

# 모티프를 이용한 최적설계 통합환경 개발

## Development of Integrated Environment for Optimum Design Using Motif

임 오 강\* · 조 헌\*\* · 김 영 협\*\*\* · 이 병 우\*\*\*\*  
Lim, O-Kaung Cho, Heon Kim, Young-Hyun Lee, Byung-Woo

### 요 약

본 연구에서는 모티프(Motif), ANCI C, Fortran 언어를 사용하여 그래픽 입출력과 대화식 입력이 가능하며, 최적설계 수행에 필요한 모든 작업을 같이 병행할 수 있는 최적설계 통합환경을 개발하였다. 최적설계 통합환경은 전처리기(preprocessor), 최적설계부, 후처리기(postprocessor)로 구성하였다. 전처리기에서는 유한요소 모형의 구성에 필요한 정보를 입력한 후 사용자가 입력한 정보를 즉시 확인할 수 있도록 하였다. 최적설계부에서는 전처리기에서 입력한 유한요소 정보를 바탕으로 최적설계 매개변수를 정의하고, 해를 구하는 과정으로 구성하였다. 후처리기에서는 구조물의 변형, 응력, 목적함수의 변화 등의 해석 결과를 가시화 함으로써 결과에 대한 비교·검토를 용이하게 하였다.

### Abstract

An integrated environment for optimum design has been developed using Motif. The integrated environment is composed of the preprocessor, the postprocessor and the optimization part. The preprocessor is part of making a finite element model for optimum structural design and the postprocessor displays results of optimum design and the optimization part is the part which execute optimization. It is designed to reduce user's difficulties in structural optimum design. It used Graphic User Interface for the concurrent representation of various inputs and outputs through the dialog box, mouse and keyboard. Structural optimum design can be done easily through dialog box, menu, concurrent representation of modeling process and results of structural optimum design can be understood easily through stress contour, deformed model and graph of cost function.

**Keywords :** motif programming, optimum design, preprocessor, postprocessor, graphic user interface

\* 정회원 · 부산대학교 기계공학과, 기계기술연구소 교수  
\*\* 국방과학연구소, 연구원  
\*\*\* 현대중공업 조선해양연구소 진동소음연구실, 연구원  
\*\*\*\* 정회원 · 동의공전 자동차과, 전임강사

• 이 논문에 대한 토론을 1996년 12월 31일까지 본 학회에  
보내주시면 1997년 6월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

## 1. 서 론

공학 설계 과정은 반복 계산 과정 중에 설계변수, 목적함수, 제약 조건의 변화 등의 상당한 계산량을 포함하고 있다. 다양한 설계 정보를 효율적으로 감시하고 평가하기 위해서는 대화형의 기능을 가진 그래픽 사용자 인터페이스(graphic user interface, GUI)가 요구된다.

다양한 최적화 기법 및 상용 소프트웨어의 개발에도 불구하고 일반 사용자는 최적설계시 많은 어려움에 부딪힌다. 최적화 프로그램을 이용한 최적설계 수행 시에 사용자는 이용하는 최적설계 프로그램에 대한 전반적인 내용을 파악하고 있어야 하고, 프로그램이 필요로 하는 다양하고 복잡한 변수들을 입력해야 한다. 따라서, 각 알고리즘에 관한 명확한 이해 없이는 최적설계 수행에 여러 가지 어려움이 따른다. 이 외에도 복잡한 문제의 경우에는 사용자가 각 알고리즘으로부터 계산된 수치 결과만으로 문제의 특성을 파악하거나 결과의 타당성 여부를 판단하는 것은 쉽지 않다.

본 연구에서는 모티프(Motif), ANCI-C, Fortran 언어를 사용하여 그래픽 입출력과 대화식 입력이 가능하며, 최적설계 수행에 필요한 모든 작업을 같이 병행할 수 있는 최적설계 통합환경을 개발하였다. 모티프는 미국 OSF(Open Software Foundation)에서 만든 객체 지향의 개념으로 만든 그래픽 시스템<sup>1,2)</sup>이다. 전·후처리 프로그램 개발은 사용자 인터페이스 객체들의 집합인 모티프를 사용하였다. 모티프 위젯(widget)은 사용자가 원하는 풀다운 메뉴, 다이얼로그 박스, 스크롤 바, 푸시 버튼 등의 그래픽 사용자 인터페이스에 관한 모든 객체를 포함하고 있다.

