

상대속도를 이용한 바렐 캠의 설계에 관한 연구

신중호*, 김성원**, 강동우***, 윤호엽****

A Study on Design of Barrel Cam Using Relative Velocity

Joong Ho Shin*, Sung Won Kim**, Dong Woo Kang*** and Ho Eop Yoon****

ABSTRACT

A barrel cam is used as a very important part of an index drive unit. The index drive unit must have an intermittent-rotational motion. The barrel typed cam and roller gear mechanism has the advantages of high reliability to perform a prescribed motion of a follower.

This paper proposes a new method for the shape design of the barrel cam and also a CAD program is developed by using the proposed method. As defined in this paper, the relative velocity method for the shape design calculates the relative velocity of the follower versus cam at a center of roller, and then determines a contact point by using the geometric relationships and the kinematic constraints, where the direction of the relative velocity must be parallel to a common tangential line at the contact point of two independent bodies, i.e. the cam and the follower. Then, the shape of the cam is defined by the coordinate transformation of the trace of the contact points.

This paper presents two examples for the shape design of the barrel cam in order to prove the accuracy of the proposed methods.

Key Words : Barrel Cam (바렐 캠), Index Driver Unit (인덱스 드라이브 유닛), Relative Velocity Method (상대속도법), Shape Design (형상 설계)

1. 서론

바렐 캠은 자동화 시스템에 널리 이용되는 인덱스 드라이브에 사용되는 캠으로서 원통의 형상을 하고 있으며 캠의 회전축과 종동철의 회전축이 서로 90°의 위상으로 직교하고 있다. 바렐 캠은 인덱스 드라이브가 가져야할 필수적인 요건인 일정하

게 들어오는 회전 입력에 대하여 회전과 일단정지 동작의 구현이 가능하며 구성 또한 간단하다. 따라서, 다른 기구를 사용하기보다는 특정한 출력함수를 만들어 낼 수 있는 캠을 널리 사용한다. 바렐 캠은 바렐 인덱스 드라이브를 설계하는데 핵심적인 부품이지만 설계와 가공에 많은 어려움을 가지고 있어 선진국 기술에 많이 의존하고 있는 실정이며

**** 2001년 9월 7일 접수

* 창원대학교 기계설계공학과

** (주)삼주기계 기술연구소

*** 두산중공업(주) 환경기술연구원

**** 창원대학교 대학원 기계설계공학과

서 설계기술 개발이 시급하다.

바렐 캠과 같은 원통형 캠에 관한 연구는 많은 학자에 의해 연구되었다. Phande⁽¹⁾는 입체 캠의 형상을 해석적으로 나타낼 수 있는 방법에 대해 연구하였고, Wei, Yan, Chen^(2~4) 등은 미분기하학을 이용하여 캠과 롤러의 접촉점을 해석하였다. 그리고 김찬봉^(5~6)은 벡터 설계해석법을 이용하여 입체캠에 대한 설계와 가공에 대하여 연구하였다.

본 논문에서는 상대속도를 이용하여 바렐 캠의 형상설계에 관하여 연구한다. 상대속도를 이용한 캠의 설계 방법은 정확한 캠의 형상 설계가 가능할 뿐만 아니라 다른 방법에 비해 수식 전개가 간단하며 명확하다는 장점이 있다.

바렐 캠의 설계에 있어 상대속도법을 적용하기 위해 여러 개의 국부 좌표계(local coordinates)를 이용하게 된다. 국부 좌표계는 캠의 회전축에 대한 속도와 종동절의 운동축에 대한 속도를 각각 정의하는데 이용되며, 이 속도들은 동일 좌표축으로 변환되어 상대속도를 결정한다. 기구학적 특성에 의해 접촉기구에서의 상대속도는 접촉점에서의 공통 접선 방향과 같은 방향이어야 한다는 조건에 의해 접촉점을 결정하게 된다.

마지막으로 제시된 설계 방법을 이용하여 CAD

프로그램을 작성하고, 이 CAD프로그램에 2가지 예를 적용하여 프로그램과 본 논문에서 제시한 이론을 검증한다.

