

## CAD 기반 최적설계 시스템을 활용한 공작기계 구조의 최적화

신정호\* · 광병만\*\*

### Optimization of Machine Tool Structure using a CAD-based Optimal Design System

Jeong Ho Shin\*, Byung Man Kwak\*\*

Key Words: CAD-based system(CAD기반 시스템), Optimal Design(최적설계), Machine tools(공작기계), Integration of commercial tools(상용 프로그램 통합)

#### Abstract

In this paper a CAD-based optimal design system is introduced and applied to optimal design of machine tool structures. The system is designed to reduce manual interfacing effort. All the design activities such as selecting design variables, making FE meshes and FE analysis are integrated on a parametric CAD program. A user can easily select design variables by clicking a CAD model. To enhance the robustness and versatility, this system uses the finite difference method for the design sensitivity analysis. By taking a practical example of the design of the column of a horizontal machining center, it is shown that the software system is efficiently usable in industry establishing the goal of minimizing user intervention between various analysis and optimization activities.

#### 1. 서론

현재 기계 산업에서 고부가가치 부품 설계에 필요한 설계 대상의 가하학적 모델링, 동역학 해석을 포함하는 하중 해석, 각종 격자 생성, 유한요소해석과 같은 공학 해석의 기법, 치수 및 형상 설계 등 일련의 활동이 각기 개별적이고 단순 반복적으로 수행되고 있어, 인력 및 물적 자원이 극히 비효율적으로 활용되고 있다. 따라서 급변하는 시장 요구와 수요에 신속히 대처하기 위해서는 제품의 제조 및 조립에 요구되는 각 부품을

설계 단계에서부터 CAE기술을 적용하여 각각의 정량적인 설계과정으로 확립함은 물론, 이 결과를 개발자들이 공유함으로써 더욱 효율적인 동시 공학적 설계가 필요하다. 동시공학 개념의 반복적인 설계과정은 최적설계의 개념을 적용함으로써 더 효율적으로 수행될 수가 있다.

최근 들어 이러한 요구에 부응하기 위해서 CAD/CAM/CAE 프로그램에 전/후처리의 기능이 통합된 소프트웨어를 개발하여 설계에 이용하려는 시도가 이루어지고 있다[1]. 사용자가 편리하게 사용할 수 있도록 하기 위해서 SolidWorks 나 SolidEdge 및 Pro/ENGINEER와 같이 널리 사용되고 있는 CAD 프로그램에 유한요소프로그램과 최적설계 기법을 통합시킴으로서 CAD 환경 하에서 공학해석과 최적설계가 가능한 소프트웨어를 개발해 오고 있다[2-6]. CAD 기반에서 모든 작업

\* 한국과학기술원 기계공학과 박사과정

\*\* 한국과학기술원 기계공학과 교수

이 이루어짐으로써 CAD 모델의 치수를 직접 마우스로 선택해서 설계변수에 추가할 수 있으며 연계된 프로그램에 의해 CAD 모델을 기반으로 한 자동격자 생성과 유한요소 해석이 이루어지기 때문에 사용자는 편리하게 작업을 수행할 수가 있다.

본 논문에서는 CAD 기반 최적설계 시스템의 개발과 생산시스템을 구성하는 핵심 요소인 공작기계를 예제로 최적설계를 수행한 결과에 대하여 언급하고자 한다.

## 2. CAD기반 최적설계 프로그램 개발

### 2.1 프로그램 개요

이 연구에서 소개하는 시스템은 본 저자 등의 국가지정연구실사업에 의해 개발이 이루어지고 있으며 지면을 통해 이미 소개된 바 있다[4]. 평가척도로서 정적해석 정보는 물론 고유진동수와 같은 동적해석 정보를 다룰 수 있도록 추가되었으며 지속적인 성능개선과 보다 사용자가 편리하게 사용할 수 있는 시스템으로 구성되고 있다.

