

<論 文>

# 설계 및 가공공정계획의 전산자동화에 관한 연구

조선휘\* · 이장무\* · 이교일\* · 정진태\*

(1985년 8월 10일 접수)

## A Study on the Computer Aided Design and Process Planning

Sun Whi Cho, Jang Moo Lee, Kyo Il Lee, and Jin Tae Chung

**Key Words:** Computer Aided Design(전산기이용설계), Computer Aided Process Planning(전산기이용공정계획), Finite Element Analysis(유한요소해석), Axisymmetric Shell(축대칭셸), Axiomatic Approach(공리적 접근방법)

### Abstract

A computer aided design package is developed that can perform such functions as computer aided inputing/drafting/modifying/outputing, automatic determination of volumetric properties, finite element analysis and post processing for the design of axisymmetric shell with slight asymmetry. In order to make the design modification easy and to accelerate the computation time for analysis, developed is a new finite element analysis which utilizes an approximate solution method and a conical ring element with slight asymmetry. Also proposed is a computer aided process planning algorithm which is based on the axiomatic approach.

### 1. 서 론

설계 및 가공공정계획의 전산화는 전산기이용설계(computer aided design) 및 전산기이용공정계획(computer aided process planning)으로 불리우며 이 분야에 관하여 많은 논문이 발표되었고<sup>(1-5)</sup> 또한 많은 상용 소프트웨어 및 터언키(turn key) 시스템이 보급되고 있다. 전산기이용설계에 있어서 종래의 연구는 일반적인 기하학적 모델링 알고리즘의 개발, 도형의 고속처리, 최적설계 알고리즘의 개발, 체적특성치의 고속계산<sup>(6)</sup> 등에 주력하였다. 그러나, 최근에는 기하학적 모델링과 유한요소해석의 결합<sup>(7)</sup>, 기하학적 모델링과 전산기 이용제조와의 결합, 또한 이들과 최적화 기

법 또는 인공지능기법의 결합<sup>(8)</sup>과 같이 여러가지의 설계수단이 총합(integrate)되어 금형이나 주형과 같은 특정 부류의 설계, 제작 문제에 응용할 수 있는 소프트웨어의 개발에 더 많은 노력이 경주되고 있다. 전산기이용공정계획에 있어서 종래의 연구는 절삭 또는 가공표준의 설정, 각종 생산가공 자료의 데이터 뱅크화 및 경험적 지혜에 의존한 의사결정의 전산화라는 범주를 벗어나지 못하고 있다<sup>(9)</sup>. 이와같은 문제점과 관련하여 설계 및 생산을 기예(art)의 수준으로부터 과학의 수준으로 이끌어 올리려는 시도로서 공리적 접근방법(axiomatic approach)이 약간의 가능성을 보여주고 있다<sup>(10)</sup>.

본 연구에서는 미소한 비대칭 요소를 갖는 축대칭 셸 구조물(중형구조물 또는 용접된 압력용기등)의 전산기 이용 도면입력/수정/출력, 체적특성치의 자동결정, 근사 고속 유한요소해석 및 출력을 시각화하는 일관

\*정회원, 서울대학교 공과대학 기계설계학과

작업을 수행할 수 있는 전산기이용설계 알고리즘을 개발하고 생산가공에 대한 공리적 접근방법을 전산화하는 전산기이용 공정계획 알고리즘에 대한 기초적인 연구를 행하였다.

## 2. 도면작성, 수정 및 체적특성치의 계산의 자동화

미소 비대칭요소(문양, 조각등)를 갖는 축대칭 셀인 한국종의 설계과정은 아래와 같다.

- (1) 종의 기본사양(총중량, 높이, 중하부의 직경, 문양 및 조각)의 결정
- (2) 기본사양, 예술적인 고려, 기존 종의 형상에 대한 자료 등을 고려한 기본설계(외곽 윤곽선 및 두께의 분포 결정)
- (3) 중량과 타점의 최적높이(질량중심 및 종의 힌지축에 대한 질량 관성 모멘트의 함수)의 계산
- (4) 중량을 기본사양과 동일하게 하기 위한 도면수정
- (5) 종체의 응력해석, 진동해석 및 음향해석
- (6) 종의 안정성 및 음향특성을 높이기 위한 설계변경[(2)의 단계로]

이상의 설계과정을 전산자동화하기 위하여 VAX 11/750 미니컴퓨터, Calcomp 6000 디지털타이저, Tektronix 4114A 그래픽터미널, Calcomp 960 플롯터를 하드웨어로 이용하여 도면작성, 수정, 체적 특성치를 계산하고 종체의 진동을 해석하며 출력을 시각화하는 소프트웨어를 개발하였다.

기본 설계의 도면은 디지털타이저로 미니컴퓨터에 자동 입력시키거나 수기로 직접 입력시킬 수 있도록 하였다. 입력된 데이터를 참고문헌(15)에 요약된 각 분할부에 대해 일련의 큐빅 스플라인(cubic spline)을 사용하는 방법에 의하여 보간하여 종 외면과 내면의 윤곽선을 그리고 기본 치수를 표시한후 구조물의 체적특성치 계산 알고리즘에 의하여 총중량, 질량중심, 질량 관성 모멘트, 타점중심을 계산하고 그 결과를 도면에 표시하도록 하였다.

