

〈論 文〉

세가지 보간방법을 이용한 평판 캠의 CAD/CAM 시스템

김 찬 봉* · 양 민 양**

(1991년 2월 21일 접수)

A CAD/CAM System for Plate Cams with Three CNC Interpolation Methods

Chan Bong Kim and Min Yang Yang

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

Abstract

Design and manufacture of cams are complicated engineering tasks which are usually performed independently of each other. Therefore a CAD/CAM system for cams would be very useful. Since the mathematical cam profile must be interpolated at some increment to create the numerical data for CNC machining, the interpolation method can have significant effects on the quality of cam dynamic performance. The effort of this paper is to develop a methodology of computer aided design and manufacturing of precision cams in consideration of three CNC interpolation methods: linear, circular and $R-\theta$ interpolation. And various aspects of their features are explained and compared. The developed software can simulate a roughing and finishing sequence on a given cam blank is conveniently generated by defining machining action with successive cutter diameters. The computerized procedure is detailed with accompanying examples.

———— 기 호 설 명 ————	
$\vec{A}, \vec{B}, \vec{C}$: 벡터
$D_p(\vec{h})$: 점 p에서 패밀리에 대한 자코비안 행렬식
e	: 오프셋(offset)
\vec{h}	: 캠의 중심으로부터 캠과 종동절의 접축점에 이르는 벡터
\vec{h}	: 종동절의 이동축에 대한 패밀리
\vec{T}, \vec{T}	: X, Y축에 대한 단위 벡터
j_y	: 종동절의 y방향 약동 성분
L	: 보간 길이
N	: 법선 벡터
R^n	: n차원 Euclid 공간
r_a	: 캠의 중심과 종동절의 중심까지의 거리

r_b	: 캠의 최단반경
r_f	: 롤러 종동절의 반지름
r_r	: 종동절의 길이
s	: 종동절의 상승
v	: 종동절의 속도
x_1, x_2	: 국소 좌표계
x^c, y^c	: 캠에 고정된 좌표계
ρ	: 곡률 반경
ϕ	: 압력각

1. 서 론

캠(cam)이란 직접 접촉에 의하여 원하는 운동을 종동절(follower)에 주기적으로 전달하는 기계요소를 말한다. 캠 기구는 운동특성이 좋으며 동기 제어가 가능하므로 고속에서도 안정된 동작을 기대할

* 한국과학기술원 생산공학과

** 정회원, 한국과학기술원 생산공학과

수 있을 뿐만 아니라, 고장이 적으며 보수가 용이하고 신뢰성이 좋으므로 인쇄기, 내연기관, 방직기, 자동기계, 공작기계등에 널리 사용되고 있다⁽¹⁾.

캠을 제작하기 위해서는 먼저 캠 기구의 구조를 결정하고 종동절에 대한 운동 계획을 확정된 후 캠 곡선을 선정하고, 이에 따라 캠의 형상을 창성한다. 캠의 형상이 창성되면 이러한 형상을 가공할 수 있는 가공 정보가 계산되고, 사용될 NC 공작기계에 따른 NC 파트프로그램(part program)이 만들어져 NC 가공을 수행하게 된다.

그런데, 캠 형상은 불규칙 할 뿐만 아니라 동일한 종동절 운동일지라도 캠기구의 구성 방법에 따라 캠 형상이 달라지게되며, 미숙한 설계로 인하여 종동절에 불연속적인 가속도가 발생하게 되면 캠의 회전운동에 따라 접촉부에 충격력을 주게 되어 심한 마멸이 초래되므로 원하는 특성을 갖는 캠을 설계하는 것이 쉽지 않다. 또한, 설계단계에서 바람직한 캠의 형상이 창성되었다고 할 지라도 가공단계에서 정밀한 가공이 수행되지 않으면 가공오차에 의하여 종동절의 특성이 매우 민감하게 반응하므로 원하는 특성을 갖는 캠을 제작하는데 많은 시간과 노력이 필요하게 되며 다른 기계요소에 비하여 가공비가 많이 드는 것이 실정이다.

캠의 설계에 관한 연구는 오래전 부터 수행되어 많은 연구 결과가 발표되었으나⁽²⁻⁴⁾, 캠의 가공에 대한 발표는 극히 드문 실정이다. 그 이유는 NC가 개발되기 이전의 캠 가공은 수동으로 이루어져 그 정밀도가 기술자에 의해 좌우 되었으나, NC가 개발되면서 보다 정밀한 캠을 제작할 수 있었고, 각 업체에서 상품성을 고려하여 캠의 제작에 관한 노하우(know-how)를 발표하길 자제해 왔기 때문이었다.

70년대 초반 Oshima⁽⁵⁾는 NC 공작기계를 이용하여 직선보간에 의해 캠을 가공하고 그 가공오차에 대한 종동절 운동의 특성에 대하여 연구 하였다. 80년도 후반에 들어 CAD/CAM 기술의 도입이 확대되면서 캠의 설계 및 제작에 관한 CAD/CAM 소프트웨어들이 발표되었는데, Kiritsis⁽⁶⁾는 정밀 캠을 가공하기 위한 기존의 공작기계와는 다른 새로운 보간 방법을 소개하였으며, Wang⁽⁷⁾은 두가지 이상의 기본적인 캠곡선을 조합하여 캠 곡선을 만들어 캠의 형상을 구하고, 그에 대한 가공정보를 얻었으며, Malkin⁽⁸⁾등은 CNC연삭기를 이용하여 캠의 최종형상을 연마할 수 있는 소프트웨어의 개

발에 관한 연구 결과를 발표하였다.

본 연구에서는 여러가지 평판 캠 기구에 대하여 효율적이며 정밀한 설계 및 가공을 할 수 있도록 CAD/CAM 소프트웨어를 개발하는데 목적이 있다. 즉, 주어진 캠 곡선과 캠 기구의 구성조건을 바탕으로 포락선 이론에 의하여 캠 형상을 구하고, 원하는 가공 방법을 선정하여 황삭가공과 정삭가공에 대한 NC 파트프로그램을 얻는 기능들을 하나의 통합된 CAD/CAM 소프트웨어로 구성하여 생산성과 효율성 및 정밀성 향상에 기여하고자 한다.

2. 캠의 설계

2.1 캠 곡선(Cam Curve)과 캠 형상 설계

캠의 설계시 가장 먼저 결정해야 할 사항은 종동절의 운동에 관계된 것으로 종동절의 최대 변위, 운동구간 그리고 운동 특성들을 고려해야 한다. 종동절의 운동특성은 캠 곡선에 의하여 묘사되는데, 캠 곡선이란 운동곡선중에서 특히 캠에 사용되는 곡선으로 캠에 의하여 구동되는 종동절의 운동 곡선을 말한다.

