

유전자 알고리즘을 이용한 닐센아치교의 최적설계기법

Optimal Design Technique of Nielsen Arch Bridges by Using Genetic Algorithm

이 광 수¹⁾ · 정 영 수²⁾

Lee, Kwang Su · Chung, Young Soo

요 약 : 유전자 알고리즘을 이용한 닐센아치교의 최적설계기법을 이 논문에서 제시하였다. 설계 매개변수로는 닐센아치교의 아치-라이즈비와 강중비에 대해서 최적화기법을 적용하여 각각의 거동을 분석하고, 적정성을 평가하여 최적의 매개변수 값을 결정하였다. 매개변수의 결정은 구조물의 안전성과 사용성 그리고 경제성에 중요한 설계인자로서 정형화가 요구된다. 이를 위해 최적화 기법으로 전역 최적해 탐색능력이 우수한 유전자 알고리즘을 사용하였으며, 설계 목적함수로는 구조물의 총 중량을 사용하였고, 제약조건으로는 변위, 응력, 시공성 제약조건을 두었다. 구조해석은 미소변위이론에 의한 탄성해석을 수행하여 유전자 알고리즘과 조합하여 병렬연산으로 수행시간을 단축시켰다. 이 연구에서 개발된 최적설계기법을 사용하여 최적의 아치-라이즈비와 강중비, 최적설계영역을 제시 하였으며 실무에 적용할 수 있도록 하였다.

ABSTRACT : Using the genetic algorithm, the optimal-design technique of the Nielsen arch bridge was proposed in this paper. The design parameters were the arch-rise ratio and the steel weight ratio of the Nielsen arch bridge, and optimal-design techniques were utilized to analyze the behavior of the bridge. The optimal parameter values were determined for the estimated optimal level. The parameter determination requires the standardization of the safety, utility, and economic concepts as the critical factors of a structure. For this, a genetic algorithm was used, whose global-optimal-solution search ability is superior to the optimization technique, and whose object function in the optimal design is the total weight of the structure. The constraints for the optimization were displacement, internal stress, and time and space. The structural analysis was a combination of the small displacement theory and the genetic algorithm, and the runtime was reduced for parallel processing. The optimal-design technique that was developed in this study was employed and deduced using the optimal arch-rise ratio, steel weight ratio, and optimal-design domain. The optimal-design technique was presented so it could be applied in the industry.

핵심용어 : 닐센아치교, 최적설계기법, 유전자알고리즘, 병렬연산, 아치-라이즈비, 강중비, 최적설계영역

KEYWORDS : nielsen arch bridge, optimal design technique, genetic algorithm, parallel processing, arch-rise ratio, steel weight ratio, optimal design domain.

1. 서론

닐센아치교는 그 자체의 독특한 아름다움과 구조적으로 매우 이상적인 형식으로, 아치조형성으로 인해 70~300m의 중·장지간에서 가장 우수한 경관을 창출하고 예술성이 풍부한 교량으로 도시지구의 연속교에 아치교량이 건설되고 있다. 강재의 고강도화 및 첨단소재 개발로 경량화가 실현되고 해석기법이 발달함에 따라 장경간을 갖는 강(Steel)아치교의 건설이

증가하면서, 인간과 자연과의 조화로 환경 친화적인 설계에 많은 관심을 갖기 시작하였다. 아치교는 구조특성상 아치리브의 단면력을 효율적으로 경감시켜 경제적인 구조물을 만들 수 있으며, 구조적 효율성과 미적 아름다움을 동시에 만족할 수 있도록 최적설계의 필요성이 절실한 실정이다. 아치구조물의 최적설계는 곡선보 이론에 의한 해석적인 방법을 적용해야 되지만, 이 방법은 해석상 곡선 보 요소 처리가 어려워 아치 구조물을 유한개의 직선 보 요소로 구성된 것으로 근사화 한다.

1) 교신저자, 중앙대학교 대학원 토목공학과 박사과정 수료, (주)텍풀이앤씨 대표이사
(Tel. 031-711-6350, Fax. 031-711-6360, E-mail: techfull@naver.com)
2) 중앙대학교 토목공학과 교수, 공학박사(chung47@cau.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2010년 2월 28일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

또한, 설계변수가 불연속 영역에서 정의 되어 있고 설계변수와 제약조건의 수가 많아지면 해를 구하는데 어려움이 있다. 기존의 최적설계 기법들을 직접적으로 적용하는 데는 어느 정도 한계가 있으며, 실제 교량에 적용할 경우 막대한 시간이 요구되고 컴퓨터의 용량부족 등으로 많은 문제점을 지니고 있었다.

최적설계 기법은 설계시 고려해야 할 강도 즉, 내구성, 사용성 등의 제약조건을 형성하여 이 제약조건을 만족하면서 구조물의 중량 또는 경비함수로 표현되는 목적함수가 최소가 되는 변수를 명확하게 결정해주는 설계법으로 최적화를 위한 효율적인 알고리즘의 개발에 대한 많은 연구가 진행되어 왔다. 수학적기법인 수치 최적화 기법들은 민감도 해석이나 많은 양의 경사도 벡터 해석을 수행해야 함으로서 설계변수가 많아지고 목적함수나 제약조건이 증가한다. 또한 최적해 주변에서 국부 최적점이 다수 존재하여 국부 최적해에 수렴하기 쉬우며 안정적이지 못하는 단점이 있다.

최적설계의 신뢰도를 높이기 위해 다수의 초기설계에 대한 반복 계산을 통해 유용한 영역 전 구간에 대해서 정확한 검토가 요구되는데 설계변수가 많고 제약조건이 복잡한 경우 초기설계의 결정에 많은 어려움이 따른다.

이러한 단점들을 해결하기 위하여 1960년대부터 다양한 최적화 문제에 자연현상을 이용한 모의진화 (Simulated Evolution) Fogel(1968), 유전알고리즘 (Genetic Algorithms : GAs) Holland(1975), 시뮬레이티드 어닐링 (Simulated Annealing) Kirkpatrick(1983), 터부탐색 (Tabu Search) Glover(1986) 기법 등은 자연 발견적 기법(Heuristic Method)을 기반으로 하는 다수의 조합 최적화(Combinatorial Optimization) 기법들로 여러 분야에서 활발히 연구되고 있다.

이들 중 유전알고리즘은 목적함수를 미분하여 얻을 수 있는 벡터를 필요로 하지 않을 뿐 아니라, 어느 특정 문제에 국한되지 않고 다양한 문제에 적용될 수 있어서 여타 기법에 비해 그 원리 및 최적해를 찾는 방법이 쉽고 사용하기 편리한 장점이 있다.

GAs는 유전적 계승과 생존경쟁이라는 자연현상을 알고리즘 형태로 모델링한 것으로 생물의 진화과정인 자연선택과 유전법칙을 모방한 확률론적 탐색기법이다.

유전자 알고리즘의 가장 큰 특징은 고전적인 최적화기법은 하나의 해를 운용하는데 비해 유전자 알고리즘은 여러 개의 해 집단을 운용한다. 또한, 해 집단의 이용과 탐색을 적절하게 조절하면서 해 공간을 탐색하는 기법으로, 그 개념과 이론이 단순하고 해의 탐색능력이 우수하여 공학적 문제는 물론, 사회과학 등 모든 분야에서 최적화 및 의사결정 문제에 다양하게 적용되고 있다. 최세휴(2005)는 기존의 단면점증법을

개선하여 수정된 단면점증법을 일반 강 아치교의 비탄성 최적설계를 수행하였고, 김승억 과 마상수(2003)는 유전자 알고리즘을 이용한 비선형 탄성 최적설계를 수행하였다. 전자는 규칙적으로 단면을 선택하므로 설계변수의 전역적 탐색이 불가능하므로 최적해의 확률이 떨어지며, 후자는 탄성해석 후 강도검토에서 제약조건을 만족하지 못하는 점과 많은 시간이 소요된다는 점을 들었다.

이 논문에서는 전역 최적해 탐색능력이 우수하고 최적의 제약조건들을 탑재한 구조해석 솔버와 유전자 알고리즘을 조합하고 병렬연산 시스템을 구축하여 설계의 효율성을 증진시키는 최적설계기법을 개발하였다.

