

# 유전적 알고리즘을 적용하여 머시닝센터 베드두께의 동하중을 고려한 최적설계에 관한 연구

조백희\*, 성활경\*\*

## A Study on the Design Optimization of Thickness of Machiningcenter Bed under Dynamic Loading by using Genetic Algorithm

Cho Baekhee\*, Seong Hwalgyeong\*\*

### Abstract

This paper presents resizing design optimization method by utilizing genetic algorithm(GA), which consists of three basic operators : reproduction, crossover and mutation. The fitness and penalty function for resizing optimization problem are defined, and the flowchart of the developed computer program along with the descriptions of each modules is presented. Also, modelling for flexible-body dynamic analysis is presented. The model is composed of bodies, joints, and force elements such as translational spring-damper-actuator. The design object is to determine the wall thickness for minimum weight under dynamic displacement constraint.

Keyword : Design Optimization(최적설계), Genetic Algorithm(유전적알고리즘), Flexible Body Dynamic Analysis(유연체동력학적해석)

### 1. 서론

비약적으로 발전하는 공업은 전 분야에 걸쳐 생산성 증대와 정밀도 향상을 요구하고 있으며 공작기계 분야에 있어서도 마찬가지로 경향이 나타나고 있다. 생산성 증대는 가공속도의 고속화로 나타나지만, 고속화는 필연적으로 진

동문제를 심화시키게 되므로 정밀도에 영향을 미치게 된다. 그러나 공작기계가 고속· 고정밀· 다기능화로 품질을 높이기 위해서는 무엇보다도 생산비용을 최소화 하면서 요구성능을 만족 할 수 있는 설계기술의 확보에 있다

\* 김천대학 건축설비과

\*\* 창원대학교 기계공학과

고 할 수 있다. 이를 위해 목적함수를 최소화 하면서 동시에 주어진 구속조건들을 만족시키는 설계변수를 결정하는 최적설계 기술은 최근들어 공작기계의 설계분야에 새로운 기술로서 인식을 갖추어 나가고 있다. 일반적으로 최적설계 문제의 해법에 있어서는 종래부터 사용되고 있는 1차, 2차의 접근법(1st, 2nd-order Method)<sup>(1)</sup>이 있으며 이는 1개의 벡터를 가지고 최적해로 접근(Approach)하는 방법이므로 설계민감도 해석<sup>(2)(3)(4)</sup> 등 고차원적인 수학적 사고가 요구되나 유전자 알고리즘 (Genetic Algorithm, GA)<sup>(5)</sup>은 종래까지 수학, 의학 및 생물학 등 여러분야에 사용되어 온 것으로서 최적화 문제로 적용함에 있어서는 0차 접근법(Zero-order Method)에 해당되므로 유한개의 유전자 개체(벡터)를 가지고 접근하는 방법이 되기 때문에 설계민감도 해석 등의 수학적 사고에 대한 기술이 요구되지 않는 장점을 갖는다. 특히 유전자 알고리즘(GA)은 목적함수의 설계변수를 생물 염색체의 개체로 보고 이를 우량한 개체로 진화시켜 최적인 해(解)를 얻고자 하는 것으로서 최적설계를 위한 진화의 과정에는 번식(Reproduction), 교차(Crossover), 돌연변이(Mutation)등의 유전 연산자(Operator)가 이용된다<sup>(6)(7)</sup>.

따라서 본 연구는 공작기계의 구조물에 대한 동적 성능을 향상시키기 위한 수단으로 GA를 이용한 최적설계를 수행하는 방법으로, 머시닝센터의 칼럼(Column)이 베드(Bed) 위를 순간적으로 역방향 주행 할 때 발생하는 진동 레벨이 최소화 되는 베드의 두께를 결정 하였으며 이 경우 구현된 최적설계 시스템에는 상업용 유한요소 코드(NASTRAN / ANSYS)와 동시에 동력학적 해석 코드(DADS)가 활용되었다.

