

회전형 종동절을 갖는 드럼 캠의 5-축 CNC 가공 - II (정삭가공을 위한 포스트프로세싱)

조현덕*, 윤문철**, 김경진+
(논문접수일 2010. 8. 20, 심사완료일 2010. 9. 30)

5-Axis CNC Machining for Drum Cam with Rotational Follower - II (Post Processing Method for Fine Machining)

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

Abstract

A drum cam with rotational follower has a cam mechanism and it is mainly used in its application such as index table and ATC of machine tool. Also its use can reduce the backlash in its kinematic movement. To machine the drum cam with rotational follower, 5-axis CNC machine tool is generally used and its kinematic principle is included in its design. Until now, the commercialized CAM software can't cover the application of the drum cam machining. Even if, some special software was developed for machining a drum cam, the post processing method for finish machining was not developed yet. And to overcome the problem, the form tool is still used on the tool path of rough machining. This study includes the induction of the post processing technique for the finish machining of drum cam on three 5-axis CNC machine tools, type AC, AB and BC. To prove the finishing geometric profile, the result was clearly verified through inspection and geometric measurement after direct machining of the drum cam in AC type 5-axis machine tool in this study.

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

1. 서론

회전형 종동절을 갖는 드럼 캠(Drum Cam)은 강성이 높

고, 백래시(Backlash)가 없는 확동기구로서 고속성이 우수하고 캠 선도에 따라 원하는 운동을 얻을 수 있어 공작기계에서 사용되는 정밀한 인덱스 테이블(Index Table) 및 자동

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

공구교환장치(ATC) 등에 사용된다^(1,2,3). 드럼 캠은 종동절의 원주에 배치된 여러 개의 롤러가 캠 선도 사이의 사다리꼴 단면의 산을 조립상의 위치 조정으로 양쪽에서 동시에 접촉할 수 있기 때문에 백래시가 없으며, 구름접촉으로 성능의 저하가 거의 없는 장점이 있다^(1,2,3).

이러한 드럼 캠을 가공하기 위해서는 5-축 CNC 가공기계를 사용하여야 하고 캠의 기구적 원리가 설계에 반영되어야 하는데 아직까지 이러한 기능을 가진 상용 CAM은 나오지 않는 실정이다. 일부 전용 S/W를 개발하여 사용하고 있으나 정삭가공은 공구의 형상을 가공 폭에 맞도록 제작하여 총형가공을 하는 것으로 알려져 있다.

이러한 방법은 가공 정밀도 및 생산성이 떨어지고 공구관리가 어려워 비용이 많이 발생하는 단점이 있다. 5-축 가공 데이터 생성 포스트 프로세싱에서 공구경로 방향을 결정하는 데는 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⁽⁴⁻⁷⁾.

그래서 본 연구는 세 종류의 일반적인 5-축 가공기계에 대하여 드럼 캠의 정삭가공 포스트 프로세싱 기법을 개발하였다⁽¹⁾. 세 종류의 5-축 가공기계는 A-축 상부에 C-축이 회전하는 인덱스를 갖는 수직주축 타입, B-축 상부에 A-축이 회전하는 인덱스를 갖는 수평주축 타입, C-축을 갖는 인덱스와 X-축이 주축으로 Y-축을 중심으로 틸팅(Tilting)하는 B-축을 갖는 복합가공기 타입이다. 본 연구의 정삭가공 포스트 프로세싱 기법을 증명하기 위하여 A-축 상부에 C-축이 회전하는 인덱스를 갖는 수직주축 타입의 5-축 CNC 가공기계를 사용하여 황삭 가공한 샘플 드럼 캠을 정삭 가공하였으며, 드럼 캠 세팅장치를 제작하여 드럼의 회전각에 대한 종동절의 회전각을 측정하였고 부분적으로 캠 곡선 홈의 폭을 측정하여 설계사양과의 일치하는지를 확인하였다. 본 연구에서 개발한 드럼 캠의 정삭가공을 위한 포스트 프로세싱 방법으로 기존 방식에 비하여 정밀한 가공이 가능하면서 가공공정, 공구관리, 공구비용 등이 크게 개선될 수 있었다.