닐센아치교의 최적설계를 위해 설계 매개변수의 결정과 아치-라이즈비(f/L)와 강중비에 대해서 최적화기법을 적용하여 각각의 거동을 분석하고, 적정성을 평가하여 최적의 매개변수 값을 제시하였다. 최적화기법으로는 유전자 알고리즘을 사용하였으며, 목적함수로는 구조물의 총 중량을 사용하였고 제약조건으로는 변위, 응력, 시공성 제약조건을 두었다. 구조해석은 미소변위이론을 적용하여 유전자 알고리즘과 조합하여 병렬연산으로 수행시간을 단축시켰다.

따라서 이 연구에서 개발된 효율적인 최적설계기법을 사용하여 최적의 아치-라이즈비와 강중비, 최적설계영역을 제시하고 기존 연구와 비교 분석하여 실무에 적용할 수 있도록 하였다.

2. 닐센아치교의 구조특성

2.1 개요

닐센아치교는 로제교의 일종으로 아치리브와 보강거더의 강성을 비슷하게 함으로서 휨모멘트를 효과적으로 분배할 수 있으며, 아치부재 및 아치부재와 보강거더를 연결하는 케이블 또는 로프나 강봉을 경사지게 배치하여 트러스와 같이 강성을 향상시킨 구조를 식이다. 그림 1은 닐센아치교의 형상을 나타내고 있으며 크게 아치리브와 보강거더, 케이블, 바닥판으로 구성되어 있다.



그림 1. 닐센아치교의 구성

닐센아치교는 아치리브의 형상 및 보강거더, 케이블의 배치 형식, 아치리브의 경사에 의해 분류할 수 있으며, 아치리브의 형상은 강(Steel)Box형, 강관형, 강관조합형으로 분류되고, 보강거더는 Box거더, 싱글와렌, 더블와렌, 중복와렌 트러스 형식으로 분류된다. 또한, 아치리브의 경사에 의해 분류하면 Basket Handle형 방식과 평행형 방식으로 구분된다. 이들의 구조적 특징을 열거하면, 강(Steel)Box형은 사각구조로 강성은 크지만 단면이 커서 비경제적이고 미관이 불량하며 내풍 안전성에도 다소 불리하지만 전체적인 구조 안전성 및 시공성이 우수한 구조로 중·장기간 교량에 적합하고, 강관형은 원형구조로 강성은 Box형에 비해 작으나 미관이 우수하고 내풍 안전성 및 경제성이 양호한 반면에 시공성이 복잡한 구조로 중·소 기간 교량에 적합하다. 강관조합형은 소형 강관을 조합한 형태로 횡방향 강성이 크고 압축 및 비틀림에 유리하며 미관이 우수하지만 교량 길이에 따라 단면이 커지고 케이블이 길어져 비경제적으로 소기간 교량에 적합한 형식이다. 케이블의 배치형식으로 싱글와렌 트러스형은 부재력이 더블와렌 트러스형식에 비해 아치리브와 보강거더의 축력은 비슷하나 휨모멘트가 커 비경제적이며, 더블와렌 트러스형식은 아치리브와 보강거더에 대한 휨모멘트가 현저히 작고 아치리브의 축방향력이 주요인 자로서 경제적이며 처짐도 일반 아치교량 보다 작아 사용성이 좋다. 중복와렌 트러스형식은 더블와렌 트러스형식과 역학적 거동이 비슷하고 전체적인 구조 안전성과 미관이 우수하여 장기간 교량이나 철도교 하중에 적용성이 우수한 형식이다.

아치리브의 Basket Handle형은 정면에서 크라운부로 경사지게 배치한 방식으로 양측 아치를 구속시킨 입체구조로 면외 강성이 커 수평하중인 풍하중이나 지진하중에 대해서 안정한 거동을 갖는다. 평행형 방식은 아치리브를 연직으로 배치한 형식으로 개방감을 주는 장점이 있지만, 반면에 폭이 넓은 교량에서는 단면이 커지고, 특히 면외강성이 작아 수평하중에 불리하며 장기간 교량에도 부적합하다. 한편, 시공성은 양호하며 건축한계에 제한을 받지 않아 주로 시가지의 소규모 교량에 적합한 형식이다.

2.2 유한변위이론

닐센아치교의 전체 구조시스템 해석은 외력에 의한 구조물의 변형은 미소하고 부재강도매트릭스를 산정할 때 외력이 작용한 상태에서의 평형조건은 외력이 작용하기 전의 부재의 기하학적 배치에 의한 것을 그대로 사용한다는 가정하에서 해석한다. 즉, 미소변형이론으로 해석하고 부분적으로 적용시간이 크고 구조적으로 강성을 확보하기 어려운 아치리브는 외력에 의한 변형이 크게 되면, 부재의 변형을 고려한 기하학적 배치에서 구하고

외력에 의한 응답을 기하학적 비선형해석으로 검토한다.

따라서 구조물의 변형 형상이 하중재하 후의 변위된 상태에 대응하는 것으로 하여 힘의 평형방정식을 세워 유한변위이론의 기초 식을 유도한다. 그림 2에서 변위 후의 아치리브 미소요소 $dx + du$ 및 $dy - dv$ 에 대한 힘의 평형방정식으로 부터 다음 식을 세울 수 있다.

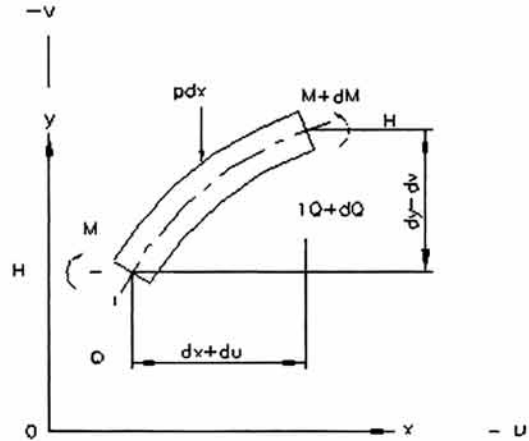


그림 2. 변위 후의 아치리브 미소 요소

$$\sum V = 0 : dQ + p dx = 0 \tag{1}$$

$$\sum M = 0 : -dM + Q(dx + du) - H(dy - dv) = 0$$

위 식(1)을 다시 정리하면,

$$\frac{dQ}{dx} = -p \tag{2}$$

$$\frac{dM}{dx} = Q - H \frac{dy}{dx} + (H \frac{dv}{dx} + Q \frac{du}{dx})$$

한편, 아치리브의 휨 강성을 EI로 하고 임의 점 m의 접선 각을 ϕ 로 하면 수직 처짐 v와 휨모멘트 M과의 관계는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{d^2v}{dx^2} = - \frac{M}{EI \cos \phi} \tag{3}$$

위 식의 양변을 x로 2회 미분하여 식(2)의 단면력을 이용하면 다음식과 같다.

$$\frac{d^2}{dx^2} (EI \cos \phi \frac{d^2v}{dx^2}) = p + H \frac{d^2y}{dx^2} - H \frac{d^2v}{dx^2} - \frac{d}{dx} (Q \frac{du}{dx}) \tag{4}$$

또한, 아치축선이 2차포물선이고 단면 2차모멘트의 변화가 $I = I_c / \cos \varphi$ 이면 위 식의 우변의 수평변위 u 의 항을 무시할 수 있으므로 위 식은,

$$EI_c \frac{d^4 v}{dx^4} + H \frac{d^2 v}{dx^2} = p - \frac{8f}{l^2} H_l \quad (5)$$

로 표시할 수 있다. 따라서 위의 식(5)는 아치교의 유한변위 이론의 기초식으로 비선형성을 나타낸다.

여기서, $H(H_l + H_r)$ 는 전체 수평반력으로 각각 사하중 및 활하중에 의한 수평반력의 합이다.