최적설계 통합환경은 전처리기(preprocessor), 최적설계부, 후처리기(postprocessor)로 구성하였다. 전처리기에서는 유한요소 모형의 구성에 필요한 정보를 입력한 후 사용자가 입력한 정보를 즉시 확인할 수 있도록 하였다. 최적설계부에서는 전처리기에서 입력한 유한요소 정보를 바탕으로 최적설계 매개변수를 정의하고, 해를 구하는 과정으로 구성하였다. 사용한 최적설계 알고리즘은 반

복 이차 계획법<sup>3)</sup>을 사용하였다. 후처리기에서는 구조물의 변형, 응력, 목적함수의 변화 등의 해석 결과를 가시화 함으로써 결과에 대한 비교·검토를 용이하게 하였다.

## 2. 모티프를 이용한 GUI

### 2.1 이벤트 구동 방식

모티프는 GUI 개발을 위한 도구로써 X 윈도우 시스템에서 구동되는 응용 프로그램 개발에 이용된다. 모티프는 이벤트 구동 방식의 프로그래밍 환경<sup>4)</sup>을 갖는다. 모티프는 위젯(widget)이라고 불리는 객체들로 구성되어지며, 여러 가지 이벤트를 내부적으로 처리함으로써 프로그래머의 이벤트 처리에 대한 부담을 줄여 준다. 모티프는 풀다운 메뉴, 다이얼로그 박스, 스크롤 바, 푸시버튼, 토클버튼 등의 많은 위젯들을 포함하고 있다. 따라서 위젯들을 적절히 선택하여 프로그래밍 함으로써 구성하고자 하는 프로그램을 구현할 수 있다. 일반 도스용 응용 프로그램을 만들기 위해서는 풀다운 메뉴를 만들기 위해서는 방대한 양의 코드가 필요하나, 모티프에서는 이런 것들 모두가 함수로 구성되어 있기에 험구를 불러 쓰면 된다.

모티프는 이벤트 구동 방식을 갖는다. 이벤트 구동 방식에는 명령어 구동 방식과 메뉴 구동 방식이 있다. 명령어 구동 방식은 매우 간단한 형태의 인터페이스 이기는 하지만 사용자가 모든 명령어를 기억하고 있어야 하고, GUI가 지원되지 않는 단점이 있다. 메뉴 구동 방식은 사용자가 선택할 수 있도록 구성된 텍스터 기반의 메뉴 화면을 가진다는 데 있다. 이벤트 구동 방식은 풀다운 메뉴, 윈도우, 버튼, 스크롤 바(scroll bar) 같은 사용자 인터페이스 객체를 생성하는 함수들로 구성된 몇 가지 응용 프로그램 인터페이스(application program interface, API)로 구성되어 있다. 이벤트 구동 방식의 프로그램에서는 방대한 양의 이벤트들을 처리할 수 있는 부분이 필요하며, 이벤트를 하나하나 프로그래머가 처리한다는 것은 아주 어려운 일이다. 따라서, 이벤트에 대한 처리를 위한 방법이 필요하다. 본 프로그램에서는 이벤트

처리를 위하여 모티프를 이용하였다. 모티프 이벤트 구동 방식의 프로그래밍 환경을 구성함으로써 프로그래머로 하여금 이벤트 처리에 대한 어려움을 덜어 준다. 이벤트 구동 방식은 MS Windows, 매킨토시와 같은 그래픽 운영 체계에서 이용하는 구동 방식이다.

## 2.2 데이터 입력

본 연구에서 작성된 통합환경에서는 다이얼로그 박스를 이용한 입력, 키보드를 통한 입력, 마우스를 통한 입력의 세 가지 입력 방법을 사용할 수 있게 하였다. 이러한 다양한 입력 방법을 이용함으로써 사용자가 편리하게 최적설계를 수행할 수 있도록 하였다.

대화상자를 이용하면 몇 가지의 이점이 있다. 대화상자의 이용함으로써 사용자는 현재하고 있는 입력에 대한 정보를 자세히 알게 되고, 데이터를 입력할 때 발생될 수 있는 오류를 방지할 수 있다.

Fig. 1은 통합환경에서 입력에 사용되는 기본적인 대화상자이다. A는 화살표 버튼, B는 텍스트 필드, C는 숫자 버튼(number button)이다. 화살표 버튼에서는 초기치와 상한과 하한, 증분량을 지정하여 버튼을 누름으로써 변수를 변화시킬 수 있다. ‘TEXT’는 변수의 이름을 입력할 부분이고, 우측에 있는 □과 ▶이 화살표 버튼이다. 화살표 버튼은 주로 정수로 이루어져 있으며, 변수의 변화 폭이 크지 않은 경우에 주로 이용한다. 텍스트

