

## 5축 가공에 의한 SCM415 롤러 캠 개발과 표면조도 연구

### A Study on the Development and Surface Roughness of Roller Cam SCM415 by 5-Axis Machining

김진수<sup>1</sup>, 이동섭<sup>2</sup>, 강성기<sup>3,✉</sup>  
Jin Su Kim<sup>1</sup>, Dong Seop Lee<sup>2</sup>, and Seong Ki Kang<sup>3,✉</sup>

<sup>1</sup> 한국폴리텍 VII 대학 컴퓨터응용기계학과 (Dept. of Computer Aided Mechanical, Korea Polytechnic VII Colleges)

<sup>2</sup> 경남대학교 대학원 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Kyungnam Univ.)

<sup>3</sup> 한국폴리텍 VII 대학 컴퓨터응용기계설계학과 (Dept. of Computer Aided Mechanical Design, Korea Polytechnic VII Colleges)

✉ Corresponding author: kskjh114@kopo.ac.kr, Tel: +82-55-260-1164

Manuscript received: 2012.6.4 / Revised: 2012.11.23 / Accepted: 2013.1.2

*In this study, we carried out the each lines of section, using GC (green silicon carbide) whetstone, the SCM415 material which separated by after and before heat treatments process, in 3+2 axis machining centers for integrated grinding after cutting end mill works, the spindle speed 8000 rpm and feed rate 150 mm/min. For the analysis of the centerline average roughness (Ra), we measured by 10 steps stages. Using Finite element analysis, we found the result of the load analysis effect of the assembly parts, when applied the 11 kg's load on both side of the ATC (Automatic tool change) arm. The result is as follows. For the centerline average roughness (Ra) in the non-heat treatment work pieces, are appeared the most favorable in the tenth section are 0.510  $\mu\text{m}$ , that were shown in the near the straight line section which is the smallest deformation of curve. In addition, the bad surface roughness appears on the path is to long by changing angle, the more inclined depth of cut, because the chip discharging is not smoothly.*

Key Words: Automatic Tool Change (ATC, 자동 공구 교환장치), Surface Roughness (표면거칠기), Displacement Vector (변위 벡터), Tool Change Arm (공구 교환 암), Roller Follower (롤러 종동절)

#### 1. 서론

공작기계의 핵심 부분으로 제품의 생산성에 큰 영향을 주는 자동 공구 교환장치는 하나의 제품을 가공하는 동안 작게는 3~4 번, 많게는 32 번 이상 공구를 교환한다. 대량 생산하는 체제에서 공구를 교환하는데 걸리는 시간은 큰 영향을 미치므로 고속 자동 공구 교환장치 개발은 매우 중요하게 되었다. 현재 기존 제품은 자동 공구 교환 시간이 약 1.4 초 정도이다. 하지만 0.2 초 정도만 단축시킨다고 해도 생산성 향상에 크게 기여를 할 것이다.

제품의 생산성에 큰 영향을 미치는 자동 공구 교환장치(automatic tool change: ATC)는 일반적으로 유·공압 작동기의 순차적 작동에 따라 수행하는 방식을 주로 사용하나, 선진국의 공작기계에서는 공구교환 암(tool change arm)에서 전기 모터와 캠으로 구동되는 고속 자동 공구 교환장치를 개발하여 꾸준히 사용하고 있는 실정이다.