식(5)의 상계 미분방정식의 수치계산을 하면 유한변위이론에 의한 휨모멘트 M_D 는 선형이론에 의해 얻어진 휨모멘트 M_E 를 이용하여 근사적으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$M_D = M_E \frac{1}{1-\zeta} \quad (6)$$

여기서, M_D, M_E 는 각각 유한변위이론 및 미소변위이론에 의한 휨모멘트이고, ζ 는 축방향력에 의한 부가모멘트를 보정하는 파라미터로 작용 수평력을 H_D , 아치의 좌굴하중을 H_{cr} 로 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\zeta = \frac{H_D}{H_{cr}} \quad (7)$$

유한변위이론에 의해 얻어지는 수직응력 f_D 는 미소변위이론에 의한 f_E 를 사용하여 표시할 수 있으며, 축방향력에 의한 수직응력을 $f_D \cong f_E$ 로 근사하고 휨모멘트에 의한 수직응력을 $f_D^M (f_E^M)$ 으로 하면 다음 식(8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_D = f_E^N + f_E^M \frac{1}{1-\zeta} \quad (8)$$

그림 3은 Roew(1953)이 제시한 도표로 유한변위이론에 의한 수직응력의 증가율(%) $100 \times (f_D/f_E - 1)$ 을 파라메타 $f_E^N/f_E^M, f_E^M/f_E^N$ 및 세장비(a/r)의 함수로 나타낸 것이다.

이 논문에서는 그림 3의 도표를 이용하여 미소변형에 의해 얻어진 응력비(f_E^N/f_E^M), 혹은 (f_E^M/f_E^N)와 세장비(a/r)로부터 유한변위이론의 적용여부를 판단하였으며, 도표의 종축에 양단 고정인 보정계수 0.70을 적용하였다.

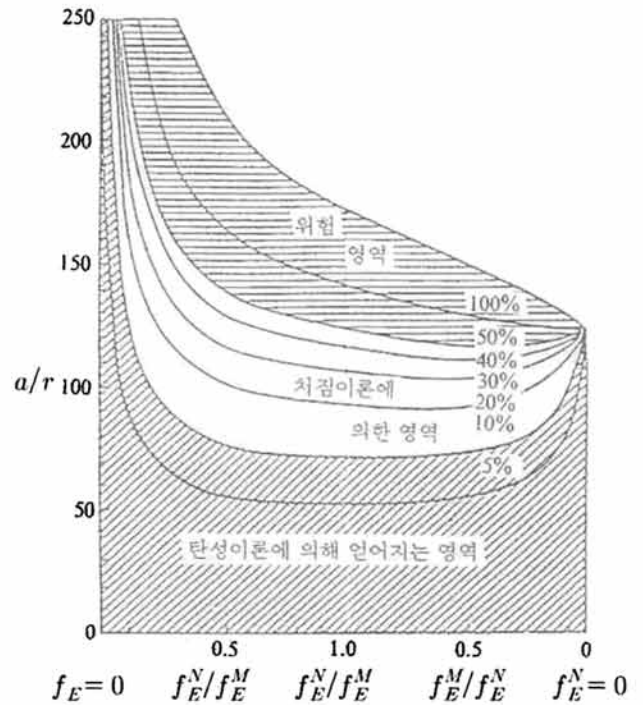


그림 3. 미소변형이론과 유한변위이론의 관계

2.3 닐센아치교의 좌굴

아치 구조계의 전체 좌굴은 면내좌굴과 면외좌굴로 분류되며 면내좌굴은 아치의 축선이 그 구면 내에서 변형하고, 면외좌굴은 구면 외로 변형한다.

특히, 닐센아치교는 아치리브가 보강거더와 강성이 비슷한 로제형으로 아치리브와 보강거더가 동시에 축방향력과 휨모멘트를 받는 구조로 적용지간이 큰 것에 비해 강성이 작기 때문에 좌굴에 대한 검토가 필수적이다.

일반 아치교는 행어, 수평브레이싱, 스트러트 등에 의해 아치리브의 변형 형상이 유사하게 나타나므로 유효좌굴길이가 일반화 되어 있으나, 닐센아치교에서는 케이블의 교차 부정정 배치에 의해 그 변형이 특이한 형상을 나타낸다.

따라서 유효좌굴길이 산정은 가정치를 두어 대상교량을 축소 모형화하여 실험치와 이론치인 탄·소성 유한변위해석에 의해 극한하중을 구하여 적정성을 검토한다.

이 논문에서는 유효좌굴길이의 적정성을 검토하기 위해 일본 도로교시방서의 좌굴조사식 식(9)을 사용하여 극한한계 상태에서의 단면력을 이용하여 검토하였다.

$$\frac{P}{P_{cu}} + \frac{M_y}{M_{ycu} \left(1 - \frac{P}{P_{ycr}}\right)} + \frac{M_z}{M_{zcu} \left(1 - \frac{P}{P_{zcr}}\right)} \leq 1.0 \quad (9)$$

여기서,

- $P = \alpha P_1$ P_1 : 축방향력
- $M_y = \alpha M_{y1}$ M_{y1} : 면내 휨모멘트
- $M_z = \alpha M_{z1}$ M_{z1} : 면외 휨모멘트
- P_{cu} : 기둥의 설계기준 압축강도
- $P_{y_{cr}}, P_{z_{cr}}$: y축, z축 둘레의 Euler좌굴하중
- α : 하중계수

따라서 선정된 유효좌굴길이를 이용해서 상기 식(9)에 대해 그림 4의 내하력 상관도를 작성하여 실험치와 해석치를 도시하고, 이들 모두가 식(9)보다 큰 값을 나타내면 아치리브는 좌굴에 대해서 안정한 것으로 판단하고 유효좌굴길이를 산정한다.

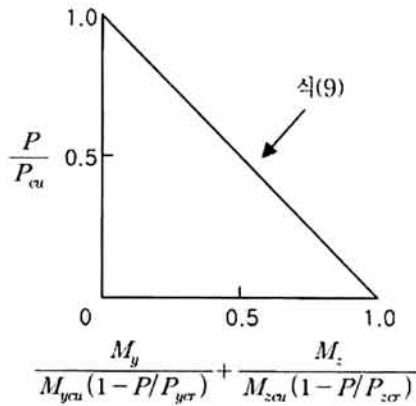


그림 4. 내하력 상관도

국내 및 해외의 적용사례를 들어 아치리브의 유효좌굴길이를 검토하였으며, 적용사례는 표 1과 같다.

표 1. 닐센아치교 아치리브의 유효좌굴길이

교 랑 명	면내좌굴길이	면외좌굴길이	비 고
Tatsumi	케이블 간격 2배	스트러트 간격	L=120m, rise=21.8m
Kizugawa	테이블 간격	스트러트 간격	L=305m, rise=57.0m
Nakajima Riner	케이블 간격	스트러트 간격의70%	-
Kanjakigawa	케이블 간격 2배	스트러트 간격	L=150m, rise=30.0m
서강대교	케이블 간격 2배	스트러트 간격	L=150m, rise=30.0m
저도연륙교	케이블 간격 2배	스트러트 간격	L=183m, rise=21.8m
탄천황단교	케이블간격 2배	스트러트 간격	L=130m, rise=25.0m

이 논문에서 적용한 유효좌굴길이 산정 기준은 아치리브와

보강거더에 대해서 표 2와 같이 적용하였다.

표 2. 각 부재별 유효 좌굴길이 산정 기준

구 분	면내좌굴	면외좌굴
아치리브	케이블간격 2배	스트러트 간격
보강거더	케이블간격 2배	가로보 간격

3. 닐센아치교의 최적설계

3.1 최적화 문제의 형성

3.1.1 설계변수

최적화에 있어서 가장 중요한 요소인 설계 매개변수를 결정하는 것은 최적설계에 부합하는 설계요소들을 선정하는데 있다. 설계변수는 성질이 서로 다른 특성 값들로 구성되어 있으며, 최적화 과정에서 이산변수로 취급된다.

구조물의 설계변수는 재료, 단면성질, 형상, 부재배치 등으로 구분할 수 있으며 대개 독립변수로 결정된다.

닐센아치교는 주 부재, 부 부재, 그리고 케이블로 구분 할 수 있으며 이들 각각의 설계변수 그룹을 나열하면 표 3과 같다.

