

고 정밀 캠 측정 장치 개발 및 오차분석에 관한 연구

A Study on Development of the High Precision Cam Measurement Apparatus and Analysis of Cam Manufacturing Error

노영화¹, 이춘만^{2,✉}

Young Hwa Roh¹ and Choon Man Lee^{2,✉}

¹ 창원대학교 기계설계공학과 (Department of Mechanical Design, Changwon Univ.)

² 창원대학교 메카트로닉스공학부 (Department of Mechatronics, Changwon Univ.)

✉ Corresponding author: cmlee@changwon.ac.kr, Tel: 055-213-3622

Manuscript received: 2008.12.23 / Accepted: 2009.4.11

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. However, complex engineering tasks are required in a design and manufacturing of cams. And also, the manufacturing of general cam is demanded high costs. For the designing of cam, it must be decided that what kind of motion has to be transmitted to follower before selecting the curve of cam and designing profile of cam. However, even though the exact profile of cam is designed at the progress of design, if it doesn't have precision at the manufacturing progress, it's impossible to get expected result. We will develop cam simulation apparatus for measuring cam curve and get profile data before analyzing an error through comparison with design data of cam.

Key Words: Cam (캠), Manufacturing Error (제조 오차), Displacement Sensor (변위 센서), Acceleration Sensor (가속도 센서),

1. 서론

일반적으로 캠 형상의 측정은 수동 측정 및 3 차원 측정기를 사용하고 있다. 3 차원 측정기의 경우 가격이 고가이며 전문인력이 필요하고 측정시간 또한 많이 소요된다는 단점을 가지고 있다. 이에 가공된 캠의 형상을 측정하기 위한 측정기의 개발 또한 활발히 이루어지고 있다. 일반적으로는 임의의 각도 분할대로 캠을 분할하면서 다이얼 게이지의 지침을 읽는 방법을 사용하는 것이 보통의 캠 형상 수동 측정의 원리이다.¹ 여기서 더 발전하여 강재관²은 선박 엔진용 캠 전용 측정기 개발

을 접촉식 리니어 스케일을 사용하여 자동화된 방법을 사용, 측정하는 방법에 대해 연구를 수행하였다. 그리고, Sherrington³ 등이 표면의 기하학적인 형상을 광학적인 방법을 사용하여 측정하는 방법에 대해 연구를 수행하였고, 권세진⁴ 등은 CAD 모델을 기반으로 하여 가공품에 대한 비접촉 기상 (On-machine) 측정에 관해 CAD 모델과 측정 데이터의 분석을 하는 기법을 연구하였다. 그리고 캠의 형상을 측정하기 위해 먼저 캠의 설계가 이루어져야 하며 그런 다음 연삭 가공을 해야한다. 디스크 캠 기구의 설계에 대한 연구는 매우 다양하게 수행되고 있다. 기구학 관련 서적들⁵⁻¹⁰에서

대표적인 하모닉 곡선, 사이클로이드 곡선, 수정 사인 곡선, 수정 사다리꼴 곡선 및 다양한 다항식 공식들이 정리되어 있고, 변위 곡선들의 도해적 방법 및 해석적인 방법으로의 생성 과정과 이렇게 계산되어진 변위 곡선의 조합을 설명하고 있다.

본 연구에서 사용된 캠 연삭기는 캠의 가공을 위한 NC code 생성 CAD/CAM 시스템과 직접 연동이 되는 최초의 국산 캠 연삭기이다. 캠 형상 설계의 구현과 Biarc curve fitting 법을 이용한 캠 형상 가공경로 생성 프로그램을 이용하여 캠을 설계하였다. 그리고 캠의 회전속도와 1 회 절입량을 이용하여 가공 조건을 바꿔가면서 가공한 후 캠 형상 측정 장치를 이용하여 캠의 형상을 측정하였다. 이렇게 측정된 캠의 형상 데이터에는 오차가 포함되어 있다. 설계 데이터와 측정 데이터를 비교 분석을 통해 오차의 원인을 찾기 위해 연구하였다.

