한국공작기계학회논문집 Vol.15 No.5 2006. 10.
Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers

고 정밀 캠 프로파일 CNC 연삭기용 CAD/CAM 시스템 개발에 관한 연구

임상헌*, 정종윤+, 이춘만++

(논문접수일 2006. 3. 28, 심사완료일 2006. 8. 2)

A Study on the Development of CAD/CAM System for High Precision Cam Profile CNC Grinding Machine

Sang Heon Lim*, Jong Yun Jung+, Choon Man Lee++

Abstract

Cam mechanisms are one of the most popular devices for generating irregular motion and are widely used in many automatic equipments, such as textile machinery, internal combustion engines and other automatic devices. In order to obtain the positive motion of follower by rotating cam, its shape should be correctly designed and manufactured. In present paper, a CAD/CAM system is developed for shape design of disk cams using relative velocity method and NC code generation using the biarc curve interpolation. And, a disk cam is successfully manufactured by the developed CAD/CAM system. Thus, it is shown that the developed CAD/CAM system can be used for high precision cam profile CNC grinding machine.

Key Words : Relative velocity method(상대 속도법), Shape design(형상 설계), Computer aided manufacturing(전산원용가공), Biarc curve fitting(이중 원호 보간)

1. 서 론

기계장치는 여러 가지 기계요소로 이루어져 있으며 이 중에서도 캠 기구는 회전축의 1회전을 수행하는 동안 종동절의 다양한 운동성분을 얻을 수 있으므로 자동화 시스템에 많이 이용되고 있다. 특히 평면 캠 기구는 적은 구성품으로 다양하고 불 규칙적인 운동을 발생시키는 접촉운동기구로서, 정확한 운동전달(positive motion)장치이다[1].

산업기술의 발달에 기인하여 각종 첨단 제품들이 개발되면서 기계 부품의 정밀가공에 대한 수요가 증가하고 있다. 절삭가공 기계들이 고속화, 고정밀화 되어가면서 과거의 연삭 가공을 대체하는 경우도 많이 발생하고 있으나 다른 한편으로는

* 창원대학교 기계설계공학과 대학원
+ 창원대학교 산업시스템공학과
++ 교신저자, 창원대학교 기계설계공학과 (cmlee@sarim.changwon.ac.kr)
주소: 641-773 경남 창원시 사림동 9번지

제품의 고정밀화 요구에 따라 연삭 가공의 수요가 늘어나고 있으며 높은 생산성과 표면 거칠기가 서브 미크론(10^{-7}m) 단위의 연삭 표면을 동시에 요구하고 있다[5].

캠의 회전에 의한 종동절의 정확한 움직임을 얻기 위해서는 캠의 형상이 정확히 설계되어야 한다. 이를 위해 순간속도 중심점과 기하학적 조건을 이용한 설계방법[1~3]과 캠과 종동절의 상대속도를 이용한 방법[4], 그리고 미분기하학을 이용한 방법[9] 등이 제시되어 있다. 또한, 설계 단계에서 바람직한 캠의 형상이 설계되었다 할지라도 가공 단계에서 정밀한 가공이 수행되지 않으면 만족스런 결과를 얻을 수 없게 된다. 이에 본 연구에서는 정밀한 캠 가공을 위해 Biarc curve fitting법[10]을 이용하였다. 이러한 연구 배경을 기초로 하여 본 연구에서는 캠의 연삭을 위해 CAD/CAM 시스템을 구축하여 설계 및 가공 자동화를 구현하는데 목적을 두고 있다.

2. CAD/CAM 시스템 개발

본 연구에서 개발된 CAD/CAM 시스템 중 변위선도의 결정법과 순간 속도 중심법 및 상대 속도법을 이용한 캠의 설계에 관해서는 참고문헌[1~8]을 참조하면 된다.

