

유전자 알고리즘에 의한 용접형 판형교의 단면 최적설계

Optimum Design of Welded Plate Girder Bridges by Genetic Algorithm

이희업* 이준석** 방춘석*
Lee, Hee-Up Lee, Jun S. Bang, Choon-seok

ABSTRACT

The main objective of this paper is to propose the optimal design method of welded plate girder bridges using genetic algorithm. The objective function considered is the total weight of the welded plate girder. The behavior and design constraints are formulated based on the Korean Railroad Bridge Design Code and UIC Code. Continuous design variables are used to define the cross-sectional dimensions of the member. The GAs(genetic algorithm) is used to solve the nonlinear programming problem. Several examples of minimum weight design are solved to illustrate the applicability of the proposed minimization algorithm. From the results of application examples, the optimum design of welded plate girder is successfully accomplished. Therefore, the proposed algorithm in this paper may be used efficiently and generally for the optimum design of welded plate girders.

1. 서 론

구조물 설계시 설계자의 경험에 의존하여 가정된 몇 가지 단면 중 설계조건과 시방서의 설계계약조건을 만족하는 단면을 선택하는 기존의 방법은 여러 가지 불합리성을 내포하고 있다. 기본설계에서 도출된 부재의 크기는 최종설계에 도달할 때까지 반복하여 조정을 거쳐야 하며, 설계변수와 제약조건이 많은 경우 설계자가 제약조건에 적합한 결과를 얻기 위해서는 많은 노력이 필요하다. 특히 동적거동이 상당히 복잡한 철도 판형교와 같이 주행안전성과 사용성을 확보하기 위하여 궤도안정(track stability), 승차감(passenger comfort), 상판의 비틀림(deck twist), 레일과 구조물의 상호작용(rail-structure interaction) 등을 모두 고려해야 하는 경우에는 더욱 그러하다. 이러한 설계과정의 번거로움과 문제점은 제약조건을 효율적으로 일괄처리할 수 있는 최적설계 기법을 세부설계과정에 도입함으로써 개선될 수 있다. 최적화 기법은 분류 기준에 따라 여러 방법으로 나눌 수 있겠지만 목적함수와 제약조건 형태 및 특징에 따라 설계점의 이동이 무작위하게 이루어지는 확률론적 기법과 설계점의 이동 방향과 폭이 확정적으로 결정되는 확정론적 최적화 기법으로 구분할 수 있다.

* 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원

** 한국철도기술연구원 책임연구원, 정회원

본 연구에서는 확률론적 기법인 유전자 알고리즘(Genetic Algorithms, GAs)을 이용하여 KTX 하중을 받는 용접형 판형교의 단면 최적화를 수행하였다. 즉 판형교 주형의 설계변수 초기집단이 확률론적 과정에 의해 무작위로 생성되고, 설계점들의 개선을 위해 자연선택과 적자생존의 원리가 적용되었다. 최적화의 목적함수로는 구조물의 중량을 사용하였고, 거동 및 설계 제약조건식은 철도설계기준(철도교편, 1999)과 UIC 기준에 맞추어 정식화하였다. 판형교에 관련된 설계기준은 나라마다 시방서마다 약간 다른데, 국내 설계기준에서 기존선에 대한 승차감 기준은 없으며 고속선에 대해서는 승객의 최대 수직가속도를 0.05g 이하로 제한하고 있다. 따라서 이동하중에 의한 동적응답을 고려하기 위해 철도 선진국에서 권고하고 있는 승차감 기준, 수직 처짐비 그리고 고유진동수 제한범위 등을 참고하여 설계 제약조건을 구성하고 최적화를 수행하였다. 몇 가지 최적설계예제를 통하여 본 연구에서 제시된 최적화 알고리즘의 수렴성을 검토하고 신뢰도를 확보하였다.

