다목적 소형 승합차 복합재 판 스프링의 적층 최적화 기법

안 상 호^{1*}

¹신한대학교 기계자동차 융합공학과

Optimal Methodology of a Composite Leaf Spring with a Multipurpose Small Commercial Vans

Sang Ho Ahn^{1*}

¹Department of Mechanical & Automotive Engineering, Shinhan University, Uijeongbu, 11644, Korea

Abstract

In this paper, design technique using genetic algorithms(GA) for design optimization of composite leaf springs is presented here. After the initial design has been validated by the car plate spring as a finite element model, the genetic algorithm suggests the process of optimizing the number of layers of composite materials and their angles. Through optimization process, the weight reduction process of leaf springs and the number of repetitions are compared to the existing algorithm results. The safety margin is calculated by organizing a finite element model to verify the integrity of the structure by applying an additive sequence optimized through the genetic algorithm to the structure. When GA is applied, layer thickness and layer angle of complex leaf springs have been obtained, which contributes to the achievement of minimum weight with appropriate strength and stiffness. A reduction of 65.6% original weight is reached when a leaf steel spring is replaced with a leaf composite spring under identical requirement of design parameters and optimization.

Keywords : optimum design, genetic algorithm, composite material, leaf spring, automobiles

1. 서 론

기후변화 대응과 저 탄소배출을 위한 친환경 차량 개발은 선진국은 물론, 국내 산업계에서도 절실히 요구되는 과제이다. 이는 성능향상 및 국제 경쟁력의 향상이라는 차원에서 중요성이 점점 확대되고 있는 실정이다. 이에 따라 저탄소 배출과 에너지 절약을 위한 방안으로 엔진의 효율화, 차량의 경량화를 위한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 그 중 차량의 경량화를 위한 방법의 하나로 차량의 충격 흡수장치인 판스프링을 섬유강화 복합재료로 대체시키고 상업화가 진행되고 있다. 기존의 금속 재료에 비해 대단히 우수한 기계적 특성을 가지고 있는 섬유강화 복합재료는 구조물 및 하위 부품의 경량화를 유도하고 차량의 고효율을 가능케 함으로 인하여 효율성이 널리 인식되고 있으며, 스포츠 용품으로부터 우주항공 구조물까지 사용분야가 확대되고

있다. 해외 각국의 탄소 배출권은 낮아지며, 업계는 경량화, 고효율화를 필연적으로 구축해야 한다. 따라서 경량화를 위한 탄소 섬유 시장은 5년 이내에 2배 이상 확대될 전망이다.

더불어 이와 관련된 국내의 연구로 Moon 등(2004)은 대형 트럭의 다관 스프링의 모델링을 구성하여 동특성을 검증하였으며, Kalantari 등(2010)은 유전자 알고리즘을 이용하여 샌드위치 패널의 접착력 이력 및 변형 반응을 예측하였다. Fachao 등은 다단계 복합 유전자 알고리즘(MSC-M)을 이용하여 복잡한 최적화 문제에서 속도와 수렴성을 개선시켰다. Ramires 등(2012)은 유전자 알고리즘을 이용하여 철골 구조물에 대한 효과적인 비용 해결책을 얻기 위해 접합 구조 성능을 제어하는 접합부의 판 치수, 볼트 수, 볼트 직경 등과 같은 매개 변수를 고려한 최적안을 제시하였다. Yi 등(2012)은 풍력 터빈 블레이드의 형상 최적화를 수행하기 위하여 유전자 알고

* Corresponding author:

Tel: +82-31-870-3683; E-mail: drshahn@naver.com

Received June 27 2018; Revised August 26 2018;