2. 캠 형상 측정 장치의 개발

캠 형상 측정 장치는 크게 구동부와 측정부의 두 부분으로 나눌 수 있으며 캠 형상 측정 장치의 측정원리는 우선 캠 설계 후에 CNC 연삭가공을 수행한 다음, 측정기에 피측정물을 위치시킨다. 이때 측정기는 기어 모터와 10,000pulse/rev 의 로터리 엔코더로 구성된 구동부와 변위 및 가속도센서를 이용한 측정부로 나뉘어 있고 엔코더에서 나오는 신호와 센서에서 나오는 신호를 동기화 및 처리하기 위한 PCB 보드와 함께 구성되어 있다. Fig. 1 은 캠 형상 측정 장치의 전반적인 측정 원리를 나타내고 있다. Fig. 2 는 본 연구에서 설계된 캠 형상 측정 장치의 2D, 3D 모델링을 나타내고 있다.

3 차원 측정기의 경우는 고가이면서 측정을 위해선 전문 인력이 필요하고 캠의 형상만 측정할 수 있지만 본 측정 장치는 평판 캠의 형상을 측정

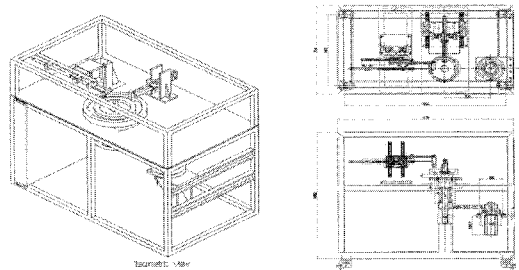


Fig. 2 Drawing of cam shape measurement apparatus

할 수 있으며 변위, 속도, 가속도선도를 측정할 수 있다. 그리고 본 연구에서 가공한 캠은 방직기에서 사용되며 캠 형상 측정 장치에서 실제 방직기에서 사용되는 속도에 가깝게 회전하면서 측정할 수 있게 개발하였다. 변위 및 가속도센서가 함께 장착되어 캠이 60RPM 으로 회전할 때는 변위센서를 이용하여 캠의 형상 및 변위선도를 측정하고 180RPM 으로 회전할 때는 가속도센서를 이용하여 형상 및 가속도선도를 측정하게 된다. 고 RPM 에서 모터에서 발생하는 진동을 줄이기 위해 캠을 장착하는 축에 직접 연결하지 않고 따로 위치시켰다. 그리고 5~6kg 의 캠을 원활히 회전시키기 위해 1:3 의 타이밍 벨트(V형)로 캠을 장착하는 중심축과 모터를 연결하였다. 그리고 고속 회전 후에 캠을 제동하기 위해 자기브레이크를 장착하여 제동할 수 있게 설계하였다. 가공된 캠의 형상 및 가속도를 측정하기 위해 변위센서와 가속도센서는 Fig. 3 과 같이 위치하게 된다. 측정하고자 하는 캠의 저속 회전 시 변위센서가 장착된 종동절을 캠에 접촉시키고 가속도센서가 장착된 종동절은 캠에서 떨어뜨려 놓는다. 종동절의 정밀 이송을 위해 리니어 모션 가이드를 사용하였다. Core 의 위치이동에 비례하여 전기적인 출력으로 센싱(Sensing)이 확실한 GHSA 750-2000 으로 Range 가 $\pm 50\text{mm}$ 이고 Sensitivity 가 14V/mm 인 변위 센서를 사용하였으며 가속도센서는 회전시 충분한 신호를 받을 수 있도록 Meas 4000-002-028 으로 Range 가 $\pm 50\text{G}$ 이며 Sensitivity 는 40mV/g 인 센서를 사용하였다. 캠 형상 측정 장치는 캠의 회전을 바꿔가며 측정이 하도록 BLDC Geared Motor 를 사용하였다. BLDC Geared Motor 는 우수한 속도 안정성과 일정한 토크를 내며 모터의 Feedback 신호와 설정속도를 비교하여 부하의 변동에도 저속부터 고속까지 안정된 운전이 가능하다. 그리고 BLDC Geared Motor 는 외부제어기능이 뛰어나서 운전, 정지, 회