체적의 특성치는 큐빅 스플라인에 다이버젠스 정리(divergence theorem)를 적용시켜서 구하는 방법도 시도하였으나 유한요소해석의 절점들과 직접 적분법을 이용하는 것이 더 편리하였다. 계산된 총중량이 기본사양과 다르면 축척계수(scale factor)를 이용하여 전체체계를 비례적으로 증감하거나 높이 또는 직경을 조정하여 반복 시행착오적으로 도면을 수정할 수 있도록 하였다.

## 3. 고효율 유한요소해석 프로그램 알고리즘

유한요소해석이 도면처리, 설계변경 및 최적화와 관련하여 수많은 반복계산을 수행할 경우 막대한 계산시간이 소요된다. 특히 미소한 비대칭 요소를 갖는 축대칭 셀인 한국종은 비대칭에 의한 맥놀이 특성이 매우 중요하므로 근접한 고유진동수들을 정확히 계산할 수 있어야 한다. 범용 유한요소해석 프로그램인 SAP VI, ADINA 또는 NASTRAN 등의 기존 유한요소(평판/셀요소등)로 종의 맥놀이 특성을 정확히 계산하기 위하여는 원주 방향으로 균일한 분할이 요구되므로 통상 300 개 이상의 요소가 필요하며 막대한 계산시간이 소요된다. 본 연구에서는 약간의 비대칭성이 모우드 형상에 영향을 미치지 않고 모우드 형상의 회전에만 영향을 미친다는 가정으로 미소 비대칭이 있는 축대칭 원추 링(ring) 요소를 새로이 개발하여 종의 맥놀이 특성을 신속하고 정확하게 계산하고 자동제도와 유한요소해석을 일관하게 수행할 수 있도록 하였다. 또한 출력된 고유진동수와 모우드 형상도 자동도시할 수 있도록 하였다. 본 연구에서는 1차적으로 비대칭 요소(문양, 조각등)가 90° 또는 180°로 배치된 경우만을 고려하였다. 이 경우에는 인접한 맥놀이 모우드의 저차 모우드의 절선(nodal line)이 비대칭 요소의 위치와 일치하게 되며 고차 모우드의 절선은 저차 모우드의 절선과 45°(모우드의 절선이 4개인 경우) 또는 30°(모우드의 절선이 6개인 경우)에 위치하게 된다<sup>(11)</sup>. Fig. 1은 비대칭이 있는 원추 링 요소(비대칭은 임의의 자오선상에 90°의 간격으로 배열 되었다고 가정)를 보이고 있으며 Fig. 2에는 절점원과 종체를 도시하였다. 요소  $i$ 에 대하여 절점원에서 축방향, 접선방향, 반경방향의 변위와 자오선 방향으로의 반경방향의 변위의 변화율  $U_i, V_i, W_i, \beta_i$ 를 맥놀이 진동수를 고려하여 Fourier 급수로 표시하면 다음과 같다<sup>(16)</sup>.

$$U_i = q^0_{4i-3} + \sum_{j=1}^n q^j_{4i-3} \cos j \left( \theta - \frac{\pi}{2j} \alpha - \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \right)$$

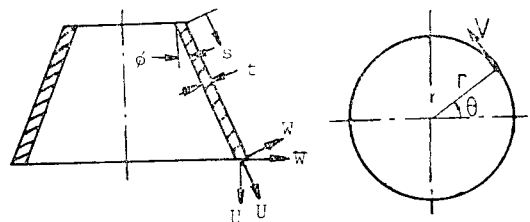


Fig. 1 Coordinates of conical ring element

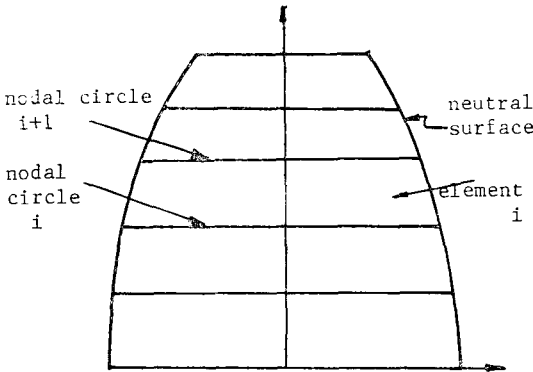


Fig. 2 Construction of elements and nodal circles

$$\begin{aligned}
 & + \sum_{j=1}^m q^{i_{4i-3}} \sin j \left( \theta - \frac{\pi}{2j} \alpha - \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \right) \\
 V_i &= q^{0_{4i-2}} + \sum_{j=1}^m q^{i_{4i-2}} \sin j \left( \theta - \frac{\pi}{2j} \alpha - \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \right) \\
 & + \sum_{j=1}^m q^{-j_{4i-2}} \cos j \left( \theta - \frac{\pi}{2j} \alpha - \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \right) \\
 W_i &= q^{0_{4i-1}} + \sum_{j=1}^m q^{i_{4i-1}} \cos j \left( \theta - \frac{\pi}{2j} \alpha - \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \right) \quad (1) \\
 & + \sum_{j=1}^m q^{-j_{4i-1}} \sin j \left( \theta - \frac{\pi}{2j} \alpha - \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \right) \\
 \beta_i &= q^{0_{4i}} + \sum_{j=1}^m q^{i_{4i}} \cos j \left( \theta - \frac{\pi}{2j} \alpha - \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \right) \\
 & + \sum_{j=1}^m q^{-j_{4i}} \sin j \left( \theta - \frac{\pi}{2j} \alpha - \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \right)
 \end{aligned}$$