캠 곡선은 종동절이 변위 s 가 시간 θ 의 함수로 하여

$$s = s(\theta) \quad (1)$$

와 같이 나타내는 것이 보통이다. 일반적으로 좋은 캠이란 캠 곡선에서 가속도의 최대값이 작은 것이라 할 수 있으나 그것만으로 절대적인 것을 평가할 수 없고, 가속도의 최대치 뿐만 아니라 기계기구의 안전에 관계되는 속도의 최대치, 종동절의 진동에 관계되는 약동(jerk)의 최대치 등을 복합적으로 고려해야 한다.

캠 곡선으로부터 캠 형상을 얻는 방법으로는 도시법(graphical layout method), 벡터 해석법(vector analysis method)등이 있고, 포락선(envelope)이론에 의하여 캠 형상을 얻을 수 있는데, 2차원 Euclid 공간에서 어떤 규칙적인 곡선의 모임을 패밀리(families)라 하며, 각각의 패밀리에 접하는 곡선의 집합을 포락선이라 한다⁽⁹⁾. 포락선이론은 복잡한 형상을 쉽게 묘사할 수 있기 때문에 컴퓨터 형상설계(computer aided geometric modeling)와 CAD/CAM에 널리 사용되고 있다. 본 연구에서는 매개변수 함수 형태의 포락선 이론을 이용하여 캠의 형상을 설계하였으며, 롤러 종동절을 갖는 캠 기구일 경우 압력각을 함께 구할 수 있는

장점이 있다.

2.2 평판 캠의 설계

(1) 왕복운동의 롤러 종동절

Fig. 1(a)에서 원점으로부터 종동절과 캠과의 접촉점에 이르는 벡터 \vec{h} 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\vec{h} = \vec{A} + \vec{B} + \vec{C}$$

여기서

$$\vec{A} = e(\sin\theta \vec{i} - \cos\theta \vec{j})$$

$$\vec{B} = (d_o + s)(\cos\theta \vec{i} + \sin\theta \vec{j})$$

$$\vec{C} = r_f(\cos\phi \vec{i} + \sin\phi \vec{j})$$

종동절의 이동궤적에 대한 패밀리는

$$\vec{h} : R^2 \rightarrow R^2$$

(3)

$$\vec{h}(\phi, \theta) = (x_1, x_2)$$

여기서

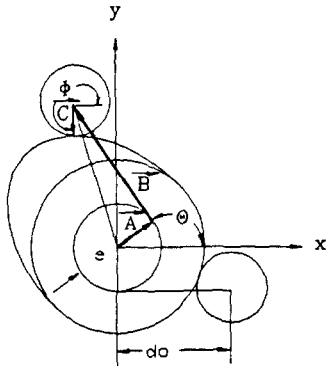
$$x_1 = e \sin\theta + (d_o + s)\cos\theta + r_f \cos\phi$$

$$x_2 = -e \cos\theta + (d_o + s)\sin\theta + r_f \sin\phi$$

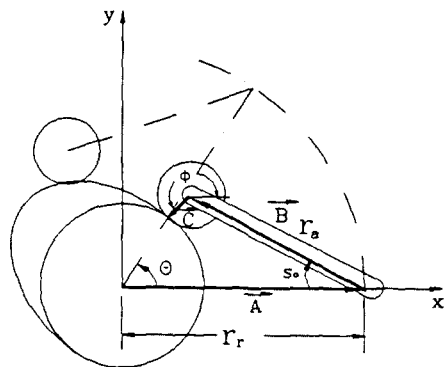
와 같은데, 패밀리에 위에 있는 점 p 에 대하여 패밀리에 대한 Jacobin 행렬식 $D_p(\vec{h})$ 를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$D_p(\vec{h}) = \begin{bmatrix} -r_f \sin\phi \cos\theta - (d_o + s)\sin\theta + v \cos\theta \\ r_f \cos\phi \sin\theta + (d_o + s)\cos\theta + v \sin\theta \end{bmatrix} \quad (4)$$

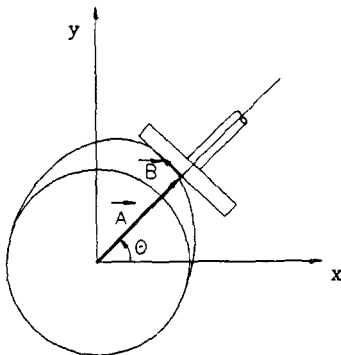
포락선은 점 p 에서 접하는 곡선이므로 국소좌표 ϕ 에 의한 접선의 방향과 패밀리에 매개변수 θ 에 의한 접선의 방향은 같으므로 $\det[D_p(\vec{h})]$ 가 0이어야 한다. 이와 같은 조건으로부터 압력각 ϕ 를 구



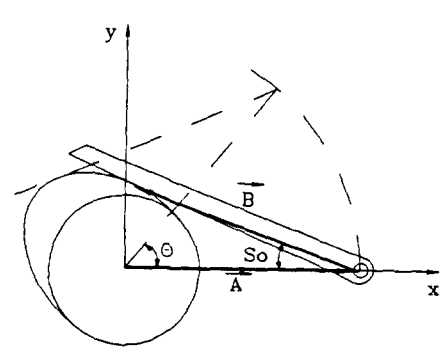
(a) Plate cam with translating roller follower



(c) Plate cam with oscillating roller follower



(b) Plate cam with translating flat face follower



(d) Plate cam with oscillating flat face follower

Fig. 1 Coordinate of plate cams

하면 다음과 같다.

$$\phi = \tan^{-1} \left\{ \frac{-(e+v)\cos\theta + (d_o+s)\sin\theta}{(e+v)\sin\theta + (d_o+s)\cos\theta} \right\} \quad (5)$$

이와같이 구한 압력각을 식 (3)에 대입하면 임의의 각도에서 캠의 형상에 관한 좌표값을 구할 수 있다.