2. 유전자 알고리즘(GAs)

2.1 GAs의 특징과 진화과정

GAs는 다윈이 주장한 자연진화의 법칙인 적자생존(survival of fittest)과 자연도태(natural selection)의 원리를 토대로 하여 정립된 최적화 기법이다. 즉 유전적 계승과 다윈적 생존 경쟁이라는 자연의 현상을 모델링한 확률적인 탐색방법이다. 이 이론은 Holland(1975)가 체계화 시켰으며, 공학분야에는 Goldberg(1983)에 의해 가스 송수관에 대한 최적설계가 시도된 이래 많은 연구가 행해지고 있다. 자연진화의 원리에 의하면 일정한 환경에 무리를 지어 살고 있는 생명체들은 그 환경에 적합한 형질을 가진 개체(또는 유전자형, 구조)가 생존할 확률을 크게 가지며 교배(crossover)와 돌연변이(mutation)의 과정을 통해 보다 좋은 방향으로 진화해 나가고 부적합한 형질의 개체들은 진화의 과정에서 점차 도태되어 간다. 결국 이와 같이 생태계의 환경에 최적으로 적응하고 순응하는 방향으로 진화의 과정을 되풀이하면 주어진 환경에 가장 적합한 형질의 개체들이 형성될 것이다. GAs는 이러한 생명체의 자연진화 과정을 일반 최적화 문제에 적용한 방법으로, 설계영역에 다수의 설계점을 분포시켜 목적함수 값과 제약조건 위반정도에 따라 각 설계점에 적합성(fitness)를 부여한다. 적합성이 클수록 다음 단계인 교배와 돌연변이의 과정에 참여할 확률을 크게 하여 적합성이 좋은 설계점에 비슷한 형질을 가진 설계점들이 다음 단계에 보다 많이 형성되어 계산이 진행될수록 전체 설계점들은 좋은 방향으로 탐색이 진행된다. GAs의 특징은 기존의 최적화 기법이 한 점에서 한 점으로의 이동에 의한 국부적인 탐색과정을 가지는 반면에, GAs는 여러 개의 설계점들이 집단(population)을 이루어 동시에 탐색을 행하여 보다 넓은 설계영역에 대한 정보를 활용함으로써 전역최적점에 수렴할 확률이 기존의 방법에 비해 매우 크다. 그래서 GAs는 국지 최적해가 아주 많은 경우 전공간 최적해 또는 적어도 이에 가까운 해를 찾을 수 있는 방법으로 알려져 있다. 또한 GAs는 목적함수와 제한조건의 값을 사용하고 미분값이나 그 외의 다른 정보를 필요로 하지 않는 직접 탐색방법을 이용하므로 이산형 최적설계 등의 다양한 최적화 문제에 적용되고 있다.

GAs는 현 세대의 집단 내에서 적합성(fitness)이 높은 설계가 다음 세대로 전달되며, 이들이 번식(reproduction), 교배(crossover) 그리고 돌연변이(mutation) 등의 변환과정을 거쳐 새로운 세대를 이루게 된다.

2.2 실수형 변수를 사용한 GAs의 최적화 과정

GAs에서 2진수 코드를 사용하기 위해서는 설계변수를 표현하는 2진수 문자열의 길이를 상당히 길게 선정해야 한다. 예를 들어 $f(x) = x^3$, $0 \leq x \leq 3$ 의 문제의 경우 설계변수가 등간격으로 $x = 0, 1, 2, 3$ 의 값을 가질 때, 이에 대응되는 목적함수 값은 $f(x) = 0, 1, 8, 27$ 로 x 값이 커질수록 $f(x)$ 값은 그 간격이 점점 증가한다. 대부분의 최적화 문제에서 목적함수 설계공간의 경사가 최적점 부근에서는 타 부분보다 급해지므로, 2진수 문자열의 길이를 충분히 길게 하지 않으면 최적점이 고려 대상에서 제외될 가능성도 있고, 최적점 부근에서의 탐색 또한 어렵다. 2진수 코드를 사용할 경우 문자열(string)의 길이를 길게 하더라도 여전히 국부 탐색에는 한계가 존재한다. 그리고 문자열의 길이가 길수록 교배과정 및 2진수형 변수를 실제값으로 변환하는데 많은 시간이 필요하며, 컴퓨터 주 기억용량을 과도하게 사용하는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 실수형 변수를 사용한 GAs의 최적화 과정을 적용하고자 한다.