2. 바렐 인덱스 드라이브와 바렐 캠

바렐 인덱스 드라이브는 Fig. 1과 같은 형태로 바렐 캠과 롤러를 포함한 종동절로 구성되어 있다. 캠은 입력축에 의해 일정하게 회전하면 종동절은 캠의 회전에 의해 회전 또는 정지운동을 하게 된다. 이때 캠의 형상은 종동절의 회전운동이 특정 변위 곡선에 따라 운동할 수 있도록 설계되어야 한다. 바렐 인덱스 드라이브의 핵심 부분이 바렐 캠과 종동절인데, 바렐캠기구의 자세한 모양은 Fig 2와 같다. 즉, 원통 캠과 하나 또는 다수의 롤러가 축과 평행하게 일정한 원주 방향으로 결합된 종동절로 구성되어 있다. 바렐 인덱스 드라이브에서는 종동절을 터렛(turret)이라 한다. 그리고 캠의 형상은 종동절 롤러의 운동을 유도하기 위해 원통 캠의 옆면에 파여진 홈을 안내홈(guide groove)이라고 하며 안내홈의 옆면을 리브(rib)라고 정의한다. 그림에서와 같이 캠의 회전 축(cam axis)과 종동절의 회전축(follower axis)이 어긋나게 교차되어 있는 것을 볼 수 있고, 캠이 회전하게 되면 캠에 파여진 안내홈의 리브에 종동절 롤러의 옆면이 서로 접촉하면서 종동절의 축에 요구되는 회전 또는 정지 운동을 수행하게 된다.

3. 상대속도를 이용한 바렐 캠의 형상 설계

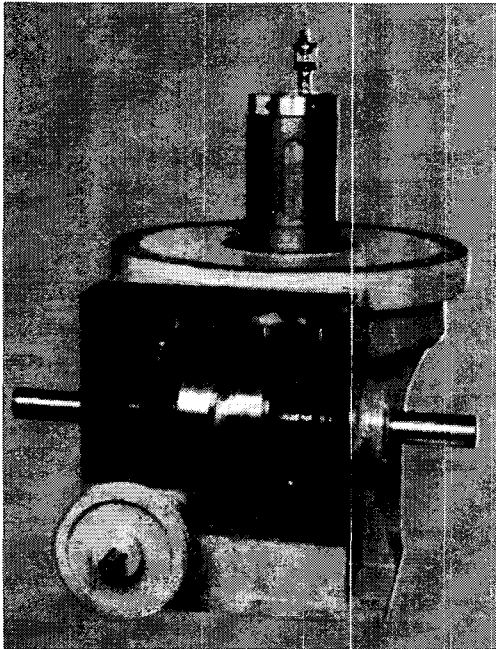


Fig. 1 Common feature of barrel index driver

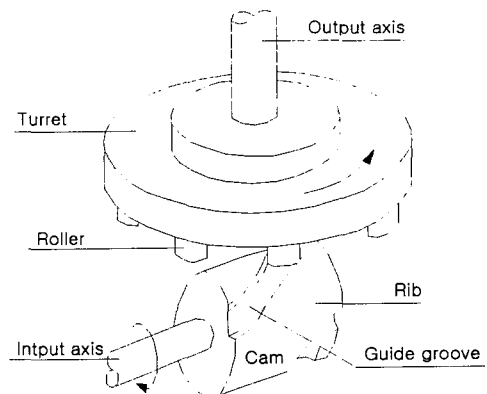


Fig. 2 Common feature of cylindrical cam

Fig. 2에서와 같은 바렐 캠 기구는 캠의 회전축과 종동절의 회전축이 어긋나게 교차되어 구성 되어 있다. 그림에서 캠의 회전축을 상하로 바꾸어 설정하면, 종동절의 회전축은 캠의 외곽원의 접선방향으로 놓이게 된다. Fig. 3은 Fig. 2에서 캠의 회전축을 상하로 바꾸어 표시한 그림이다. Fig. 3에서 캠의 회전축과 터렛 중심의 수직 거리를 d 라 한다.