(2) 왕복운동의 평판 종동절

Fig. 1(b)에서 원점으로부터 종동절과 캠과의 접촉점에 이르는 벡터 \vec{h} 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\vec{h} = \vec{A} + \vec{B} \quad (6)$$

여기서

$$\vec{A} = (r_b + s)(\cos\theta \vec{T} + \sin\theta \vec{J})$$

$$\vec{B} = -u(-\sin\theta \vec{T} + \cos\theta \vec{J})$$

종동절의 이동체적에 대한 패밀리는

$$\tilde{h} : R^2 \rightarrow R^2 \quad (7)$$

$$\tilde{h}(u, \theta) = (x_1, x_2)$$

여기서

$$x_1 = (r_b + s)\cos\theta + u\sin\theta$$

$$x_2 = (r_b + s)\sin\theta - u\cos\theta$$

와 같은데, 패밀리위에 있는 점 p 에 대하여 $D_p(\tilde{h})$ 를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$D_p(\tilde{h}) = \begin{bmatrix} \sin\theta & v\cos\theta - (r_b + s)\sin\theta + u\cos\theta \\ -\cos\theta & v\sin\theta + (r_b + s)\cos\theta + u\sin\theta \end{bmatrix} \quad (8)$$

패밀리에 접하는 포락선을 구하기 위해서 $\det[D_p(\tilde{h})]$ 가 0이어야 한다는 조건으로부터 u 를 구하면 다음과 같다.

$$u = -v \quad (9)$$

(3) 요동운동의 롤러 종동절

Fig. 1(c)에서 원점으로부터 종동절과 캠과의 접촉점에 이르는 벡터 \vec{h} 는 다음과 같다.

$$\vec{h} = \vec{A} + \vec{B} + \vec{C} \quad (10)$$

여기서

$$\vec{A} = r_a(\cos\theta \vec{T} + \sin\theta \vec{J})$$

$$\vec{B} = -r_r[\cos(\theta - s_o - s)\vec{T} + \sin(\theta - s_o - s)\vec{J}]$$

$$\vec{C} = r_f(\cos\phi \vec{T} + \sin\phi \vec{J})$$

종동절의 이동체적에 대한 패밀리는

$$\tilde{h} : R^2 \rightarrow R^2 \quad (11)$$

$$\tilde{h}(\phi, \theta) = (x_1, x_2)$$

여기서

$$x_1 = r_a\cos\theta - r_r\cos(\theta - s_o - s) + r_f\cos\phi$$

$$x_2 = r_a\sin\theta - r_r\sin(\theta - s_o - s) + r_f\sin\phi$$

와 같은데, 패밀리위에 있는 점 p 에 대하여 $D_p(\tilde{h})$ 를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$D_p(\tilde{h}) = \begin{bmatrix} -r_f\sin\phi - r_a\sin\theta + (1-v)r_r\sin(\theta - s_o - s) \\ r_f\cos\phi \quad r_a\cos\theta - (1-v)r_r\cos(\theta - s_o - s) \end{bmatrix} \quad (12)$$

패밀리에 접하는 포락선을 구하기 위해 $\det[D_p(\tilde{h})]$ 가 0이어야 한다는 조건으로부터 압력각 ϕ 를 구하면 다음과 같다.

$$\phi = \tan^{-1} \left\{ \frac{r_a\sin\theta - r_r(1-v)\sin(\theta - s_o - s)}{r_a\cos\theta - r_r(1-v)\cos(\theta - s_o - s)} \right\} \quad (13)$$

(4) 요동운동의 평판 종동절

Fig. 1(d)에서 원점으로부터 종동절과 캠과의 접촉점에 이르는 벡터 \vec{h} 는 다음과 같다.

$$\vec{h} = \vec{A} + \vec{B} \quad (14)$$

여기서

$$\vec{A} = r_a(\cos\theta \vec{T} + \sin\theta \vec{J})$$

$$\vec{B} = -u[\cos(\theta - s_o - s)\vec{T} + \sin(\theta - s_o - s)\vec{J}]$$

종동절의 이동체적에 대한 패밀리는

$$\tilde{h} : R^2 \rightarrow R^2 \quad (15)$$

$$\tilde{h}(u, \theta) = (x_1, x_2)$$

여기서

$$x_1 = r_a\cos\theta - u\cos(\theta - s_o - s)$$

$$x_2 = r_a\sin\theta - u\sin(\theta - s_o - s)$$

와 같은데, 패밀리위에 있는 점 p 에 대하여 $D_p(\tilde{h})$ 를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$D_p(\tilde{h}) = \begin{bmatrix} -\cos(\theta - s_o - s) - r_a\sin\theta + u(1-v)\sin(\theta - s_o - s) \\ -\sin(\theta - s_o - s) \quad r_a\cos\theta - u(1-v)\cos(\theta - s_o - s) \end{bmatrix} \quad (16)$$

패밀리에 접하는 포락선을 구하기 위해서 $\det[D_p(\tilde{h})]$ 가 0이어야 한다는 조건으로부터 u 를 구하면 다음과 같다.

$$u = \frac{r_a[\cos\theta\cos(\theta - s_o - s) + \sin\theta\sin(\theta - s_o - s)]}{1-v} \quad (17)$$

3. 캠의 가공

3.1 캠의 가공 방법과 가공 오차(Surface Irregularities)

캠은 접촉한 상태에서 상대운동이 일어나기 때문

에 특히 고속에서 사용할 경우 캠 표면에 작은 오차가 있을지라도 큰 소음, 마멸, 진동, 충격(inertia shock)이 발생한다. 그러므로, 캠은 정밀하게 가공해야 하기 때문에 가공이 힘들고 가공비가 많이 들며 가공시간이 많이 소비된다.

NC가 개발되기 이전에 사용되었던 캠의 가공방법에는 레이아웃 가공(layout cutting), 증분 가공(incremental cutting), 모방절삭(tracer cutting) 등이 있었는데, NC가 개발되면서 대부분의 캠은 NC 동작기계에 의하여 가공이 이루어지고 있으며, 형단조(die forging), 스탬핑(stamping), 분말야금(powder metallurgy) 등의 방법이 사용되기도 한다⁽¹⁰⁾.

정밀한 캠을 제작하기 위해 사용되고 있는 최근의 방법으로는 모방절삭(tracer control cutting), CNC를 이용한 직선보간 가공, CNC를 이용한 원호보간 가공, 모형 생성(geometric generation) 등이 있는데, 본 연구에서는 X-Y좌표계를 갖는 동작기계를 이용할 경우 CNC를 이용한 직선보간 방법과 CNC를 이용한 원호보간 방법을 이용하였으며, R-θ 좌표계를 갖는 동작기계에서는 직선 보간과 회전운동을 동기시켜 가공하는 R-θ보간 방법을 이용하였다.