2. 정삭가공을 위한 포스트 프로세싱

드럼 캠의 구성은 Fig. 1(a)과 같이 회전하는 축에 롤러를 설치한 종동절과 롤러의 회전면과 일치하는 둘레윤곽을 갖는 드럼 형태의 캠으로 구성되며, 드럼 캠 홈의 곡선은 Fig. 1(b)와 같이 일부 구간을 사인 곡선(Sine Curve)으로 부드럽게 처리한 캠 선도의 위치 데이터는 식 (1)로 표현된다⁽¹⁾.

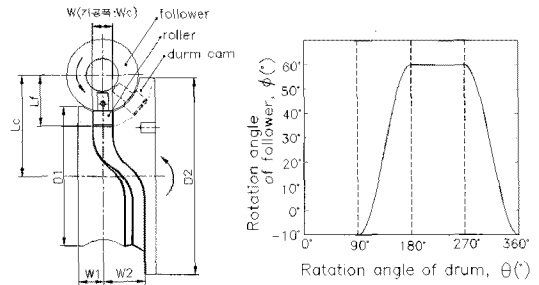
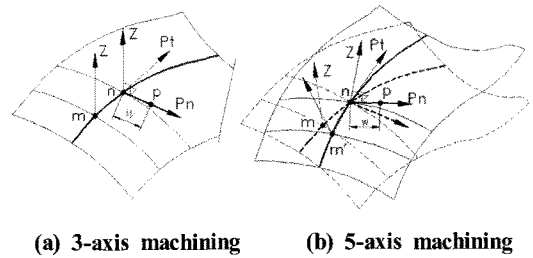


Fig. 1 Drum cam mechanism and its curve



(a) 3-axis machining (b) 5-axis machining

Fig. 2 Tool path in 3-axis and 5-axis machining

$$\phi(\theta) = a_i + b_i \sin(c_i(\theta - d_i)) \quad (1)$$

$$\text{여기서, } a_i = \frac{\phi_{i+1} + \phi_i}{2}$$

$$b_i = \frac{\phi_{i+1} - \phi_i}{2}$$

$$c_i = \frac{\pi}{\theta_{i+1} - \theta_i}$$

$$d_i = \frac{\theta_{i+1} + \theta_i}{2}$$

i 와 $i+1$ 은 \sin curve의 양 끝단을 표시

드럼 캠의 5-축 가공에 필요한 공구경로는 3개의 위치좌표와 2개의 회전좌표를 구하여야 하는데, 2개의 회전좌표의 표현방법이 5-축 가공기계의 구성에 따라 달라지고 2개의 회전좌표에 의해 3개의 위치좌표도 변환된다. 즉 Fig. 2(a)와 같이 3-축 가공에서는 직전 가공위치 m 이 현재 가공위치에서도 변함이 없지만 Fig. 2(b)와 같이 5-축 가공에서는 직전 가공위치 m 이 2개의 회전각의 변화에 의해 새로운 값으로 변함을 알 수 있다. 따라서 현재 가공위치 n 에서 공구경로는 변화된 직전 가공위치 m' 에서 현재 가공위치 n 까지의 벡터가 되며 이를 현재 가공위치 n 에서 공구방향 벡터와 백

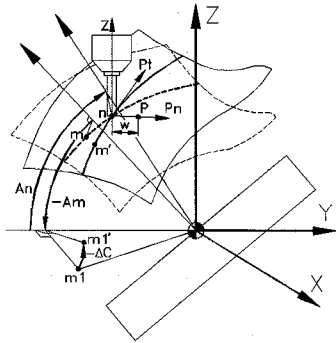


Fig. 3 Previous position calculation for 5-axis vertical M/C with C-axis index on A-axis index (AC type)

터 곱을 하면 정삭을 위한 가공 폭의 방향 벡터를 구할 수 있다. 본 연구에서는 세 종류의 일반적인 5-축 가공기계인 (a) A-축 상부에 C-축이 회전하는 수직주축 타입(AC 타입), (b) B-축 상부에 A-축이 회전하는 수평주축 타입(AB 타입), (c) C-축을 갖고 X-축이 주축으로 Y-축을 중심으로 텔팅하는 B-축을 갖는 복합가공기 타입(BC 타입)에 대하여 정삭가공 포스트 프로세싱 방법을 개발하였다.

