

다두 Router Machine 구조물의 경량·고강성화 최적설계

최영휴*(창원대 메카트로닉스공학부), 장성현(창원대 대학원 기계설계공학과),
하종식(한국정밀기계㈜), 조용주(한국정밀기계㈜)

Structural Analysis and Dynamic Design Optimization of a High Speed Multi-head Router Machine

Y. H. Choi*(Changwon Univ.), S. H. Jang(Changwon Univ.),
J. S. Ha(HNK Machine Tool Co., Ltd) Y. J. Cho(HNK Machine Tool Co., Ltd)

ABSTRACT

In this paper, a multi-step optimization using a G.A. (Genetic Algorithm) with variable penalty function is introduced to the structural design optimization of a 5-head route machine. Our design procedure consist of two design optimization stage. The first stage of the design optimization is static design optimization. The following stage is dynamic design optimization stage. In the static optimization stage, the static compliance and weight of the structure are minimized simultaneously under some dimensional constraints and deflection limits. On the other hand, the dynamic compliance and the weight of the machine structure are minimized simultaneously in the dynamic design optimization stage. As the results, dynamic compliance of the 5-head router machine was decreased by about 37% and the weight of the structure was decreased by 4.48% respectively compared with the simplified structure model.

Key Words : Multi-head router machine (다두 라우터 머신), Optimization (최적설계), Genetic algorithm (유전알고리즘), Compliance response function (컴플라이언스 응답함수), Static compliance (정적 컴플라이언스), Dynamic compliance (동적 컴플라이언스)

1. 서론

최근 항공기 기체 구조 부품의 제조방식은 종래의 판금 단품 소조립 방식에서 제조원가를 획기적으로 줄일 수 있는 일체형 기계가공 부품(1 piece machined part) 형태로 전환되고 있다. 뿐만 아니라 생산성을 향상시키기 위하여 한 기계에서 여러 개의 부품을 동시에 가공하는 방식을 도입하고 있다. 이처럼 기체 부품을 대형, 일체형 동시 다량 기계가공으로 제조하기 위해서는 고성능의 다두 라우터 머신(Multi-head router machine) 개발이 필수적이다.

고정밀·고생산성을 가진 다두 라우터 머신을 개발하기 위해서는 구조물의 정강성과 동강성을 높이고 구조물의 중량을 줄여야 하는데, 이는 구조설계의 관점에서 보면 서로 상충되는 설계 목표이므로 소위 절충설계(Trade-off design or pareto design) 과정을 거쳐 적합한 설계를 찾아야만 한다. 본 연구에서는 가변벌점함수 유전알고리즘을 이용하여 5두 라우

터 머신(5-head router machine) 구조물의 경량·고강성화 최적설계를 수행한 결과를 소개 한다. 이미 1차년도 연구에서 다두 라우터 머신의 크로스 빔(Cross beam)을 중심으로 헤드를 집중질량으로 모델링 한 단순 구조모델(Simplified structure model)을 사용하여 최적 설계한 사례를 발표하였는데, 본 논문에서는 헤드와 크로스 빔, 그리고 업-라이트(Upright) 구조부분을 모두 포함한 전체 구조모델(Full structure model)을 사용하여 최적설계를 수행하였다.

단순 구조모델을 사용한 최적화는 핵심 구조물 부분품인 크로스 빔의 단면형상 및 치수 최적화에 중점을 두었기 때문에 크로스 빔을 제외한 헤드와 램, 업라이트 등의 구조물은 집중질량으로 간주하였다. 그러나 전체 구조모델은 크로스 빔 뿐만아니라 헤드, 램, 새들, 업라이트를 포함하는 구조물로서 셀 요소로 모델링하고 치수최적화 하는데 포함시켰다.

