

고 정밀 캠 프로파일 CNC 연삭기의 구조설계 및 평가에 관한 연구

임상현*, 신상훈*, 이춘만#

A Study on Structural Design and Evaluation of the High Precision Cam Profile CNC Grinding Machine

Sang Heon Lim*, Sang Hun Shin* and Choon Man Lee#

ABSTRACT

A cam profile CNC grinding machine is developed for manufacture of high precision contoured cams. The developed machine is composed of the high precision spindle using ball bearings, the high stiffness box layer type bed and the three axis CNC controller with the high resolution AC servo motor. In this paper, structural and modal analysis for the developed machine is carried out to check the design criteria of the machine. The analysis is carried out by FEM simulation using the commercial software, CATIA V5. The machine is modeled by placing proper shell and solid finite elements. And also, this paper presents the measurement system and experimental investigation on the modal analysis of a grinding machine. The weak part of the machine is found by the experimental evaluation. The results provide structure modification data for good dynamic behaviors. And safety of the machine was confirmed by the modal analysis of modified machine design. Finally, the cam profile grinding machine was successfully developed.

Key Words : Grinding machine (연삭기), FEM (Finite elements method : 유한요소법), Experimental evaluation (실험적 평가)

1. 서론

공작기계는 기계를 만드는 기계로써 국가산업 발전의 기초가 되는 동시에 산업발전을 주도하는 핵심 첨단 기간설비이다. 공작기계를 생산하기 위해서는 여러 가지 기술, 예를 들어 설계기술, 가공 기술, 제어기술 및 생산된 공작기계의 평가기술 등

과 같은 고도의 전문기술이 복합적으로 요구된다. 이러한 공작기계중 연삭기는 제품의 마지막 가공 공정을 담당하는 기계로, 제품의 품질에 많은 영향을 미친다.

산업기술의 발달에 기인하여 각종 첨단 제품들이 개발되면서 기계 부품의 정밀가공에 대한 수요가 증가하고 있다. 이러한 기계 가공품의 고정밀화

접수일: 2005년 8월 30일; 게재승인일: 2006년 9월 14일

* 창원대학교 기계설계공학과 대학원

교신저자 : 창원대학교 기계설계공학과

E-mail cmlee@changwon.ac.kr Tel. (055) 279-7572

추세에 따라 연삭 가공 기술도 빠르게 발전하고 있다. 절삭 가공 기계들이 고속화, 고정밀화 되어가면서 과거의 연삭 가공을 대체하는 경우도 많이 발생하고 있으나 다른 한편으로는 제품의 고정밀화 요구에 따라 연삭 가공의 수요가 늘어나고 있으며 높은 생산성과 표면 거칠기가 서브 마이크론(10^{-7} m) 단위의 연삭 표면을 동시에 요구하고 있다.

지금까지의 연구를 살펴보면 Hahn¹은 공작물의 연삭마모에 의해 chatter가 발생한다는 가정아래 처음으로 연삭기 진동을 해석하였고, Kim² 등이 초정밀 3축 CNC 연삭기에 대하여 설계에 대하여 연구하였으며 시가야 정기 제작소의 Yamamoto³는 초고속·고정밀도 사양기와 비 진원 가공의 영역으로 진입하는 원통연삭기의 실제에 대하여 기술하는 등 연삭기 설계에 관하여 여러 가지 연구들이 수행되었다. 또한 Staszewski⁴와 Lin⁶ 등은 웨이브렛(wavelet) 변환을 이용한 잡음이 혼재된 신호로부터 기계의 평가 정보를 추출하여 기계의 성능을 높이는 연구를 수행 해왔다. 이러한 연구들을 토대로 하여 본 연구에서는 캠의 내·외경 프로파일을 연삭할 수 있는 캠 프로파일 CNC 연삭기의 시제품 개발과 아울러 진동측정을 수행하여 해석 결과와 비교하였으며, 측정결과 연삭기의 문제점을 파악하여 설계 변경을 통해 강성을 높이는 것을 목표로 하였다.