Accepted August 27 2018

©2018 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

리즘을 이용한 패턴 서치 방법을 제시하였다. Won 등(2013)은 스킨의 두께, 위도 각도, 비틀림 상자의 두께, 위치, 폭 등의 설계 파라미터를 결정하는 로터 블레이드의 단면 최적화에 대한 연구를 수행하였다. Kang 등(2014)은 특수목적 차량에 적용되는 판 스프링 고장모드를 개선하기 위해 차량의 유한요소 모델을 구성하고 판 스프링의 길이, 폭, 두께 등을 고려한 설계 변수를 선택하여 설계 최적화를 수행하였다. Fu 등(2015)은 효율성과 적응성을 높이기 위해 인공 신경망은 유전 알고리즘과 통합하여 3차원 합성 구조물에 대해 혼합된 연속 설계 변수를 설정한 인공 신경망 기법을 제시하였다. Herath 등(2015)은 프로펠러의 최적화를 위한 제한된 체계, 공정에 적용된 다양한 조건을 반영하여 유전자 변형 RationalB-Splines(Nurbs) 알고리즘을 사용하여 풍력 블레이드의 설계를 개선하였다. Qian 등(2017)은 피로시험 결과를 통해 복합재료로 구성된 판 스프링의 피로 모델링을 수행하였으며 적층 시퀀스를 개선하기 위한 유전자 알고리즘을 제안하였다. Pathan 등(2018)은 유전자 알고리즘과 유한 요소법과 결합하고, 구조적 강성과 질량의 제약 조건에 설정하여 단 방향 복합재 적층판의 감쇠 응답을 계산하였다.

본 논문에서는 유전자 알고리즘을 복합재료로 구성된 판 스프링의 적층 최적화 방법을 제시한다. 자동차 판 스프링을 유한요소모델로 구성하여 초기 설계를 검증한 이후, 유전자 알고리즘을 통해 복합재료의 적층수와 적층각도를 최적화하는 과정을 제시한다. 최적화 과정을 통해 판 스프링의 하중 감소 과정, 반복수에 따라 기존의 알고리즘 결과와 비교할 것이다. 유전자 알고리즘을 통해 최적화된 적층 시퀀스는 구조의 건전성을 검증하기 위해 유한요소 모델로 구성하여 안전여유를 계산한다.

2. 최적화 적용을 위한 이론

2.1 유전자 알고리즘

유전자 알고리즘은 생존력이 강한 형질을 가진 개체가 자연계에 적응하여 우수한 자손으로 진화한다는 자연계의 법칙을 그대로 응용한 알고리즘으로 유전학에 바탕을 두고 생물진화의 원리를 기본으로 두고 있다. 기존의 최적화 방법들은 도함수를 이용하며, 제한된 공간과 구속조건에서 목적함수를 순차적으로 탐색을 하거나 시작점을 선정하여 탐색을 시작하는 방법을 이용한다. 따라서 전통적 최적화 방법은 좁은 영역에서 효과적이었지만 넓은 영역에서는 큰 성능을 발휘하기엔 한계가 있다.

유전자 알고리즘은 Non-convex 영역, 연속-불연속의 혼합 지점, 불연속 지점을 포함하는 최적화 문제를 해결할 수 있다.

Fig. 1 Structure of genetic algorithm(Jang et al., 2014)

이는 목적함수의 미분 개념을 사용하지 않고, 확률 탐색과 방향성 있는 탐색을 수행하기 때문이다. Fig. 1과 같이 유전자 알고리즘은 이진수의 배열로 구성된 개체집단을 가지고, 생물학적 진화의 순서대로 선택(selection), 교배(crossover), 돌연변이(mutation)이라는 진화 과정을 수행함으로써 최적화를 수행하는 알고리즘이다. 선택(selection)이란 유전적 특징을 포함하는 각각의 스트링이 적합도(fitness)에 따라 재생산하는 과정이다. 개체가 차세대로 진화하면서 높은 적합도를 가진 유전적 스트링들의 특징을 차세대로 전달한다. 교배란 선택된 염색체들의 정보가 포함된 스트링 일부를 서로 교환함으로써 정보를 교환한다. 이 과정을 통하여 염색체는 확률적 선택에 의해 목적함수에 근접할 수 있는 기회가 주어진다. 더불어 빠른 수렴 속도로 해석의 시간을 줄일 수 있다. 마지막으로 돌연변이란 선택과 교배를 통해 얻을 수 없는 정보를 획득하는 과정이다. 돌연변이는 높은 적합도의 수렴성을 향상시키는데 이는 임의의 적당한 확률에서 이 돌연변이 과정을 통해 전역적인 탐색효과를 수행하기 때문이다. 그리고 최적화 목적함수를 만족하기 위하여 교차와 돌연변이 연산자들은 유전자 알고리즘에서 집단의 다양성을 높여 고전적인 최적화와 차별성을 가지게 된다.