형상설계를 위해 Fig. 3에서와 같이 바렐 캠과 종동절에 5개의 극부 좌표계를 설정한다. 우선, 캠의 회전중심 좌표계를 원점 O 로 하고 캠의 축이 Z 축으로 놓인 좌표계를 x_0, y_0, z_0 좌표계로 표시한다. 두 번째 좌표계는 y_0 축 방향으로 캠의 중심과 터렛의 중심간 거리를 각각 x_0, y_0, z_0 축에 대하여 $-f, -d, -g$ 만큼 이동하여 터렛의 중심에 위치하는 좌표축을 x_1, y_1, z_1 로 하고 1-좌표계에서 x_1 축에 대해 터렛이 캠을 향하고 있는 각도로 직각으로 회전하여 터렛의 회전축이 z_2 축이 되도록 한 좌표계를 x_2, y_2, z_2 로 정의한다. 즉,

종동절의 회전축을 의미한다. 터렛에 부착된 N 개의 롤러 중 캠과 접촉하고 있는 임의의 롤러를 선택하고, 롤러가 위치한 방향으로 z_2 축을 중심으로 x_2 를 회전시켜 롤러의 위치와 동일 방향으로 향한 좌표계를 x_3, y_3, z_3 라 정의한다. x_2 축이 x_3 만큼 회전한 각도가 θ_r 이다. x_3 축을 따라서 롤러의 밀면으로 이동한 좌표계를 x_4, y_4, z_4 로 정의하고 z_4 축 방향으로 롤러 중심선을 따라서 임의의 점까지의 거리 $-h$ 만큼 이동된 축을 x_5, y_5, z_5 로 표시한다. 즉, 임의의 선택된 롤러의 중심좌표에 해당된다.

종동절의 롤러의 중심 좌표계는 x_5, y_5, z_5 에 위치하며 5-좌표계의 어느 한 점 p_5 를 0-좌표계의 p_0 로 변환하는 좌표변환식은 식(1)과 같다. 그리고 각각의 좌표변환 행렬은 식(2)에서 식(6)에 나타낸 것과 같다. 각각의 식들을 살펴보면 캠의 중심에 위치한 0-좌표계에서 터렛의 중심으로 x_0, y_0, z_0 축을 따라 각각 $-f, -d, -g$ 만큼 평행이동하

