

〈論 文〉

입체 캠의 형상 설계와 가공에 관한 연구

김찬봉* · 양민양**

(1992년 10월 23일 접수)

A Study on Design and Manufacture of Spatial Cams

Chan Bong Kim and Min Yang Yang

Key Words : Spatial Cam(입체 캠), Follower(종동절), CAD/CAM(전산기 원용 설계 및 가공), Envelope(포락선), NC Machining(수치제어 기계 가공)

Abstract

The effort of this paper is to develop a methodology of computer aided design and manufacture of spatial cams. The integrated CAD/CAM systems for spatial cams are developed to enable manufacturer to design and machine them readily. The contour of spatial cams can be obtained by applying envelope theory to the cam/follower motion. The mathematical cam contour is evaluated at some increment to generate the numerical data for the CNC programming. Incremental generation of points along a cam contour can be accomplished in consideration with the specified tolerance. The computerized procedure is described in detail with accompanying examples.

기 호 설 명

- A, B, C, D : 벡터
- $D_p(h)$: 점 p 에서 사상 h 의 Jacobian 행렬식
- h : 원점으로부터 특성곡선까지 이르는 사상
- h_e : 포락면에 대한 사상
- h_f : 패밀리에 대한 사상
- i_1, i_2, i_3 : x, y, z 축 좌표에 대한 단위 벡터
- R^n : n 차원 Euclid 공간
- r_f : 롤러 종동절의 반지름
- l_f : 롤러 종동절의 길이
- l : 종동절의 최대 상승
- s : 종동절의 변위 상승량
- v : 종동절의 속도
- t : 패밀리 매개변수
- u : 국소 좌표계
- U_f : 패밀리에 대한 매개변수의 집합

- U_e : 포락면에 대한 매개변수의 집합
- ϕ : 압력각

1. 서 론

입체 캠 기구는 고속에서도 안정된 동작을 얻을 수 있을 뿐만 아니라 고장이 적으며 보수가 용이하고 강성이 높고 운동구간 선정이 자유로우며, 특히 고속의 간헐 이송운동(index motion)에 있어서 정확하고 신뢰성 있는 운동 특성으로 인하여 자동기계, 자동조립기, 공작기계에 그 사용이 증가하고 있는 실정이다.⁽¹⁾

그러나, 입체 캠은 평판 캠과 달리 원통주위에 홈이 파여있는 형태이므로 캠의 형상을 적절히 표현하기 어려운 뿐만아니라 입체 캠의 가공을 위한 적절한 장비와 소프트웨어가 널리 보급되지 않았기 때문에 원하는 정밀도를 갖는 입체 캠의 제작이 큰 어려

*한국과학기술원 정밀공학과

**정회원, 한국과학기술원 정밀공학과

움으로 여겨졌다.

평판 캠에 대해서는 설계와 가공에 관한 연구 뿐만 아니라 CAD/CAM 소프트웨어가 많이 발표되었는데, (2~4) 입체 캠에 대한 연구발표는 매우 드문 실정이다. 입체 캠에 관한 연구중에서 Chakraborty(5)는 입체 캠의 형상을 해석적으로 나타낼 수 있는 방법에 대하여 연구하였고, Makino(6)는 롤러기어 캠의 형상을 벡터 해석법(vector analysis)을 이용하여 도시하는 방법에 관하여 연구하였다. 그러나 이러한 연구는 입체 캠의 형상을 설계하는데 국한되며 가공에는 직접적으로 이용할 수 없기 때문에 가공을 하기 위해서는 별도의 노력이 필요하게 된다.

본 연구에서는 여러가지 입체 캠 기구에 대하여 기구학적인 구성조건과 캠 곡선을 바탕으로 매개변수 형태의 포락면이론에 의하여 캠 형상을 구하고, 이를 직접 가공할 수 있는 NC 파트프로그램을 얻는 CAD/CAM 소프트웨어를 구성하여 정밀성, 생산성, 효율성 등을 증진하고자 한다.

2. 캠의 설계

2.1 매개변수 함수(parametric function)의 포락면(envelope)

곡면을 매개변수 형태로 나타낼 경우 계산이 편리하며 음함수 형태로는 표현할 없는 복잡한 형태의 모양도 쉽게 표현할 수 있다. 곡면을 매개변수 함수로 나타낼 경우 곡면에 대한 패밀리와 그에 대한 포락면도 매개변수 함수로 나타낼 수 있다. (7)

$n+k$ 차원 유클리드 공간 R^{n+k} 에서 n 개의 매개변수를 갖는 곡면(n-surface)을 R^n 의 부분집합 U 에서 R^{n+k} ($k \geq 1$)로 대응되는 사상 h 로 나타낼 때, 사상 h 는

$$h : U \rightarrow R^{n+k} \quad (1)$$

와 같이 정의할 수 있다. 여기서 U 는 매개변수의 집합이고 각 매개변수는 사상 h 에 의하여 R^{n+k} 안의 n -surface로 사상된다. 즉, 사상 h 를 다음과 같이 나타낼 수 있다. (8)

$$h(u) = (h_1(u), \dots, h_{n+k}(u)) \quad (2)$$

여기서 $u = (u_1, \dots, u_n)$

사상 h 의 미분을 U 에 속하는 모든 점 p 에 대하여 자코비안(Jacobian) 행렬식으로 나타내면

$$D_p(h) = \begin{bmatrix} (h_1)_{u_1} & \dots & (h_1)_{u_n} \\ \vdots & & \vdots \\ (h_{n+k})_{u_1} & \dots & (h_{n+k})_{u_n} \end{bmatrix} \quad (3)$$

와 같은데, $D_p(h)$ 의 각 열(column)은 n -surface 위의 점 p 에서 매개변수(u_i)에 의한 접선벡터(tangent vector)를 나타낸다. 매개변수형태의 n -surface에서 접선벡터는 각각 선형적으로 독립(linear independent)이 되기 때문에 $D_p(h)$ 의 계수(rank)는 n 이 된다.

