韓國精密工學會 2000年度 春季學術大會論文集 pp.1027~1031

유전자 알고리즘을 이용한 공작기계구조물의 다단계 동적 최적화

이영우*(창원대 대학원 기계공학과), 성활경(창원대 기계공학과)

Multiphase Dynamic Optimization of Machine Structures Using Genetic Algorithm

Y. W. Lee(Mech. Eng. Dept., CNU), H. G. Seong(Mech. Eng. Dept., CNU)

ABSTRACT

In this paper, multiphase dynamic optimization of machine structure is presented. The final goal is to obtain (i) light weight, and (ii) rigidity statically and dynamically. The entire optimization process is carried out in two steps. In the first step, multiple optimization problem with two objective functions is treated using Pareto genetic algorithm. Two objective functions are weight of the structure, and static compliance. In the second step, maximum receptance is minimized using genetic algorithm. The method is applied to a simplified milling machine.

Key Words : Multiphase Dynamic Optimization (다단계 동적 최적화), Pareto Genetic Algorithm (파레토 유전자 알고리즘)

1. 서론

기계구조물에 대한 최적설계는, 구조물의 성능과 제작비의 측면에 있어서 최적형상을 만들어 내는 것이다. 이때 여러 종류의 특성이 제품성능을 평가하기 위하여 구해지지만, 실제의 설계에 적용할 수 있는 특성의 평가와 최적화를 실시하기 위하여 사용되는 기계구조물의 모델은 먼저 설계개념이 합리적으로 반영되어 구체적 표현이 이루어진 것이어야 하며, 얻어진 모델에 따라 제조한 제품에 있어서 설계 최적화에 의해 요구되어지는 특성을 충분하고 정확하게 실현할 수 있도록 해야 한다.

기계구조물의 최적설계를 얻기 위한 일반적인 설계최적화 문제에 있어서는, 목적함수 및 제약조건이 결정변수의 복잡한 비선형식으로 표시되고, 더욱이 부재의 형상을 지배하는 구조영역에 대한 설계의사결정을 포함하고 있기 때문에 결정변수 공간에 많은 국소적 최적점이 존재하게 된다. 그 때문에 기계구조물 전체의 최적해를 얻는 것은 쉽지 않다. 또한 비선형인 최적설계 문제의 해법으로서, 비선형계획법이 이용되지만, 이것에 의해 얻어진 설계해가 전역적인 최적해인지 아닌지를 아는 것이 불가능하고, 얻어진 목적함수의 값이 어느 정도 전역적인 최적해에 근접하는지를 판단하는 것도 불가능하다. 이러한 기계구조물의 설계 최적화에 대해서, 지금까지는 정특성(静特性)에 주목해서, 판 두께의 분포, 리브 및 보강재의 설계의사결정 문제에 관한 연구가 단순한 구조요소에 적용되어 행해져 왔다. 그에 비해서 복잡한 기계구조물의 동적인 특성을 설계단계에서 미리 예측한다는 것은 매우 힘들고, 요구되는 성능과 기계구조물의 동적인 강성 사이의 관계가 명확하게 정의되어 있지 않기 때문에 최근에 광범위한 연구활동의 대상이 되어 있다.(3)

본 연구에서는 기계구조물의 최적설계를 유효하게 얻기 위하여 정특성 및 동특성(動特性)의 다단계적인 평가를 통한 기계구조물의 설계의사결정법의 구축과 복수개의 목적함수를 실현하기 위하여 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm)을 적용하여 최적해를 구하는 방법을 제안한다. 이하에서는 우선 다단계적인 평가에 의한 설계최적화법의 기본개념 및 고정도(高精度), 고능률(高能率)이 요구되는 기계구조물의 최적설계를

얻기 위한 실제적인 순서, 그리고 유전자 알고리즘을 이용한 다목적 최적화 방법에 대해서 서술하고, 마지막으로 제안한 방법을 공작기계 구조에 적용하여 유용성을 예증(例證)한다.