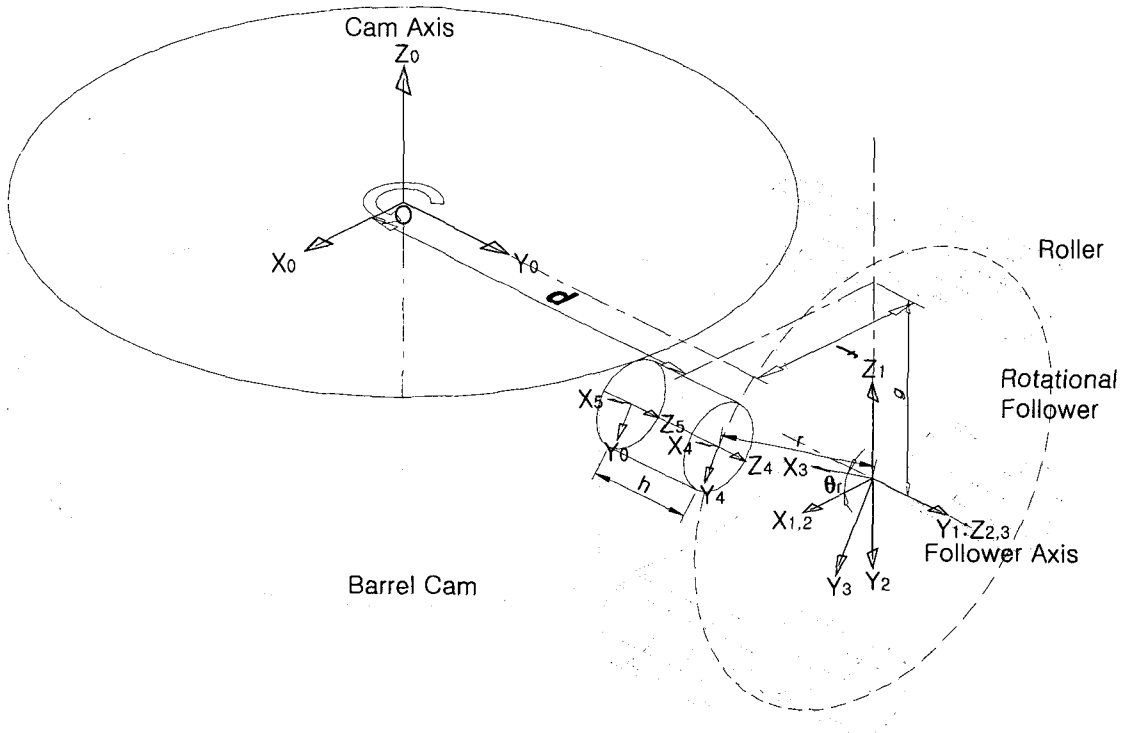


Fig. 3 Coordinate systems of grooved barrel cam with rotating follower

는 변환행렬은 식(2)와 같고, x_1 축에 대해 -90° 회전변환 하는 행렬은 식(3)과 같다. 그리고 z_2 축에 대하여 $-\theta_r$ 만큼 회전하는 변환행렬은 식(4)와 같이 나타낼 수 있고, x_3 축을 따라 롤러의 밀면으로 평행이동하는 변환행렬은 식(5)와 같다. 롤러의 중심선을 따라서 밀면에서 임의의 위치로 평행이동 변환행렬은 식(6)과 같다.

$$p_0 = T_{x_0, -f} T_{y_0, -d} T_{z_0, -g} R_{x_1, -90} R_{z_2, -\theta_r} T_{x_3, r} T_{z_4, -h} p_5 \quad (1)$$

$$T_{x_0, -f} T_{y_0, -d} T_{z_0, -g} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -f \\ 0 & 1 & 0 & -d \\ 0 & 0 & 1 & -g \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$R_{x_1, -90} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$R_{z_2, -\theta_r} = \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \sin \theta_r & 0 & 0 \\ -\sin \theta_r & \cos \theta_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$T_{x_3, r} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & r \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$T_{z_4, -h} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -h \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

상대속도 해석을 위해 Fig. 4의 A점에서의 캠의 속도와 종동철의 속도를 계산해야 한다. A점에서의 캠의 속도를 계산하기 위한 식은 식(7)과 같고, 이를 계산한 식은 식(8)과 같다. 식(8)은 0-좌표계에 대해 나타낸 식인데 이는 캠의 회전속도가 0-좌표계에 대해 표현되어 있으므로, 계산을 용이하게 하기 위한 것이다.

$$V_{c_0} = \omega_c \times P_{A/O} \quad (7)$$

$$V_{c_{x_0}} = (h-d) \omega_c \quad (8)$$

$$V_{c_{y_0}} = (r \cos \theta_r - f) \omega_c$$

$$V_{c_{z_0}} = 0$$

식(8)에서 θ_r 은 종동철의 회전각을 나타내며 주어진 변위선도를 따라 운동한다. 캠의 설계를 위해 지정된 변위선도로부터 얻어지는 종동철의 속도 값을 ω 라고 정의하면, ω 는 캠의 단위 회전속도에 대한 값이므로 종동철의 각속도는 ω 에 실제 캠의 회전속도 ω_c 를 곱하여야 한다. x_5, y_5, z_5 원점에서 종동철의 회전에 의해 발생하는 속도 V_f 은 5-좌표계에 대해서 y_5 축 성분만이 존재하며 식(9)와 같다.

$$V_{f_{x_5}} = 0$$

$$V_{f_{y_5}} = r \omega \cdot \omega_c \quad (9)$$

$$V_{f_{z_5}} = 0$$

회전하는 캠의 중심에 대한 롤러의 상대속도를 구하기 위해 V_c 성분을 5-좌표계에 대해 나타내어 동일한 좌표계로 표시하여야 하므로 식(10)에 식(11)에서 식(12)로 정의된 각각의 변환행렬을 적용

