

# 하모니서치를 이용한 강사장교 형식에 따른 케이블 단면 및 응력 수준 결정

마상수<sup>1</sup> · 권태윤<sup>1</sup> · 이원홍<sup>2</sup> · 안진희<sup>\*</sup>

<sup>1</sup>박사과정, 경상국립대학교, 건설시스템공학과, <sup>2</sup>교수, 경상국립대학교, 건설시스템공학과

## Determining Cable Cross-Section and Stress Level according to Steel Cable-Stayed Bridge Type Using Harmony Search

Ma, Sang-Soo<sup>1</sup>, Kwon, Tae-Yun<sup>1</sup>, Lee, Won-Hong<sup>2</sup>, Ahn, Jin-Hee<sup>\*</sup>

<sup>1</sup>Graduate student(Ph.D course), Dept. of Civil and Infrastructure Engineering, Gyeongsang National University, Jinju, 52725, Korea

<sup>2</sup>Professor, Dept. of Civil and Infrastructure Engineering, Gyeongsang National University, Jinju, 52725, Korea

**Abstract** - This study presents a cable section determination method using the Harmony Search algorithm for steel cable-stayed bridges. Based on probabilistic theory, the Harmony Search algorithm determines the cable section to search for the optimal value. The weight of the cable is used as the objective function for the cable sectional determination of the cable-stayed bridge. As a constraint condition, the load resistance capacity and serviceability for the design load conditions are considered according to the limit state design method. The direct iteration method is used as a nonlinear analysis technique, and the section of the cable is determined by considering the geometry characteristics and material nonlinearity of each member. Initial shape analysis of a three-dimensional steel cable-stayed bridge is performed with the cable section selected by the Harmony Search algorithm, and the determination of cable section and stress level is performed through nonlinear analysis considering initial tension and shape. As an analysis result of the determined section and stress level of the cable, it is confirmed that the cable section can be determined by considering the stress level occurring in the cable according to the height of the cable-stayed bridge pylon, section conditions, and span changes of the girders and cable layout types.

**Keywords** - Harmony search algorithm, Steel cable-stayed bridges, Cable section determination, Cable sectional stress evaluation, Design load condition, Nonlinear inelastic analysis

### 1. 서론

사장교는 아름다운 구조형태와 케이블 기술 발달에 따른 장기간화로 200 m에서 1,000 m 지간의 사장교들이 건설되고 있다. 주탑, 보강형, 케이블로 구성된 사장교는 케이블에 의하여 보강형이 탄성적으로 지지되는 연속보와 같이 거동하여 작용하중에 저항하며, 케이블에 도입된 인장력에 의하여 보강형에 압축력이 도입되게 된다. 또한 케이블은 보강형에 작용하는 작용하중을

주탑으로 전달한다. 이러한 사장교의 경우 케이블에 의하여 보강형과 주탑이 연결되어 전체 교량 구조를 구성하는 형태이므로 케이블 단면과 케이블 장력변화 등은 시공단계 및 사용단계에서 검토되어야 한다<sup>[1][3]</sup>. 일반적으로 케이블 설치 교량들은 다양한 하중효과를 설계과정에서 검토하고 있으며<sup>[2][4]</sup>, 사전 설계과정에서는 각 부재 단면이나 구조형상이 결정되어 있지 않으므로 초기형상해석이나 비선형 해석 등을 통한 케이블의 단면 결정과 이에 따른 응력 수준 등을 검토하기 위한 많은 노력이 요구된다.

사장교의 초기형상에 따른 특징을 분석하기 위하여 다양한 초기형상 해석방법이 연구되었으며<sup>[5][7]</sup>, 특히 사장교 케이블은 사장교 형상과 보강형 및 주탑에 작용하는 응력상태에 영향을 줄 수 있으므로 사장교 케이블의 최적 긴장력을 검토하기 위한 연구들이 많이 진행되어 왔으며, 이를 위하여 Genetic Algorithm, Jaya Algorithm 및

Note.-Discussion open until October 31, 2024. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on February 23, 2024; revised on March 19, 2024; approved on March 25, 2024.

Copyright © 2024 by Korean Society of Steel Construction

\*Corresponding author.

Tel. +82-55-772-3293 Fax. +82-55-772-3209

E-mail. jahn@gnu.ac.kr

Multiobjective Particle Swarm Optimization Algorithm 등 다양한 최적화 방법들이 검토되었다<sup>[1], [8]-[17]</sup>.

사장교 케이블에 작용하는 케이블 긴장력은 케이블 단면과 케이블 특성에 따라 결정되는 케이블의 하중저항능력과 연계하여 검토될 필요가 있으며, 이를 위해서는 사장교 하중상태와 사장교 케이블 배치 형태 등에 따른 영향을 확인할 필요가 있다. 하지만 이러한 변수가 고려된 케이블 단면을 케이블에 작용하는 하중상태를 반영하여 결정하는 데는 다양한 구조적 검토와 제약 조건의 확인이 필요하므로, 사전 설계과정에서 다양한 조건에 대한 영향을 모두 검토하여 단면을 결정하기에는 어려운 점이 있다.

본 연구에서는 사장교 형식에 따른 케이블의 초기 단면결정을 위하여 하모니 서치 알고리즘을 사용하여 설계변수인 케이블 단면을 형성하였으며, 형성된 케이블 단면으로 비선형 초기형상해석을 수행하고, 사장교 하중재하 조건 및 사용성 조건 등을 고려한 사장교 케이블 초기단면 결정방법을 제시하였다. 하모니 서치 알고리즘(Harmony Search Algorithm)은 즉흥연주과정에서 발생하는 불협화음을 연습을 진행하면서 좋은 화음으로 만들어지는 것을 이용하여 적절한 전역 탐색과 지역 탐색을 통하여 최적해를 결정<sup>[18], [19]</sup>하는 최적화 알고리즘으로, 격자구조 및 부재 설계 등 구조설계 최적화 등에 적용되어왔다<sup>[19]-[22]</sup>.

본 연구에서는 사장교 케이블 단면 및 응력 수준 결정을 위한 하모니 서치 알고리즘 및 비선형 해석을 수행하기 위하여 공학용 소프트웨어인 매트랩(MATLAB)을 이용하여 프로그램을 구성하였다. 구성된 프로그램은 하모니 서치 알고리즘을 통하여 설계변수인 케이블 제원을 생성하고 한계상태설계법에 따라 설계하중조건에 따른 각 부재의 하중저항능력과 사용성이 제약조건으로 검토되도록 구성하였으며, 목적함수로는 케이블 중량을 적용하였다. 또한 케이블 부재의 파단을 방지하고 케이블 응력 제한의 영향을 분석하기 위하여 케이블 제원에 따라 변화되는 부재응력 수준을 결정할 수 있도록 프로그램을 구성하였다. 따라서 본 연구에서는 하모니 서치 알고리즘을 통하여 강사장교의 비선형성을 고려하여 모든 제약조건과 목적함수인 케이블 중량을 만족하는 케이블 단면을 결정할 수 있으며 케이블 단면 결정에 영향을 미칠 수 있는 케이블 작용 응력 수준을 확인

하고 작용 응력 수준을 제한함으로써 강사장교 형상 및 부재 단면에 따른 케이블의 단면 제원과 응력 수준을 합리적으로 확인할 수 있도록 하였다.

