을 의미한다. 따라서, 하중 증분에 따른 케이블 도입장력 증가에 따라 등가탄성계수가 증가하여 케이블의 강성이 증가하는 것을 반영할 수 있도록 하였다. 이와 같이 구성된 케이블 부재의 강성행렬 $[K_{ec}]$ 는 1절점 요소좌표계에서 힘 벡터 $\{f_e\}$, 변위 벡터 $\{d_e\}$ 와 함께 Eq. (13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\{f_e\} = [K_{ec}]\{d_e\} \quad (13)$$

2.4 사장교 구성 단면 결정을 위한 하모니 서치 알고리즘의 단면 탐색과정

하모니 서치 알고리즘을 이용하여 사장교 부재의 단면이 결정되는 과정을 Fig. 1에 나타내었다. 하모니 서치 알고리즘을 통하여 결정된 부재 설계 변수는 Fig. 1과 같이 보강거더와 가로보의 비율을 검토하여 불필요한 반복을 줄일 수 있도록 하였으며, 비율 검토 후 선정된 각 부재 단면을 고정하중조건에서 초기형상해석을 수행하여 케이블 초기장력과 이로 인한 구조형상이 도출되도록 하였다. 초기형상해석은 최초의 설계형상에 대하여 단면변수에 따라 변화할 수 있는 케이블의 장력과 구조형상을 고려하기 위한 것이며, 최초의 설계형상에 대하여 고정하중에 대한 비선형해석을 하중에 따라 나타나는 초기장력과 구조형상을 기준으로 반복적으로 수행하여 설계형상을 기준으로 절점변위의 합이 허용치 이내인 경우 종료되도록 하였다. 이를 통하여 사장교의 설계형상과 유사한 구조형상과 케이블 장력을 비선형해석에 반영하여, 설계하중조건에 대한 비선형해석과정에서 케이블 장력에 따른 등가탄성계수와 구조형상을 고려할 수 있도록 하였다(Song et al., 2005; Kim et al., 2010). 이후 설계하중에 대한 비선형해석을 수행하고 각 부재의 제약조건을 검토하여, 모든 조건을 만족하는 설계변수를 탐색하도록 하였다.

이와 같은 과정을 반복하여 목적함수인 구조물의 전체 중량과 사장교 부재의 단면이 설계변수로 HM에 저장되도록 하였으며, New HM으로써 HM 업데이트 과정에서는 동일한 과정을 반복하여 제약조건을 만족하는 변수를 도출하고 목적함수인 전체 중량을 비교하여 기존의 HM보다 큰 중량을 가지는

설계변수는 제외되도록 하여 최적값을 탐색할 수 있도록 하였다. 마지막으로 최적값에 근접하여 탐색을 계속해도 HM에 저장된 목적함수가 갱신되지 않거나 부재 중량 감소로 인하여 연속적으로 제약조건을 만족하지 않는 경우에 대한 종료조건을 설정하였으며, 두 가지 종료조건을 구분하여 연속적으로 100회 이상 HM이 업데이트 되지 않는 경우 종료되고 종료시의 최적값이 사장교 부재 단면으로 결정되도록 하였다.

3. 사장교 구성 부재 단면 결정을 위한 하모니 서치 알고리즘의 적용성 검토

3.1 대상 강사장교 제원

하모니 서치 알고리즘을 이용한 3차원 강사장교의 부재단면 결정을 위하여 각 부재단면 변수를 하모니 서치 알고리즘을 통하여 결정되도록 하였다. 부재단면 결정을 위한 3차원 강사장교의 제원은 Fig. 2에 나타낸 것과 같이 2주탑 사장교 제원을 적용하였으며, 케이블은 주탑과 보강거더에 핀(pin)으로 연결되어 있는 것으로 가정하였다. 주요 부재의 단면 형상은 주탑과 보강거더는 강박스 단면, 가로보는 H형강으로 적용하였고 케이블 부재는 원형 단면으로 적용하였다. 주요 부재의 단면 제원은 하모니 서치 알고리즘을 통하여 단면 제원에 따른 단면 특성이 반복하여 계산되도록 하였다. 주탑의 단면제원은 단면의 높이와 폭의 비율을 고려할 수 있도록 하였고, 가로보의 단면제원은 하모니 서치 알고리즘을 통한 결정과정에서 보강거더의 폭과 높이의 비율을 고려하여 0.5이상의 비율을 가지는 단면치수가 결정되도록 하였다. 또한 각 부