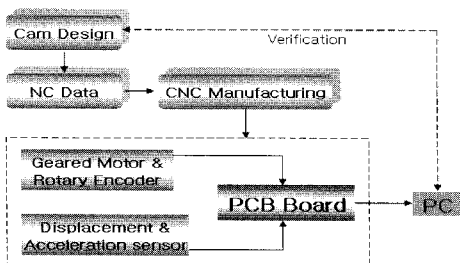


Fig. 1 Measurement principles of a cam shape measurement apparatus

전방향 변경 및 순시 정지가 외부신호를 이용하여 제어 가능하다. 정기에서 사용된 변위, 속도, 가속도 센서는 측정기의 측정범위를 고려하여 적정 사양의 상용센서를 선정하였으며, 본 연구에서 캠은 형상 데이터를 확보한 상태에서 오차분석을 실시함으로써 연삭기의 가공오차를 고려하였으며 또한 3 차원 측정을 실시하여 캠 측정장치 자체의 측정오차 대한 신뢰성을 확보하였다. Fig. 4 는 본 연구에서 개발한 캠 형상 측정 장치의 모습이다.

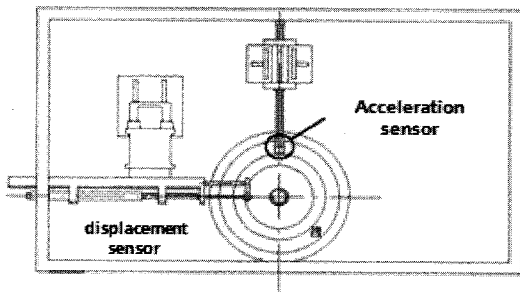


Fig. 3 Position of displacement and acceleration sensor

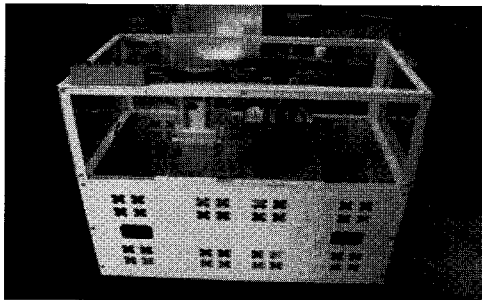


Fig. 4 Cam shape measurement apparatus

3. 캠 연삭가공 및 측정

3.1 캠 설계

성공적인 캠 설계를 위한 기본 조건으로 종동절의 변위, 속도 및 가속도는 전 구간에서 연속적이어야 한다. 그러나 주어진 변위선도에서는 변곡 지점에서의 속도를 정의할 수 없기 때문에 대표적인 변위 곡선 수식을 이용하여 수정 변위선도를 만들어야 한다. 본 연구에서는 사이클로이드 곡선(Cycloidal curve)을 이용하였다. 변위선도에서 상승 운동과 하강 운동을 각각 사이클로이드 상승 운동, 사이클로이드 하강 운동으로 다시 정의를 하고 변위선도를 나타내어 보면 Fig. 5 와 같다.

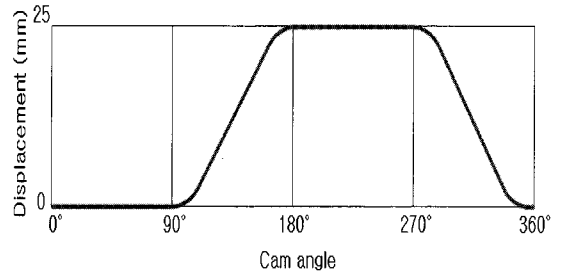


Fig. 5 The modified cam curve diagram

Table 1 Displacement condition for the Palanquin cam with translating roller follower

Section	Cam angle(°)	Displacement(mm)	Curve type
1	0 ~ 30	dwell	
2	30 ~ 150	12mm rise	Cycloidal
3	150 ~ 350	12mm fall	Cycloidal
4	350 ~ 360	dwell	

Table 2 Displacement condition for the Blanket cam with translating roller follower

Section	Cam angle(°)	Displacement(mm)	Curve type
1	0 ~ 200	dwell	
2	200 ~ 270	24mm rise	Cycloidal
3	270 ~ 335	24mm fall	Cycloidal
4	335 ~ 360	dwell	

본 연구에서는 이렇게 정의된 변위선도를 이용하여 방적기에 들어가는 Palanquin 캠과 Blanket 캠을 설계하고 연삭가공을 수행하였다. 이 캠들은 병진 운동용 롤러 종동절을 가지는 캠으로써 설계를 위한 조건은 다음 Table 1 과 Table 2 와 같이 정의하였다.