2. 다단계 최적화

2.1 다단계 최적화에 의한 최적설계법

본 연구에서 제안하는 방법에서는 우선 초기모델에 대한 정적 최적화 특성을 구해서, 그 특성을 이상적인 특성으로 간주하고, 동적인 설계 단계에 있어서 실현 가능하면, 1 단계에서의 이상적인 특성에 따른 최적인 동특성을 얻는 다단계적인 최적화 과정을 행한다. 초기의 이상적인 모델로부터 최종적인 설계모델에 쉽게, 확실하게 도달하기 위하여, 또한 모델에서의 특성 평가와 이상특성을 가지는 최적설계의 실현을 쉽게 하기 위하여, 기계구조물 전체를 부분영역으로 분할하고, 분할된 모델의 부분영역에서의 특성을 비교하는 것으로 행한다.

여기서 구체적으로 고정도, 고능률이 요구되는 공작기계 및 산업용 로봇과 같은 기계제품에 대한 설계 최적화의 순서를 설명한다. Fig. 1은 단일 칼럼 공작기계의 외형을 나타내고 있다. 이와 같은 공작기계에 있어서는, 절삭점에서의 공구, 물체 사이의 정적 및 동적 거동이 가공정도와 가공능률과 같은 구조물의 성능에 직접적인 영향을 미친다. 그 특성을 평가하기 위해서는 절삭점에서의 가진력 F에 의한 상대변위 D에 관해서, 공구-물체간의 상대 리셉턴스 주파수응답 $R(=D/F)$이 요구된다.

절삭이 일어나는 점에서 측정되는 공작기계의 컴플라이언스 특성은 채터 진동에 대한 하나의 직접적인 측도로서, 이 재생형 자려 채터 진동은 공작기계의 제작 후에는 해결이 무척 곤란한 것으로서 설계단계에서 평가하지 않으면 되지 않는 가장 까다로운 문제이다. 이 문제에 대한 안정성의 증가, 즉 가공정도 및 가공능률의 향상을 위해서는 Fig. 2에서 보여주는 것과 같이 공구-물체간의 상대 리셉턴스의 최대치($R_{m.\max}$)를 감소시키지 않으면 안된다. 이와 같이 절삭점에서 $R_{m.\max}$가 최대치를 가지는 성능상 가장 문제가 되는 방향에 있어서 컴플라이언스의 정적 및 동적 특성치가, 설계최적화를 위하여 평가되어야 한다. 본 연구에서는 성능에 영향을 미치는 인자들을 (1) 정적하중에 의한 변위에 영향을 미치는 설계변수 군(群)과 (2) 동적 거동에 영향을 미치는 설계변수 군(群)으로 구분한다. 이렇게 함으로서, 초기 모델로부터 상세설계의 의사결정을 효과적으로 행하는 것을 가능케 한다.

제 I단계에서는 정적구조특성에 의한 설계를, 제 II단계에서는 동적구조특성에 의한 상세설계를 결정한다. 그러므로 제 I 단계와 제II단계는 각각 정적 및 동적문제에 놓이게 된다.

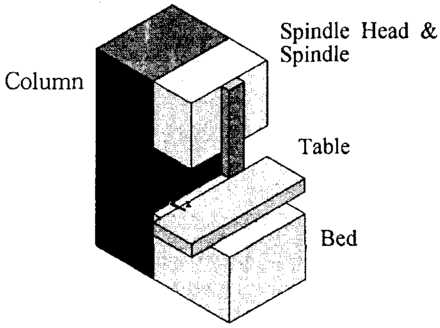

Fig. 1 A single column milling machine

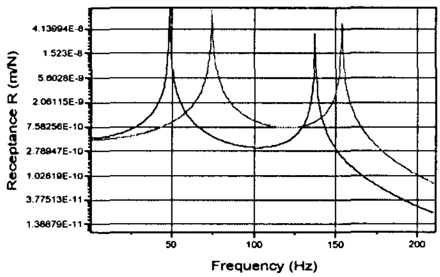

Fig. 2 Receptance at the cutting point

2.1.1 정적문제

우선, 정적인 힘의 설계모델에 대한 영향평가를 행하고 최적설계를 수행하기 위하여 제 1 군의 설계변수를 사용한다. 이를 위한 실용적인 방법으로서, 모델의 영역을 M_s개의 영역으로 분할하고, 상세설계를 얻기 위하여, 판 두께 분포의 변경, 칸막이 판, 리브의 부가 등 여러 종류의 방법을 이용하지만, 여기에서는 가장 기본적 방법인 판 두께 분포의 변경을 채용하고, N_i개의 판 요소로 모델화 한다. 결정변수는 판 두께 $t_{ij}(i=1,2,\cdots,M_s, j=1,2,\cdots,N_i)$이다. 정적문제의 최적화는 두 개의 목적함수의 최소화 문제로 다음과 같이 정식화 될 수 있다.

