

금형가공센터 고속 이송체의 최적설계

최영휴*(창원대 기계설계공학과), 박선균**, 배병태**(창원대 대학원 기계설계공학과),
이재윤***, 김태형***, 박보선***(대우종합기계(주))

Structural Design Optimization of a High Speed Machining Center Using a Simple Genetic Algorithm

Y. H. Choi(Dep. of Mech. Design & Manufacturing, CNU), S. K. Park, B. T. Bae(Grad. Students, CNU),
J. Y. Lee, T. H. Kim, and B. S. Park(DAEWOO H. I. & M. Ltd.)

ABSTRACT

In this study, a multi-step optimization technique combined with a simple genetic algorithm is introduced to the structural design optimization of a high speed machining center. In this case, the design problem is to find out the best design variables which minimize the static compliance, the dynamic compliance, and the weight of the machine structure and meet some design constraints simultaneously. Dimensional thicknesses of the thirteen structural members along the static force loop of the machine structure are adopted as design variables. The first optimization step is a static design optimization, in which the static compliance and the weight are minimized under some dimensional and safety constraints. The second step is a dynamic design optimization, where the dynamic compliance and the weight are minimized under the same constraints. After optimization, the weight of the moving body was reduced to 9.1% of the initial design respectively. Both static and dynamic compliances of the optimum design are also in the feasible range even though they were slightly increased than before.

Key Words : Static compliance (정적 킴플라이언스), Dynamic compliance (동적 킴플라이언스), Finite element method (유한요소법), Genetic algorithm (유전알고리즘), Optimum design (최적설계)

1. 서론

산업이 발전함에 따라 산업현장에서는 생산성과 품질을 향상시키기위해 고속, 고정밀의 공작기계가 요구되고 있고, 이에 발 맞추어 금형가공센터 또한 고속·고정밀화 되는 추세이다. 그러나 공작기계가 고속·고정밀화 되기 위해서는 구조물의 정강성과 동강성을 높이고 중량은 줄여야 하는데, 이는 구조설계의 관점에서 보면 서로 상충되는 설계 목표이므로 매우 어렵고 복잡한 설계과정을 거쳐야 가능하다. 이에 따라 효율적이고 경제적인 공작기계 구조 최적설계방법에 대한 많은 연구가 이루어졌다[1~3]. 또한 공작기계 구조설계 분야에서는 Yoshimura[4] 등이 생산공정과 재료 선정까지 고려

한 다단계 최적설계 방법을, Weck[5]이 컴퓨터를 이용한 최적화와 강성거동 연구를 하였고, Park[6]은 유전알고리즘을 공작기계 구조 토폴로지 설계 최적화에 적용하였다. 본 연구에서는 금형가공센터 구조물을 고강성 경량 구조로 최적설계하기 위하여 유전알고리즘과 결합된 다목적 다단계 최적설계 방법을 제안한다.

2. 최적설계 방법

본 연구에서 다루고자 하는 최적설계 문제는 고속 이송이 가능하도록 하기 위하여 구조물 중량을 최소화시키면서 진동과 변형은 최소화 되도록 구조강성을 극대화시키는 것이다. 즉, 구조 중량과 구조 강

성이라는 두 가지 종류의 목적함수를 갖는 다목적함수 최적화 문제이다. 본 연구에서는 강성의 역수 개념인 컴플라이언스(compliance)를 도입하여 두 개의 목적함수가 가중된(weighted) 단일 목적함수 최적화 문제로 변환시킨다. 최적화 알고리즘은 최근 광범위하게 활용되고 있는 유전알고리즘을 이용한다. 특히 유전알고리즘은 목적함수와 구속조건의 형태나 개수, 비선형성, 불연속성 등에 크게 제약받지 않고 적용 가능한 이점 등이 있으므로 본 설계문제에 적용하기에 유리한 점이 있다.

일반적 구조설계에서는 정적설계 후에 동적설계를 최적화시키게 되는데, 이는 동적설계와 정적설계를 사실상 별개의 과정으로 수행하는 경우가 많기 때문에 정적설계와 동적설계 성능을 모두 충족시키는 최적설계를 찾는 데에 많은 시간이 소요된다. 따라서 본 연구에서는 정적설계 최적화 과정에서 적합도(fitness)가 높은 "좋은 설계개체 군(feasible good solution group)"을 선별하고, 그 선별된 개체군에 대하여 동적설계 최적화를 순차적으로 수행하여 컴플라이언스를 낮추는 다단계 최적설계 방법을 제안한다.

