

꺠형 공작기계구조물의 다단계 최적화(1) (정강성 해석 및 다목적함수 최적화)

이영우*, 성활경**

Multi-Phase Optimization of Quill Type Machine Structures(1) (Static Compliance Analysis & Multi-Objective Function Optimization)

YeongWoo Lee*, HwalGyeong Sung**

ABSTRACT

To achieve high precision cutting as well as production capability in the machine tool, it is needed to develop excellent rigidity statically, dynamically and thermally as well. In order to predict the qualitative behavior of a machine tool, simultaneous analysis of mechanics and heat transfer is required. Generally, machine tool designers have solved designing problems based on partial estimation of the specified rigidity. This study clears the inter-relationship between them, and proposes multi-phase optimization of machine tool structure using a genetic algorithm. The multi-phase solution method is consists of a series of mechanical design problem. At this first phase of static design problem, multi-objective optimization for the purpose of minimization of the total weight and static compliance minimization is solved using the Pareto Genetic Algorithm.⁽¹⁾

Key Words : Multi-Phase Optimization(다단계 최적화), Multi-Objective Optimization(다목적 최적화), Pareto Genetic Algorithm(파레토 유전자 알고리즘), Static Compliance(정 컴플라이언스)

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 큰 어려움을 가진다. 또한 이러한 과정에서 제품성능을 평가하기 위하여 여러 종류의 특성이 구해지게 되고, 이들을 실제의 설계과정에 적용하기 위해서는 사용할 기계구조물의 평가모델 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 요구되는 설계 특성이 충분하고 정확하게 실현될 수

2001년 3월 9일 접수
* 창원대학교 메카트로닉스 공학부
** 창원대학교 기계공학과

있어야 한다.

그러나 기계구조물의 일반적인 설계최적화 문제에 있어서는, 목적함수 및 제약조건이 결정변수의 복잡한 비선형식으로 표시되고, 더욱이 부재의 형상을 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 정적인 특성(靜特性), 동적인 특성(動特性) 그리고 열적인 특성(熱特性) 등의 개별적인 평가 및 부품 해석에 주목하여 설계의사결정 문제를 해결하는 연구가 많이 행해져왔다. 그러나 각 부분의 특성이 서로간에 어떤 영향을 주는지 명확하게 정의되어 있지 않아서 국소적인 최적해에 머물 수 있는 여지가 충분히 있다고 할 수 있다. 복합적인 공작기계구조물에서도 최근에는 이들 각 특성들간의 관계 규명에 의한 전체적인 최적화 요구가 점차 증가되고 있다.⁽³⁾⁽⁴⁾

본 연구에서는 공작기계 구조물의 최적설계를 유효하게 얻기 위하여 정특성, 동특성 및 열특성의 순차적이면서 다단계적인 평가를 통한 구조물의 설계의사결정법을 정의하고, 제 1단계의 정적 최적화에서 복수개 목적함수의 최적화를 실현함에 있어서 파레토 유전자 알고리즘(Pareto Genetic Algorithm)을 적용하여 해를 구하는 방법을 제안한다.⁽¹⁾ 그리고 제안한 방법을 공작기계구조에 적용하여 유용성을 예증(例證)하고자 한다.

2. 다단계 최적화

본 연구에서 제안하는 방법에서는 초기모델에 대한 정적 최적화 특성을 구해서, 제 1단계 최적화 설계변수로 정의하고, 제 2의 동적인 설계 단계에서 앞의 1단계의 설계변수에 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 높い 실현하면서 구조물의 열변형 최소화의 제 3 목적을 평가할 수 있는 과정이다. 즉, 정강성, 동강성 및 열적 특성 평가의 3 단계가 연속적으로 이어지는 페루프를 구성하여 전체적인 최적화를 이루는 것이 본 연구에서 제안하는 다단계 최적화 방법이다.

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

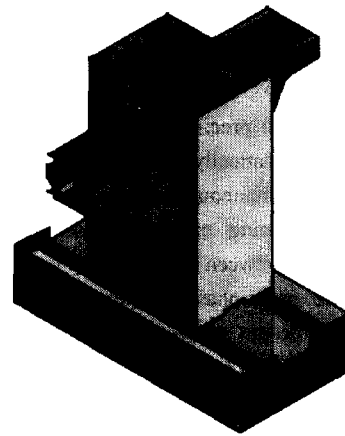


Fig. 1 Simulation Model of High-Speed Line Center

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 가공정도 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 구분하여서 초기 모델로부터 상세설계의 의사결정을 효과적으로

행하는 것을 가능케 한다. 그래서 제 1단계에서는 정적구조특성에 의한 설계를, 제 2단계에서는 동적구조특성에 의한 상세설계를 결정하는, 서로 독립적인 조건에서 최적화를 실시하게 된다.