2. 구조물의 성능평가 함수

2.1 구조물 중량

m 개의 쉘 요소(Shell element)로 FEM 모델링된 구조물의 i -번째 요소가 Fig. 1과 같이 일정한 단면 형상을 가지고, 그 단면적이 S_i , 두께가 t_i , 밀도가 ρ_i 라면 구조물의 총 중량은 다음과 같이 된다.

$$W = \sum_{i=1}^m \rho_i S_i t_i \quad (1)$$

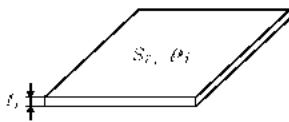


Fig. 1 Shell element

2.2 동적 컴플라이언스

설계문제의 목적함수를 정의하기에 앞서 먼저 유한요소법으로 모델링된 n 자유도계 구조진동계의 운동방정식은 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$[M]\{\ddot{X}\} + ([K] + j[H])\{X\} = \{F\} \quad (2)$$

여기서, $[M]$, $[K]$, $[H]$ 는 각각 질량행렬, 강성행렬, 구조감쇠행렬이며, $\{X\}$, $\{F\}$ 는 각각 자유도벡터와 외력벡터이다. k -점에만 조화가진력이 작용하는 경우, j -점에서의 컴플라이언스 또는 리셉턴스 응답함수의 성분, $|R_{jk}(\omega)|$ 은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} |R_{jk}(\omega)| &= \left| \frac{X_j}{F_k}(\omega) \right| \quad (3) \\ &= \left| \sum_{r=1}^n \frac{r\phi_{jr}\phi_k}{m_r(\omega_r^2 - \omega^2 + i\eta_r\omega_r^2)} \right| \\ &= \left| \sum_{r=1}^n \frac{r\phi_{jr}\phi_k}{k_r \left\{ 1 - \left(\frac{\omega}{\omega_r} \right)^2 + i\eta_r \right\}} \right| \end{aligned}$$

여기서, ω_r 는 r -번째 고유진동수, $r\phi_j$ 는 r -번째 모달벡터(Modal vector)의 j -번째 요소이고, m_r 과 k_r 은 각각 모달질량과 모달강성, 그리고 η_r 는 r -번째 모드의 손실계수이다.

위 식 (2)의 $R_{jk}(\omega)$ 을 동적 컴플라이언스라 하며, 강성의 역수에 해당된다. $\omega = \omega_r$ 인 공진영역에서는 다른 주파수 성분의 컴플라이언스는 상대적으로 미

미하므로 $R_{jk}(\omega)$ 의 r 차 공진응답 또는 피크응답의 크기는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$R_p(r) = |R_{jk}(\omega_r)| \approx \left| \frac{-i_r\phi_{jr}\phi_k}{k_r\eta_r} \right| \quad (4)$$

2.3 정적 컴플라이언스

식(2)에서 $\omega=0$ 인 경우를 정적 컴플라이언스, R_{jk}^s 라고 하며 다음과 같이 된다.

$$|R_{jk}^s| = \left| \frac{X_j}{F_k}(\omega=0) \right| = \left| \sum_{r=1}^n \frac{r\phi_{jr}\phi_k}{k_r(1+i\eta_r)} \right| \quad (5)$$

2.4 다목적함수의 단일목적함수 변환

본 연구의 구조설계 최적화 문제는 중량을 최소화시키면서 반대로 정적 및 동적 구조강성 등을 최대화시키는 문제이다. 구조강성의 역수인 컴플라이언스를 도입함으로써 본 설계문제는 모든 성능함수를 최소화시키는 문제로 단순화시킬 수 있다. 또한 가중치 방법을 사용하여 다목적함수 최소화 문제를 다음 식과 같이 단일목적함수 최적화문제로 변환할 수 있다.

$$\text{Find : } \mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n)^T \quad (6-1)$$

$$\text{Minimize : } f(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^p w_i \frac{f_i(\mathbf{x})}{f_i^*} \quad (6-2)$$

$$\text{Subject to : } g_j(\mathbf{x}) \leq 0, j=1, 2, \dots, q \quad (6-3)$$

여기서, w_i 는 가중치이고, 모든 가중치의 합은 $\sum_{i=1}^p w_i = 1$ 이 된다. f_i^* 는 i -번째 목적함수에 대한 스케일링 인자이다.