2. 구조설계 및 기계요소

고정밀의 캠 프로파일 연삭가공을 실현하기 위해서는 연삭기가 충분한 강성을 유지하여야 하며,

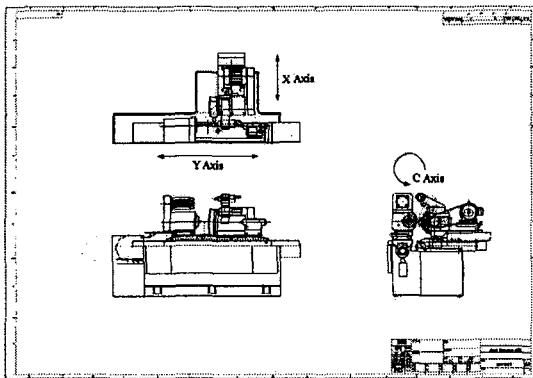
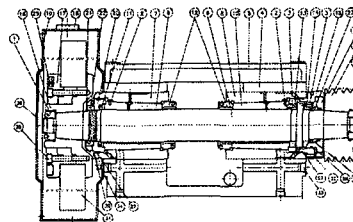


Fig. 1 Drawings of the developed cam profile CNC grinding machine

정밀한 위치결정이 가능해야 한다. 따라서 연삭기로서의 기능을 갖추기 위해서는 주축의 고속 회전 중에도 진동 특성이 우수하며 높은 회전 정밀도를 유지하는 스핀들과 고 강성 및 고 정도의 선행 조건을 만족하는 이송기구, 등이 구비되어야 한다.⁴⁻¹⁰ 본 연구에서는 이상과 같은 조건을 만족하는 기계 요소를 선정하고 이에 따른 구조설계를 수행하였다. Fig. 1은 설계된 연삭기의 조립도를 나타내고 있다. 본 연삭기는 3축의 움직임으로 캠의 내·외경을 가공할 수 있게 구성되어 있다. 즉 X축과 Z축의 이송 그리고 C축의 회전운동의 동기를 통하여 캠 형상을 추종하는 구조이다. 연삭이 가능한 캠의 최대 크기는 최대 지름 450 mm 이고 그 무게는 150 kg 까지 견딜 수 있게 설계를 실시하였다. 또한 본 연삭기는 주축 회전 구동을 위해 유정압 베어링을 적용한 스핀들과 연삭기 헤드 부분의 이송을 위해 직선운동 안내기구(linear motion guide)와 볼 스크류(ball screw), 위치제어용 서보 모터 및 CNC 3축 컨트롤러 등으로 구성되었다.

2.1 스핀들

회전축 구동을 위하여 사용되는 정압 베어링은 공기 또는 기름을 매체로 하여 강제적으로 안정된 유체 윤활 막을 형성시켜주기 때문에 회전정밀도가 우수하여 고 정밀의 연삭기 스핀들 부품으로 사용하기에 적합하다. 정압 베어링에는 유정압 베어링과 공기정압 베어링이 있다. 일반적으로 공기정압 베어링이 유정압 베어링에 비해 고속회전 영역에서 높은 회전 정밀도를 가지고 회전으로 인한 발열량이 적지만, 본 머신은 캠을 가공하기 위한 것으로



