

# 유전자 알고리즘을 이용한 반능동현가장치의 구조-제어계의 동시최적화

## Simultaneous structure and control system optimization of a semi-active suspension by Genetic Algorithms

서선민(부산대 대학원생), 이시복(부산대 기계공학부)  
 Seon-Min Seo(Graduate Pusan National Univ.), Shi-Bok Lee(Pusan National Univ.)

### Abstract

A simultaneous optimal design of structural and control system of a semi-active suspension is applied on a half-car model in this paper. Suspension stiffnesses and dampings are selected as structural design parameters and damping forces of variable dampers as controller parameters. Since this optimization problem is of large discontinuous space, conventional exhaustive methods are not enough. So we here try out an approach using Genetic Algorithm for our problem.

Through numerical simulation work, the performance of the simultaneously optimized system was tested and showed meaningful improvement over the partially optimized ones.

**Key Words** : simultaneous optimization(동시최적화), genetic algorithm(유전자 알고리즘), fitness function(적합함수), select(선택), crossover(교배), mutation(돌연변이), robustness(강건성), string(염색체)

### 1 서론

현가 장치의 기능 중에서 승차감과 조정안정성을 위한 기능은 동시에 만족 못하는 상충 요소로서, 차체 설계시 공간 확보 문제와 더불어 설계자의 고민거리이다.

수동현가장치에서는 세 가지 상충 요소에 대한 최적의 절충값으로 설계하고 있고<sup>[2]</sup>, 반능동 현가 장치는 댐핑력의 제어로 에너지를 소모시키는 방향에서만 제어를 수행하여 성능 향상을 꾀하고 있다. 비록 반능동 현가 장치는 성능의 한계가 있지만 동력측면에서의 효율성, 장치의 간단성 및 장치의 신뢰도 등을 고려하여 최근 연구가 활발하다.

그러나 구조계의 동특성과 반능동적인 제어계는 서로 밀접한 연관이 있으므로 각 계의 단독설계를 결합된 계에 대한 최적의 설계라고 할 수 없으므로 동시최적설계 방법이 고안되어야 한다. 그런데 동시최적화에 관한 연구는 설계의 복잡성과 반복계산을 요하는 등의 이유로 초보적인 단계의 연구가 이루어지고 있다.<sup>[1]</sup> 이는 단일해를 사용하여 해공간을 탐색하면서 도함수 또는 다른 정보가 필요한 고전적인

완전검색 방법으로 불충분하기 때문이며, 큰 공간에서는 특수한 인공지능 기법이 사용되어야 한다. 유전자 알고리즘(Genetic Algorithms)은 그러한 기법들 중 하나이다.<sup>[5]</sup>

본 논문에서는 구조계와 Bilinear 모델에 대한 제어계의 동시최적화를 위해 유전자 알고리즘을 적용하여, 이렇게 동시최적화한 성능을 구조계만 최적 설계한 성능 및 제어계를 Bilinear 모델로 최적 제어한 성능과 비교한다.

### 2 시스템 모델링

Fig. 1.에서 차체는 3차까지의 탄성모드를 고려하여 1/2 차량을 모델링하였다.

강체에 대한 운동방정식은

$$\begin{aligned}
 &M_c \ddot{y}_c + c_f(\dot{y}_A - \dot{y}_H) + k_f(y_A - y_H) \\
 &+ c_r(\dot{y}_B - \dot{y}_H) + k_r(y_B - y_H) = u_f + u_r \\
 &I_c \ddot{\theta}_c + a_f c_f(\dot{y}_A - \dot{y}_H) + a_f k_f(y_A - y_H) \\
 &- a_r c_r(\dot{y}_B - \dot{y}_H) - a_r k_r(y_B - y_H) = u_f a_f - u_r a_r \\
 &m_H \ddot{y}_H + c_f(\dot{y}_H - \dot{y}_A) + k_f(y_H - y_A)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + k_H(y_H - r_f) = -u_f \\
m_{ir} \ddot{y}_{ir} + c_r(\dot{y}_{ir} - \dot{y}_B) + k_r(y_{ir} - y_B) \\
& + k_{ir}(y_{ir} - r_r) = -u_r
\end{aligned} \quad (1)$$