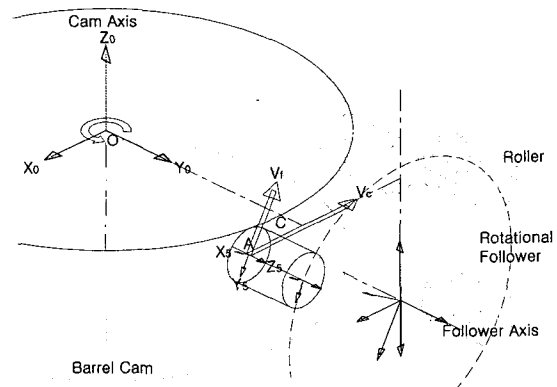


Fig. 4 Velocities on barrel cam with rotating follower

하여 좌표변환을 수행하면 식(13)과 같이 V_{c5} 가 나타난다.

$$V_{c5} = R_{z_2, -\theta_r} R_{x_1, -90^\circ} V_{c0} \quad (10)$$

$$R_{z_2, -\theta_r} = \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \sin \theta_r & 0 & 0 \\ -\sin \theta_r & \cos \theta_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$R_{x_1, -90^\circ} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$V_{cx_5} = (-d \cos \theta_r + h \cos \theta_r) \omega_c \quad (13)$$

$$V_{cy_5} = (-d \sin \theta_r + h \sin \theta_r) \omega_c$$

$$V_{cz_5} = (r \cos(\theta_r) - f) \omega_c$$

회전하는 캠의 중심에서 바라본 롤러의 상대속도 V_{ffc} 는 식(14)와 같이 V_f 과 V_c 의 차와 같으므로 식(9)과 식(13)에서 구한 속도를 대입하여 이를 정리하면 식(15)와 같다. 여기서 구한 V_{ffc5} 는 5-좌표계에 대해 나타낸 것이다.

$$V_{ffc} = V_f - V_c \quad (14)$$

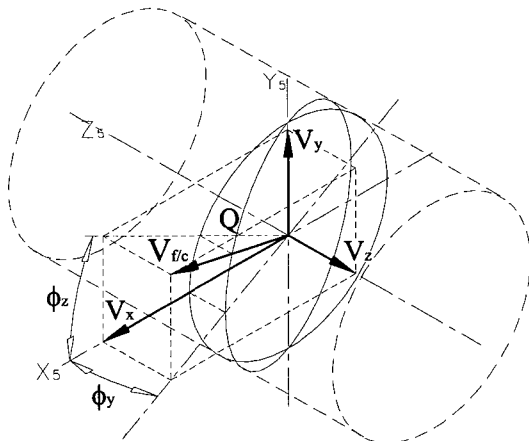


Fig. 5 Directional angles and relative velocities

$$V_{ffc x_5} = (d \cos \theta_r - h \cos \theta_r) \omega_c \quad (15)$$

$$V_{ffc y_5} = (r \omega + d \sin \theta_r - h \sin \theta_r) \omega_c$$

$$V_{ffc z_5} = (-r \cos(\theta_r) + f) \omega_c$$

Fig. 5에서 보는 바와 같이 상대속도 V_{ffc5} 가 5-좌표계와 이루는 각을 구해보면 x_5, z_5 평면과 이루는 방향각 ϕ_y 는 식(16)과 같고 x_5, y_5 평면과 이루는 방향각 ϕ_z 는 식(17)과 같다.

$$\phi_y = \tan^{-1} \left(\frac{V_{z_5}}{V_{x_5}} \right) \quad (16)$$

$$\phi_z = \tan^{-1} \left(\frac{V_{y_5}}{V_{x_5}} \right) \quad (17)$$

캠과 롤러가 접촉상태를 유지하기 위해서는 5-좌표계의 원점과 상대속도 V_{ffc5} 가 이루는 평면에서 V_{ffc5} 와 접촉점에서의 접선은 평행하여야 한다. 만일 평행하지 않으면 접촉을 하지 않거나, 파고드는 현상이 발생한다. 그러므로 접촉점은 5-좌표계의 원점에서 V_{ffc5} 에 수직인 선이 롤러 표면과 만나게 되는 두 점에 해당된다. 롤러의 반경을 r_r 이라 정의하면 Fig. 5의 그림에서 기하학적인 관계에 의해 두 개의 접촉각을 내포한 점접촉점 Q에 관한 식(18)이 구해진다. 식(18)은 5-좌표계에 대해 나타낸 것이다.