1) 적합성 함수

적합성(fitness)이란 생태계에서 살아 남을 수 있는 능력의 척도를 말한다. GAs에서 적합성은 mating pool에 개체들이 복사될 때 배치여부를 판정하는 척도로 사용된다. 따라서 높은 적합성을 가지는 개체들은 다음 세대에 parents로 선택될 확률이 크다는 것을 의미한다. GAs의 기본과정은 적합성이 증가되는 것을 찾는 것이므로 최소화 문제의 경우는 기본과정을 변환해야 하며, 본 연구에서는 다음 식 (1)과 같은 적합성 함수를 적용하였다.

$$\text{Maximize, } f(x) = \frac{1}{1 + F(X)} \quad (1)$$

여기서 $f(x)$ 는 적합성 함수(fitness function), $F(X)$ 는 목적함수(objective function)이다.

GAs의 탐색은 목적함수의 적합도만을 요구하기 때문에 제약조건을 위반하는 비가능 설계점(부적합한 형질의 개체)들은 벌칙함수(penalty function)를 적용하여 생존할 확률을 적게 하여 진화의 과정에서 점차 도태되도록 해야 한다. 본 연구에서는 적용한 quadratic penalty function 방법은 목적함수에 다음 식 (2)와 같은 벌칙함수를 적용한다.

$$\phi_i = 1 + k_r(q_i - 1)^2 \quad (2)$$

여기서 k_r 은 quadratic penalty rate이다. q_i 는 다음과 같이 정의되며 $|p_i| / p_{\max} \leq 1$ 이면, $q_i = 1$ 이고, $|p_i| / p_{\max} > 1$ 이면, $q_i = |p_i| / p_{\max}$ 이다. 여기서 p_i 는 설계변수 또는 구조응답, p_{\max} 는 p_i 의 최대 허용 값이다.

2) 설계집단의 초기화와 번식(reproduction)

설계집단의 초기화를 위해서 요구되는 수만큼의 설계점들을 설계공간내에 발생시킨다. 이 때 각 설계변수의 값은 최소값과 최대값 사이에서 무작위로 발생시킨다. 본 연구에서는 확률 분포에 의한 새로운 개체집단의 선택 방법으로는 룰렛-휠 선택(roulette-wheel selection)을 사용하며, 각 설계점이 선택될 확률은 $eval(x_i) / \sum_{i=1}^{popsize} eval(x_i)$ 로 한다. 여기서 $eval(x_i)$ 는 염색체 x_i 에 대한 적합성의 크기를 뜻한다. 즉 각 설계점이 선택될 확률은 적합성(fitness)의 크기에 비례한다.

3. 최적설계 정식화 및 예제

3.1 목적함수와 제약조건

최적설계에 대한 문제의 정식화 과정에서 중요한 단계는 단위비용과 설계변수의 함수로 유도한 비용함수로 된 목적함수의 정식화와 설계변수를 실제 제작 가능한 이산형으로 취급하는 문제이다. 그러나 본 연구에서는 동적응답의 제약조건을 만족하는 용접형 판형교의 단면 최적화 알고리즘 수립에 주안점을 두고 설계변수는 연속형으로 하였고, 부재의 중량을 목적함수로 형성하여 이를 최소화하는 것으로 하였다. 또한 강재의 경우 강종과 보강재의 유무에 따라 제약조건이 매우 복잡하여, 본 연구에서는 응력에 관한 제약조건, 고유진동수 및 승차감 등의 동적응답에 관한 제약조건 그리고 설계변수의 한계 제약조건만 적용하였다.

본 연구에서 설정한 설계변수는 표 1과 같이 용접형 판형교 주형의 플랜지 폭과 두께, 복부의 두께이며, 목적함수 $F(X)$ 는 다음 식 (3)과 같이 표현된다.

$$F(X) = \gamma_s AL \quad (3)$$

여기서, γ_s 는 강재의 단위 중량이고, A 는 단면적 그리고 L 은 부재의 길이 이다.

구조거동에 관한 제약조건식은 철도설계기준(철도교편, 1999)과 동적응답 기준을 적용하여 정식화하였으며, 먼저 응력에 관한 제약함수를 정규화하여 나타내면 다음과 같다.