2.1 설계변수의 설정

다음 Fig.1은 고속 금형가공센터의 초기 설계모델로서, 강으로 이루어진 이송체(x-, y-, z-slides)와 Resin Concrete로 이루어진 Base부분으로 나눌 수 있다.

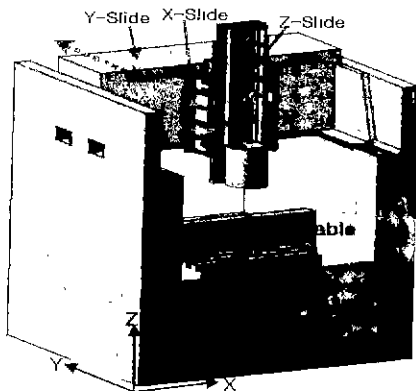


Fig. 1 Schematic drawing of the machining center.

본 연구에서는 이송체의 고속화 설계를 목표로 하므로 Fig. 2에 보는 바와 같이 X-slide, Y-slide 그리고 Z-slide로 이루어진 이송체 부분만 선택하여 최적설계를 수행하였다.

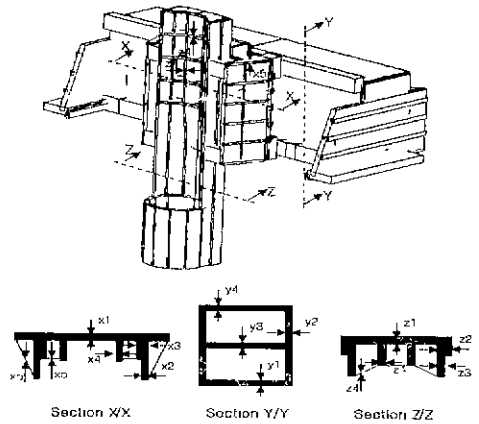


Fig. 2 Design variables of the machining center.

이송체 구조물의 설계변수(design parameter)로는 Fig.2의 각각의 슬라이드 단면형상에 보인 바와 같이 X-slide 부재단면의 두께인 x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 , Y-slide 부재단면의 두께인 y_1, y_2, y_3, y_4 그리고 Z-slide 부재단면의 두께인 z_1, z_2, z_3, z_4 로 설정하였다.

2.2 정적설계 최적화단계

정적설계 최적화단계에서는 공구대 절삭점의 정적 절대 컴플라이언스, f_1 과 Z-slide의 중량, f_2 , Z-slide와 X-slide 중량의 합계, f_3 . 그리고 Z-, X-, 및 Y-slide 중량의 총합계, f_4 를 동시에 최소화함으로써 각각의 slide 중량과 전체 이송체 중량을 모두 최소화한다. 본 연구에서는 이러한 4가지의 목적함수에 가중치를 곱하여 가중된 단일 목적함수로 변환시킴으로써 다음과 같이 단일 목적함수 최적설계 문제로 정식화하였다.

Find $X(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, y_1, y_2, y_3, y_4, z_1, z_2, z_3, z_4)$
to minimize:

$$f = W_1 \frac{f_1}{f_1^*} + W_2 \frac{f_2}{f_2^*} + W_3 \frac{f_3}{f_3^*} + W_4 \frac{f_4}{f_4^*} \quad (1)$$

Subject to: $0.016(\mu m/N) \leq f_1 \leq 0.056(\mu m/N)$

$$180(kg) \leq f_2 \leq 280(kg)$$

$$350(kg) \leq f_3 \leq 497(kg)$$

$$800(kg) \leq f_4 \leq 1127(kg)$$

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

and dimensional constraints.

여기서, $X(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, y_1, y_2, y_3, y_4, z_1, z_2, z_3, z_4)$ 는 설계변수이고, W_1, W_2, W_3, W_4 는 총합이 1인 가중치이며, f_1, f_2, f_3, f_4 는 스케일 인자(scale factor)이다.

구속조건으로는 각 슬라이드 구조물 중량(f_2, f_3, f_4)의 탐색영역을 제한하였고, 정적 컴플라이언스(f_1)의 탐색영역도 참고문헌[7]에 따라 $0.016\mu\text{m/N} \sim 0.056\mu\text{m/N}$ 으로 제한하였다. 안전을 제한조건으로서 질삭력과 이송체의 관성력 및 자중, 그리고 리니어 모터(linear motor)에 의한 자력(magnetic force)이 모두 작용되는 조건에서 해석된 응력을 기준으로 안전계수가 10보다 커야 된다. 설계변수들의 치수 제한 조건은 설치공간, 가공 및 조립작업 공간, 부재간의 간섭회피 조건 등을 고려하여 다음의 Table 1과 같이 설정하였다.