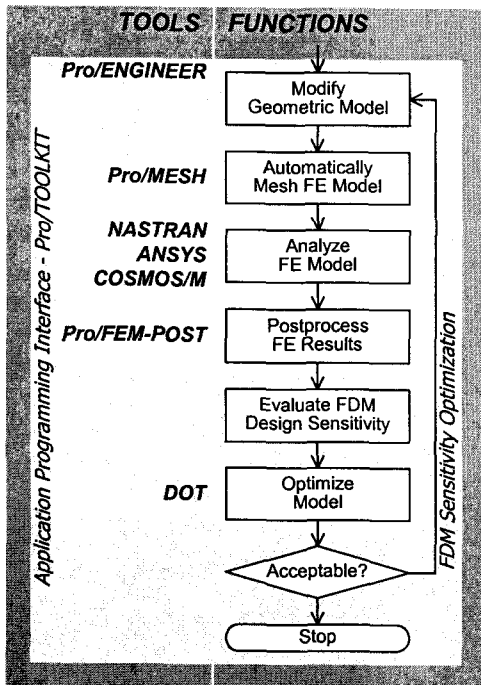


Fig. 1 Program flow

DS/FDM(Design System with Finite Difference Method)이라 명명된 이 시스템은 최적설계 시 유한차분법에 의한 민감도를 이용함으로써 강건성과 다양한 확장성을 가지고 있다. 프로그램의 전체적인 구성은 그림 1을 통해 살펴볼 수 있다. 파라메트릭 CAD 모델의 생성, 유한요소 격자 자동 생성, 유한요소해석을 통한 구조응답, 유한차분법을 이용한 민감도해석이 CAD 기반에서 통합되어 일련을 절차를 수행하면서 최적설계가 이루어진다.

### 2.2 프로그램 개발환경

본 시스템에 사용된 CAD 프로그램은 산업현장에서 널리 쓰이고 있는 Pro/ENGINEER이다. 유한요소 해석 프로그램으로는 NASTRAN, 최적설계를 위해서 DOT(Design Optimization Tool)가 사용되었다. 다양한 사용자의 작업환경을 고려하여 Windows NT와 UNIX 환경 모두에서 작업이 가능하도록 구성되었다.

### 2.3 프로그램 수행절차

그림 1에서 살펴볼 수 있듯이 제일 먼저 파라메트릭 CAD 모델을 작성하여야 한다. 모델의 치수나 파라미터는 최적설계를 고려하여 합리적으로 선언되어야 한다. 모델이 완성되면 CAD 모델에 대한 유한요소 격자를 생성한다. 이 작업에는 Pro/ENGINEER가 제공하는 Pro/MESH가 이용된다. CAD 모델이 변경될 때마다 변경된 형상에 대한 유한요소 격자로 자동 갱신되도록 설계되었다. 구성된 유한요소 격자를 이용하여 외부 유한요소 해석 프로그램에 의해 구조해석이 수행된다.

유한요소 해석 프로그램은 NASTRAN, ANSYS와 같이 Pro/E가 후처리과정을 제공하는 상용프로그램 뿐만 아니라 자체적으로 개발된 프로그램도 이용할 수 있다. 또한 해석을 위한 서버를 별도로 설정하여 원격으로 해석을 수행할 수 있도록 설계하여 자원의 공유를 고려하였다. 유한요소 해석이 완료되면 그 결과는 Pro/ENGINEER에 전달되어 후처리과정을 거친다. 여기에서 응력이나 변위와 같은 구조해석을 통해서 얻어지는 평가척도의 값이 구해진다. 이상의 과정을 통해

언은 정보를 이용하여 목적함수 및 구속조건에 대한 각 설계변수들의 민감도가 유한차분법을 통해서 구해진다. 이러한 일련의 절차가 최적설계의 수렴조건을 만족할 때까지 반복되면서 최적설계가 이루어진다.

## 2.4 프로그램 메뉴구성

그림 2에 메뉴의 전체적인 구성을 보이고 있다. Pro/ENGINEER의 기존의 메뉴에 통합되도록 구성되어 있으며 크게 설계변수를 선택하는 부분, 평가척도를 선택하는 부분, 민감도 계산 부분, 최적설계 문제를 정의하는 부분으로 나눌 수 있다. 평가척도는 질량이나 부피와 같이 모델의 기하학적 형상으로부터 직접 구할 수 있는 값들과 응력, 변위, 고유진동수와 같이 유한요소해석을 통해서 얻을 수 있는 값들로 분류해 놓았다.

민감도 해석 메뉴에서는 최적설계를 수행하기 이전에 유한차분법에 의해 민감도를 구하여 각 설계변수가 설정한 성능척도에 미치는 영향을 빠르게 살펴볼 수 있도록 구성된 메뉴이다. 해석이 완료되면 그 결과를 테이블의 형태로 볼 수 있다.

최적설계 문제정의 메뉴에서는 먼저 선택된 성능척도 중에서 목적함수를 선택하고 최적설계 기법 및 구속조건을 설정한다. 모든 문제정의를 마치고 최적설계를 수행시키면 완료 후에 그 결과를 얻을 수 있다.