번호	명칭	수량	단위	소재	비고
1	1332-45272	1	세트	SKF	1
2	1332-45271	1	세트	SKF	1
3	1332-45270	1	세트	SKF	1
4	1332-45269	1	세트	SKF	1
5	1332-45268	1	세트	SKF	1
6	1332-45267	1	세트	SKF	1
7	1332-45266	1	세트	SKF	1
8	1332-45265	1	세트	SKF	1
9	1332-45264	1	세트	SKF	1
10	1332-45263	1	세트	SKF	1
11	1332-45262	1	세트	SKF	1
12	1332-45261	1	세트	SKF	1
13	1332-45260	1	세트	SKF	1
14	1332-45259	1	세트	SKF	1
15	1332-45258	1	세트	SKF	1
16	1332-45257	1	세트	SKF	1
17	1332-45256	1	세트	SKF	1
18	1332-45255	1	세트	SKF	1
19	1332-45254	1	세트	SKF	1
20	1332-45253	1	세트	SKF	1
21	1332-45252	1	세트	SKF	1
22	1332-45251	1	세트	SKF	1
23	1332-45250	1	세트	SKF	1
24	1332-45249	1	세트	SKF	1
25	1332-45248	1	세트	SKF	1
26	1332-45247	1	세트	SKF	1
27	1332-45246	1	세트	SKF	1
28	1332-45245	1	세트	SKF	1
29	1332-45244	1	세트	SKF	1
30	1332-45243	1	세트	SKF	1
31	1332-45242	1	세트	SKF	1
32	1332-45241	1	세트	SKF	1
33	1332-45240	1	세트	SKF	1
34	1332-45239	1	세트	SKF	1
35	1332-45238	1	세트	SKF	1
36	1332-45237	1	세트	SKF	1
37	1332-45236	1	세트	SKF	1
38	1332-45235	1	세트	SKF	1
39	1332-45234	1	세트	SKF	1
40	1332-45233	1	세트	SKF	1
41	1332-45232	1	세트	SKF	1
42	1332-45231	1	세트	SKF	1
43	1332-45230	1	세트	SKF	1
44	1332-45229	1	세트	SKF	1
45	1332-45228	1	세트	SKF	1
46	1332-45227	1	세트	SKF	1
47	1332-45226	1	세트	SKF	1
48	1332-45225	1	세트	SKF	1
49	1332-45224	1	세트	SKF	1
50	1332-45223	1	세트	SKF	1
51	1332-45222	1	세트	SKF	1
52	1332-45221	1	세트	SKF	1
53	1332-45220	1	세트	SKF	1
54	1332-45219	1	세트	SKF	1
55	1332-45218	1	세트	SKF	1
56	1332-45217	1	세트	SKF	1
57	1332-45216	1	세트	SKF	1
58	1332-45215	1	세트	SKF	1
59	1332-45214	1	세트	SKF	1
60	1332-45213	1	세트	SKF	1
61	1332-45212	1	세트	SKF	1
62	1332-45211	1	세트	SKF	1
63	1332-45210	1	세트	SKF	1
64	1332-45209	1	세트	SKF	1
65	1332-45208	1	세트	SKF	1
66	1332-45207	1	세트	SKF	1
67	1332-45206	1	세트	SKF	1
68	1332-45205	1	세트	SKF	1
69	1332-45204	1	세트	SKF	1
70	1332-45203	1	세트	SKF	1
71	1332-45202	1	세트	SKF	1
72	1332-45201	1	세트	SKF	1
73	1332-45200	1	세트	SKF	1
74	1332-45199	1	세트	SKF	1
75	1332-45198	1	세트	SKF	1
76	1332-45197	1	세트	SKF	1
77	1332-45196	1	세트	SKF	1
78	1332-45195	1	세트	SKF	1

Fig. 2 Drawing of main spindle for the cam profile CNC grinding machine

가공 중 스피indle에 가해지는 하중이 계속 변하게 되므로 이러한 하중 조건에서 신뢰성이 보장되는 유정압 베어링 방식을 채택하여 스피indle을 설계하였고 그것을 Fig. 2에 나타내었다. 스피indle을 구동하기 위해 사용되는 모터는 2 kW급의 출력을 가진다. 또한 이 스피indle의 유막 파괴 하중은 반경 방향으로 600 N이고 축 방향으로 450 N이다. 일반적인 연삭가공에 있어 대상 소재에 따라 차이가 있으나 가공 중의 적정 연삭력이 200 N에 이하에 국한되는 것으로 알려져 있어,⁷ 본 연삭기에 적용된 스피indle의 부하용량은 타당하다 볼 수 있다.

2.2 직선운동 안내기구

본 연삭기는 3축 구동으로 연삭기 헤드의 이송(X축), 테이블(Z축) 및 피삭재 구동용 척(C축)의 3축에 대한 안내기구가 필요하다. Fig. 3에 X축의 이송을 위한 헤드 유닛 기저의 도면을 나타내고 있다. 일반적으로, 고정밀 공작기계의 경우에는 마찰이 적고 진동특성이 우수한 유정압 또는 공기정압 안내기구가 채택되지만 이와 같은 기계요소의 선택은 공작기계의 원가를 상승시키고 주변장치의 복잡성으로 인해 유지보수가 어려운 단점을 가진다. 따라서 본 머신은 부하조건에 따라 사용규격이 표준화 되어 있어서 가격이 저렴하고 사용이 쉬우며, 구조가 간단하고 유지보수가 용이한 서보 모터와 볼 스크류를 이용한 직선운동 안내 기구를 채택하였다. 이러한 서보모터와 볼 스크류를 사용하면 저속이송의 경우에도 스틱슬립(stick-slip)이 없는 원활한 이송이 가능하다. 볼 스크류의 직경은 40 mm, 스크류의 강성은 1,580 N/μm이다.⁸ 또한 C축의 경우에

는 서보모터와 감속기를 이용하여 직접적으로 구동을 하는 방식을 채택하였고 10,000 pulse/rev의 분해능을 갖는 펄스코더가 장착되어 있으며, X축과의 동기화를 이용하여 캠 프로파일을 구현하도록 설계되었다.