2.1 가공을 위한 Biarc curve fitting법

평판 캠의 캠 곡선을 가공하기 위해서는 우선 캠 곡선상의 점들을 구하고, 이 점을 지나는 원호를 Biarc curve fitting법에 의해 계산한다. 여기에 사용된 Biarc curve fitting법에 관한 이론은 Bolton[10]이 제시한 것을 사용하였다. Bolton은 주어진 두 접선의 방향에 따라 변곡과 비변곡으로 나누어 제시하였다. 비변곡인 경우 반지름이 각각 R_1, R_2인 두 개의 원호를 넣는 방법을 Fig. 1에 나타내었으며, 서로 접하는 두 원의 중심점 좌표는 다음과 같이 된다.

$$(x_1,\ y_1) = (R_1 S_1,\ R_1 C_1) \tag{1}$$
$$(x_2,\ y_2) = (P - R_2 S_2,\ R_2 C_2) \tag{2}$$

여기서, P는 두 점 P_1, P_2간의 거리이고, R_1, R_2는 두 원의 반지름이다. 그리고 $S_1 = |\sin\theta_1|$, $S_2 = |\sin\theta_2|$,

$C_1 = -\sin\theta_1 \cos\theta_1 / S_1$, $C_2 = \sin\theta_2 \cos\theta_2 / S_2$ 이다.

또한, 자유 곡선을 추종하기 위해 선정될 두 개의 원은 서로 접해야 하며, 두 원의 반지름 차를 최소로 할 때 더욱 원에 가까우며 P_1, P_2를 지나는 곡선을 구할 수 있다. 이러한 조건을 만족하는 R_1, R_2를 구하면 식 (3)과 같이 된다.

$$R_1 = \frac{PC \pm P(C^2 - CA + B/2)^{1/2}}{B} \tag{3}$$
$$R_2 = \frac{P^2 - 2PR_1 A + 2R_1^2 B}{2R_1 B - 2PC} - R_1$$

여기서, $A = S_1 + S_2$,

$B = S_1 S_2 + C_1 C_2 + 1$,

$C = S_2$ 이다.

식 (3)에서 (+)인 경우는 $\phi_1 > \phi_2$인 경우에 해당되고, (-)인 경우는 $\phi_1 < \phi_2$인 경우에 해당된다.

Fig. 2는 변곡인 경우 반지름이 각각 R_1, R_2인 두 개의 원호를 넣는 방법을 그림으로 나타내었다. 변곡인 경우 반지름 R_1, R_2는 예각 ϕ_1과 ϕ_2에 비례하므로 이 조건을 이용하여 반지름 R_1, R_2를 나타내면 식 (4)와 같다.

$$R_1 = \frac{EP - P(E^2 - 2D)^{1/2}}{2D} \tag{4}$$
$$R_2 = \frac{\phi_2}{\phi_1} R_1$$

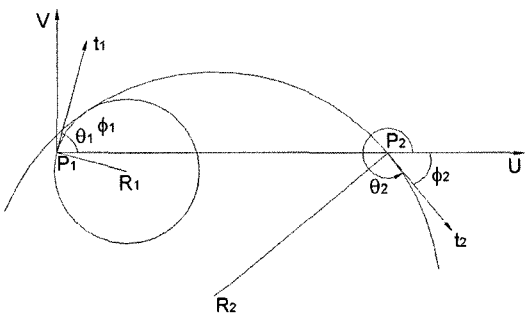

Fig. 1 Non-inflection case for the biarc curve fitting

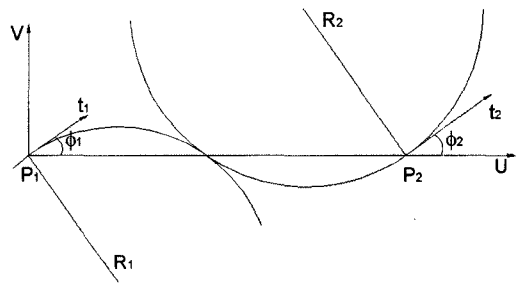

Fig. 2 Inflection case for the biarc curve fitting

여기서, P는 두 점 P_1, P_2간의 거리이며

$D = (S_1 S_2 - C_1 C_2 - 1)\phi_2 \,/\, \phi_1$, $E = S_1 + \dfrac{\phi_2}{\phi_1} S_2$ 이다.