식 (1)에서  $i$ 는 절점원,  $j$ 는 조화수(harmonic number)를 나타내고  $\alpha$ 는 축대칭인 셸 구조물에 비대칭 요소가 1개 혹은 서로  $90^\circ$  떨어져 있을 때 맥놀이 진동수에 관계되는 인수이다.  $\alpha$ 가 0일때 고차 진동수를 나타내고,  $\alpha$ 가 1일때 저차 진동수를 나타낸다. 또한  $-(\theta_1 + \theta_2)/2$ 는 비대칭 요소가  $\theta_1$ 과  $\theta_2$ 에 걸쳐 있을 때 적분기점을 비대칭 요소의 중심으로 이동시키기 위해서 삼입한 각도이다. 이하의 적절한 유도과정은<sup>(12)</sup> 별도의 논문에서 자세하게 다루게 된다. 요소의 강성 및 질량행렬  $[K^e]$ 와  $[M^e]$ 의 계산은  $\theta$  방향으로 먼저 적분하고  $r$  방향은  $s$ 로 치환하여 피적분 함수를  $s$ 에 관한 함수로 표시한 후 Gauss quadrature에 의하여 적분한다.

$$\begin{aligned}
 [K^e] &= \int_A [B]^T [H_B] [D] [H_B] [B] dA \\
 &= \int_0^{2\pi} \int_0^{r_i} [B]^T [H_B] [D] [H_B] [B] R ds d\theta \quad (2)
 \end{aligned}$$

여기서,  $[H_B]$ ,  $[B]$ ,  $[D]$ 는 각각 변환행렬, 변형을

변위행렬, 응력-변형을 행렬을 뜻하며  $R$ 은 원주 요소의 반경을 나타낸다.

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{S}{L} \quad (L \text{은 원주요소의 옆면 길이}) \text{로 놓으면} \\
 [K^e] &= \frac{L}{2} \int_0^{2\pi} \int_{-1}^1 R [B]^T [H_B] [D] [H_B] [B] ds d\theta \\
 &= \frac{L}{2} \int_{-1}^1 R [B]^T \left( \int_0^{2\pi} [H_B] [D] [H_B] d\theta \right) [B] dp \quad (3)
 \end{aligned}$$

같은 방법으로

$$\begin{aligned}
 [M^e] &= \int_V [S]^T [H_S] [H_S] [S] dV \\
 &= \frac{1}{2} \int_{r_i}^{r_i+t} \int_0^{2\pi} \int_{-1}^1 \rho R [S]^T [H_S] [H_S] [S] dp d\theta dr
 \end{aligned}$$

여기서  $r_i$ 는 내경,  $t$ 는 두께를 나타낸다.

두께  $t$ 가  $s$ 의 1차 함수로 표시될 수 있으므로  $[D]$ 는  $s$ 에 관한 3차 함수이다. 그리고  $[B]$ 와  $[S]$ 의 최고 차수는 각각 3차이고  $R$ 은  $s$ 의 1차 함수이다. 따라서  $[K^e]$ 와  $[M^e]$ 의 피적분 함수는 각각  $s$ 의 10차와 7차함수이므로 Gauss quadrature에서 적분점을 5개로 택하였다. Fig. 3은 비대칭 요소가 한개인 경우의 계산에로서 I부분은 축대칭의 부분을, II부분은 비대칭 요소를 나타내고 있다. 식 (3) 및 식 (4)에 Fig. 3의 값을 적분구간별로 대입하여 적분하면 다음과 같은 결과를 얻는다.

$$\int_0^{2\pi} [H_B] [D] [H_B] d\theta = \int_I [H_B] [D] [H_B] d\theta + \int_{II} [H_B] [D] [H_B] d\theta \quad (5)$$

$$\begin{aligned}
 \int_I [H_B] [D] [H_B] d\theta &= \int_0^{\theta_1} [H_B] [D] [H_B] d\theta \\
 &+ \int_{\theta_2}^{2\pi} [H_B] [D] [H_B] d\theta \\
 &= \pi [D_I] - [T_B] [D_I] \quad (6)
 \end{aligned}$$

여기서, I는 밀도  $\rho_1$ 과 두께  $t_1$ 의 상태를 나타내며,

$$[T_B] = \begin{pmatrix} A+B & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & A+B & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A-B & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & A+B & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & A+B & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A-B \end{pmatrix} \quad (7)$$

단,

$$A = \frac{\theta_2 - \theta_1}{2},$$

$$\begin{aligned}
 B &= \left\{ \sin 2j \left( \theta_2 - \frac{\pi}{2j} \alpha - \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \right) - \sin 2j \left( \theta_1 - \frac{\pi}{2j} \alpha - \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \right) \right\} / 4j
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \int_{II} [H_B] [D] [H_B] d\theta &= \int_{\theta_1}^{\theta_2} [H_B] [D] [H_B] d\theta \\
 &= [T_B] [D_{II}] \quad (8)
 \end{aligned}$$