## 2. GA를 이용한 최적화

### 2.1 최적화과정

GA는 결정론적인 규칙이 아닌 확률론적인 추이규칙을 사용하며, 각 파라미터를 별개로 고려하지 않고 개체의 특성에 해당하는 파라미터 집합을 하나로 묶어 취급한다. 또한 단일해를 사용하여 해공간을 탐색하지 않고 해집단을 사용하여 해공간을 탐색하며, 도함수 또는 다른 정보가 필요하지 않고 목적함수로부터 산출되는 적응도만을 이용한다. 즉 자연계에서는 우수한 형질을 가진 개체만이 환경에 잘 적응하여 큰 생존확률을 가진다. 그리고 우수한 형질을 가진 두 개체가 교배를 통하여 더욱 우수한 자손을 생성

하며, 돌연변이에 의해 생긴 우수한 형질이 자손에게 유전되므로써 진화가 진행된다. 유전알고리즘은 이와같은 자연계의 유전법칙에 착안하여 재생, 교차, 돌연변이 등의 인위적인 조작을 통하여 목적함수의 최적해를 찾아내는 모의 진화형 탐색 알고리즘으로 해(Solution)를 이루는 전공간을 탐색할 수 있는 기회를 확률적인 방법을 이용하여 처리하도록 구성되어 있기 때문에 복잡한 구조를 갖고 있는 함수나 다변수 함수 또는 매우 비선형적인 함수의 최적화 문제에서도 전체적(Global)인 최적값(Optimum value)을 제공할 수 있는 유일한 방법이다. 즉 유전자 알고리즘(GA)의 처리순서를 요약하면 다음과 같은 과정으로 계산 처리된다.

(Step 1) 개체특성을 이진코드의 1차원 배열의 스트링(string)으로 표현. 초기 (시간,  $t=0$ ) 개체수  $m$ 에 대한 염색체 길이(Chromosome length)를 결정하고 이를 랜덤하게 구성하여 초기 유전자집단(Population size)  $P_0$ 를 형성 한다.(初期化)

$$P_t = \{ C_1, C_2, C_3, \dots, C_m \}^T,$$

(Step 2) 이진코드로 표현된 개체의 적응도를 평가한다.

(Step 3) 확률적으로 적응도가 높은 개체는 더 많이 복제(Reproduction)되어 교배율에 해당하는 수 만큼의 교배쌍이 선택되며, 선택된 스트링(string)을 상호교차(Crossover)시킴에 의한 새로운 유전자 집단  $P_t$ 를 형성 한다.(交叉)

$$P_t = \{ C_1, C_2, C_3, \dots, C_m, C_{m+1}, \dots, C_{m+k} \}^T$$

(Step 4) 이진 코드로 구성된 유전자 집단  $P_t$ 의 각 개체중 확률적인 수단(돌연변이율)에 의해 염색체의 특정위치 비트(Bit)를 치환한다.(突然變異)

(Step 5)  $P_t$ 의 각 개체( $C_i$ )에 대한 적합도 $f(C_i)$ 를 계산하여 평균적합도를 고려하고, 여기에 각 개체의 선택 확률을 결정해서 이를 기초로  $m$ 개의 개체를 선택하여 다음 세대의 유전자 집단  $P_{t+1}$ 를( $t=t+1$ )만든다.

(Step 6) 상기의 과정을 거치면 한 세대(Generation)가 끝나는 것으로서 미리 정해진 세대수 만큼, 또는 수렴기준을 만족할 때까지 상기의 과정을 반복 시키면 설계변수는 원하는 최적해로 수렴을 하게 된다.

이 경우 유전자의 표현에 있어서 1개의 유전자와 1개의 해(解)사이에는 1대 1 대응이어야 하고 교차에 의한 치사 유전자의 생성은 억제되면서 생성된 인자는 양친(兩親)의 형질이 계승되도록 하여야 한다.

## 2.2 전산프로그램

GA의 특징을 이용하여 동하중 하에서의 Re-sizing 최적설계를 수행하기 위해서 다음 Fig 1과 같이 전 과정의 흐름도와 입, 출력 관계를 정리 하였다.

