

유전자 알고리즘을 이용한 공작기계구조물의 정강성 해석 및 다목적 함수 최적화(I)

이영우*, 성활경**

Static Compliance Analysis & Multi-Objective Optimization of Machine Tool Structures Using Genetic Algorithm(I)

YeongWoo Lee*, HwalGyeong Seong**

*창원대학교 기계공학과 대학원, **창원대학교 기계공학과

Abstract

In this paper, multiphase optimization of machine structure is presented. The goal of first step is to obtain (i) light weight, (ii) rigidity statically. In this step, multiple optimization problem with two objective functions is treated using Pareto Genetic Algorithm. Where two objective functions are weight of the structure, and static compliance. The method is applied to a new machine structure design.

Key words : Multiphase Optimization(다단계 최적화), Pareto Genetic Algorithm(파레토 유전자 알고리즘), Multiple Optimization Problem(다목적 최적화 문제)

1. 서론

기계구조물의 최적설계는, 크게 구조물의 성능과 제작비의 측면에 있어서 최적의 형상을 만들어 내는 것이라고 할 수 있다. 그러나 이러한 최적화 과정에서 특히 대형의 공작기계와 같은 복합적인 기계구조물에 있어서는 다루어야 할 설계변수가 많고, 고차의 비선형 제약조건 때문에 쉽게 해결할 수 없는 많은 어려움을 가진다. 또한 이러한 과정에서 제품성능을 평가하기 위하여 여러 종류의 특

성이 구해지고, 이들을 실제의 설계에 적용하기 위해서는 사용할 기계구조물의 최적화모델 구축에 많은 관심을 가져야 한다. 즉 최적화 모델이라고 할 때는 무엇보다 설계 개념이 합리적으로 반영되어 구체적 표현이 이루어진 것이어야 하며, 얻어진 모델에 따른 제품화에는 최적화에 의해 요구되어지는 설계 특성이 충분하고 정확하게 실현될 수 있어야 한다.

기계구조물의 일반적인 설계최적화 문제에 있어서는, 목적함수 및 제약조건이 결정변수의 복잡한 비선형식으로 표시된다. 더욱이 부재의 형상이 지배하는 구조영역에 대한 설계의사 결정을 포함하고 있기 때문에, 결정변수 공간에는 많은 국소적 최적점이 존재하게 된다. 그 까닭으로 기계구조물의 전체적인 최적해를 얻는 것은 쉽지 않고, 지금까지는 하나의 단계로 해서 주로 정적인 특성(靜特性)에만 주목하여, 판 두께의 분포, 리브 및 보강재의 설계의사결정 문제에 관한 연구가 단순한 구조요소에 적용되어 많이 행해져 왔다. 그에 비해서 복잡한 기계구조물의 동적인 특성을 설계단계에서 미리 예측한다는 것과 정적 및 동적 특성을 동시에 고려한다는 것은 매우 힘들고, 요구되는 성능과 기계구조물의 강성 사이의 관계가 명확하게 정의되어 있지 않기 때문에 최근에는 최적화 측면에서 활발한 연구활동의 대상이 되어 있다.⁽³⁾

본 연구에서는 공작기계 구조물의 최적설계를 유효하게 얻기 위하여 정특성, 동특성(動特性) 및

열특성(熱特性)의 다단계적인 평가를 통한 구조물의 설계의사결정법을 정의하고, 우선 제 1단계의 정적 최적화에서 복수개의 목적함수를 실현함에 있어서 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm)을 적용하여 최적해를 구하는 방법을 제안한다. 그리고 제안한 방법을 공작기계구조에 적용하여 유용성을 예증(例證)하고자 한다.