유·공압 장치로 공구교환 할 경우 동작이 연동되어 일어나지 못하며, 고속 자동 공구 교환장치의 경우에는 유·공압 장치 대신 기계적인 장치를 이용하여 전기모터와 캠으로 운동을 유도하기 때문에 캠의 설계와 가공에서 많은 어려움이 있으나

정확한 운동과 제어가 됨으로써 간편하다고 할 수 있다.<sup>1</sup>

인덱스 드라이브의 경우에는 입력 축에 부착된 캠을 기구학적으로 해석된 운동곡선에 따라 출력 축에 부착된 캠 Follow 베어링에 운동을 전달함으로써 최적의 운동으로 변환시키는 역할을 한다. 본 연구에서 적용된 롤러 캠 방식은 중동절 축의 원주에 여러 개의 롤러를 부착하여 중동절의 회전을 주기적으로 제어할 수 있는 원통 캠 기구로 공작기계의 인덱스 테이블 및 ATC 등 백래쉬 없이 정밀한 구동이 필요한 곳에 많이 사용한다.<sup>2,3</sup>

롤러 캠의 개발에 있어 모델링 설계방법 및 최적의 가공방법을 찾아 작업 공정개선 생산성 향상 품질향상 원가절감 등에 기여하고자 한다.

**2. 롤러 캠 방식의 구성과 원리**

고속 ATC의 공구 교환시간(T-T-T)을 줄여 주는 가장 핵심적인 부품은 롤러 캠(roller cam)이다. 롤러 캠의 1 회전에 의하여 축 회전과 축 방향 이송이 동기화 되어 공구의 교환이 연속적으로 일어나므로 유·공압 장치의 순차적인 운동에 비하여 속도가 현저하게 빠르다. 롤러 캠 기구는 회전운동용 롤러를 가진 원통 캠의 형태로 Fig. 1에서 보는 바와 같이 다수의 롤러가 옆면에 부착되어 있다.

Fig. 1에서 원통 캠은 수직 축을 중심으로 원통 모양으로 다수의 복잡한 홈으로 형상을 이루고 있다. 원통 캠의 축과 교차하는 수평축에 여러 개의 롤러로 구성된 것이 중동절이며, 터렛(turret)이라 한다.

캠의 회전축과 중동절 회전축(follower axis)이 어긋나게 교차되어 있는 것을 볼 수 있는데 캠이 회전하게 되면 캠에 파여진 안내 홈의 리브에 중동절 롤러의 옆면이 서로 접촉하면서 중동절의 축에 대해 회전운동, 정지운동을 수행하게 된다.<sup>4</sup>

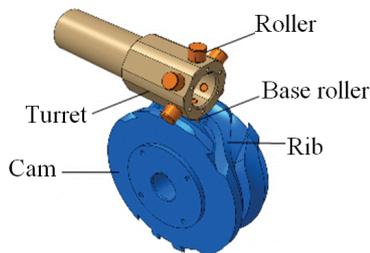


Fig. 1 Schematic view of roller cam and tool change arm

고속 ATC의 주요 부품인 롤러 캠은 원통 단면의 평판 캠과 원통 외벽 면의 원통 캠의 두 가지 캠이 복합되어 있는 캠으로 원통 캠에 의한 공구 교환 암의 축 회전 운동이다. 이것은 단순히 축 회전과 축 방향 이송만 하는 것이 아니라 축 회전에 대한 축 방향 이송이 서로 연동적으로 일어나야 한다. 캠을 모델링 하기 위해서는 각각의 변위선도가 입력 데이터로 주어지는데, 이 변위선도의 변위곡선 부분에서는 속도를 정의하기 매우 어려움으로 그대로 사용할 수 없고 근사적인 수식에 의하여 수정변위선도(MS 곡선)로 바꾸어 모델링 한다.<sup>5,6</sup>

**3. 실험방법**

**3.1 가공 장비 및 표면 거칠기 측정**

절삭가공을 위하여 실험에 사용된 수평 머시닝 센터는 현대위아(주) KH63G 타입이며 롤러 캠 부품의 가공을 위해 다음과 같은 장비 조건을 주었다. 첫째, 칼럼과 테이블 베드가 T 자형 주물구조로 강성을 높이고 장시간 운전에도 안정할 수 있는 정도를 유지하도록 하였으며 둘째, Y축 안내면은 주축헤드가 칼럼에 대해 8면 모두 안내되는 새로운 방식으로 중 절삭 가공에서도 고정도를 유지하도록 하였다.