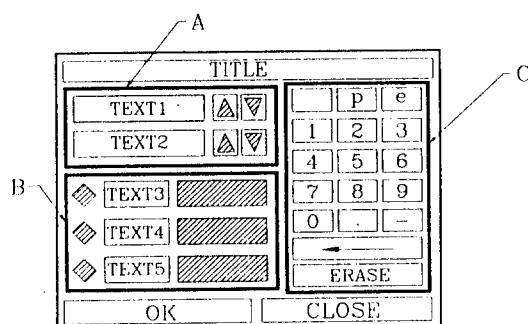


Fig. 1 Dialogue box

필드는 설계변수의 상한이나 하한이 정해져 있지 않은 실수 데이터의 입력이 요구될 경우 주로 이용한다. 텍스트 필드는 토큰버튼과 변수 이름, 데이터가 입력될 부분으로 이루어져 있다. Fig. 1에서 토큰버튼은 ‘◆’로 표시된 부분이고, 변수 이름은 ‘TEXT’로 표시된 부분에 쓰여지고 입력하는 데이터는 우측에 있는 ‘■■■’에 쓰여지게 된다. 텍스트 필드를 이용할 때는 먼저 입력할 변수를 토큰버튼을 이용하여 선택한다. 그리고, 키보드를 이용하여 데이터를 입력하거나, 마우스를 이용하여 숫자 버튼을 눌러서 데이터를 입력한다.

## 3. 통합환경 구성

### 3.1 통합환경 구조

최적설계용 통합환경의 구성은 유한요소법을 바탕으로 한 구조 최적설계에 맞도록 마우스로 클릭하면서 절점이나 요소의 생성 또는 결과들을 볼 수 있도록 하였다. 모티프에 있는 풀다운 메뉴, 스크롤 바, 푸시 버튼 등의 기능을 가지고 전문 지식

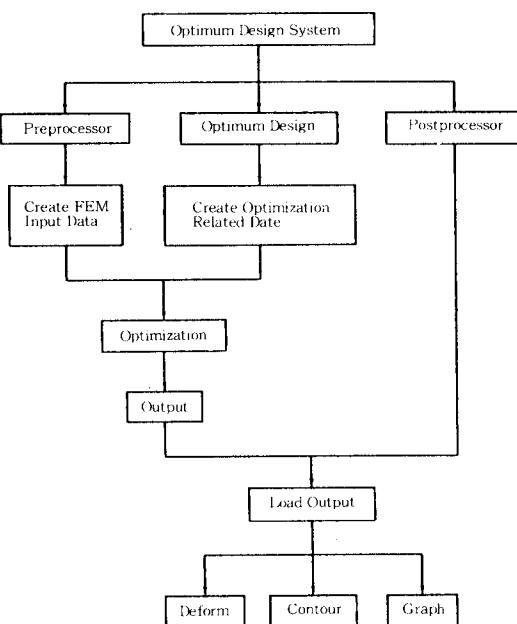


Fig. 2 Flow diagram for the integrated environment

이 없는 사용자도 효율적으로 운용이 가능하도록 구성하였는데, 최적설계 통합환경의 구성도가 Fig. 2에 나타나 있다. 전처리기에서는 공학 문제를 수학적으로 모형화하는 유한요소 모델링부로 써 모델링 과정에 대한 입력부와 유한요소 모형을 가시화 하는 부분으로 구성하였다. 최적설계부에서는 최적설계 수행과 관련된 변수들을 설정하는 부로 구성하였다. 후처리기는 변형, 응력 선도 등의 구조해석 결과를 가시화하고, 반복회당 목적함수의 변화 등의 최적설계 결과를 그래프로 출력하는 기능으로 구성하였다.

### 3.2 풀다운 메뉴 구성

Fig. 3은 통합환경의 초기 화면이다. 초기 화면은 풀다운 메뉴바, 그림 영역, 상태창, 버튼, 명령어 입력 영역(명령어 history 영역)으로 구성하였다. 이 중 풀다운 메뉴바, 버튼, 명령어 입력 영역은 입력부이고, 그림 영역과 상태창은 출력부이다.

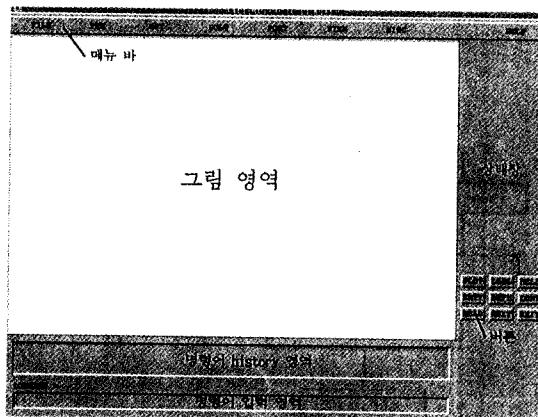


Fig. 3 Initial view of the integrated environment

풀다운 메뉴는 FILE, PRE, OPT, SOLVE, POST, VIEW, MISC, HELP의 세부 메뉴로 다시 나누어진다. 풀다운 메뉴의 구조가 Fig. 4에 나타나 있다. 버튼은 자주 사용하는 메뉴를 빠르게 사용할 수 있도록 하기 위한 것으로 프로그램에 익숙한 사용자를 위한 것이다. 명령어 입력 영역은