3. 다목적 최적화

제 1단계의 정적 최적화 단계에서 구현되어야 하는 다목적 최적화 문제는 대개 서로 충돌하는 목적함수 벡터를 최소화하는 실행가능영역 내에서의 설계변수 벡터를 결정하는 것으로 다음과 같이 수식화 하여 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \text{minimize } \{f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x)\} \\ & \text{subject to } g(x) \leq 0 \end{aligned} \quad (1)$$

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

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

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

위와 같은 다목적 최적화문제의 해는 항상 비 지배적인 파레토 최적해 집합(Pareto Optimal Set) 내에 놓이게 되고, 이 집합에서 실행가능 벡터 x^* 는 식(3),(4)와 같이 실행가능 벡터 x 가 존재하지 않을 때만 식(1)에서 파레토 최적해가 될 수 있다.

$$f_i(x) \leq f_i(x^*) \text{ for all } i \in \{1, 2, \dots, m\} \quad (3)$$

$$f_i(x) < f_i(x^*) \text{ for at least one } i \in \{1, 2, \dots, m\} \quad (4)$$

3.1 정감성 해석

정 컴플라이언스 $f_s (= D/F)$ 는 정감성의 역수로서 표현되고, 특히 보다 좋은 정도(精度)와 작업 능률이 요구되는 공작기계 및 산업용 Robot와 같은 기계구조물에 있어서는, 구조중량 W_T 와 함께 가장 중요한 정적(靜的) 특성이 되고, 이들이 종합적으로 그리고 동시에 평가될 필요가 있다. 이처럼 정적문제의 최적화는 두 목적함수의 최소화 문제로 식 (5)와 같이 정식화 될 수 있고, 가중치를 적용하여 식

(6)과 같이 단일목적 함수로 변환할 수 있다.

$$\left. \begin{aligned} \mathcal{W}_{01} &= \text{구조물의 총 중량} \\ \mathcal{W}_{02} &= \text{정컴플라이언스} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \text{최소화} \quad (5)$$

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

$$f = W_1 \frac{f_1}{f_{1a}} + W_2 \frac{f_2}{f_{2a}} \quad (6)$$

또한 정적인 외력 $\vec{F}(x, y, z)$ 는 편의상 단위 힘으로 하고, 가진 및 평가점을 동일 A 지점으로 하여 절삭점의 x, y, z 절삭력 방향의 절대변위를 다음과 같이 고려하였다.

$$f_s = \|f_{sx}(A, A) + f_{sy}(A, A) + f_{sz}(A, A)\| \quad (7)$$

식 (6)과 같은 다목적 함수의 평가를 위해서는 목적함수가 되는 정 컴플라이언스와 중량 사이의 관계 규명이 필요하고, Fig. 2와 같이 구조부재의 총 중량 (f_1)과 외력에 대해서 전 구조부재에 축적되어지는 변형에너지 (f_2)사이의 관계를 이용할 수 있다. 여기서 변형에너지의 크기는 정 컴플라이언스의 크기에 상응하고 F 로 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 정해지고, 특히 중량과 정 컴플라이언스가 반비례 관계를 가지고 있는 이 문제에서 최적점은 실행 불가능한 이상적인 점이 된다.

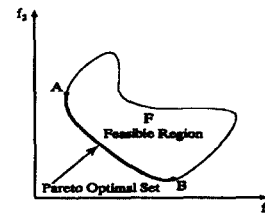


Fig. 2 Feasible Region and Pareto Set in Objective Space

3.2 Pareto Optimal Set

파레토 최적해는 비지배적인 해의 집합을 만들어 내면서 적어도 다른 하나의 목적을 손상시키지 않고서는, 목적이 개선되지 않는 해이다. Fig. 2에서

굵은 선은 이상적인 구조 모델에 있어서 f_1, f_2 양자의 최소화에 관한 다목적 최적화 문제의 파레토 최적해 집합에 상당한다. 이 파레토 최적해 집합의 특성은, 구조부재에 대한 제 1단계 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 원점으로부터 최소 거리를 가지는 파레토 최적해의 영역을 벗어나는, 즉 이상상태로부터의 특성의 저하량이 크게 되는 실제적인 설계가 됨을 알 수 있다.