2.2 Biarc curve fitting법의 형상오차

부드러운 자유 곡면에 대한 Biarc curve fitting법은 매우 정밀한 형상을 재현해낼 수 있고, 직선보간법에 비해 매우 정밀한 장점을 보유하고 있으며 CNC 컨트롤러에서 G02, G03의 NC-code를 이용할 수 있기 때문에 간결한 NC-code를 생성할 수 있는 이점을 가지고 있다. 그러나 급격한 형상변화의 곡면에서는 Fig. 3과 같은 추가점의 위치에서 곡률반경의 불연속현상(discontinuity)이 발생한다[11].

즉, 점 P_1, P_2, P_3에 의한 곡률의 중심(O_1)과 반경 R_1에 의한 구간 (P_2, P_3)의 추가점 S_{11}의 좌표와 점 P_2, P_3, P_4에의한 원호의 중심(O_2)과 반경 R_2에 의한 같은 구간의 추가점 S_{12}의 좌표는 같은 방향각은 유지하고 있으나, 반경방향으로 $R_1 \neq R_2$인 곡률 불연속현상이 발생된다. 이 현상은 결국 공구 중심위치를 이중으로 제시하게 되고 이것은 가공오차를 유발하는 원인이다. 이 때 반경방향의 상승량(Jump)는 2개의 좌표간의 거리에 해당된다.

2.3 GSS법을 이용한 NC-code의 최적화

Biarc curve fitting에 필요한 캠 곡선상의 점을 구하기 위해 캠 곡선을 몇 개의 구간 수(number of span)로 나누고, 구간길이(length of span)를 어떻게 하는가는 매우 중요하다. 이 점들은 Biarc curve fitting에서의 기준점이 되고, 점간의 간격은 캠 곡선과 Biarc curve 사이의 오차에 영향을 주게 된다[12]. 본 연구에서는 캠 곡선과 Biarc curve 사이에서 발생하는 오차의 한도를 정하여 허용오차(ϵ_a : allowance error)라하고, 허용오차 범위에 드는 캠 곡선상의 점을 구하기 위하여 반복법(iterative method)인 GSS(golden section search)법을 사용하였다. 이렇게 구한 점들에 의해 Biarc curve fitting을 하게 되면 모든 구간에서의 오차는 허용오차 범위에 들게 되고, 구간 수 또한 줄어들어 NC-code를 줄일 수 있다. 즉, Biarc curve fitting법을 사용하면 각 구간마다 2개의 NC-code가 생성되는데, 캠 곡선을 N개의 점으로 분할하면 구간 수 M은 N-1개가 되고, NC-code 수는 2M개가 된다. 구간길이를 늘리면 구간수가 감소하고 오차는 증가하지만 NC-code의 길이는 감소한다. 그러므로 NC-code의 길이를 줄이기 위해서는 허용오차 범위에 드는 최적구간길이를 구하여야 한다.

Fig. 4는 GSS법에 의해서 허용오차 범위에 드는 최적구간길이를 계산하는 과정을 요약한 그림으로 n번째와 n+1번째의 반복계산 상태를 보여주고 있다. 캠 곡선의 시작각 θ_1에서 캠 곡선의 끝각 θ_2까지 나타낸 것이며, 수직축은 오차 ϵ을 나타낸 다. 시작각 θ_1에서 캠 곡선이 시작되므로 오차는 영(zero)이 되고, θ_2에서의 오차는 ϵ_k가 된다. GSS법의 n번째 계산에서 캠 곡선상의 임의의 두 점에 대한 각도를 $(\theta_1)_n$, $(\theta_2)_n$이라고 하면, 각각의 오차는 $(\epsilon_1)_n$, $(\epsilon_2)_n$이 되며 오차간의 차이는 $(\Delta\epsilon)_n$이 된다. GSS법의 n+1번째 계산구간의 결정에 필요한 $(\theta_1)_{n+1}$, $(\theta_2)_{n+1}$은 다음 식(5)로 계산할 수 있다.