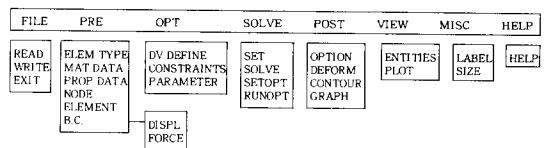


Fig. 4 Full-Down menu

키보드를 통한 입력을 위한 영역으로 입력 부분과 history 부분으로 구성된다. 입력부는 명령어를 키보드로부터 받아들이는 부분이고, 명령어 history 영역은 입력된 명령어를 보여줌으로써 같은 명령을 반복 입력하는 오류를 막아 주며 같은 명령을 여러 번 사용할 경우 편리하게 사용된다.

그림 영역은 그림을 출력하는 부분으로 전처리기에서는 모델을 그리는 데 이용되고, 후처리기에서는 등고선, 그래프, 모델의 변형 후의 모습을 그리는 데 이용된다. 상태창은 후처리기에서 등고선이나 모델의 변형 모습을 그릴 때 최대 응력이나 최대 변형량을 출력하는 데 이용된다.

### 3.3 전처리기

전처리기는 요소 선택, 재료 물성치, 요소 물성치, 절점, 요소 생성, 경계조건 등의 유한요소 모델링에 필요한 모든 정보를 입력받고, 이상의 결과를 가시화 하는 과정으로 구성하였다.

요소 선택부에서는 구조 요소 중에서 트러스, 보, 평면 응력, 판 요소 중 하나를 선택할 수 있게 하였다. 재료 물성치 입력부에서는 요소 선택부에서 선택한 요소에 따라 재료의 물성치를 입력하며, 탄성계수, 프와송비, 밀도 등을 입력한다. 요소 물성치 입력부에서는 요소 선택부에서 선택한 요소에 따라 단면적, 단면의 높이, 관성 모멘트 등을 입력한다. 절점 생성부에서는 절점 번호와 절점의 위치를 입력해서 절점을 생성하며 절점 생성과 동시에 그래픽으로 절점 생성 과정을 가시화 한다. 요소 생성부에서는 미리 생성된 절점을 이용하여 요소를 생성한다. 요소 생성부에서도 절점 생성부에서와 같이 요소 생성 과정을 그래픽으로 가시화 한다. 그리고, 사용자 편의를 위하여 요소 생성시 절점을 마우스로 화면에서 바로 절점 선택

이 가능하다.

경계조건 구성부에서는 변위 경계조건과 힘 경계조건을 결정한다. 변위 경계조건은 6각형을 이용하여 6자유도를 모두 평면상에서 나타낼 수 있도록 하였다. Fig. 5는 변위 경계조건의 표시 방법을 나타낸 것이다. x, y, z는 각각 x, y, z 변위를 나타내고, rotx는 x 축에 대한 회전 변위, roty는 y 축에 대한 회전 변위, rotz는 z 축에 대한 회전 변위를 나타낸다. 변위 경계가 고정된 자유도는 그 자유도에 해당하는 부분을 채움으로써 경계를 나타낸다.

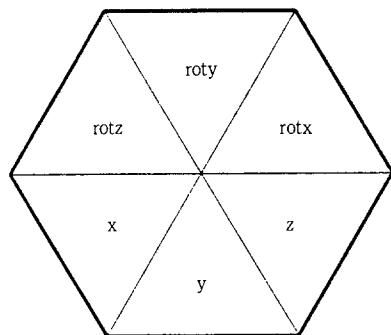


Fig. 5 Display of the boundary condition

### 3.4 최적설계

최적설계에서 사용하고 있는 알고리즘에는 반복 이차 계획법, 경사·투영법과 같이 비선형인 목적함수와 제한 조건식을 선형화하여 원래 수식화된 형태로 문제를 푸는 것이 있다<sup>5)</sup>. 한편, 제약조건식이 존재하는 경우에는 별차 함수법과 같은 비제약 최적화 문제로 전환을 통해 푼다. 여러 가지 최적화 알고리즘 중 반복 이차계획법이 많이 사용되고 있다. 반복 이차계획법이 많이 사용되는 이유는 어떤 시작점에서 출발해도 해에 수렴한다는 것이 증명되었고, 빠른 수렴률을 갖고 있기 때문이다.