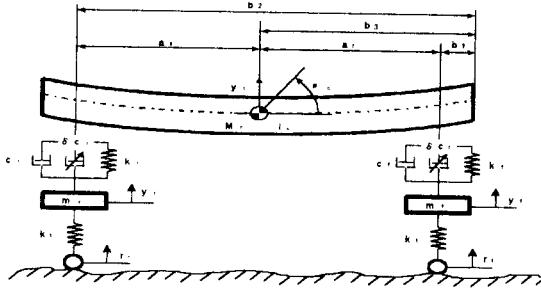


Fig. 1. 1/2 Vehicle model

차체 탄성모드에 대한 운동방정식은 집중하중이 현 가장치 지지점에 작용하는 양단 자유 탄성보로 가정하였다. 고유모드의 직교성을 이용하면 탄성보의 모드 좌표에서의 비연성화된 운동방정식은

$$\mu_n \ddot{T}_n + \lambda \dot{T}_n + k_n T_n = f_1 z_n(b_1) + f_2 z_n(b_2) \quad (n = 1, 2, 3) \quad (2)$$

여기서 모드 질량  $\mu_n$ 과 모드 강성  $k_n$ 은

$$\mu_n = \int \rho A (z_n(x))^2 dx \quad k_n = \omega_n^2 \mu_n$$

이고  $\lambda$ 는 모드 비례 점성감쇠 계수,  $\omega_n^2$ 은 고유진동수,  $\rho A$ 는 단위길이 당 질량이며,  $f_1, f_2$ 는 지지점에 작용하는 힘이다.

$$f_1 = u_f - k_f(y_A - y_H) - c_f(\dot{y}_A - \dot{y}_H)$$

$$f_2 = u_r - k_r(y_B - y_{ir}) - c_r(\dot{y}_B - \dot{y}_{ir})$$

운동방정식(1), (2)에서 아래의 상태 벡터를 식(3)에 설정하여 상태방정식(4)를 구성한다.

$$X(t) = [y_c \ \phi_c \ y_H \ y_{ir} \ T_1 \ T_2 \ T_3 \ \dot{y}_c \ \dot{\phi}_c \ \dot{y}_H \ \dot{y}_{ir} \ \dot{T}_1 \ \dot{T}_2 \ \dot{T}_3]^T \quad (3)$$

$$\dot{X} = AX + Bu + Lr \quad (4)$$

전, 후륜의 외란 벡터를 식(5)에, 전, 후 가변멤버에서 발생하는 힘을 나타내는 제어입력 벡터를 식(6)에 나타내었다.

$$r(t) = [r_f \ r_r]^T \quad (5)$$

$$u(t) = [u_f \ u_r]^T \quad (6)$$

와 같다.

구조계의 수동현가장치 초기 설계변수값으로는

$$k_f = 24,000N/m, \quad k_r = 16800N/m, \quad c_f = 1560Ns/m$$

$$c_r = 1309Ns/m \text{ 로 설정하였고, 차체질량와 관성모}$$

$$\text{멘트를 } M_c = 705kg, \quad I_c = 945kgm^2 \text{ 로 설정하였으}$$

$$\text{며, 전, 후 차축질량을 } m_f = m_r = 50kg \text{ 로 설정하였}$$

다.<sup>[3]</sup>

### 3 동시 최적화 알고리즘

#### 3.1 구조계와 제어계의 설계변수

구조계의 설계변수는 현가장치의 동특성을 좌우하는 스프링과 댐퍼의 계수로 선정하였는데 승차감을 고려하여 초기값의  $\pm 20\%$ 에서 선정하였다.

제어계는 LQ(Linear Quadratic)제어이론을 적용한 Bilinear모델의 제어력을 가변댐퍼의 계수로 바꾸어 설계변수로 선정하였다. 이 설계변수들로 유전자 알고리즘의 탐색체를 구성하였다.

#### 3.2 유전자 알고리즘의 적용

유전자 알고리즘의 가장 핵심적인 주제는 강건성(robustness)으로 임의 알고리즘과 다른 특징은 아래와 같다.

① 방향성있는 탐색과 확률탐색의 요소를 결합하여, 방향성있는 임의 탐색방법보다 강인한 전역 최적화 방법이다.

② 단 한 점을 처리하는 임의 탐색방법과 달리 해가 될 가능성이 있는 개체집단을 유지하여 복잡한 해 공간에 대한 이론적, 경험적으로 건인한 탐색을 할 수 있다.

③ 또한 함수의 미분가능성, Unimodality, 연속성 등의 문제에 제약이 없다.

유전자 알고리즘의 구조는 순환  $t$ 동안에 해가 될 가능성이 있는 것(염색체 벡터),

$P(t) = \{x_1^t, \dots, x_n^t\}$ 의 각 개체집단 "적합도"를 척도로 더 적합한 개체들을 선택함으로써 새로운 개체 집단(과정  $t+1$ )이 구성된다. 이 새로운 개체집단의 어떤 개체들은 교배와 돌연변이에 의해 변경과정을 겪어 새로운 해를 구성한다. 교배연산자는 해들 사이의 정보 교환, 돌연변이연산자는 개체집단에 추가적인 변화를 도입해 준다.

다음은 유전자 알고리즘 구조의 각 단계이다.