$$\text{휨 응력; } 1.0 - f/f_a \geq 0.0 \quad (4)$$

$$\text{전단 응력; } 1.0 - v/v_a \geq 0.0 \quad (5)$$

$$\text{합성 응력; } 1.21 - (f/f_a)^2 - (v/v_a)^2 \geq 0.0 \quad (6)$$

$$\text{처짐; } 1.0 - \Delta_{\max} / \Delta_a \geq 0.0 \quad (7)$$

여기서, f 는 수직 응력, f_a 는 허용응력, v 는 전단응력, v_a 는 강재의 허용 전단응력, Δ_{\max} 는 활하중에 의한 최대처짐 그리고 Δ_a 는 허용처짐이다. 또한 승차감을 고려하기 위해 차량의 최대 수직가속도를 정식화하였으며, 기존선에서 이 값을 0.05g로 제한하는 것은 상당히 어렵기 때문에 최근에 0.1g로 증가시키고 있는 추세를 감안하여 다음 식과 같이 정규화하였다.

$$\text{차량의 최대 수직가속도; } 1.0 - a_{\max} / a_a \geq 0.0 \quad (8)$$

여기서, a_{\max} 는 차량의 최대 수직가속도 이며 a_a 는 허용 최대 수직가속도이다.

표 1. 설계변수에 대한 제약조건

부재명	설계변수	제약조건
플랜지 폭(mm)	X(1)	$300.0 \leq X(1) \leq 360.0$
플랜지 두께(mm)	X(2)	$8.0 \leq X(2) \leq 25.0$
복부 두께(mm)	X(3)	$8.0 \leq X(3) \leq 25.0$

교량의 지간길이 L 에 따라 고유진동수의 상한 기준은 $4\text{m} \leq L \leq 25\text{m}$ 인 경우 $n_o = 94.756 / L^{0.74807}$ 이며, $L > 25\text{m}$ 인 경우는 한계기준이 없다. 또한 하한 기준은 $4\text{m} \leq L \leq 20\text{m}$ 인 경우 $n_o = 80 / L$ 이며, $20\text{m} \leq L \leq 100\text{m}$ 인 경우는 $n_o = 74.567 / L^{0.92215}$ 이다.

3.2 최적화 흐름도

본 연구에서 적용된 GAs를 이용한 판형교 주형의 최적화 흐름도는 다음 그림 1과 같다.

3.3 설계 예제

최적설계 모델은 용접형 판형교이며 지간길이 L 은 16.0m, 탄성계수 E 는 $2.1 \times 10^6 \text{kg/cm}^2$, 포아송의 비 ν 는 0.3 그리고 강종은 SWS490A를 사용한다. 하중은 KTX를 20~200km/h 까지 20km/h 씩 증가시키면서 작용하고, 자중 또한 고려하기로 한다. 최적화 수행시 주형의 높이는 1.6m로 고정시키고 설정된 설계 변수의 조건과 범위는 표 1과 같다.

GAs를 적용하여 개체집단의 크기와 유전연산자의 확률값 등의 GAs 변수(parameters)를 변화시키면서 연속형 최적설계를 수행하여 그 결과를 검토하면 다음과 같다. 그림 2는 각각의 경우별 세대수(generation number)에 대한 목적함수의 수렴성을 나타내고 있다. 그림을 살펴보면 경우 1에서는 38번째 세대에서 목적함수의 값이 전역최소점 영역부근에 도달하는 것을 알 수가 있다. 따라서 GAs를 이용하여 얻어진 최적설계 결과는 해의 신뢰도가 확보되는 것으로 판단 된다. 표 2는 3가지 경우로 GAs 변수를 변화시키면서 최적설계를 수행한 결과를 비교한 것이다. 표에서 알 수 있듯이 경우 1에서 가장 좋은 최적 결과를 얻을 수 있는 것으로 나타났으며, 각각의 경우 중량의 변화가 없는 거의 동일한 근접 최적해를 주고 있다.