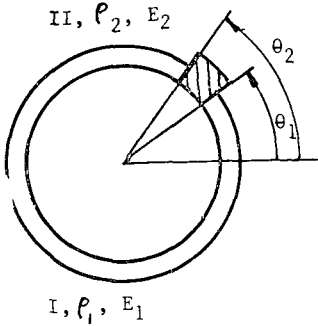


Fig. 3 Element with asymmetry

여기서 II는 밀도  $\rho_2$ 와 두께  $t_2$ 를 나타낸다. 식 (3), 식 (6) 및 식 (8)로부터

$$\begin{aligned}
 [K^*] &= \frac{\pi L}{2} \int_{-1}^1 R_1 [B]^T [D_T] [B] dp \\
 &\quad - \frac{L}{2} \int_{-1}^1 R_1 [B]^T [T_B] [D_I] [B] dp \\
 &\quad + \frac{L}{2} \int_{-1}^1 R_1 [B]^T [T_B] [D_{II}] [B] dp \\
 &= \frac{L}{2} \sum_{k=1}^5 \left[ \pi R_1(h_k) [B(h_k)]^T [D_I(h_k)] [B(h_k)] a_k \right. \\
 &\quad \left. - R_1(h_k) [B(h_k)]^T [T_B] [D_I(h_k)] [B(h_k)] a_k \right. \\
 &\quad \left. + R_2(h_k) [B(h_k)]^T [T_B] [D_{II}(h_k)] [B(h_k)] a_k \right] \quad (9)
 \end{aligned}$$

여기서  $h_k$ 는 Gauss quadrature 적분점을,  $a_k$ 는 가중치를 나타낸다.

식 (4)로부터

$$\begin{aligned}
 [M^*] &= \frac{\rho_1 L}{2} \int_{-1}^1 t_1 R_1 [S]^T \left[ \int_I [H_S] [H_S] d\theta \right] [S] dp \\
 &\quad + \frac{\rho_2 L}{2} \int_{-1}^1 t_2 R_2 [S]^T \left[ \int_{II} [H_S] [H_S] d\theta \right] [S] dp \quad (10) \\
 \int_I [H_S] [H_S] d\theta &= [I] - [T_I] \quad (11)
 \end{aligned}$$

여기서

[I]는 identity matrix 이고,

$$[T_I] = \begin{pmatrix} A+B & 0 & 0 \\ 0 & A-B & 0 \\ 0 & 0 & A+B \end{pmatrix}$$

단, A와 B는 앞에서 기술한 바와 같다.

$$\int_{II} [H_S] [H_S] d\theta = [T_I] \quad (12)$$

식 (10), (11) 및 (12)로부터 아래의 결과를 얻는다.

$$\begin{aligned}
 [M^*] &= \frac{\pi \rho_1 L}{2} \int_{-1}^1 t_1 R_1 [S]^T [S] dp \\
 &\quad - \frac{\rho_1 L}{2} \int_{-1}^1 t_1 R_1 [S]^T [T_I] [S] dp \\
 &\quad + \frac{\rho_2 L}{2} \int_{-1}^1 t_2 R_2 [S]^T [T_I] [S] dp \\
 &= \frac{L}{2} \sum_{k=1}^5 \left[ \pi \rho_1 t_1(h_k) R_1(h_k) [S(h_k)]^T [S(h_k)] a_k \right. \\
 &\quad \left. - \rho_1 t_1(h_k) R_1(h_k) [S(h_k)]^T [T_I] [S(h_k)] a_k \right.
 \end{aligned}$$

$$\left. + \rho_2 t_2(h_k) R_2(h_k) [S(h_k)]^T [T_I] [S(h_k)] a_k \right] \quad (13)$$

같은 방법으로  $90^\circ$  떨어져 있는 2개, 3개, 4개의 비대칭 요소에 대한  $[K^*]$  및  $[M^*]$ 도 구할수 있다. 위와 같은  $\theta$  방향과 두께에 대하여 해석적으로 적분을 수행하면 자오선 방향의 자절점의 변형에 대한 고유치 문제로 간략화 된다.

$$\left[ [K] - \lambda [M] \right] \{\phi\} = \{0\} \quad (14)$$

식 (14)의 근을 구하기 위하여 본 연구에서는 Secant 방법에 Bisection 방법과 Regular-falsi 방법에 의하여 경계폭을 좁혀나가는 Half-secant 방법을 사용하여 계산시간을 단축시켰다<sup>(13)</sup>.

#### 4. 전산기 이용설계 프로그램팩키지의 기능 및 응용예

이상의 이론으로 개발된 전산기 이용설계 프로그램팩키지의 블럭선도는 Fig. 4와 같으며 각 부프로그램의 기능은 아래와 같다.