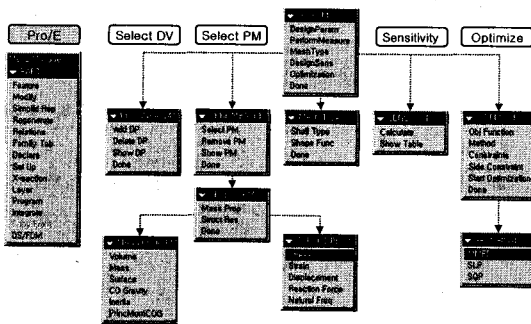


Fig. 2 Menu structure

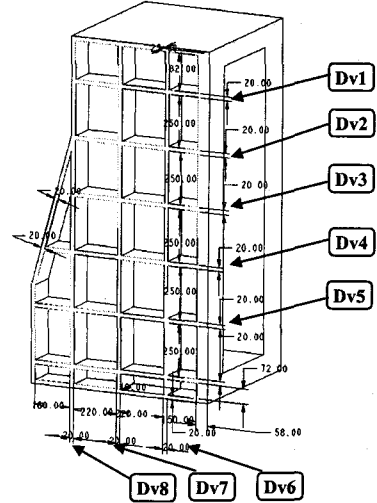


Fig. 3 Parametric CAD model

## 3. 공작기계에 대한 적용

공작기계는 자유도가 많고 그 구조가 복잡하기 때문에 새로운 형태의 공작기계를 설계 및 제작하는 과정에서는 많은 노력, 시간, 비용 등이 필요하게 된다. 기계의 성능을 나타내는 여러 특성들 중 대표적인 정적, 동적 강성을 초기 설계 단계에서 파악하여 명확한 평가기준을 얻는 것이 필요하다[7]. 본 연구에서 개발한 DS/FDM을 수평머시닝 센터의 컬럼부의 설계에 적용해 보았다.

### 3.1 파라메트릭 모델링

그림 3은 컬럼의 CAD 모델을 나타낸 것이다. 컬럼 부재의 내부구조를 보이기 위하여 외벽을 절단한 모델이다. 수평과 수직 방향으로 두께 20 mm의 보강재가 배치되어 있다. 내부보강재의 치수 8 개를 설계변수로 설정하기 위하여 적절하게 치수선언을 하고 설계변수의 변경에 따라 올바른 모델이 생성될 수 있도록 치수 간의 관계를 설정하였다. 본 시스템의 모든 작업이 CAD 기반에서 이루어지기 때문에 최적설계를 수행하기 이전에 초기 파라메트릭 모델을 잘 구성하는 것이 매우 중요하다.

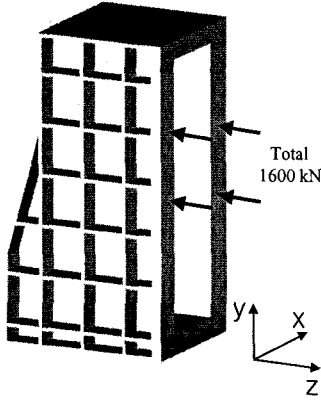


Fig. 4 Force condition

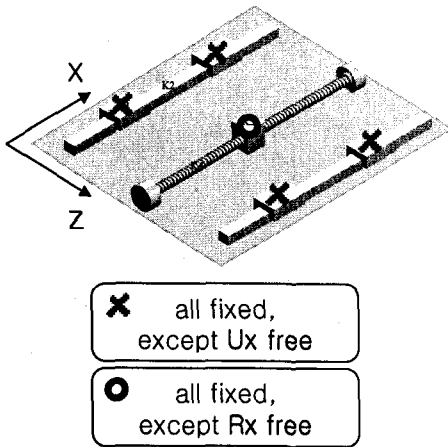


Fig. 5 Boundary condition for joint parts

### 3.2 경계조건 설정

컬럼은 베드 위에서 이송이 되기 때문에 베드와 이송결합부를 통해서 연결이 되어 있다. 또한 컬럼은 스피ن들의 회전을 담당하는 스피너들 박스의 이송을 담당한다. 이러한 공작기계는 컬럼이 뒤로 밀리는 추력을 가장 많이 받게 된다. 그래서 그림 4와 같이 스피너들 박스가 컬럼과 연결되는 부위에 총 1600 kN의 힘을 가정하여 작용하였다. 컬럼이 베드와 연결되는 부위는 그림 5와 같이 X 방향으로의 미끄럼을 담당하는 LM 가이드 파트와 이송을 담당하는 볼스크류 시스템으로 이루어져 있다. LM 가이드 부분은 X 방향으로의 변위만을 제외하고 모두 구속하였고, 볼

스크류의 너트 위치는 X 방향의 회전을 제외하고 모두 구속하였다.