Table 1. Dimensional Constraints(unit: mm)

slide no.	X-slide Parameter	Y-slide Parameter	Z-side Parameter
1	$20 \leq x_1 \leq 30$	$15 \leq y_1 \leq 24$	$20 \leq z_1 \leq 40$
2	$10 \leq x_2 \leq 30$	$10 \leq y_2 \leq 18$	$28 \leq z_2 \leq 52$
3	$10 \leq x_3 \leq 40$	$12 \leq y_3 \leq 24$	$10 \leq z_3 \leq 20$
4	$10 \leq x_4 \leq 20$	$12 \leq y_4 \leq 24$	$5 \leq z_4 \leq 20$
5	$5 \leq x_5 \leq 15$		

2.3 동적설계 최적화단계

일반적으로 공작기계 구조물 등과 같은 복잡한 형상의 대형 구조물을 유한요소 모델링하면 비교적 요소(element) 분할 수가 많아지게 되어 구조해석 시간이 많이 소요된다. 특히 동적해석이나 반복계산이 수반되는 최적화 문제에서는 최적해를 탐색하기까지 장시간이 소요된다.

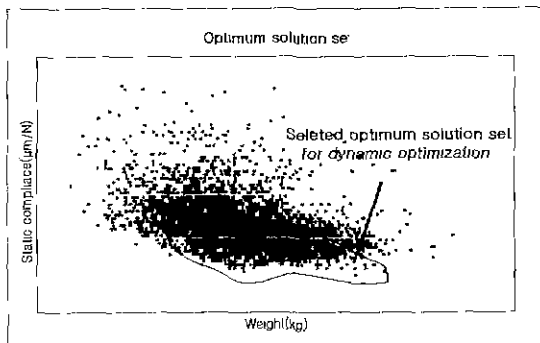


Fig. 3 Optimum solution set on the static optimization

따라서 본 연구에서는 앞의 Fig. 3과 같이 정적 최적설계 단계에서 구한 성능함수의 집단 중에서 적합도가 상대적으로 높은 개체군을 선택하고, 그 개체들에 대해서 동적성능 함수를 구하여 가장 적합도가 높은 개체를 선택함으로써 동적설계 최적화단계에서의 최적해를 구하였다.

동적 최적설계 단계에서는 운전속도 영역(환산된 주파수 대역)에 걸친 동적 절대 컴플라이언스의 누적합계 f_{d1} 과 운전속도 영역 내에 존재하는 공진점의 개수 f_{d2} , 그리고 공진점에서의 동적 컴플라이언스의 합 f_{d3} 을 모두 최소화하는 다목적 최적화를 수행한다.

이로부터 동적설계 최적화 목적함수는 다음과 같이 정식화한다.

$$\text{minimize: } f = W_1 \frac{f_{d1}}{f_{d1}^*} + W_2 \frac{f_{d2}}{f_{d2}^*} + W_3 \frac{f_{d3}}{f_{d3}^*} \quad (2)$$

Subjected to: the same constraints as the 1st step.

여기서 W_1, W_2, W_3 는 총합이 1인 가중치이며, $f_{d1}^*, f_{d2}^*, f_{d3}^*$ 는 스케일 인자이다.

2.4 유전알고리즘

설계변수의 진역 최적값을 탐색하기 위하여 Fig. 4와 같이 단순 유전 알고리즘을 이용한 탐색프로그램을 작성하였다. 개체집단에 대한 이송체 중량과 전체 구조물 중량 및 절대 컴플라이언스 계산은 상용 F.E.M 패키지인 ANSYS(Rev. 5.6)를 사용하였다.

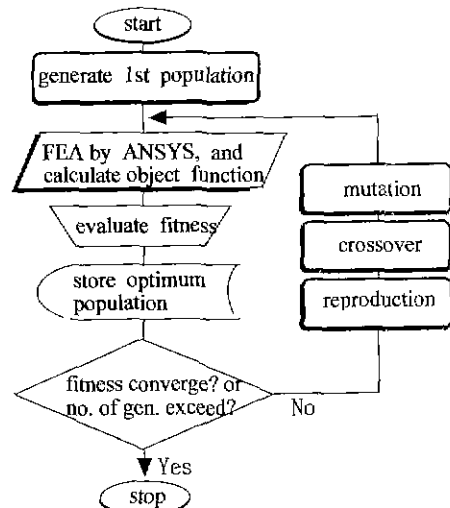


Fig. 4 Flow chart of the optimization program using a simple genetic algorithm.