INPUT.....기본 도면으로부터 구조물의 좌표(외면과 내면의 절점의 x, y좌표)를 배열(array)로써 입력하고, 구조물의 재질 즉, 영율, 프와송비, 밀도를 읽는다. 또한 유한요소 해석에서 구하고자 하는 고유진동수의 갯수와 분할요소수를 입력 들인다. 동시에

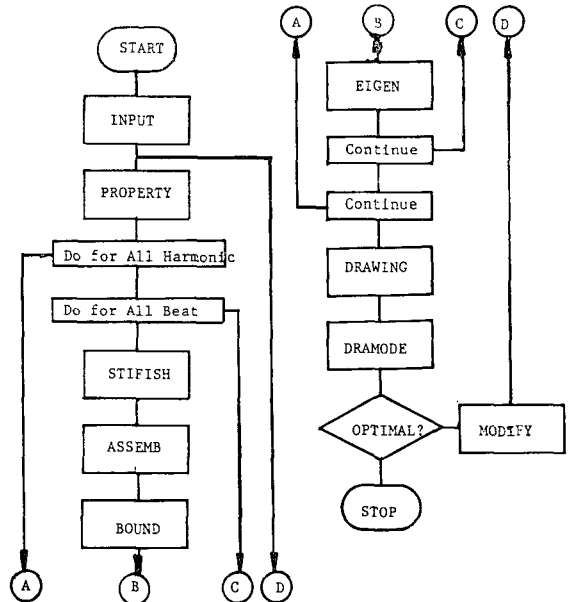


Fig. 4 Flow chart for computer aided design program package

구조물의 좌표로부터 유한요소 해석에 필요한 중심면(middle surface)을 구한다. 또한 이들 좌표를 기준으로 두께  $t$ 를 자오선 방향의 좌표  $s$ 로 표시하여 함수화 한다.

PROPERTY...구조물의 중량, 질량중심, 타격중심, 관성모우멘트를 계산한다.

STIFISH ...요소의 질량 매트릭스와 강성 매트릭스를 구한다.

ASSEMB...요소의 질량 매트릭스와 강성 매트릭스를 결합하여 전체 질량 매트릭스와 전체 강성 매트릭스를 구한다.

BOUND.....경계조건을 입력시킨다.

EIGEN .....밀집한 매트릭스(compact matrix)를 구하여 기억용량과 계산시간을 줄이고, 고유진동수와 진동형상을 구한다.

DRAWING...INPUT에서 받은 데이터로 구조물 옆면의 곡선을 큐빅 스플라인으로 처리하여 도면작성을 위한 HCBS(host computer basic software) 데이터로 저장시켜 Tektronix 터미널에서 도면을 확인한 후 플롯터로 도면을 작성하고 각부분의 치수를 계산하여 도시한다. 그리고 PROPERTY에서 계산된 물성치를 표시한다. 이 부프로그램은 PROPERTY 다음에 실행시켜서 유한요소 해석 이전에는 중량조정을 할 수 있도록 하였다.

DRAMODE...EIGEN에서 구한 고유진동수를 표시하고, 역시 EIGEN에서 구한 모우드 형상을 HCBS 데이터로 저장시켜 Tektronix 터미널로 도면을 확인한 후 플롯터를 통하여 DRAWING과는 별도의 도면을 출력한다.

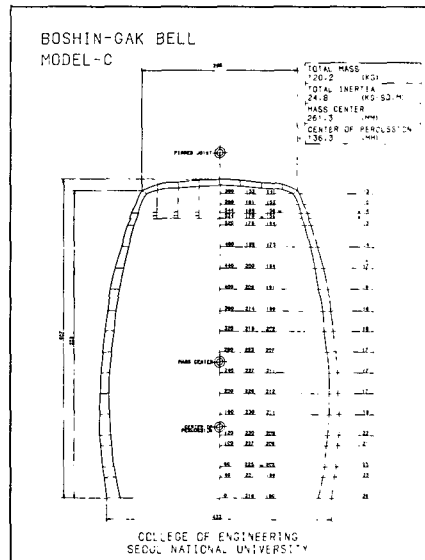
OPTIMAL...설계된 구조물의 중량, 고유진동수, 맥놀이 현상이 적합하기를 판단하고 적합하면 작업을 멈추고, 적합하지 않으면 MODIFY로 간다. (현재는 설계자가 판단하도록 되어 있음)

MODIFY...구조물의 두께, 높이 반경등을 수정하고 撞座의 두께도 수정한다. 이 수정은 데이터 파일에 들어가 수정하지 않고 인터랙티브(interactive)하게 수행한다. 도면을 수정하기 위하여 데이터를 수정하면, 이 수정된 데이터에 따라서 중심면과 두께가 변하게 되어, 수정된 도면에 대하여 자동으로 유한요소 해석을 수행할 수 있다.

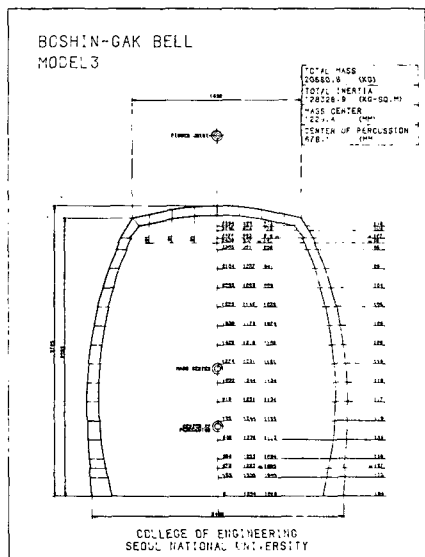
이 프로그램 패키지의 응용으로서 한국 중(현의상 당

과의 비대칭성만 고려)의 설계를 행하였다. Fig. 5(a)는 자동 입력되어 체적 특성치의 계산과 더불어 출력된 도면이며 Fig. (b), (c)는 자동 수정된 종의 도면이다. Table 1은 Fig. 6(a)에 도시된 한국중에 하나의 撞座(두께 2.8mm, 각도 20°)가 Fig. 6(b)의 위치에 있을 때에, 본 연구에서 개발한 유한요소해석 프로그램과 SAP 6의 평판셀 요소로 구한 결과를 비교한 것이다.