캠 가공시 발생 할 수 있는 가공오차(surface irregularities)로는 오차(error), 조도(roughness), 파형(waviness)등이 있다. 오차는 국부적인 특징으로 공구의 위치를 잘못 설정하였거나 공구가 한 곳에만 너무 오래 머물렀을 때 발생하며, 그 크기에 따라 중동절의 운동에 영향을 주지만 가공시 주의를 요하면 제거할 수 있다. 조도는 동작기계의 진동(chatter)이나 동작기계의 최소 구동단위(1 BLU)때문에 발생하며, 작은 크기의 진동을 유발하지만 표면에 있는 기름등 완충재(damping)에 의하여 흡수 될 수 있어서 그 크기를 무시할 수 있다. 파형은 과도한 이송으로 가공할 경우 또는 가공오차(scallops or flats)에 의하여 발생하며, 큰 주기를 가지고 발생하기 때문에 연속적인 진동을 유발하여 중동절의 정상적인 동작에 큰 영향을 미친다.

그러므로, 중동절 운동의 특성에 가장 큰 영향을 주는 가공오차로는 파형이라 할 수 있다. 파형 형성의 주된 원인인 스칼럽이나 플랫은 보간 간격과 직접적인 관계가 있기 때문에 원하는 허용오차를 만족하는 최대 보간간격을 구하는 일은 매우 중요하다. 또한, 사용하고자 하는 동작기계의 동적 특

성도 고려해야 할 중요한 인자이다.

3.2 X-Y 좌표계에 의한 평판 캠의 가공

X-Y 좌표계를 갖는 대부분의 동작기계에서 사용되는 DDA 방식의 보간기(interpolator)를 이용하게 될 경우, 공구가 현재 시작점으로부터 다음 위치로 이동할 때 가속과 감속을 하면서 이동하게 되는데, 공구의 이동좌표가 많을 경우 가속과 감속운동을 많이 반복하게 되고 그로인하여 가공시간이 많이 걸리게 되며, 전체 가공시간의 10% 정도만 최고의 절삭속도로 가공하기 때문에 공구의 마멸이 증가한다⁽¹¹⁾.

또한, X-Y 좌표계로 원호 보간을 할 경우 8가지의 기본 원호보간이 연결되는 0°, 90°, 180°, 270° 부위에서는 동작기계에 따라 불연속적인 변곡점이 발생할 수 있다.

그러므로, 원하는 허용오차 이내로 가공할 수 있는 적절한 보간 길이(step length)를 결정하는 일은 매우 중요하다. 주어진 허용오차 이내로 가공할 수 있는 최대한의 보간 간격을 구함으로써 가공시간을 줄일 수 있고 파형을 향상시킬 수 있으며 불필요한 공구의 마멸을 줄일 수 있다.

보간길이를 구하는 방법으로 첫째는, 시행착오법(trial and error)으로 가공구간을 미소하게 증가시키면서 그때의 가공오차를 계산하는 방법으로, 증분에 따라 가공 오차가 달라지고 계산속도가 상대적으로 많이 걸리는 것이 단점이다. 둘째는, 허용오차가 주어지면 이에 상응하는 보간 길이를 예측하는 방법으로 계산 속도가 상대적으로 빠른 것이 장점이다.

(1) 직선보간(linear interpolation)에 의한 가공 직선 보간으로 가공할 경우 보간길이를 예측하기 위해서 가공경로 곡선을 부분적으로 반경이 ρ인 원호로 가정하면 허용오차에 대한 보간길이 L을 다음과 같이 예측할 수 있는데, 곡선의 매개변수를 u라 할 때 Taylor급수전개에 의하여 보간길이 L에 상응하는 매개변수 증분 Δu는 다음과 같다⁽¹²⁾.

$$\Delta u \cong \frac{L}{\dot{r}(u)} \quad (18)$$

(2) 원호보간(circular interpolation)에 의한 가공 직선보간으로 가공할 경우 스칼럽에서 변곡점이 존재하여 가속도가 불연속적으로 변하게 되어 이로 인한 충격력에 의하여 진동이 발생하게 된다. 그러나, 원호보간으로 가공할 경우 변곡점이 없는 연속

된 원호를 연결할 수 있어 좋은 특성을 갖는 캠을 제작할 수 있다. 즉, Bi-arc curve fitting⁽¹³⁾ 방법을 이용하여 각 곡선구간(curve segment)에서 접하는 두개의 원호를 연결하여 각각을 원호보간에 의하여 가공하면 변곡점을 피할 수 있다.

Bi-arc를 이용하여 원호보간으로 가공하기 위해서는 먼저 캠 형상의 두점간에 변곡점의 유무를 확인하고, 인접한 두점 P_i 와 P_j 사이에 변곡점이 없을 경우 각각의 곡률반경은 Fig. 2로부터

$$\rho_i = d(1 - \cos\theta_i) / A \quad (19)$$

$$\rho_j = d(1 - \cos\theta_j) / A \quad (20)$$

여기서

$$A = \sin\theta_i + \sin\theta_j - \sin(\theta_i + \theta_j)$$

와 같이 나타낼 수 있다. 인접한 두 점 P_i 와 P_j 사이에 변곡점이 있을 경우 공통 곡률 반경 ρ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho = \frac{d}{\sin\theta_i + \sin\theta_j + \sqrt{4 - (\cos\theta_i + \cos\theta_j)^2}} \quad (21)$$

Fig. 2에서 점 P_i 와 P_j 에서는 원호와 실제 곡선

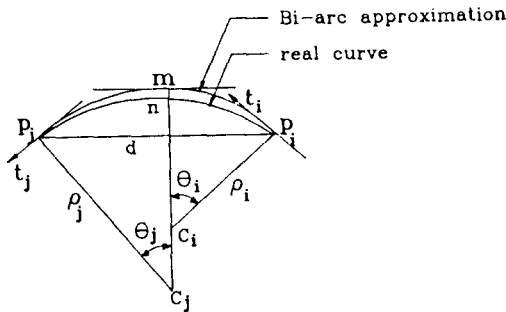


Fig. 2 Bi-arc at No-inflection section

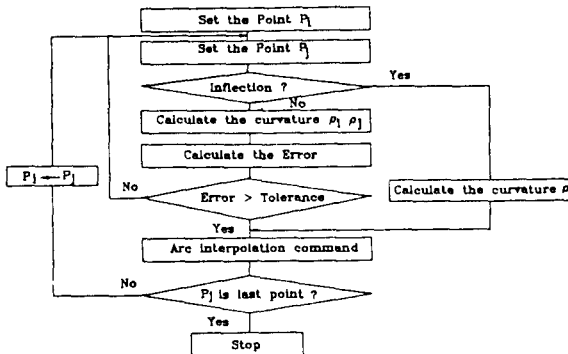


Fig. 3 Flow chart for circular interpolation

이 접하며 두 점에서 원호가 전개되어 m 점에서 만나므로 실제 곡선과 원호와의 오차는 점점 P_i 와 P_j 에서 m 점으로 갈 수록 증가하여 m 점에서 최대가 되므로, 각 구간에서의 최대 가공오차는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{Error} = |\rho_i - n c_i| = |\rho_j - n c_j| \quad (22)$$