PLBA(Pshenichny-Lim-Belegundu-Arora) 알고리즘<sup>6)</sup>은 반복 이차 계획 중의 하나로써 해시안 수정과정과 잠재집합방책을 포함한 것으로 이전의 알고리즘에 비해서 효율성과 신뢰성이 우수하

다. 방향 탐색에 필요한 설계 민감도 해석<sup>7)</sup>은 유한차분법을 이용하였다. 유한차분법은 다음 식에 의하여 계산된다.

$$\Delta\phi_i = \frac{\phi_i(x+\Delta x) - \phi_i(x)}{\Delta x} \quad (1)$$

식 (1)에서  $\phi_i(x+\Delta x)$ 는 변동된 점에서의 함수값이고,  $\phi_i(x)$ 는 원래 점에서의 함수값이다.  $\Delta x$ 는 이동 거리를 나타낸다.

Fig. 6은 통합환경에서 이용하는 최적설계부에 대한 흐름도이다. 그림에서 'I/O DATABASE'는 최적설계 수행 과정에서 발생하는 데이터를 나타낸다.

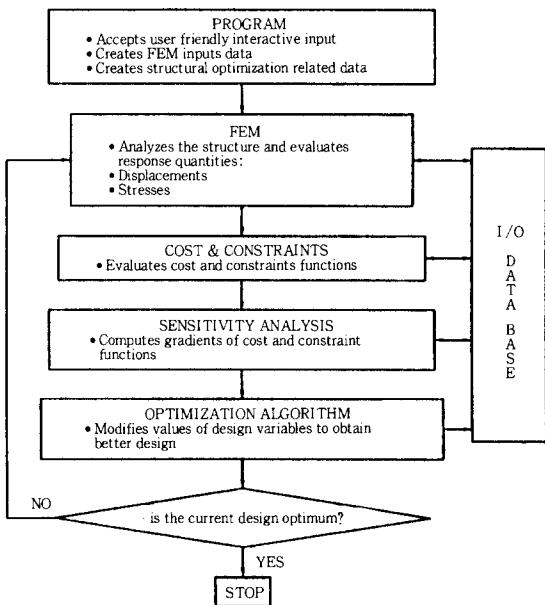


Fig. 6 Flow Diagram of the optimum design

### 3.5 후처리기

구조 해석과 최적설계를 수행해서 생성되는 결과 파일은 많은 데이터로 이루어져 있기 때문에 사용자가 결과를 파악하는데 많은 어려움이 있다. 후처리기는 이러한 사용자의 어려움을 감소시켜서 사용자가 결과를 쉽게 파악할 수 있도록 하는

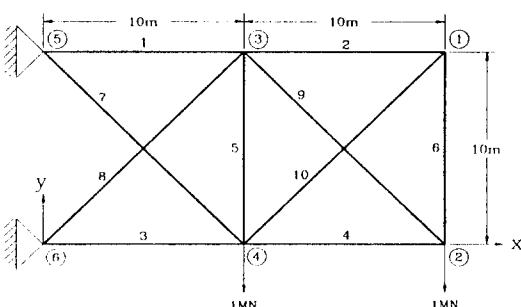
데 주안점을 두었다.

후처리기는 모델 변형, 응력 선도, 그래프로 구성하였다. 모델의 변형부에서는 구조 해석 결과를 이용하여 모델의 변형된 모습을 화면에 나타낸다. 원래 모델은 실선으로 나타내고, 변형된 모델은 점선으로 나타내서 모델의 변형된 모습을 원래 모델과 비교할 수 있도록 하였다. 응력 등고선도부는 평면 응력 요소의 경우에만 응력 등고선도를 이용할 수 있다. 그래프부에서는 최적설계 결과 파일을 이용하여 반복회당 목적함수 변화를 그래프로 나타낸다.

#### 4. 통합환경을 적용한 예제

##### 4.1 10-부재 트러스

부재 10개로 구성된 외팔보 트러스<sup>8)</sup>가 Fig. 7에 나타나 있다. 본 문제에 사용한 재료의 물성치는 탄소강을 기준으로 설정하였는데, 탄성계수는 200GPa, 밀도는 77kN/m<sup>3</sup>이다. 설계변수는 각 요소의 단면적으로써, 설계변수의 초기치는 0.01m<sup>2</sup>이고, 설계변수의 하한값은 0.0001m<sup>2</sup>이며, 상한값은 1m<sup>2</sup>이다. 제한 조건식은 요소 응력과 절점에서의 변위를 제한조건으로 설정하였는데, 허용변위량은  $\pm 0.05$ m, 인장과 압축에 대한 허용응력은  $\pm 10$ MPa으로 하였다.