$$Q_{x_5} = r_r \cos(\phi_z \pm 90) \quad (18)$$

$$Q_{y_5} = r_r \sin(\phi_z \pm 90)$$

$$Q_{z_5} = r_r \cos(\phi_z \pm 90) \tan \phi_y$$

식(18)을 식(1)에 대입하면 캠의 중심 좌표계 0-좌표계에 대한 캠의 접촉점이 계산되는데 이는 식(19)와 같다. 식(19)는 식(18)에 의해 계산된 캠과 종동철의 접촉점을 5-좌표계에서 0-좌표계로 좌표 변환 한 것으로 어떤 순간에 캠과 종동철이 접촉하는 접촉점을 캠의 중심에서 계산된 좌표값을 의미한다.

$$\begin{aligned}
 Q_{x_0} &= \cos \theta_r x_5 + \sin \theta_r y_5 + r \cos \theta_r + f \\
 Q_{y_0} &= z_5 + d + h \\
 Q_{z_0} &= \sin \theta_r x_5 - \cos \theta_r y_5 - r \cos \theta_r + g
 \end{aligned}
 \tag{19}$$

식 (19)에서 캠이 z_0 를 축으로 캠의 회전각도 θ_c 만큼 회전하게 되면, 어떤 순간의 접촉점은 반대 방향으로 회전하는 것과 같으므로 z_0 에 대해 $-\theta_c$ 만큼 회전하는 것과 같다. 따라서 이를 식 (19)에 적용하여 좌표변환하면 고정된 좌표계의 캠의 각도에 대한 캠의 전체 형상은 식 (20)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
 C_{x_0} &= \cos \theta_c Q_{x_0} + \sin \theta_c Q_{y_0} \\
 C_{y_0} &= -\sin \theta_c Q_{x_0} + \cos \theta_c Q_{y_0} \\
 C_{z_0} &= Q_{z_0}
 \end{aligned}
 \tag{20}$$

4. 바렐 캠의 형상 설계 적용예

본 논문에서 제안된 설계법으로 개발된 CAD 프로그램 "CylinderCam"을 이용하여 제시된 설계법의 정확성과 개발된 프로그램의 유용성을 검증하기 위해 2가지의 예를 적용하였다.

4.1 바렐 캠의 설계 분석을 위한 적용예(I)

예제(I)의 바렐 캠은 종동절이 360°회전 운동을 하는 것으로 회전 운동중에 2번의 정지 운동을 포함하고 있다. 바렐 캠의 형상 설계를 위한 변위 조건은 Table 1과 같이 정의하였으며, 캠과 종동절의 설계 조건은 Table 2와 같다. Fig. 6은 캠의 변위 선도를 보여주고 있다.

Fig. 7은 본 논문에서 제안된 설계법을 이용하여 형상설계된 캠의 종동절의 롤러와의 접촉점을 보여주고 있으며, Fig. 8은 접촉점과 종동절의 롤러를 같이 표현한 그림이다.

Table 1 Displacement curve conditions for the barrel cam and rotating follower mechanism(I)

Section	Cam angle (Deg)	Motion	Curve type
1	0~80	Dwell	
2	80~170	90°Rise	Full cycloidal
3	170~250	Dwell	
4	250~320	90°Rise	Full cycloidal
5	320~360	Dwell	

Table 2 Design parameters of the barrel cam and rotating follower mechanism(I)

Parameters	Values
Radius of base circle of cam	111 mm
High of cam	35 mm
Radius of turret(r)	45 mm
Length between cam rotating center and turret center x, y, z (-f,d,g)	-45,115,0 mm
Radius of roller	6 mm
Height of roller(h)	12 mm
Number of roller	6

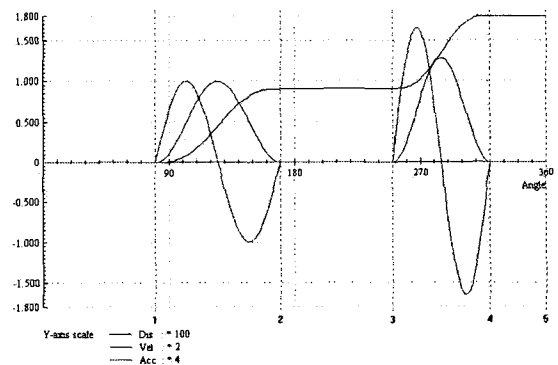


Fig. 6 Displacement, velocity and acceleration curves for example(I)