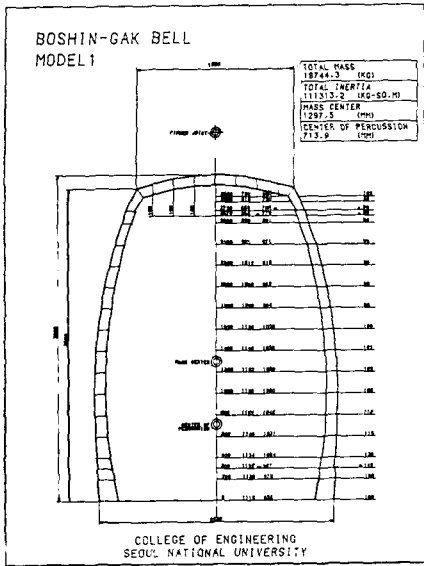
Table 2는 撞座가 있는 축대칭 한국 중을 원추 요소 5, 10, 15 그리고 20개로 나누어 해석했을 때 각 모



(a) Initial design



(b) Modified design



(c) Modified design

Fig. 5 Automatic drawing and property calculation

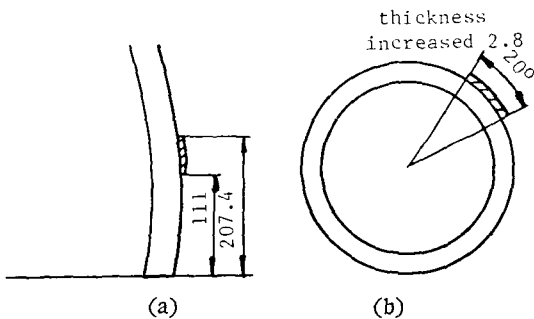


Fig. 6 Bell with a Dangiwa(unit in mm)

Table 1 Comparison of computed results and computation time for the present program and SAP 6. High/low denotes high and low beat modes.

Mode	Present program (high/low) (Hz)	SAP 6 (high/low)
1st	208.8/208.7	217.0/216.1
2nd	608.8/606.9	
3rd	834.6/834.5	
Number of element	20	120
Computation time	76 sec	430 sec

우드에서 고유진동수를 나타낸 것이다. 요소 수가 15개일 때 거의 수렴하는 것을 알 수 있다.

또한 위에서 구한 고유진동수와 모우드형상은 DRA-MODE 부프로그램에 의하여 Fig. 7과 같이 출력된다.

Table 2 Convergence test

Mode No. of element	1st	2nd(Hz)	3rd
5	243.2/232.6	631.0/628.2	806.8/806.4
10	206.8/205.7	604.7/602.8	888.3/887.6
15	208.9/208.7	609.0/607.6	831.4/831.2
20	208.8/208.7	608.8/606.9	834.5/834.5

Fig. 7에서  $NF$ 는 원주방향의 Fourier 수를,  $M$ 은 자오선 방향의 절점수를 나타내며  $L$ 은 저차모우드  $H$ 는 고차모우드를 의미한다.

### 5. 가공공정 계획의 전산자동화 알고리즘

가공공정계획은 과거 주로 경험적 데이터와 경험적 지혜에 의존하여 데이터 뱅크와 가공표준의 설정, 최소가공시간 또는 최소비용의 관점에서 연구되어 왔다. 본 연구에서는 공리적 접근방법의 제 2 공리인 “정보량의 최소화(minimization of information content)”를 전산기이용 가공공정 계획의 알고리즘 개발에 이용하였다. Nakazawa와 Suh<sup>(14)</sup>는 마이크로컴퓨터와 BASIC 프로그램으로 이 알고리즘의 활용 가능성을 최초로 제안하였다. 본 연구에서는 VAX 11/750 미니컴퓨터와

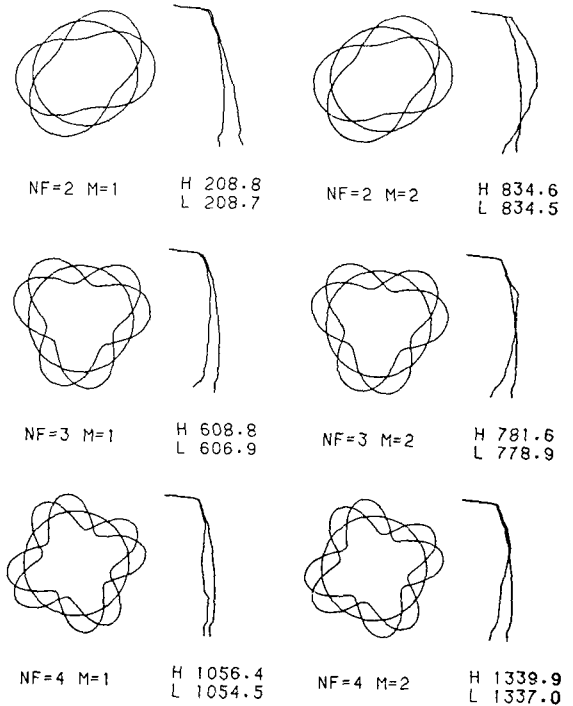


Fig. 7 Drawn output of mode shapes (frequencies in Hz)

FORTRAN 77 을 이용하고 통계적으로 보다 정확하고 실용화된 대화식 가공공정계획 프로그램인 MACROPLAN 의 알고리즘을 개발하였다.