## 2. 케이블 응력 수준 및 단면 결정 방법

### 2.1 하모니 서치 알고리즘

하모니 서치(Harmony search)란 확률론적인 이론을 바탕으로 최적화 문제를 해결하는 최적화 기법으로, 십진수를 이용한다는 점과 초기 설계집단을 구성하는 과정에서 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm, GA)과 차이가 있으나 최적화 과정 등은 GA와 유사한 최적화 기법이다<sup>[20], [23]</sup>. 하모니 서치 알고리즘은 초기값 설정 이후 하모니 메모리 초기화, 새로운 하모니 메모리 구성 및 하모니 메모리 업데이트의 과정을 반복하여 최적값을 탐색하게 된다.

초기값 설정 단계에서는 설계변수 크기, 설계변수 최소 및 최대값 설정과 하모니 메모리 크기(Harmony Memory Size, HMS) 설정, 하모니 메모리 채택 비(Harmony Memory Considering Ratio, HMCR), 피치조정비(Pitch Adjusting Ratio, PAR), 반복횟수 등을 설정한다. 일반적으로 HMCR은 0.70-0.90, PAR은 0.2-0.5 수준으로 설정한다. 하모니 메모리(Harmony Memory, HM) 초기화 단계에서는 초기변수를 HMS 만큼 생성하게 되는데, 생성과정에서 제약조건을 만족하지 않는 변수는 제외하게 된다. 따라서 초기변수 생성 과정에서 제약조건을 검토하여 빠르게 최적해에 접근할 수 있다.

생성된 HM은 Eq. (1)과 같이 표현되며,  $nd$ 는 설계변수의 수를 의미한다. 새로운 하모니 메모리(New Harmony Memory, New HM) 구성단계에서는 HMCR에 따라 HM에서 New HM을 선택하거나 랜덤변수로 New HM을 생성한다. HM에서 New HM을 선택할 경우, PAR에 따라 기존변수를 피치 조정의 폭인 BW(Band width)만큼 조정한다. New HM은 생성방법을 고려하여 Eq. (2)와 같이 나타낼 수 있으며,  $x_i^{RS}$ ,  $x_i^{HMC}$ ,  $x_i^{PA}$ 는 각각 무작위 선택, HM에서 New HM을 선택, 피치조정 방법에 따라 생성된 New HM을 의미한

다. 하모니 메모리 업데이트 단계에서는 New HM이 구성된 후, 목적함수에 따른 값을 비교하여 HM에서 HMS를 초과하는 만큼 나쁜 값을 우선순위로 제거하게 되므로 HM의 크기를 일정하게 유지할 수 있다.

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

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

앞서 설명된 하모니 서치 과정을 반복하며 최적값을 찾고, 종료 조건 도달 시 하모니 서치 알고리즘을 종료하게 된다. 여기서 종료 조건은 케이블 단면 결정을 위하여 충분히 루프가 반복될 수 있도록 하모니 메모리의 크기와 피치조정치 등을 고려하여 결정하였고, HM과 New HM은 제약조건을 모두 만족하도록 하였다. 제약조건은 하중저항능력과 사용성을 고려하여 케이블의 단면을 결정하였다.

## 2.2 제약조건식 및 목적함수

본 연구에서는 케이블 단면 결정과 응력 수준 조정을 위한 제약조건식을 두가지로 나누어 고려하였다. 첫째는 구조시스템의 하중저항능력에 대한 제약조건이며, 둘째는 사용성에 대한 제약조건이다. 목적함수로는 케이블 중량으로 하였으며, 케이블 단면 결정시 영향을 미칠 수 있는 케이블의 응력 수준을 제한할 수 있도록 하여 이에 대한 영향을 고려할 수 있도록 하였다.

### 2.2.1 하중저항능력에 대한 제약조건식

사상교의 단면 검토 및 비선형 해석의 하중저항능력에 대한 제약조건식은 한계상태설계법의 설계형식을 활용하여 Eq. (3)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\sum \gamma_i Q_i \leq \phi R_n \quad (3)$$

여기서,  $R_n$ =구조물 부재의 하중저항능력,  $Q_i$ =설계 하중,  $\phi$ =저항계수,  $\gamma_i=Q_i$ 에 대한 하중계수이다. 강구조 부재 설계기준<sup>[24]</sup> 및 강교 설계기준<sup>[25]</sup>에서도 동일한 저항계수를 규정하고 있다. 따라서, 강교량이 압축에 의하여 좌굴이 발생할 때에는 0.9를, 인장에 의해 항복할 때에는 0.95를, 그리고 휨에 의해 소성파괴될 때에는 1.0을 구조물 저항계수로 사용한다. 하중저항능력에 대한 제약조건식 Eq. (3)는 하모니 서치 알고리즘에도 적용하여 하중저항능력이 충분하지 않은 설계변수는 제외되도록 하였다.

### 2.2.2 사용성에 대한 제약조건식

강교 설계기준<sup>[25]</sup>에서는 지간 L인 교량에서 사용이동하중에 대한 사용성 제한을 차량하중에 대한 처짐은 L/800, 보도하중에 의한 처짐은 L/1000로 규정하고 있으며, 사용하중 하에서는 영구 변형을 방지하기 위하여 소성힌지가 생기지 않도록 하고 있다. 본 연구에서는 사용성에 대한 제약조건으로 차량하중에 대한 처짐을 L/800로 제한하여 사용성에 대한 제약조건을 만족하지 않는 설계변수는 하모니 서치를 통한 단면 결정과정에서 제외되도록 하였다.

### 2.2.3 목적함수

본 연구에서는 케이블 단면 결정을 위한 목적함수를 케이블 중량의 함수로서 Eq. (4)와 같이 적용하였다. 케이블 단면 결정을 위한 목적함수로 중량을 고려할 경우 케이블 응력 수준이 변화할 수 있고 이에 대한 영향을 확인할 수 없으므로 추가적으로 케이블의 응력 수준을 Eq. (5)와 같이 고려하여 케이블 응력을 제한할 수 있도록 하였다. 따라서 제한된 케이블 응력 수준을 기준으로, 케이블에 작용하는 인장력의 초과여부를 제한할 수 있도록 하였다.

$$OBF = \rho \left[ \sum_{i=1}^{NCA} (V_{ca})_i \right] \quad (4)$$

$$OBY = \max \left( \frac{f_1}{f_{design}}, \frac{f_2}{f_{design}}, \dots, \frac{f_{NCA}}{f_{design}} \right) \quad (5)$$

여기서 OBF는 전체 케이블 부재의 중량이며,  $(V_{ca})_i$ 는  $i$ 번째 케이블의 체적, NCA는 케이블의 개수이다.  $\rho$

는 단위 체적당 중량이다. 또한 *OBY*는 케이블 부재에서 발생하는 응력과 케이블 설계강도의 비이며,  $f_i$ 은  $i$  번째 케이블에 발생하는 응력,  $f_{design}$ 은 케이블의 설계 강도를 의미한다.

### 2.3 비선형 해석

본 연구에서는 다양한 조건에 대한 케이블의 응력 수준과 단면을 결정하기 위하여 주탑 및 보강형의 비선형 성과 케이블 부재의 비선형성을 고려하였다.