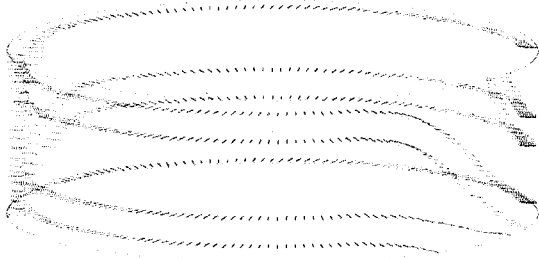


Fig. 7 Designed shape of the barrel cam(I)

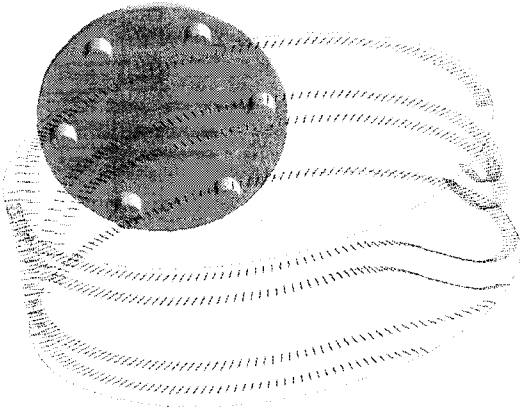


Fig. 8 Simulation of the barrel cam mechanism(I)

4.2 원통 캠의 설계 분석을 위한 적용 예(II)

두 번째 예에서는 캠이 반시계 방향으로 회전함에 따라, 종동절이 임의의 각도만큼 상승하고, 다시 원래 위치로 되돌아가는 형태의 운동으로 캠의 설계를 위한 변위조건은 Table 3과 같고 설계를 위한 캠과 종동절의 형상조건은 Table 4와 같다. Fig. 9는 캠의 변위 선도를 보여주고 있다.

캠의 회전방향은 반시계 방향으로 정하고 종동절의 운동은 시계방향의 회전을 양의 값으로 정하여 캠 형상설계를 수행한다. Fig. 10은 형상설계된 캠의 종동절의 롤러와의 접촉점을 보여주고 있으며, Fig. 11은 접촉점과 종동절의 롤러를 같이 임의의 각도에서 본 모습이다.

Table 3 Displacement curve conditions for the barrel cam and rotating follower mechanism(II)

section	cam angle (Deg)	Motion	Curve type
1	0~80	Dwell	
2	80~170	90°Rise	Full cycloidal
3	170~250	Dwell	
4	250~320	90°Return	Full cycloidal
5	320~360	Dwell	

Table 4 Design parameters of a barrel cam and rotating follower mechanism(II)

Parameters	Values
Radius of base circle of cam	111 mm
Height of cam	35 mm
Radius of turret(h)	45 mm
Length between cam rotating center and turret center x, y, z (-f,d,g)	-45,115,0 mm
Radius of roller	6 mm
Height of roller(r)	12 mm
Number of roller	6

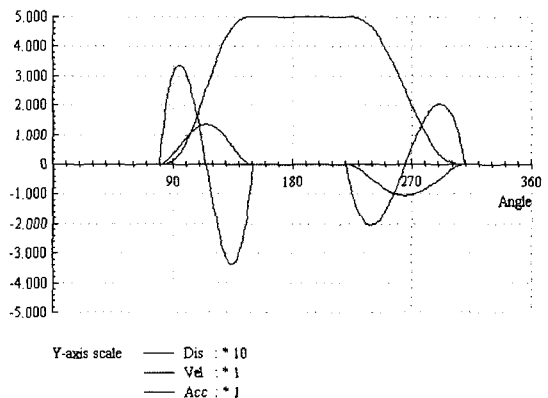


Fig. 9 Displacement, velocity and acceleration curves for example(II)