셋째, Z축은 습동면의 마찰을 줄이기 위해 반부상 슬라이드방식을 채택하여 위치결정과 반복 정도를 장시간 유지하도록 하였다. 넷째, 각 이송 안내면 주위에 마련된 윤활유 회수 구에 의해 분리되도록 하였고 다섯째, X/Y/Z축의 볼 스크류의 윤활은 냉각효과가 높은 Oil-air 방식을 채용하여 열 변위를 최대한 억제함으로써 정밀도를 향상하도록 하였다. 캠의 리브 형상의 가공을 위해 Fig. 2에서 보는 바와 같이 부가축 B축의 회전 각도는 0.001 mm로

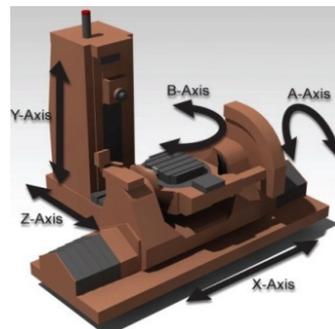


Fig. 2 Internal configuration of the experimental system

360° 회전과 테이블 위에 로타리 인덱스 장치를 부착하여 C 축의 회전 360° 로 0.001 mm 테이블의 회전하여 선단점 제어를 할 수 있도록 하였다.

표면 거칠기는 Kosaka laboratory 사의 Surface roughness tester 를 사용하였고, 측정기의 일반적인 특징으로는 평균치 측정모드, 연속자동 측정모드, 곡면 측정모드, 결함부 제거모드 등 다양한 측정모드가 가능하며 제품별 측정 조건을 저장할 수 있다. 타 제품과는 다르게 중, 횡 양방향 교정을 채택하여 보다 정확한 데이터를 산출할 수 있는 정교한 기기 교정방법을 적용하였다.

롤러 캠의 가공 곡면의 표면 거칠기는 롤러 캠의 MS 곡선 선도를 기준으로 작업한 가공 면의 방향과 직각이 되게 하여 0.001 mm 인디케이터를 롤러 캠의 리브가공 형상 면의 측벽 면에 터치하면서 각 구간별로 회전 및 틸팅 인덱스 테이블로 경사각에 맞게 조절하여 10 mm 거리를 경로 간격으로 중심선 평균 거칠기(Ra) 값을 측정하였으며 Fig. 3 은 측정장치를 보여 주고 있다.

**3.2 소재 및 공구**

가공에 사용된 소재는 SCM415 으로 Cr(0.9~1.2%) 강에 Mo(0.15~0.3%)을 첨가한 것으로 기타

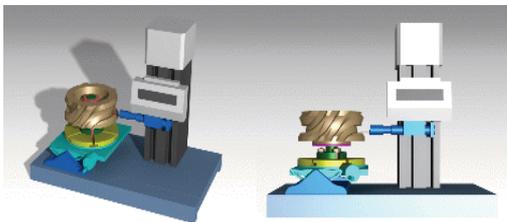


Fig. 3 Schematic illustration of the Surface roughness measuring instrument

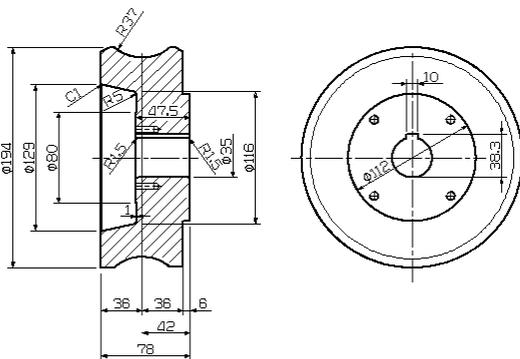


Fig. 4 After drawing the first sample machining

화학적 성분은 C 0.13~0.18%, Si 0.15~0.35, Mn 0.6~0.85, P 0.03%, S 0.03%, Ni 0.25%, Cu 0.3% 등이다.