파레토 최적해 집합은 설계변수들의 교환정보를 가져오며, 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. 이 해는 거의 모든 다목적 최적화문제에서처럼 탐색기술에 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 설계 목적들 사이에서의 상호교환을 결정할 수 없게 되므로 그들은 블랙박스 형태에서 작업을 하는 것과 같이 얻은 해가 진실로 최적인지, 강건한 것인지 확신할 수 없게 된다.⁽²⁾

반면, 유전자 알고리즘(GA, Genetic Algorithm) 탐색과정은 전역적인 최적값을 찾아내도록 설계되어 있으며, 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 정검 플라이언스 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 설계 가능 영역을 나타낸다.

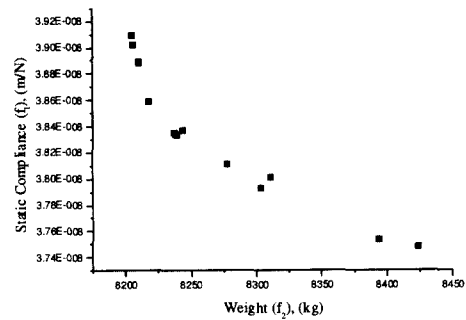


Fig. 3 Non-dominated Points

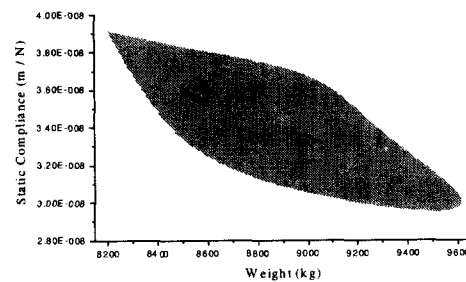


Fig. 4 Feasible region

3.3 Pareto GA for Multi-Optimization

파레토 최적해 집합의 탐색은 파레토 GA의 목표이다. 그리고 파레토 GA 동작 과정은 기본적인 GA 기술의 수정에 의해 개발되었다. 병렬탐색과 다목적 최적화 해의 비 지배적인 성질로서 GA 특성들의 집단적 출력을 사용하여 구성하는데, 재생

산, 교차 및 돌연변이의 기초적인 세 개 동작자 이외에 Niche와 Pareto-Set Filter 동작자가 추가된다. Niche는 개체들 사이의 “거리”를 측정하여 가까운 개체들끼리 적합도를 공유하도록 하고, 한 Peak 점에 몰리지 않으면서, 모든 Peak 점에 골고루 분포하게 하여, 쓸모 있는 재원을 나누게 한다. 또한 집단 내에서 적절한 변화를 유지하게 하여 최적의 파레토 조합을 구성하게 함으로써 다목적 최적화 문제에서 GA의 성공을 확신하게 한다. 그리고 Pareto-Set Filter는 각 세대에서 비 지배적인 점들을 모아, 유전자의 표류를 감소시키고, 파레토 최적점의 손실을 막아서 파레토 GA가 더욱 강건하도록 한다.

4. 적용례

Fig. 1의 공작기계 구조모델을 이용해서, 제안한 설계최적화 순서의 제 1단계 최적화를 행하고, 제 1설계변수군을 탐색한다. 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 모델화 하고, 결합부는 스프링과 댐퍼의 병렬요소를 가지는 유연 결합부 요소로 모델화 했다.

본 연구의 제 1단계 최적화 과정에서 사용된 설계변수는 아홉 가지로 분류된다. 이는 베이스, 칼럼, 크래들 및 킬을 구성하는 평판 요소 두개의 서로 다른 영역에 해당되는 것으로 $x_1 \sim x_9$ 을 아래와 같이 정의했다. 또한 베이스와 칼럼, 칼럼과 크래들 그리고 크래들 및 킬의 연결부분을 스프링과 감쇠를 포함하는 TSDA 요소로 형상화하였다.

$$\begin{aligned}
 0.010 &\leq x_1 \leq 0.030 \\
 0.010 &\leq x_2 \leq 0.030 \\
 0.020 &\leq x_3 \leq 0.035 \\
 0.030 &\leq x_4 \leq 0.040 \\
 0.030 &\leq x_5 \leq 0.040 \\
 0.030 &\leq x_6 \leq 0.045 \\
 0.035 &\leq x_7 \leq 0.050 \\
 0.045 &\leq x_8 \leq 0.055 \\
 0.040 &\leq x_9 \leq 0.060
 \end{aligned}$$