$$\left.\begin{array}{l} \Psi_{01} = \text{구조물의 총 중량} \\ \Psi_{02} = \text{정 컴플라이언스} \end{array}\right\} \quad (1)$$

$$\text{제약조건 :} \quad t_{ij} - t_{ij}^{U} \leq 0 \ , \quad t_{ij}^{L} - t_{ij} \leq 0$$
$$(i=1,2,\cdots,M_s, j=1,2,\cdots,N_i)$$

2.1.2 동적문제

이상적인 동적 특성을 표현하기 위하여, 제II단계에서는 제 2군의 설계변수를 사용하여 상세설계를 결정한다. 이 경우, 전 주파수 영역 상에서 레셉턴스의 최대치 $R_{m.\max}$를 가지는 고유모드에서의 변형에너지와 관성에너지를 평가한다. 초기 모델과의 대

응관계를 고려하기 위하여, 구조영역을 M_D개의 부분영역으로 분할하고, 또한 구조부재의 강성과 질량의 균형이 중요하기 때문에, 관련하는 구조영역에 있어서 중량은 일정하게 유지시킨다. 동적문제의 최적화는 다음과 같이 정식화 할 수 있다.

$$\Psi_0 = \text{리셉턴스의 최대치} \rightarrow \text{최소화} \qquad (2)$$

2.2 이상특성의 제시

통상의 다목적 최적화에 있어서는, 이상적인 최적점이 목적함수 공간상에서 정해진다. 그 최적점은 실행 불가능한 이상적인 점이다. 한편 본 연구에서 대상으로 하는 기계구조물에 있어서는, 특히 보다 좋은 정도와 작업능률이 요구되는 공작기계 및 산업용 Robot 와 같은 기계구조물에 있어서는, 靜 컴플라이언스(D/F)와 구조중량 W_T가 가장 중요한 기본적인 정적(靜的)특성이고, 이들을 종합적으로 평가할 필요가 있다. 이와 같이 시스템적 평가를 위해서는 靜 컴플라이언스와 중량사이의 관계도가 요구되는데, Fig. 3은 구조부재의 총 중량 (f_1)과 외력 F에 대해서 전 구조부재에 축적되어지는 변형에너지 (f_2) 사이의 관계를 나타내고, 여기서 변형에너지의 크기는 靜 컴플라이언스의 크기에 대응한다. 실행가능영역은 상세한 실제 모델에 있어서 실행 가능한 영역을 나타내고 있다. 일반적인 정적 및 동적 특성의 관점에서 보면, 보다 작은 중량과 보다 큰 강성의 이상적인 특성이 요구된다. 그 때문에 높은 동적 성능이 요구되는 기계제품의 설계에 있어서는 이상적인 특성으로부터의 특성 저하를 최소로 할 수 있도록 상세 설계를 결정하는 것이 요구된다.

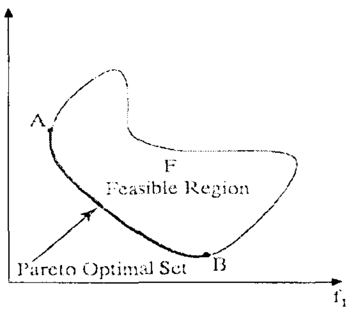

Fig. 3 Feasible Region and Pareto Set in Objective Space

3. 다목적 최적화

다목적 최적화 문제는 대개 서로 충돌하는 목적함수 벡터를 최소화하는 실행가능영역 내에서의 설계변수 벡터를 결정하는 것으로 다음과 같이 수식화하여 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} &minimize\{f_1(x), f_2(x), \cdots, f_m(x)\} \\ &\qquad subject\ to\ g(x) \le 0 \end{aligned} \qquad (3)$$