매개변수 형태의 n -surface에 대한 패밀리의 매개변수를 m 이라 할 때, n -surface의 m -매개변수 패밀리는 사상 h_f 로 나타낼 수 있고, $m \geq 1$ 일 때 패밀리에 대한 사상 h_f 는 국소 좌표계의 매개변수의 집합 U 와 패밀리 매개변수의 집합 R^m 의 합집합인 U_f 에서 R^{n+k} 로 대응됨을 나타낸다.

$$h_f : U_f \rightarrow R^{n+k} \quad (4)$$

여기서, $U_f = U \times R^m$

$u = (u_1, \dots, u_n) \in U$: 국소좌표계(local coordinate)

$t = (t_1, \dots, t_m) \in R^m$: 패밀리 매개변수(family parameter)

매개변수 형태의 n -surface에서 $D_p(h)$ 의 계수가 n 이기 때문에 패밀리 매개변수(family parameter) t 에 의하여 형성되는 접선벡터는 국소좌표계(local coordinate) u 에 의하여 형성되는 접선벡터에 종속(dependent)이 된다.

즉, n -surface 패밀리의 포락면은 패밀리의 각각에 접하는 곡면임을 알 수 있다. 다시말해서, U_f 의 원소인 점 p 에 대하여 m -패밀리 매개변수 방향에 따른 접벡터는 대응하는 패밀리 위의 각 $h_f(p)$ 에서의 n -좌표계 방향(coordinate direction)에 따른 접벡터와 종속관계에 있다. 이것은 포락면 위에 있는 U_f 의 원소 p 에 대하여 $D_p(h_f)$ 의 rank가 n 이고 $D_p(h_f)$ 의 행렬식(determinant)이 0이라는 것을 의미한다.

매개변수 형태의 n -surface 상에서 포락면 위에 있는 각점은 패밀리에 접하므로 다음과 같이 포락면을 정의할 수 있다. R^{n+k} 에서 n -surfaces의 m -매개변수 패밀리(parameter family)에 대한 포락면은 집합 U_f 의 부분집합인 U_e 로부터 R^{n+k} 로의 사상 h_e 라 할 수 있고, h_e 는

$$h_e : U_e \rightarrow R^{n+k} \quad (5)$$

와 같이 정의할 수 있다.

입체 캠에서는 볼러 형태의 종동절이 캠곡선에 의하여 이동하면서 패밀리를 형성하고, 각각의 패밀리에 접하는 곡면이 포락면이 되며 이러한 포락면이 곧 입체 캠의 형상이 된다. 볼러 형태의 종동절의 표면을 나타내기 위해 국소 좌표계 u 와 φ 를 이용하여 사상 $h: U(u, \varphi) \rightarrow \mathbb{R}^3$ 을 나타낼 수 있다. 종동절의 이동은 캠의 회전각 θ 에 대하여 종동절의 위치가 결정되고, 각각의 종동절의 표면이 패밀리 $h_f: U(u, \varphi, \theta) \rightarrow \mathbb{R}^3$ 이 된다. 그러면 입체 캠의 형상, 즉, 포락면을 구하기 위해서는 앞서 설명한 포락면이 각각의 패밀리에 접하는 곡면이므로 θ 에 의한 접선 벡터는 u 와 φ 에 의한 접선벡터에 종속이 되고 $D_p(h_f)$ 의 행렬식이 0이 된다.

즉, 국소좌표계 u 와 φ , 패밀리 매개변수 θ 에 의한 패밀리 h_f 를 구하고, $D_p(h_f)$ 의 행렬식이 0이 되는 조건을 구하면 각각의 θ 에 대하여 압력각 φ 를 구할 수 있다.

2.2 입체 캠의 형상설계

종동절의 변위(s)와 속도(v)를 종동절의 최대 변위와 캠의 회전각으로 나타낼 경우 다음과 같다.

$$s = lf \left(\frac{\theta}{\beta} \right) \tag{6}$$

$$v = \frac{l}{\beta} f' \left(\frac{\theta}{\beta} \right) \tag{7}$$

여기서,

- f : 캠곡선의 함수식
- θ : 종동절의 상승에 따른 캠의 회전각
- β : 종동절이 상승하는 동안 캠이 회전한 각도
- l : 종동절의 최대상승

종동절의 반지름을 r_f , i 축에 대한 θ 만큼 반시계 방향으로 회전한 것을 연산자 $R(\theta, i)$ 와 같이 나타낼 때, 원통 캠에 대한 매개변수 형태의 포락면은 다음과 같이 구할 수 있다.

Fig. 1에서 원점으로부터 종동절과 캠과의 접촉선, 즉 특성곡선(characteristic curve)까지를 벡터로 표시하면

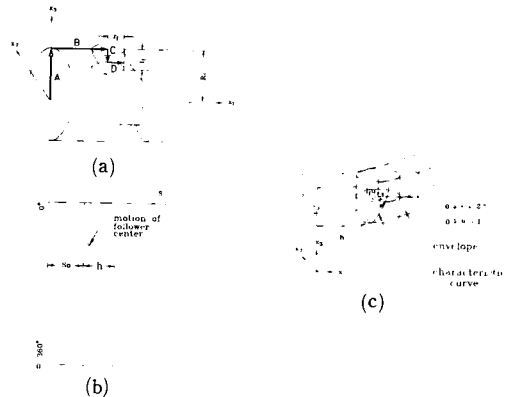
$$h = A + B + C + D \tag{8}$$

여기서, $A = R_c R(\theta, i) i_3$

$$B = (s_o + s) i_1$$

$$C = -l_f u R(\theta, i) i_3$$

$$D = \pm r_f (\cos \varphi i_1 + \sin \varphi R(\theta, i) i_2)$$



(a) Cam/follower system of cylindrical cam
 (b) Development diagram of cylindrical cam
 (c) Characteristic curve and envelope