2. 다단계 최적화

본 연구에서 제안하는 방법에서는 우선 초기모델에 대한 정적 최적화 특성을 구해서, 제 1단계 최적화 설계변수로 결정하고, 제 2의 동적인 설계 단계에서 앞의 1 단계에서의 최적화 특성에 따른 제 2의 최적화 특성을 얻어서 다시 제 3의 특성을 순차적으로 구하는 다단계적인 최적화 과정을 행한다. 초기의 설계 모델로부터 최적화 모델까지 도달하는 과정에서는, 각 모델에서의 특성 평가와 최적화 특성을 가지는 최적설계로의 실현을 일관되게 하기 위하여, 기계구조물 전체를 몇 개의 설계변수영역으로 분할하고, 각 단계에서의 설계 특성을 비교 평가하는 것으로 진행한다. 특히 제 3의 최적화 단계에서는 구조물의 최적화에 따른 열원의 거동을 분석하는데, 제 1, 2단계에서 구체화 된 고속 및 고정도의 목적함수를 한 단계 더 높이 실현하기 위하여 구조물의 열변형 최소화의 제 3 목적을 실현하는 과정이다. 즉, 제 1단계에서 얻어진 특성이 제 2단계의 기본 설계값이 되고 제 1, 2단계의 특성이 제 3단계까지 연속적으로 이어지는 페루프를 구성하여 최적화를 이루는 것이 본 연구에서 제안하는 다단계 최적화 방법이다.

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 공작기계 구조물의 외형을 나타내고 있다. 베드, 칼럼, 크래들, 쿨, 스펀들의 5개 구조부분으로 이루어진 이와 같은 공작기계에 있어서, 절삭점에서의 공구, 물체 사이의 정적 및 동적 거동은 공작기계의 제품성능에 직접적인 영향을 미친다. 그러한 특성을 평가하기 위해서는 절삭점에서의 가진력에 대한 정강성 및 동강성 분석이 절실히 요구된다고 할 수 있다.

절삭이 일어나는 점에서 측정되는 컴플라이언스 특성은, 공작기계의 제작 후에는 해결이 무척 곤란한 것으로서 설계 단계에서 평가하지 않으면 되지 않는 가장 까다로운 문제의 하나이다. 또한

이는 재생형 자려 채터 진동에 대한 직접적인 척도가 된다. 이 문제에 대한 안정성의 증가, 즉 가공도 및 능률의 향상을 위해서는, 성능상 가장 문제가 되는 절삭력 작용방향으로 최대값을 갖는 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. 그래서 제 I단계에서는 정적구조특성에 의한 설계를, 제 II단계에서는 동적구조특성에 의한 상세설계를 결정하는, 각각 정적 및 동적 문제의 서로 다른 조건에 놓이게 된다.

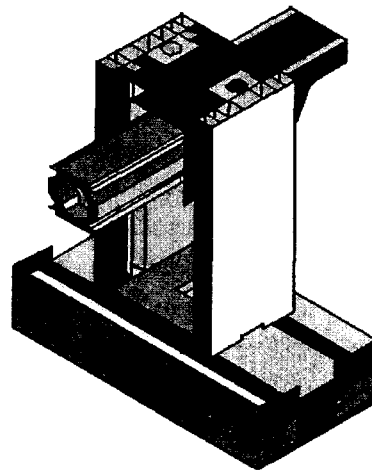


Fig. 1 Outline of New machining Structure

3. 정강성 해석

우선, 정적인 힘에 대한 설계모델의 영향평가를 행하고 최적설계를 수행하기 위하여 제 1군의 설계변수를 사용한다. 모델의 영역을 M_s 개 영역으로 분할하고, 또한 상세설계를 얻기 위하여 판 두께 분포를 변경하는 방법을 채용해서 N_j 개의 판 요소로 유한요소 모델을 만든다. 여기서 결정변수는 판 두께 $t_{ij}(i=1,2,\dots,M_s, j=1,2,\dots,N_j)$ 이다. 정적문제의 최적화는 두 개의 목적함수의 최소화 문제로 다음과 같이 정식화 될 수 있다.