표 3. 닐센아치교 설계변수 그룹

No	설계변수 그룹	비 고
1	아치리브	주 부재
2	보강거더	"
3	스트러트	"
4	스트러트	"
5	횡 빔	"
6	단부거더	"
7	종 리브	부 부재
8	횡 리브	"
9	케 이 블	케 이 블

설계변수는 최적화시 그룹별 부재요소에 따라 세분화 하였고, 다시 이들은 각각의 단면성질(단면적(A), 단면2차 모멘트(I), 단면계수(Z), 단면2차 반경, 비틀림 상수, 뒤틀림 상수) 등이 데이터베이스(D/B)화 되어 자동으로 입력될 수 있도록 이산화 하였다.

3.1.2 목적함수

구조물의 최적화에 있어서 목적함수는 또 하나의 가장 중요한 요소로 최적해를 구하는 지표이다. 목적함수는 설계 가능영

역에서 무수히 많이 존재하지만 그 중에 최적의 설계점을 결정하기 위해서 여러 허용 설계점들과 비교해야 한다. 결국 최적 설계는 제약조건식을 만족하면서 목적함수가 최소값이 되는 설계변수의 값을 구하는 것이다.

이 논문에서는 구조물의 중량을 최소화하는 것을 목적함수로 다음 식(10)과 같이 정하였다.

$$F(x) = \sum_{i=1}^N Area_i \cdot L_i \cdot \rho_i \quad (10)$$

여기서,

- $F(x)$: 목적함수
- $Area_i$: i 부재 단면적
- L_i : i 부재 길이
- ρ_i : i 부재 단위중량
- N : 부재수

상기 식(10)을 구조 최적화의 일반식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\text{Minimize : } F(X) \quad (11a)$$

$$\text{Subject to : } G_i(X) \geq 0, \quad i = 1, \dots, g \quad (11b)$$

여기서, X 는 설계변수이고 $G_i(X)$ 는 설계제약조건식이며 g 는 제약함수이다. 위 식(11)은 비선형 계획문제로 여러 가지 비선형 알고리즘으로 해를 구할 수 있으나, 효율적인 최적설계를 위해 설계변수 X 를 이산형으로 취급하여 X 에 대한 특수 이산형 알고리즘에 의해서 해를 구해야 한다.

이 연구에서는 설계변수 X 를 2진 스트링(0, 1로 표현) 형태인 염색체가 나열된 유전자형을 코드화한 파라미터로 치환하여 유전자 알고리즘을 이용하였다.

목적함수는 대부분 단일목적함수로 정형화되지만 서로 상반되거나 종속되는 경우가 나타나는데, 즉, 중량이 최소화 되면 변위가 최대가 되는 다목적함수가 나타난다.

이 논문에서는 구조안정성과 경제성을 동시에 만족할 수 있도록 도로교설계기준(2005)의 설계제약조건을 두었다.

3.1.3 설계제약조건

최적설계를 위한 제약조건으로는 변위제약, 응력제약, 시공성제약 등에 대해서 제약조건을 두었으며, 이들의 제약조건은 도로교설계기준(2005)에 의한 6가지 하중조합으로 부재에 대한 평가를 하였다. 널센아치교의 설계를 위한 허용응력조합 및 허용응력 증가계수는 다음 표 4와 같다.

표 4. 허용응력조합 및 허용응력 증가계수

구 분	고정 하중	지점 침하	활하중	온도 하중	풍하중	풍하중 1/2	하중증가 계수
하중조합 1	●	●	●				1.00
하중조합 2	●	●	●	●			1.15
하중조합 3	●	●	●			●	1.25
하중조합 4	●	●			●		1.25
하중조합 5	●	●	●	●		●	1.35
하중조합 6	●	●		●	●		1.35

1) 변위 제약조건

변위(처짐)의 제약으로는 충격을 포함한 활하중에 의한 보강 거더 및 횡빔의 최대처짐을 사장교형식에 준하는 허용처짐으로 $L/400$ 로 규정하였다.

$$f_1 = \frac{\Delta^{iv}}{\Delta_{allow}^{iv}} \leq 1.0 \quad i = 1, N \quad (12a)$$

$$f_2 = \frac{\Delta^{ih}}{\Delta_{allow}^{ih}} \leq 1.0 \quad i = 1, N \quad (12b)$$

여기서,

f_1, f_2 : 연직 및 수평변위 제약함수

Δ_{iv}, Δ_{ih} : 연직 및 수평방향의 최대변위

$\Delta_{allow}^{iv}, \Delta_{allow}^{ih}$: 연직 및 수평방향의 최대허용변위

2) 응력 제약조건

널센아치교는 구조특성상 축방향력과 휨모멘트를 동시에 받는 구조로 거동하는데, 도로교설계기준(2005)에 의해 부재가 축방향력이 압축인 경우와 인장인 경우에 대해서 각각의 조합 응력에 대한 제약조건을 두었다.

(1) 축방향력이 압축인 경우

$$\frac{f_c}{f_{caz}} + \frac{f_{bcy}}{f_{bagy}(1 - \frac{f_c}{f_{Ey}})} + \frac{f_{bcz}}{f_{bao}(1 - \frac{f_c}{f_{Ez}})} \leq 1.0 \quad (13a)$$

$$f_c + \frac{f_{bcy}}{(1 - \frac{f_c}{f_{Ey}})} + \frac{f_{bcz}}{(1 - \frac{f_c}{f_{Ez}})} \leq f_{cal} \quad (13b)$$

(2) 축방향력이 인장인 경우

$$f_t + f_{bt_y} + f_{bt_z} \leq f_{ta} \quad (14a)$$

$$-\frac{f_c}{f_{ta}} + \frac{f_{bcy}}{f_{bagy}} + \frac{f_{bcz}}{f_{bao}} \leq 1.0 \quad (14b)$$

$$-f_t + f_{bc_y} + f_{bc_z} \leq f_{cal} \quad (14c)$$

3) 시공성 제약조건

시공성 제약은 아치리브와 보강거더 부재에 대해 적용하였으며 아치리브 부재의 제약조건은 다음식과 같다.

$$c = \frac{A_r^i}{A_r^{i+1}} \leq 1.0 \quad i = 1, \dots, N \quad (15)$$

여기서, A_r^i, A_r^{i+1} : i 번째 높이의 부재단면적

동일한 아치 축선 상에 위치하는 부재에 대해서 아래쪽 부재 단면적이 위쪽 부재 단면적 보다 크게 취할 수 있도록 아치 축선의 부재 연결성을 제약하였다.

또한, 보강거더 부재에 대해서는 시공순서에 의해서 자동으로 단부쪽 부재가 먼저 선택 되도록 제약을 두었다.

3.2 최적화 알고리즘

3.2.1 유전자 알고리즘

조합 최적화의 한 방법인 유전알고리즘은 1975년 Holland의 논문 "Adaptational Naturalized Artificial Systems"에서 처음으로 소개되었는데, 유전자 알고리즘(GAs)은 유전적 계승과 생존경쟁이라는 자연현상을 알고리즘 형태로 모델링한 것으로 생물의 진화과정인 자연선택과 유전법칙을 모방한 확률론적 탐색기법이다. 유전자 알고리즘은 설계변수를 부호화해서 사용하므로 이산형 변수를 다루기에 매변수편리하며, 또한 설계영역에서 초기집단을 무작위로 선택하고 그 설계집단이 전체의 설계공간을 병렬 탐색하므로 초기의 매개 변수치 및 매개변수의 조정치에 따라 전역적 최적해를 찾을 가능성이 매우 높다. 그 뿐만 아니라 목적함수의 미분 가능성 및 연속성과 상관없이 오로지 적합도 함수만의 정보를 이용하는 직접 탐색 기법이므로 비선형 함수나 불연속적인 제약조건을 많이 포함하는 문제에도 매우 적합한 기법이다.

이 연구에서 개발된 닐센아치교의 최적설계 과정은 그림 5에서 보여주고 있으며, 최적설계 알고리즘에 사용된 유전자 알고리즘의 파라미터는 De Jong(1975)이 제시한 표준 파라미터를 기초로 집단의 개체수는 40개, 교배율은 0.6, 돌연변이율은 0.02를 사용하였다.