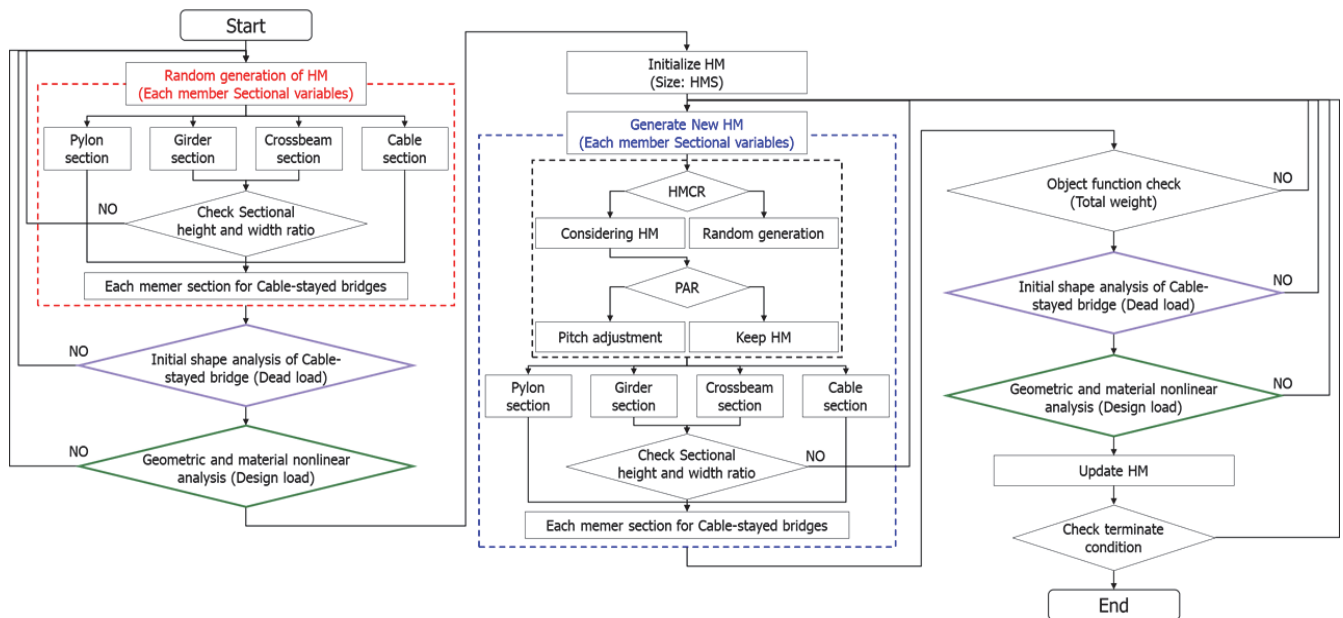


Fig. 1 Flow chart of each member cross-section optimization for cable-stayed bridge using the Harmony Search Algorithm

재단면 결정에 영향을 미칠 수 있는 변수로 케이블 새그 및 자중변화에 의한 부재 응력 수준변화를 고려하여 사장교의 주탑 높이와 지간변화를 변수로 고려하였다. 주탑의 높이는 34.4m ~ 51.6m로 변화시켰고, 지간 길이는 204m ~ 306m로 변화시켜 이에 따른 부재응력 수준변화에 따라 설계단면이 결정될 수 있도록 하였다. 고려된 변수는 Table 1에 정리하여 나타내었다. 또한 각 사장교 제원에 따른 고정하중조건에 대한 초기형상해석과 설계하중조건에 대한 비선형해석과정에서 적용된 사장교 부재의 재료특성은 주탑, 보강거더, 가로보는 탄성계수 210,000MPa와 항복강도 275MPa를 적용하였고, 케이블은 탄성계수 210,000MPa와 항복강도 1,600MPa를 적용하였고, 하모니 서치 알고리즘에 적용된 메모리 채택비(HMCR)는 0.7, 피치조정비(PAR)는 0.3으로 적용하였고, BW는 각 부재의 제작오차 수준을 고려하여 0.5mm 수준으로 단면치수가 변화할 수 있도록 적용하였다.

Table 1 Main design variables for 3D Cable-stayed bridge

Span length (m)	Pylon height (m)
204.0	34.4
	43.0
	51.6
255.0	34.4
	43.0
	51.6
306.0	34.4
	43.0
	51.6

3.2 대상 강사장교 기하 및 재료 비선형 해석

3.2.1 사장교 고정하중조건에 따른 초기형상해석

초기형상해석은 사장교의 케이블 새그효과, 초기장력 및 이로 인해 변화된 구조형상을 부재 단면 결정을 위한 비선형 해석에 반영하기 위하여 수행되었다. Fig. 3과 같이 하모니 서치 알고리즘을 통하여 결정된 부재별 단면 변수에 따라 변화하는 케이블 새그효과와 초기장력 및 구조형상이 비선형 해석에 반영되어야 하므로 각 단면변수마다 수행되었다. 또한 사장교 제원과 부재 단면에 따라 변화하는 고정하중에 대한 초기형상해석이므로 각 단면변수마다 고정하중이 계산되도록 하였다. 고정하중 계산과정에서 추가적인 하중효과를 고려하기 위하여 1.1배를 적용하고, 하중계수는 1.25(KDS 24 12 11, 2021)를 사용하였다. 초기형상해석의 종료조건은 Eq. (9)에 따라 절점 변위의 합이 0.2m가 되는 경우 종료되고 이 때의 케이블 장력 및 구조형상이 비선형 해석의 케이블 초기 장력과 초기형상으로 입력되어 초기장력에 따른 케이블의 등가탄성계수와 사장교의 구조형상이 비선형해석에 반영되도록 하였다.