#### 2.3.1 주탑 및 보강형의 비선형성

사장교 주탑 및 보강형의 기하학적 비선형성을 고려하기 위하여 안정함수를 사용하였다. 안정함수란 축방향력에 의하여 휨 강성의 감소 영향을 고려하는 함수로서 부재를 하나 혹은 두 개의 요소로 이상화하여 기하학적 비선형을 효과적으로 고려할 수 있다<sup>[26]</sup>.

산류응력을 가진 부재가 축방향력에 의하여 점진적으로 항복하는 것을 고려하기 위하여 작용하중 수준에 따른 부재의 거동변화를 반영할 수 있도록 CRC 점선 계수를 사용하였다<sup>[27]</sup>. 부재가 축력과 휨을 받는 경우 탄성강성에서 완전 소성강성 즉 영까지 점진적 변화를 나타내기 위하여 연화소성힌지(softening plastic hinge)를 사용하였다. 또한, 전단변형의 효과는 휨에 대한 유연도 행렬에 전단에 대한 유연도 행렬을 더함으로써 고려하였다.

#### 2.3.2 케이블 부재의 비선형성

사장교 케이블 단면 결정과정에서 케이블의 특성을 반영하기 위하여 사장교 케이블 자중과 장력에 의하여 케이블 새그(Sag)가 발생되며, 케이블 새그의 크기에 따라 케이블의 축방향 강성이 변화하므로 이를 고려하여야 한다. 사장교의 경사 케이블의 비선형성은 등가탄성 계수를 갖는 등가직선 케이블 요소로 적용할 수 있다<sup>[28]</sup>. 등가탄성계수 개념은 Ernst에 의하여 처음 소개된 것으로<sup>[29]</sup>, 하중 재하 전 케이블 도입 장력만을 고려하는 점선탄성계수<sup>[30]</sup>와 최초의 장력과 하중 재하 후의 장력을 함께 고려하는 할선탄성계수<sup>[31]-[33]</sup>를 이용하여 계산할 수 있다. 본 연구의 경우 케이블의 등가탄성계수로 Eq. (6)에 나타난 식을 이용하여 계산하여 적용하였다.

$$E_{eq} = E_s = \frac{E}{1 + \frac{w^2 l^2 (T_0 + T_1)}{24 T_0^2 T_1^2} EA} \quad (6)$$

여기서,  $E_{eq}$ 는 케이블의 등가탄성계수,  $E_s$ 는 케이블의 할선(Secant)탄성계수,  $E$ 는 케이블의 탄성계수이며,  $A$ 는 케이블의 단면적,  $w$ 는 케이블의 단위길이당 자중,  $l$ 은 케이블 수평 길이를 의미하고,  $T_0$ 와  $T_1$ 은 하중 재하 전후의 케이블 장력을 의미한다.

### 2.4 케이블 제원 및 응력 수준 결정을 위한 해석 절차

사장교 케이블 단면제원과 응력 수준 결정을 위한 해석 절차를 Fig. 1에 정리하여 나타내었다. 본 연구에서는 하모니 서치 알고리즘을 통하여 케이블 단면을 결정하는 것을 목적으로 하고 있으므로 하모니 서치 알고리즘으로 선정된 각 케이블 단면변수에 대하여 강사장교의 초기형상해석을 수행하고, 초기 장력과 형상을 고려하여 개선된 초기형상을 도출한다.

이후 초기형상이 고려된 사장교를 대상으로 설계하중에 대한 비선형해석을 수행하여 설계하중에 대한 하중저항능력과 사용성 등의 제약조건에 대하여 검토되도록 하였다. 이 과정을 반복하여 목적함수인 케이블의 중량을 검토하며 종료 조건을 만족하게 되면 케이블 단면이 결정되고 이에 따른 응력 수준이 확인되도록 하였다. 또한 비선형 수치해석 기법으로 각 단계별 증분하중을 작용하여 증분하중에 해당하는 증분변위를 구하는 직접반복법(Direct Iteration)을 이용하였고, Fig. 1에 나타난 것과 같이 케이블 단면 결정을 위하여 사장교 초기형상 해석과 하중상태에 대한 사장교 기하 및 재료 비선형 해석을 설계하중 조건에 따라 진행하도록 하였다.

사장교 케이블 단면 가정 후 검토되는 사장교의 초기형상 해석은 Fig. 1과 같이 하모니 서치 알고리즘으로부터 결정된 단면 변수에 따라 변화하는 사장교의 초기형상 및 케이블의 초기장력을 해석과정에 고려하기 위하여 수행되며, 결정되는 단면 변수마다 케이블 장력과 변위가 고려되지 않은 변형 전 형상과 고정하중 상태에서 비선형 수치해석을 수행한 후 케이블 장력과 개선된 사장교 형상을 고려하여 다음단계의 형상해석이 수행되도록 하였다.

케이블 장력의 변화는 케이블의 등가탄성계수에 영

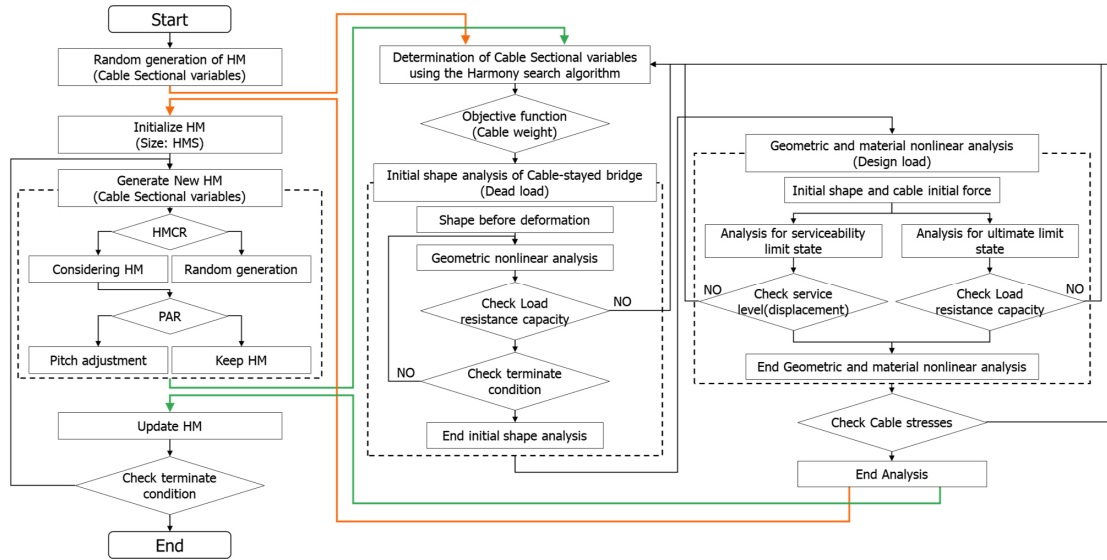


Fig. 1. Flow chart of cable cross-section optimization for cable-stayed bridge using the Harmony Search Algorithm

향을 주게 되므로 처음단계를 제외한 초기형상해석과정에서 이전단계의 케이블 장력과 절점변위를 다음 단계의 초기값으로 반영되도록 하였으며, 이를 반복수행하여 모든 절점변위의 합이 허용수준을 만족할 때 초기형상해석을 종료하도록 하였다. 이 과정에서 하중저항능력을 만족하지 않는 단면변수는 제외하고 새로운 단면변수를 선정하도록 하였다. 종료조건에 따라 초기형상해석 완료시 나타나는 사장교의 기하형상과 케이블 장력 결과는 설계하중에 대한 비선형 해석에 반영되도록 하였다<sup>[4],[5]</sup>.