#### 3.2.1 해의 유전자적 표현

10진수로 표현된 설계변수를 그 범위와 정밀도에 따라 일정 길이의 무부호2진스트링으로 변환시켜 사용한다.

또한 적합함수에 대입할 설계 변수를 염색체에서 추출해야하는데 한 설계 변수가  $x_i \in [a_i b_i]$ , 이고 정밀도에 따른  $m_i$ 개의 비트로 최적화할 때 각 이진스트

링에 대한 실수값은

$$x_i = a_i + decimal(1001\dots001_2) \cdot \frac{b_i - a_i}{2^m - 1}$$

로써, 여기서  $decimal(string_2)$ 은 이진스트링에 대한 십진수 정수의 값이다.

### 3.2.2 적합함수(Fitness Function)

$f = 1/(1 + J^2)$ 인 적합함수  $f$ 를 최대화하는 문제로 알고리즘을 구성한다.

### 3.2.3 유전 연산자

염색체의 선택(Select), 교배(Crossover), 돌연변이(Mutation)는 알고리즘에서 탐색과 방향성을 부여한다.<sup>[5]</sup>

선택은 적합도값에 기초한 확률 분포에 의한 새로운 개체집단을 선택하는 것이다.

- 각 염색체의  $f(v_i)$ . ( $i=1, \dots, pop\_size$ ) 계산.
- 각 염색체  $v_i$  ( $i=1, \dots, pop\_size$ )의 선택확률

$$p_i = f(v_i) / \sum_{i=1}^{pop\_size} f(v_i) \text{ 계산.}$$

- 각 염색체  $v_i$  ( $i=1, \dots, pop\_size$ )의 누적선택확률

$$a_i = \sum_{j=1}^i p_j \text{ 계산.}$$

- 범위  $[0, 1]$  사이의 난수  $r$ 을 발생.
- 만일  $r < a_i$ 이면 첫 번째 염색체 ( $v_1$ )을 선택. 그렇지 않으면  $a_{i-1} < r < a_i$ 인  $i$ 번째 염색체  $v_i$  ( $2 \leq i \leq pop\_size$ )을 선택.

분명히 가장 좋은 염색체는 더 많이 복제되고, 보통 염색체는 비슷하게 남아 있으며, 최악의 염색체는 소멸된다.

- 범위  $[0, 1]$  사이의 난수  $r$ 을 발생.
- 만일  $r < p_c$  (교배율)이면, 주어진 염색체를 선택하여 교배연산을 적용.

$$(b_1 \dots b_{pos} b_{pos+1} \dots b_m)(c_1 \dots c_{pos} c_{pos+1} \dots c_m)$$

는 다음과 같이 자손의 쌍으로 대체된다.

$$(b_1 \dots b_{pos} c_{pos+1} \dots c_m)(c_1 \dots c_{pos} b_{pos+1} \dots b_m)$$

pos는 임의로 결정된 교배위치이다.

- 범위  $[0, 1]$  내에서 난수  $r$ 을 발생.
- 만일  $r < p_m$  (돌연변이율)이면, 그 비트를 돌연변이.

선택, 교배, 그리고 돌연변이를 한 후에 새로운 개체집단은 새 평가를 받아 위 과정을 반복한다..

## 4. 수치실험 및 결과

성능지수를 다음과 같이 선정하였다.

$$J1 = \sum_{t=1}^N [(y_c + \sum_{i=1}^3 \hat{T}_i(t)z_i(b_3))^2 + \hat{\theta}_c^2] / (2N)$$

$$J2 = \sum_{t=1}^N [(y_c + a_f \theta_c + \sum_{i=1}^3 T_i(t)z_i(b_1) - y_\theta)^2$$

$$+ (y_c - a_r \theta_c + \sum_{i=1}^3 T_i(t)z_i(b_2) - y_n)^2] / (2N)$$

$$J3 = \sum_{t=1}^N [(y_\theta - r)^2 + (y_n - r)^2] / (2N)$$

$$J4 = \sum_{t=1}^N [u_t^2 + u_{t-1}^2] / (2N)$$

$J1$ 은 피칭과 차체탄성의 굽힘모드를 고려한 승차감 성능지수로 가속도 평균제곱 기대치를,  $J2$  및  $J3$ 는 현가장치 작동범위 및 접지력의 성능지수로 상대변위 평균제곱 기대치를,  $J4$ 는 제어력의 성능지수이며 제어입력의 평균제곱의 기대치를 취한다. 성능지수의 가중치 상수를 고려하면, 목적함수는 아래와 같이 표현된다.

$$[ \rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho_4 ] = [1e4, 1e3, 1e3, 1e-6]$$

$$J = \rho_1 J1 + \rho_2 J2 + \rho_3 J3 + \rho_4 J4$$

### 4.1 수치실험 및 고찰

구분	Jp.	Jstr.	Jcon.	Jsim.
성능지수	1.6989	1.4049	0.5216	0.3776

Table 1 Performance index

Table 1에서 Jp.는 수동현가장치의 성능지수이며, Jstr.는 구조 최적설계할 때, Jcon.는 최적 제어할 때, Jsim.는 동시최적화할 때의 성능지수로 Jsim.가 작아져 제성능을 고려할 때 성능이 가장 우수하다.