AC 타입인 5-축 가공기계에서 직전 가공위치 m 을 현재 가공위치 n 을 기준으로 표현하면 m' 가 되는데, m' 는 Fig. 3과 같이 인덱스 테이블의 회전각도 $-A_m$ 에 대한 좌표변환과 인덱스 테이블 회전각도 ΔC 에 대한 좌표변환과 인덱스 테이블의 회전각도 A_n 에 대한 좌표변환을 각각 순차적으로 수행하여 구할 수 있으며 식 (2)로 표현된다. 따라서 정삭가공을 위한 가공위치 p 는 식 (5)로 표현할 수 있다. 여기서 A_m , A_n 은 위치 m , n 에서의 A-축 회전각이며 ΔC 는 위치 m 과 위치 n 사이의 C-축의 변화량($C_n - C_m$)이다.

$$\vec{m}' = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos A_n & \sin A_n \\ 0 & -\sin A_n & \cos A_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \Delta C & 0 & \sin \Delta C \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \Delta C & 0 & \cos \Delta C \end{bmatrix} \vec{m} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos A_m & -\sin A_m \\ 0 & \sin A_m & \cos A_m \end{bmatrix} \vec{m}' \quad (3)$$

$$\vec{P}_t = \vec{n} - \vec{m}' \quad (4)$$

$$\vec{P}_n = \vec{P}_t \times \vec{Z} \quad (5)$$

$$\vec{P} = w \frac{\vec{P}_n}{|\vec{P}_n|} \quad (6)$$

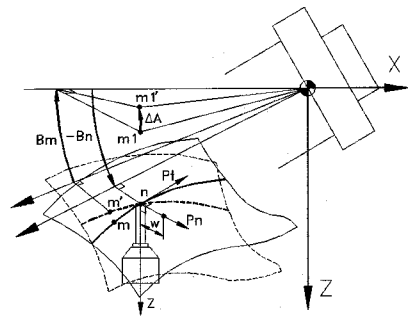


Fig. 4 Previous position calculation for 5-axis horizontal M/C with A-axis index on B-axis index (AB type)

AB 타입의 5-축 가공기계에서 현재 기준의 직전 가공위치 m' 는 Fig. 4와 같이 인덱스 테이블의 회전각도 B_m 에 대한 좌표변환과 인덱스 테이블 회전각도 ΔA 에 대한 좌표변환과 인덱스 테이블의 회전각도 $-B_n$ 에 대한 좌표변환을 각각 순차적으로 수행하여 구할 수 있으며 식 (6)으로 나타난다. 따라서 정삭가공을 위한 가공위치 p 는 식 (9)로 나타낼 수 있다. 여기서 B_m , B_n 은 위치 m , n 에서의 B-축 회전각이고 ΔA 는 위치 m 과 위치 n 사이의 A-축의 변화량($A_n - A_m$)이다.

$$\vec{m}' = \begin{bmatrix} \cos B_n & 0 & -\sin B_n \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin B_n & 0 & \cos B_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \Delta A & \sin \Delta A \\ 0 & -\sin \Delta A & \cos \Delta A \end{bmatrix} \vec{m} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} \cos B_m & 0 & \sin B_m \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin B_m & 0 & \cos B_m \end{bmatrix} \vec{m}'$$

$$\vec{P}_t = \vec{n} - \vec{m}' \quad (8)$$

$$\vec{P}_n = \vec{Z} \times \vec{P}_t \quad (9)$$

$$\vec{P} = w \frac{\vec{P}_n}{|\vec{P}_n|} \quad (10)$$

BC 타입의 5-축 가공기계에서 현재 기준의 직전 가공위치 m' 는 Fig. 5와 같이 피벗 점의 위치 m_p 로부터 공구축의 방향을 고려하여 위치 m 을 먼저 계산하고 Z-축을 중심으로 ΔC 만큼 회전 변환하여 구할 수 있다. 그리고 현재 가공위치 n 은 피벗 점의 위치 n_p 로부터 공구축의 방향을 고려하여 구한다. 따라서 공구경로 벡터 P_t 는 m' 와 n 간의 벡터가 되고,

