

롤러 기어 캠의 5-축 CNC 가공

조현덕*, 윤문철**, 김경진⁺

(논문접수일 2010. 09. 07, 심사완료일 2010. 10. 28)

5-Axis CNC Machining of Roller Gear Cam

Hyun-Deog Cho*, Moon-chul Yoon**, Kyung-Jin Kim⁺

Abstract

The roller gear cam can control the rotational follower periodically by attaching several roller on the circumstance of follower shaft and it is widely used in non-backlash and precise actuating mechanism such as index table or ATC of machine tools. For machining the roller gear cam, 5 axis CNC machine tool is used and the geometric principle of CAM mechanism must be adopted to generate the NC-code and to develop the special CAD/CAM software because there is not commercial CAM system to machine the roller gear cam. The maker of the specially developed software in domestic user is generally from Japan or Taiwan. However these softwares do not reflect the post processing technique for finish machining in the module. Also, there is some limitation for further new application of itself and it needs higher costs for further application. In this study, the CAD/CAM software to overcome these problem was developed. And its reliability was verified by applying it in 5-axis CNC machining. Finally, the experimental result conducted in the 5-axis machining show good consistency in the movement of follower along the flute and in its size.

Key Words : 5-Axis CNC Machining(5-축 CNC 가공), ATC(자동공구교환장치), Drum Cam(드럼 캠), Index Table(인덱스 테이블), Post Processing(포스트프로세싱), Roller Gear Cam(롤러 기어 캠), Rotational Follower(회전형 종동절)

* 경일대학교 기계자동차학부
** 부경대학교 기계자동차공학과
+ 교신저자, 경일대학교 기계자동차학부 (kkj@kiu.ac.kr)
주소: 712-701 경북 경산시 하양읍 부호리 33

1. 서론

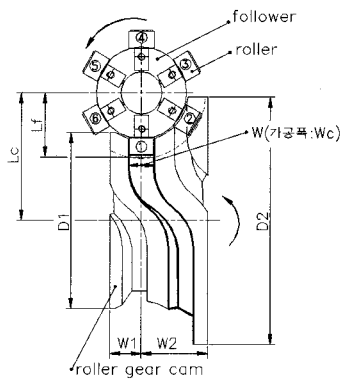
롤러 기어 캠은 종동절 축의 원주에 여러 개의 롤러를 부착하여 종동절의 회전을 주기적으로 제어할 수 있는 원통 캠 기구로서 주로 공작기계의 인덱스 테이블 및 ATC 등 백래시없이 정밀한 구동이 필요한 곳에 많이 사용된다^(1,2). 롤러 기어 캠이 백래시가 거의 영이 되는 원리는 종동절의 원주에 배치된 여러 개의 롤러가 캠 선도시아의 사다리꼴 단면의 산을 조립상의 위치 조정으로 양쪽에서 동시에 접촉할 수 있기 때문이다. 또한 롤러 기어 캠은 종동절의 롤러가 캠 곡선과 구름접촉을 하기 때문에 내구성이 뛰어나면서 정밀한 위치제어가 가능한 장점이 있다⁽¹⁻³⁾.

롤러 기어 캠을 가공하기 위해서는 5-축 CNC 가공기계를 사용하여야 하고 캠의 기구적 원리가 설계에 반영되어야 하는데 아직까지 모델링에 롤러 기어 캠 기구의 설계요소를 반영하는 상용 CAM은 나오지 않는 실정이다. 따라서 전용 소프트웨어를 개발하여 사용하고 있으나 국내에서는 주로 대만과 일본으로부터 소프트웨어를 구입하여 사용하고 있다. 하지만, 이들 소프트웨어도 항상 공구경로로 공구형상을 캠 곡선 흡의 폭에 맞도록 제작하여 정삭가공을 하는 수준이다. 이것은 아직 롤러 기어 캠의 정삭가공을 위한 포스트 프로세싱 기술이 미흡하기 때문이며 5-축 가공원리와 캠 기구의 설계요소를 명확하게 밝히지 못하였기 때문인 것으로 판단된다. 5-축 가공 데이터 생성에 필요한 공구경로 방향을 결정하기 위해서는 반드시 5-축 가공기계의 회전각 구현 방식이 반영되어야 하고, 가공중의 특정 NC-코드 블록을 기준으로 다른 모든 데이터를 2개의 회전각 변화를 고려하여 모두 경신해야 하는데 이것은 3-축 가공과 큰 차이점이다⁽³⁻⁸⁾.