최적 제어할 때와 동시최적화할 때의 제어력의 성능지수를 보여주는 J4값을 비교해보면 동시최적화의 J4값은 184.3946e-6 으로 최적 제어의 207.9562e-6 보다 작아져 제어력을 작게 필요로 한다.

Fig.2와 Fig.3은 차체 bounce의 가속도를 시간역에서 시물레이션한 결과이며, Fig.4와 Fig.5는 차체 pitch의 가속도를 시물레이션한 결과인데, 동시최적화의 경우가 구조 최적설계보다는 월등하게 우수하고, 최적 제어보다는 다소 우수하다. 이는 차량의 동특성을 고려할 때 구조계의 구조변경이  $\pm 20\%$  정도로 제한되기 때문이다.

## 5 결론

본 논문에서는 유전자 알고리즘을 적용하여 1/2 차

량모델에 대한 구조계와 제어계의 동시최적화를 수행하였다.

(1) 유전자 알고리즘을 적용하여 구조계와 제어계를 동시최적화한 반응동현가장치를 설계하는 알고리즘을 제시하였다.

(2) 승차감을 기준으로 비교할 때, 구조계를 최적 설계한 수동현가장치와 제어계를 최적 제어한 반응동현가장치보다 동시최적화한 반응동현가장치의 성능이 우수하다.

(3) 제어계를 최적 제어한 반응동현가장치의 제어력이 동시최적화한 반응동현가장치에서는 격감하게 되는데 이는 동시최적화시 구조계의 역할로 제어계의 부담이 줄어들었기 때문이다.

### 참고문헌

1. 김창동, "진동계와 제어계의 동시최적화에 관한 연구", 부산대 정밀기계공학과 공학박사 학위논문, 1995.
2. 이민호, 기창두, "자동차의 승차감을 고려한 현가장치의 동적 성능 해석", 한국정밀공학회 '95추계 학술대회논문집, pp.425-431. 1995.
3. A. Hac, Iljoong Youn, Hsien H. Chen, "Control of Suspension for Vehicle With Flexible Bodies -Part 1: Active Suspension", ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control Vol. 118 pp.508-517, 1996.
4. Hiroshi, "Studies on simultaneous optimization of structural and control systems with nonlinear properties", Finite Elements in Analysis and Design 14, pp.187-195, 1993.
5. Zbigniew Michalewicz, "Genetic Algorithms +Data Structures=Evolution Programs", second extended edition, Springer-Verlag Book Company.

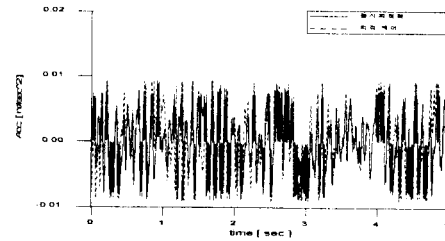


Fig. 2 Bouncing acceleration of vehicle body center.

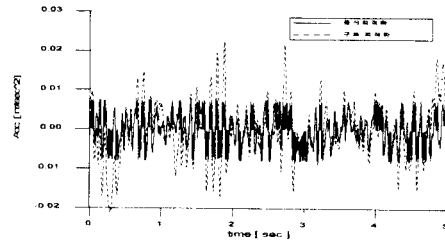


Fig. 3 Bouncing acceleration of vehicle body center

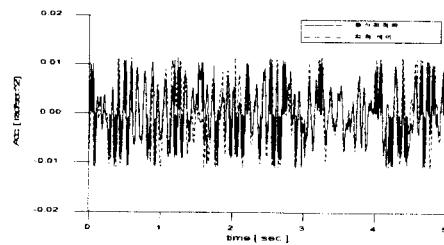


Fig. 4 Pitching acceleration of vehicle body center

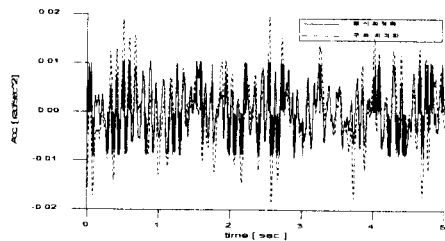


Fig. 5 Pitching acceleration of vehicle body center