사장교의 초기 형상해석이 완료된 후, Fig. 1에 나타난 것과 같이 대상 사장교의 설계하중에 대한 기하 및 재료비선형 해석을 수행하도록 하였다. 설계하중에 따른 사장교의 기하 및 재료 비선형 해석은 대상 사장교에 작용하는 고정하중과 이동하중에 의한 극한한계상태와 사용한계상태를 구분하여 고려할 수 있도록 하였다. 극한한계상태에 대한 검토는 선택된 케이블 제원이 적용된 사장교가 설계하중조건에 따라 대상 사장교 부재에서 나타날 수 있는 극한한계상태에 대한 각 부재별 설계강도기준으로 하중저항수준을 비교하여 안전성을 확인할 수 있도록 하였으며, 사용한계상태에 대한 검토는 설계하중에 의하여 발생하는 최대 처짐 수준을 사용한계상태와 비교할 수 있도록 하였다.

사용성 및 하중저항능력 검토과정에서 두 제약조건을 모두 만족하지 않는 단면변수는 하모니메모리에 추

가되지 않도록 하며, 새로운 단면 변수를 선정하고 초기형상 해석과정부터 동일한 과정을 반복하여 수행하도록 하였다. 또한 추가적으로 케이블 단면 결정에 케이블의 응력 수준을 고려할 수 있도록 구성하였으며, 제한된 케이블 설계강도를 초과하는 인장력이 발생하는 경우에도 케이블 단면이 하모니메모리에 추가되지 않고 새로운 단면변수를 선정하도록 하였으며, 이 과정을 반복하여 케이블의 단면과 응력 수준이 결정되도록 하였다.

### 3. 사장교 케이블 단면 및 응력 수준 결정

#### 3.1 케이블 단면 및 응력 수준 결정 대상 강사장교 제원

본 연구에서는 하모니 서치 알고리즘을 이용하여 케이블의 단면과 응력 수준을 결정하기 위하여, 다양한 조건으로 가정된 사장교 모델을 적용하여 결과를 분석하였다. 연구에서 적용한 강사장교는 Fig. 2에 나타난 것과 같이 2주탑 사장교이며, 케이블은 주탑과 보강형에 핀(pin)으로 연결되어 있는 것으로 가정하였다. 강사장교의 케이블 배치에 따라 케이블 단면이 변화할 것으로 판단하여 케이블 배치형식을 Fan Type과 Semi-harp Type으로 고려하였다. 또한 사용된 주요 부재의 단면 치수로 주탑은 높이와 폭이 각 1.0 m 및 2.0 m이며, 두께는 0.05 m인 강박스 단면으로 가정하였다. 가로보의

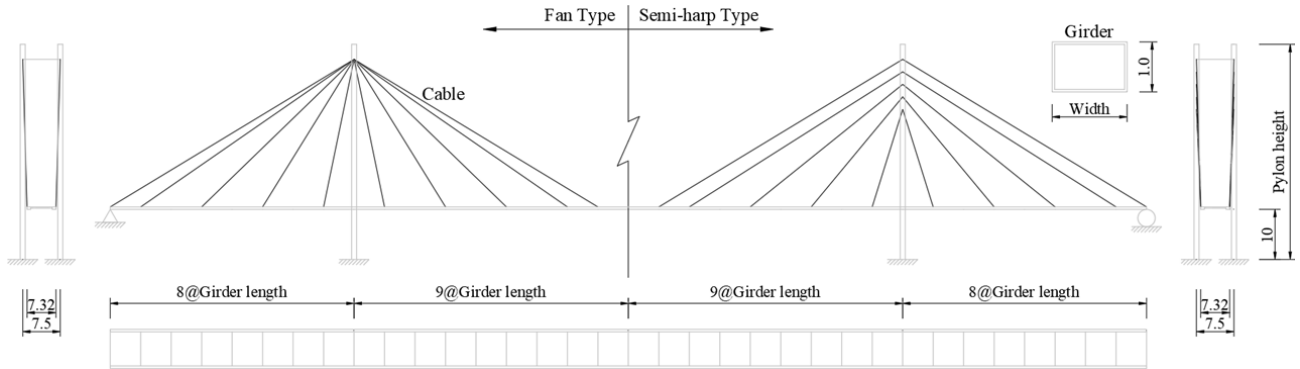


Fig. 2. Detail of steel cable-stayed bridge for cable cross-section optimization

단면은 KS 규격에서 제시하는 H-500x200x10/16의 H형강으로 적용하였다. 케이블 단면 결정에 거더의 제원이 영향을 줄 수 있을 것으로 판단하여 보강형은 높이 1.0 m 및 두께는 0.05 m인 강박스 단면 사용하였으며, 박스단면 폭은 변수로서 1.25 m를 기준으로 0.25 m 씩 증가시켜 케이블 단면 변화에 대한 거더폭의 변화를 고려하였다. 또한 사장교 주탑의 높이와 시간에 따라 케이블 작용응력과 단면이 변화하게 되므로 케이블 설치 거더의 길이와 주탑의 높이를 변수로 고려하였다. 설계 변수로 고려된 주탑의 높이와 보강형 단면 및 보강형 길이 등의 변수를 Table 1에 정리하여 나타내었다.

케이블 단면은 일정 범위를 가지는 설계변수로, 하모니 서치 알고리즘에 의하여 결정되도록 하였다. 또한 케이블의 제원에 따라 응력 수준이 변화할 수 있으며, 이를 케이블 단면 결정에 고려하기 위해서는 케이블에 작용하는 응력 수준을 고려할 필요가 있다. 이를 고려하기 위한 추가적인 변수로 케이블에 작용하는 하중에 따른 작용응력 수준과 한계상태설계에 따라 결정되는 설계강도의 비를 고려하여 케이블 응력 수준을 프로그램 내에서 제한할 수 있도록 하였다. 또한 케이블 응력 제한여부를 추가적인 변수로 고려하였으며, 제한된 케이블의 응력 수준은 설계강도의 20% 수준으로 이는 본 연구에서 고려된 사장교의 설계하중 수준에 따라 케이블 응력 수준 제한여부로 인한 결과 분석을 위한 수치로 가정하였다. 이는 실제 사장교의 사전 설계 단면 결정 시에도 적용되는 설계하중조건을 고려하여 적절한 응력 수준에 대한 수치를 결정하고 이에 대한 영향을 케이블 단면 결정에 반영할 수 있도록 하였다.