3.2.2 사장교의 설계하중조건에 따른 비선형 해석

비선형해석과정에서 적용된 설계하중은 교량 설계하중조합(한계상태설계법, KDS 24 12 21, 2021)에 따라 다양한 하중조건이 적용될 수 있으나 본 연구는 하모니 서치 방법에 대한 단면결정이 주요목적이므로 극한한계상태 하중조합1에서 대상 사장교에 고려할 수 있는 하중조건을 적용하였다. 적용된 설계하중조건은 가장 큰 하중효과가 나타나는 경우를 고려하여 차로하중은 지간 전체에 적용하였으며, 차량 축 하중은 지간의 중심에 적용하였다. 고정하중은 하모니 서치 알고리즘을 통하여 결정되는 단면에 따라 변화하며 반복될 때 마다 계

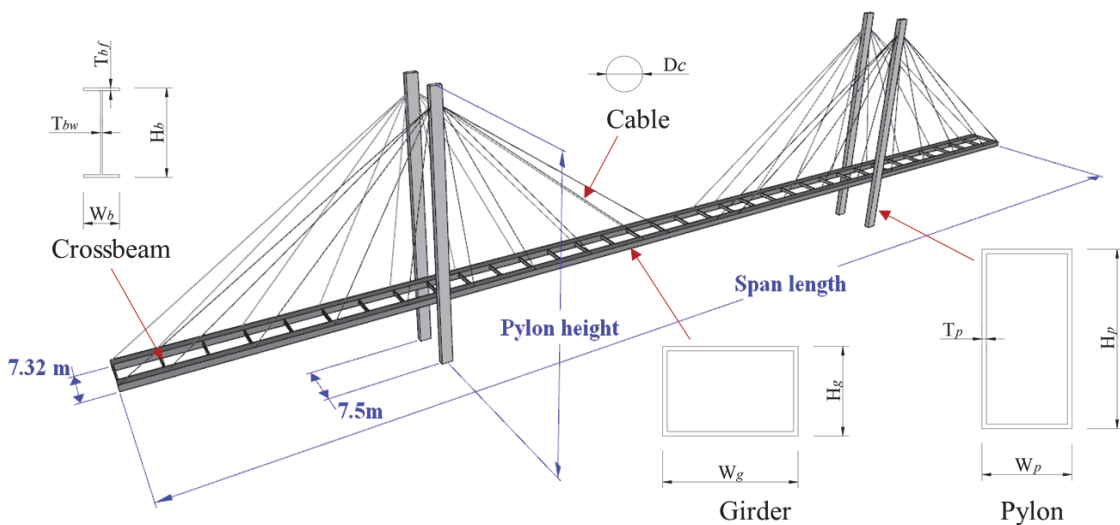


Fig. 2 Detail of steel cable-stayed bridge for each member cross-section optimization

산되고 하중계수는 교량 설계하중(한계상태설계법, KDS 24 12 11)에 따라 한계상태를 구분하여 적용되도록 하였으며, 이동하중은 차량 축 하중(KL-510)과 차로하중을 적용하고 교량 설계하중(한계상태설계법, KDS 24 12 11)에 따라 이동하중 계수와 충격하중계수, 2차로구분에 따른 하중계수를 한계상태에 따라 적용하였다. 이와 같은 비선형해석결과로 나타나는 각 부재의 작용 부재력은 Fig. 4와 같이 제약조건을 검토할 수 있도록 하였으며 제약조건을 만족하지 않는 경우에는 해당 변수를 제외하고 하모니 서치 알고리즘을 통하여 새로운 변수를 설정하고 초기형상해석부터 비선형해석까지 반복하여 제약조건을 만족하는 변수를 도출하도록 하였으며, 도출된 변수는 목적함수에 따른 전체 중량을 검토하여 New HM 업데이트에 반영되도록 하였다.

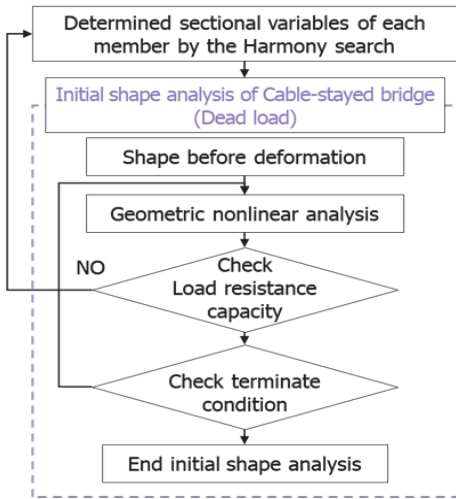


Fig. 3 Flow chart of initial shape analysis in dead load

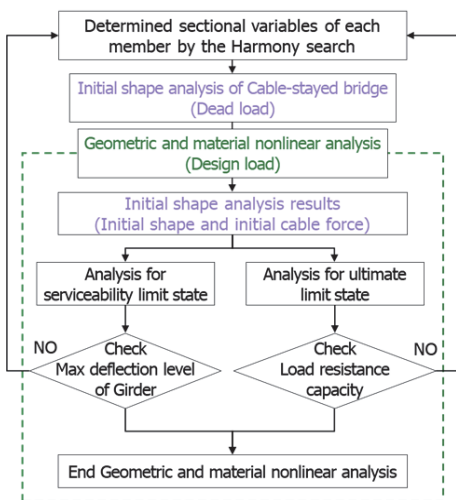
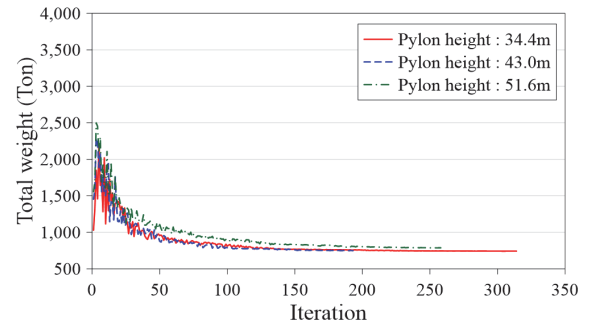