Fig. 1 Coordinates of cylindrical cam

R_c : 입체 캠의 반지름

s_o : 원점으로부터 종동절의 초기 위치

l_f : 종동절의 길이

r_f : 종동절의 반지름

이고, 종동절의 이동체적에 대한 패밀리는,

$$h_f: \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3$$

$$h_f(u, \varphi, \theta) = (x_1, x_2, x_3) \tag{9}$$

여기서,

$$x_1 = s_o + s + r_f \cos \varphi$$

$$x_2 = -R_c \sin \theta + l_f u \sin \theta + r_f \sin \varphi \cos \theta$$

$$x_3 = R_c \cos \theta - l_f u \cos \theta + r_f \sin \varphi \sin \theta$$

u, φ : local coordinates

와 같이 나타낼 수 있는데, 패밀리 위에 있는 점 p 에 대하여 $D_p(h_f)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$D_p(h_f) = \begin{bmatrix} \frac{\partial x_1}{\partial u} & \frac{\partial x_1}{\partial \varphi} & \frac{\partial x_1}{\partial \theta} \\ \frac{\partial x_2}{\partial u} & \frac{\partial x_2}{\partial \varphi} & \frac{\partial x_2}{\partial \theta} \\ \frac{\partial x_3}{\partial u} & \frac{\partial x_3}{\partial \varphi} & \frac{\partial x_3}{\partial \theta} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} \end{bmatrix} \tag{10}$$

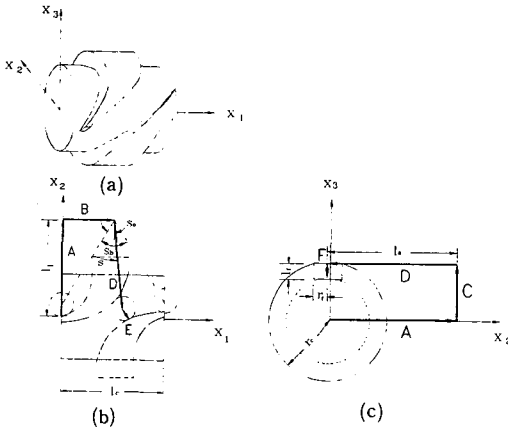
여기서, $M_{11} = 0$

$$M_{12} = -r_f \sin \varphi$$

$$\begin{aligned}
 M_{13} &= v \\
 M_{21} &= l_f \sin \theta \\
 M_{22} &= r_f \cos \varphi \cos \theta \\
 M_{23} &= -R_c \cos \theta + l_f u \cos \theta - r_f \sin \varphi \sin \theta \\
 M_{31} &= -l_f \cos \theta \\
 M_{32} &= r_f \cos \varphi \sin \theta \\
 M_{33} &= -R_c \sin \theta + l_f u \sin \theta + r_f \sin \varphi \cos \theta
 \end{aligned}$$

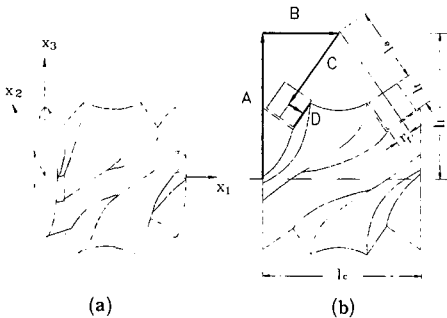
패밀리에 접하는 포락면을 얻기위해서 $\det(D_p(h_f))$ 가 0이 되어야 한다는 조건으로부터 압력각 φ 를 구하면 다음과 같다.

$$|D_p(h_f)| = v \cos \varphi - (R_c - l_f u) \sin \varphi = 0 \tag{11}$$



(a) Index barrel cam
 (b) Plane diagram of cam/follower system
 (c) Side view diagram of cam/follower system

Fig. 2 CoordinateX of indes barrel cam



(a) Roller gear cam
 (b) Plane diagram of cam/follower system

Fig. 3 Coordinates of roller gear cam

Table 1 Coordinates and pressure angles of spatial cams

	Coordinates	pressure angle
cylindrical cam	$x_1 = s_c + s + r_c \cos \phi$ $x_2 = -R_c \sin \theta + l_f u \sin \theta + r_f \sin \phi \cos \theta$ $x_3 = R_c \cos \theta - l_f u \cos \theta + r_f \sin \phi \sin \theta$	$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{v}{R_c - l_f u} \right)$
index barrel cam	$x_1 = l_f / 2 - l_f \sin(s_c - s) + r_c \cos \phi$ $x_2 = l_f \cos \theta - R_c \sin \theta - l_f \cos(s_c - s) \cos \theta + l_f u \sin \theta - r_f \sin \phi \cos \theta$ $x_3 = l_f \sin \theta + R_c \cos \theta - l_f \cos(s_c - s) \sin \theta - l_f u \cos \theta - r_f \sin \phi \sin \theta$	$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{l_f \cos(s_c - s) v}{l_f u - \sin(s_c - s) v - R_c} \right)$
roller gear cam	$x_1 = l_f / 2 - (l_1 + l_2 u) \sin(s_c - s) + r_c \cos \phi \cos(s_c - s)$ $x_2 = l_f \cos \theta - (l_1 + l_2 u) \cos(s_c - s) \cos \theta + r_f (\sin \phi \sin \theta - \cos \phi \sin(s_c - s) \cos \theta)$ $x_3 = l_f \sin \theta - (l_1 + l_2 u) \cos(s_c - s) \sin \theta - r_f (\cos \phi \sin(s_c - s) \sin \theta + \sin \phi \cos \theta)$	$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{(l_1 + l_2 u) v}{l_1 - (l_1 + l_2 u) \cos(s_c - s)} \right)$

$$\varphi = \tan^{-1} \left\{ \frac{v}{R_c - l_f u} \right\} \tag{12}$$

식(12)의 φ 를 식(9)에 대입하면 임의의 각도에서 u 를 따르는 특성곡선(characteristic curve)을 얻을 수 있다.