Fig. 4 와 같이 CNC 선반에서 시편 5 개를 가공하였다. 시편은 머시닝센터에서 1 차 황삭 작업하여 열처리 후 머시닝센터에서 2 차 연삭작업을 하는 방법으로 가공이 이루어졌다.

공구는 대구택(주)에서 롤러 캠 작업에 적합한 인선 형상과 정밀공차를 보유하고 있는 고속 가공용 플랫폼 4 날 엔드밀(artmill flat for HSM)로 재종 TT1040 을 사용하였으며, 또한 TT1040 은 초 미립 재종(UF10N)에 AlTiN 을 코팅한 것으로 솔리드, 카바이드, 엔드밀, 드릴, 브레이징, 엔드밀 등의 용도로 사용된다. 밀도가 14.2 (g/cm<sup>3</sup>)이며 항절력 340 (kg/mm<sup>2</sup>), 경도 90.5 (H<sub>R</sub>B)로 내마멸성과 인성이 탁월하여 범용 작업에도 적합한 공구이다.

롤러 캠의 리브 형상의 측벽 면을 가공하기 위해 Fig. 5 와 같이 Ø20 mm 인 GC 슷돌을 콜렛 척에 부착한 후 머시닝센터의 테이블에 다이아몬드 드레스를 고정하여 자동 프로그램으로 GC 슷돌의 직경의 크기를 Ø19 mm 로 드레싱하여 마지막 가공 공정에 사용할 수 있는 슷돌 공구로 만든 후 가공하였다.

**3.3 설계조건과 형상 설계**

Table 1 은 자동 공구 교환장치를 설계하는데

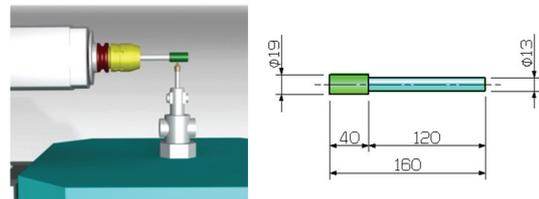


Fig. 5 Dressing of GC hone tool

Table 1 Specification of ATC

No	Tem	Description
1	Method of joint	Tool holder vertical position
2	Tool size	Mas 403 BT-40
3	Weight of Tool	8 kg × 2ea
4	Radius of arm	240 mm
5	Weight of arm	8 kg
6	Rpm of input axis (max)	225 rpm
7	Motor	G3FB-22-10-040A (Nissei)
8	Lubrication	Oil type
9	Cycle time	1.4 sec
10	The ration on of reduction	1/46.875
11	Balance of arm axis	±0.55 Target/R240 (90°)

필요한 사양이며 본 실험을 위해 현재 제조업체에서 널리 사용되고 있는 CAD&CAM 솔루션을 선정하였는데, 그 이유는 3D 모델링 작업에 자유곡면 모델링 제작기능이 강하고 또한 가공 프로그램을

Table 2 Displacement conditions for a cam & rotating follower

Section	Cam Angle	Motion	Curve Type
1	0° ~ 10.5°	Dwell	-
2	10.5° ~ 62.5°	-70° Return	Modified Sine
3	62.5° ~ 122.5°	Dwell	-
4	122.5° ~ 237.5°	-250° Return	Modified Sine
5	237.5° ~ 297.5°	Dwell	-
6	297.5° ~ 349.5°	-180° Return	Modified Sine
7	349.5° ~ 360°	Dwell	-