Fig. 4 Flow chart of geometric and material nonlinear analysis in design load

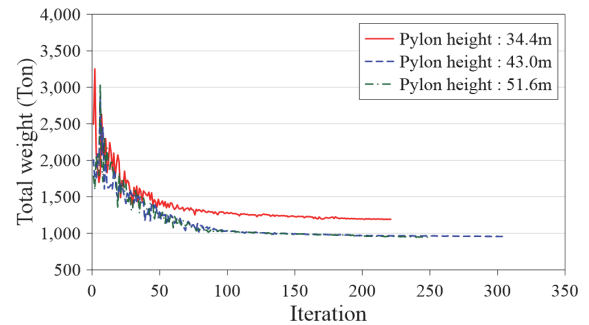
4. 강사장교 구성 부재 단면 최적화 결과

4.1 사장교 구성 부재 단면 최적화를 위한 하모니 서치 알고리즘 적용 결과

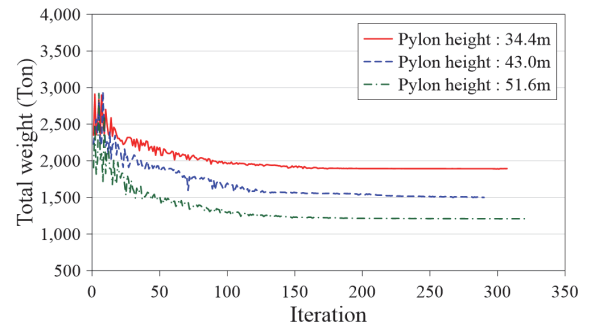
하모니 서치 알고리즘을 이용한 사장교의 부재 단면 결정을 위하여 시간 및 주탑 높이 변화에 따라 변화하는 부재 단면 결정을 위한 반복횟수(Iteration)는 Fig. 5와 같이 시간 및 주탑 높이 변화에 따라 변화하였으며, 평균적으로 약 273회 수준에서 각 부재의 최적 단면이 결정되었다. 반복회수의 경우 시간 변화 및 주탑높이 변화와 단면 부재 제원 범위에 따라 감소하거나 증가할 수 있을 것이다. 이는 단면 변수가 각 부재의 제원으로 적용되고, 모든 제약조건을 만족하는 부재 단면을 결정하는 과정에서 각 변수가 서로 영향을 미치며 가능해의 영역



(a) Span length : 204.0m



(b) Span length : 255.0m



(c) Span length : 306.0m

Fig. 5 Iteration numbers using Harmony search algorithm for Cable-Stayed bridge Sectional determination

내에서 해를 찾는 과정은 확률론적인 방법에 의하여 결정되기 때문인 것으로 판단된다. 이는 케이블 부재만을 제한적으로 결정한 사례와 비교하여 상대적으로 고려되는 전체 변수가 증가하였고 이에 따라 제약조건을 만족하지 않는 해의 범위도 증가하였으므로 동일한 반복횟수에서 제약조건을 만족하는 가능해를 탐색하는 시간이 상대적으로 증가하는 것으로 평가되었다(Ma et al., 2024). 또한, 지간의 길이가 길고 주탑의 높이가 낮은 경우 보강거더에 작용하는 압축력이 증가함에 따라 좌굴에 대한 설계기준을 만족하지 못하는 변수가 상대적으로 많아지므로 해를 탐색하는 시간이 상대적으로 증가하는 것으로 판단되었고 Fig. 5와 같이 해를 반복적으로 탐색하여 목적함수인 중량이 최적값에 근사하며, 최적값은 각 사장교의 설치조건에 따라 다양하게 나타나는 것을 알 수 있다.

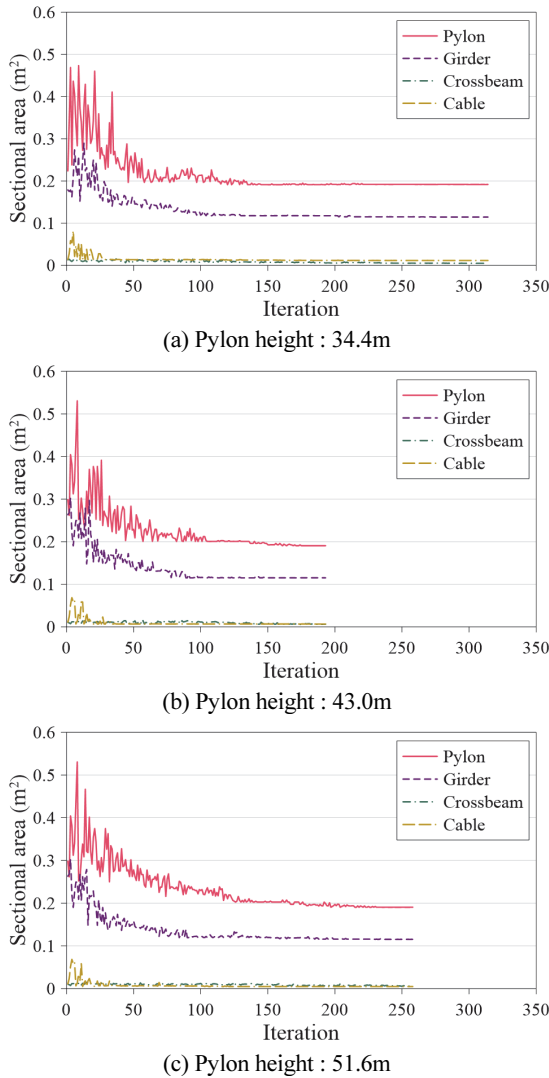


Fig. 6 Sectional area change by Design variables (Span length : 204.0m)