그림 5의 중간부분은 설계의 최적화로 기본단면에 의해 주어진 개체 집단에서 무작위로 하나의 개체를 선택한 다음 적합도(목적함수)를 평가하여 제약조건의 위배 여부를 판단한다. 선택된 개체가 설계 비가용 영역일 경우 설계가용 영역으로 적합도가 평가되도록 재생산과 교배, 돌연변이의 과정을 되풀이 하면서 적합도가 우수한 형질의 개체가 다음 세대로 유전시키는

일련의 과정에서 최대 적합도가 50% 이상 될 때 종료하도록 하였다.

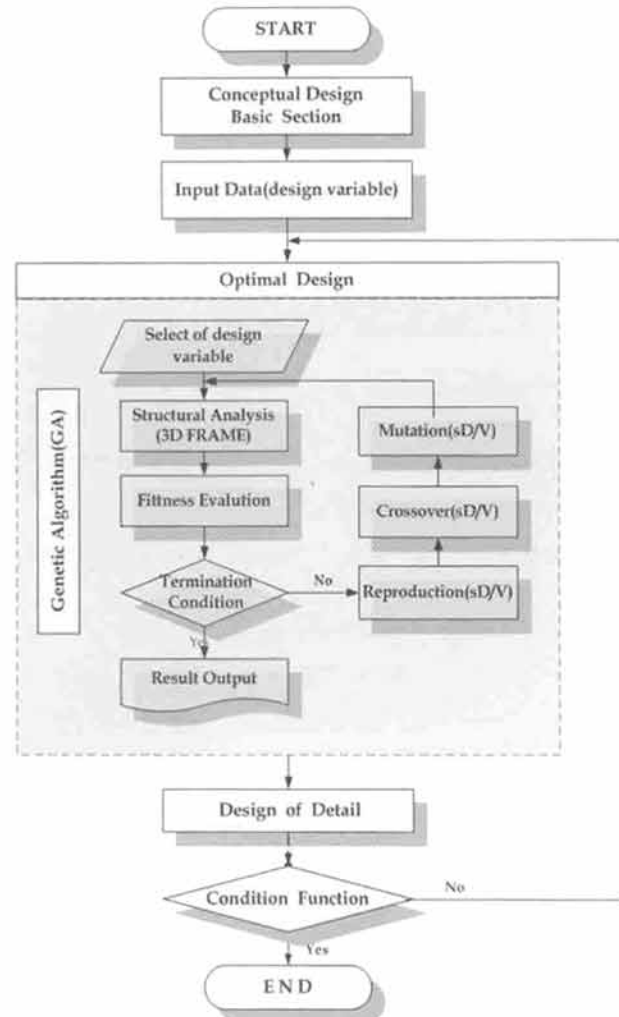


그림 5. 최적설계 흐름도

3.2.2 병렬연산 기법

병렬연산(Parallel processing)은 대규모의 문제를 푸는데 있어서 컴퓨터 하드웨어의 프로세스가 하나가 아닌 여러개의 프로세서를 동시에 사용하여 빠르고 효율적으로 연산을 수행하는 것을 말한다. 유전자 알고리즘은 병렬성을 띤 구조로 되어 있지만 최적해의 확률을 높이기 위해서 개체군의 증가가 요구되고 적합도를 평가하기 위해 구조해석을 순차적으로 반복 수행하는데 많은 시간이 소요된다. 이는 전체 계산시간의 95% 이상을 차지하는데, 이런 반복적이고 순차적인 연산을 병렬연산 처리함으로써 시간을 단축시킬 수 있다.

이 논문에서 사용된 병렬연산 기법으로는 데이터를 전송하는 부분과 선형 대수식의 연산 부분에 대해서 병렬화 하였다. 즉, 컴퓨터 하드웨어 측면에서 메모리 방식과 명령어 흐름 방식을 적용하였고, 소프트웨어 측면에서는 프로그래밍 기법을 적용하였다.

1) 병렬 프로그래밍

그림 6a는 순차계산을 실제로 병렬계산을 했을 때 속도향상을 보여 주는 개념적인 예로 프로세스 수가 4개 일 때 약 2.5배의 속도가 향상됨을 알 수 있다. 프로세스 수가 더욱 많아지면 선형적으로 최대 5배의 속도향상을 얻을 수 있으나 실제로는 모든 프로세스의 CPU 시간이 불균등 (Load unbalance)할 수 있고 통신 과부하 등으로 속도향상은 선형적이지 못하는 경우가 발생된다.

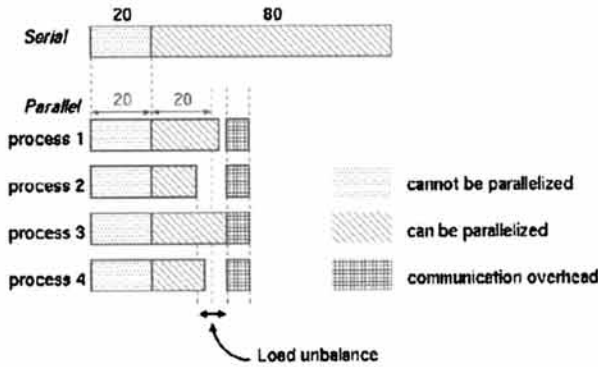


그림 6a. 병렬 속도향상

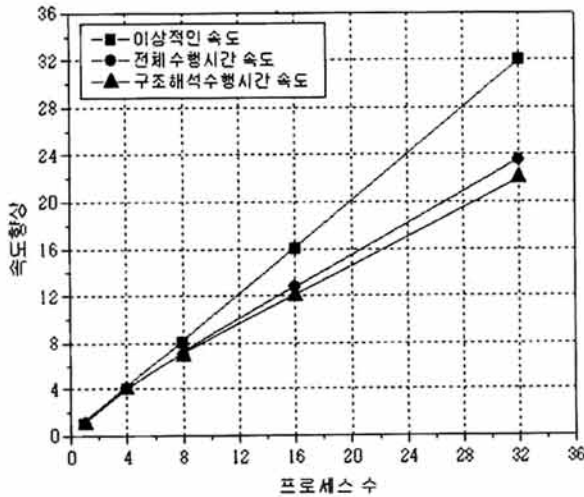


그림 6b. 병렬 속도향상

그림 6b는 Master 노드 - Slave 노드 모델을 기본으로 이상적인 속도상향과 실제 시뮬레이션을 통한 각 노드의 속도향상을 비교하였다. Slave 프로세스 수가 증가할수록 알고리즘의 통신량 증가로 통신시간이 증가한다. 따라서 병렬시스템의 속도향상은 이상적인 속도향상에 비해 감소하는데 프로세스 수가 증가함에 따라 증가폭은 더 커진다. 이는 각 프로세스가 알고리즘을 수행할 때 연산 신호를 받게되면 모든 프로세스의 종료시간이 일정치 않고 대기시간 증가로 시간손실이 발생하기 때문이다. 또한, 각각의 PC 클러스터로 인한 네트워크에서도

속도향상의 손실을 가져온다.

이 논문에서는 병렬 효율성을 높이기 위해 소프트웨어 부분에서 구조해석 프로그램내의 병렬이 가능하고, 해석속도 면에서 직접법보다 효율적인 반복법을 기반으로 하는 수치해석 알고리즘으로 프로그램을 코딩하여 부재 강성매트릭스를 생성한다. 또한, 전체 강성매트릭스의 조합과 분산 구성 등 구조해석에 기본적으로 필요한 부분들을 병렬화 하였다.

하드웨어 면에서는 동일한 성능을 갖는 개인용 컴퓨터를 Master(node1)와 Slave(node2, ... nodeN)로 클러스터링하였고 총 프로세스 수는 2N배로 조합하였다. 즉, 여러 대의 컴퓨터를 네트워크를 통해 연결하여 하나의 단일 컴퓨터처럼 동작하도록 하였고, 각 노드간의 데이터 교환이 가능하도록 소형 슈퍼컴퓨터를 구성하여 연산 시간을 단축시켰다. 각각의 프로세스들 사이의 통신을 위해 병렬프로그래밍 라이브러리 MPI(Message Passing Interface) 모델인 MPICH2 를 사용하였다.