그러면 가공오차가 주어진 허용오차보다 작은 최대한의 구간까지 검사한 후 각각의 원호를 원호보간으로 가공하면 변곡점이 없는 원호보간만으로 가공이 가능하게 된다. 상승 구간과 하강 구간에 대하여 Bi-arc를 이용하여 원호보간 가공에 대한 정보를 얻는 과정을 Fig. 3에 나타냈다.

3.3 R-θ좌표계에 의한 평판 캠의 가공

R-θ보간은 공작기계의 테이블에 인덱스 테이블을 설치하고 인덱스 테이블에 캠 소재를 설치한 후 캠 소재의 회전과 공구의 이동을 동기시켜서 가공하는 방법으로 임의의 보간 구간에서 공구의 직선운동과 캠 소재의 회전운동으로 극 좌표계(polar

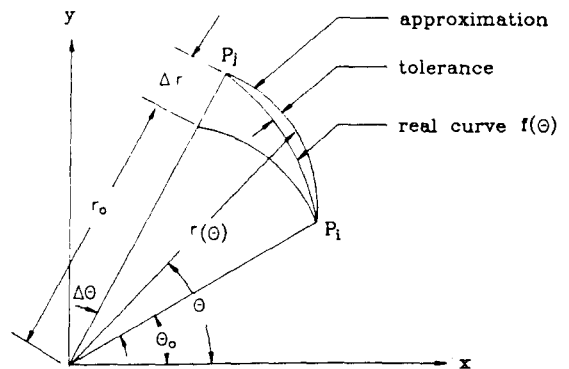


Fig. 4 R-θ approximation

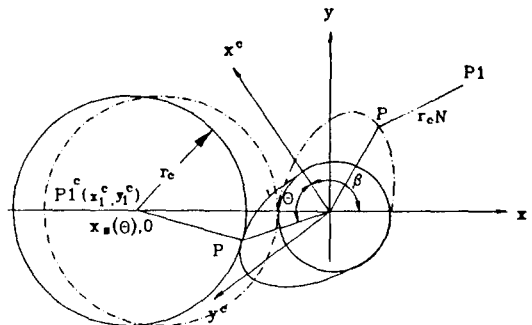


Fig. 5 Cam profile and cutter location

coordinate)를 형성 하면서 가공하는 방법이다.

Fig. 4로부터 임의의 곡선 구간에서 공구의 이동을 극 좌표계로 나타내면 다음과 같다.

$$r(\theta) = r_o + \frac{\Delta r}{\Delta \theta}(\theta - \theta_o) \quad (23)$$

그러면, 임의의 곡선 구간에서 가공오차를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{Error} = \max |r(\theta) - f(\theta)| \quad (24)$$

절대좌표계를 x, y 로 나타내고 캠에 고정된 좌표계를 x^c, y^c 라 하면, 캠 형상에 있는 임의의 점 P 를 가공하기 위한 공구 중심점 P_i 은 공구의 반지름을 r_c 라하고 법선 벡터를 N 이라 할 경우 Fig. 5로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P^c = P + r_c N \quad (25)$$

$R-\theta$ 보간으로 가공할 경우 공구 중심점 P_i 을 공구의 중심점이 x 축 선상에 오도록 임의의 각도 β 만큼 회전시키면 $P_i^c(x_i^c, y_i^c)$ 에 대한 y 값으로부터 회전각 β 를 다음과 같이 구할 수 있다⁽⁸⁾.

$$y_i^c = x_i(\theta) \sin \beta + y_i(\theta) \cos \beta = 0 \quad (26)$$

$$\beta = \tan^{-1} \left[\frac{-y_i(\theta)}{x_i(\theta)} \right] \quad (27)$$

그러므로 P 점을 가공하기 위한 공구 중심점의 거리 $x_s(\theta)$ 를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$x_s(\theta) = x_i(\theta) \cos \beta - y_i(\theta) \sin \beta \quad (28)$$

상승 구간과 하강 구간에 대한 $R-\theta$ 보간 과정을 Fig. 6에 나타냈다.

3.4 가공 계획(Operation Planning)

캠 형상에 대한 정보가 얻어지면 그것으로부터 정삭에 관한 CL-Data는 쉽게 얻어지는데, 황삭에 관한 적절한 CL-Data가 없을 경우 정삭 CL-Data를 이용하여 공구경 보정을 들어가면서 가공을 하게된다. 그러한 경우 가공초기에는 절삭에 참여하는 구간이 적어 불필요한 공구이송을 부여하며 가공시간도 많이 드는 것이 실정이다.

그러나, 초기 공작물의 반지름과 캠의 최대 반지름을 비교하여 캠의 최대 반지름이 초기 공작물의 반지름 보다 작을 경우 정삭 절삭깊이를 제외한 공작물은 원호보간으로 가공을 하고, 공작물의 반지름이 캠의 최대 반지름보다 작아지게 되면 단일한 원호보간으로 가공할 수 있는 최대 각도를 계산하여 시계방향과 반시계방향으로 원호보간을 반복하여 캠의 최종형상으로부터 정삭 절삭깊이를 제외한 양만큼을 황삭한 후 정삭작업에 들어감으로써 경제

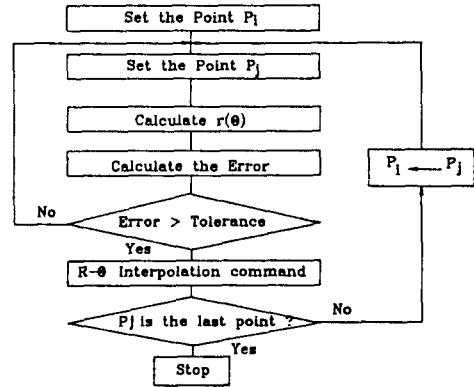


Fig. 6 Flow chart for $R-\theta$ interpolation

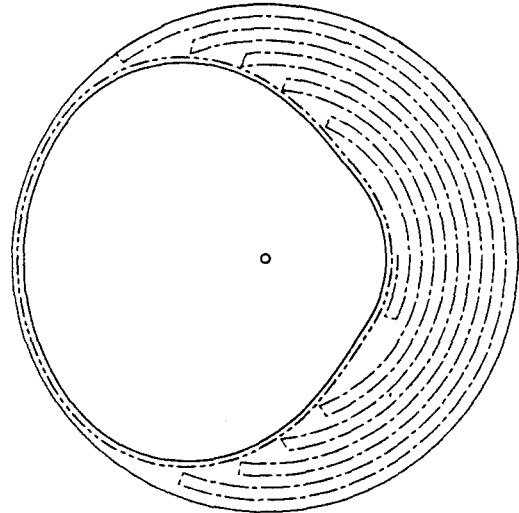


Fig. 7 Cutter path for operation planning

적인 CL-Data를 얻을 수 있다(Fig. 7).