$$\left. \begin{aligned} \Psi_{01} &= \text{구조물의 총 중량} \\ \Psi_{02} &= \text{정컴플라이언스} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \text{최소화} \quad (1)$$

$$\text{제약조건 : } t_{ij}^U - t_{ij}^L \leq 0, \quad t_{ij}^L - t_{ij}^L \leq 0$$

$$(i=1,2,\dots,M_s, j=1,2,\dots,N_j)$$

여기서 정 컴플라이언스는 정강성의 역수로서 표현되고, 특히 보다 좋은 정도와 작업능률이 요구되는 공작기계 및 산업용 Robot 와 같은 기계구조물에 있어서는, 정 컴플라이언스 $V_T (= D/F)$ 와 구조중량 W_T 가 가장 중요한 정적(靜的) 특성이 되고, 이들이 종합적으로 평가될 필요가 있다. 이와 같이 시스템적 평가를 위해서는 정 컴플라이언스와 중량사이의 관계도가 요구되는데, Fig. 2와 같이 구조부재의 총 중량 (f_1)과 외력에 대해서 전 구조부재에 축적되어지는 변형에너지 (f_2) 사이의 관계를 나타낼 수 있다. 여기서 변형에너지의 크기는 정 컴플라이언스의 크기에 상응하고 F로 표시되는 영역은 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. 통상의 다목적 최적화에 있어서, 이상적인 최적점은 목적함수 공간상에서 정해지지만, 그 최적점은 실행 불가능한 이상적인 점이다.

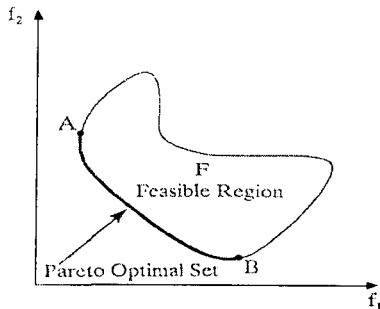


Fig.2 Feasible Region and Pareto Set in Objective Space

4. 다목적 최적화

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

$$\text{minimize } \{f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x)\} \quad (2)$$

$$\text{subject to } g(x) \leq 0$$

여기서 x : 설계변수 벡터, $f_i(x)$: i 번째 목적함수, 그리고 $g(x)$: 제약 벡터이다. 다목적 함수 벡터는 일반적으로 가중치를 도입하여 다음과 같은 단일 목적 함수로 변환한다.

$$f = W_1 \frac{f_1}{f_{1a}} + W_2 \frac{f_2}{f_{2a}} + \dots + W_m \frac{f_m}{f_{ma}} \quad (3)$$

여기서 W_1, W_2, \dots 는 총합이 1인 가중치, f_{1a}, f_{2a}, \dots 는 각 목적함수에 대한 스케일 인자를 나타낸다.

일반적으로 다목적 최적화문제의 해는 항상 비지배적인 파레토 최적해 집합(Pareto Optimal set) 내에 놓이게 된다. 이 집합에서 실행가능 벡터 x^* 는 식(4),(5)와 같이 실행가능 벡터 x 가 존재하지 않을 때만 식(2)에서 파레토 최적해가 된다.

$$f_i(x) \leq f_i(x^*) \text{ for all } i \in \{1, 2, \dots, m\} \quad (4)$$

$$f_i(x) < f_i(x^*) \text{ for at least one } i \in \{1, 2, \dots, m\} \quad (5)$$

4.1 Pareto Optimal set

파레토 최적해는 비지배적인 해의 집합을 만들어 낸다. 이들은 적어도 다른 하나의 목적을 손상시키지 않고서는, 목적이 개선되지 않는 해이다. Fig. 2에서 굵은 선은 이상적인 구조 모델에 있어서 V_T 와 W_T 양자의 최소화에 관한 다목적 최적화문제의 파레토 최적해 집합에 상당한다. 이 파레토 최적해 집합의 특성은, 구조부재에 대한 제 I단계 최적화 특성에 대응한다. 실제의 기계 구조물에 있어서는 굵은 선으로 표시되는 파레토 최적해상에 설계해는 없고, 원점으로부터의 화살표 방향으로 후퇴한 실행가능 영역 상에서 설계해를 가진다. 여기서, 원점으로부터 보다 멀리 놓이는 점들은 특성의 보다 큰 저하를 의미하고, 원점으로부터 짧은 거리를 가지는 파레토 최적해상의 설계해는 일반적으로, 작은 중량과 큰 강성을 가지는 설계에 상응한다. 특히 판형 구조부재를 사용하는 경우, 즉 넓은 단면 폭과 얇은 벽 두께를 가지는 부재의 적용에 해당하게 되고, 그와 같은 설계에 있어서는 통상, 큰 국소 변형이 발생할 수 있으며, 이를 피하는 설계는 Fig. 2에서 볼 때 원점으로부터 최소의 거리를 가지는 파레토 최적해의 영역을 벗어나는,