MACROPLAN 은 외부 데이터 파일(예컨대, MAC-IHNE·DAT 와 PSPECIFIC·DAT)로부터 이용 가능한 동작기계들과 작업 데이터에 관한 정보를 받는다. 또한 공차, 표면조도 및 각각의 표면그룹(surface group)에 속한 가공량에 대한 정보는 사용자(user)로부터 대화식으로 획득하게 된다. 사용자는 가공비용에 대한 그 자신의 비용제한(cost constraint)을 입력시킬 수 있으며 또는 비용에 대한 정보량을 디폴트(default)로 계산할 수 있도록 하였다. 각각의 표면 그룹과 후보가 되는 가공기계에 대한 전체 정보량은 공차, 표면조도, 비용에 대한 정보량의 합으로서 구하여진다. 최적가공 조합순서는 각 표면 그룹에 대한 최소정보량 기준(criterion)으로부터 결정된다. !

MACROPLAN 은 모듈화를 염두에 두고 작성되었다. 예컨대, 동작기계와 작동비용에 대한 고정정보는 MACHINE·DAT 에 포함시켰다. 이와같은 구조적 분할에 의하여 MACROPLAN 을 데이터 베이스와 용이하게 연결지을 수 있고 실제 생산환경에 적응시킬 수 있다. 이 가공계획은 단지 절삭가공 뿐만 아니라 금속성형 및 폴리머공정에도 이용될 수 있다. 또한 도면의 그룹 테크놀로지(group technology) 코오드 번호를 연결시키면 가공에 들어오는 최적의 가공물(preformed workpiece)의 형태도 결정할 수 있다. MACROPLAN 프로그램의 내용은 아래와 같다.

### (1) 데이터 획득

(가) 데이터 파일로부터 : 파일 MACHINE·DAT 는 각 동작기계에 관한 정보, 즉 동작기계 번호(ID), 명칭, 최고정밀도(mm), 최고 표면조도( $\mu$ ), 전력 소비(kW), 효율, 작동비용(원/초) 및 공구/가공물 설치시간(초)을 저장·공급한다. 파일 PSPECIFIC·DAT 는 각 가공물 재질(합금강, 알루미늄, 탄소강등)과 가공방식(밀링, 선삭, 연삭등)에 따른 비절삭 에너지(specific cutting energy; joules/mm<sup>3</sup>)에 대한 정보를 저장 공급한다.

(나) 사용자로부터 : 사용자는 해당 가공물의 재질 및 각 표면그룹의 수치에 대한 데이터를 입력시킨다. 각각의 표면그룹에 대한 공차의 상한/하한, 허용 가능한 표면조도 및 가공량에 대한 정보를 사용자가 입력시킨다. 다음에 그는 전산기로부터 이용 가능한 동작기계의 리스트를 받으며 각 표면그룹에 대하여 후보기계의 번호를 지정한다. 마지막으로

사용자는 그 자신이 비용의 제한 조건을 입력시킬 것인지 프로그램의 디폴트 절차를 이용할 것인지를 결정한다.

### (2) 계 산

(가) 공차의 정보량  $IT(i, j)$  :  $i$  번째의 표면 그룹에 대하여 제품의 공차범위,  $PR(i)$  가공치의 상한 및 하한으로부터 결정된다. 가공공정의 유효공차 범위,  $PL(j)$  는 기계의 최고 정밀도의 10 배로 택한다. 이 공차 범위를 균일분포 함수로 기술할 수 있고 각 분포함수의 중앙점이 일치할 때에 성공의 확률이 가장 높다고 가정하자. 이 경우 공통 범위  $COM(i, j)$  는  $PR(i)$  와  $PL(j)$  의 최소값에 의하여 결정된다. 다음에 공차 정보량은

$$IT(i, j) = \log_2[PL(j)/COM(i, j)]_T$$

로 계산된다.

(나) 표면조도의 정보량  $IS(i, j)$  : 설계범위의 상한은 사용자가 입력시킨다. 표면조도의 하한은 0 으로 가정한다. 그러므로 제품 범위의 값은 상한값과 같다. 유효공정범위는 최고 표면조도의 10 배로 한다. 공차에 대한 정보와 같이 표면조도의 공통범위는 제품과 가공공정(공차) 범위의 최소값으로 결정된다. 표면조도 정보량  $IS(i, j)$  는

$$IS(i, j) = \log_2[PL(j)/COM(i, j)]_S$$

로 계산된다.

(다) 가공비용의 정보량  $IC(i, j)$  : 사용자가 각 표면 그룹에 대하여 자신의 비용제한 조건  $C(i)$  를 입력시키면, 비용의 공통 범위  $COM(i, j)$  는  $C(i)$  의 최소값과 실제비용  $A(i, j)$  로 결정된다. 실제비용은 기계  $j$  에 대하여 가공물의 재질, 비절삭 에너지 및 가공비를 기초로 하여 계산된다. 가공비용의 정보량은  $IC(i, j) = \log_2[A(i, j)/COM(i, j)]_C$  로 계산된다.