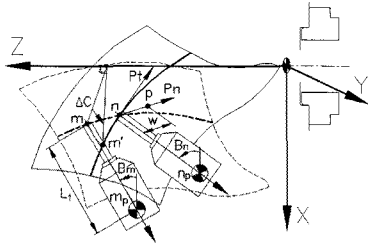


Fig. 5 Previous position calculation for 5-axis turning M/C with C-axis index and B-axis tilting (BC type)

현재 가공위치 n에서의 공구축의 방향 벡터는 $\vec{n}_p - \vec{n}$ 가 되며, 정삭가공을 위한 가공위치 p는 식 (15)로 나타난다. 여기서 B_m, B_n 은 위치 m, n에서의 공구의 Y-축에 대한 틸팅각이며 ΔC 는 위치 m과 위치 n사이의 C-축의 변화량($C_n - C_m$)이다.

$$\vec{m} = \begin{bmatrix} x_{mp} - L_t \cos B_m \\ y_{mp} \\ z_{mp} + L_t \sin B_m \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\vec{m}' = \begin{bmatrix} \cos \Delta C & \sin \Delta C \\ -\sin \Delta C & \cos \Delta C \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \vec{m} \quad (11)$$

$$\vec{n} = \begin{bmatrix} x_{np} - L_t \cos B_n \\ y_{np} \\ z_{np} + L_t \sin B_n \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\vec{P}_t = \vec{n} - \vec{m}' \quad (13)$$

$$\vec{P}_n = (\vec{n}_p - \vec{n}) \times \vec{P}_t \quad (14)$$

$$\vec{P} = w \frac{\vec{P}_n}{|P_n|} \quad (15)$$

3. 가공실험 및 고찰

본 연구의 정삭가공을 위한 포스트 프로세싱을 검증하는 가공실험을 위해 AC 타입의 5-축 가공기계인 WIA Hi-V560M/5A(MCU: SINUMERIK 840Di)에서 $\phi 17.998\text{mm}$ 인 4날 HSS 엔드밀과 AL 공작물을 사용하여 드럼 캠을 가공하였다⁽⁸⁾. 황삭 공구경로는 곡선 홈의 중간점이며⁽¹⁾, 정삭은 하향

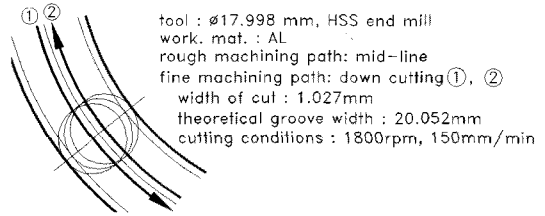


Fig. 6 Tool path for fine 5-axis machining on 5-axis vertical M/C with C-axis index on A-axis index

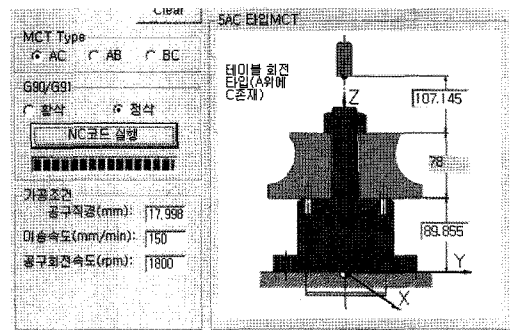
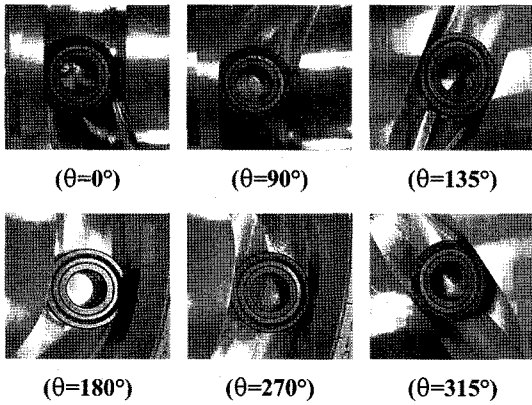