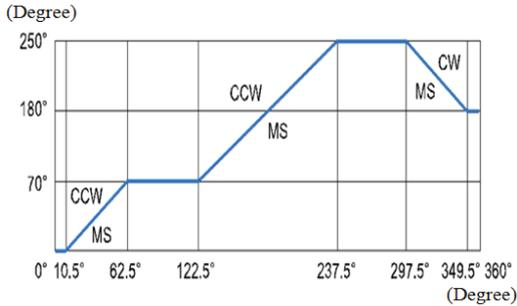


Fig. 6 The cam curve diagram

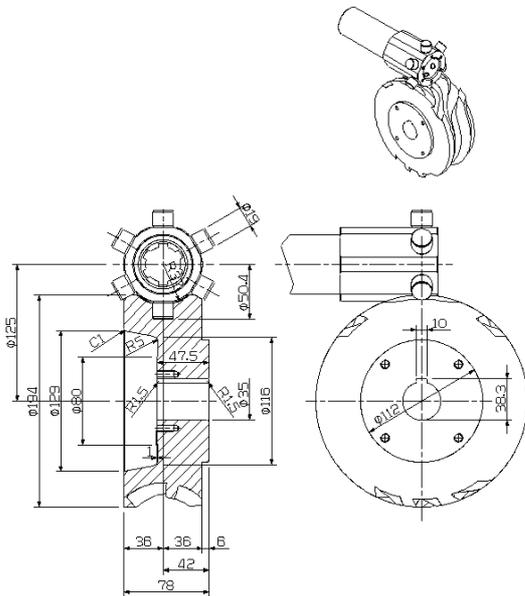


Fig. 7 Design parameters of a roller gear cam & rotating follower

선정한 프로그램 내에서 직접 제작이 가능하므로 롤러 캠의 제작에 있어 작업의 프로세스가 통합화할 수 있고 작업의 일관성이 유지된다.

롤러 캠 3D 모델링을 위해 필요한 설계조건을 이용하여 형상모델링을 하였으며 설계 조건 중 롤러 캠의 원동절과 종동절의 회전각을 입력하였다.

회전각의 입력 값은 Table 2 와 같은 조건으로 하여 Fig. 6 과 같이 변위선도를 얻었으며 캠의 설계를 위한 캠과 종동절의 형상 도면은 Fig. 7 에 나타내었다.

#### 4. 실험 결과 및 고찰

##### 4.1 머시닝센터 가공 및 시제품 제작

CNC 선반에서 가공한 시편을 3+2 축 머시닝센터를 이용하여 주축 회전수 8000 rpm, 이송속도 150 mm/min, 절입 깊이 18.3 mm 으로 주어 1 차 가공된 소재를 이용하여 AITin 코팅 TT1040 엔드밀 공구로 습식 절삭으로 가공하였다.

시편을 머시닝센터 작업시 2 가지 작업방법으로 실시 하였는데 1 차 작업한 시편을 이용하여 연삭작업까지 진행한 후 H<sub>R</sub>C58 로 진공 열처리 공정을 하는 방법과 머시닝센터에서 엔드밀로 황·정삭을 한 후 진공 열처리하여 GC 슷돌로 연삭작업을 할 수 있는 여유량을 남겨두고 가공하였다.

가공한 롤러 캠의 가공형상 제품은 Fig. 8 과 같다.

본 연구에서는 가공한 롤러 캠의 완성검사를 위해 ATC 장치에 가공한 캠을 조립한 후 수동으로 조작하여 Fig. 6 과 같이 캠 선도에서 요구하는 회전각과 조립 문제를 동작 시험하여 캠과 종동절의 간섭 여부를 확인한 결과 캠과 종동절이 정확히 접촉함을 확인하였다.

또한 ATC 장치에 가공한 캠을 장착하여 1 회전시 1.2 초로 회전이 이루어져 ATC 암 양쪽에 공구



Fig. 8 Shape of designed cylindrical cam

의 중량 11 kg 를 2 개 걸어서 480 시간 동안 연속해서 144 만회 회전검사를 실시한 결과 작동에 문제가 발생하지 않았고 진동소음 등에서는 기존 제품과 비슷한 결과를 얻었다.