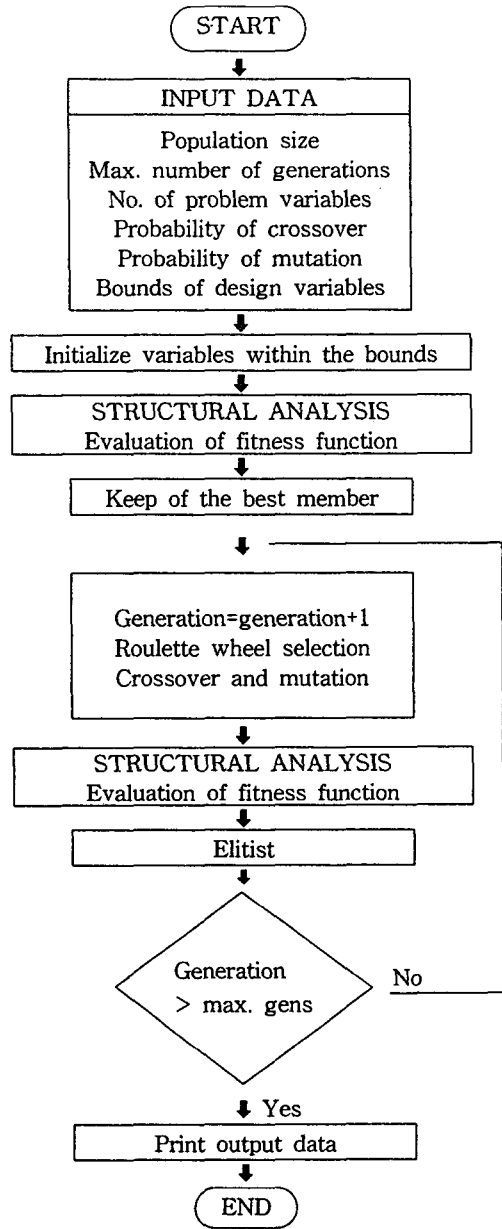


그림 1. 최적화 흐름도

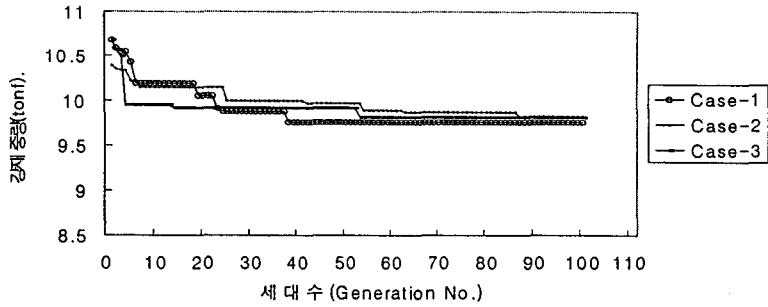


그림 2. 세대수에 대한 목적함수의 수렴성

표 2. 설계조건에 대한 최적화 결과

Case	GAs 변수 (parameters)		설계변수	최적 결과 (mm)	강제 중량 (tonf)
1	개체집단 크기	200	X(1)	359.4	9.756
	교배 확률	0.8	X(2)	24.8	
	돌연변이 확률	0.1	X(3)	13.5	
	세대수	100			
2	개체집단 크기	100	X(1)	357.0	9.825
	교배 확률	0.85	X(2)	24.8	
	돌연변이 확률	0.1	X(3)	13.7	
	세대수	100			
3	개체집단 크기	200	X(1)	359.6	9.812
	교배 확률	0.85	X(2)	24.7	
	돌연변이 확률	0.1	X(3)	13.7	
	세대수	100			

4. 결 론

본 연구에서는 유전자 알고리즘(Genetic Algorithms, GAs)을 이용하여 KTX 하중을 받는 용접형 판형교의 단면 최적화를 수행하였다. 최적화의 목적함수로는 구조물의 중량을 사용하였고, 거동 및 설계 제약조건식은 철도설계기준(철도교편, 1999)과 UIC 기준에 맞추어 정식화하였다. 몇 가지 최적설계 예제를 통하여 본 연구에서 제시된 최적화 알고리즘의 수렴성을 검토하고 신뢰도를 확보하였다. GAs는 동적응답의 설계 제약조건이 있는 최적화 문제에 매우 잘 적용되었고, 탐색과정이 확률론적 방식으로 접근하므로 비록 전역최적점에 대한 완벽한 보장은 없으나 이를 찾는 방편으로 적용성이 충분히 있는 것으로 판단된다.

참고문헌

1. UIC 776-1 R, Loads to be considered in railway bridge design
2. Eurocode 1, Basis of design and actions on structures
3. 양영순 외(1995), "실수형 Genetic Algorithm에 의한 최적 설계", 한국전산구조공학회 논문집, 제8권 제2호
4. 최진유 외(2002), "판형교의 보수보강 및 유도상화 기술개발", 한국철도기술연구원
5. 이희업 외(2002), "KNR 용접형 판형교의 동적거동에 관한 해석적 고찰", 한국철도학회 추계학술회