2.2 적층 매개 변수

고전적인 적층 이론으로 각 층의 두께 및 섬유 각도를 포함하는 강성 행렬을 표현할 수 있다. 또 다른 방법은 적층의 함수가

층을 가진 스택을 생성하는 것으로 시작된다. 인접한 플라이에서 스택 내의 임의의 위치가 설계 조건에 일치하는 모든 실행 가능한 플라이 각도 세트를 선택할 수 있다. 세트에서 각도가 무작위로 선택되고 적층 시퀀스 테이블(*SST*)에 추가된다. 대칭을 복원하려면 다음 단계에서 동일한 플라이가 해당 대칭 위치에 추가되어 *SST*에 다른 열이 생성된다. Table 2는 적층 시퀀스가 초기화되고 추가되는 과정이다. 적층 프로세스는 최대 플라이 N_{max} 에 도달할 때까지 계속된다.

Table 2 *SST* initialization, $N_{min} = 10$

10	11	12	10	11	12
-45	-45	-45	-45	-45	-45
-45	0	0	0	0	0
0	+1°	0		0	0
45	45	45	45	45	45
90	90	90	90	90	90
90	90	90	⇒ 90	90	90
90	90	90	90	90	90
90	90	90	90	90	90
45	45	45	45	45	45
0	0	+1°			0
-45	-45	0	0	0	0
		-45	-45	-45	-45

2.6 복제(reproduction)

복제를 적용하기 위해 적층 시퀀스와 두께 정의 N_{str} 에 교차와 돌연변이를 모두 이용할 수 있다. 염색체 SST_{lan} 의 돌연변이는 그 위치에서 허용된 플라이 각도 중에서 무작위로 선택하여, 스택 시퀀스 내에서 플라이 $\pm\theta$ (균형), 플라이 θ (불균형)의 변화를 구성한다. 염색체 SST_{ins} 의 돌연변이는 기본적으로 무작위로 교환된다. 복합재 적층의 Δn -rule에 의해 N_{str} 돌연변이에서 단일 부품이 N_{min} 과 N_{max} 사이에 무작위로 생성된 번호로 교체된다. *SST*의 교차 연산은, 동일한 길이의 플라이를 선택하는 것으로 구성되어 있으므로, SST_{ins} 에서는 두가지 유형 중에서 동일한 숫자를 선택하고 이 하위 유형을 교환한다. N_{str} 에 대한 교차연산은 두개의 지오메트리에서 동일한 길이의 두 그룹을 무작위로 선택하는 작업과 이후의 교환으로 구성된다. 이 경우에 *SST*는 Δn -rule에 따라 확인한 후에 교환된다.

3. 복합재 판 스프링의 설계

휨 강성은 판 스프링 설계에서 중요한 매개 변수이다. 휨 강성을 증가시키기 위해 스프링의 두 끝에서 중심까지 두께가 증가하는 형상을 가진다.

Fig. 4 Automobile conventional leaf spring configuration

복합재 판스프링의 단면 설계는 양산 능력과 섬유의 지속적 강화를 수용할 수 있도록 선택되어야 한다. 복합재 판 스프링의 설계는 자동차의 강철 판 스프링을 단일 잎 합성 스프링으로 대체하는 것을 목표로 하며 설계 요구 사항은 강철 판 스프링과 동일한 것으로 간주된다. Fig. 4는 판 스프링의 위치와 형상을 나타내며 강철 판 스프링의 요구사항은 다음과 같다.

- Max design load, $W=950\text{kg}$, deflection=188mm
- spring rate, $K_m=32\sim35\text{kg/mm}$.
- Weight =14.3kg

본 논문에서는 요구사항을 만족하는 모델을 비교하기 위해 강철 판 스프링과 복합재 판 스프링 2종류의 모델을 구성한다. 적용된 재료는 Table 3에 나타내었다.

Table 3 Material information of steel and composite leaf spring configuration

Steel		Composite	
$E(\text{GPa})$	210	$E_{11}(\text{GPa})$	142
		$E_{22}, E_{33}(\text{GPa})$	10.3
ν	0.3	$\nu_{12} = \nu_{23}, \nu_{31}$	0.27, 0.05
$\rho(\text{kg/mm}^3)$	7850×10^{-12}	$\rho(\text{kg/mm}^3)$	1580×10^{-12}
Tensile strength	1962 MPa	Longitudinal tensile strength	1830MPa
		Longitudinal compression strength	1096MPa
		Lateral tensile strength	57MPa
		Lateral compression strength	228MPa
		Shear strength	68MPa