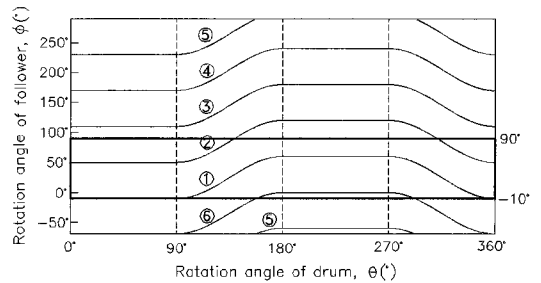
일반적으로 5-축 가공을 위한 포스트 프로세싱은 5-축 가공기계의 구조적 특성에 따라 유도방법이 크게 차이가 난다. 본 연구에서는 A-축 상부에 C-축이 회전하는 인덱스를 갖는 수직주축 타입의 5-축 가공기계에 대하여 롤러 기어 캠 가공에 필요한 설계인자를 밝혀내어 포스트 프로세싱 방법을 개발하고 샘플 롤러 기어 캠에 대하여 황삭가공과 정삭가공을 실시하였다. 그리고 롤러 기어 캠을 캠 세팅장치에 설치하여 롤러 기어 캠 회전각에 대한 종동절의 회전각을 측정하고, 백래시의 유무를 확인하였다. 본 연구에서 개발한 롤러 기어 캠 가공을 위한 포스트 프로세싱 방법은 정삭가공에서 임의 직경을 사용할 수가 있어 공구관리, 생산성, 가공정밀도 등이 우수하여 정밀 구동을 필요로 하는 인덱스 테이블 등에 응용할 수 있음을 알 수 있었다.

2. 롤러 기어 캠 설계

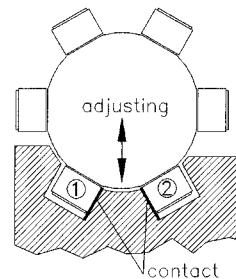
롤러 기어 캠은 캠 곡선의 형태에 따라 종동절을 특정한 회전각에 대해 주기적으로 제어할 수도 있으나 연속적으로 회전시킬 수도 있어 롤러 기어 캠(roller gear cam)이라 불리기도 한다⁽³⁾. 롤러 기어 캠 기구는 Fig. 1(a)과 같이 여러 개의 캠 곡선을 갖는 롤러 기어 캠, 종동절 축, 종동절 원주에 부착된 여러 개의 롤러 등으로 구성된다. Fig. 1(b)는 본 연



(a) Roller gear cam mechanism



(b) Rotation angle curve between roller gear cam and follower



(c) Contact relation between roller and cam groove

Fig. 1 Roller gear cam mechanism

구에서 5-축 가공을 위해 설계된 롤러 기어 캠의 캠 곡선으로 주기적인 운동하는 경우이며 6개의 롤러가 60° 간격으로 배열되어 있으며 중동절의 회전각 범위를 -10°에서 90°까지로 설정하면 ①번 롤러를 기준으로 이웃하는 ②번과 ⑥번 롤러가 놓이게 된다. 롤러 기어 캠은 백래시가 없으면서 큰 토크를 전달할 수 있는 것이 최대의 장점이며, 백래시가 제거되는 원리는 Fig. 1(c)과 같이 이웃하는 2개 이상의 롤러가 롤러 기어 캠 곡선 홈을 힘을 전달하는 방향의 양쪽에서 접촉하기 때문이다^(3,4). Fig. 1(b)의 ①번 롤러의 캠 곡선을 기준으로 중동절의 회전각을 $\phi_i(\theta)$ 라고 하고^(1,2), ②번과 ⑥번 캠 곡선을 각각 $\phi_{i+1}(\theta)$, $\phi_{i-1}(\theta)$ 라고 하면 i 번째 롤러의 캠 곡선 $\phi_i(\theta)$ 은 식(1)로 나타나며, 중동절의 회전각 -10°에서 90°범위에서 i 는 0, 1, 2가 된다.