4. 최적설계

이 연구에서 개발된 닐센아치교 최적설계기법의 최적화 알고리즘을 검증하기 위해 축소모형 닐센아치교인 그림 7. 프로그램 해석 검증모델을 동일 조건하에서 상용 구조해석 프로그램인 SAP2000과 비교 분석하여 검증하였고, 기존의 연구(최세휴, 2005)와 아치-라이즈비 별로 최적해의 수렴성을 분석하였다. 해석 검증모델의 정수는 표 5와 같고 최적설계에 요구되는 유전자 알고리즘 개체의 집단수는 40, 세대수를 50으로 하였다. 또한, 교배율 0.6, 돌연변이율 0.02, 토너먼트 선택은 2로 설정하였다. 설계종료는 한 세대에서 제약조건을 만족하는 개체수가 전체 개체수의 10% 이상이고 그 중에서 50% 이상이 동일한 최적해가 3번 반복하면 종료하도록 하였다.

4.1 최적화 프로그램 해석 검증

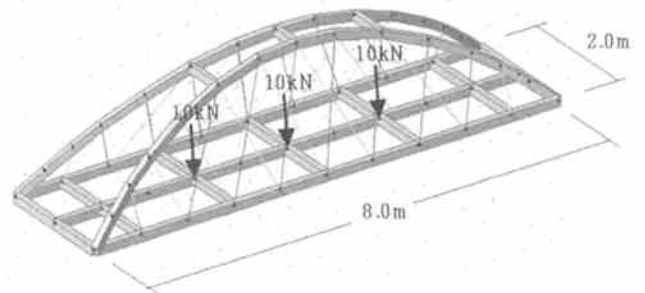


그림 7. 프로그램 해석 검증모델

표 5. 해석 검증모델 정수

지 간	$L = 8.0m$
교 폭	$B = 2.0 m$
작용하중	중앙 3 지점 $P = -10 kN$
	아치리브 $w = 2 kN/m^2$
아치-라이즈	$f = 1.333m$
강재의 탄성계수	$E = 2.06 \times 10^8 (kN/m^2)$
포아송비	$\nu = 0.3$
전단탄성계수	$G = 7.92 \times 10^7 (kN/m^2)$
케 이 블	강선 $\phi 3 mm$
부재단면	Box type $100 \times 100 \times 4t$

표 6. 부재 절점변위(mm)

구 분	$D_{v,max}$		$D_{h,max}$		비 고	
	SAP 2000	이논문	SAP 2000	이논문	SAP 2000	이논문
거 더 1	2.431	2.432	2.144	2.146	1.0000	1.0004
거 더 2	6.967	6.975	2.000	2.002	1.0000	1.0011
거 더 3	4.770	4.774	2.126	2.128	1.0000	1.0008
아치리브	6.392	6.390	12.858	12.842	1.0000	0.9988

표 7. 부재 단면력

구 분	$M_{max} (kN \cdot m)$		$V_{max} (kN)$		비 고	
	SAP 2000	이논문	SAP 2000	이논문	SAP 2000	이논문
거더지점	2.164	2.167	2.438	2.435	1.000	1.0014
횡 빔	3.889	3.883	5.437	5.432	1.000	0.9985
아치지점	3.686	3.682	6.133	6.142	1.000	0.9989
아치1/4	2.236	2.235	8.854	8.843	1.000	0.9988

해석결과 표 6은 부재 절점변위로 SAP2000과 비교시 약 0.11%의 차이를 보였으며, 표 7의 부재 단면력은 0.14%의 차이가 나타났다. 따라서 이 논문의 최적설계 구조해석 솔버는 만족할 수 있는 것으로 검증되었다.

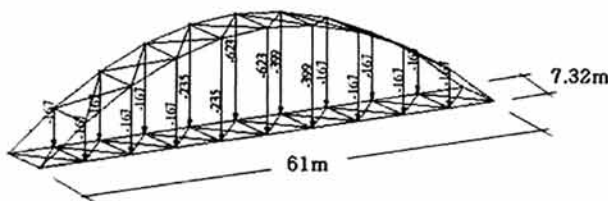


그림 8. 강 아치교 모델

그림 8의 설계예제는 최세휴(2005)의 수정된 단면점증법인

비선형 해석모델로, 규모는 교폭 7.32m(24ft), 지간 61m (200ft)인 강 아치교를 대상으로 이 연구에서 개발한 최적설계 기법을 적용하여 비교하였다.

각 부재의 탄성계수는 $E=200,000MPa$ 이고 강재의 항복응력은 248MPa이다. 작용하중은 고정하중(자중포함)과 활하중(충격포함)으로, 고정하중은 각 절점당 133.5kN을 재하하고, 활하중은 영향선으로부터 하중을 계산하여 각 절점에 작용시켰다. 하중조합 및 하중계수는 도로교설계기준(2005)에 의해서 탄성해석을 수행하였다. 목적함수는 총 중량을 사용하였으며, 변위 및 응력, 시공성 제약조건이 설계기준을 만족하도록 하였다. 또한, 보강거더의 활하중에 대한 연직방향 허용처짐은 $L/400(152mm)$ 로 제한하였다.

유전자 알고리즘의 파라미터는 개체수 40개 세대수 50개, 교배율 0.6, 돌연변이율은 0.02를 사용하였고 최적해 수행은 5회 표본으로 평균하였다.

이 논문에서는 국내 설계기준(2005)을 적용하였기 때문에 최세휴(2005)의 AASHTO-LRFD(1998)와의 결과 비교는 무의미한 바, 단지 국내와 해외의 설계기준에 따른 결과와 최적해의 수렴성을 분석하였다.

최세휴(2005)는 단면점증법을 개선한 수정된 단면점증법을 제시하였는데, 단면점증법은 모멘트 재분배와 구조계의 비선형 비탄성에 기초한 설계개념으로 실용적인 최적화기법이지만, 부재 선택시 사용되는 유효길이 계수 값에 따라 최적설계 결과값이 심하게 변하므로 적절한 유효길이 계수를 사용해야 하는데 어려움이 있다. 따라서 최세휴(2005)는 수정된 단면점증법에서 구조물의 횡방향 변위가 구속여부와 관계없이 구속된 유효길이 계수를 적용하였으나, 그러나 실제 구조물의 거동은 횡방향 변위가 허용되는 경우가 발생한다. 특히 장경간의 아치교나 닐센아치교는 횡하중에 의해서 횡방향 변위를 구속하게 되면 부재의 단면력이 커지며 결국 최적의 단면을 도출할 수 없게 된다.

해석결과 표 8에 의하면 기존의 단면점증법과 수정된 단면점증법은 동일해석에서 무려 21.2%의 차이를 보였는데, 수정된 단면점증법은 구조물의 횡구속 조건만 고려하였으며, 비횡구속 조건은 고려하지 않았다. 즉, 수정된 단면점증법은 다양한 경계조건을 갖는 경우 적용하는데 한계가 있다. 또한, 두 해석법은 초기 단면을 작은 단면부터 단계별로 하나씩 증가시키는 알고리즘으로 전체 설계영역을 동시에 탐색하지 못하는 것으로 설계변수의 전역적 탐색이 불가능하다.

표 8 강아치교 최적설계 결과

구 분	AASHTO-LRFD		도로교설계기준
	기존단면점증법	수정된단면점증법	이 연구
	비선형해석	비선형해석	탄성해석
총중량	677.6kN	559kN	642kN

이 연구에서 개발된 유전자 알고리즘을 이용한 최적설계기법을 적용한 결과 탄성설계법으로도 단순비교에서 좋은 결과를 나타내 주고 있다. 그림 9에서 보는 바와 같이 최적해의 수렴성도 초기에는 수렴속도의 차이는 있으나 종국에는 모두 안정된 수렴 양상을 보여주고 있다.