Key  
 (1) Node number  
 1 Element number

Fig. 7 Ten member cantilever truss

부재 10개로 구성된 트러스를 전처리 기능을 이용하여 모델링 하였는데, Fig. 8에 나타나 있다. Fig. 9는 구조 해석한 후 변형된 모습을 나타낸 것이다. 실선은 원래 모델을 나타낸 것이고 점선은 변형된 모델을 나타낸 것이다. 상태창을 통하여 x, y방향의 최대 변형이 모두 2번 절점에서 나타났다.

반복 이차 계획 알고리즘을 이용하여 최적설계 문제를 풀려면 초기에 몇 개의 매개변수에 대한 값을 지정해 주어야 한다. 별처 매개변수는 설계 점을 유용영역(feasible region)의 경계에 위치하도록 세어하는 변수이다. 활성화 제한조건식의 폭은 잠재 집합을 결정하는데 사용되며, 이 값이 커

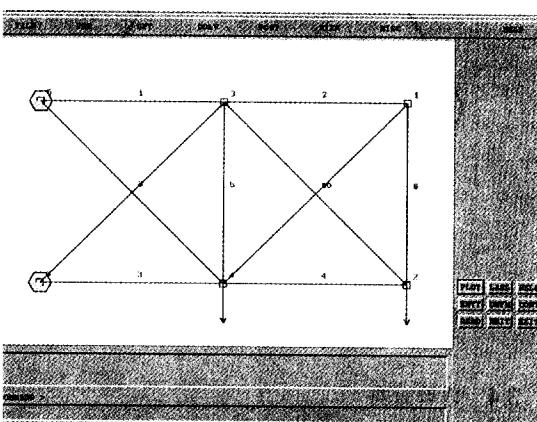


Fig. 8 Finite element model of the truss

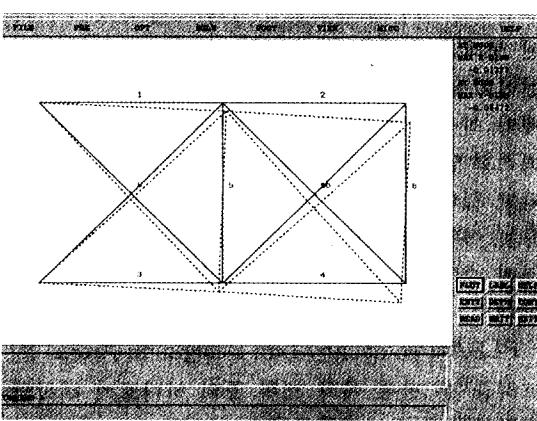


Fig. 9 Deformed shape of the truss

지면 많은 제한 조건식이 활성화되어진다. 최적해의 정확도는 수렴 기준으로 사용되며, 선탐색의 정확도는 이동 거리를 결정하기 위하여 사용되는 기준이다.

본 문제에서는 별차 매개변수를 1.0 활성화 한 조건식의 폭을 0.5, 최적해의 정확도를  $1.0 \times 10^{-4}$ , 선탐색의 정확도를  $1.0 \times 10^{-4}$ 으로 선택하여 최적설계를 수행하였다. 최적설계 결과 목적함수 값은 21회 반복 계산 후에 60.61 kN에 수렴하였다. 반복회당 목적함수 변화 값을 Fig. 10에 그래프로 도시하였다.

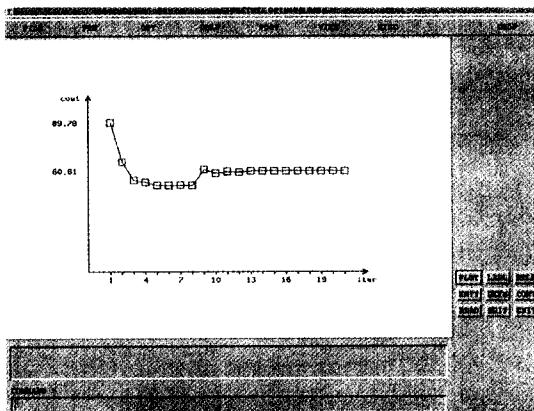


Fig. 10 Weight history for the truss

#### 4.2 단순 지지된 두꺼운 보

단순 지지된 두꺼운 보가 Fig. 11에 나타나 있다. 보의 길이와 높이가 각각 2m, 1m이고, 100 MN/m의 분포 하중을 받고 있다. 설계에 사용한 데이터는 탄성계수가 200GPa, 프와송비가 0.3, 밀도가 77kN/m<sup>3</sup>이다.