4.2 설계변수에 따른 사장교 구성 단면 결과 분석

하모니 서치 알고리즘을 통하여 생성되는 강사장교의 각 부재 단면 최적화 과정을 비교하기 위하여 반복횟수에 따라 생성된 각 부재의 단면적을 강사장교의 지간길이에 따라 구분하여 비교하였고 대표적으로 지간 204.0m의 부재 단면적을 Fig. 6에 나타내었다. 또한 각 조건에 따른 설계기준 대비 부재력 수준은 Fig. 7에 나타내었으며, 하모니 서치 알고리즘을 통하여 도출된 각 조건별 부재 단면체원과 설계강도 대비 부재응력 수준(f_{max}/f_{design})을 Table 2, Table 3, 그리고 Table 4에 정리하여 나타내었다. 각 부재는 반복횟수가 증가함에 따라 단면적이 감소하며, 설계기준에 따른 제약조건을 만족하는 가능해 영역에서 각 부재의 단면적 수준에 따라 상대적인 변동 폭이 차이가 나는 것을 알 수 있으며 모든 조건에서 유사

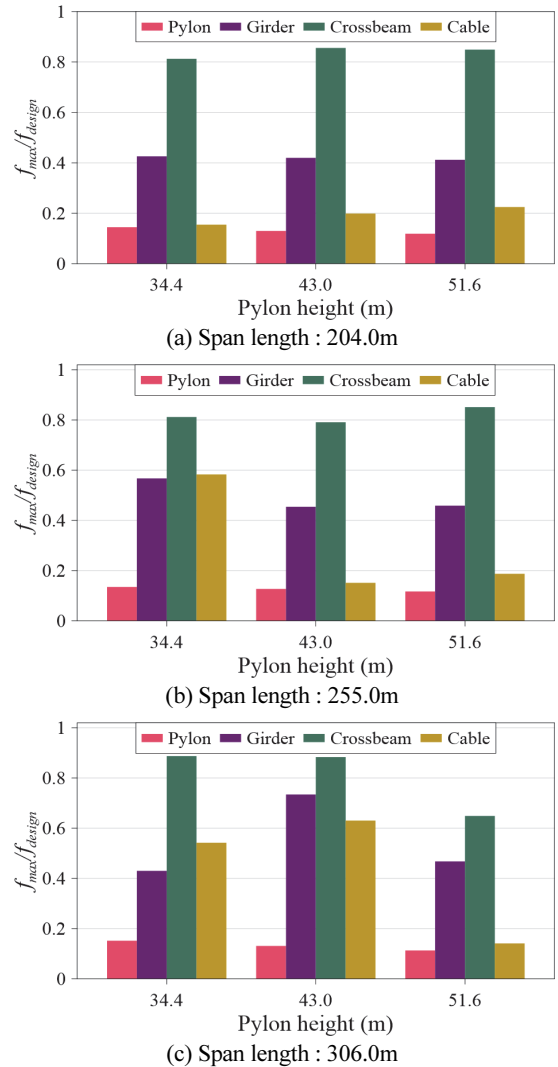


Fig. 7 f_{max}/f_{design} change by Design variables

Table 2 Main design variables for Steel Cable-stayed bridge in span length 204.0m

Span length (m)	Pylon height (m)	Each member section detail			f_{max} f_{design}
		Member	Type	Dimension (mm)	
204.0	34.4	Pylon	Box	1001.5×1016×50	0.145
		Girder	Box	504.5×1004.5×40	0.426
		Crossbeam	H-beam	301.5×104.5×8/12	0.813
		Cable	Cable	121	0.155
	43.0	Pylon	Box	1004×1000×50	0.130
		Girder	Box	503.5×1015×40	0.420
		Crossbeam	H-beam	302×130×8/12	0.856
		Cable	Cable	91	0.199
	51.6	Pylon	Box	1004.5×1000.5×50	0.119
		Girder	Box	514×1009×40	0.412
		Crossbeam	H-beam	302.5×125×8/12.5	0.849
		Cable	Cable	78	0.225

Table 3 Main design variables for Steel Cable-stayed bridge in span length 255.0m

Span length (m)	Pylon height (m)	Each member section detail			f_{max} f_{design}
		Member	Type	Dimension (mm)	
255.0	34.4	Pylon	Box	1415×1366×50	0.135
		Girder	Box	527×1246×40	0.567
		Crossbeam	H-beam	318×138.5×8/17	0.812
		Cable	Cable	170.5	0.583
	43.0	Pylon	Box	1005×1003×50	0.127
		Girder	Box	547×1009×40	0.454
		Crossbeam	H-beam	315.5×159×8/14.5	0.791
		Cable	Cable	125.5	0.151
	51.6	Pylon	Box	1008×1000.5×50	0.117
		Girder	Box	543×1010.5×40	0.459
		Crossbeam	H-beam	306.5×139.5×8.5/15	0.851
		Cable	Cable	98	0.187