Fig. 7 Developed software for 5-axis machining of drum cam

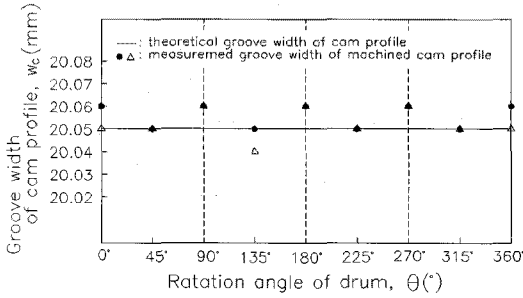
절삭이 이루어지도록 Fig. 6과 같이 공구경로 ①과 공구경로 ②의 방향으로 하였고, 절삭 폭 1.027mm, 공구 회전수 1800 rpm, 이송속도 150mm/min로 가공하였다. 따라서 이러한 조건으로 가공하면 이론적으로 캠 곡선 홈의 폭은 20.052 mm가 되어야 함을 알 수 있다. Fig. 7은 중동절이 회전하는 드럼 캠 5-축 가공을 위해 개발한 S/W의 절삭조건과 공작물 세팅 상태를 나타낸다.

Fig. 8은 회전 각도에서 캠 곡선 홈의 폭이 20.052mm로 가공되었는지를 확인하기 위하여 드럼 캠의 회전각에 따른 외경이 $\phi 19.97\text{mm}$ 인 볼 베어링(699z)을 캠 곡선 홈에 끼운 상태와 직접 캠 곡선 홈의 폭을 디지털 버니어캘리퍼스로 측정된 결과를 나타내었다. 여기서 정확한 측정위치를 지정할 수는 없었으나 2명이 측정된 값을 나타내었는데 거의 이론값과 일치함을 확인하였고, 베어링의 유격도 거의 느낄 수 없었다. 따라서 본 연구의 정삭가공 포스트 프로세싱 방법이 정확하였음을 알 수 있었다.

드럼 캠 가공 결과의 확인은 곡면을 3차원 측정기로 측정하여도 캠의 회전선도를 드럼 캠 곡면으로 전환하는 S/W를 개발하지 않으면 측정 결과를 확인할 수 없고 또한 S/W의 검증이 필요하므로 직접 캠 기구를 제작하여 회전각도를 측