$$(\theta_1)_{n+1} = (\theta_1)_n + (1-\tau)\Delta\theta_n \tag{5}$$

$$(\theta_2)_{n+1} = (\theta_1)_n + \tau\Delta\theta_n$$

단, $\Delta\theta_n = (\theta_2)_n - (\theta_1)_n$

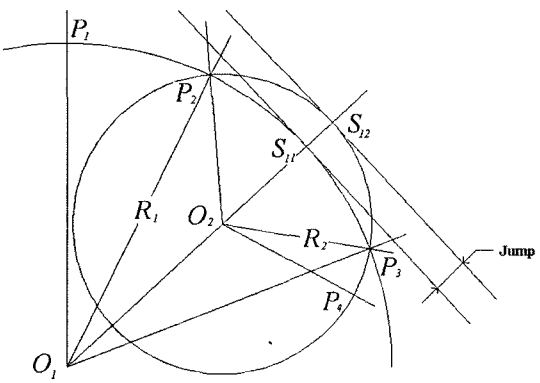

Fig. 3 Radial jump between two circles

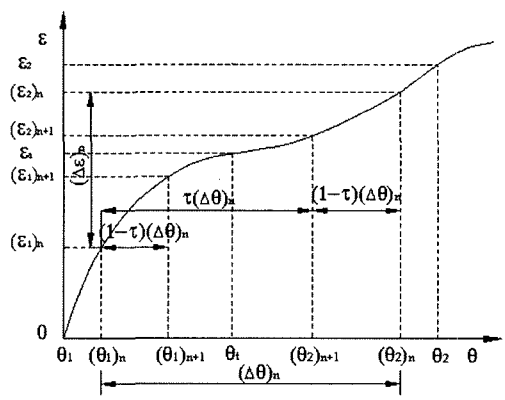

Fig. 4 Optimized points on cam curve by the golden section search method

$\tau = 0.618$(golden section ratio)

$n = 1, 2, 3...$

여기서, $|\epsilon_a - (\epsilon_2)_{n+1}| < |\epsilon_a - (\epsilon_1)_{n+1}|$이면 θ_t는 $(\theta_1)_{n+1}$과 $(\theta_2)_n$사이에 존재하게 되고, n+1번째 계산 구간은 $(\theta_1)_{n+1}$과 $(\theta_2)_n$사이의 구간으로 줄어들게 된다. 그러나 $|\epsilon_a - (\epsilon_2)_{n+1}| > |\epsilon_a - (\epsilon_1)_{n+1}|$이면 θ_t는 $(\theta_1)_n$과 $(\theta_2)_{n+1}$사이에 존재하게 되고, n+1번째 계산 구간은 $(\theta_1)_n$과 $(\theta_2)_{n+1}$사이의 구간으로 줄어들게 된다. 이와 같은 과정을 반복계산 하면 계산구간은 점점 줄어들게 되고, 허용오차에 해당하는 분할점 θ_t를 계산할 수 있다. 오차는 캠 곡선을 기준으로 하므로 (±)값을 가질 수 있다. 부호가 (+)인 경우는 Biarc curve가 캠 곡선보다 더 작게 묘사하는 경우이며, 부호가 (-)인 경우는 Biarc curve가 캠 곡선보다 더 크게 묘사하는 경우를 나타낸다. 그리고 마지막 구간에서의 최대오차를 끝구간 최대오차(ϵ_f : maximum error of final span)라 한다.

Fig. 5는 본 연구에서 사용한 알고리즘에 대한 전체적인 흐름도(flow chart)이다. 변위 선도는 캠의 설계에서 가장 먼저 정의되어야할 종동절의 변위, 속도, 가속도를 결정하는 부분이다. 변위 선도가 정의되고 나면 정의된 변위 선도로부터 순간 속도 중심법과 상대 속도법을 이용하여 캠의 형상을 설계하는 작업을 수행하게 되고 캠 프로파일의 곡률을 계산한다. 계산된 데이터를 이용하여 캠 형상을 그래픽으로 나타내어 설계가 제대로 이루어 졌는지 판단하고 동시에 캠과 종동절의 시뮬레이션을 시행하여 그 움직임을 관찰한다. 그리고 설계된 캠 형상 데이터를 바탕으로 NC-code생성에 필요한 공구반경 등의 입력을 받을 수 있고, 연삭기에서 가공이 용이하도록 Biarc curve fitting법을 적용하고 GSS법을 이용한 최적화 과정을 통해 공구 경로 허용오차를 기준으로 최적화 된 NC-code를 생성 한다.