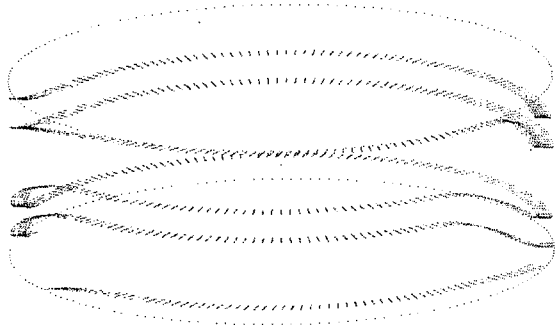


Fig. 10 The designed shape the of barrel cam(II)

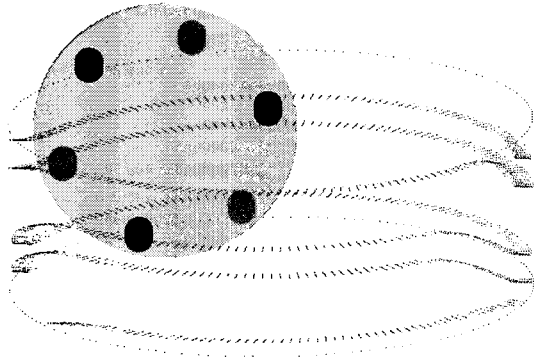


Fig. 11 Simulation of the barrel cam mechanism(II)

5. 결론

본 연구에서는 인덱스 유니트에 널리 이용되고 있는 바렐 캠의 설계에 관하여 연구하였다. 본 연구에서는 상대속도를 이용하는 설계방법으로 정확한 접촉점의 해석을 통하여 바렐 캠을 설계하였다. 상대속도법은 다른 방법에 비해 수식 전개가 간편하며 정확한 캠의 설계방법을 제공해 준다.

그리고 본 연구에서 설계된 캠의 정확성을 검증하기 위해 2가지의 예를 적용하여 모의 동작 시험(simulation)을 통하여 본 연구에서 제안된 바렐 캠의 설계를 위한 상대속도법과 개발된 CAD프로그램의 정확성을 검증하였다.

참고문헌

1. S.G. Phande, B.S. Shadoria and J. Chakraborty, "A Unified Approach to the Analytical Design of Three-Dimensional Cam mechanism," Trans. of ASME, Journal of Engineering for Industry, pp. 327-333, 1975.
2. Liu J.Y. and Yan H.S., "Surface Geometry of Variable Pitch Cylindrical Cams with Conical Meshing Elements," Transactions of the ASME, Journal of Mechanical Design, Vol. 116, pp. 862-866, 1994.
3. H.S. Yan and H.H. Chen, "Geometry Design of Globoidal Cams With Generalized Meshing Turret-Rollers," Transactions of the ASME, Journal of Mechanical Design, Vol. 118, pp. 243-249, 1996.
4. D.M. Tsay and H.M. Wei, "A general approach to the determination of planar and spatial cam profiles," Transactions of the ASME, Journal of Mechanical Design, Vol. 118, pp. 259-265, 1996.
5. 김찬봉, 양민양, "입체캠의 형상설계와 가공에 관한 연구," 대한 기계 학회 논문집, 제17권, 제6호, pp. 1361-1371, 1993.
6. 김찬봉, 양민양, "세가지 보간방법을 이용한 평판 캠의 CAD/CAM시스템," 대한 기계 학회 논문집, 제15권, 제3호, pp. 869-879, 1991.
7. 신중호, 이춘만, 김종수, "Shape Design of Disk Cam Mechanisms Using Instant Velocity Center," Proceedings of 6th International symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery, Vol. 1, pp. 178-186, 1996.
8. 신중호, 김종수, "디스크형 캠기구 설계를 위한 순간속도 중심설계법의 연구," 창원대학교 산기연 논문집, 제8집, pp. 123-129, 1994.
9. 신중호, 김종수, 하경훈, "캠 구동 슬라이더 기구의 기구동역학 해석에 관한 연구," 대한 기계 학회 논문집, 제21권, 제6호, pp. 871-883, 1997.
10. 신중호, 윤호엽, 강동우, "사이크로이드 판기어의 형상설계법에 관한 연구," 대한기계학회논문집 A, 제25권, 제1호, pp. 70-80, 2001.