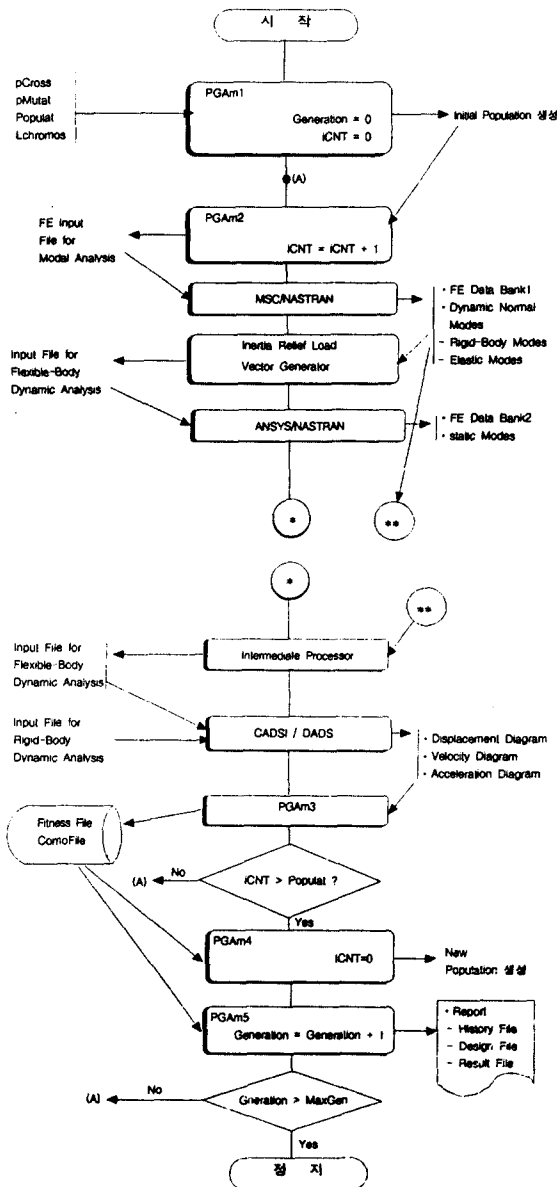


Fig. 1 Flowchart of GA

흐름도에서 PGAm1, PGAm2, ..., PGAm5는 GA코드인 PGA의 모듈1부터 모듈5까지를 지칭하는 것으로 직접 개발한 각기 독립된 프로그램이다. 또한 변수 Generation은 진행 세대 수 계수(進行世代數計數)용이며, 변수 iCNT는 모집단내에서의 처리된 유전자 계수용이다.

PGAm1의 입력자료중 pCross는 교배확률(Cross-over Probability)을, pMutat는 돌연변이 확률(Mutation Probability)을, Populat는 모집단내의 개체의 수를, Lchromos는 한 개체의 구성 비트수를 각기 나타낸다. PGAm3의 출력자료중 Fitness file은 모집단내 개체들의 적합도(Fitness)를 저장하며 como file은 각 개체에 대한 참고자료를 저장하는 곳이다. PGAm5를 마치고 PGAm2로 수행이 옮겨갈 때, 입력자료로는 PGAm4에 의해 새로 생성된 모집단을 사용한다. PGAm5에 의해 다음 세 File이 생성되며 저장되는 내용은 다음과 같다.

- History File: 각 세대별로 진행되어온 적합도, 베드 하중 및 벌칙함수값.
- Design File: 각 세대별로 개선된 설계치(Design Vector)
- Result File: 결과 분석에 필요한 기타 자료들 - 적합도 세대별 합, 적합도 세대별 평균, 세대별 최대 및 최소 적합도, Parents ID, 교차 위치(Crossing Site)등

## 3. 동하중 하에서의 Resizing 최적설계

### 3.1 문제의 정의

설계대상은 머시닝 센터 베드로 하였으며 외부에서 충격하중이 가해질 때 계 전체가 어떤 거동을 하며, 안정화에 어느 정도의 시간이 필요한지를 예측하여 보다 향상된 거동을 하는 설계치를 결정하는 것이다.