3.5 종동절 운동의 특성

직선 보간에 의하여 가공된 캠은 직선 부위에서는 연속적인 운동을 하지만 직선의 접합부위에서는 불연속적으로 변한다. 즉, 직선 보간으로 가공된 캠의 표면을 따라 종동절이 운동을 할 때 변위는 연속이 되지만 속도, 가속도, 약동 등은 불연속적으로 변하여 원하는 특성을 얻기 어렵다.

$R-\theta$ 에 의하여 가공된 캠도 두 보간 구간이 접하는 곳에서는 변위만 연속이며 속도, 가속도, 약

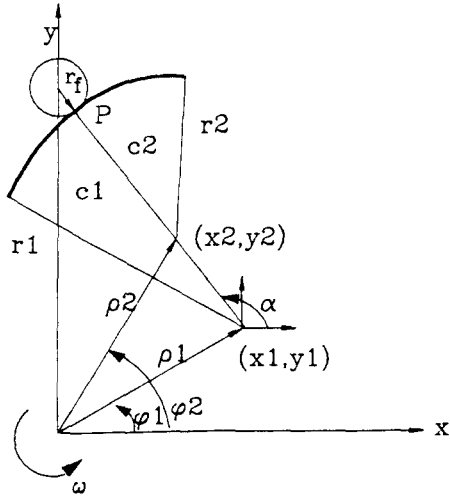


Fig. 8 Follower motion for circular interpolation

동 등은 불연속적으로 변하게 된다.

그러나, Bi-arc에 의하여 원호보간으로 가공될 경우 임의의 접속점에서 종동절의 운동이 불연속적으로 변하지 않는다. Bi-arc에 의하여 원호보간으로 가공된 캠의 표면을 따라 거동되는 종동절을 Fig. 8과 같이 나타내고, 캠의 회전속도는 ω 로 일정하면 종동절의 운동은 y 방향을 따라 일어나기 때문에 두 원호의 접속 구간에서 종동절의 변위, 속도, 가속도는 연속적임을 알 수 있다.

그러나, P 점에서 약동(jerk)은 각각의 원호에서

$$C_1 : j_y = -\rho_1 \omega^3 \cos \phi_1 + (r_1 + r_f) \omega^4 \sin \alpha \quad (29)$$

$$C_2 : j_y = -\rho_2 \omega^3 \cos \phi_2 + (r_2 + r_f) \omega^4 \sin \alpha \quad (30)$$

와 같이 나타낼 수 있는데,

$$\begin{aligned} \text{식 (29) - 식 (30)} &= \omega^3 (-\rho_1 \cos \phi_1 + \rho_2 \cos \phi_2) \\ &\quad + \omega^4 (r_1 - r_2) \sin \alpha \\ &= \omega^3 (x_2 - x_1) + \omega^4 (y_2 - y_1) \\ &\neq 0 \end{aligned} \quad (31)$$

이므로 약동은 불연속임을 알 수 있다.

4. CAD/CAM 소프트웨어 개발과 적용 예

본 소프트웨어는 Borland International의 Turbo C Version 2.0을 이용하여 개발하였으며 사용자의 편이를 위하여 메뉴(menu)방식을 이용했다. 전체 소프트웨어의 구조를 다음과 같이 CAD Module과 CAM Module로 나눌 수 있다(Fig. 9).

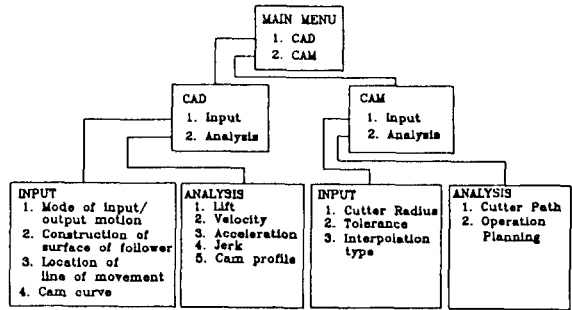


Fig. 9 Block diagram for CAD/CAM software

4.1 CAD 모듈

CAD 모듈(module)은 두 부분으로 구성되는데, 입력단계에서는 캠기구의 종류를 선정하고 캠기구의 구성조건을 입력하며 캠 곡선은 18개의 단일한 캠곡선중에서 선택하는지 불연속 데이터를 이용한다. 또한 기초원, 종동절의 반경 및 편차(offset)량, 종동절의 최대 변위등이 정해지면 해석단계에서는 캠 곡선의 각종 특성과 캠 형상을 해석, 표시할 수 있도록 하여 설계된 캠의 모양과 특성에 대한 검토를 용이하게 하였다.

4.2 CAM 모듈

CAM 모듈도 두 개의 부분으로 구성되는데, 입력단계에서는 CAD 모듈에서 구한 캠 형상으로부터 가공방법을 결정하고 허용오차의 크기와 근사방법(approximation types)을 결정한다. 가공에 대한 입력정보가 주어지면 해석단계에서는 공작물의 초기 형상으로부터 캠의 최종 형상을 가공할 수 있는 황삭 가공과 정삭가공에 대한 NC 파트프로그래밍을 얻으며 공구의 제적을 도시한다.

4.3 적용 예

기초원의 반지름이 20mm, 종동절의 반경이 8mm, 종동절의 최대 상승이 20mm, 상승과 하강이 각각 $30^\circ \sim 150^\circ$, $210^\circ \sim 330^\circ$ 이며, 변형사인곡선을 택한 캠을 가공오차를 0.01mm로 직선보간, 원호보간 그리고 $R-\theta$ 보간에 의하여 가공할 경우 소프트웨어를 적용하는 과정을 Fig. 10부터 Fig. 13에 나타냈다. Fig. 14는 3가지 보간방법으로 가공된 캠의 형상이다.