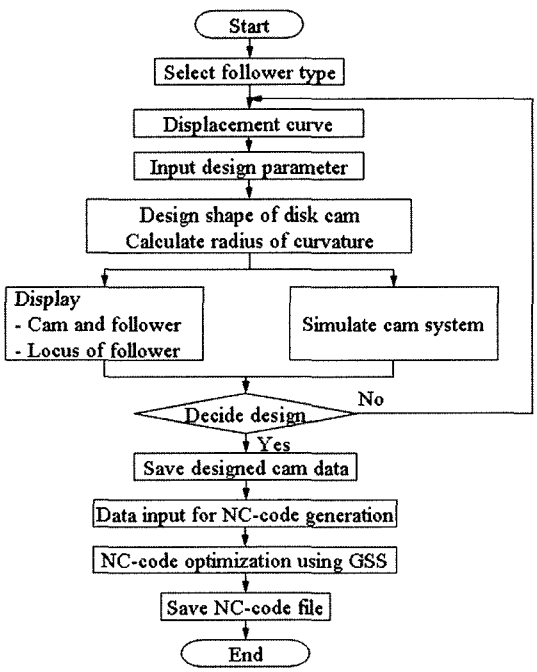

Fig. 5 Flowchart of CAM system for cam profile CNC grinding machine

3. CAD/CAM 시스템의 적용

평판 캠의 연삭을 위해 개발된 CAM 시스템을 적용하기 위해, Fig. 6과 같은 변위선도(0° ~ 60° : Dwell 구간, 60° ~ 180° : 수정사인 상승곡선, 180° ~ 240° : Dwell 구간, 240° ~ 360° : 사이클로이드 하강곡선)를 가지는 직선 병진 운동용 롤러 종동절을 가진 평판 캠을 고려한다. 이 때, 평면 캠 기구 설계를 위해 캠의 기본 원지름은 85㎜, 롤러지름은 20㎜, 편심은 없는 경우로 하고 종동절의 변위량은 20㎜이다. 설계된 캠의 형상은 Fig. 7과 같다.

평판 캠을 가공하기 위하여 앞 절의 이론을 이용하여 허용오차가 1㎛이내에 들 수 있도록 평판 캠의 점 데이터와 접선각을 구하고, Biarc curve fitting법을 이용하여 모델링하였다. 허용 오차를 1㎛로 정한 이유는 본 연구를 통해 개발된 CAD/CAM 시스템을 적용할 연삭기의 최대 정밀도가 1㎛