3.2 캠 연삭 실험

본 연구에서 사용된 캠 연삭기는 임상현의 연구에 의해 H 사에서 개발하였으며 캠의 가공을 위한 NC code 생성 CAD/CAM 시스템과 직접 연동이

되는 최초의 국산 캠 연삭기이다.¹⁴ 캠 연삭기는 CNC 컨트롤러를 적용시켜 연삭숫돌을 전후로 이송시켜 캠 연삭을 수행할 수 있는 캠 프로파일 CNC 연삭기이다. 설계된 캠 형상 정보를 이용하여 캠 시스템에서 NC code 를 생성하였다. 이렇게 생성된 NC code 는 일정 표면거칠기를 얻기 위한 캠 최대회전속도 계산 알고리즘에 의해 얻어지는데 본 연구에서는 캠을 등속으로 회전하기 위해 NC code 를 수정하였다. Table 3 은 Palanquin 캠의 연삭 조건이며 다음과 같이 9 번의 연삭을 실시하였다.

Table 3 Grinding conditions of Palanquin cam, Blanket cam

Rotational speed of cam [mm/min]	Underformed chip thickness of once [mm]	
	Palanquin cam	Blanket cam
100	0.01	0.1
	0.02	0.3
	0.03	0.5
150	0.01	0.1
	0.02	0.3
	0.03	0.5
200	0.01	0.1
	0.02	0.3
	0.03	0.5

위와 같은 가공 조건을 제시한 이유는 본 연구에서 사용된 캠이 방적기에 사용되는 캠으로써 정밀급을 요구한다. 그래서 정밀급으로 가공을 하기 위해 Table 3 과 같이 가공을 하였으며 의외로 초정밀급에 가까운 연삭 결과를 나타내어 1 회 절입량을 크게 해서 가공을 실시하였다. Blanket 캠의 연삭 조건으로 9 번의 연삭을 실시하였으며 1 회 가공 후의 과정은 Palanquin 캠과 같다.

3.3 측정 결과

시제품으로 개발된 고 정밀 캠 프로파일 CNC 연삭기를 이용하여 캠 연삭가공을 수행하였으며 본 연구 과정에서 직접 개발한 캠 형상 측정 장치를 통하여 캠의 형상을 측정하였다. Fig. 7 과 Fig. 8 은 임상현¹⁴ 이 개발한 CAD/CAM 시스템에서 얻은 NC code 를 이용하여 Table 3 에서 주어진 가공 조건을 이용하여 캠 연삭기에서 가공한 Palanquin

캠과 Blanket 캠을 나타낸다. 이렇게 가공되어진 캠을 본 연구에서 개발한 캠 형상 측정 장치를 이용하여 캠의 형상을 측정하였다. Fig. 6 은 연삭가공시 캠의 회전속도를 100mm/min, 1 회 절입량을 0.03mm 로 했을 때의 Palanquin 캠의 측정 결과 화면이고, Fig. 7 은 캠의 회전속도를 100mm/min, 1 회 절입량을 0.1mm 로 했을 때의 Blanket 캠의 측정 결과 화면이다.