즉 이상상태로부터의 특성의 저하량이 크게 되는 실제적인 설계가 됨을 알 수 있다. 그러나 가장 바람직한 동특성을 가지는 설계하는, 원점으로부터 최소거리를 가지는 파레토 최적해 상에 존재한다.

파레토 최적해 집합은 설계변수들의 교환정보를 가져온다. 그래서 다목적 최적화문제를 해결하는 이상적인 방법은 파레토 최적해 집합에서 평균하게 분포된 부분 집합을 얻고, 이 부분 집합을 탐색해서 더 좋은 해를 선택하게 된다. 전통적인 다목적 최적화 알고리즘은 보통 파레토 최적해 집합으로부터 가장 잘 절충된 해를 찾으려고 한다. 이해는 거의 모든 다목적 최적화문제에서처럼 탐색 기술에 따라 변한다. 더욱이 이 최적화 방법으로부터 나온 해는 파레토 최적해 집합에서 처음 만나는 지역최소화로 빠질 경향이 있다. 이 방법에서 설계자들은 일반적인 파레토 최적해 집합을 찾을 수 없고, 또한 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. 3은 정킴플라이언스 및 중량의 두 목적을 가지는 본 연구의 제 1단계 최적화 과정에서 찾아낸 집단내의 비 지배적인 점들을 설명하고 있다. 그리고 Fig. 4는 제 1단계 최적화 과정 중에 탐색된 파레토 최적해 집합을 나타낸다.

4.2 Pareto GA for Multi-objective 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 돌연변이이다. 이들 기초적인 동작자 이외에 파레토 GA는 두 개의 다른 동작자를 가지는데 niche와 Pareto-set filter이다. niche는 개체들에게 쓸모 있는 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.

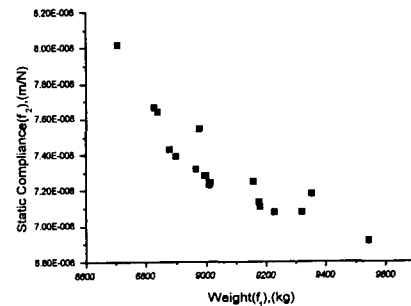


Fig. 3 Non-dominated Points

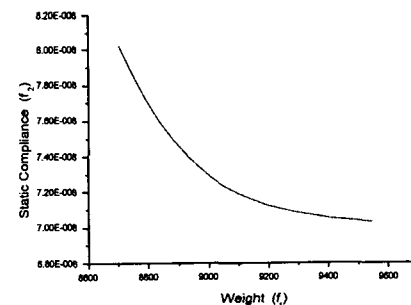


Fig. 4 Pareto Optimal Set in first optimization step

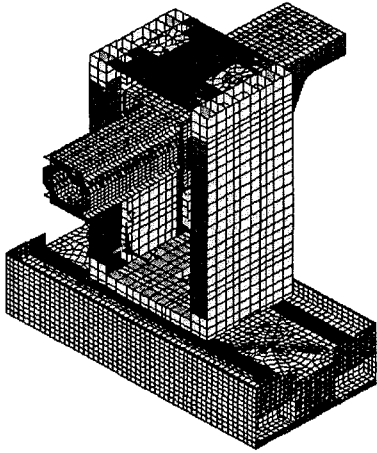


Fig. 5 Analysis Model with 3 type Element

5. 적용례

Fig. 1의 공작기계 구조모델을 이용해서, 제한한 설계최적화 순서의 유용성을 예증한다. 공작기계의 고정도, 고능률을 실현하기 위해서는 칼럼부재가 가장 중요하지만, 여기에서는 칼럼부재를 포함한 그 주변의 모든 부재를 대상으로 한 상세설계를 고려한다. Fig. 5와 같이 공작기계구조의 초기모델은 구조부재를 판요소 및 빔요소로 모델화하고, 결합부는 스프링과 댐퍼의 병렬요소를 가지는 유연 결합부 요소로 모델화 했다.