본 연구에서는 식 (6-2)에서 $p=5$ 인 5개의 목적함수를 두어 최적해를 구하였으며, 각각의 목적함수는 다음과 같이 될 수 있다.

$$1) \text{ 구조물의 전체 중량, } f_1(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^m \rho_i S_i t_i$$

$$2) \text{ 정적 컴플라이언스, } f_2(\mathbf{x}) = \left| \frac{X}{F} \right|_{\text{static}}$$

$$3) \text{ 최대의 피크값을 가지는 동적 컴플라이언스,}$$

$$f_3(\mathbf{x}) = \left| \frac{X}{F}(\omega) \right|_{\text{dym.max}}$$

$$4) \text{ 동적 피크 컴플라이언스의 합,}$$

$$f_4(\mathbf{x}) = \sum \left| \frac{X}{F}(\omega) \right|_{\text{dym.peak}}$$

5) 동적 컴플라이언스 함수의 전체 면적,

$$f_5(\mathbf{x}) = \int \left| \frac{X}{F}(w) \right|_{dyn} dw$$

또한, 식 (6-3)은 구속함수를 표현하는 항으로써, 구조물에 있어서 가공정도에 영향을 미치는 최대치짐, 구조안전율과 관계있는 허용응력, 구조물의 기하학적인 요소로써 치수나 형상과 같은 제한조건들을 들 수가 있다.

3. 가변 벌점함수 유전알고리즘

3.1 가변 벌점함수

본 연구에서는 기존의 정적 벌점함수와 달리 구속조건 위반 회수와 위반 수준을 모두 고려하는 다음 식과 같은 가변 벌점함수를 도입한다.

$$p(\mathbf{x}) = \epsilon \cdot \left[c_1 \times \sum_{i=0}^n \left(\frac{g_i(\mathbf{x})}{g^*} \right)^2 + c_2 \times \delta \frac{1}{\Phi^*} \sum_{i=1}^n \Phi_i(\mathbf{x}) \right] \quad (7)$$

위의 식 (7)에서 Φ_i 는 i -번째 구속조건에 대한 벌점이다. 즉, 몇 개의 구속함수가 구속조건을 초과하는지를 나타내는 값이며, $g_i(\mathbf{x})$ 는 각 구속조건이 얼마나 기준을 초과하는지를 나타내는 양이며, ϵ 은 최대화와 최소화를 구분하는 1과 -1을 나타내는 지시값이다. 그리고 c_1 과 c_2 는 벌점함수에서 첫 번째 항과 두 번째 항의 비중을 나타내는 가중치 값이며, g^* 와 Φ^* 는 각 항목들의 전체 벌점함수에 대한 민감도를 조정하기 위한 스케일인자이다.

3.2 적합도 평가 및 탐색조건

개체의 적합도를 평가하기 위하여 아래의 식 (8)과 같이, 각 세대별로 개체 집단에 대하여 목적함수 f 는 내림차순(descending order)으로 구속조건 위반 정도 p 는 오름차순(ascending order)으로 순위를 매겨 그것을 합한 값으로 적합도를 정의하였다.

$$Fitness = \frac{1}{f(\mathbf{x}) + p(\mathbf{x})} \quad (8)$$

유전알고리즘의 유전자 조작 및 최적개체 탐색 조건은 Table 1과 같이 정하였다. 탐색 파라미터의 선택방법은 룰렛 휠(Roulette wheel)을 사용했고, 교배는 2점 교배 연산자를 사용했다.

Table 1 Parameters for the genetic algorithm

Population size	No. of Generation	Chromosome length	Crossover		Mutation probability
			Probability	Operator	
50	100	30x13	0.8	2-point	0.01%

3.4 최적화 프로그램

설계변수의 전역 최적값을 탐색하기 위하여 Fig. 2와 같이 유전 알고리즘을 이용한 최적값 탐색 프로그램의 흐름도를 작성하였다. 개체집단에 대한 이송체 중량과 전체 구조물 중량 및 절대 컴플라이언스 계산은 상용 FEM 패키지인 ANSYS (Rev. 5.6)를 사용하였다.