(라) 전체 정보량 : 기계  $j$  를 사용하여 표면 그룹  $i$  를 가공할 때의 정보량  $ITOT$  는  $ITOT(i, j) = IT(i, j) + IS(i, j) + IC(i, j)$  로 표시된다. 표면 그룹  $i$  에 대한 최소 정보량  $ISG(i)$  는 여러개의 후보 동작기계  $j$  에 대한 정보량  $ITOT(i, j)$  의 최소치로부터 결정된다. 특정재질의 특정제품에 대한 최소 전체 정보량  $IMIN$  은 모든 표면 그룹에 대한  $ISG(i)$  의 합으로부터 결정된다.

### (3) 출 력

주어진 재질에 대하여, 사용자는  $IMIN$  은 물론 각 표면그룹과 동작기계에 대한 정보량  $ITOT(i, j)$  를 출력으로 받는다.

위와 같은 여러개의 표면 그룹과 가공물 재질에 대하여 구한  $ITOT(i, j)$ 와  $IMIN$ 를 비교하여 최선의 가공방법 및 순서를 결정할 수 있다. 이상의 알고리즘은 컴퓨터 프로그램으로 작성되어 현재 시험중에 있으며 별도의 논문에서 상세한 응용예를 다루게 된다.

## 6. 결 론

설계 및 가공공정계획의 전산자동화는 앞으로 많은 연구가 행하여질 매우 광범위한 분야로서 본 연구에서는 매우 기초적이고 제한된 부분에 대하여 연구하였으며 이를 요약하면 아래와 같다.

- (1) 미소 비대칭 요소를 갖는 축대칭 구조물의 동적설계를 자동화하기 위하여 기하학적 모델링/유한요소 해석/수정/자동출력을 일관하게 행할수 있는 전산기이용설계 프로그램팩키지를 개발하여 한국 중의 설계에 응용하였다.
- (2) 미소 비대칭을 갖는 원추형 링 유한요소를 개발하여 맥놀이 진동수 및 고유진동모우드 해석시간을 대폭 단축시킬 수 있었다. 이와같은 방법은 용접된 압력용기등의 정·동특성 해석에도 강력한 수단으로 이용될 가능성이 있다.
- (3) 공리적 접근 방법인 "정보량 최소화"의 공리를 가공공정계획시의 의사결정에 이용하는 전산기이용가공공정계획의 알고리즘을 제시하였다. 상기 연구결과를 토대로 프로그램을 더욱 확장하고 수정하여 보다 광범위한 분야에 응용하여야 한다.

## 후 기

이 연구는 한국학술진흥재단의 1984년도 문교부 첨단과제에 의하여 행하여 졌으며 이 연구에 도움을 준 서울대학교의 염영하교수에게 감사한다.

## 참 고 문 헌

- (1) Parmater, J., 'Computer-Aided Engineering the Step beyond CAD/CAM', Machine Design, October 1980
- (2) Sata, T. et als, Development of Machine Tool Structural Analysis Program(MASAP), Annals of the CIRP. 1976
- (3) Pratt, M.J., '3D Geometric Product Definition for CAD/CAM, I Mech E, C166/83, 1983
- (4) Merchant, E., 'Current Status of, and Potential for, Automation in the Metalworking Manufacturing Industry', Annals of the CIRP, Key-Note-Papers, 1983
- (5) 염영하, 이장무, 이원희, 선반의 이송장치부의 컴퓨터이용 설계에 관한 연구, 한국자동차기술학회지. 제 5권 제 1호 pp.63~78, 1983
- (6) Lee, K., 'Shape Optimization of Assemblies using Geometric Properties', Ph. D. Thesis, M.I.T., 1983
- (7) Butlin, G., 'CAD/FEM Interfacing', I Mech E, C175/83, 1983.
- (8) Eskicioglu, H. and Davies, B.J., 'An Interactive Process Planning System for Prismatic Parts', Annals of the CIRP, 1983
- (9) Weill, R., Spur, G. and Eversheim, W., 'Survey of Computer-Aided Process Planning System', Annals of the CIRP, 1982
- (10) Suh, N., Bell, A.C., and Gossard, D., 'On an Axiomatic Approach to Manufacturing Systems', Journal of Engineering for Industry, ASME, Vol. 100, 1978
- (11) Yum, Y.H. and Lee, J.M., 'A Study on the Vibrations of Korea Bells', Proceedings of Vibration Conference '85, J.S.M.E., 1985
- (12) Lee, J.M. 'Vibratoin analysis of Axisymmetric Shells with Small Asymmetry', to be submitted to K.S.M.E.
- (13) Chung, S.B., 'Vibration Analysis of Bell Type Shells', M.S. Thesis, Seoul National Univ., 1983
- (14) Nakazawa, H. and Suh, N., 'Process Planning Based on Information Contents', Unpublished Paper, M.I.T., 1983
- (15) Spath, H. 'Spline Algorithms for Curves and Surfaces', Utilitas Mathematica Publishing Inc., 1974
- (16) Yum, Y.H., Ansari, J. and Lee, J.M., 'A Study on the Vibration of Axisymmetric Shells', Proceedings of International Modal Analysis Conference, Vol. 3, January, 1985