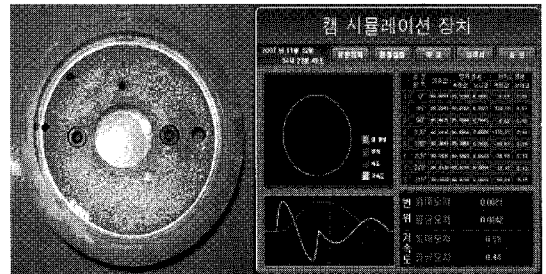


Fig. 6 Result of grinding machining for the Palanquin cam

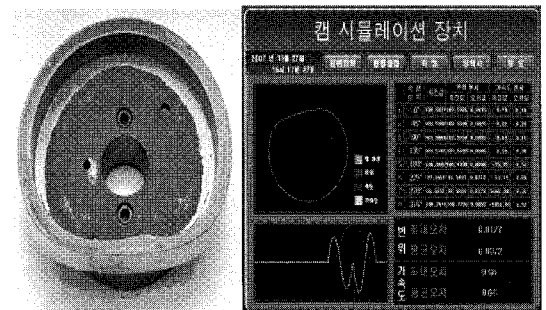


Fig. 7 Result of grinding machining for the Blanket cam

주어진 캠을 설계하기 위한 변위선도 조건으로 생성된 설계 데이터와 NC code 에 의해 가공된 캠의 측정 데이터와의 곡선의 반경의 차이를 계산하여 가장 차이가 큰 곳의 반경차이를 최대 오차로 나타냈다. 측정 결과를 통해 설계 데이터와 측정 데이터를 비교해 보면 Palanquin 캠의 경우 변위 오차율이 0.0047%이고, Blanket 캠의 경우는 변위 오차율이 0.006%로 나왔다. 그리고 가속도 오차율에서는 Palanquin 캠은 1.7%, Blanket 캠은 3.1%로 나왔으며, 이것은 캠 연삭기에서 캠의 가공이 잘 이루어졌지만 오차를 포함하고 있다는 근거가 됨을 판단할 수 있다.

4. 캠 오차 분석

측정 데이터의 오차에는 캠 연삭기에서의 가공 오차, 캠 형상 측정 장치에서의 형상 측정오차, 설계 데이터에서 NC code 생성 시 Biarc 알고리즘에 의한 2 차원 보간 과정에서의 오차가 발생할 것이다. 본 연구에서는 Biarc 알고리즘에 의한 2 차원 보간 과정에서 발생한 오차와 캠 가공 시 발생한 오차를 분석하고자 한다.¹⁵

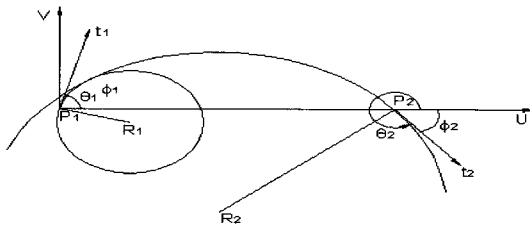


Fig. 8 Non-inflection case for the biarc curve fitting¹⁷

Fig. 8 과 같이 캠에서는 두 점의 연결이 곡선으로 이루어져 있으며 두 점을 연결하기 위해 반지름이 각각 P1, P2 인 두 개의 원호를 끼워 넣어 보간하게 되는데, 이 때 설계 데이터와 차이가 생기게 되고 이것이 Biarc 알고리즘에 의해 발생한 오차가 된다. Table 4 와 Table 5 는 Palanquin 캠과 Blanket 캠의 가공 조건에 따른 가공된 캠의 측정 최대 오차와 캠 설계 데이터의 Biarc 알고리즘에 의한 2 차원 보간 과정에서 발생한 오차, 그리고 캠의 가공오차를 나타낸다. Table 4 와 Table 5 에서 가공된 캠의 형상을 측정하였을 때 최대 오차가 발생하는 지점에 대해 Biarc 알고리즘에 의해 발생한 오차를 나타냈다. 최대 변위오차와 가속도오차는 가공된 캠을 캠 형상 측정 장치를 통해 측정한 측정 데이터와 설계 데이터를 비교해서 그 차이가 가장 큰 지점의 값을 나타낸다. 여기서 변위, 가속도오차는 (+), (-) 값으로 나타나지만 기준값에 대한 차이기 때문에 절대값으로 표시하였다. 그리고 가공된 캠의 측정 최대 오차에서 Biarc 알고리즘에 의해 발생한 오차를 빼면 캠 연삭기의 가공 오차가 된다. Table 2 와 Table 3 에서 Vcam 은 캠 속도, Tf 는 1 회 절입량, Ebc 는 Biarc curve 오차, Em 은 최대 변위오차, Ep 는 가공오차, Ea 는 최대 가속도오차로 표시하였다.

Fig. 9 와 Fig. 10 는 Palanquin 캠과 Blanket 캠의 가공 조건 변화에 따른 가공 오차를 그래프로 나타내었다. 그래프를 통하여 Palanquin 캠과 Blanket 캠의 가공 조건에 따른 변위오차의 변화를 알 수

있다.