직선보간과 원호보간은 TMV-40M밀링 머신을

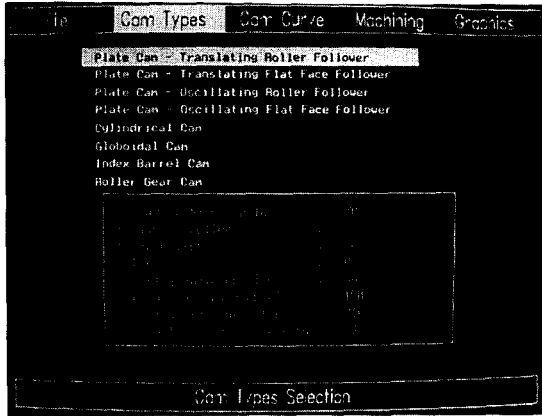


Fig. 10 Input the cam system construction

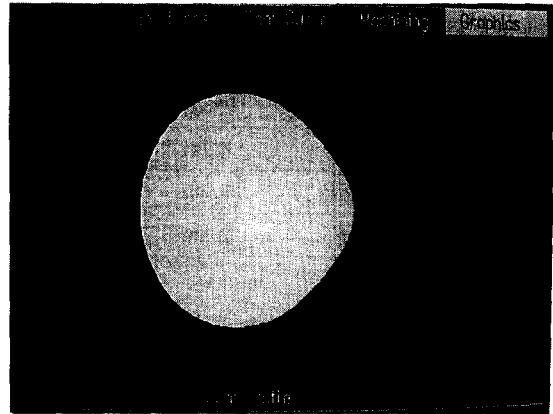


Fig. 13 Cam profile

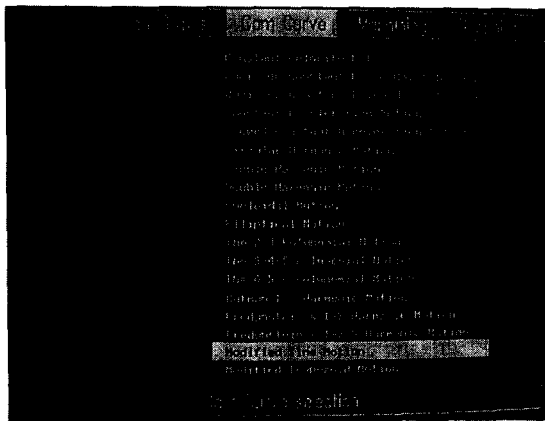


Fig. 11 Selection of cam curve

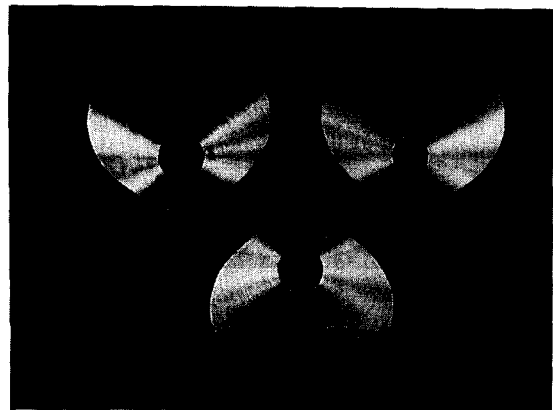


Fig. 14 Cams manufactured by three interpolations

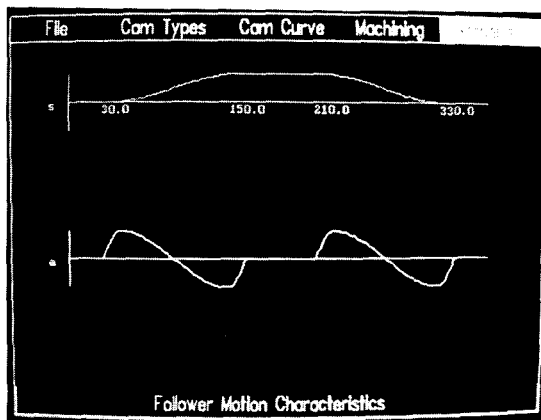


Fig. 12 Follower motion characteristics

이용하였으며, $R-\theta$ 보간은 VMC-430 밀링 머신과 CNC-250 인덱스 테이블을 동시시켜 가공하였고 UMC 850 CAA 3차원 좌표 측정기를 이용하여 측정하였다.

직선보간, 원호보간, $R-\theta$ 보간으로 가공된 캠의 가공특성을 Table 1에 나타냈다. 보간구간의 수가 가장 작으며 NC 테이프 길이도 가장작은 것은 $R-\theta$ 보간이고 직선보간의 경우 보간구간의 수가 제일 많고, 원호보간의 경우 보간구간의 수는 직선 보간보다 작은 반면 원호보간에 대한 NC 파트프로그램 명령어가 많기 때문에 상대적으로 NC 테이프의 길이도 길어짐을 알 수 있다.

Table 1 Machining characteristics

	NC tape length	No. of data points	Machining error	R_a	R_n
Linear interpolation	6.7m	127	45.2 μ m	1.2 μ m	6.67 μ m
Circular interpolation	7.7m	89	48.4 μ m	0.7 μ m	5.33 μ m
R - θ interpolation	2.8m	62	40.5 μ m	1.1 μ m	6.33 μ m

허용오차를 10 μ m로 주었으며 공작기계 구동부의 동적 특성과 치구의 견고성, 측정시 중심점 설정의 부정확성등 여러가지 요인으로 인하여 가공오차는 대략 40 μ m 정도였다.

상승구간에 대한 표면조도는 원호보간을 가공된

경우가 가장 좋고 직선보간이 가장 나쁜 결과를 나타냈다. 상승구간에 대한 파형은 Fig. 15에서 나타낸 것처럼 원호보간으로 가공된 캠이 가장 좋으며 보간간격의 수가 작은 R - θ 보간이 가장 나쁜 결과를 나타냈다. 정류구간인 150 $^{\circ}$ ~210 $^{\circ}$ 구간의 파형은 R - θ 보간에서는 매우 좋은 결과를 나타낸 반면, X-Y좌표계에서는 180 $^{\circ}$ 부위에서 약간의 불연속적인 성질을 보이고 있다(Fig. 16).