유한요소 해석은 4절점 평면 응력 요소를 이용하여 해석하였다. 4절점 평면 응력 요소는 각 절점 당 2 자유도를 가진다. 본 문제에 대한 유한요소 모델은 형상이 대칭이므로 경계조건을 이용하여 반쪽만 모델링 하였다. 분포 하중은 각 절점당의 집중 하중으로 변환하였는데, 21번과 25번 절점에는 12.5 MN이 가해지고, 22~24번 절점에는 25 MN이 가해진다.

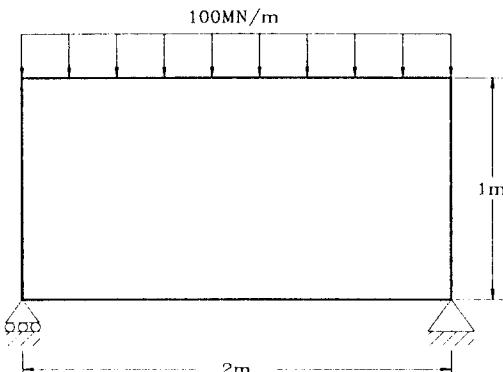


Fig. 11 Simply supported thick beam

설계변수는 각 평면 응력 요소의 두께로써 초기치는 0.1m이며, 설계변수의 하한값은 0.001m, 상한값은 1m로 설정하였다. 따라서 이 문제의 설계 변수는 모두 16개이다. 제한조건은 각 절점에서의 등가 응력값을 계산하여 응력 제한식으로 구성하였는데 등가 응력식은 다음과 같다.

$$\sigma_{eq} = (\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau_{xy}^2)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

식 (2)에서  $\sigma_x$ 와  $\sigma_y$ 는 수직 응력이고,  $\tau_{xy}$ 는 전단응력이다. 응력 제한식에서 허용 응력은 10MPa로 설정하였다.

Fig. 12에서는 통합환경의 전처리 기능을 이용

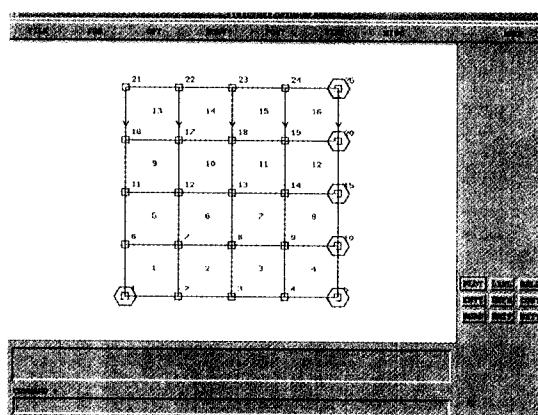


Fig. 12 Finite element model for the beam

하여 모델링한 모습을 도시하였다. Fig. 13은 변형 전과 변형 후의 거동을 나타내었다.

본 예제에서는 별칙 매개변수를 1.0 활성화 제한 조건식의 폭을 0.5, 최적해의 정확도를  $1.0 \times 10^{-4}$ , 선탐색의 정확도를  $1.0 \times 10^{-4}$ 으로 선택하여 최적설계를 수행하였다. 최적설계 수행 결과 목적함수값은 반복 계산 21회 후에 2.108 kN에 수렴하였다. 반복회 당 목적함수의 변화를 Fig. 14에 나타내었다. Fig. 15와 Fig. 16은 각각 초기 모델과 최적화 모델의 응력 등고선도이다. 두 그림을 비교해 보면 최적화 모델의 응력 분포가 초기 모델에 비해서 균일하게 나타났다.