외부에서 가해지는 동하중은 충격하중으로 테이블과 칼럼 및 헤드가 정지상태에서 급속 출발을 시켰을 때와 급격히 운동 방향을 바꿈으로 가해지도록 했다. 베드 위의 진동레벨은 유연체 동력학적 해석(Flexible Body Dynamic Analysis) 결과에 따라 얻을 수 있으며, 유연체 동력학적 해석은 머시닝센터를 Ground, Bed, Table, Column 및 Head와 이송장치등 총 29개의 Body로 정의 하고 Body 상호간의 상대운동을 위하여 Body 사이에 Joint를 정의하였다. 29개의 Body중 Bed 및

Column을 유연체(Flexible-Body)로 선택 하고 베드와 테이블 그리고 베드와 컬럼 및 컬럼과 헤드 사이에 이송을 위한 LMG (Linear Motion Guide)가 설치되어 있으므로 Translational Joint와 TSDA (Translational Spring-Damper-Actuator) 등을 이용하여 Fig. 2와 같이 구성하여 유연체 동력학적 해석을 수행하였다.

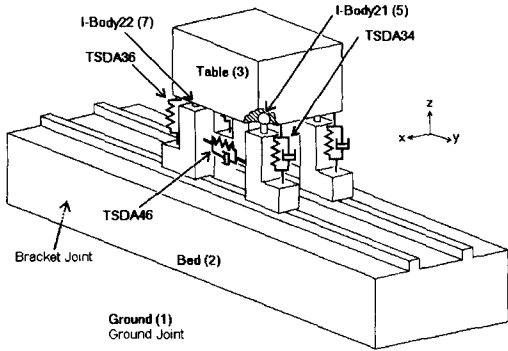


Fig. 2 The Analysis Modeling of LMG

유연체 동력학적 해석의 결과로부터 Body 내의 임의의 점의 변위선도, 속도선도 및 가속도선도가 얻어지면 Body 내의  $i$  번째 절점의  $x_1, x_2$  및  $x_3$  방향의 변위를 각각  $U_i, V_i$  및  $W_i$ 라 하고, 운동이 측정될 점들의 집합을 J set이라 하면 다음과 같은 Resizing 설계문제가 정의될 수 있다.

설계변수 ( $\vec{b}$ ) : 사용 판재의 두께 (1)

$$\vec{b} = [b_1, b_2, b_3]^T \quad (2)$$

목적함수 : 베드의 총 중량  $f(\vec{b})$ 의 최소화

설계조건 :

$$\begin{aligned} |U_i(t, \vec{b})| &\leq U^B, \quad i \in J \\ |V_i(t, \vec{b})| &\leq V^B, \quad i \in J \\ |W_i(t, \vec{b})| &\leq W^B, \quad i \in J \end{aligned} \quad (3)$$

여기서  $U^B, V^B$  및  $W^B$ 는  $U_i, V_i, W_i$ 에 대한 기준값이다. 설계조건식 식 (3)은 각 설계치에 대한 비교를 위하여 다음과 같이 시간 구간에 대한 적분식으로 치환된다.

$$\begin{aligned} g(\vec{b}) &= \sum_{i \in J} \int_{t_1}^{t_2} \{ \langle U_i - U^B \rangle^2 \\ &+ \langle V_i - V^B \rangle^2 + \langle W_i - W^B \rangle^2 \} dt \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 함수  $\langle U_i - U^B \rangle^2$ 은 다음과 같은 값을 갖는다.

$$\langle U_i - U^B \rangle^2 = \begin{cases} 0 & U_i \leq U^B \\ (U_i - U^B)^2 & U_i > U^B \end{cases} \quad (5)$$

최적설계를 위한 벌칙함수 (Penalty Function)  $P(\vec{b})$ 는 식 (2)와 식 (4)을 이용하여 아래 식 (6)과 같이 정의할 수 있다.

$$P(\vec{b}) = f(\vec{b}) + r \cdot g(\vec{b}) \quad (6)$$

여기서  $r$ 은  $f(\vec{b})$ 와  $g(\vec{b})$ 의 상대적인 크기를 조절하기 위한 Penalty Ratio로써 양(+)의 값을 갖도록 적절히 선택된다. 함수의 성질상  $P(\vec{b})$ 는 작을수록 우수한 설계가 되지만 GA에서는 클수록 우수한 설계가 됨으로 GA응용을 위하여 다음과 같은 적합도(Fitness)함수  $F(\vec{b})$ 를 정의한다.

$$F(\vec{b}) = \frac{C_1}{C_2 + P(\vec{b})} \quad (7)$$

여기서  $C_1$  및  $C_2$ 는 상수로써 적당하게 선택하여  $P(\vec{b})$ 의 변화가  $F(\vec{b})$ 의 변화로 확실하게 반영될 수 있게 한다. 운동이 측정되도록 결정된 점들의 집합인 J set으로는 베드위의 테이블 및 컬럼 이송을 위한 레일 위에 있는 절점들로 선택되었다.