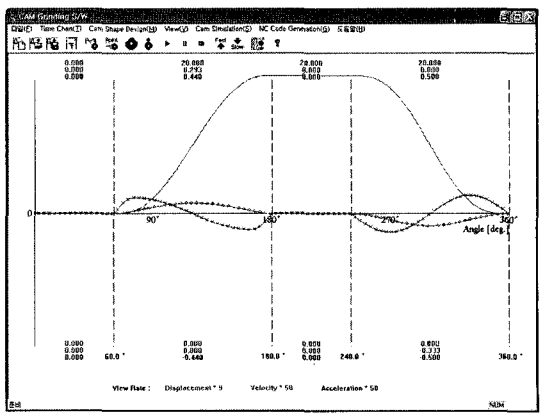

Fig. 6 Displacement, velocity, acceleration curve

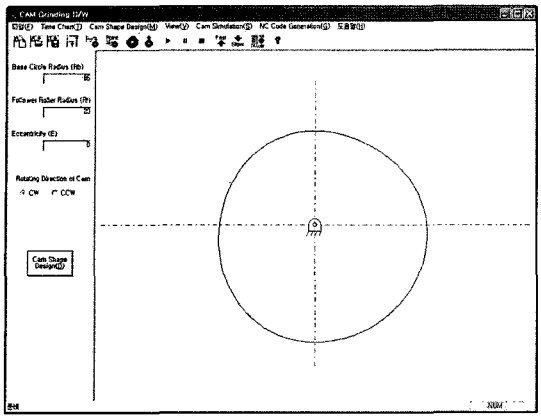

Fig. 7 Result of cam shape design

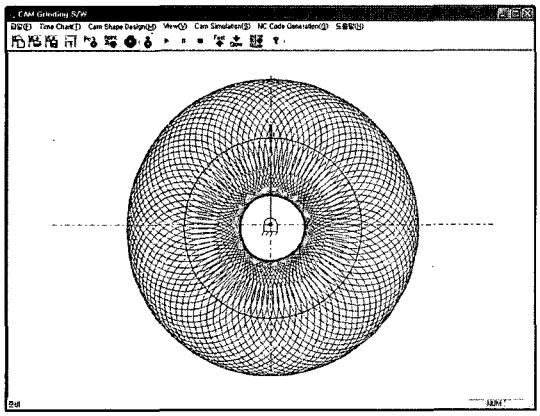

Fig. 8 Grinding stone moving path

이기 때문이다. 그리고 모델링한 평판 캠의 데이터를 이용하여 NC-code를 생성하고 출력해 본 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 이 때 연삭 휠의 지름은 350㎜ 이다. 변위 선도에서 캠의 회전에 대하여 변위 값이 일정한 구간(Dwell 구간)은 평판 캠의 곡선 중 원호에 해당하는 부분이므로 Biarc curve fitting이 필요하지 않다. 따라서 Biarc curve fitting이 필요한 구간은 60°에서 180° 그리고 240°에서 360°사이 이다.

허용오차를 1㎛로 하고, 60°에서 180°사이 캠 곡선을 Biarc curve fitting 했을 때 생기는 오차 ϵ을 그래프로 Fig. 9에 나타내었다. 오차 ϵ이 허용오차(ϵ_a= 1㎛)를 넘어서려 하면 구간 수는 하나가 증가하는 것을 알 수 있다.

Table 1은 허용오차에 대한 최적구간 수를 표로 나타내었다. 허용오차를 작게 하면 최적구간 수는 증가한다. 즉 더욱 정밀한 캠을 묘사하기 위해서는 많은 수의 원호가 필요함을

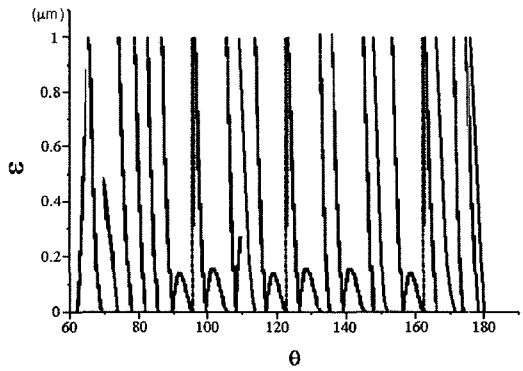

Fig. 9 The error of span (ϵ_a = 1 ㎛, 60° ≤ θ ≤ 180°)

Table 1 The optimal no. of span and allowance error (ϵ_a)

Optimal number of span	Allowance error (㎛)
5	20
9	10
11	5
21	1

알 수 있다. 본 예제에서는 총 752개의 NC 블록을 얻을 수 있었다. 일반적으로 선형 보간을 이용한 방법을 사용할 경우 최대 0.1°의 구간을 나누고 있는데, 이렇게 구간을 나누게 되면 최소 3600개의 NC블록을 얻게 되며, 황삭 및 정삭을 포함할 경우 그 수는 기하급수적으로 늘어나게 된다. 그러나 앞서 언급한 경우는 거의 원에 가까운 형상의 캠을 가공할 경우에만 국한되는 것으로 일반적으로 사용되는 0.02°구간으로 선형 보간을 할 경우[11] NC블록의 수는 최소 18,000개를 가지게 된다. 따라서 본 연구에서 사용된 Biarc curve fitting법을 사용하면 단위구간 사이에 존재하는 곡선의 형상을 고려하여 보간을 수행하므로 NC블록 수를 줄여 가공 생산성을 높일 수 있다.

다음 Table 2는 앞서 언급한 평면 캠 예제의 형상 좌표를 1° 간격으로 360 개를 유지했을 때 구간 사이에 지정된 추가 점들의 위치 좌표를 추적하고 캠의 형상설계 값과 비교하여 최대 오차를 가지는 부분만 계산하여 발췌한 것이다. Table 2로 부터 형상오차의 발생량은 매우 미미하다는 것을 알 수 있다.