### 3.3 유한요소 모델 구성과 초기해석

최적설계 문제를 정의하기 위해서는 초기설계에 대한 구조해석을 수행하여 평가척도를 지정하고 초기 값을 구해야 한다. 그림 6은 정적해석 결과로 변위 스펙트럼을 보이고 있다. 최대변위가 컬럼의 최상단에서 발생하였으며 38.5  $\mu\text{m}$ 로 나타났다. 문제정의의 편의를 위해 실제 작업환경보다 큰 힘을 주었기 때문에 변위가 크게 나타났다. 이 최대 변위를 평가척도로 정하였다.

공작기계는 스피너들의 회전에 의한 가공을 하기 때문에 정적인 특성뿐만 아니라 동적인 특성도 매우 중요하다. 이 공작기계의 스피너들의 회전수 범위는 30 ~ 6000 rpm 이다. 주파수로는 100 Hz 이내의 범위의 가진원이 될 수 있다. 모드 해석을 수행한 결과를 그림 7에 나타내었다. 모드 형상은 전체 모델을 대상으로 한 모드해석에서의 결과와 일치하고 있으며 고유진동수 범위 또한 비슷하게 나타나고 있다. 그렇기 때문에 컬럼부만의 동적인 특성을 평가척도로 설정하여도 전체적인 성능의 개선에 영향을 준다고 볼 수 있다. 가공정밀도를 좋게 하기 위해서는 가능한 한 고유진동수를 일반적인 작업영역 밖으로 밀어내거나 그 영역을 빨리 벗어날 수 있도록 해야 한다. 1차 모드와 2차 모드가 100 Hz 이내의 값이므로 1차 고유진동수 값을 평가척도로 설정하였다.

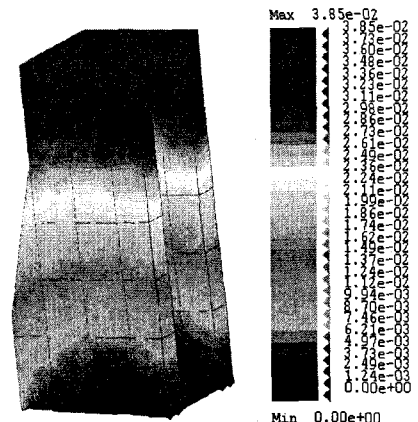
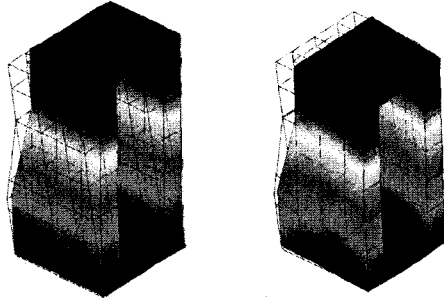
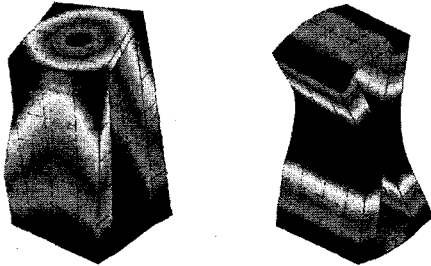


Fig. 6 Displacement of initial design



(a) 1st mode: 39.08 Hz (b) 2nd mode: 97.74 Hz



(c) 3rd mode: 131.96 Hz (d) 4th mode: 158.94 Hz

Fig. 7 Modal analysis

#### 4. 최적설계 수행

##### 4.1 최적설계 문제정의

앞에서 수행한 초기해석 결과를 토대로 최적설계 문제를 식 (1)과 같이 정의하였다.

*Minimize (mass)*

*Subject to 1st natural frequency > 39.08 Hz (1)*

*Maximum displacement < 38.5 μm*

$5 \text{ mm} \leq dv_i \leq 40 \text{ mm} (i=1..8)$

설계변수는 그림 3에서 살펴볼 수 있듯이 내부보강재의 치수 8개이다. 목적함수를 총 질량으로 정하고 1차 고유진동수는 초기 값보다 크게 유지하고 킬럼상면의 최대 변위는 초기 값보다 작도록 하는 구속조건하에서 질량을 최소화하는 치수들을 찾도록 하였다. 각 설계변수들은 제조공정을 고려하여 5 mm와 40 mm 사이에 있도록 하한 값과 상한 값을 설정하였다.