스프링 전체 강도를 균일하고 효율적으로 배분하기 위하여 형상을 고려하였다. 판 스프링의 조립상태와 스프링의 정적, 동적 구조 부품의 연관성을 고려하여 하중인가를 판 스프링의 중심으로 설정하였다. Fig. 5와 같이 판 스프링의 구조형상에

Fig. 5 Automobile conventional leaf spring configuration

Fig. 6 Automobile load 3 condition (Song et al., 2015)

따라 재질을 강철과 복합재료를 구분하여 모델을 구성하였다. 유한요소 모델은 유전자 알고리즘이 초기 설계로부터 최적화를 수행한 이후, 최적설계 결과를 검증할 때 사용된다.

최적화를 수행하기 위해 판 스프링의 중앙에 하중과 모멘트를 입력한다. 스프링의 하중은 Song 등(2015)의 연구에서 제시된 차량 동역학 모델의 가속, 선회, 과속방지턱의 3조건에서 계산된 하중을 입력하였다.

4. 복합재 판 스프링 설계를 위한 유전자 알고리즘의 적용

복합재료의 최적화 설계에서 유전자 알고리즘은 연속 변수 혹은 적층수, 적층 각도와 같은 이산 변수의 경우에도 쉽게 적용할 수 있는 장점이 있다. 판 스프링을 설계할 때 일반적인 목표는 주어진 기능 및 기하학적 제약 조건(하중, 스프링 강성)에서 가장 가벼운 스프링을 얻는 것이다. 따라서 최적화를 위한 목적함수로 구조의 질량을 선정하였다.

$$f(w) = \rho \cdot L \cdot b \cdot t \quad (3)$$

설계 변수는 복합재 적층 수와 적층 각도로 설정하였으며, 구속조건은 변위와 정적 강도를 설정하였다. 변위는 하중이 인가될 때 최대 변형량을 의미하며, 구속조건으로 적용하였다. 정적 강도는 피로수명을 고려하여 최소 1.5 이상의 여유마진을 확보하는 것으로 설정하였다.

$$\text{Margin of Safety} = \frac{\text{Stress } \sigma_{allow}}{\text{Stress } \sigma_{bending}} - 1 \geq 1.5 \quad (4)$$

$$\text{deflection } d = \frac{W \cdot L^3}{4Ebt^3} \leq 188\text{mm} \quad (5)$$

유전자 알고리즘은 일반적으로 제약 없는 최적화 문제에 가장 적합하다. 현재의 문제는 제한된 최적화이므로 유전자 알고리즘을 사용하여 문제를 해결하기 위해서는 제한되지 않은 문제로 변환해야 한다. 제약을 처리하기 위해서는 대부분 페널티 기능 방법이 사용되었다.

최대 세대수(maximum generation)는 효율적인 최적화를 위해서 최대 세대 수를 150으로 고정시켰다. 일반적으로 교차 확률이 높고 돌연변이 확률이 낮은 것이 좋을 때문에, 본 논문에서는 교차 확률은 0.9로, 돌연변이 확률은 0.001로 적용하였다.

5. 복합재 판 스프링 설계를 위한 유전자 알고리즘의 적용

유전자 알고리즘을 사용하여 최적화된 구조의 적층 시퀀스 최적화를 수행할 때, 강성과 강도를 만족하기 위하여 유전자 형은 0도, 45도, 90도가 혼합된 적층 시퀀스를 가진다. 따라서

Fig. 7 Genetic algorithm process for leaf spring design

해당 제약 조건과 함께 유전자형의 적합성을 평가하려면 유한 요소 분석이 필요하다. 임의의 적층상태에서 초기 설계조건을 만족할 수 있도록 유전자 알고리즘이 적층 시퀀스 최적화를 진행한다. 강성 행렬은 디코딩으로 표시되고 최적화의 설계 변수에 해당하는 강성 행렬은 목적을 포함한 응답의 유도에 적용된다. 모든 유전자형에 대한 제한조건이 적용되고, 복제가 수행되어 차세대 유전자형을 얻게 된다. 이 세대에서 유전자 알고리즘 루프는 다음 표현형 디코딩으로 계속된다. 일단 초기에 정의된 최대 발생량에 도달하면, 최적화로 인한 최적의 설계 포인트에서의 새로운 응답 및 민감도의 유도를 위해 외부 루프로 들어가기 위해 GA가 중단된다. 유전자 알고리즘에 의해 마지막 유전자형 생성 및 적합한 결과를 얻게 되면 최종적으로 유한요소 모델로 구조 건전성을 평가한다.