고정하중에 대한 초기형상해석과 설계하중에 대한 기하 및 재료 비선형 해석시 적용된 재료특성은 주탑과

보강형, 가로보의 경우 탄성계수 210 GPa을 적용하고 항복강도는 275 MPa을 적용하였다. 케이블의 재료특성으로 탄성계수 210 GPa, 항복강도 1,600 MPa을 적용하여 부재별 재료 비선형성을 고려할 수 있도록 하였다. 또한 하모니 서치 알고리즘 수행을 위한 하모니 메모리의 크기는 10으로 적용하였고 하모니 메모리 채택비와 피치 조정비는 각각 HMCR=0.9, PAR=0.3로 적용하였으며, BW는 케이블 부재의 오차 수준을 고려하여 0.5 mm로 적용하였다. 하모니 서치 알고리즘의 종료 조건은 본 연구의 목적인 강사장교의 케이블 단면 결정

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

Cable yield strength	Pylon height (m)	Girder length (m)	Girder width (m)
Not considered	43.0	6.0	1.25
			1.5
			1.75
		7.0	1.25
			1.5
			1.75
	51.6	6.0	1.25
			1.5
			1.75
		7.0	1.25
			1.5
			1.75
Considered (20%)	43.0	6.0	1.25
			1.5
			1.75
		7.0	1.25
			1.5
			1.75
	51.6	6.0	1.25
			1.5
			1.75
		7.0	1.25
			1.5
			1.75

과정에서 충분히 루프가 반복될 수 있도록 하모니 메모리의 크기와 설계변수의 범위, 피치 조정시 고려되는 BW의 크기를 고려하여 New HM을 50번 찾을 동안 목적함수의 값이 변화가 없는 경우 종료되도록 하였다.

### 3.2 초기형상해석 및 비선형 해석

#### 3.2.1 고정하중에 대한 초기형상해석

하모니 서치 알고리즘에 의해 형성된 케이블에 대한 사장교 보강형 자중의 영향을 확인하고, 사장교 초기형상을 확인하기 위한 것으로, 초기형상해석에 사용된 고정하중은 보강형(박스거더) 및 가로보 등의 자중 이외의 추가적인 하중효과를 반영하여 자중의 1.1배를 적용하였다. 초기형상결정을 위한 고정하중에 대한 하중계수로 1.25<sup>[33]</sup>를 사용하였다. 종료조건은 모든 절점변위의 합이 0.2 m 이하가 되는 경우로 하였다. 초기형상해석에 의하여 산정된 Fan Type과 Semi-harp Type의 케이블장력(cable tensions)과 초기형상은 설계하중에 대한 사장교 기하 및 재료 비선형 해석의 입력 데이터로 고려되도록 하였다.

#### 3.2.2 설계하중에 대한 사장교의 기하 및 재료 비선형 해석

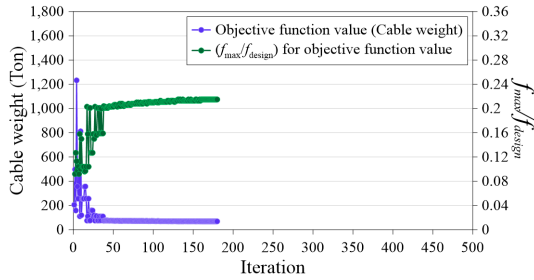
초기형상해석 결과인 초기장력과 개선된 초기형상을 고려하여 설계하중에 대한 사장교 비선형 해석을 수행하였다. 주탑과 보강형은 기하비선형성과 재료비선형성을 고려하였으며, 케이블 부재는 기하비선형성을 고려하였다. 설계 작용하중으로 교량 설계하중조합<sup>[34]</sup>에서 규정하고 있는 고정하중, 이동하중을 고려하였다. 설계의 경우 다양한 설계하중이 고려될 수 있으나, 사장교 케이블 단면에 상대적으로 큰 영향을 줄 수 있는 고정하중과 이동하중을 고려하였다. 고정하중은 초기형상해석과 동일하게 적용하였고 이동하중은 차량 축하중(KL-510)과 차로 하중을 재하하였다. 하중계수는 교량 설계하중<sup>[33],[35]</sup>에 따라 사용한계상태와 극한한계상태를 구분하여 적용하였다. 적용된 사용한계상태의 하중계수는 고정하중 1.00, 이동하중 1.30, 충격계수 1.25를 적용하였고 극한한계상태의 하중계수는 고정하중 1.25, 이동하중 1.80, 충격계수 1.25를 사용하였으며, 2차로 적용에 따른 계수 0.9를 적용하였다.

사장교 케이블의 단면산정에 대한 이동하중효과는 차로 하중의 적용범위에 따라 총 3개의 Load case로 구분하였다. Load case 1은 시간전체에 대하여 차로하중을 재하하였으며, Load case 2는 주탑을 기준으로 중간 부분에 대하여 차로하중을 재하하였다. Load case 3는 한쪽 주탑의 바깥 부분을 제외한 부분에 대하여 차로하중을 재하하였고, 모든 Load case에서 차량 축하중은 시간의 중심에 적용되었다.

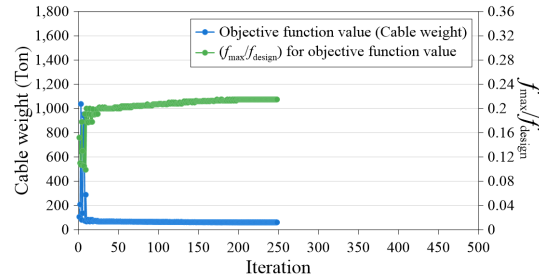
## 4. 케이블 단면 및 응력 수준 분석 결과

사장교 케이블의 배치형태 및 보강형 길이와 폭에 따른 케이블 단면과 응력 수준 결정을 위한 하모니 서치 알고리즘 반복횟수를 확인하였다. 제약조건과 단면조건에 따라 반복횟수(Iteration)는 35회~510회로 나타났으며, 평균적으로 약 280회 수준에서 케이블 단면이 결정되는 것을 확인하였다. Fig. 3는 사장교의 케이블의 응력 수준을 제한한 경우와 제한하지 않은 경우의 케이블 중량 및 응력과 설계강도비를 나타내었다. 분석결과, 케이블의 응력 수준을 제한하지 않은 경우와 비교하여 제한한 경우 상대적으로 케이블의 단면 결정까지의 반복횟수가 증가하는 것으로 분석되었다. 이는 사장교 단면 및 하중조건에 따른 케이블의 단면 결정에 케이블 응력 수준이 영향을 받아 나타나는 것으로 케이블의 응력 수준을 제한하지 않은 경우 케이블의 단면변화보다 케이블의 인장강도에 의하여 단면이 결정될 수 있음을 알 수 있다. 하지만 케이블의 응력 수준을 제한할 경우 상대적으로 중량을 기준으로 단면이 결정되며 이러한 반복과정에 따라 단면 결정을 위한 반복횟수가 증가하는 것을 알 수 있다.