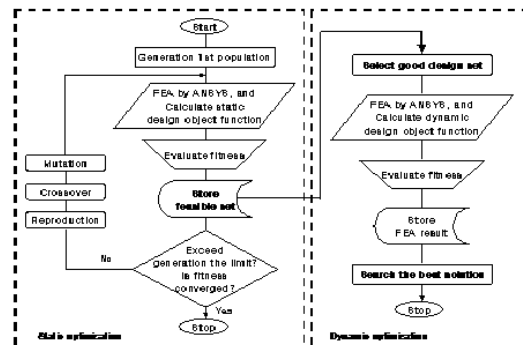


Fig. 2 Flowchart of the static and dynamic optimization

4. 구조물 최적설계

본 연구의 구조물 최적설계 과정은 구조물의 헤드와 크로스 빔의 부재에 대한 치수를 최적설계 대상으로 두어, 제 1단계와 제 2단계의 결친 전체 구조모델(Full structure model)의 정적설계 및 동적설계 단계를 수행하였다.

4.1 FEM 모델링

Fig. 3은 1차년도 연구내용인 5두 라우터 머신(5-head router machine) 구조물의 경량·고강성화를 위하여 크로스 빔(Cross beam)의 부재 단면형상 최적설계를 거쳐 정·동적 최적설계가 된 단순 구조모델(Simplified structure model)의 FEM 모델링이다. Fig. 4는 본 논문의 주요 연구내용이 되는 헤드와 크로스 빔, 그리고 업-라이트(Upright) 구조부분을 모두 포함한 전체 구조모델(Full structure model)의 FEM 모델링이다.

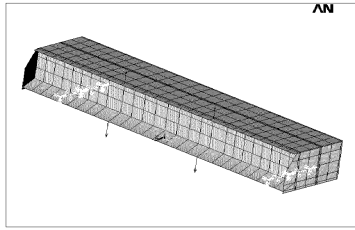


Fig. 3 Simplified model of a router machine

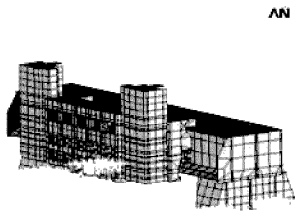


Fig. 4 Full model of a router machine

4.2 제 1단계: 정적설계 최적화

정적설계 최적화 단계의 문제정의는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\text{Find: } \mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_{14}, y_1, y_2, \dots, y_7) \quad (9-1)$$

$$\text{Minimize: } f(\mathbf{x}) = w_1 \frac{f_1(\mathbf{x})}{f_1^*} + w_2 \frac{f_2(\mathbf{x})}{f_2^*} \quad (9-2)$$

$$\text{Subject to: } f_1 \leq 0.05 \text{ } \mu\text{m}/N \quad (9-3)$$

$$f_2 \leq 43052 \text{ kg}$$

$$\text{safety factor} \geq 10$$

정적설계 최적화 단계에서는 전체 구조물의 중량(f_1)과 구조물의 정적 절대 컴플라이언스(f_2)를 최소화시키는 것을 목적으로 한다.

식 (9-1)에서 $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_{14}, y_1, y_2, \dots, y_7)$ 는 설계변수로써 크로스 빔의 단면 부재들의 두께 (x_1, x_2, \dots, x_{14})와 헤드의 단면 부재들의 두께 (y_1, y_2, \dots, y_7)이다. 즉, 다두 라우터 머신의 설계 변수는 구조물의 총 무게와 구조강성에 관련된 변수로서 Fig. 5와 같이 크로스 빔의 $x_1 \sim x_{14}$ 까지 모두 14개의 부재의 두께로 설정하였고, Fig. 6에서와 같이 헤드의 $y_1 \sim y_7$ 까지 7개의 부재 두께로 파라미터가 설정되어있다. 그리고 위의 식에 쓰인 목적함