$$\phi_i(\theta) = 60^\circ \times (i-1) + \phi_1(\theta) \quad (1)$$

3. 롤러 기어 캠 5-축 가공 포스트 프로세싱

5-축 가공을 위한 포스트 프로세싱 방법은 5-축 기계의 구성에 따라 달라지는데^(3,6), 본 연구에서 5-축 가공기계는 A-축 상부에 C-축이 회전하는 수직주축 타입을 대상으로 하였다. 따라서 본 연구의 5-축 가공기계에서 캠 곡선 홈의 황삭 가공을 위한 공구경로의 임의의 위치벡터 $P_{i,j}$ 는 Fig. 2(a)와 같이 $T_{i,j}$ 와 $R_{i,j}$ 와 $-Z$ 벡터의 합으로 구할 수 있으며 캠의 회전각 $\theta_{i,j}$ 와 중동절의 회전각 $\phi_{i,j}$ 로 표현하면 식 (2)로 나타난다⁽¹⁾.

$$\begin{bmatrix} X_{i,j} \\ Y_{i,j} \\ Z_{i,j} \\ A_{i,j} \\ C_{i,j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -(H_j + w_2) \cos \phi_{i,j} + L_c \sin \phi_{i,j} \\ (H_j + w_2) \sin \phi_{i,j} + L_c \cos \phi_{i,j} - L_f \\ \phi_{i,j} \\ -\theta_{i,j} \end{bmatrix} \quad (2)$$

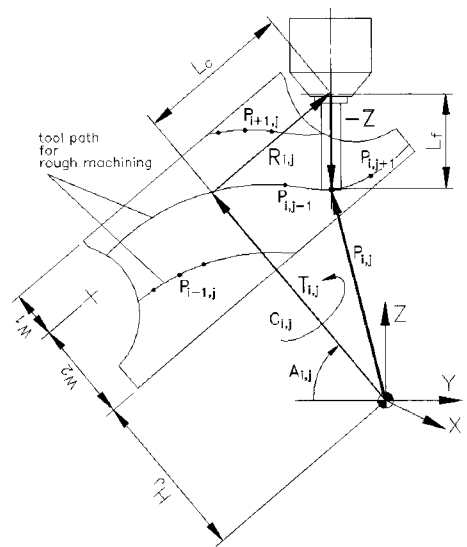
롤러 기어 캠 5-축 정삭의 가공경로는 캠 곡선 방향과 공구축의 방향에 수직한 방향으로 가공 폭만큼 이동한 위치들의 자취가 된다⁽²⁾. Fig. 2(b)와 같이 인덱스 테이블의 회전과 텀딩으로 $(i, j-1)$ 시점의 가공 위치 벡터 $P_{i,j-1}$ 가 (i, j) 시점에서는 $P'_{i,j-1}$ 로 변환되기 때문에 공구경로의 접선벡터는 $P_{i,j}$ 와 $P_{i,j-1}$ 의 차가 아니라 $P_{i,j}$ 와 $P'_{i,j-1}$ 의 차가 되어 식(3)으로 표현할 수 있다. 법선벡터 P_n 은 식(4)로 나타낼 수 있으므로 최종적으로 정삭가공 위치 P 는 식(5)로 표현된다. 여기서 $P_{i,j}$ 는

$[X_{i,j}, Y_{i,j}, Z_{i,j}]^T$ 이고, $P_{i,j-1}$ 는 $[X_{i,j-1}, Y_{i,j-1}, Z_{i,j-1}]^T$ 이고, Z 는 $[0, 0, 1]^T$ 이다.