6. 최적설계 결과

6.1 판 스프링의 적층 최적설계

유전자 알고리즘이 진행되는 동안 초기 적층조건에서 시작되어 세대가 거듭되는 동안의 무게 변화를 Fig. 8에 나타내었다. 40세대까지 큰 변화가 있지만, 40세대 이후부터 수렴하여 150세대까지 진행된 후 종료한다. 스틸의 경우 판 스프링의 설계는 설정된 두께를 유한요소로 적용하면 스틸 판 스프링은 8.506kg의 중량이 계산된다. 복합재 판 스프링의 경우, 초기 설계 중량은 4.21kg로 설정된 이후 유전자 알고리즘이 초기 두께와 각도를 세분화하여 설계 영역별로 적층 시퀀스를 계산한다. 적층 최적화 진행되면 최종적으로 2.925kg의 목표 중량으로 수렴한다. Fig. 8은 유전자 알고리즘이 적층 두께를 계산하고 순차적으로 제조 조건을 반영하고 적층 각을 고려하여 적층 최적화를 계산한다.

Fig. 8 Variation of weight of composite spring with number of generations

스틸의 경우 판 스프링의 설계는 설정된 두께를 유한요소로 적용하면 스틸 판 스프링은 8.506kg의 중량이 계산된다. 복합재 판 스프링의 경우, 초기 설계 중량은 4.21kg로 설정된 이후 유전자 알고리즘이 초기 두께와 각도를 세분화하여 설계 영역별로 적층 시퀀스를 계산한다. 적층 최적화 진행되면 최종적으로 2.925kg의 목표 중량으로 수렴한다. Fig. 9는 유전자 알고리즘이 적층 두께를 계산하고 순차적으로 제조 조건을 반영하고 적층 각을 고려하여 적층 최적화를 계산한다.

스틸 판 스프링 : [10mm/13mm/16mm/18mm]

복합재 판 스프링 : [20mm/24mm/26.4mm/28mm]
[200ply/240ply/264ply/280ply]

Fig. 9 Optimum design of laminate sequence using genetic algorithm

6.2 설계의 검증

최적설계 결과를 검증하기 위하여 Fig. 9의 적층 200ply, 240ply, 264ply, 280ply와 적층각을 유한요소모델에 적용하였다. 적층 결과는 스틸이 적용된 판 스프링의 정적 해석 결과와 유사하다. 과속방지턱의 하중조건에서 가장 큰 응력 628Mpa가 발생되나 충분한 구조 건전성이 확보되는 것으로 판단하였다. 유전자 알고리즘을 이용하면 두꺼운 복합재 적층

Fig. 10 Design verification of composite leaf spring

데이터베이스를 구축할 수 있으며, 효과적인 설계를 진행할 수 있음을 확인하였다. 단, 구조물에서 두꺼운 적층 문제에서 강도, 강성뿐만 아니라 내부의 제조 결함, 층간분리 등의 문제를 고려해야 한다.

7. 결 론

본 논문에서는 복합재료가 적용된 판 스프링의 설계 변수로 적층 시퀀스를 설정하여 유전자 알고리즘을 사용하여 최적화를 수행하였다. 유전자 알고리즘을 적용할 때, 복합재 판 스프링의 적층 두께와 적층각을 획득되었으며, 이는 적절한 강도와 강성으로 최소 무게를 달성하는데 기여한다. 동일한 설계 매개 변수 및 최적화 조건에서 강철된 판 스프링을 복합재 판 스프링으로 교체하면 65.6%의 중량이 감소한다.

유전자 알고리즘을 이용하면 두꺼운 복합재 적층 데이터베이스를 구축할 수 있으며, 효과적인 설계를 진행할 수 있음을 확인하였다. 이러한 결과는 유전자 알고리즘을 통해 엔지니어링 문제에서 자주 접하는 매우 두꺼운 복합재료 구조물의 현실적인 설계에서 효과적이고 효율적으로 사용될 수 있음을 시사한다.

감사의 글

본 논문은 2018년도 신한대학교 학술연구비 지원으로 연구되었음.