수에 대한 구속조건은 공구, 모터, 칩을 제외한 다두 라우터 머신 구조물의 총 중량이 43052 kg 이하에 존재하도록 설정하였고, 구조물 자체의 중량에 유한요소 해석 시, 각 슬라이드를 연결시켜주는 부분(LM-guide 등)의 중량이 포함되었다. 또한 정적 절대 컴플라이언스가 0.05 [$\mu\text{m}/N$]보다 작도록 설정하였으며 안전율이 최소 10보다 크게 설정하였다. w_1, w_2 는 총합이 1인 가중치이고, $w_1 = 0.5, w_2 = 0.5$ 로 두었다. f_1^*, f_2^* 는 스케일 인자이다.

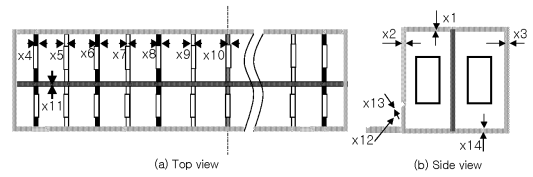


Fig. 5 Design variables of a cross beam

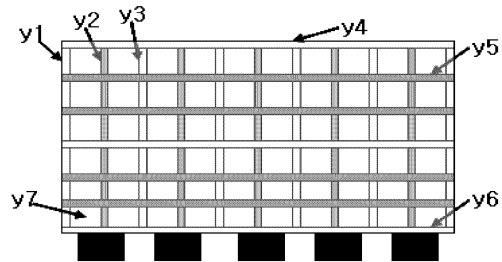


Fig. 6 Design variables of a head (Front view)

크로스 빔과 헤드의 설계 구속조건 중에서 형상 치수 제한조건(Dimension constraints)은 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Dimensional constraints (Unit : mm)

Design variable parameter of cross-rail					
1	$10 \leq x_1 \leq 15$	8	$10 \leq x_8 \leq 15$	15	$10 \leq y_1 \leq 10$
2	$10 \leq x_2 \leq 15$	9	$10 \leq x_9 \leq 15$	16	$10 \leq y_2 \leq 10$
3	$10 \leq x_3 \leq 15$	10	$10 \leq x_{10} \leq 15$	17	$10 \leq y_3 \leq 10$
4	$10 \leq x_4 \leq 15$	11	$10 \leq x_{11} \leq 15$	18	$10 \leq y_4 \leq 10$
5	$10 \leq x_5 \leq 15$	12	$10 \leq x_{12} \leq 15$	19	$10 \leq y_5 \leq 10$
6	$10 \leq x_6 \leq 15$	13	$10 \leq x_{13} \leq 15$	20	$10 \leq y_6 \leq 10$
7	$10 \leq x_7 \leq 15$	14	$10 \leq x_{14} \leq 15$	21	$10 \leq y_7 \leq 10$

4.3 제 2 단계: 동적설계 최적화

동적설계 최적화 단계는 정적설계 구속조건을 만족하는 적합해 집단(Feasible solution set)중에서 동적 컴플라이언스와 구조중량을 최소화시키는 최

적해를 구하는 과정이며, 설계문제는 다음과 같이 정의한다.

$$\text{Find: } \mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_{14}, y_1, y_2, \dots, y_7) \quad (10-1)$$

$$\text{Minimize: } f(\mathbf{x}) = w_1 \frac{f_1(\mathbf{x})}{f_1^*} + w_2 \frac{f_2(\mathbf{x})}{f_2^*} + w_{d1} \frac{f_{d1}(\mathbf{x})}{f_{d1}^*} \\ + w_{d2} \frac{f_{d2}(\mathbf{x})}{f_{d2}^*} + w_{d3} \frac{f_{d3}(\mathbf{x})}{f_{d3}^*} \quad (10-2)$$