이와같은 과정을 통하여 일반적으로 많이 사용되고 있는 원통 캠, 인덱스 배럴 캠, 롤러 기어 캠에 대한 좌표계를 Fig. 1, Fig. 2, Fig. 3과 같이 나타낼 때 각각의 입체 캠에 대한 좌표값과 압력각을 Table 1에 나타냈다.

3. 캠의 가공

입체 캠은 접촉한 상태에서 운동이 이루어지기 때문에 특히 고속에서 사용될 경우 작은 가공오차에서도 중동절의 운동 특성이 크게 바뀌기 때문에 정밀한 가공이 이루어져야 한다. 입체 캠을 가공하기 위한 방법으로는 모형캠(master cam)에 의하여 구동되는 공구에 의하여 모방절삭하는 방법과 $R-\theta$ 좌표계를 갖는 동작기계에서 캠 소재를 회전시키면서 가공하는 방법이 주로 사용되고 있다.

$R-\theta$ 좌표계로 가공할 때 보간간격이 클 경우 가공오차(scallops or flats)에 의하여 파형(waviness)이 형성되는데, 파형은 큰 소음, 마모, 충격 등을 유발하여 중동절의 정상적인 동작에 큰 영향을 미친다. 그러므로 파형과 가장 밀접한 관계가 있는 보간간격을 적절히 설정하는 일은 매우 중요하다. 보간간격이 너무 작을 경우 공구 이동 명령이 너무 많게되어

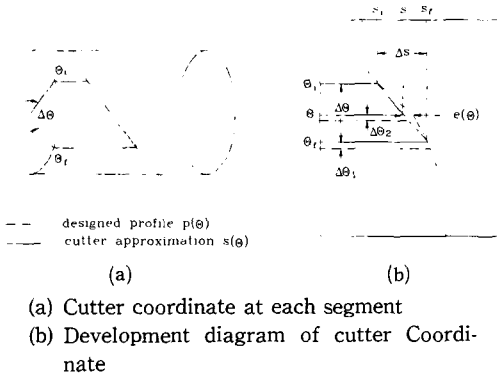


Fig. 4 Cutter path approximation to designed profile

상대적으로 공구의 가속속 운동이 많아지므로 가공 시간이 많이 소비되고 불필요한 공구의 마모가 수반되며, 보간간격이 너무 클 경우 가공오차가 크게되어 파형이 생김으로 인해 중동절의 정상적인 동작을 얻을 수 없게된다.⁽⁹⁾ 원하는 허용오차 이내로 가공할 수 있는 보간간격을 구하는 방법으로는 시행착오법(trial and error)과 보간간격 예측법이 있는데 입체캠을 가공할 수 있는 R-θ 보간 가공에서는 시행착오법으로 보간간격을 구할 수 있다.⁽¹⁰⁾

캠 소재를 Fig. 4와 같이 캠의 회전각 θ와 중동절의 상승 s를 직각 좌표계로 나타낼 경우 임의의 곡선구간에서 설계된 곡면을 가공하기 위한 공구의 궤적 s(θ)를 극좌표계로 나타내면 다음과 같다.

$$s(\theta) = s_i + \frac{\Delta s}{\Delta \theta} (\theta - \theta_i) \quad (13)$$

그러면, 임의의 곡선 구간에서 설계된 곡면 p(θ)와 공구 궤적 s(θ)의 차이값을 가공오차 e(θ)로 나타낼 수 있다.

$$e(\theta) = |s(\theta) - p(\theta)| \quad (14)$$

위와 같이 보간간격을 구하여 가공정보를 얻는 과정을 Fig. 5에 나타냈다. 캠곡선과 공구궤적과의 오차를 비교하여 허용가공오차보다 작은 최대의 가공구간을 찾기위하여, 하나의 보간 간격 Δθ를 Δθ만큼씩 증가시키고, θ는 θ₁로부터 θ₂까지 Δθ만큼씩 증가시켜서 그때의 보간 구간에서 가공오차 e(θ)를 구한다. 이러한 과정을 반복하여 허용오차를 만족하는 최대한의 보간간격을 구한다.

평판 캠을 가공할 경우 공구경 보정을 이용하면 공구경에 관계없이 캠을 가공할 수 있는데 반해 입체

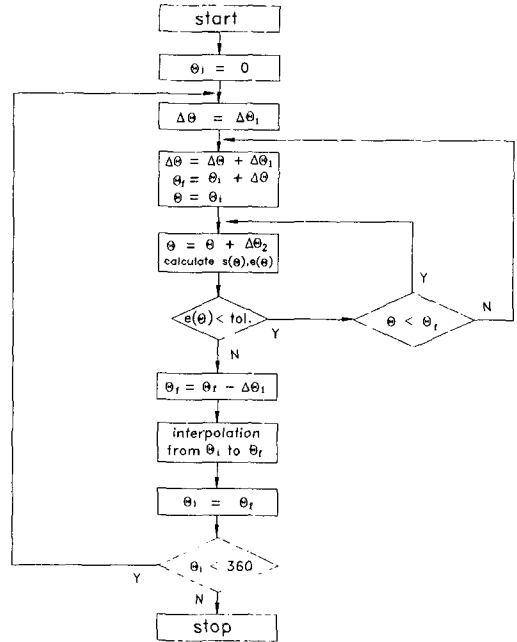


Fig. 5 Flow chart for interpolation algorithm

캠은 원통주위에 홈이 파여진 형태이기 때문에 중동절의 깊이를 따라 압력각이 달라지므로 중동절의 지름과 공구의 지름이 같아야 한다. 즉, 원하는 특성을 얻기 위해서는 중동절의 반지름과 공구의 반지름이 같고 중동절 중심점의 이동좌표와 공구 중심의 이동좌표가 같아야만 설계시와 동일한 압력각을 갖는 포락면을 가공할 수 있고 중동절의 운동에 무리가 생기지 않는다.