한 경향을 보였다. 주탑의 단면은 지간이 길고 주탑이 낮을수록 케이블 새그량 증가 및 보강거더 자중 증가에 따른 주탑 압축력 증가로 인하여 단면적이 증가하는 것으로 나타났다. 보강거더와 가로보 단면은 지간이 길수록 케이블간 간격 증가 및 자중 증가에 따라 처짐 수준이 증가하고 단면적도 증가하는 것으로 나타났다. 동일한 지간에서는 주탑의 높이가 낮을수록 케이블 새그량 증가에 따라 단면적도 증가하는 것으로 확인되었다. 또한 케이블 부재의 단면은 주탑이 낮고, 지간이

Table 4 Main design variables for Steel Cable-stayed bridge in span length 306.0m

Span length (m)	Pylon height (m)	Each member section detail			f_{max} f_{design}
		Member	Type	Dimension (mm)	
306.0	34.4	Pylon	Box	1563×1505×50	0.152
		Girder	Box	760.5×1523.5×40	0.430
		Crossbeam	H-beam	591×188.5×10/18.5	0.887
		Cable	Cable	231	0.542
	43.0	Pylon	Box	1476.5×1408.5×50	0.131
		Girder	Box	594.5×1420×40	0.734
		Crossbeam	H-beam	325×130×9/20	0.883
		Cable	Cable	156.5	0.630
	51.6	Pylon	Box	1000×1003.5×50	0.113
		Girder	Box	595×1007×40	0.468
		Crossbeam	H-beam	303×218.5×8/12	0.649
		Cable	Cable	137	0.141

길수록 케이블 새그량이 증가하게 되므로 이에 따라 케이블의 단면제원도 증가하는 것으로 나타났다. 특히 지간이 가장 짧고 주탑 높이가 가장 높은 지간 204.0m, 주탑 높이 51.6m의 강사장교와 비교하여 상대적으로 지간이 길고 주탑 높이는 낮은 지간 255.0m, 주탑 높이 34.4m인 강사장교와 지간 306.0m, 주탑 높이 34.4m 및 43.0m인 강사장교의 경우에는 단면적도 상대적으로 크게 나타났으며 케이블에 작용하는 응력 수준(f_{max}/f_{design})도 설계강도 대비 50% 이상까지 증가하는 것으로 나타났다. 이는 사장교의 거동특성에 따라 보강거더의 압축력 수준이 크게 증가하며, 이로 인한 보강거더의 단면제원 증가에 따른 고정하중 증가 등으로 인하여 케이블의 인장력도 증가한 것으로 판단되었다. 이를 통해 사장교의 비선형 거동 특성을 고려한 검토가 가능함을 알 수 있으며 부재의 응력 수준을 함께 고려할 경우 합리적인 설계단면을 결정할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구는 강사장교 주요 부재인 주탑, 보강거더, 가로보, 케이블의 최적 단면 결정을 위한 방법으로 강사장교의 비선형거동과 하모니 서치 알고리즘을 이용하였다. 단면 결정과정에서 선택된 사장교 단면에 대한 초기형상해석을 수행하고, 설계 하중 조건 및 사용성 조건과 부재 단면의 비율 등을 사장교 부재 단면결정을 위한 제약조건으로 고려하였다. 본 연구에서 얻은 결과를 다음과 같이 정리하였다.

- (1) 강사장교 부재 단면 결정과정에서 단면 최적화를 위한 반복횟수가 증가함에 따라 각 부재의 단면적이 변화하였으며, 설계기준에 따른 제약조건을 만족하는 가능해 영역에서 사장교의 비선형 거동과 각 부재의 단면적 수준에 따라 변화하여 최적 단면에 가까워지고 있음을 확인하였다.
- (2) 강사장교 단면 결정을 위한 목적함수로 구조물의 전체 중량을 적용함으로써 제시된 부재 단면들은 사장교 전체의 경제성에 기초한 최적 단면에 근사하고 있음을 알 수 있다.
- (3) 케이블과 보강거더가 이루는 배치형태에 따라 상대적으로 지간이 짧고 주탑 높이가 가장 높은 사장교와 지간이 길고 주탑 높이가 가장 낮은 사장교를 비교할 때, 케이블에 작용하는 인장력 및 케이블과 연결된 보강거더에 작용하는 압축력이 증가함에 따라 보강거더 및 케이블의 단면제원도 증가하는 것으로 나타났다. 또한 부재 응력 수준도 크게 증가함을 확인하였으며 이를 통하여 비선형성을 고려한 사장교 부재 단면제원을 하모니 서치 기법을 통하여 결정할 수 있음을 확인하였다.

사장교 부재 단면 결정에 대한 신뢰성과 적용성 측면에서 설계단면의 범위나 부재비를 고려한 제약조건 등이 추가적으로 고려된다면 상대적으로 합리적인 사장교 부재 단면을 결정할 수 있을 것으로 판단된다.