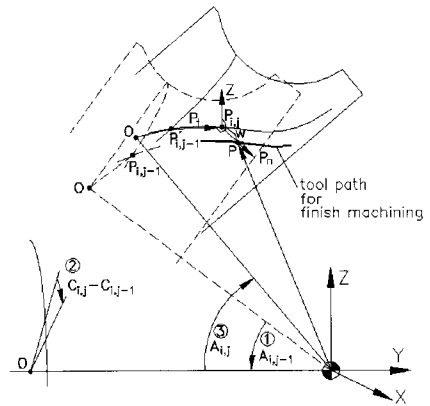
$$P_t = P_{i,j} - P'_{i,j-1} \quad (3)$$

$$P_n = P_t \times Z \quad (4)$$

$$P = w \frac{P_n}{|P_n|} \quad (5)$$



(a) Tool path for rough machining



(b) Tool path for finish machining

Fig. 2 Tool path for machining of roller gear cam on 5-axis vertical M/C with C-axis index on A-axis index

전술한 바와 같이 $(i, j-1)$ 시점에서의 가공위치 벡터는 $P_{i,j-1}$ 이고 (i, j) 시점에서의 가공위치 벡터는 $P_{i,j}$ 이며, $P'_{i,j-1}$ 는 (i, j) 시점에서 $P_{i,j-1}$ 의 변화된 위치이다. 따라서 $P'_{i,j-1}$ 는 $P_{i,j-1}$ 가 $(i, j-1)$ 시점과 (i, j) 시점간에 인덱스 테이블의 회전과 틸딩의 변화가 반영되어야 한다. Fig. 2(b)와 같이 $P_{i,j-1}$ 를 YZ-평면에 대하여 $A_{i,j-1}$ 만큼 반시계방향으로 회전 변환시키고 XZ-평면에 대하여 $C_{i,j}-C_{i,j-1}$ 만큼 시계방향으로 회전 변환시킨 후 다시 YZ-평면에 대하여 $A_{i,j}$ 만큼 시계방향으로 회전 변환시키면 $P'_{i,j-1}$ 를 구할 수 있고, 식(6)으로 표현된다. 여기서 $\Delta C_{i,j}$ 는 $C_{i,j}-C_{i,j-1}$ 이다.

$$P'_{i,j-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & \cos A_{i,j} & \sin A_{i,j} \\ 0 & -\sin A_{i,j} & \cos A_{i,j} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \Delta C_{i,j} & 0 & \sin \Delta C_{i,j} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \Delta C_{i,j} & 0 & \cos \Delta C_{i,j} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos A_{i,j-1} & -\sin A_{i,j-1} \\ 0 & \sin A_{i,j-1} & \cos A_{i,j-1} \end{bmatrix} P_{i,j-1} \quad (6)$$

롤러 기어 캠은 여러 개의 캠 곡선이 드럼 위에 놓이며 드럼 폭과 종동절의 기구적 관계로 캠 곡선의 수와 캠 회전각의 범위를 구할 수 있다. 본 연구에서 사용된 5-축 가공기계는 인덱스 테이블 회전각에 따른 가공영역의 한계가 있기 때문에 Fig. 1(b)와 같이 종동절의 회전각을 -10° 에서 90° 범위로 설정하였는데, 캠 곡선의 수는 캠 곡선의 형태에 따라 달라질 수 있지만 본 연구에서의 롤러 기어 캠은 3개의 캠 곡선이 설정되었다. 따라서 각각의 캠 선도를 i 라고 하면 다음과 같은 절차를 통하여 5-축 황삭 공구경로를 구할 수 있다.

- (step 1) i 번째 캠 곡선의 미소요소에서 임의의 j 에서의 캠 회전각 $\theta_{i,j}$ 에 대하여 식(1)로 $\phi_{i,j}$ 범위를 정한다.
- (step 2) 식(1)로 $\theta_{i,j}$ 에 따른 $\phi_{i,j}$ 를 구하고, 식(2)로 황삭 가공경로를 구하여 i 번째 캠 곡선에 대하여 NC-코드를 작성하고, 다른 캠 곡선도 NC-코드에 첨부한다.

5-축 정삭가공은 (i,j) 시점에서의 공구경로에 대한 접선벡터 및 법선벡터를 구함으로써 정삭 공구위치를 구할 수 있는데 다음 절차와 같다.

- (step 1) 각각의 캠 곡선의 미소요소에 대하여 황삭 가공경로의 위치벡터와 회전각 $[X_{i,j}, Y_{i,j}, Z_{i,j}, A_{i,j}, C_{i,j}]^T$ 를 구한다.
- (step 2) (i,j) 시점에서 직전 위치벡터인 $P'_{i,j-1}$ 를 식(6)으로 계산하고 식(3), (4), (5)를 사용하여 정삭을 위한

공구위치 벡터를 구하여 i 번째 캠 곡선에 대하여 NC-코드를 작성하고, 다른 캠 곡선도 NC-코드에 첨부한다.