여기서 x :설계변수 벡터, $f_i(x)$: i번째 목적함수, 그리고 $g(x)$: 제약 벡터이다. 다목적 함수 벡터는 통상 가중치를 도입하여 다음과 같은 단일 목적 함수로 변환된다.

$$f = W_1\frac{f_1}{f_{1a}} + W_2\frac{f_2}{f_{2a}} + \cdots + W_m\frac{f_m}{f_{ma}} \qquad (4)$$

여기서 $W_1, W_2, \cdots$는 총합이 1인 가중치, $f_{1a}, f_{2a}, \cdots$는 각 목적함수에 대한 가중치를 나타낸다.

다목적 최적화문제의 해는 항상 비 지배적인 파레토 최적해 집합(Pareto Optimal set) 내에 놓이게 된다. 파레토 최적해 집합에서 실행가능 벡터 x^*는 식(5),(6)과 같이 실행가능 벡터 x가 존재하지 않을 때만 (3)에서 파레토 최적해가 된다.

$$f_i(x) \le f_i(x^*) \text{ for } all\ i \in \{1, 2, \cdots, m\} \qquad (5)$$

$$f_i(x) < f_i(x^*) \text{ for } at\ least\ one\ i \in \{1, 2, \cdots, m\} \qquad (6)$$

파레토 최적해는 비 지배적인 해의 집합을 만들어 낸다. 이들은 적어도 다른 하나의 목적을 손상시키지 않고서는, 목적이 개선되지 않는 해이다. Fig. 3에서 굵은 선은 이상구조 모델에 있어서 V_T 와 W_T 양자의 최소화에 관한 다목적 최적화 문제의 파레토 최적해 집합에 상당한다. 이 파레토 최적해 집합의 특성은, 구조부재에 대한 제 1단계 이상특성에 대응한다. 실제의 기계 구조물에 있어서는 굵은 선으로 표시되는 파레토 최적해상에 설계해는 없고, 원점으로부터의 화살표 방향으로 후퇴한 실행가능 영역 상에 설계해를 가진다. 여기서, 원점으로부터 보다 긴 거리는 특성의 보다 큰 저하를 의미한다. 원점으로부터 짧은 거리를 가지는 파레토 최적해상의 설계해는 일반적으로, 작은 중량과 큰 강성을 가지는 설계에 대응한다. 판형 구조부재의 경우, 넓은 단면 폭과 얇은 벽 두께를 가지는 부재에 대응한다. 그와 같은 설계에 있어서는 통상, 큰 국소 변형이 발생할 수 있고, 또한 원점으로부터 최소의 거리를 가지는 파레토 최적해의 영역은, 이상특성으로부터의 특성의 저하량이 크게 된다. 그래서 가장 바람직한 동특성을 가지는 설계해는, 원점으로부터 최소거리를 가지는 파레토 최적해 상에 존재한다.

파레토 최적해 집합은 그들의 교환정보를 가져온다. 그래서 다목적 최적화문제를 해결하는 이상적인 방법은 파레토 최적해 집합에서 평준하게 분포된 부분 집합을 얻고, 이 부분 집합을 탐색해서 더 좋은 해를 선택하게 한다. 전통적인 다목적 최적화 알고리즘은 보통 파레토 최적해 집합으로부터 가장 잘 절충된 해를 찾으려고 한다. 이 해는 거의 모든 다

목적 최적화문제에서처럼 탐색기술에 따라 변한다. 더욱이 전통적인 최적화 방법으로부터 나온 해는 파레토 최적해 집합에서 처음 만나는 지역최소화로 빠질 경향이 있다. 이 방법에서 설계자들은 일반적인 파레토 최적해 집합을 찾을 수 없고, 설계목적들 사이에서의 상호교환을 결정할 수 없게 되므로 그들은 블랙박스 형태에서 작업을 하는 것과 같이 얻은 해가 진실로 최적인지, 강건한 것인지 확신할 수 없게 된다.[2]