또 다른 캠의 연삭을 위해 두 번째 예제로 Fig. 10과 같은 변위선도(0° ~ 90° : Dwell 구간, 90° ~ 180° : 수정사인

Table 2 Coordinates of shape error

Point No.	Error (μm)
228	0.98
240	0.99
248	0.99
600	0.93
612	0.97
624	0.99

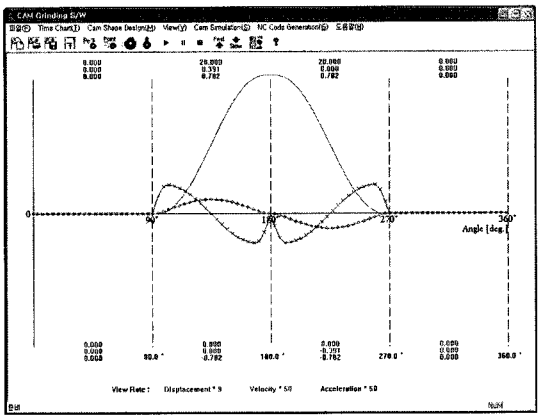

Fig. 10 Displacement, velocity, acceleration curve

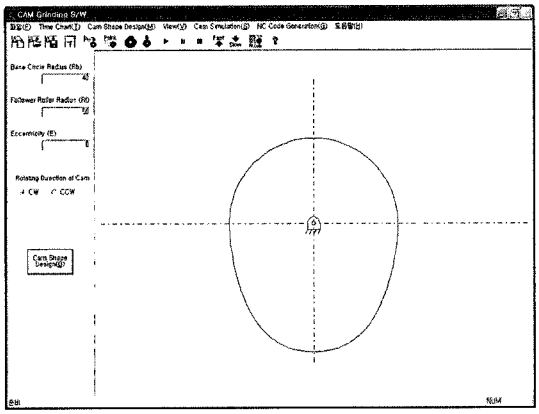

Fig. 11 Result of cam shape design

상승곡선, 180° ~ 270° : 수정사인 하강곡선, 240° ~ 360° : Dwell 구간)를 가지는 직선 병진 운동용 롤러 종동절을 가진 평판 캠을 고려하여 보았다. 이 때, 캠의 기본 원지름은 40㎜, 롤러지름은 50㎜, 편심은 없는 경우로 하고 종동절의

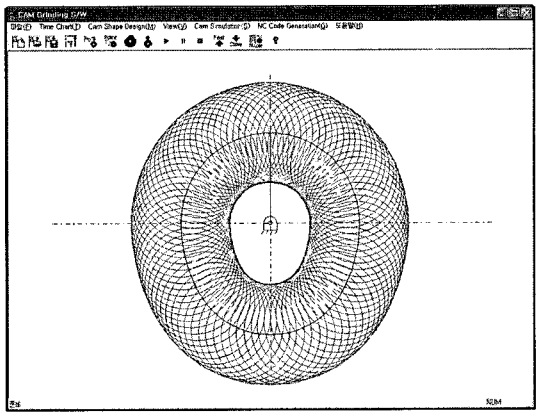

Fig. 12 Grinding stone moving path

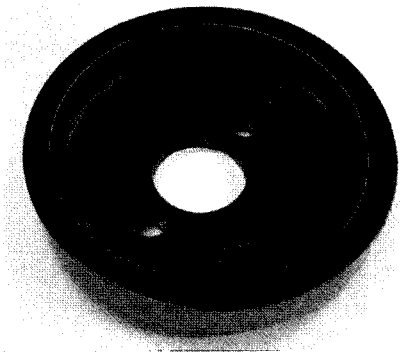

Fig. 13 The manufactured disk cam

변위량은 20㎜이다. 설계된 캠의 형상은 Fig. 11과 같으며, 앞의 예제와 같이 평판 캠의 데이터를 이용하여 NC-code를 생성하고 출력해 본 결과를 Fig. 12에 나타내었다. 이 때 연삭 휠의 지름은 종동절의 롤러 지름과 동일한 50㎜로 주었고, 생성된 NC블록의 수는 726개를 얻었다.