### 3.2 최적화 결과

테이블을 정지상태에서 급가속 및 역주행으로 bed에 충격이 가해지는 과정에서 최적설계를 진행하였다.

설계 변수  $\vec{b} = [b_1, b_2, b_3]^T$ 로 하였으며  $b_1, b_2, b_3$ 는 각기 베드의 외벽면 두께 (초기설계치수 25mm), 베드의 가로방향 보강재 두께 (초기설계치수 30mm), 베드의 세로방향 보강재 두께 (초기설계치수 20mm)를 나타낸다. 각 설계변수는 3비트의 길이를 갖도록 하였으므로 한 개체의 길이는 9비트가 되고 모집단의 크기는 8로 하였다. 모집단의 크기는 클수록 더 넓은 설계공간을

탐색할 수 있는 장점이 있으나, 해석에 그 만큼 시간이 많이 소요되게 된다. 한 개체의 해석에 약 7만 cpu초가 소요되는 본 연구는 해석 시간과 개체의 길이를 고려하여 모집단의 크기를 8로 선택하였다. 각 변수  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$ 는 3비트로 구성되었으므로, 각기 8개의 선택이 주어지게 된다. 각 변수의 선택 범위는 Table 1에 정리하였다.

식 (3)의  $U^p$ ,  $V^p$ ,  $W^p$ 는 모두 0.002로 하였고 J set은 베드 상면중 가로방향 레일상에 있는 절점들로 하였다.

식 (6)의 Penalty Parameter  $r$ 은 5.0이 사용되었고 식(7)의  $C_1$ 과  $C_2$ 는 각기 50000. 과 500. 이 선택되었다. 총 10회의 반복개선(9세대)이 수행되었으며 각 세대별 설계변수  $b_1$ ,  $b_2$  및  $b_3$ 의 변화를 Fig. 3에 나타내었다.

Table 1 The Selectable Range of Design Variable

Design Variable(mm)	Selectable thickness(mm)
Bed의 외벽면 두께( $b_1$ )	17,19,21,23, 25,27,29,31
Bed의 가로방향(z-방향)보강재 두께( $b_2$ )	22,24,26,28, 30,32,34,36
Bed의 세로방향(x-방향)보강재 두께( $b_3$ )	14,16,18,20, 22,24,26,28

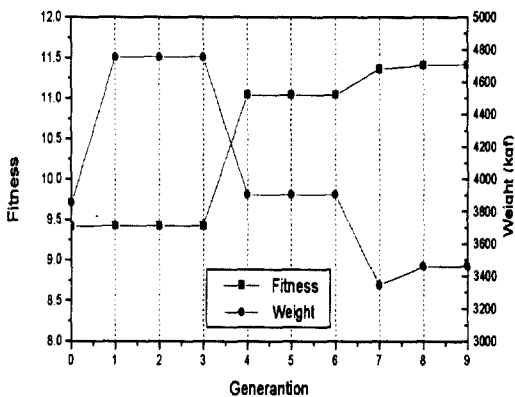


Fig. 3 The History of Design Variable

적합도 이력 및 베드의 중량 이력 곡선을 Fig. 4에 정리하였다. Fig. 3으로부터 설계변수  $b_3$ 는 4세대 (반복수 5회)에서 28mm에 수렴 하였으나  $b_1$ 과  $b_2$ 는 7세대(반복

수8회)에서 최적 값에 수렴하고 있고 그때의 각 설계변수의 값은  $b_1=17mm$   $b_2=22mm$   $b_3=28mm$  로 나타났다.