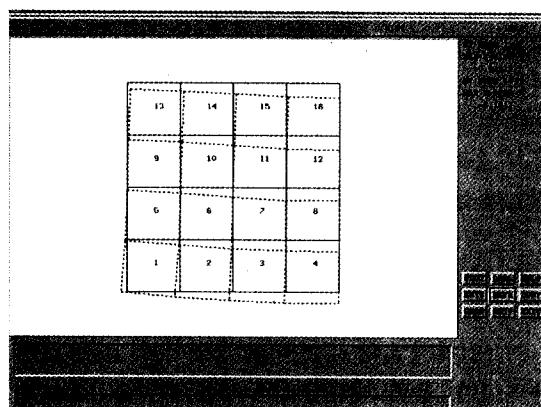


Fig. 13 Deformed shape of the beam

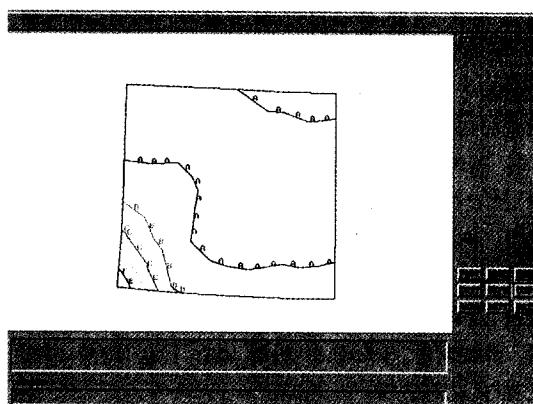


Fig. 15 Stress contour of the initial model

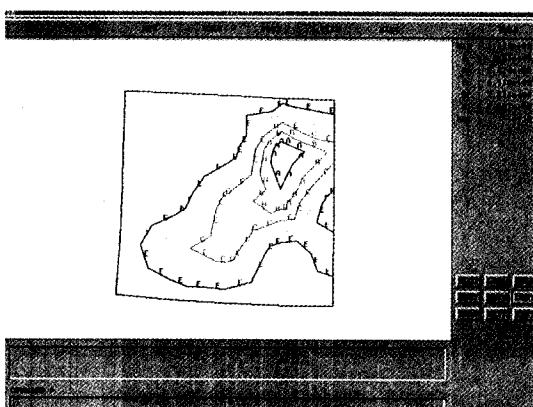


Fig. 16 Stress contour of the optimum model

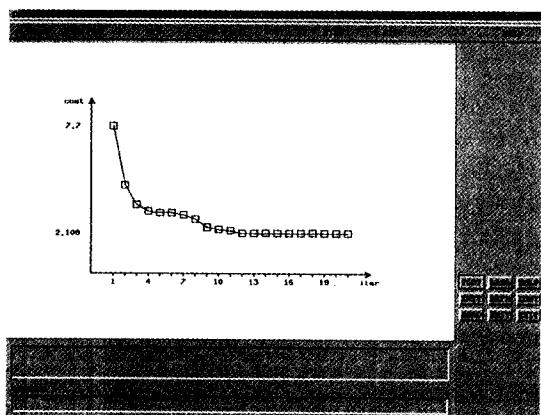


Fig. 14 Weight history of the beam

## 5. 결 론

본 연구에서는 Fortran 언어, C언어, 모티프를 이용하여 X 윈도우에서 자동하는 구조물의 최적설계를 위한 전·후처리 통합환경을 개발하였다. 통합환경은 구조 최적설계를 수행할 때 사용자가 겪게 되는 여러 가지 어려움을 대화 상자, 메뉴 등의 사용자 인터페이스들과 구조물의 유한요소 모델링의 가시화를 통하여 감소시켜 줄 수 있다. 또한 최적설계 결과를 가시화하여 사용자가 최적설계 결과를 쉽게 파악할 수 있도록 하였다. 본 연구의 내용을 요약하면 다음과 같다.

1) 구조 최적설계를 위한 통합환경을 개발하여 최적설계에 필요한 여러 가지 정보의 입력을 쉽게 할 수 있고, 다양한 형식의 구조물에 대하여 설계 가능하도록 하였다.

2) 전처리기에서 모델링에 필요한 여러 가지 정보들을 대화상자, 마우스, 키보드를 통하여 입력 가능하게 하고 모델링 과정을 가시화 함으로써 사용자가 모델링 작업을 쉽게 할 수 있도록 하였다.

3) 후처리기에서는 최적설계 결과로부터 모델의 변형된 모습과 응력에 대한 등고선도와 목적함수를 그래프로 가시화 함으로써 최적설계 결과를 쉽게 파악할 수 있도록 하였다.

### 참 고 문 헌

- 셈틀지기, C언어 사용자를 위한 *MOTIF PROGRAMMING*, 에스컴, 1994.
- 한순홍, 이동곤, 이경호, “Motif를 이용한 선박개념설계 시스템용 그래픽 사용자 인터페이스의 개발”, 대한기계학회지, 제32권, 제2호, 1992, pp. 159-166.

- Lim, O. K., and Arora, J. S., “An Active Set RQP Algorithm for Engineering Design Optimization”, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 57, 1986, pp. 51-65.
- Heller, D., and Ferguson, P. M., Motif Programming Manual for OSF/Motif Release 1.2, O'Reilly & Associates, 1991.
- Belegundu, A. D., and Arora, J. S., “A Study of Mathematical Programming Methods for Structural Optimization, Part I :Theory; Part II :Numerical Aspects”, *Int. J. for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 21, No. 9, 1985, pp. 1583-1624.
- Arora, J. S., *Introduction to Optimum Design*, McGraw-Hill, 1991.
- Haug, E. J., Choi, K. K., Kornkov, V., *Design Sensitivity Analysis of Structural Systems*, ACADEMIC PRESS, 1986.
- Haug, E. J., and Arora, J. S., *Applied Optimal Design*, John Wiley & Sons, New York, 1979.

(접수일자 : 1996. 2. 9)