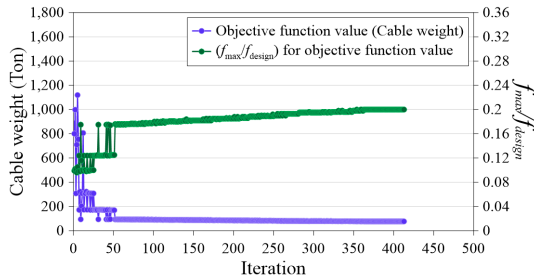
하모니 서치 알고리즘을 이용하여 사장교 형식 및 조건에 따라 결정된 케이블 단면 제원과 케이블 응력과 설계강도의 비( $f_{max}/f_{design}$ )를 Fig. 4와 Fig. 5 그리고 Table 2와 Table 3에 정리하여 나타내었다. 케이블 응력 수준을 제한하지 않은 경우, Fig. 4의 (a)와 (c)에 나타난 것과 같이 케이블 응력과 설계강도의 비율이 Fan type은 0.190~0.236 수준에서 케이블 단면이 결정되었고, Semi-harp type은 0.190~0.219 수준에서 케이블 단면이 결정되었다. 케이블 응력 수준을 설계강도의 20%



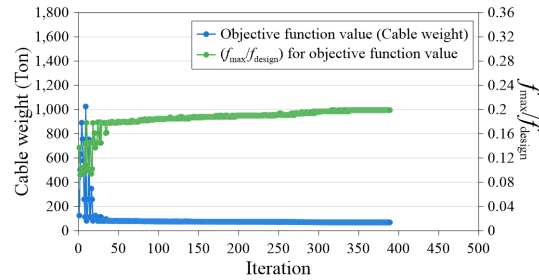
(a) Fan type (w/o design strength)



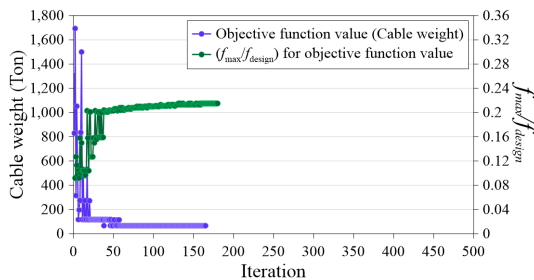
(e) Semi-harp type (w/o design strength)



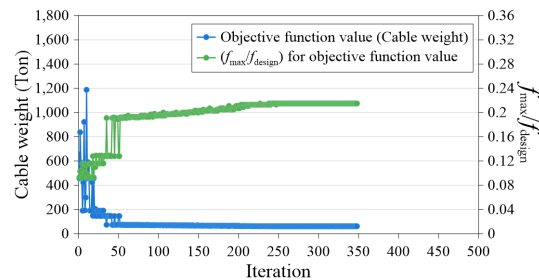
(b) Fan type (w/ design strength)



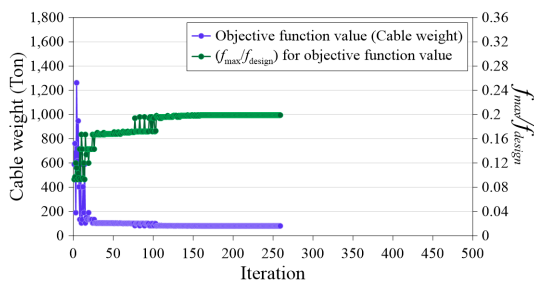
(f) Semi-harp type (w/ design strength)



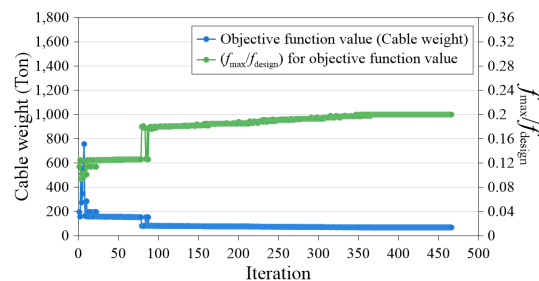
(c) Fan type (w/o design strength, Increased pylon height)



(g) Semi-harp type (w/o design strength, Increased pylon height)



(d) Fan type (w/ design strength, Increased pylon height)



(h) Semi-harp type (w/ design strength, Increased pylon height)

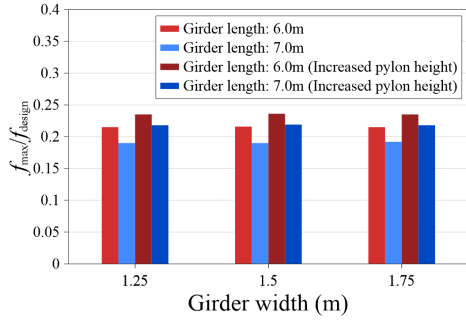
**Fig. 3.** Iteration numbers using Harmony search algorithm for Girder width 1.25 m, Length 6.0 m

수준으로 제한한 경우에는 Fig. 4의 (b)와 (d)와 같이 케이블 응력과 설계강도의 비율이 Fan type은 0.190–0.200, Semi-harp type은 0.189–0.200 수준에서 케이블 단면이 결정되는 것으로 확인되었다. 또한 케이블의 설치형태와 상관없이 보강형의 폭이 증가할수록 고정하중 증가로 인하여 Fig. 5에 나타난 것과 같이 케이블의 단면 제원이 증가하는 경향이 나타났다.

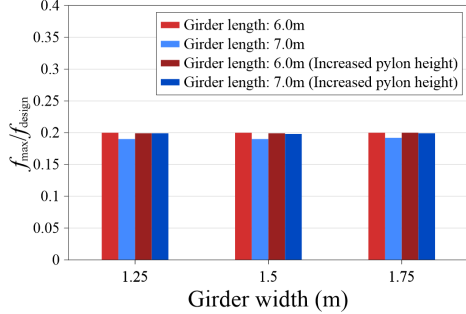
케이블의 응력 수준이 설계강도의 20%로 제한된 경

우 케이블 응력이 제한된 수준에서 단면이 결정됨을 확인하였다. 또한 지간이 증가하는 경우 케이블의 응력 수준은 설계강도의 20%보다 낮은 수준으로 나타났으며, 이는 지간이 증가함에 따라 하중효과는 증가하였으나 케이블의 수가 동일하므로 케이블의 하중저항능력보다 사용하중상태의 처짐 수준에 따라 케이블의 단면 제원이 결정된 것으로 분석되었다. 주탑의 높이를 증가시킨 경우에는 케이블의 단면이 작아지는 경향을 보였

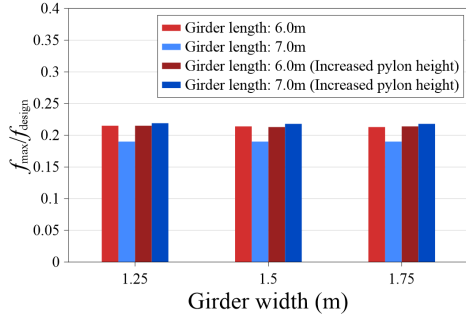




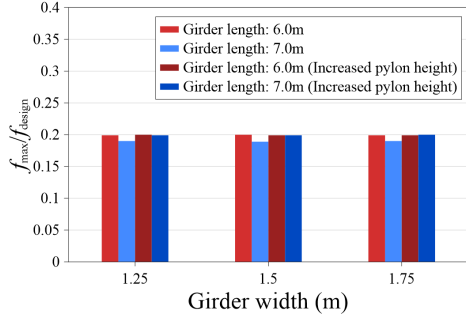
(a) Fan type (w/o design strength)



(b) Fan type (w/ design strength)