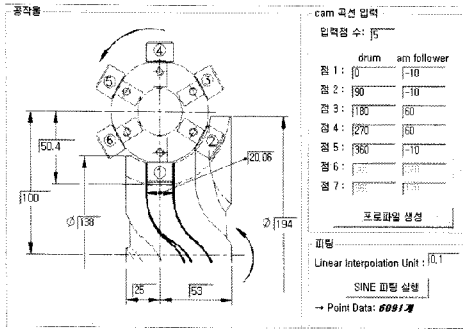
다음으로 롤러 기어 캠을 5-축 가공하기 위해서는 미소구간에 대한 이동거리 및 회전각 등을 구하여 이송속도를 동시에 계산하여 지정할 필요가 있고, 캠 곡선의 진입부 및 다른 캠 곡선으로의 급속 이송 등을 고려하여 NC-코드를 작성하여야 한다.

4. 가공실험 및 고찰

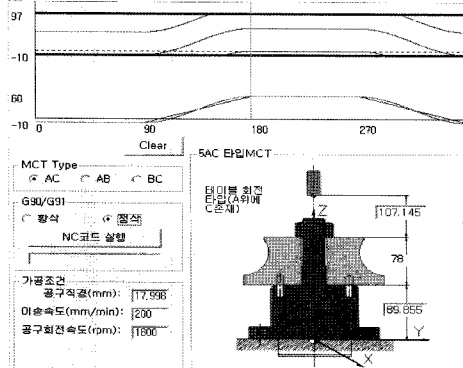
롤러기어 캠 가공을 위한 포스트 프로세싱 방법을 확인하기 위하여 Table 1과 같은 가공조건으로 5-축 가공실험을 하였다. 본 연구의 롤러기어 캠의 기본 곡선은 캠 회전각 $0^\circ \sim 90^\circ$ 에서 종동절 회전각은 -10° 를 유지하고, 캠 회전각

Table 1 Conditions for 5-axis machining of gear roller cam

items		specification or condition
5-axis m/c	Model	WIA Hi-V560M/5A
	MCU	SINUMERIK 840Di
tooling	tool	4 flute HSS End Mill, diameter $\phi 17.998\text{mm}$
	workpiece	AL after turning
cutting conditions	cutting speed	1,800rpm
	feed-rate	under 200mm/min
	width of cut	rough: tool diameter finish: $(20.06-17.998)/2=1.031$
	depth of cut	rough: 12.9mm finish: 12.5mm
	tool path dir.	rough: - finish: down milling
cam curve	follower angle region(B-axis)	$-10^\circ \sim 97^\circ$
	cam angle region(C-axis)	$0^\circ \sim 360^\circ$
	cam angle	follower angle
	$0^\circ \sim 90^\circ$	-10° dwell
	$90^\circ \sim 180^\circ$	sine curve
	$180^\circ \sim 270^\circ$	60° dwell
$270^\circ \sim 360^\circ$	sine curve	



(a) Input area for design of roller gear cam mechanism



(b) Cam curve and jig setting for 5-axis machining

Fig. 3 Developed S/W for 5-axis machining of roller gear cam

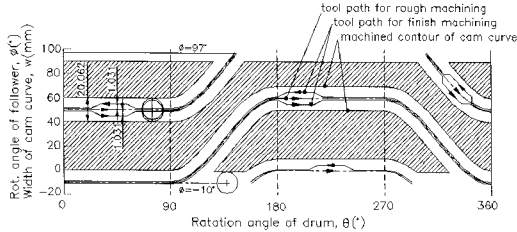
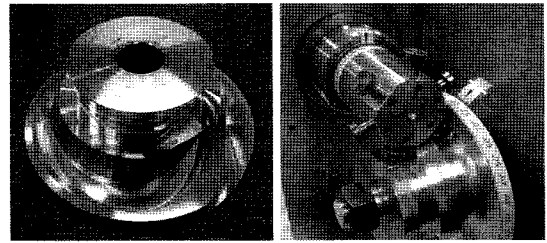