초기 공작물의 반지름을 42mm로 주고 2mm씩 공구경보정을 하면서 절삭속도를 300mm/min으로 가공할 경우 1074sec가 걸리는데 반해가공계획(operation planning)에 의한 가공을 한 결과 382sec로 64.4%의 가공 시간을 단축할 수 있었다.

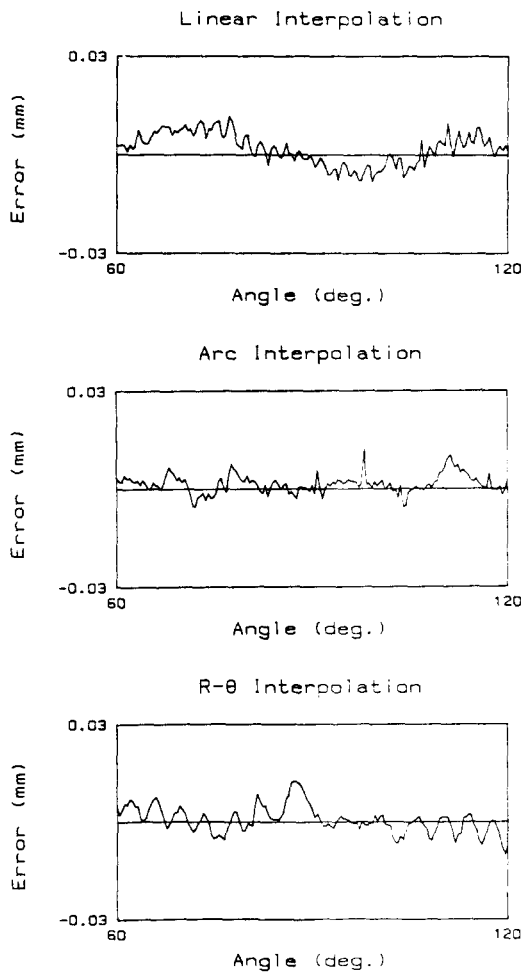


Fig. 15 Waviness for rise section

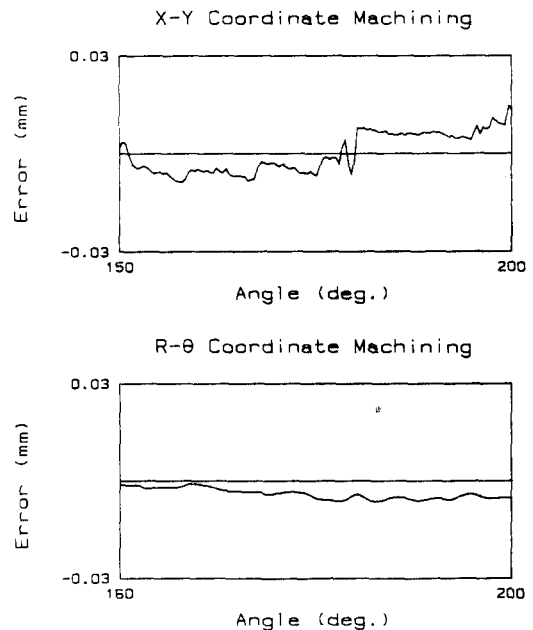


Fig. 16 Waviness for dwell section

5. 결 론

캠의 설계 및 가공에 관한 문제를 하나의 CAD/CAM 소프트웨어로 구성하여 해결함으로써 캠의 설계에 있어서는 캠 곡선의 특성, 종동절 운동의 특성을 쉽게 파악할 수 있었고, 캠 형상의 설계가 용이하였으며, 캠의 가공에 있어서는 황삭 가공 뿐만 아니라 허용 오차이내로 가공할 수 있는 최대 보간 간격으로 가공할 수 있는 정삭 가공에 대한 가공 정보를 얻을 수 있었으며, 공구 궤적을 도시함으로써 검토가 용이하였다. 또한, 사용하고자 하는 동작기계에 맞는 NC 파트프로그램을 얻을 수 있었다.

그러므로, 본 연구에 의하여 개발된 CAD/CAM 소프트웨어를 이용한 결과 NC 가공의 효율화로 인하여 생산성을 향상할 수 있었고 기존의 동작기계에서도 정밀한 캠을 제작할 수 있었다.

참 고 문 헌

- (1) Chen, Fan. Y., 1982, "Mechanics and Design of Cam Mechanisms", Pergamon Press Inc.
- (2) Wiederrich, J.L., Roth, B., 1975, "Dynamic Synthesis of Cams Using Finite Trigonometric Series", Trans. ASME, Journal of Engineering for Industry, pp. 287~293.
- (3) Chen, Fan.y., 1977, "A Study of the State of the Art of Cam System Dynamics", Mechanism and Machine Theory, Vol. 12, pp. 201~224.
- (4) Sandgren, E., West, R.L., 1989, "Shape Optimization of Cam Profile using a B-Spline Representation", Trans. ASME, Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design, Vol. 111, pp. 195~201.
- (5) Takeshi Oshima, 1970, "Cam Profile Machining by Numerically Controlled Milling Machine", Review of the Electrical Communication Laboratory, Vol. 18, No. 3-4, pp. 226~234.
- (6) Papaioannou, S.G., 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.
- (7) Lin, Alan C., Chang, H., Wang, H.P., 1988, "Computerized Design and Manufacturing of Plate Cams", INT. J. PROD. RES. Vol. 26, No. 8, pp. 1395~1430.
- (8) Gal-Tzur, Z., Shpitaini, M., Malkin, S., 1989, "Design and Manufacturing Analysis for Integrated CAD/CAM of Cams", Trans. of the ASME, Journal of Engineering for Industry, Vol. 111, pp. 307~314.
- (9) do Carmo, 1976, "Differential Geometry of Curves and Surface", Prentice Hall Inc.
- (10) Grant, B., Soni, A.H., 1979, "A Survey of Cam Manufacture Methods", Trans. of ASME, Journal of Mechanical Design, Vol. 101, pp. 455~467.
- (11) Vickers, G.W., Bradly, C., 1990, "Curved Surface Machining Through Circular Arc Interpolation", The Winter Annual Meeting of the ASME. PED-VOL. 45, Modeling of Machine Tools; Accuracy, Dynamics, and Control, pp. 191~198.
- (12) Faux, I.D., Partt, M.J., 1981, "Computational Geometry for Design and Manufacture", John Wiley & sons Inc.
- (13) Bolton, K.M., 1975, "Biarc Curves", Computer Aided Design, Vol. 7, No. 2, pp. 89~92.