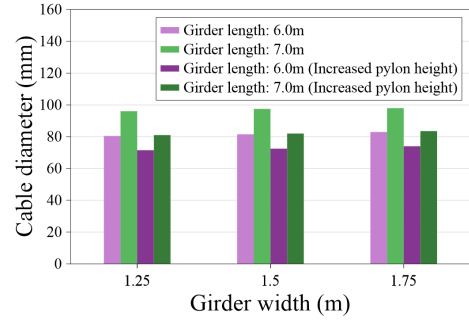
(c) Semi-harp type (w/o design strength)



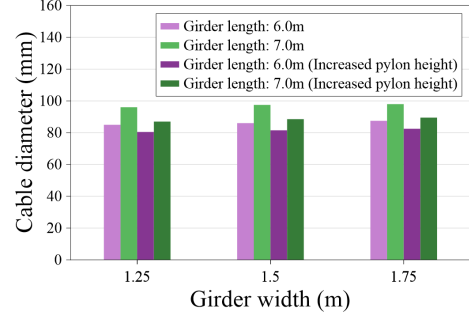
(d) Semi-harp type (w/ design strength)

Fig. 4.  $f_{max}/f_{design}$  by Design variables

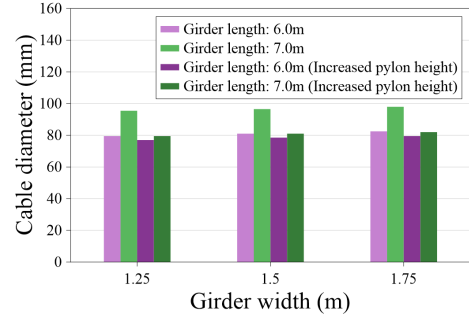
으며, 이는 구조적으로 사장교의 주탑 높이가 증가함에 따라 케이블과 보강형이 이루는 각도의 차이 등에 의해 보강형에 작용하는 압축력과 케이블 새그(sag)의 감소로 인한 것으로 분석되었다. 또한 케이블 단면 제원이 상대적으로 더 작은 수준에서 결정됨에 따라 케이블에



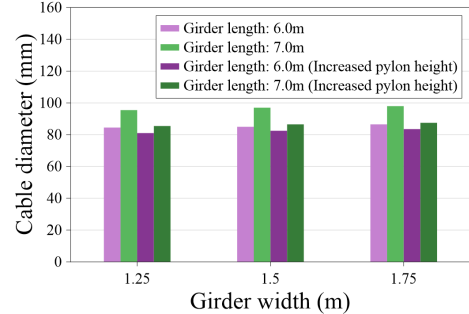
(a) Fan type (w/o design strength)



(b) Fan type (w/ design strength)



(c) Semi-harp type (w/o design strength)



(d) Semi-harp type (w/ design strength)

Fig. 5. Cable diameter by Design variables

작용하는 응력 수준은 더 높은 수준으로 확인되었다. 따라서 본 연구에서 적용한 하모니서치 방법을 이용하여 다양한 조건에 대한 사장교 케이블의 단면을 결정하고 케이블의 응력 수준을 검토할 수 있을 것으로 판단된다.

**Table 2.** Main design variables for Steel Cable-stayed bridge with Fan type

Cable yield strength	Pylon		Girder		Results	
	Height (m)	Length (m)	Width (m)	Cable diameter (mm)	$\frac{f_{max}}{f_{design}}$	
Not considered	43.0	6.0	1.25	80.5	0.215	
			1.50	81.5	0.216	
			1.75	83.0	0.215	
		7.0	1.25	96.0	0.190	
			1.50	97.5	0.190	
			1.75	98.0	0.192	
	51.6	6.0	1.25	71.5	0.235	
			1.50	72.5	0.236	
			1.75	74.0	0.235	
		7.0	1.25	81.0	0.218	
			1.50	82.0	0.219	
			1.75	83.5	0.218	
Considered (20%)	43.0	6.0	1.25	85.0	0.200	
			1.50	86.0	0.200	
			1.75	87.5	0.200	
		7.0	1.25	96.0	0.190	
			1.50	97.5	0.190	
			1.75	98.0	0.192	
	51.6	6.0	1.25	80.5	0.199	
			1.50	81.5	0.199	
			1.75	82.5	0.200	
		7.0	1.25	87.0	0.199	
			1.50	88.5	0.198	
			1.75	89.5	0.199	

**Table 3.** Main design variables for Steel Cable-stayed bridge with Semi-harp type

Cable yield strength	Pylon		Girder		Results	
	Height (m)	Length (m)	Width (m)	Cable diameter (mm)	$\frac{f_{max}}{f_{design}}$	
Not considered	43.0	6.0	1.25	79.5	0.215	
			1.50	81.0	0.214	
			1.75	82.5	0.213	
		7.0	1.25	95.5	0.190	
			1.50	96.5	0.190	
			1.75	98.0	0.190	
	51.6	6.0	1.25	77.0	0.215	
			1.50	78.5	0.213	
			1.75	79.5	0.214	
		7.0	1.25	79.5	0.219	
			1.50	81.0	0.218	
			1.75	82.0	0.218	
Considered (20%)	43.0	6.0	1.25	84.5	0.199	
			1.50	85.0	0.200	
			1.75	86.5	0.199	
		7.0	1.25	95.5	0.190	
			1.50	97.0	0.189	
			1.75	98.0	0.190	
	51.6	6.0	1.25	81.0	0.200	
			1.50	82.5	0.199	
			1.75	83.5	0.199	
		7.0	1.25	85.5	0.199	
			1.50	86.5	0.199	
			1.75	87.5	0.200	

### 5. 결론

본 연구에서는 하모니 서치 알고리즘을 이용하여 강 사장교 형식과 케이블 배치형상, 주탑의 높이, 보강형 단면 및 경간장 변화에 따른 사장교 케이블 단면 및 응력 수준을 결정하였으며, 본 연구의 결과를 다음과 같이 정리하였다.

- (1) 케이블에 작용하는 응력 수준과 케이블 설계강도 비( $f_{max}/f_{design}$ )의 제한여부에 따른 케이블 단면 결정 결과, 보강형의 폭의 증가에 따른 고정하중 증가로 극한설계하중 검토기준에 따른 케이블의 단면 제원도 증가함을 확인하였고, 지간이 증가한 경우에는 케이블 응력 제한 여부와 상관없이 사용성 한계 기준인 처짐 수준을 기준으로 케이블의 단면과 응력수준이 결정되는 것을 확인하였다.
- (2) 주탑의 높이가 증가한 경우 케이블의 단면은 상대적으로 더 낮은 수준에서 결정되었으나 작용 응력은 높아지는 것으로 분석되었는데, 이는 보강형에 작용하는 압축력과 케이블 새그(sag)의 감소로 인한 것으로 분석되었다.
- (3) 본 알고리즘을 이용할 경우 복잡한 거동 특성을 가지는 사장교 케이블의 설계 단면 결정 과정에서 다양한 하중조건, 제약 조건 및 사장교 형상변화에 따라 변화하는 케이블의 응력 수준을 고려하는 케이블 단면을 결정할 수 있다.
- (4) 하모니 서치 알고리즘을 이용하여 사장교의 형식과 주탑의 높이 및 보강형의 단면과 길이 변화를 고려한 각 설계변수에 따른 케이블의 단면은 사장교에 작용하는 하중효과에 따라 결정되었으며, 확률적인 방법을 이용하여 변수를 생성하는 하모니 서치 알고리즘의 특성에 따라 충분한 반복횟수가 적용되도록 반복횟수와 종료조건을 결정할 필요가 있을 것으로 평가되었다.