Table. 2는 초기 설계치와 최적 설계치를 비교한 것으로 설계변수  $b_1$ 과  $b_2$ 는 초기설계치와 비교할 때 감소한 반면  $b_3$ 는 증가하였다. 그러나 Fig. 4로부터 7세대(반복수 8회)에서 적합도가 최대, 중량이 최소가 되므로써 이점에서의 값을 최적의 값으로 결정 할수 있으며 초기 설계치에서의 중량을 1로할 때 이때의 중량은 0.8126으로 18.74%의 중량이 감소 되었다.

Table. 2 The Result of Re-sizing Optimization

하중 종류	설계 변수 $b_1$	설계 변수 $b_2$	설계 변수 $b_3$	초기설계치에 대한 중량비
최적 설계치	17	22	28	0.8126
초기 설계치	25	30	20	1.

한편 Fig. 5에 보인 레일 위 임의의 한점(절점번호 4272)에 대하여 초기설계치와 최적 설계치의 진동 변위 선도를 Fig. 6 (a) (b)에 나타내어 각각의 변위 특성을 살펴보았다.

설계의 변화에 따른 두 절점에서의 거동을 살펴보면 초기 설계치에서는 전구간(1.5초동안)에 걸쳐 약 0.1mm(p-p)의 큰 진동이 발생한 반면, 8개선후의 최적 설계치에서는 1초 이후 진폭이 크게 감소하였으며 그 크기는 0.02mm(p-p)로 현저히 개선되었음을 알 수 있다.

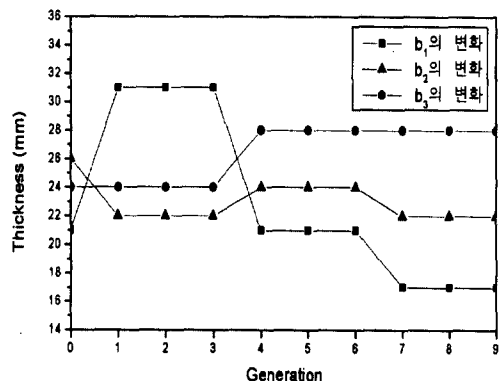


Fig. 4 The History of Fitness and Bed Weight

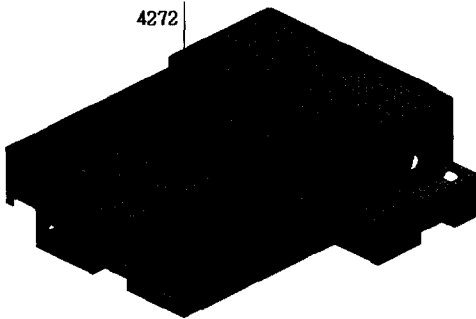
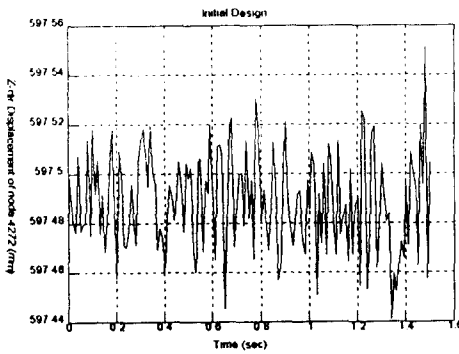
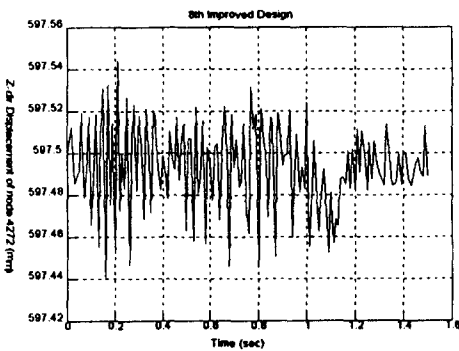


Fig. 5 Selected Position (Node No. 4272)



(a) Initial Design (0th Generation)



(b) Optimum design (7th Generation)

Fig. 6 Displacement of Node No. 4272

따라서 머시닝센터 베드를 설계함에 있어서 GA를 이용하여 7세대만에 18.74%의 중량감소가 가능 하였으며 이때 진동도 변위 진폭이 20%이상 감소 시킬수 있었다. 한편 머시닝센터의 설계에 있어서 초기 설계치와 최적 설

계치를 비교해 보면 칼럼이송방향 보강재는 초기설계치보다 증가한 반면 테이블이송방향 및 외벽의 두께는 크게 감소하였다.