2.5 적합도 평가 및 탐색조건

개체의 적합도를 평가하기 위하여 다음 (3)식과 같이, 각 세대별로 개체 집단에 대하여 목적함수 f 는 내림차순(descending order)으로 구속조건 위배 정도 p 는 오름차순(ascending order)으로 순위를 매겨 그것을 합한 값으로 적합도를 정의하였다.

$$fitness = rank(f) + Rank(p) \quad (3)$$

유전알고리즘의 최적설계 탐색 파라미터 조건은 Table 2와 같이 정하였다.

Table 2 Parameters for the genetic algorithm

Design step	Population size	Generation	Chromosome length	Crossover probability	Mutation probability
static	50	80	30x13	85%	0.01%

개체의 염색체 길이(chromosome length)는 하나의 설계변수 당 30bit의 스트링(string)을 할당하여 13개 설계변수 당 390bit가 된다 그리고 개체의 돌연변이 확률은 대체로 0.005~0.01사이의 값을 사용한다. 여기서는 0.01을 사용하였다.

3. 최적설계 결과 및 검토

3.1 설계변수 비교

최초설계 모델과 최적설계후의 설계변수를 비교하면 Table 3과 같다. 정적설계 최적화 결과 x_3 , x_5 , z_3 변수가 증가하였고, x_4 , y_1 , z_1 을 제외한 나머지 변수들은 모두 감소하였다.

동적설계 최적화 경우에는 초기모델에 비해 x_3 , x_5 , z_2 , z_3 가 증가하였고, x_4 와 y_1 을 제외한 나머지 변수들은 감소하는 방향으로 최적화가 진행되었음을 알 수 있다.

Table 3 Comparison of optimum design parameters

design parameters (mm)	x1	x2	x3	x4	x5	y1	y2	y3	y4	z1	z2	z3	z4	
before optimization	37	33	16	20	11	24	27	29	28	23	31	13	12	
after optim	static	20	32	44	20	15	24	24	13	23	23	30	14	10
		dynamic	20	32	44	20	16	24	24	22	19	22	32	14

위의 설계변수 최적치들은 Fig. 5에 나타난 것과

같이 100세대동안 (3)식에 의해 계산되어진 적합도 함수가 최대로 되는 시점의 결과값에 의해 결정되었다.

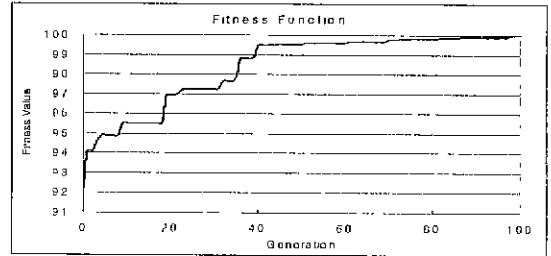


Fig. 5 Generation-history of fitness function

3.2 정적 및 동적 구조해석 결과 비교

최초설계 모델과 최적설계 모델에 대한 정적 구조해석 결과를 다음의 Table 4에 나타내었다. 여기서 급형가공센터의 공구대 절삭점의 처짐은 정적설계 최적화 후 설계모델의 경우 33.5%, 그리고 동적설계 최적화 후 설계모델의 경우 31.2% 감소되었다.

Table 4 Comparison of static analysis results

	max. disp. [mm]	max. stress [MPa]	safety factor
before optimize	0.173	16	29
after optimize	static	0.115	23
	dynamic	0.119	24

3.3 중량 및 절대 컴플라이언스 비교

최초설계 모델과 최적설계 모델의 각 슬라이드별 중량 비교는 Table 5와 같고, 정적 및 동적 절대 컴플라이언스 비교 결과는 Table 6에 나타내었다.

Table 5에서 보면 정적 설계모델의 경우는 최초설계 모델에 대해 전체중량이 약 6.1%가 감소하였고, 동적 설계모델의 전체 중량은 최초설계 모델에 비해 9.1%가 감소하였음을 확인할 수 있다.

Table 5 Comparison of the computed weights

	weight[kg]				
	total	x-slide	y-slide	z-slide	
before optimize	1,157	186	691	280	
after optimize	static	1,086	175	633	278
	dynamic	1,052	176	602	274

아래의 Table 6은 정적과 동적설계 최적화를 끝낸 모델로 정적 컴플라이언스와 동적 컴플라이언스의 계산결과를 비교한 것이다.