Fig. 13은 평판 캠의 캠 곡선과 Biarc curve 사이의 허용오차를 1μm로 하였을 때 첫 번째 예제에 대해 생성된 NC-code를 이용해서 연삭한 평판 캠을 사진으로 나타낸 것이다.

4. 결 론

본 논문은 평판 캠의 정밀 연삭을 위해 CAD/CAM 시스템을 구축한 내용을 기술한 것이다. 특히 CAD/CAM 시스템에서는 순간 속도 중심법과 상대 속도법을 이용한 캠 설계를 구현하였고, 정밀 가공을 위해 Biarc curve fitting법을

이용하여 NC-code를 생성하는 일련의 과정을 나타내었으며, 개발된 CAM 시스템을 이용하여 적용 예로 선택한 직선 병진 운동용 롤러 종동절을 가진 캠을 가공한 결과를 제시하였다. 일반적으로 많이 사용되어지는 선형 보간과 비교해 본 결과 NC블록 수를 20% 정도로 줄일 수 있었다.

향후에는 캠을 정밀하게 측정할 수 있는 측정 장치를 만들어 가공된 캠의 형상 정밀도와 설계된 캠의 형상 정밀도를 비교하여 보다 우수한 가공 결과를 얻을 수 있도록 할 예정이며, 이를 연삭기 내에 포함하여 기상측정(on machine measurement)을 통해 연삭기의 보정까지 구현할 수 있는 시스템을 개발할 예정이다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 지역혁신 인력양성사업의 연구결과로 수행되었음.

참 고 문 헌

(1) Norton, R. L., 1992, *Design of Machinery*, McGRAW-HILL Inc., pp. 353~369.

(2) Shin, J. H., Lee, C. M. and Kim, J. S., 1996, "Shape Design of Disk Cam Mechanisms Using Instant Velocity Centers," *Proceedings of the 6th International symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery*, Vol. 1, pp. 178~186.

(3) Shigley, J. E. and Uicker, J. J. Jr., 1980, *Theory of Machines and Mechanisms*, McGRAW-HILL, pp. 226~241.

(4) Shin, J. H., Kang, D. W., Kim, J. S. and Kim, D. W., 2000, "A Study on Shape Design Approach of Disk Cams using Relative Velocity of Followers," *Journal of the KSPE*, Vol. 17, No. 2, pp. 185~192.

(5) Lin, A. C., Chang, H. and Wang, H. P., 1988, "Computerized design and manufacturing of plate cams," *International Journal of PROD. RES.*, Vol. 26, No. 8, pp. 1395~1430.

(6) Gal, T. Z., Shpitalni, M. and Malkin, S., 1989, "Design and Manufacturing Analyses for Integrated CAD/CAM of Cams," *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 111, pp. 307~314.

(7) Lee, J. H., Lee, J. K., Kim, B. H. and Jeon, B. J., 2003, "Cam Profile Design for Precision Positioning," *Spring Conference of KSTP*, pp. 204~209.

(8) Cho, H. D., Kim, Y. J., Yong, B. J. and Dong, Y. G., 2005, "A Study on Desing and Machining of the Mirror Type of Conjugate Cam," *Transactions of the KSMTE*, Vol. 14, No. 2, pp. 83~90.

(9) Tsay, D. M. and Wei, H. M., 1996, "A General Approach to the Determination of Planar and Spatial Cam Profiles," *ASME Journal of Mechanical Design*, Vol. 118, pp. 259~265.

(10) Bolton, K. M., 1975, "Biarc curves," *Computer-Aided Design*, Vol.7, No. 2, pp. 89~92.

(11) Yang, M. Y., Shon, T. Y. and Cho, H. D., 1997, "An Improved NC-code Generation Method for Circular Interpolation," *Journal of KSPE*, Vol. 14, No. 11, pp. 77~83.

(12) Cho, S. R. and Lee, C. M., 2001, "A Study on the Modeling of Roller Gear Cam," *Transactions of the KSMTE*, Vol. 10, No. 3, pp. 31~37.