그러나 GA를 이용하여 설계를 개선시키기 위하여는 수많은 반복계산을 필요로 하므로 전산기의 사용시간을 최소화 하기위하여 본 논문에서는 모집단의 크기를 최소화 (population size:8, chromosom length:9)로 유지시켜 결과를 얻었으나 모집단의 크기와 개체의 길이를 증가시킨다면 보다 넓은 설계공간을 탐색하므로써 동강성에 영향력을 미치지 않는 부재는 더욱 감소시키면서 전체 중량은 더욱 감소시킬 수 있을 것으로 생각한다. 또한 본 논문에서는 주요 보강재의 두께만을 설계변수로 가정하였으나 보강재의 위치변화도 함께 고려하는 형상 최적화 (shape optimal design)를 같이 수행한다면 한층더 좋은 결과를 얻을 수 있을 것이다.

#### 4. 결론

본 연구는 기계 구조물의 동적 성능을 향상시키기 위한 수단으로 유전자 알고리즘(GA)을 이용하여 기하학적치수 및 토폴로지 최적설계를 수행하는 방법을 제시 하였으며 머시닝센터 베드의 구조물에 대하여 적용한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 머시닝센터 베드구조물을 동하중을 고려한 설계로 기준 설계치에서의 베드중량보다 18.74%의 중량감소를 나타내었다. 여기서 기준 설계치는 원 도면 상의 최초 설계 치수를 말한다. 또한 변위선도를 통하여 살펴 본 바와 같이 GA를 이용하여 설계를 변화시킴으로 베드의 기동, 특히, 운동의 진폭을 20% 이하로 낮추는 효과도 가져올수 있었다.
- (2) 최적설계 결과로부터 베드의 외벽면두께(b1)와 가로방향 보강재두께(b2)는 초기설계치보다 감소한 반면 세로방향 보강재두께(b3)는 오히려 증가 하였다. 이는 베드의 외벽면두께와 가로방향의 보강재는 머시닝센터의 동강성에 큰 영향력이 없으므로 좀더 두께의 감소가 가능할것으로 생각되며 세로방향의 보강재만이 머시닝센터 동강성에 높은 영향력이 있음을 알수 있다.

#### 참고 문헌

1. E. J. Haug and J. S. Arora, "Applied optimal

- design, mechanical and structural system", John Wiley & Sos, 1976.
2. E. J. Haug, K. K. Choi, and V. Komkov, "Design sensitivity analysis of structural system", Academic Press, New York, 1986.
  3. K. K. Choi and H. G. Seong, "Design component method for sensitivity analysis of built-up structures", Journal of Structure Mechanics, Vol.14, pp.379-399, 1986.
  4. K. K. Choi and H. G. Seong, "A domain method for shape design sensitivity analysis of built-up structures", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol.57, No.1, pp1-15, 1986.
  5. D. E. Goldberg, "Genetic algorithm in search, optimization, and machine learning" Addison-Wesley, 1989.
  6. W. M. Jenkins, "Towards structural optimization via the genetic algorithm, computers and structures", Vol.40, No.5, pp. 1321-1327, 1991.
  7. C. Y. Lin and P. Hajela, "Genetic search strategies in large scale optimization" AIAA paper #93-1585, Structures, Structural Dynamics, and Material Conference, La Jolla, CA, April. 1993.
  8. J. Richardson, (eds), "Some guidelines for genetic algorithms with penalty functions", Proc. of the 3th ICGA, Los Altos, CA, 1989.
  9. J. Richardson, (eds), "Some guidelines for genetic algorithms with penalty functions", Proc. of the 3th ICGA, Los Altos, CA, 1989.
  10. A. Colorni, M. Dorigo, and V. Maniezzo, "Genetic algorithms and highly constrained problem : the timetable case", in Parallel Problem Solving from Nature, eds., G. Goos and J. Hartmanis, Springer-Verlag, pp55-59, 1990.
  11. A. E. Smith and D. M. Tate, "Genetic optimization using a penalty function", Proc. of the 5th ICGA, ed., S. Forrest, pp499-505, 1993.