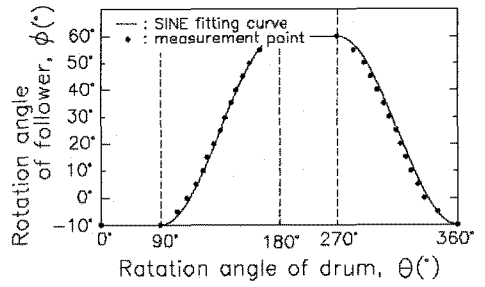
(a) Roller position on drum cam



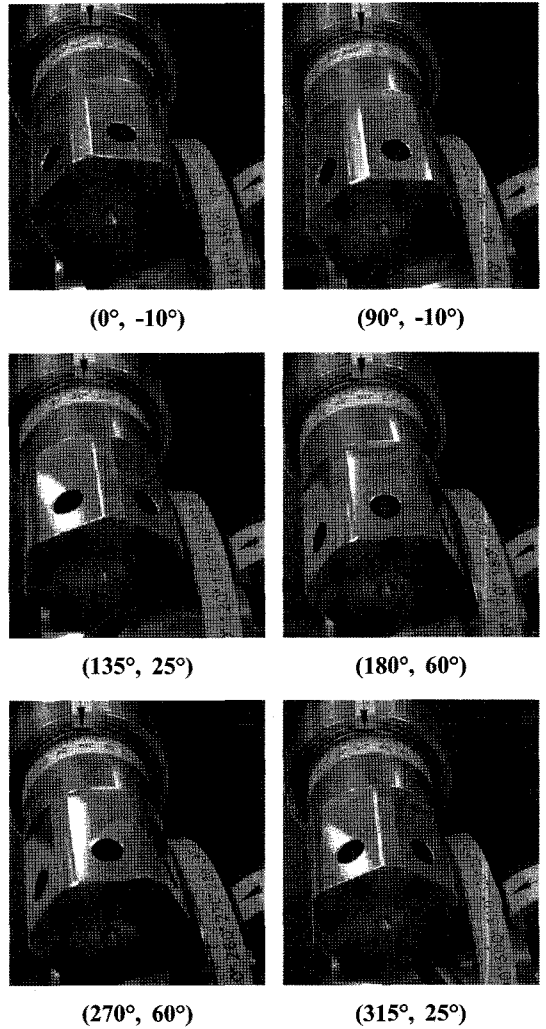
(b) machined groove width on drum cam

Fig. 8 Roller position and machined groove on drum cam

정하는 것이 가장 정확한 방법이라 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 드럼 캠의 측정기구⁽¹⁾를 제작하여 드럼 캠의 회전각에 따른 종동절의 회전각을 직접 측정하였으며, 측정 결과 Fig. 9와 같이 캠 선도와 잘 일치하였다. 그리고 회전상태를 확인한 결과 부드럽게 작동하였으며 종동절의 백래시도 거의 느낄 수 없을 정도였다. 그러나 롤러 베어링의 회전 방향이 일정하지 않은 현상이 나타났는데 이는 캠 곡선 홈의 폭과 롤러간의 간격이 너무 적어 접촉부위가 반대방향으로 수시로 바뀌기 때문인 것으로 분석되었다. 따라서 롤러의 회전이 일정하게 이루어져야 더욱 원활한 운동을 할 수 있기 때문에 실제 산업현장에 적용하기 위해서는 캠 곡선의 홈과 롤러 간의 공차를 크게 설정하는 것이 유리하다. 이 때 백래시가 증가하여 기능적으로 부정적인 요소가 될 수 있는데 백래시를 제거하기 위하여 여러 개의 롤러와 여러 개의 캠 곡선을 갖는 인텍스 배럴 캠 기구(Barrel Cam Mechanism)를 제작하여 사용한다⁽²⁾. 본 연구는 인텍스 배럴 캠 5-축 가공에도 직접적으로 응용될 수가 있다.