4. CAD/CAM 소프트웨어 개발과 적용 예

4.1 솔리드 모델의 생성

앞서 설명한 포락면을 이용하여 입체캠의 형상을 표현하기 위하여 솔리드 모델을 생성하여야 한다. 본 연구에서는 롤러의 이동에 의하여 생성되는 포락면을 경계면으로 하는 솔리드 모델을 구축하기 위하여 경계표현법(boundary representation)을 이용하였다. 즉, 롤러의 이동을 작은 구간으로 나누고 그때 생성되는 포락면을 사각형 또는 삼각형으로 근사화하여 하나의 다각형을 만들고 그 다각형을 구성하는데 필요한 선(edge)과 점(vertex)를 구하여 하나의 입체캠에 대한 솔리드 모델을 형성하게 된다(Fig. 6).

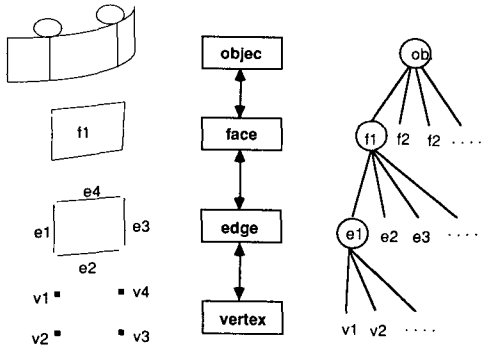


Fig. 6 A boundary representation tree

입체캠의 음영처리를 위하여 스캔라인 Z-버퍼 (scan line Z-buffer) 알고리즘과 Gouraud 음영처리법 (shading)을 이용하였다.⁽¹¹⁾ 효과적인 B-rep. 모델 생성과 음영처리를 위하여 점, 선, 면에 대하여 각각의 좌표값 뿐만아니라 음영처리에 필요한 정보를 함께 저장하여 효과적으로 처리할 수 있도록 하였다.

4.2 CAD/CAM 시스템의 개발 및 적용

본 연구에서 제시한 입체캠의 설계 및 가공방법을 이용하여 입체캠을 위한 CAD/CAM 시스템을 개발

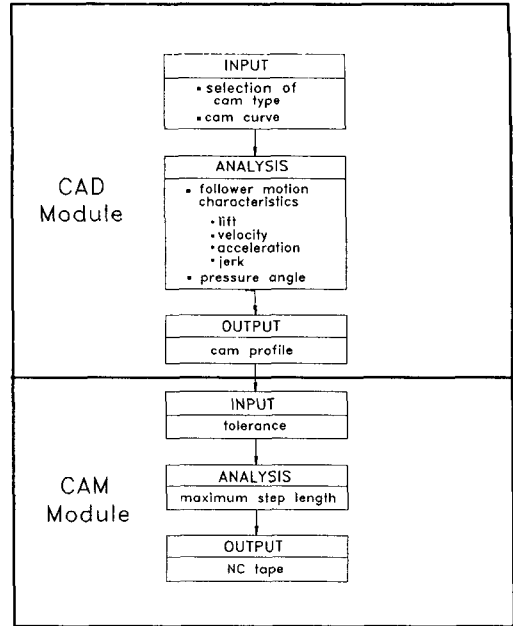


Fig. 7 Conceptual diagram for CAD/CAM system

하였다. 본 연구에서 개발한 CAD/CAM시스템은 MS-C 언어와 SDK(software development kit)를 이용하여 개발하였으며 IBM-PC에서 MS-DOS와