### 4.2 3 차원 곡면 Ra 표면 거칠기 분석

가공방법 및 가공조건에 따라 3 차원 자유곡면

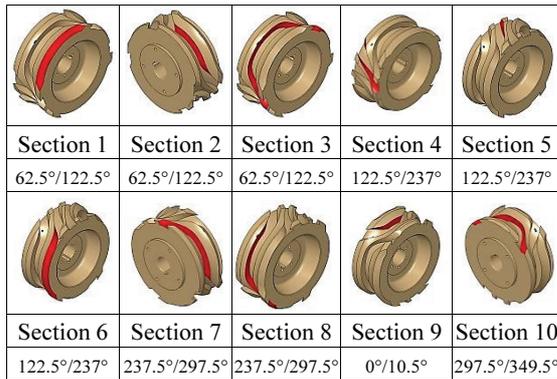


Fig. 9 Measurement position of surface roughness

Table 3 Measure surface roughness (Ra) by grinding of heat-treatment and non-treated

No	Non-treated	Heat-treatment
1	0.970 $\mu\text{m}$	0.870 $\mu\text{m}$
2	2.070 $\mu\text{m}$	1.160 $\mu\text{m}$
3	0.940 $\mu\text{m}$	0.740 $\mu\text{m}$
4	0.891 $\mu\text{m}$	0.850 $\mu\text{m}$
5	0.590 $\mu\text{m}$	0.714 $\mu\text{m}$
6	0.740 $\mu\text{m}$	0.780 $\mu\text{m}$
7	0.690 $\mu\text{m}$	0.800 $\mu\text{m}$
8	0.721 $\mu\text{m}$	0.820 $\mu\text{m}$
9	0.740 $\mu\text{m}$	0.760 $\mu\text{m}$
10	0.510 $\mu\text{m}$	0.652 $\mu\text{m}$

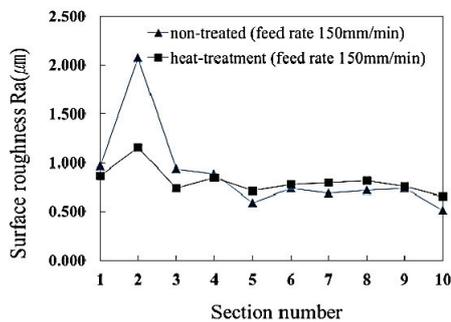


Fig. 10 Surface roughness by cutting of heat-treatment and non-treated

가공 시 회전수 8000 rpm 이송속도 150 mm/min 조건에서 가공된 롤러 캠의 공구 경로간격을 10 mm 에 따라 표면 거칠기의 변화를 분석하기 위해 3+2 축 동시제어를 통한 표면 거칠기 측정 구간(section 1~10)을 나누어 Fig. 9 에서 보는 바와 같이 적색 부분의 위치에서 측정하였다.

Table 3 은 중심선 평균 거칠기(Ra)를 5 회 측정 한 값의 평균값을 나타내고 있으며 Fig. 10 은 비교 한 결과 값을 보여주고 있다.

Table 3 과 Fig. 10 에서 보는 바와 같이 미열처리 시제품에서는 공구경로 2 번째 구간에서 평균 값 Ra 2.070  $\mu\text{m}$  값으로 가장 좋지 못한 것으로 나타내었는데 이것은 양 측벽의 사이클 타임이 가장 긴 구간에서 이루어졌으며 상대적으로 측벽 절입 깊이의 과다한 현상으로 표면 거칠기가 나쁘게 발생되고 있었음을 알 수 있었다. 10 번째 구간에서 Ra 0.510  $\mu\text{m}$ 으로 가장 양호한 표면 거칠기를 나타내었는데 이는 곡선구간 보다 직선구간이 많은 부위가 상대적으로 절입 깊이가 작아 양호하게 나타난 알 수 있었다.