Table 6 Comparison of static & dynamic compliances

		Absolute Static Compliance($\mu\text{m}/\text{N}$)				
		X-dir	Y-dir	Z-dir	ISO-axis	Reference
before	optimizat'n	0.0140	0.0460	0.0032	0.048	0.016
after	static	0.0090	0.0342	0.0025	0.035	~
	dyna- mic	0.0092	0.0343	0.0025	0.037	0.056
		Absolute Dynamic Compliance($\mu\text{m}/\text{N}$)				
		X-dir	Y-dir	Z-dir	ISO-axis	Reference
before	optimizat'n	0.0023	0.6770	0.0249	0.68	0.05
after	static	1.3500	0.0022	0.0027	1.35	~
	dyna- mic	0.0021	0.1950	0.0075	0.19	0.2

Table 6에서 보듯이 정적 컴플라이언스(ISO 방향)는 정적과 동적 최적설계 모델이 모두 최초설계 모델에 비하여 약 27% 정도 감소하였다. 그리고 동적 컴플라이언스(ISO 방향)는 정적 최적설계 모델의 경우 약 99% 증가하였고, 동적 최적설계 모델은 약 72%가 감소하였다. 일반적인 수직형 밀링 공작기계의 경우 참고문헌[7]에 따르면 정적 컴플라이언스가 $0.01\mu\text{m}/\text{N} \sim 0.056\mu\text{m}/\text{N}$ 이며, 동적 절대컴플라이언스는 $0.05\mu\text{m}/\text{N} \sim 0.2\mu\text{m}/\text{N}$ 에 분포하고 있으므로 본 연구의 최적설계결과는 매우 타당한 것으로 판단된다.

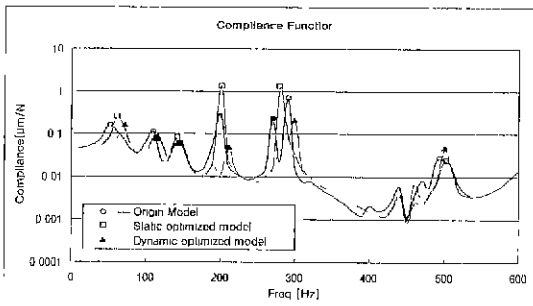


Fig. 6 Comparison of the compliance functions

뿐만 아니라 앞의 Fig. 6에서 보듯이 최초설계 모델과 최적설계 모델의 컴플라이언스를 비교하여 보면 동적 최적설계 모델이 정적 최적설계 모델 및 최초설계에 비하여 컴플라이언스가 대부분의 주파수 영역에서 더 낮게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 고속 금형센터의 고속 이송체 구조물설계를 최적화하기 위해 유전알고리즘과 결합된

다단계 최적설계 방법을 제안하였다. 본 설계방법은 강성의 역수 개념인 컴플라이언스(compliance)를 도입하여 강성과 중량이라는 두 개의 목적함수를 가중된(weighted) 단일 목적함수 최적화 문제로 변환시켰으며, 1단계 정적설계 최적화 과정에서 적합도(fitness)가 높은 "좋은 설계개체 군(feasible good solution group)"을 선별하고, 그 선별된 개체군에 대하여 2단계 동적설계 최적화를 순차적으로 수행하는 다단계 최적설계 방법이다.

최적설계 후 고속 금형센터 이송체 구조물의 전체 중량은 9.1%감소하였고, 정적 컴플라이언스는 약 27%, 동적 컴플라이언스는 약 72%감소하였다. 본 연구에서 최적설계 후 고속 금형센터 이송체 구조물의 정·동강성은 유럽(독일)에서 생산된 동일 종류의 공작기계와 비교한 결과 평균값에 가까웠다. 그러므로 본 연구의 설계방법이 매우 타당하고 신뢰할 만 한 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 류연선, 임오강, 박경진, "최적설계입문," 반도출판사, 1994.
2. 김호룡, "시스템설계," 문운당, 1996.
3. F. Y. Cheng, DAN Li, "Multi-objective Optimization Design with Pareto Genetic Algorithm," J. of Structural Eng. Vol.123, No. 9, pp.1252~1261, 1997.
4. M. Yoshimura, "Design Optimization of Machine Tool Dynamics Based on an Explanation of Relationships between Characteristics," JSPE, Vol.53, No. 4, pp601~606, 1987.
5. M. Weck, "Computer-Aided Optimization and Metrological Recording of the Stiffness Behavior of Machine Tools," Proc. of 5th IMEC, pp.1~14, 1992.
6. J. K. Park, "유전자 알고리즘을 이용한 공작기계 구조물의 최적토폴로지 설계에 관한 연구," 창원대학교 대학원 공학박사 학위논문, 1996.12.
7. In-Ung Eun, "Development of Static and Dynamic Behavior of Machine Tools in the Period from 1980~1999," 창원대학교 공작기계기술연구센터 세미나자료, 2000.7.
8. Swanson Analysis. "ANSYS User's Manual," Revision 5.5, 1996.