Subject to: The same constraints as the static optimization step

여기서, $f_1(\mathbf{x})$ 는 다두 라우터 머신의 중량을 포함하는 목적함수이고 $f_2(\mathbf{x})$ 은 정적 절대 컴플라이언스를 최소화하는 목적함수, $f_{d1}(\mathbf{x})$ 는 동적 절대 컴플라이언스 중에서 최대 피크값을 최소화하는 목적함수, $f_{d2}(\mathbf{x})$ 는 동적 절대 컴플라이언스들의 합을 최소화하는 목적함수, $f_{d3}(\mathbf{x})$ 는 동적 절대 컴플라이언스 함수의 총면적을 최소화하는 목적함수이다. $f_1^*, f_2^*, f_{d1}^*, f_{d2}^*, f_{d3}^*$ 는 각 목적함수에 대한 스케일 인자이며 $w_1, w_2, w_{d1}, w_{d2}, w_{d3}$ 는 총합이 1인 가중치이다.

또한 정적 최적설계 단계에서 좋은 해의 집단을 위한 필터링 조건은 다음과 같다.

$$\text{Weight} \leq 43052 \text{ kg}$$

$$\text{Dynamic compliance} \leq 0.03 \mu\text{m}/\text{N}$$

5. 최적설계 결과 및 검토

앞서 기술한 정적 및 동적 최적화 과정을 수행한 최종적인 모델인 전체 구조모델(Full structure model)을 단순 구조모델(Simplified structure model)과 비교하여 정리하면 다음과 같다.

5.1 설계변수 비교

Table 3에 최적설계 이전 모델인 단순 구조모델과 최적설계 이후인 완전한 구조모델의 설계변수를 비교하여 나타내었다.

Table 3 Comparison of optimized design variables

Design parameter	Value (mm)		Design parameter	Value (mm)	
	Full structure model	Simplified structure model		Full structure model	Simplified structure model
x_1	26	25	y_1	32	30
x_2	26	30	y_2	21	21
x_3	24	25	y_3	16	16
x_4	20	20	y_4	24	25
x_6	15	15	y_6	15	15
x_6	17	20	y_6	38	35
x_7	20	20	y_7	30	25
x_8	17	20			
x_9	23	25			
x_{10}	25	25			
x_{11}	15	20			
x_{12}	21	-			
x_{13}	17	20			
x_{14}	18	20			

5.2 중량 비교

1차년도 연구 결과인 단순 구조모델과 최적설계 이후의 전체 구조모델의 전체 구조물 중량 비교를 Table 4에 나타내었다. Table 4에서 보면, 최적설계를 수행하고 난 후의 전체 중량이 단순 구조모델에 비해 약 4.48% (1944.7 kg)정도 감소하였다.

Table 4 Comparison of the optimized machine weights

	Weight [kg]
Simplified structure model	43456.2
Full structure model	41511.5

5.3 컴플라이언스 비교

단순 구조모델과 전체 구조모델에 대하여 다두 라우터 머신 헤드의 중앙 스피드를 절삭점에서의 정-동적 절대 컴플라이언스 비교 결과를 Table 5에 나타내었다.

Table 5 Comparison of compliances

	Static compliance [$\mu\text{m}/\text{N}$]	Dynamic compliance [$\mu\text{m}/\text{N}$]
Simplified structure model	0.00131	0.04330
Full structure model	0.00171	0.02728

Table 6에서 보듯이 정적 컴플라이언스(iso방향)는 단순 구조모델에 비하여 약 30.53% 증가하였지

만, 동적 컴플라이언스는 37.00% 정도 감소하였다. 최종 선정모델인 전체 구조모델은 이전 모델에 비하여 전반적으로 중량이 줄고 동적 컴플라이언스가 감소했기 때문에 구조물의 성능이 향상되었음을 확인할 수 있다.