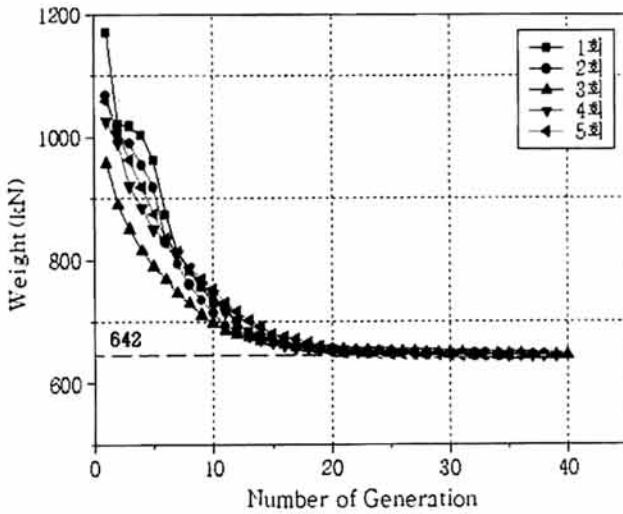


그림 9. 강 아치교 최적해 수렴곡선

그림 10의 적용 예제는 서울시 송파구 장지동 탄천상에 위치한 교량으로 전체교량 길이는 3경간으로 230M이고, 교폭이 39.5M이며 주경간이 널센아치교($L = 130m$)로 구성되어 있다. 교량의 제원은 그림 10, 11과 같으며 설계정수는 표 8과 같다.

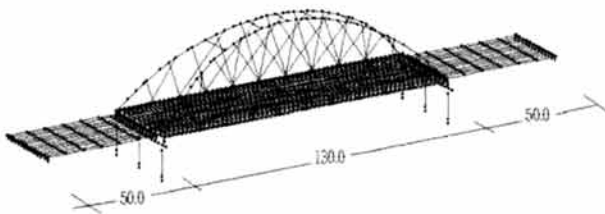


그림 10. 널센아치교 종단면도

또한, 아치-라이즈비가 $h/L = 1/5.2$ 인 널센아치형 교량으로 최적설계를 수행하기 위해 설계그룹을 상현재와 하현재, 케이블로 나누어 총 467개의 부재로 구성하고 구조적 거동을

고려해 16개의 소그룹으로 세분화하여 수행하였다. 최적해 수행결과 그림 12에서 보는 바와 같이 최적해의 수렴양상이 진화의 초기에는 각 회수별로 수렴의 속도차이는 있으나 종국에는 모두 안정된 수렴 양상을 띠고 있다.

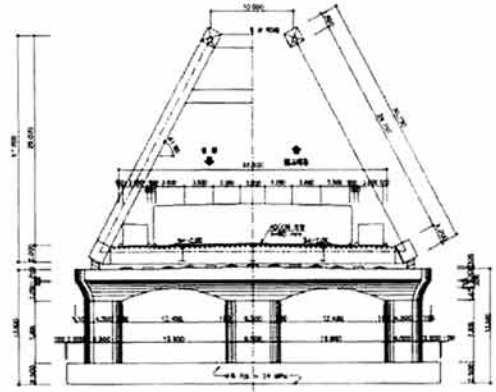


그림 11. 널센아치교 횡단면도

표 8. 널센아치교 설계정수

지 간	$L = 130.0m$
교 폭	$B = 39.5m$
설계하중	DB-24, DB-24
풍 하 중	$w = 40 m/sec$
아치-라이즈	$f = 25m$
강재의탄성계수	$E = 2.06 \times 10^8 (kN/m^2)$
포아송비	$\nu = 0.3$
전단탄성계수	$G = 7.92 \times 10^7 (kN/m^2)$
케 이 블	PWS cable
사용강종	$4.570 (kN/m^2)$

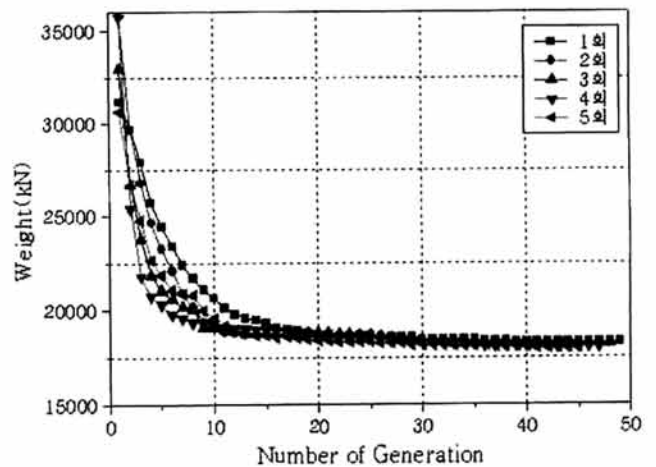


그림 12. 적용 예제 최적해 수렴곡선

표 7은 최적해 결과이며, 각 회수별 최적해는 최대값 18,250kN, 최소값 17,981kN로 최대오차가 1.5% 미만의 오차를 보이며 수렴한다.

표 9. 최적해 결과치

Object Function	Number of Simulation					평균
	1회	2회	3회	4회	5회	
Weight (kN)	18,250	18,142	18,160	18,055	17,981	18,117

• 최적 강중 = $\frac{18,117}{130 \times 39.5} = 3.528 \text{ kN/m}^2$

따라서 최적설계기법을 실제 교량에 적용한 결과 최적해의 수렴과정이 안정적이며 좋은 결과를 나타냈다. 강재의 사용강중은 4.570 kN/m²으로 이 논문에서 최적화된 강중은 3.528 kN/m²로 사용강중 대비 약 77%로 23%의 강재를 절약 할 수 있는 것으로 나타났다. 또한, 상부하중 감소로 하부공에서도 경제적인 단면을 계획할 수 있어 전체 공사비는 더 줄어들게 된다.

4.2 아치-라이즈비(f/L) 비교분석

닐센아치교의 미관 및 경제성을 고려할 때 가장 중요한 요소인 아치-라이즈비(f/L)는 아치교의 강중에 중대한 영향을 미치며, 구조적 거동의 특성을 결정하는 주요 결정인자이다. 대개 f/L는 1/5~1/10 정도이며 아치-라이즈비가 작아질수록 미관은 좋아지지만 처짐에 대한 부가응력이 발생하기 쉽고 강재중량도 증가한다. 반면에 f/L가 너무 커져도 강재중량이 증가하고 아치 전체의 면외 안정이 나빠져 안정성 및 경제성 측면에서도 불리해진다.

일반적으로 강중은 아치-라이즈비(f/L) 및 사하중 w와 활하중 p에 의해 좌우되므로 이들의 파라미터를 변화시켜 강중이 최소가 되는 f/L를 결정한다.

이 논문에서는 유전자 알고리즘을 이용한 최적설계로 강중과 처짐과의 관계가 GAs의 다목적함수에 해당되어 이들의 관계를 유전자 알고리즘 최적화기법으로부터 아치-라이즈비(f/L)특성을 고찰하고, 닐센아치교에 대한 f/L의 적정 기준을 비교 분석하였다.

적용 예제는 교장 L = 200m, B = 25m에 대해서 아치-라이즈비(f/L)의 관계를 규명해 본다. 하중조건은 고정하중과 활하중 L/2을 재하한 상태에서 f/L 를 5가지 경우로 구분하여 최적설계를 수행하였다.

아치-라이즈비(f/L) 범위는 1/5, 1/5.5, 1/6, 1/6.5, 1/7

로 하였으며, 최적설계 결과 전체 강중과의 관계를 그림 13에서 보여주고 있다. 최적해 수행은 각각 f/L에 대해서 표본을 10회씩 실시하여 평균하였다. 그림에서 보는 바와 같이 f/L가 클수록 경제적인 것으로 나타났으며, 반면에 1/7 경우는 가장 비경제적인 것으로 동일 범위내에서 강중대비 약 30% 정도의 차이가 나타났다.

따라서 강재량은 아치-라이즈비(f/L)가 클수록 경감되어 경제적이다. 미관을 고려한 전체적인 경제성을 분석할 때는 종합적인 검토가 필요할 것으로 판단된다.