본 연구에서는 하모니 서치 알고리즘을 이용하여 다양한 조건과 케이블의 응력 수준에 따라 사장교 케이블의 단면 제원을 결정하고 이에 대한 결과를 분석하였다. 사장교는 설계과정에서 보강형, 주탑 및 가로보 등의 구성 부재의 초기 단면 결정을 위한 반복적인 구조 해석이 필요하다. 따라서 효율적인 사장교의 설계 및

해석을 위하여, 본 연구에서 제안한 케이블에 대한 단면 및 응력수준 뿐만 아니라, 주탑 및 보강형 등 사장교 주요부재에 대한 단면 결정 방법도 추가적으로 제안되고 검토되어야 할 것이다.

### 참고문헌(References)

- [1] Park, D.-Y. (2012) A Study for Finding Optimized Cable Forces of Cable Stayed Bridge, *Journal of the Korean Society for Advanced Composite Structures*, KOSACS, Vol.3, No.1, pp.16-20 (in Korean).
- [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, Vol.17, No.2, pp.443-469.
- [3] Kim, J.S., and Kim, K.S. (2019) Strength Interaction of Wide Steel Box Girder Subjected to Concurrent Action of Compression and Flexure for Cable-Supported Bridges, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.31, No.4, pp.301-309 (in Korean).
- [4] Koo, G.J., An, J.K., Shin, S.H., and Kim, H.K. (2022) Design of Pedestrian Suspension Bridge with 3-Dimensional Cable and Wind Resistant Stiffened Girder, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.34, No.5, pp.239-249 (in Korean).
- [5] 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, Vol.25, No.1A, pp.1-7 (in Korean).
- [6] 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, Vol.30, No.1A, pp.1-13 (in Korean).
- [7] 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*, COSEIK, Vol.24, No.1, pp.87-95 (in Korean).
- [8] Janjic, D., Pircher, M., and Pircher, H. (2003) Optimization of Cable Tensioning in Cable-Stayed Bridges, *Journal of Bridge Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol.8, No.3, pp.131-137.
- [9] 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, Vol.25, No.6A, pp.1071-1084 (in Korean).
- [10] 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, Vol.49, pp.643-654.
- [11] 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, Vol.36, No.6, pp.947-954 (in Korean).
- [12] Ha, M.-H., Vu, Q.-A., and Truong, V.-H. (2018) Optimum Design of Stay Cables of Steel Cable-Stayed Bridges Using Nonlinear Inelastic Analysis and Genetic Algorithm, *Structures*, Elsevier, Vol.16, pp.288-302.
- [13] 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*, International Association of Structural Engineering and Mechanics, Vol.34, No.6, pp.853-862.
- [14] 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, Vol.2020, 4527309.
- [15] 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, Vol.54, No.1, pp.20-39.
- [16] Guo, J., and Guan, Z. (2023) Optimization of the Cable Forces of Completed Cable-Stayed Bridges with Differential Evolution Method, *Structures*, Elsevier, Vol.47, pp.1416-1427.
- [17] 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, Vol.13, No.4, 2611.
- [18] 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*, KAIS, Vol.17, No.4, pp.1-12 (in Korean).
- [19] 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*, KWRA, Vol.51, No.3, pp.281-291 (in Korean).
- [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*, The Korean Society of Ocean Engineers, Vol.27, No.5, pp.36-42 (in Korean).
- [21] 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*, KSSC, Vol.27, No.2, pp.131-142 (in Korean).
- [22] 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*, AIK, Vol.33, No.12, pp.53-62 (in Korean).
- [23] 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, Vol.76, No.2, pp.60-68.
- [24] 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).
- [25] MOLIT (Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea) (2018) *2018 Design Standard for Steel Bridges (Limit State Design)*, KDS 24 14 31, MOLIT, Korea (in Korean).
- [26] 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, Vol.59, No.1, pp.91-108.
- [27] Chen, W.-F., and Lui, E.M. (1991) *Stability Design of Steel Frames*, CRC Press, US.
- [28] Wang, P.H., Tseng, T.C., and Yang, C.G. (1993) Initial Shape of Cable-Stayed Bridges, *Computers & Structures*, Elsevier, Vol.47, No.1, pp.111-123.
- [29] Ernst, H.J. (1965) Der E-Modul von Seilen unter Beruecksichtigung des Durchhanges, *Der Bauingenieur*, Vol.40, No.2, pp.52-55 (in German).
- [30] Fleming, J.F. (1979) Nonlinear Static Analysis of Cable-Stayed Bridge Structures, *Computers & Structures*, Elsevier, Vol.10, No.4, pp.621-635.
- [31] Gimsing, N.J., and Georgakis C.T. (2012) *Cable Supported Bridges: Concept and Design* (3rd Ed.), John Wiley & Sons, UK.
- [32] Nazmy, A.S., and Abdel-Ghaffar, A.M. (1990) Three-Dimensional Nonlinear Static Analysis of Cable-Stayed Bridges, *Computers & Structures*, Elsevier, Vol.34, No.2, pp.257-271.
- [33] MOLIT (Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea) (2021) *2021 Load Combination for Bridge Design (Limit State Design)*, KDS 24 12 11, MOLIT, Korea (in Korean).
- [34] MOLIT (Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea) (2021) *2021 Bridge Design Load (Limit State Design)*, KDS 24 12 21, MOLIT, Korea (in Korean).
- [35] Noh, D.O., Kyung, K.S., and Park, J.E. (2021) Evaluation of Rating Factors for Steel Box Girder Bridge Based on Limit State Design, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.33, No.2, pp.75-86 (in Korean).

**요약:** 본 연구에서는 하모니 서치 알고리즘을 이용한 강사장교 케이블 단면 결정 방법을 제시하였다. 하모니 서치 알고리즘은 확률론적 이론을 바탕으로 최적값을 탐색함으로써 케이블 단면을 결정한다. 사장교 케이블 단면결정을 위한 목적함수로는 케이블의 중량을 사용하였으며, 제약조건식은 한계상태설계법에 따라 설계하중조건에 대한 하중저항능력과 사용성을 고려하였다. 비선형 해석기법으로 직접반복법을 이용하였으며, 각 부재의 기하 및 재료 비선형성을 고려하여 케이블 단면을 결정하였다. 하모니 서치 알고리즘으로 선정된 케이블 단면으로 3차원 강사장교 초기형상해석을 수행하였으며, 초기 장력과 형상이 고려된 비선형해석을 통하여 사장교 케이블의 단면과 응력수준을 결정하였다. 결정된 케이블의 단면과 응력수준을 분석한 결과, 사장교 주탑의 높이, 보강형 단면 조건 및 지간 변화 그리고 케이블 배치 형식에 따라 케이블에 발생하는 응력 수준을 고려하여 단면이 결정될 수 있음을 확인하였다.

**핵심용어:** 하모니 서치 알고리즘, 강사장교, 케이블 단면 결정, 케이블 단면 응력 검토, 설계하중조건, 기하 및 재료 비선형 해석