그러나 GA 탐색과정은 전역적인 최적값을 찾아내도록 설계되어 있다. GA는 해의 집단을 유지할 수 있고, 동시에 비 지배적인 해를 탐색할 수 있다. 이들 속성은 다목적 최적화문제를 푸는데 있어서 파레토 최적해 집합을 찾는 조건에 대응된다. GA를 이용한 다목적 최적화에서 각 세대 각 개체의 적합도 함수는 비 지배적인 성질에 따라서 결정된다. 비 지배적인 개체는 항상 가장 높은 적합도 값을 가지기 때문에 다음세대로 나아갈 높은 확률을 가지게 된다. 진화가 계속 이루어지면서 집단은 그들의 비 지배적인 파레토 최적조합 영역에 수렴한다. 해점들은 집단 내에서 비 지배적인 개체들을 나타내고, 가능한 설계변수들 사이의 파레토 최적해 부분집합(subset)을 나타낸다. 이들 점들을 기초로 해서 결정권자는 최적이면서 강건한 설계를 할 수 있다. Fig. 4는 두 목적을 가지는 최적화 문제에서 집단내의 비 지배적인 점들을 설명하고 있다.

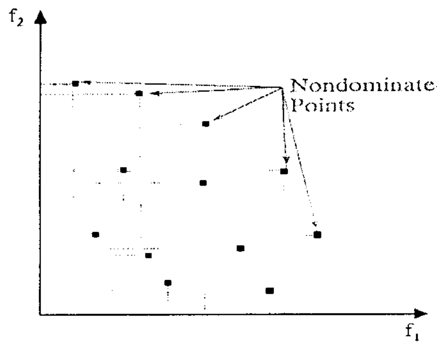

Fig. 4 Nondominated Points in a Population

3.1 Pareto GA for Multiobjective Optimization

파레토 최적해 집합의 탐색은 파레토 GA의 목표이다. GA는 병렬탐색과 다목적 최적화 해의 비 지배적인 성질로서 GA 특성들의 집단적 출력을 사용하여 구성한다. 파레토 GA 동작 과정은 기본적인 GA 기술의 수정에 의해 개발되었다. 단일 목적 최적화에 효과적인 단순 GA는 세 개의 동작자를 포함하는데, 그것은 재생산, 교차 및 돌연변이 이다. 먼저 재생산은 스트링의 적합도에 따라서 스트링의 생존확률을 결정하는 선택과정이며, 적합도는 최적화 된 목적함수의 장점 크기를 나타내는 양의 수이다. 다음 교차는 두 부모 스트링 사이에서 일정한 비트의 무작위 변환을 포함하는데 새로운 자손을 생성시키는데, 여기서 스트링은 대개 설계변수 공간에서 점으로 표현된다. 그리고 돌연변이는 스트링의 비트 값에서 무작위의 우연한 변화를 통한 모델 집단 내에서의 변화를 나타낸다. 이들 기초적인 동작자 이외에 파레토 GA는 두 개의 다른 동작자를 가지는데 niche와 Pareto-set filter이다. niche는 개체들에게 쓸모있는 재원을 나누게 하고, 집단 내에서 적절한 변화를 유지하게 한다. 효과적인 niche 기술은 다목적 최적화 문제에서 GA의 성공을 확신하게 한다. 왜냐하면 파레토 GA의 해는 최적점이기 보다는 파레토 조합 영역이기 때문이다. Pareto-set filter는 각 세대에서 비 지배적인 점들을 모아서, 유전자가 표류하는 효과를 감소시키고, 파레토 GA가 더욱 강건하도록 한다.

4. 적용례

Fig. 1의 단일 칼럼공작기계의 구조모델을 이용해서, 제안한 설계최적화 순서의 유용성을 예증한다. 공작기계의 고정도, 고능률을 실현하기 위해서는 칼럼부재가 가장 중요하기 때문에 여기에서는 칼럼부재를 대상으로 한 상세설계를 고려한다. Fig. 5와 같이 공작기계구조의 초기모델은 구조부재를 판요소 및 빔요소로 모델화 하고, 결합부는 스프링과 댐퍼의 병렬요소를 가지는 유연 결합부 요소로 모델화 했다.