References

1. Ren, W.-X. (1999), Ultimate Behavior of Long-Span Cable-Stayed Bridges, *Journal of Bridge Engineering*, ASCE, 4(1), 30-37.
2. Kim, H.-J., Won, D. H., Kang, Y.-J., and Kim, S. (2017), Structural Stability of Cable-stayed Bridges During Construction, *International Journal of Steel Structures*, Springer, 17(2), 443-469.
3. Cong, Y., and Kang, H. (2019), Planar nonlinear dynamic behavior of a cable-stayed bridge under excitation of tower motion, *European Journal of Mechanics - A/Solids*, ELSEVIER, 76, 91-107.
4. Song, W.-K., Kim, S.-E., and Ma, S. S. (2005), Initial Shape Determination of Steel Cable-Stayed Bridges Using Nonlinear Analysis, *KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research*, Korean Society of Civil Engineers, 25(1A), 73-79 (in Korean).
5. Kim, S., Lee, K. S., Kim, K. S., and Kang, Y.J. (2010), Analytical Study of Geometric Nonlinear Behavior of Cable-stayed Bridges, *KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research*, Korean Society of Civil Engineers, 30(1A), 1-13 (in Korean).
6. Song, Y.-H., and Kim, M.-Y. (2011), Practical Determination Method of Initial Cable Forces in Cable-Stayed Bridges, *Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea*, Computational Structural Engineering Institute of Korea, 24(1), 87-95 (in Korean).
7. Wu, J., Frangopol, D. M., and Soliman, M., (2015), Geometry control simulation for long-span steel cable-stayed bridges based on geometrically nonlinear analysis, *Engineering Structures*, ELSEVIER, 90, 71-82.
8. Ma, S.-S., Kwon, T.-Y., Lee, W.-H., and Ahn, J.-H. (2024), Determining Cable Cross-Section and Stress Level according to Steel Cable-Stayed Bridge Type Using Harmony Search, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, Korean Society of Steel Construction, 36(2), 121-132.
9. Janjic, D., Pircher, M., and Pircher, H. (2003), Optimization of Cable Tensioning in Cable-Stayed Bridges, *Journal of Bridge Engineering*, ASCE, 8(3), 131-137.
10. Kim, C. H., and Lee, H. S. (2005), Analyses of Initial Equilibrium States of Cable-stayed Bridges by Optimization, *KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research*, Korean Society of Civil Engineers, 25(6A), 1071-1084.
11. Park, D. Y. (2012), A Study for Finding Optimized Cable Forces of Cable Stayed Bridge, *Journal of the Korean Society for Advanced Composite Structures*, Korean Society for Advanced Composite Structures, 3(1), 16-20.
12. Hassan. M. M. (2013), Optimization of stay cables in cable-stayed bridges using finite element, genetic algorithm, and B-spline combined technique, *Engineering Structures*, ELSEVIER, 49, 643-654.
13. Jung, M. R., Park, S. W., Min, D. J., and Kim, M. Y. (2016), A Simplified Analysis Method for Determining an Optimized Initial Shape of Cable-Stayed Bridges, *KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research*, Korean Society of Civil Engineers, 36(6), 947-954.
14. Atmaca, B. Dede, T., and Grzywinski, M. (2020), Optimization of cables size and prestressing force for a single pylon cable-stayed bridge with Jaya algorithm, *Steel and Composite Structures*, Techno-Press, 34(6), 853-862.
15. Zhang, H.-H., Sun, N.-N., Wang, P.-Z., Liu, M.-H., and Li, Y. (2020), Optimization of Cable Force Adjustment in Cable-Stayed Bridge considering the Number of Stay Cable Adjustment, *Advances in Civil Engineering*, Hindawi, 2020, 4527309.
16. Feng, Y., Lan, C., Briseghella, B., Fenu, L., and Zordan, T. (2022), Cable optimization of a cable-stayed bridge based on genetic algorithms and the influence matrix method, *Engineering Optimization*, Taylor & Francis, 54(1), 20-39.
17. Guo, J., and Guan, Z. (2023), Optimization of the cable forces of completed cable-stayed bridges with differential evolution method, *Structures*, ELSEVIER, 47, 1416-1427.
18. Wang, L., Xiao, Z., Li, M., and Fu, N. (2023), Cable Force Optimization of Cable-Stayed Bridge Based on Multiobjective Particle Swarm Optimization Algorithm with Mutation Operation and the Influence Matrix, *Applied Sciences*, MDPI, 13(4), 2611.
19. Geem, Z. W., Kim, J. H., and Loganathan, G. V. (2001), A New Heuristic Optimization Algorithm: Harmony Search, *Simulation: Transaction of The Society for Modeling and Simulation International*, SAGE, 76(2), 60-68.
20. Kim, B.-I., and Kwon, J.-H. (2013), Optimum Design of Truss on Sizing and Shape with Natural Frequency Constraints and Harmony Search Algorithm, *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Korean Society of Ocean Engineers, 27(5), 36-42 (in Korean).