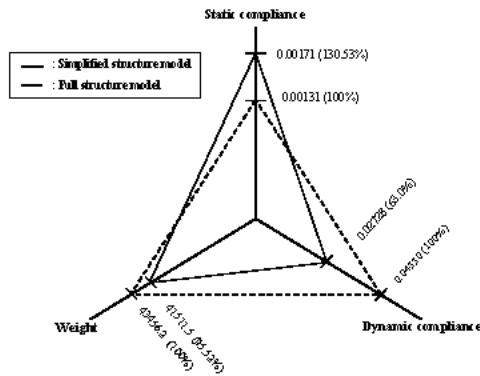


Fig. 9 Comparison of objectives

6. 결론

본 연구에서는 다투 라우터 머신의 구조물 설계를 최적화하기 위해 가변 벌점함수 유전 알고리즘과 결합된 다단계 최적설계 기법을 적용하였다. 구조강성 극대화와 중량 최소화라는 상반된 성질의 목적함수를 최적화하기 위하여 강성의 역수 개념인 컴플라이언스를 도입하여 목적함수를 최소화시키는 문제로 만들었으며, 가중치방법(Weighted method)을 이용하여 다목적 함수를 단일 목적함수로 변환시켰다. 다투 라우터 머신에 대한 이전 연구모델에 대하여 정·동적 최적화 단계를 거치는 다단계 최적설계 방법을 적용시킴으로써, 중량은 약 4.48% 감소되고 동적 컴플라이언스는 약 37.00% 정도가 향상된 최종 모델인 전체 구조모델(Full structure model)을 설계하였다.

정적 컴플라이언스의 경우 단순 구조모델보다 전체 구조모델의 값이 다소 증가 되었지만 대형공작기계에 대한 정적 컴플라이언스 기준이 0.05 [$\mu\text{m}/\text{N}$] 정도이고, 항공기 기체 가공용 공작기계의 정적 컴플라이언스가 대개 0.02 [$\mu\text{m}/\text{N}$]이다. 본 연구의 설계 제한조건도 0.05 [$\mu\text{m}/\text{N}$]로 설정되어 있으며 최적화 이후 정적 컴플라이언스가 0.02 [$\mu\text{m}/\text{N}$]보다 작으므로 충분한 설계값으로 볼 수 있다.

후기

본 연구는 산업자원부의 중기거점과제 일환으로 한국정밀기계(주)의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Y. S. Ryu, O. G. Leem, K. J. Park, 1994, "The Introduction of Genetic Algorithm," Bando Pub. Co.
2. Z. Michalewicz, 1995, "Genetic algorithms, numerical optimization, and constraints," Proceedings of the Sixth International Conference on Genetic Algorithms, Morgan Kaufman, San Mateo, pp. 151-158.
3. F. Y. Cheng, DAN Li, 1997, "Multi-objective Optimization Design with Pareto Genetic Algorithm," J. of Structural Eng. Vol.123, No. 9, pp.1252-1261.
4. M. Yoshimura, 1987, "Design Optimization of Machine Tool Dynamics Based on an Explanation of Relationships between Characteristics," JSPE, Vol.53, No. 4, pp.601-606.
5. M. Weck, 1992, "Computer-Aided Optimization and Metrological Recording of the Stiffness Behavior of Machine Tools," Proc. of 5th IMEC, pp.1 ~ 4.
6. J. K. Park, 1996 "A Study about Topology Optimization Design for Machining Center Using Genetic Algorithm," Ph. D. Dissertation, Changwon Univ.
7. In-Ung Eun, 2000, "Development of Static and Dynamic Behavior of Machine Tools in the Period from 1980 ~ 1999," Changwon Univ. Seminar Handout.
8. Swanson Analysis, 1996, "ANSYS User's Manual," Revision 5.5.
9. David E. Goldberg. 1989, "Genetic Algorithm in Search, Optimization, and Machine Learning," Addison-Wesley Publishing Company.
10. W. H. Tong and G. R. WH, 2000, "An Optimization Procedure for Truss Structures with Discrete Design Variables and Dynamic Constraints," Computer & Structure, pp.155-162.
11. K. Deb and A. Kumar, "Real-coded Genetic Algorithms with Simulated Binary Crossover: Studies on Multi-modal and Multi-objective Problems," Complex Systems 9 (6) 431-454, 1995.