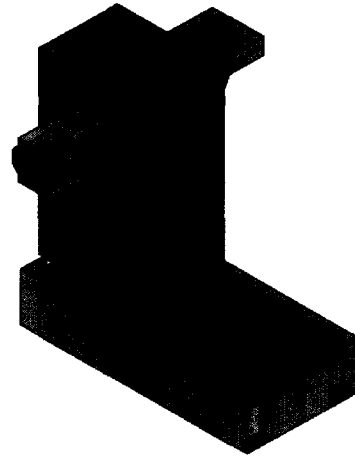


Fig. 5 Static Analysis Model with 3 type Element

정의된 9개의 설계변수 $x_i(i=1,2,\dots,9)$ 를 표현하는데 12개의 비트를 사용하였고, 모집단의 크기를 300으로 설정하였다. 따라서 108비트를 가지는 설계변수 벡터 300개가 난수발생기를 통해 생성된다. 여기서 비트수와 모집단의 크기는 주어진 설계변수 범위에서의 최소 변화량과 설계공간의 범위를 나타낸다. 파레토 GA를 이용한 제 1단계 최적화에 따라서 161세대 동안 최적화를 행한 결과 Table 1에서 볼 수 있듯이 정 킴플라이언스 f_s 는 0.381×10^{-7} m/N, 최적화 된 중량 W_T 은 8277.65 kg 이었다. 또한 과정 중의 전체중량 및 정 킴플라이언스의 관계를 Fig. 6에서 볼 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 기계구조물의 최적설계를 얻기 위하여 정특성 및 동특성을 단계별로 구해서 최적화하는 다단계 최적설계법을 제안하고 공작기계구조물에 적용하여 방법론의 유용성을 증명했다. 제 1 단계의 정적 최적화 단계에서 다목적함수의 최적화를 이용한 정특성 해석을 행하고, 제 1 설계변수군의 최적값을 구할 수 있었다.

고정밀도를 유지하면서, 고속이송을 실현하는데 있어서 중량 감소는 가장 먼저 요구되는 특성 중의 하나라고 할 수 있으며, 본 연구에서는 파레

토 GA를 적용하여 국소 최적화를 피하면서 정کم플라이언스 및 중량을 동시에 최적화 할 수 있었으며, 서로의 관계를 규명할 수 있었다.

제 1 설계변수군의 최적화로 구현된 제 1단계의 정특성에 따라서 제 2단계의 동특성 해석 및 제 3단계의 열해석을 순차적으로 진행하면, 리셉턴스, 열변형의 최소화를 목적으로 하는 다단계적인 최적화 특성을 구할 수 있을 것으로 사료된다.

Table 1 Optimized Results in Static Optimization Step

		Before Optimization	After Optimization
Compliance(m/N)		0.317×10^{-7}	0.381×10^{-7}
Weight (kg)	Total	9551.80	8277.65
	Base	4540.07	4037.18
	Column	3174.61	2690.10
	Cradle	707.44	620.61
	Quill	564.71	364.80
	Spindle	564.96	←

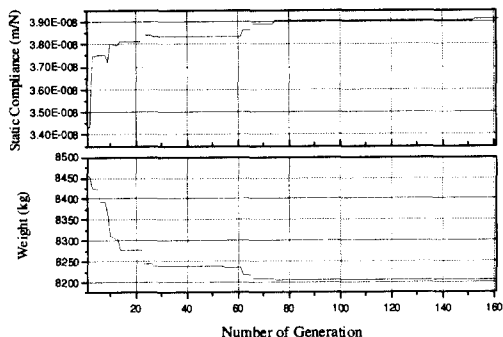


Fig. 6 Weight and Static Compliance Relationship

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-to-ol Dynamics Based on an Explanation of Relations-hips between Characteristics (1st Report)," JSPE. Vo l. 53, No. 4, pp. 601-606, 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.
6. 이영우, "유전자 알고리즘을 이용한 공작기계 구조물의 다단계 및 다목적 최적화에 관한 연구," 창원대학교 박사학위논문, 2001.
7. 朴錫柱, 石井哲, 本多滋樹, 長松昭男, "プレス機械の振動の解析と最適設計," 日本機械學會論文集 (C編), 56卷, 524号, 1990.
8. A. Nagamatsu, Park Sok-Chu, "Vibration analysis and structural optimization of a press machine," Finite Elements in Analysis and Design. Vol. 14, pp. 297-310, 1993.
9. 박종권, 성활경, "유전자 알고리즘을 이용한 공작기계구조물의 정역학적 최적설계," 한국정밀공학회, Vol. 14, No. 2, pp. 66-73, 1997.