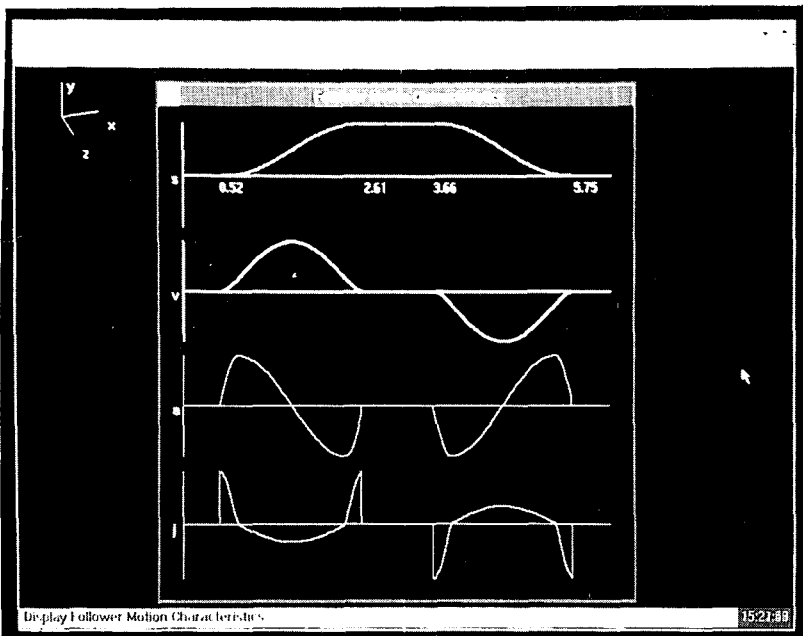


Fig. 8 Dynamic characteristics of follower motion

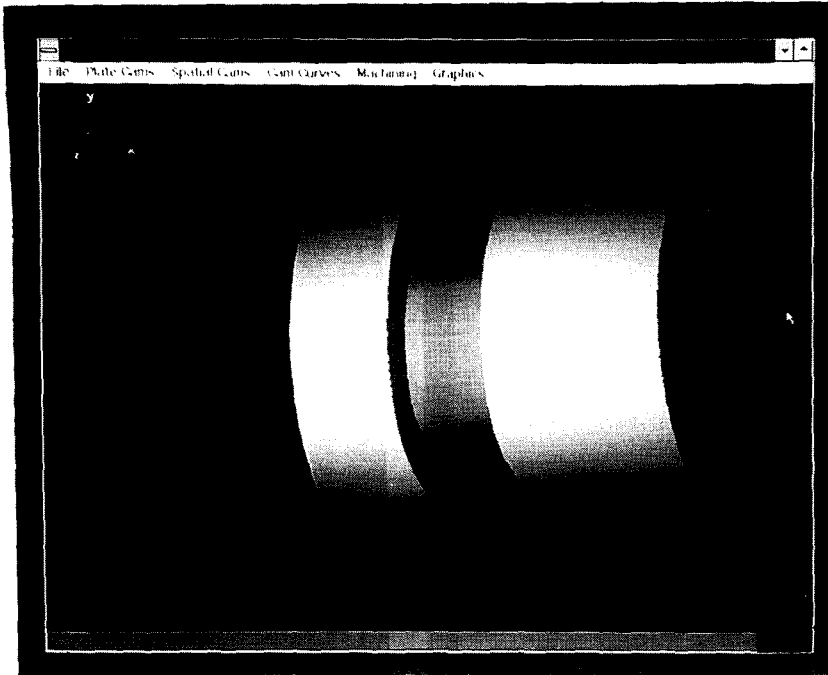


Fig. 9 Designed cylindrical cam
 radius of cylinder : 30 mm
 radius of follower : 8 mm
 displacement of follower : 30 mm
 cam curve : modified sine curve

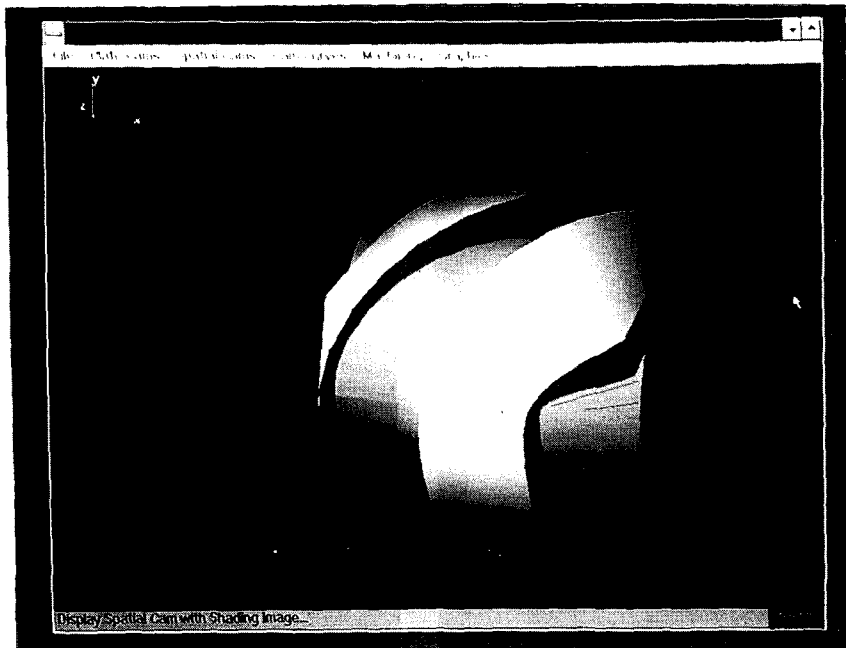


Fig. 10 Designed index barrel cam
 radius of cylinder : 30 mm
 radius of roller : 8 mm
 length of follower : 50 mm
 distance between two axes : 45.2 mm
 number of rollers : 8
 index angle : 100°
 cam curve : modified sine curve

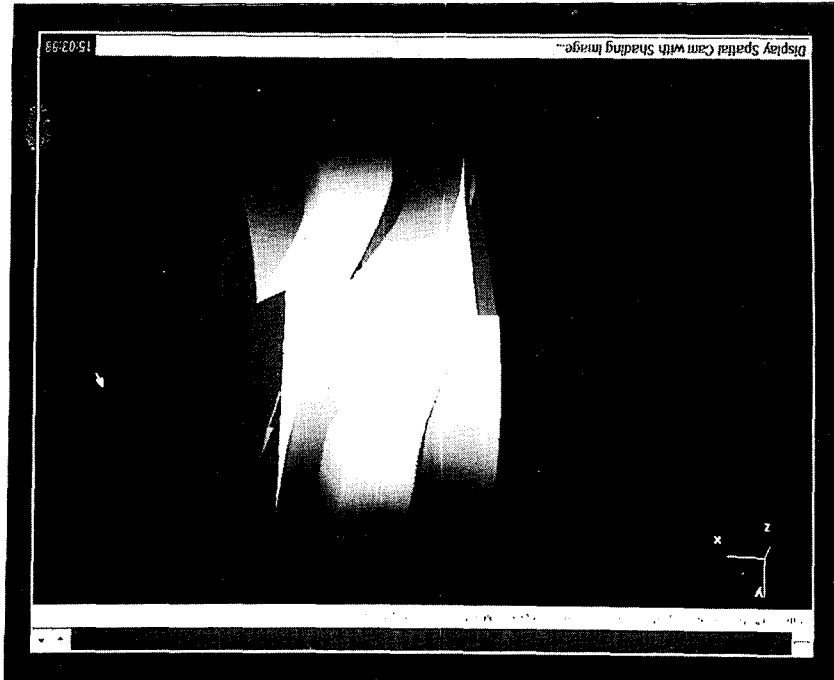


Fig. 11 Designed roller gear cam
radius of cylinder : 30 mm
radius of roller : 8 mm
length of follower : 73.5 mm

distance between two axes : 102 mm
number of rollers : 8
index angle : 120°
cam curve : modified sine curve

MS-Windows 환경하에서 운용되도록 하였고 그 시스템의 개념도를 Fig. 7에 나타냈다.