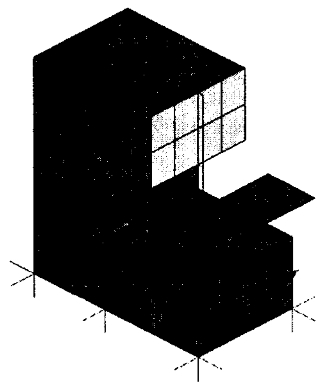

Fig. 5 Analysis Model with 3 type Element

본 연구에서 사용된 설계변수는 크게 세 가지로 분류된다. 첫 번째 베이스와 칼럼 및 테이블을 구성하는 평판 요소의 두께를 세 개의 영역으로 구분하여 변수로 설정하고, 스핀들의 크기를 장방형으로 모델화 하여 그 크기를 두 개의 변수로 설정했다. 또

한 스핀들과 칼럼 헤드 부분, 테이블과 베이스의 연결부분 및 공작기계의 설치 마운트 부분을 스프링과 감쇠를 포함하는 TSDA 요소로 모델화 하여 전체 8개의 변수 $x_1 \sim x_8$으로 설정했다. 그 설계 범위는 다음과 같이 주었다.

$$0.0015 \le x_1 \le 0.0045$$
$$0.0040 \le x_2 \le 0.0080$$
$$0.0050 \le x_3 \le 0.0090$$
$$0.0200 \le x_4 \le 0.4000$$
$$0.0200 \le x_5 \le 0.0600$$
$$75000 \le x_6 \le 150000$$
$$250000 \le x_7 \le 750000$$
$$0.5\times 10^8 \le x_8 \le 1.5\times 10^8$$

정의된 8개의 설계변수 $x_i(i=1,2,\cdots,8)$를 표현하는데 11개의 비트를 사용하였고, 모집단의 크기를 300으로 설정하였다. 따라서 88비트를 가지는 설계변수 벡터 300개가 난수발생기를 통해 생성된다. 위에서 각 설계변수를 표현하는 비트수와 모집단의 크기는 주어진 설계변수 범위에서의 최소 변화량과 설계공간의 범위를 나타낸다. 파레토 GA를 이용한 1단계 최적화에 따라서 50세대 동안 최적화를 행한 결과 정 컴플라이언스 f_s는 1.727×10^{-6} m/N, 최적화된 중량은 11.826 kg 이었다. 또한 과정 중의 적합도에 대한 파레토 최적해를 Table 1과 같이 나타낼 수 있고, 그에 따른 동특성의 변화과정을 Fig. 2에서 볼 수 있다.

Table 1. Pareto Optimal Set

x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8
88.5	0.004	0.005	0.02	0.03	14.58E04	70.48E04	97.78E06

4. 결론

본 연구에서는 기계구조물의 최적설계를 얻기 위하여 정특성 및 동특성을 단계별로 구해서 최적화하는 다단계 최적설계법을 제안하고 공작기계구조물에 적용하여 방법론의 유용성을 증명했다. 이 방법에서는 우선 이상적인 특성을 제 I 단계의 정특성 해석을 통해서 구하고, I 단계의 정특성에 따라서 제 II 단계의 동특성 해석을 순차적으로 진행하였고, 최적화 알고리즘으로 파레토 GA를 적용하여 국소최적화를 피했다.

참고문헌

1. F.Y.Cheng, Fellow, ASCE, DAN Li, "Multi-objective Optimization Design with Pareto Genetic Algorithm", J. of Structural Eng., Vol.123, No.9, pp.1252-261, 1997.
2. D.E. Goldberg, "Genetic Algorithm in Sear -ch Optimization and Machine Learning", Addison-Wesley Publishing Company, Inc., pp.1-88, 1989.
3. M. Yoshimura, "Design Optimization of Machine-tool Dynamics Based on an Explanation of Relationships between Characteristics (1st Report)", JSPE. Vol.53, No. 4, pp601-606, 1987
4. M. Yoshimura, Y. Takeuchi, K. Hitomi, "工作機械構造物の多層最適設計", 日本機械學會論文集(C 編), 50卷, 459号, pp.2210-2218, 1984