열처리한 상태에서는 연삭가공 후 시제품을 완성하여 측정한 결과 10 번째 구간에서 Ra 0.652  $\mu\text{m}$  으로 가장 양호하게 나타났으며, 2 번째 공구 경로 구간에서 Ra 1.160  $\mu\text{m}$  값으로 가장 나쁜 결과를 보였는데 가공 시 연삭 작업에서 CAM 의 NC 데이터를 이용한 가공이 사인 곡선에 따라서 62.5° 에서 출발하여 122.5° 까지 가공이 완료 됨으로 인한 슷돌의 로딩(Loading) 현상으로 표면 거칠기 값이 나쁘게 나타나는 것으로 분석되었다. 특히 열처리 소재와 미열처리 소재의 경로 구간에서 4 에서 10 번 구간의 Ra 값은 대체로 평균화 되어있는 편이며 10 구간에서 표면 거칠기 Ra 값이 가장 양호하게 나타났으며 곡선의 변형량이 적은 일직선상의 경로구간 부근에서 나타남을 알 수 있었다.

## 5. 결론

본 연구에서는 SCM415 소재를 사용하여 동작 기계 ATC 의 핵심 부품인 롤러 캠을 5 축 머시닝 센터 가공에서 엔드밀 절삭과 연삭의 복합화에 관한 가공특성을 연구하기 위해 열처리 후 공정과 미열처리 공정으로 구분하여 주축속도 8000 rpm 이송속도 150 mm/min 로 각 선도의 구간별 절삭을 10 단계로 변화시키면서 표면 거칠기를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

열처리와 미열처리된 시제품의 표면 거칠기 Ra 값에서 10 구간에서 가장 양호하게 나타났으며 곡선의 변형량이 작은 일직선상의 경로구간 부근 임을 알 수 있었다. 또한 시제품의 표면 상태는 1 구간에서 4 구간은 열처리 소재가 양호하고 5 구간에서 10 구간은 미열처리 소재가 양호 함을 알 수 있었는데 선도의 각도 변화에 따른 공구경로 구간 이 길고, 경사 절입 깊이가 많아 칩 배출이 원활 하지 못하기 때문에 발생하는 것으로 나타났다.

엔드밀을 이용한 황삭 가공시 다듬질 여유량 0.04 mm 남겨 놓은 후 진공열처리 과정을 거친 후 머시닝센터를 이용하여 연삭작업을 함으로서 엔드 밀 절삭과 연삭작업의 복합화가 가능함을 알 수 있었고 연삭작업 후 열처리 공정을 거쳐서 작업을 진행하여도 공차 범위가 0.02 mm 내외로 발생되어 공정개선과 가공사이클 타임이 줄어든 것을 알 수 있었다.

## 참고문헌

1. Cho, S. R., Lee, C. M., and Chung, W. J., "A study on the modeling of roller gear cam," Journal of the KSMTE, Vol. 10, No. 3, pp. 31-37, 2001.
2. Cho, H. D., Yoon, M. C., and Kim, K. J., "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, 2010.
3. Kim, C. S., Choi, J. H., Cho, H. M., and Cho, S. Y., "A Study on the Stability of A Barrel Cam Type Index Table," Proceedings of the KSMPE Conference, pp. 147-148, 2010.
4. Cho, H. D., Yoon, M. C., and Kim, K. J., "5-Axis CNC Machining for Drum Cam with Rotational Follower - II (Post Processing Method for Fine Machining)," Journal of the KSMTE, Vol. 19, No. 5, pp. 684-690, 2010.
5. Cho, H. D., Yoon, M. C., and Kim, K. J., "5-Axis CNC Machining of Roller Gear Cam," Journal of the KSMTE, Vol. 19, No. 6, pp. 739-745, 2010.
6. Kim, S. W., Shin, J. H., Kang, D. W., and Chang, S. W., "A study on relative velocity approach for shape desing to cylindrical cam with rotating roller follower on faced-vertical axes," Proc. of KSPE Conference, pp. 612-615, 2000.