캠의 설계부분에서는 캠기구의 종류를 선정하고 캠기구의 구성조건을 입력하며 18개의 단일곡선의 형태 혹은 불연속 데이터(discrete)를 이용하여 캠곡선을 선정한 후 중동절의 각종 특성과 캠 형상을 도출할 수 있도록 하여 캠의 모양과 특성에 대한 검토를 용이하게 하였다. 원하는 캠 형상을 창성한 후 캠의 가공모듈에서 허용오차가 주어지고 허용오차이내로 가공할 수 있는 보간간격을 구하여 $R-\theta$ 보간에 대한 NC 파트프로그램을 얻는다.

본 CAD/CAM 시스템을 이용한 입체 캠의 설계 및 가공에 관한 예를 들면 다음과 같다. 먼저 캠곡선을 선정하면, 그 캠곡선의 변위, 속도, 가속도, 약동(jerk) 등의 동적 특성을 Fig. 8과 같이 나타내서 설계하고자 하는 캠 시스템의 특성을 검토할 수 있도록 하였다. Fig. 9, Fig. 10, Fig. 11에서는 설계된 입체캠을 나타냈고, Fig. 12에서는 인덱스 배럴캠을 가공하기 위한 NC 파트프로그램을 나타냈다. 또한 Fig. 13, Fig. 14, Fig. 15에서는 가공된 캠의 형상을 각각

```

N110X8.171Y-1.064B7.420
N120X8.241Y-1.093B8.860
N130X8.326Y-1.128B9.440
N140X8.428Y-1.169B10.340
N150X8.546Y-1.217B11.220
N160X8.683Y-1.271B12.290
N170X8.838Y-1.332B13.360
N180X9.010Y-1.400B14.400
N190X9.201Y-1.473B15.140
N200X9.410Y-1.553B15.280
N210X9.637Y-1.639B16.220
N220X9.882Y-1.729B17.360
N230X10.146Y-1.825B18.500
N240X10.427Y-1.926B19.870
N250X10.726Y-2.031B20.880
N260X11.043Y-2.140B21.320
N270X11.377Y-2.252B22.520
N280X11.729Y-2.368B23.300
N290X12.098Y-2.486B24.240
N300X12.484Y-2.606B25.340
N310X12.887Y-2.727B26.350
N320X13.307Y-2.850B27.260
N330X13.724Y-2.973B28.400