Fig. 4 Tool paths for rough and finish machining

180°~270°에서 중동절 회전각은 60°를 유지하도록 하고 경사면은 모두 사인 커브(sine curve)로 연결되도록 하여 Fig. 1(b)의 ①번 곡선으로 하였다^(1,2). 롤러 기어 캠 기구, 캠 선도, 가공을 위한 초기세팅조건 등은 본 연구에서 개발한 소프트웨어인 Fig. 3과 같다. Fig. 3(a)의 롤러기어 캠 기구에 대하여 롤러기어 캠이 연속적으로 회전하기 위해서는 Fig. 3(b)의 캠 곡선이 나타나며, 360°에 대하여 펼쳐 겹 곡선과 공구경로 등을 표현하면 Fig. 4와 같이 된다. 본 연구의 5-축



(a) 5-axis machining of gear roller cam



(b) Machined gear roller cam and its mechanism

Fig. 5 5-axis machining result of gear roller cam

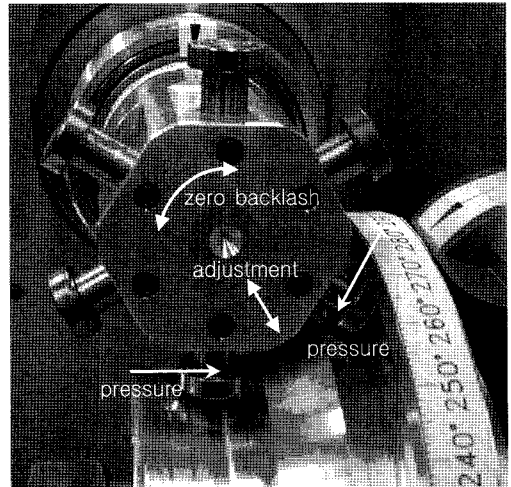


Fig. 6 The principle of non-backlash in cam mechanism

가공실험에서 공구경로는 하향절삭이 되도록 이송방향을 정하였다⁽⁹⁾.

Fig. 5는 롤러기어 캠의 5-축 가공, 가공된 기어롤러 캠, 조립된 기어롤러 캠 기구를 보여주며, Fig. 5(b)의 기어롤러 캠 기구에 가공된 캠을 조립하여 캠을 회전시켰을 중동절의 회전각 제어가 원활하게 이루어졌으며 설계조건과 동일한 결과를 얻을 수 있었다^(1,2). Fig. 6은 중동절 롤러기어 롤러 캠에 접촉하는 상태를 보여주며 롤러가 중동절의 롤러를

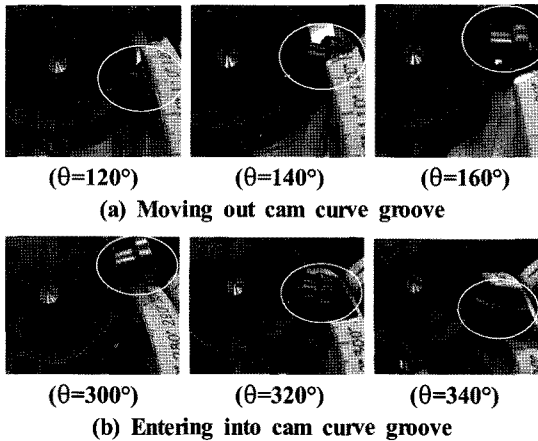


Fig. 7 The contact relation between cam groove and roller

경사면 양쪽에서 압력을 가하여 물리게 할 수 있어 1개의 캠 곡선 홈을 갖는 드럼 캠과 비교하면 백래시가 크게 개선됨을 알 수 있다. Fig. 7은 기어롤러 캠 회전에 따른 종동절 톨러의 물림상태를 보여주며 하나의 롤러가 캠 곡선 홈을 벗어나더라도 다음 롤러가 캠 곡선 홈을 계속적으로 접촉하고 있음을 알 수 있다. 따라서 캠 선도를 일정한 경사각으로만 구성하면 기어와 같이 종동절에 회전을 전달하여 백래시를 최소화한 감속기로도 응용될 수 있음을 알 수 있다.