Table 4 Error by grinding conditions for Palanquin cam

V _{cam} [mm/min]	T _f [mm]	E _{bc} [μm]	E _m [μm]	E _p [μm]	E _a [rad/s ²]
100	0.01	1.3 329~330°	7.2	5.9	0.48
	0.02	1.1 331~332°	8.0	6.9	0.51
	0.03	1.3 329~330°	8.7	7.4	0.53
150	0.01	1.2 330~331°	7.7	6.5	0.50
	0.02	1.0 328~329°	8.5	7.5	0.53
	0.03	1.1 331~332°	9.2	8.1	0.59
200	0.01	0.9 327~328°	8.3	7.4	0.62
	0.02	1.2 330~331°	9.0	7.8	0.66
	0.03	1.0 328~329°	9.8	8.8	0.74

Table 5 Error by grinding conditions for Blanket cam

V _{cam} [mm/min]	T _f [mm]	E _{bc} [μm]	E _m [μm]	E _p [μm]	E _a [rad/s ²]
100	0.1	0.9 290~291°	12.7	11.8	0.96
	0.3	1.1 293~294°	15.5	14.4	1.01
	0.5	1.0 291~292°	18.8	17.8	1.20
150	0.1	0.8 289~290°	13.1	12.3	0.99
	0.3	1.0 291~292°	17.3	16.3	1.25
	0.5	0.9 290~291°	22.6	21.7	1.43
200	0.1	1.2 292~293°	14.0	12.8	1.17
	0.3	1.1 293~294°	19.7	18.6	1.39
	0.5	0.8 289~290°	31.9	31.1	1.72