Table 1 Optimization result

	dv1~dv5	dv6	dv7	dv8
Initial	20	20	20	20
Optimal	5	6.93	6.65	24.03
	Mass	MAX DISP	1st Mode	
Initial	1816.5 kg	38.52 μm	39.08 Hz	
Optimal	1636.9 kg	38.65 μm	38.96 Hz	

##### 4.2 최적설계 결과

최적설계 결과를 표 1에 정리하였다. 6번의 촉차가 이루어졌고 유한요소 해석이 68번 수행되었다. 최적설계를 통한 설계변수들의 변화는 수평방향의 내부보강재들은 모두 하한에 접근하였고 세로방향의 내부보강재 중 가장 뒤쪽의 두께는 다소 증가하였다. 초기설계가 그림 8과 같은 같은 형태로 변경되면서 킬럼상면의 최대변형과 1차 고유진동수 값은 거의 그대로 유지하면서 목적함수는 질량은 1636 kg으로 감소하여 약 10%의 재료를 절약할 수 있는 결과를 얻었다.

CAD 기반 시스템이기 때문에 내부보강재의 치수뿐만 아니라 킬럼을 이루는 여러 파라미터들을 설계변수로 새로이 설정하여 여러 가지 최적설계를 쉽게 수행해 볼 수 있다. 최적설계 결과를 실제 설계의 개선에 적용하기 위해서는 실제 작업환경을 잘 반영하여 실제와 가까운 경계조건을 설정하는 것이 중요하다.

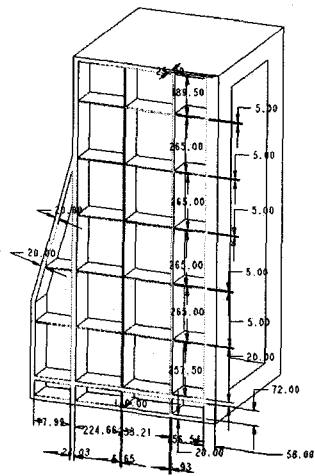


Fig. 8 Optimal model

이상에서 CAD 기반 최적설계 시스템인 DS/FDM의 전반적인 내용과 구성에 대해 설명하고 공작기계에 적용한 예제를 살펴보았다.

본 DS/FDM의 가장 큰 특징은 구조해석을 위한 상용 유한요소 해석 프로그램을 비롯한 최적화에 필요한 모든 요소가 3차원 파라메트릭 CAD 시스템인 Pro/ENGINEER를 기반으로 연계되었다는 점이다. 또한 유한 차분법 사용의 특성상 설계 민감도 해석이 해석적인 방법보다 강건하며 계산이 용이하여 보다 현실적인 문제에 적용이 가능하다. CAD 모델링과 설계변수 선정, 최적화 수행 및 결과의 확인이 모두 CAD 플랫폼에서 마우스 클릭으로 이루어지므로 설계 및 최적화 수행 시에 사용자의 편의성을 도모하였다.

본 연구에서 수행한 일련의 내용들은 빠른 속도로 변해 가는 설계환경에서 설계단계에서의 제품의 성능을 평가하고 보다 나은 설계를 위한 기본정보를 활용하는 데에 효과적일 것으로 기대된다.

### 후 기

본 연구는 과학기술부에서 주관하는 국가지정 연구실사업(동시공학설계개념에 의한 통합최적설계 시스템 개발)의 지원으로 수행되었음을 밝힌다.

- (1) Dan Deitz, 1997, "One-Stop Design and Analysis", Mechanical Engineering, ASME, Vol. 119, No. 2, February, pp. 62~65
- (2) B.M. Kwak and F. Uphaus, 1998, "An Integrated Structural Optimization System in Parametric CAD Environment Based on a Finite Difference Sensitivity Method", Proc. 1998 Korea-US Technical Conference on Strategic Technologies, October 22-24, Vienna, VA, USA, pp. 271~278
- (3) Jeong Ho Shin, Byung Man Kwak, 1999, "Integration of Commercial Codes from CAD to Optimization for Structural Design", Proceedings of the First China-Japan-Korea Joint Symposium on Optimization of Structural and Mechanical Systems, pp. 649~655
- (4) 한정삼, 광병만, 2000, "CAD 기반 최적설계 시스템인 DS/FDM의 개발과 공학 구조물에 대한 적용", 2000 대한기계학회 춘계 학술대회 논문집, pp. 720~724
- (5) 신정호, 광병만, 광기성, 한영근, 1999, "최적설계를 위한 상용프로그램의 통합에 대한 연구", 한국군사과학기술학회지, pp. 209~217
- (6) 신정호, 광병만, 2000, "데이터베이스를 활용한 공작기계의 구조해석 프로그램 개발" 2000 대한기계학회 추계 학술대회 논문집, pp. 446~451
- (7) 신정호, 광병만, 1998, "수평형머시닝 센터에 대한 구조해석 및 최적설계", 1998 대한기계학회 추계 학술대회 논문집, pp. 396~401