5. 결론

종동절의 회전각을 제어하는 롤러 기어 캠의 5-축 가공을 위한 포스트 프로세싱 방법에 대한 본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) A-축 위에 C-축이 회전하는 인덱스 테이블을 갖는 5-축 가공기계에 대하여 드럼 캠의 황삭 및 정삭 가공을 위한 포스트 프로세싱 방법을 롤러 기어 캠에 적용하는 기법을 개발하였다.
- (2) 샘플 롤러 기어 캠에 대하여 직접 5-축 가공하였으며, 세팅 기구를 제작하여 톨러 기어 캠의 회전에 대한 종동절의 회전각, 물림상태 등을 분석한 결과 설계조건과 일치함을 확인하였다.
- (3) 정삭가공을 임의의 공구직경을 사용할 수 있도록 개발된⁽²⁾ 드럼 캠의 가공방법을 적용함으로써 정밀한 톨러 기어 캠의 제작이 가능하게 되었고, 공구관리가 용이하

고 공구비용이 절감되며 상향 또는 하향절삭 중 원하는 가공법을 선택하여 하나의 절삭특성을 갖게 할 수 있으므로 우수한 가공표면을 얻을 수 있게 되었다.

- (4) 본 연구는 톨러 기어의 몸체형상과 캠 곡선의 변화로 다양한 종류의 톨러 기어 캠의 제작이 가능하여 인덱스 테이블용 캠 및 ATC용 캠 등 직접 산업현장에서 제작이 난해한 제품에 바로 적용할 수 있으면서 우수한 정밀성 및 생산성을 기대할 수 있게 되었다.
- (5) 본 연구의 결과 제작된 톨러 기어 캠 기구의 작동에서 캠 곡선 홈에 톨러가 진입할 시 톨러가 캠 곡선에 부딪치는 소음이 발생하였는데, 본 연구의 정삭 포스트 프로세싱 방법이 한쪽 면만 가공하는 것이기 때문에 진입 부를 경사면으로 가공할 수 있는 장점이 있고, 경사면으로 가공하면 별도의 수작업에 의한 다듬기 공정을 생략할 수 있다.

후 기

본 연구는 지식경제부 지정 경일대학교 자동차부품시험 지역혁신센터사업의 지원에 의한 것입니다.

참 고 문 헌

- (1) Cho, H. D., Yoon, M. C., and Kim, K. J., 2010, "5-axis CNC machining for drum cam with rotational follower - I (post processing method for rough machining)," *Journal of the KSMTE*, Vol. 19, No. 5, pp. 678-683.
- (2) Cho, H. D., Yoon, M. C., and Kim, K. J., 2010, "5-axis CNC machining for drum cam with rotational follower - I (post processing method for finish machining)," *Journal of the KSMTE*, Vol. 19, No. 5, pp. 684-690.
- (3) Kim, C. S., Choi, J. H., and Kim, J. U., 2010, "Technology trend and design of index table," *Journal of the KSMTE*, Vol. 19, No. 2, pp. 141-146.
- (4) Kim, C. S., Choi, J. H., Cho, H. M., and Cho, S. Y., 2010, "A study on the stability of a barrel cam type index table," *Spring conference of the KSMPE*, pp. 147-148.
- (5) Jo, E. J., Hwang, J. D., and Jung, Y. G., 2006, "Study on the development of post-processor for

- 5-axis NC machining,” *Journal of the KSMTE*, Vol. 15, No. 3, pp. 53~58.
- (6) Cho, H. D., Jun, Y. T., and Yang, M. Y., 1993, “Five- Axis CNC Milling for Effective Machining of Sculptured Surfaces,” *Int. J. Prod. Res.*, Vol. 31, No. 11, pp. 2559~2573.
- (7) Jun, J. Y., 2004, “5-axis machining for precision machining of complicate geometric workpiece,” *Journal of the KSMTE*, Vol. 13, No. 2, pp. 23~29.
- (8) Hwang, J. D., Jung, J. Y., and Jun, Y. G, 2004, “A study on the application of reverse engineering for impeller using polynomial regression,” *Journal of the KSMTE*, Vol. 13, No. 5, pp. 103~109.
- (9) SIEMENS AG, 2004, *SINUMERIK 840D/840Di/810D fundamentals programming guide*, SIEMENS AG, Germany, pp. 234~241.