본 연구에서 사용된 설계변수는 크게 일곱 가지로 분류된다. 이는 베이스, 칼럼, 크래들 및 퀴를 구성하는 평판 요소의 두께를 일곱 개의 영역으로 구분하여 변수로 설정했다. 또한 베이스와 칼럼, 칼럼과 크래들 그리고 크래들 및 퀴의 연결부분 및 공작기계의 설치 마운트 부분을 스프링과 감쇠를 포함하는 TSDA 요소로 형상화하여 제 1 단계 최적화 과정에서는 제 1 설계변수군을 전체 7개의 변수 $x_1 \sim x_7$ 으로 설정했다. 그 설계 범위는 다음과 같이 주었다.

$$\begin{aligned} 0.0150 &\leq x_1 \leq 0.0450 \\ 0.0400 &\leq x_2 \leq 0.0800 \\ 0.0100 &\leq x_3 \leq 0.0400 \\ 0.0100 &\leq x_4 \leq 0.0400 \\ 0.0200 &\leq x_5 \leq 0.0600 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 0.0050 &\leq x_6 \leq 0.0300 \\ 0.0250 &\leq x_7 \leq 0.0750 \end{aligned}$$

정의된 7개의 설계변수 $x_i(i=1,2,\dots,7)$ 를 표현하는데 11개의 비트를 사용하였고, 모집단의 크기를 300으로 설정하였다. 따라서 77비트를 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 제 1단계 최적화에 따라서 111세대 동안 최적화를 행한 결과 Table 1에서 볼 수 있듯이 정 컴플라이언스 f_s 는 0.724×10^{-8} m/N, 최적화된 중량은 9009.2 kg 이었다. 또한 과정 중의 적합도의 변화를 Fig. 6에서 볼 수 있다.

Table 1. Optimized Results

		Before Optimization	After Optimization
Compliance(m/N)		0.818×10^{-8}	0.724×10^{-8}
Weight (kg)	Total	9198.20	9009.90
	Base	4868.68	4450.39
	Column	2998.32	3207.48
	Craddle	534.75	507.59
	Quill	796.45	844.45

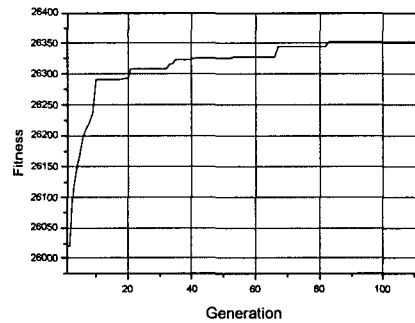


Fig. 6 Fitness vs Generation

6. 결론

본 연구에서는 기계구조물의 최적설계를 얻기 위하여 정특성 및 동특성을 단계별로 구해서 최적화하는 다단계 최적설계법을 제안하고 공작기계구조물에 적용하여 방법론의 유용성을 증명했다. 이 방법에서 정적 최적화 특성을 제 1단계의 정특성

해석을 통해서 구할 수 있었다. 고정밀도를 유지하면서 생산성 향상을 위한 고속이송을 실현하는데 중량 감소는 가장 중요한 특성 중의 하나라고 할 수 있으며, 본 연구에서는 파레토 GA를 적용하여 국소 최적화를 피하면서 정킵플라이언스 및 중량을 동시에 최적화 할 수 있었다. 또한 제 I 단계의 정특성에 따라서 제 II 단계의 동특성 해석 및 제 III 단계의 열해석을 순차적으로 진행하면, 리셉턴스, 열변형의 최소화를 목적으로 하는 다단계적인 최적화 특성을 구할 수 있을 것으로 사료된다.

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 Search 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
5. 이영우, 성활경 "유전자 알고리즘을 이용한 공작기계구조물의 다단계 동적 최적화", 한국정밀공학회 2000년도 춘계학술대회 논문집, pp. 1027-1031, 2000