21. Lee, H. M., Yoo, D. G., Lee, E. H., Choi, Y. H., and Kim, J. H. (2016), Development and Applications of Multi-layered Harmony Search Algorithm for Improving Optimization Efficiency, *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, The Korea Academia-Industrial cooperation Society, 17(4), 1-12 (in Korean).
22. Kim, E.-S., Shin, S. S., Kim, Y.-H., and Yoon, Y. (2021) State of the Art Technology Trends and Case Analysis of Leading Research in Harmony Search Algorithm, *Journal of The Korea Convergence Society*, 12(11), 81-90 (in Korean).
23. Geem, Z. W. (2022), Review on Theory and Applications of Harmony Search Algorithm based on Korea Citation Index, *Journal of Korean Institute of Intelligent Systems*, Korean Institute of Intelligent Systems, 32(3), 244-253 (in Korean).
24. Kim, B.-I., and Kwon, J.-H. (2013), Optimum Design of Truss on Sizing and Shape with Natural Frequency Constraints and Harmony Search Algorithm, *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Korean Society of Ocean Engineers, 27(5), 36-42 (in Korean).
25. Kim, B. I. (2015), Optimum Design for Sizing and Shape of Truss Structures Using Harmony Search and Simulated Annealing, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, Korean Society of Steel Construction, 27(2), 131-142 (in Korean).
26. Jung, J.-S., Choi, Y.-C., and Lee, K.-S. (2017), Discrete Optimization of Structural System by Using the Harmony Search Heuristic Algorithm with Penalty Function, *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, Architectural Institute of Korea, 33(12), 53-62 (in Korean).
27. Kim, J. H. (2018), Harmony search algorithm and its application to optimization problems in civil and water resources engineering, *Journal of Korea Water Resources Association*, Korea Water Resources Association, 51(4), 281-291 (in Korean).
28. MOLIT (Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea) (2017), Design Standard for Steel Structural Members (Load & Resistance Factor Design), KDS 14 31 10, MOLIT, Korea (in Korean).
29. MOLIT (Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea) (2018) Design Standard for Steel Bridges(Limit State Design), KDS 24 14 31, MOLIT, Korea (in Korean).
30. Kim, S.-E., Choi, S.-H., and Ma, S.-S. (2003), Performance based design of steel arch bridges using practical inelastic nonlinear analysis, *Journal of Constructional Steel Research*, ELSEVIER, 59(1), 91-108.
31. Chen, W. F. and Lui, E. M. (1992), Stability Design of Steel Frames, CRC Press, Boca Raton, 380.
32. Wang, P. H., Tseng, T. C., and Yang, C. G. (1993), Initial Shape of Cable-Stayed Bridges, *Computer & Structures*, ELSEVIER, 47(1), 111-123.
33. Ernst, H. J. (1965), Der E-Modul von Seilen unter Beruecksichtigung des Durchhanges, *Der Bauingenieur*, 40(2), 52-55 (in German).
34. Fleming, J. F. (1979), Nonlinear static analysis of cable-stayed bridge structures, *Computer & Structures*, ELSEVIER, 10(4), 621-635.
35. Gimsing, N. J. (2012), Cable Supported bridges: Concepts and Design(3rd Ed.), John Wiley & Sons, UK.
36. Nazmy, A. S. and Abdel-Ghaffar, A. M. (1990), Three-dimensional nonlinear static analysis of cable-stayed bridges, *Computers and Structures*, ELSEVIER, 34(2), 257-271.
37. MOLIT (Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea) (2021) Load Combination for Bridge Design (Limit State Design), KDS 24 12 11, MOLIT, Korea (in Korean).
38. MOLIT (Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea) (2021) Bridge Design Load (Limit State Design), KDS 24 12 21, MOLIT, Korea (in Korean).

Received : 05/16/2024
 Revised : 06/17/2024
 Accepted : 06/18/2024

요 지 : 본 연구에서는 강사장교의 비선형 거동과 하모니 서치 알고리즘에 기반한 사장교 부재 단면 결정 방법을 제시하였다. 하모니 서치 알고리즘은 초기값 설정, 하모니 메모리 초기화, 새로운 하모니 메모리 구성 및 하모니 메모리 업데이트의 과정을 반복하여 최적값을 탐색함으로써 사장교 부재 단면을 결정한다. 하모니 서치 알고리즘으로 선정된 주요 부재 단면으로 3차원 강사장교의 비선형 초기형상해석을 수행하였으며, 초기장력과 형상을 고려하여 복잡한 거동특성과 각 부재의 비선형성을 반영한 사장교 주요 부재인 주탑, 보강거더, 가로보 및 케이블의 최적 단면을 결정하였다. 사장교 주요 부재의 단면 결정을 위한 목적함수로는 전체 중량을 사용하였으며, 제약조건으로 한계상태설계법을 바탕으로 하중저항능력과 사용성에 대한 제약조건식 및 보강거더와 가로보 단면의 폭과 높이의 비율을 추가적인 제약조건으로 고려하고, 주탑, 보강거더 및 가로보의 기하 및 재료 비선형성과 케이블 부재의 비선형성에 따라 부재 단면을 결정할 수 있도록 하였다. 최적 단면 결정 결과, 제안한 해석 방법은 사장교의 다양한 설치조건에 따라 최적 단면을 결정할 수 있으며, 비선형성을 고려한 사장교 부재 단면제원을 하모니 서치 기법을 통하여 결정할 수 있음을 확인하였다.

핵심용어 : 강사장교, 부재 단면 결정, 비선형 거동, 하모니 서치 알고리즘