References

- Fu, X., Ricci, S., Bisagni, C. (2015) Minimum-weight Design for Three Dimensional Woven Composite Stiffened Panels using Neural Networks and Genetic Algorithms, *Compos. Struct.*, 134(15), pp.708~715.
- Herath, M.T., Natarajan, S., Prusty, B.G., John, N.S. (2015) Isogeometric Analysis and Genetic Algorithm for Shape-adaptive Composite Marine Propellers, *Comput. Methods Appl. Mech. & Eng.*, 284(1), pp.835~860.
- Jang, J.H., Kim, J.H. (2014) Design Optimization of Slender Elastic Beam with Initial Twist using Genetic Algorithms and Finite Element Analysis, *J. Mech. & Sci. & Tech.*, 28(5), pp.1811~1818.
- Kalantari, M., Nami, M.R., Kadivar, M.H. (2010) Optimization of Composite Sandwich Panel Against Impact using Genetic Algorithm, *Int. J. Impact Eng.*, 37(6), pp.599~604.
- Kang, S., Lee, J.M., Jang, J., Lim, W., Lee, T.H. (2014) Design Optimization of Multi-leaf Spring with Finite Element Analysis for Special Purpose Vehicle, *Int. J. Automot. Technol. Conf.*, pp.900~905.
- Moon, I.D., Oh, S.H., Oh, C.Y. (2004) Modeling of a Multi-Leaf Spring for Dynamic Characteristics Analysis of a Large Truck, *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, 21(10), pp.147~153.
- Pathan, M.V., Patsias, S., Tagarielli, V.L. (2018) A Real-coded Genetic Algorithm for Optimizing the Damping Response of Composite Laminates, *Comput. & Struct.*, 198, pp.51~60.
- Qian, C., Shi, W., Chen, Z., Yang, S., Song, Q. (2017) Fatigue Reliability Design of Composite Leaf Springs based on Ply Scheme Optimization, *Compos. Struct.*, 168(15), pp.40~46.
- Ramires, F.B., Andrade, S.A.L., Vellasco, P.C.G.S., Lima, L.R.O. (2012) Genetic Algorithm Optimization of Composite and Steel Endplate Semi-rigid Joints, *Eng. Struct.*, 45, pp.177~191.
- Song, S.M., Kim, C.W. (2015) Optimum Design of Composite Leaf Spring using Vehicle Dynamics Analysis, *Altair Conference*.
- Srinivas, N., Kalyanmoy, D. (1994) Multiobjective Optimization Using Nondominated Sorting in Genetic Algorithms, *Evolut. Comput.* 2(3), pp.221~248.
- Won, Y.-J., Lee, S.-Y. (2013) A Study on the Structural Optimum Design Method of Composite Rotor Blade Cross-Section using Genetic Algorithm, *J. Korean Soc. Aeronaut. & Space Sci.*, 41(4), pp.275~283.
- Yi, J.-H., Sale, D. (2012) Blade Shape Optimization of Wind Turbines using Genetic Algorithms and Pattern Search Method, *J. Korean Soc. Civil Eng.*, A, 32(6A), pp.369~378.

요 지

본 논문에서는 복합재 판 스프링의 설계 최적화를 위해 유전자 알고리즘을 사용한 적층 최적화 과정을 제시하였다. 다목적 소형 승합 자동차 판 스프링을 유한요소모델로 구성하여 초기 설계를 검증한 이후, 유전자 알고리즘을 통해 복합재료의 적층수와 적층각도를 최적화하는 과정을 기술하였다. 최적화 과정을 통해 판 스프링의 하중 감소과정, 반복수에 따라 강 구조의 해석 결과와 비교하였다. 더불어 유전자 알고리즘을 통해 최적화된 적층 시퀀스를 구조에 적용하여 구조의 건전성을 검증하기 위해 유한요소 모델로 구성하여 안전여유를 계산하였다. GA를 적용할 때, 복합재료 판 스프링의 적층 두께와 적층 각을 획득하였으며, 이는 적절한 강도와 강성으로 최소 무게를 달성하는데 기여한다. 동일한 설계 매개 변수 및 최적화 조건에서 강철된 판 스프링을 복합재 판 스프링으로 교체하면 65.6%의 중량이 감소한다.

핵심용어 : 최적 설계, 유전자 알고리즘, 복합재료, 판 스프링, 자동차