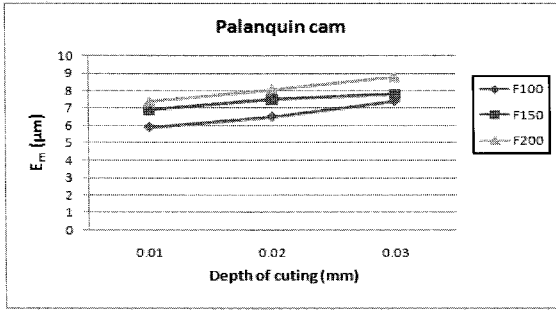


Fig. 9 Manufacturing error by grinding conditions of Palanquin cam

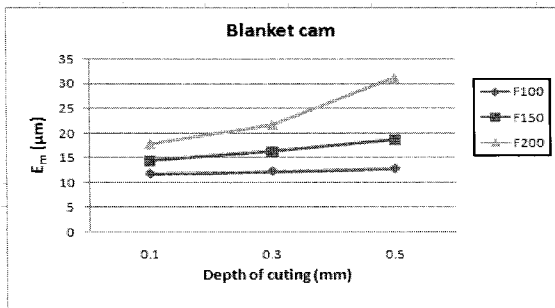


Fig. 10 Manufacturing error by grinding conditions of Blanket cam

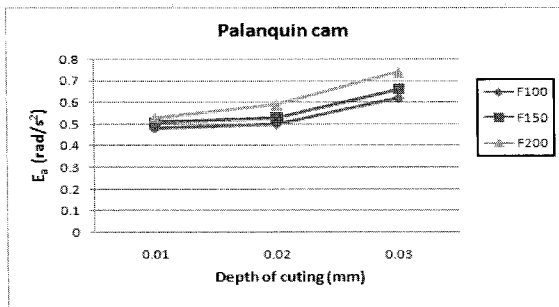


Fig. 11 Maximum acceleration error of Palanquin cam

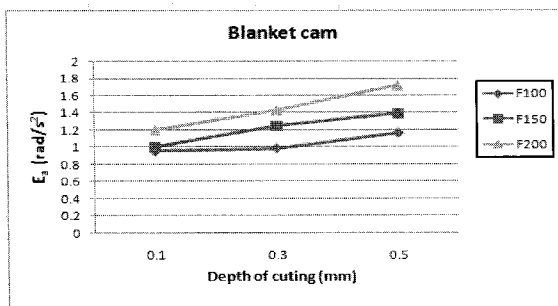


Fig. 12 Maximum acceleration error of Blanket cam

Blanket 캠에서 캠의 회전속도를 200mm/min, 1 회 절입량을 0.5mm 로 했을 경우에 큰 오차가 생겼음을 확인할 수 있다. 그리고 Palanquin 캠은 가공오차가 직선으로 증가하였으며 Blanket 캠의 경우는 포물선으로 가공오차가 증가하였다. 1 회 절입량이 커지면 가공오차의 증가에 영향을 미치며 캠의 회전속도가 커지면 가공오차가 급격히 증가함을 알 수 있다. Fig. 11 과 Fig. 12 는 Palanquin 캠과 Blanket 캠의 가공 조건 변화에 따른 캠의 측정 최대 가속도오차를 그래프로 나타내었다. 가속도 오차 그래프에서도 캠 가공 시 캠의 회전속도 및 1 회 절입량이 증가하면 오차도 커진다는 것을 알 수 있다. 그리고 Fig. 9 에서 Fig. 12 에서 보듯이 캠의 가공 조건인 캠의 회전속도와 1 회 절입량에서 오차는 캠의 회전속도의 변화에 더 큰 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. Fig. 13 과 Fig. 14 는 Palanquin 캠과 Blanket 캠이 가공된 후 형상 측정에서 최대 변위오차가 발생한 지점에 대해 5° 단위로 잘라서 나타내었다. 가공 시 캠의 회전 속도에 따른 1 회 절입량이 0.01mm 와 0.1mm 일 때의

그래프만 표시하였다. 그래프를 보면 최대 변위 오차 지점을 기준으로 산모양의 그래프가 그려진다. 최대 변위오차가 발생한 지점이 캠의 반지름 R 의 편차가 큰 지점이였다. 이것은 곡선이 큰 부분에서 Biarc 알고리즘에 의한 보간 과정에서 오차가 커진다는 것을 알 수 있다. 그리고 가공 시에도 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

Fig. 15 와 Fig. 16 은 Palanquin 캠과 Blanket 캠의 가속도센서를 이용한 가속도 측정값에서 최대 가속도오차가 발생한 지점에 대해 5° 단위로 잘라서 나타내보았다. 그래프를 보면 변위오차의 그래프와 마찬가지로 최대 가속도오차를 기준으로 산모양의 그래프를 그린다. 즉, 변위오차에 따라 가속도오차에 영향을 준다는 것을 알 수 있다.

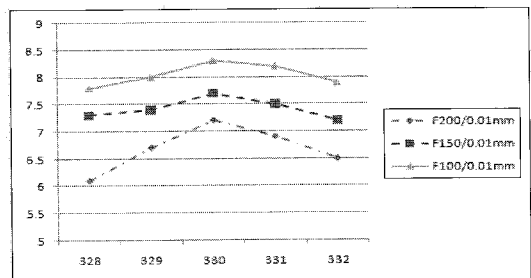


Fig. 13 Displacement error for maximum error point of Palanquin cam

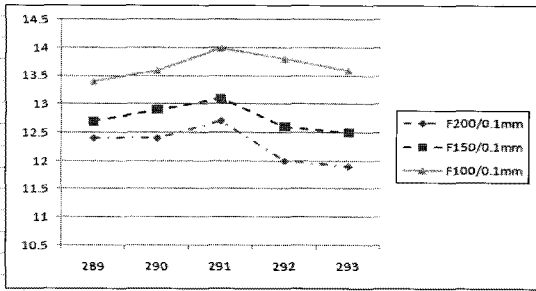


Fig. 14 Displacement error for maximum error point of Blanket cam

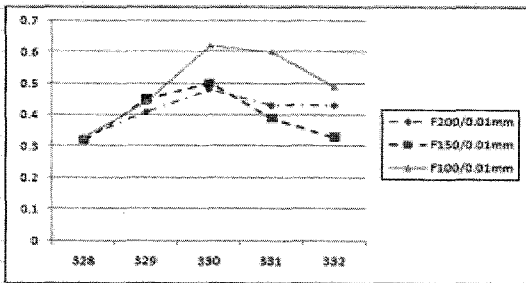


Fig. 15 Acceleration error for maximum error point of Palanquin cam

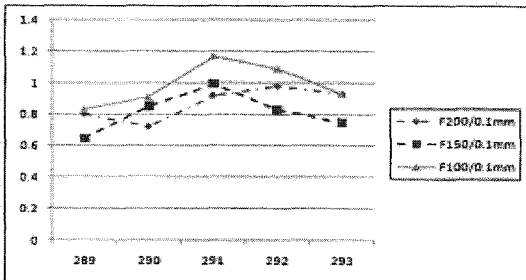


Fig. 16 Acceleration error for maximum error point of Blanket cam

5. 결론

본 연구에서는 가공된 평판 캠의 형상을 측정하기 위해 캠 형상 측정 장치를 개발하였고, 각 캠의 설계 데이터와 장치를 통해 측정된 측정 데이터의 비교를 통해 발생오차에 대한 분석을 실시하였다. 본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 제작된 캠 형상 측정 장치의 시제품으로 캠 형상을 측정 해 본 결과, 수동 측정기나 3 차원 측정기에 비해 짧은 시간에 측정이 가능하며 측정