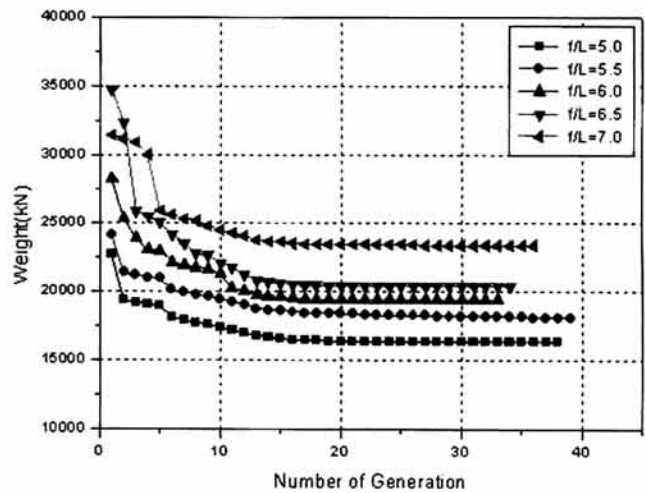


그림 13. 아치-라이즈비(f/L) 최적해 수렴곡선

표 10. 아치-라이즈비(f/L) 최적해 결과치

Object Function	아치-라이즈비(f/L)				
	1/5	1/5.5	1/6	1/6.5	1/7
Weight (kN)	16,410	18,105	19,410	20,420	23,367

4.3 적용 지간장과 강재중량 비교분석

이 논문에서 최적설계 기법을 적용하여 적용한 예제를 통해 지간장과 강재중량과의 관계를 비교 분석하였다. 그림 14는 아치-라이즈비(f/L) 분석을 통해서 강중비 최적의 범위를 도표화하여 국내·외의 닐센 아치교량의 데이터와 일본의 Fehmarsund 교의 실적 등을 비교한 것으로 대부분 최적의 상한치에 근접함을 보여 주고 있다.

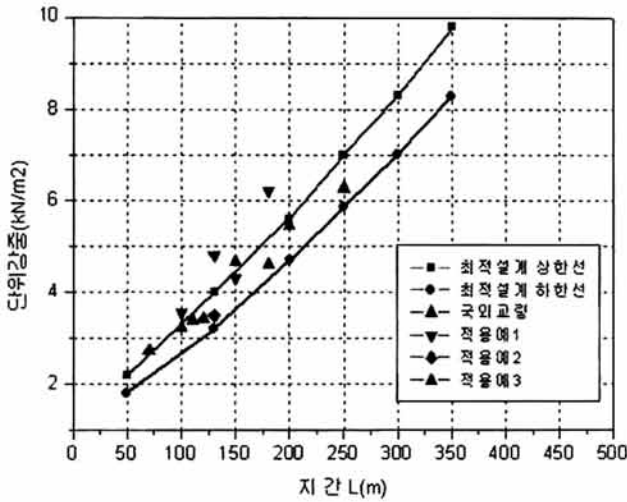


그림 14. 지간장과 단위 강중과의 관계

상기 그림의 실선은 이 논문에서 제시한 닐센아치교의 단위 강중 검토시 최적의 설계영역선으로 제안한다. 대부분 닐센아치교 설계시 아치-라이즈비(f/L)는 1/5~1/7인 경우가 대다수로 최적설계 영역선은 이 범위내에서 적용하였다.

설계 영역선의 상한선은 $f/L=1/5$ 인 경우의 최적해를 도시 하고, 하한선은 $f/L=1/7$ 인 경우를 정하였다. 이 논문의 적용예제 및 연구를 통해서 검토한 결과 설계 단위강중이 그림 14에 표시된 적용 예1의 심벌을 나타내는데 모두 설계영역선 밖에 존재하며 과다설계로 판단되고 있다. 반면에 설계영역선 내의 심벌들은 대부분 국외교량으로 최적설계영역 상한선에 위치한다. 적용예 2, 3은 국내교량에 대해서 최적설계기법을 적용한 결과로 모두 최적설계영역 내에 존재하는 것으로 입증되었다.

따라서 이 연구에서 제시된 설계영역선은 설계자에게 과다설계를 미연에 방지하고 안전하고 합리적인 설계를 할 수 있도록 제시하였다.

5. 결론

이 논문은 닐센아치교량의 최적설계를 위해 최적화 알고리즘인 유전자 알고리즘을 이용하여 닐센아치교의 효율적인 최적화 기법을 개발하였다. 최적설계 알고리즘을 이용해서 공용중인 실제 교량에 대해 최적설계를 수행하여 그 성능을 분석하고 실무에 적용할 수 있도록 하였다.

유전자 알고리즘을 이용한 닐센아치교의 최적설계기법에 대한 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 닐센아치교 최적설계 프로그램을 이용하여 대상교량의 공용중인 실제 교량에 적용한 결과 설계시의 단위 강중

보다 약 23% 강재를 절약 할 수 있었다. 또한, 상부하중 감소로 하부구조도 최적화 할 수 있어 전체적인 공사비를 경감시킬 수 있었다.

- (2) 공용중인 실제교량의 아치 라이즈비(f/L)를 분석한 결과 f/L 가 1/5.0에서 최적의 강중으로 경제적임을 알 수 있었다. 반면에 f/L 가 1/7.0 인 경우는 가장 비경제적인 것으로 나타났다. 즉, f/L 가 클수록 강재량이 경감되어 경제적이나, 미관을 고려한 전체적인 경제성을 분석할 때는 종합적인 검토가 필요하다.
- (3) 교량의 단위강중(kN/m^2)을 분석하여 과다설계를 미연에 방지하고 공사비를 절감시킬 수 있는 최적설계 영역을 제시하여 안전하고 합리적인 설계를 할 수 있도록 하였다.
- (4) 최적화 알고리즘과 구조해석 솔버를 탑재한 병렬연산 시스템을 구축하여 PC 클러스터링이 가능하고 개인용 PC의 다중 프로세스를 활용할 수 있도록 함으로서 프로그램 수행시간을 단축하였다.

참 고 문 헌

최세휴 (2005) 강아치교의 고등해석과 최적설계, 한국강구조학회 논문집, 한국강구조학회, 제17권, 1호, pp.13-21.

김승익, 마상수 (2003) 유전자알고리즘을 이용한 비선형 비탄성 최적설계, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제15권 2호, pp.197-206.

권운환, 박효선 (2001) 대형구조물의 효율적인 구조해석을 위한 리눅스 클러스터링, 2001년도 학술발표회 논문집, 대한건축학회, pp.55-60.

진강규(2002) 유전알고리즘과 그 응용, 교우사.

한국도로교통협회(2005) 건설교통부제정 도로설계기준, 건설정보사

반석기술(2005) 닐센아치교 설계와 시공

서울시(2008) 탄천횡단교량 실시설계보고서 및 설계도

서울시(2006) 서강대교 가설공사 설계도

마산시(2002) 저도 연륙교 실시설계보고서 및 설계도

中井 博, 河井章好, 吉川 紀, 北田俊行, 酒造敏廣, 鋼製ラーメン橋脚實績照査(上)·(下), 橋梁と基礎, Vol.16, 17, 1982, pp.35~40, pp.43~49.

Austin, W. J. (1982). Numerical Bending Analysis of Arches, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 108, No. ST4, pp.849-867.

Oladokun, A. (1988). Optimum Design of flexible arches, Ph.D., Kansas State University.

Goldberg, D. E. (1989). Genetic Algorithms in search, Optimization and machine learning, Addison-Wesley.

Holland, J. H. (1975), Adaptation in Natural and

- Artificial System. The University of Michigan Press, Michigan
- De Jong, K. A. (1975). An Alysis of Behavior of a Class of Genetic Adative systems. Phd Dissertation. The University of Michigan, Ann Arbor, Michigan
- Melbourne, C. (1995). Arch Bridges, Thomas Telford
- Rajeev, S. and Krishnambros, C. S. (1992). Discrete Optimization of Structrues Using Genetic Algorithms, ASCE, *Journal of Structural Engineering*, Vol.118, No.4, pp.1223-1250.
- D.M. Peng, C.A. Fairfield, (1999). Optimal design of arch bridges by integrating genetic algorithms and the mechanism method. *Engineering Structures* 21, pp.75-82.
- Simiu, E., & Robert, H. S. (1996). Wind Effect on Structure, John Wiley & Sons. Inc. , N.Y.
- Clarke, J. L., & Garas, F. K., & Armer, G. S. T., (1992). Structural Design for Hazardous Loads, the role of physical testing, Chapman & Hall.
- (접수일자 : 2007. 11. 19 / 심사일 2007. 12. 27 / 게재확정일 2009. 8. 10)