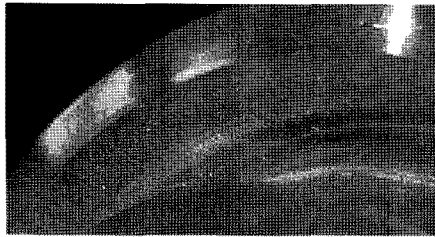


(a) Drum cam profile and its measured one

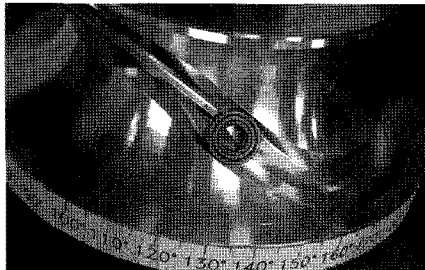


(b) Follower angle versus drum cam angle

Fig. 9 Relative position between the drum and the follower



(a) Rough machined surface



(b) Finish machined surface

Fig. 10 Machined surfaces of the drum cam

Fig. 10은 황삭가공면과 정삭가공면을 나타내며 황삭가공면에는 공구의 떨림에 의한 공구 자국이 크게 나타났다. 이러한 현상은 황삭가공에서 절삭 폭이 공구직경과 동일하게 크고 가공성이 좋지 않은 엔드밀 공구의 바닥면에서 절삭이 발생하였고 4날 엔드밀의 칩 배출이 좋지 않았기 때문으로 분석되었다. 그래서 정삭가공에서는 절삭 깊이를 황삭에 비해 0.4mm작게 하여 공구 바닥면의 가공을 피하도록 하였고 절삭 폭을 작게 하였기 때문에 Fig. 10(b)과 같이 매우 매끄러운 가공면을 얻을 수 있었다. 본 연구의 샘플 드럼 캠 기구에서 종동절의 회전중심에서 롤러 끝단까지의 거리가 49.4 mm이기 때문에 캠 곡선 바닥과 롤러 끝단의 간섭을 배제하기 위하여 종동절의 회전중심에서 캠 곡선 바닥까지의 거리를 50.4mm가 되도록 하였다. 따라서 황삭 절삭깊이를 12.9 mm로 하였고 정삭은 12.5mm로 하였다. 그리고 Fig. 10(b)에서 보는 바와 같이 외경 $\phi 19.97\text{mm}$ 의 볼베어링을 전체 캠 곡선 홈을 따라 이동시킨 결과 전체 구간을 매끄럽게 이동할 수 있었다.

4. 결론

종동절의 회전각을 제어하는 드럼 캠의 5-축 정삭가공을 위한 포스트 프로세싱 방법에 대한 본 연구를 통하여 다음과

같은 결론을 얻었다.

- (1) 세 종류의 5-축 가공기계에 대하여 드럼 캠의 정삭 가공을 위한 포스트 프로세싱 방법을 개발하여 다른 타입의 5-축 가공기계에도 쉽게 접근할 수 있도록 하였으며, Hi-V560M/5A 5-축 가공기계에서 샘플 드럼 캠을 가공하여 검증하였다.
- (2) 세팅 기구를 제작하여 드럼 캠의 회전선에 대한 종동절의 회전각, 물림상태 등을 비교한 결과 캠 곡선의 설계치수와 가공결과가 정확하게 일치하였다.
- (3) 기존 산업현장에서는 캠 곡선 홈의 폭 크기에 맞는 공구를 사용하여 황삭가공의 공구경로로 최종 정삭을 하였으나 본 연구의 결과를 적용하면 임의 직경의 공구로도 정삭가공이 가능하게 된다. 따라서 공구관리가 용이하고 공구비용이 절감되며, 상향 또는 하향절삭 중 원하는 가공법을 선택하여 하나의 절삭특성을 갖게 할 수 있으므로 더욱 우수한 가공표면을 얻을 수 있다.
- (4) 본 연구의 포스트 프로세싱 방법은 여러 개의 종동절을 갖는 드럼 캠 가공에 적용할 수 있어 인택스 테이블용 드럼 캠 및 ATC용 드럼 캠 제작에 활용할 수 있다. 또한 캠 선도의 변화가 가능하여 다양한 종류의 드럼 캠 제작을 가능하게 한다.

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)," *Transactions of the KSMTE*, Accepted.
- (2) Kim, C. S., Choi, J. H., and Kim, J. U., 2010, "Technology trend and design of index table," *Transactions of the KSMTE*, Vol. 19, No. 2, pp. 141~146.
- (3) 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.
- (4) Jo, E. J., Hwang, J. D., and Jung, Y. G., 2006, "Study

- on the development of post-processor for 5-axis NC machining,” *Transactions of the KSMTE*, Vol. 15, No. 3, pp. 53~58.
- (5) 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.
- (6) 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.
- (7) Hwang, J. D., Jung, J. Y., and Jun, Y. G., 2004, “A study on the application of reverse engineering for impeller using polynomial regression,” *Transactions of the KSMTE*, Vol. 13, No. 5, pp. 103~109.
- (8) SIEMENS AG, 2004, *SINUMERIK 840D/840Di/810D fundamentals programming guide*, pp. 234~241.