```

Fig. 12 Partial list of the NC part program

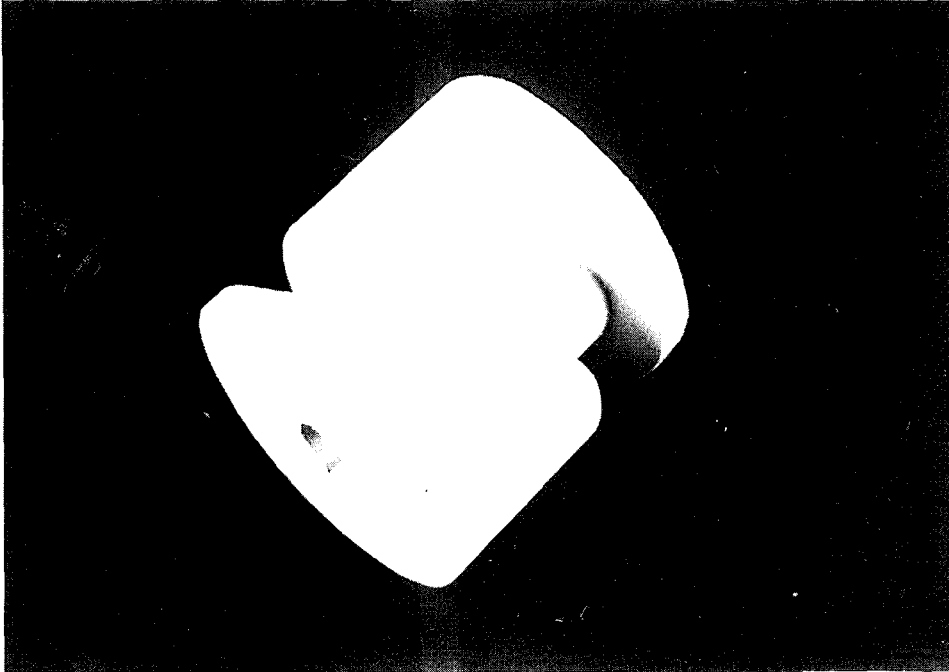


Fig. 13 Manufactured cylindrical cam

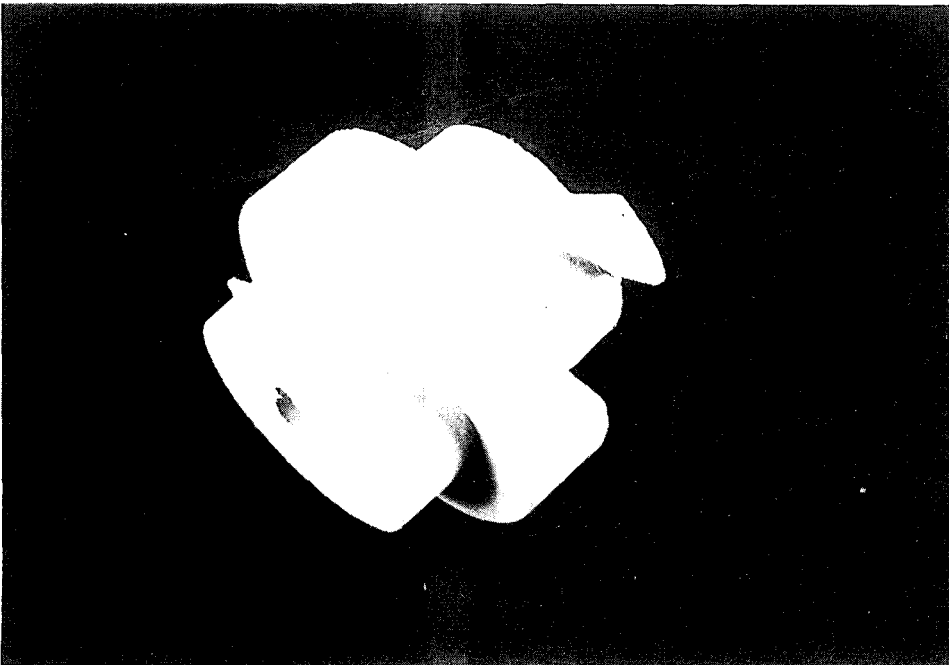


Fig. 14 Manufactured index barrel cam

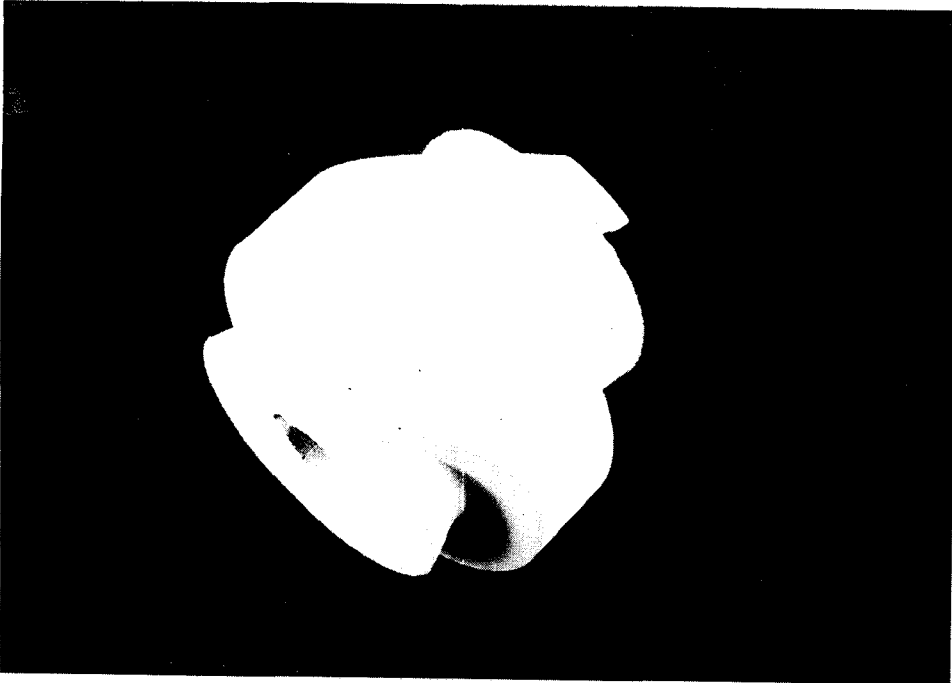


Fig. 15 Manufactured roller gear cam

나타냈다.

입체캠의 가공은 20V-80 CINCINNATI-MILACRON 5축 가공기와 Turbo-IX5C 인덱스 테이블을 이용하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 여러가지 입체 캠 기구에 대한 설계 및 가공법에 대하여 연구하였으며, CAD/CAM 소프트웨어를 구성하여 매개변수형 포락면에 의하여 캠 형상을 쉽게 설계할 수 있을 뿐만 아니라 캠 곡선의 각종 특성을 도시함으로써 중동절의 특성을 쉽게 파악할 수 있어 캠의 설계에 있어서는 여러가지 문제점을 쉽게 해결할 수 있었다.

또한, $R-\theta$ 보간으로 가공할 수 있는 NC 파트프로그램을 직접 얻을 수 있어서 정밀한 캠의 가공이 가능하였으며 생산성, 효율성을 높일 수 있었다.

참고문헌

- (1) Chen, F. Y., 1982, "Mechanics and Design of Cam Mechanisms," Pergamon Press Inc.
- (2) Papaioannou, S. G. and Kiritsis, D., 1988, "Computer Aided Manufacture of High Precision Cams," Trans. of the ASME, Journal of Engineering for Industry Vol., 110, Nov., pp. 352~358.
- (3) Lin, A. C., Chang, H. and Wang, H. P., 1988, "Computerized Design and Manufacturing of Plate Cams," INT. J. PROD. RES., Vol. 26, No. 8, pp. 1395~1430.
- (4) Gal-Tzur, Z., Shpitaini, M. and Malkin, S., 1989, "Design and Manufacturing Analysis for Integrated CAD/CAM of cams," Trans. of the ASME, Journal of Engineering for Industry Vol. 111, Nov., pp. 307~314.
- (5) Phande, S. G., Shadoria, B. S. and Chakraborty, J., 1975, "A Unified Approach to the Analytical Design of Three-Dimensional Cam Mechanism," Trans. of ASME, Journal of Engineering for Industry, Feb., pp. 327~333.
- (6) Makino, F. and Sato, H., 1976, "Computer Drawing of a Three Dimensional Cam," Journal of JSPE, Vol. 42, No. 6, pp. 8~13.

- (7) do Carmo, 1976, "Differential Geometry of Curves and Surface," Prentice-Hall, Inc.
- (8) Weld, J. D., 1987, "Geometric Representation of Swept Volumes with Application to Polyhedral Objects," Ph. D. Thesis, Cornell Univ.
- (9) Grant, B., Soni, A. H., 1979, "A survey of cam Manufacture methods," Trans. of ASME, Journal of Mechanical Design, Vol. 101, pp. 455~467.
- (10) 김찬봉, 양민양, 1991, "세가지 보간방법을 이용한 평판 캠의 CAD/CAM 시스템," 대한기계학회논문집, 제15권 제3호, pp. 869~879.
- (11) Gouraud, H., 1971, "Continuous Shading of Curved Surfaces," IEEE Trans. on Computing, Vol. C-20, No. 6, pp. 623~629.