결과를 통해 설계 데이터와 측정 데이터의 전 구간을 비교해 보면 Palanquin 캠의 경우 변위 오차율이 0.0047%이고, Blanket 캠의 경우는 변위 오차율이 0.006%로 나왔다. 그리고 가속도 오차율에서는 Palanquin 캠은 1.7%, Blanket 캠은 3.1%로 나왔으며, 이것은 캠 연삭기에서 캠의 가공이 잘 이루어졌다는 근거가 됨을 판단할 수 있다.

2) 캠 형상 측정 장치를 통해 캠 형상의 각 구간에 대한 변위 및 가속도 값을 얻었고 측정 데이터의 분석을 통해 각 캠의 오차를 분석하였다. Biarc 알고리즘에 의한 2 차원 보간 과정에서 발생한 오차와 캠 가공 시 발생한 가공오차를 제시하였다.

3) 본 연구를 통해 캠의 반지름 R 의 편차가 큰 지점에서 최대 변위오차가 나타났으며, 변위오차의 변화에 따라 가속도오차에 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

후 기

본 연구는 지식경제부 지방기술 혁신 사업 [RT104-01-03]의 지원으로 수행되었음.

참고문헌

1. Lee, J. G., "Automation of easy knowing measurement," GIJUN, pp. 14-20, 1997.
2. Kang, J. G. and Lee, K. H., "Data Acquisition and Analysis of a Measuring Machine for Marine Engine's Cams," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 19, No. 11, pp. 160-166, 2002.
3. Sherrington, I. and Smith, E. H., "Modern Measurement Techniques in Surface Metrology : Part II : Optical Instruments," Wear, Vol. 125, No. 3, pp. 289-308, 1988.
4. Kwon, S. J., "Non-contacting OMM (On Machine Measurement) based on CAD Model," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 20, No. 11, pp. 134-141, 2003.
5. Shigley, J. E. and Uicker, J. J., "Theory of Machines and Mechanisms," McGraw-Hill, pp. 226-241, 1980.
6. Martin, G. H., "Kinematics and Dynamics of Machines," McGraw-Hill, pp. 353-369, 1982.
7. Norton, R. L., "Design of Machinery," McGraw-Hill,

- pp. 353-369, 1992.
8. Erdman, A. G. and Sandor, G. N., "Mechanism Design : Analysis and Synthesis," Prentice-Hall International, Inc., pp. 158-164 1991.
 9. Willson, C. E. and Salder, G. N., "Kinematics and Dynamics of Machinery," HarperCollins College Publishers, pp. 59-61, 1993.
 10. Norton, R. L., "CAM DESIGN and Manufacturing Handbook," Industrial Press Inc., pp. 212-217, 2002.
 11. Neklutin, C. N., "Trig-Type Cam Profile," Machine Design, Vol. 31, No. 21, pp. 175-187. 1959.
 12. Schmidt, E., "Continuous Cam Curves," Machine Design, Vol. 31. No. 1, pp. 127-132. 1960.
 13. Wiederrich, J. L. and Roth, B., "Dynamics Synthesis of Cams using Finite Trigonometric Series," ASME Journal of Engineering for Industry Series B, Vol. 97, No. 1, pp. 287-293, 1975.
 14. Shin, J. H., Lee, C. M. and Kim, J. S., "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.
 15. Kang, D. W., "A Study on automation of complex organization of multi axial control disk cam and cylindrical cam research," A Master's thesis of Mechanical Design & Manufacturing Engineering on Changwon National University, 2000.
 16. Lim, S. H., "A Study on the Development of a High Precision Cam Profile Grinding Machine and Operating CAD/CAM System," A Doctoral Dissertation of Mechanical Design & Manufacturing Engineering on Changwon National University, 2007.
 17. Bolton, K. M., "Biacr curves," Computer-Aided Design, Vol. 7, No. 2, pp. 89-92, 1975.
 18. Yoon, S. D., "Research reports of a Study on the development of a high precision cam profile grinding machine," Ministry of Knowledge Economy, pp. 63-81, 2007