2.3 베드

베드는 공작기계의 기저를 이루는 동시에 각 파트의 지지를 담당하기 위해 굽힘 및 비틀림에 대한 강성을 모두 고려하여 설계되어야 한다. 또한 제작의 용이성과 진동에 대한 감쇠성능이 고려되어야 하는 관계로 본 머신은 주철을 이용하여 베드를 제작하였다. Table 1은 본 머신에 적용한 주철의 물성치를 나타내고 있다. 베드의 단면형상은 앞에 언급한 바와 같이 굽힘 및 비틀림 강성을 모두 증가시킬 수 있는 사각 Box형으로 설계하였다.¹¹

Table 1 Properties of cast iron

Natural frequency(f)	600 Hz
Damping factor	0.04~0.05 %
Modulus (E)	97 GPa
Specific gravity (ρ_g)	71.97 kN/m ³
Specific stiffness (E/ ρ_g)	1.35 × 10 ⁶ m
Specific heat	0.43 kJ/kg · K
Thermal expansion coefficient (α)	12 μm/m/°C
Thermal conductivity	75 W/m · K

3. 연삭기 구조 해석

설계된 연삭기의 구조해석을 위해 3차원 유한요소 해석을 실시하였다. 일반적으로 여러 개의 구조물이 결합되어 구성된 복합 구조물에 대한 해석은 실제 결과와 비교적 큰 오차를 나타내기 때문에 해석에 대한 신뢰도가 저하된다. 이와 같은 이유는 전체 구조물의 연결부위의 모델링에 실제적으로 적용하는 부하 상태를 충분히 반영하지 못하는 단순화된 요소를 사용하는 것에 기인하기 때문이다.² 따라서 각 부분을 최대한 실물에 근접하게 모델링하고 연결 부위에 대한 실제 부하조건에 가까운 모델링을 사용할 때에 공작기계와 같은 복합 구조물에 대해서도 신뢰성 있는 유한요소해석 결과를 얻을 수 있다고 판단할 수 있다. 본 연구에서 해석을 위해 사용한 소프트웨어는 CATIA V5이며, 해석결과

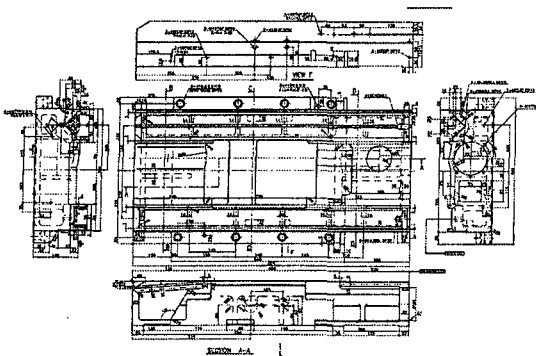


Fig. 3 Drawing of head unit base for the cam profile CNC grinding machine

는 제작된 연삭기에 하중을 가하여 처짐량을 구한 후 비교, 평가를 실시하였다.

3.1 구조 해석

전체 시스템을 모델링하고 각각의 연결부위에 대한 구속조건을 CATIA에 포함되어 있는 가상파트(virtual part)를 이용하여 정의하였다. 이 때 적용한 직선운동 안내기구의 물성치 값은 베드와 동일한 재료의 주철을 가공하여 직선운동 안내기구를 구성하였으므로 97 GPa이다. 이 값을 가상파트에 정의한 후 그 정적 강성에 대한 해석을 수행하였다. Fig. 4는 전체 시스템을 3차원으로 모델링 하고, 각각의 구속조건을 부여하여 최종적으로 조립된 모습을 나타낸 것이다. 그림에서 보는바와 같이 연삭기 헤드 부분, 캠 척, 슬라이딩 테이블 및 베드의 4개 볼륨으로 구분하였고 조립된 상태에서 전체의 모델을 총 32533개의 절점과 35254개의 요소로 나누고

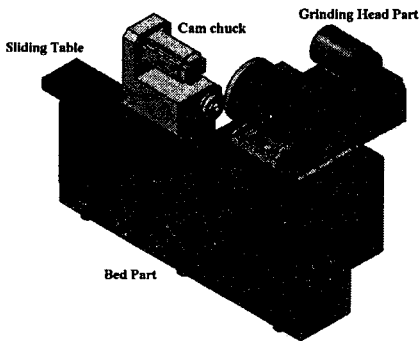


Fig. 4 Modeling of the developed grinding machine

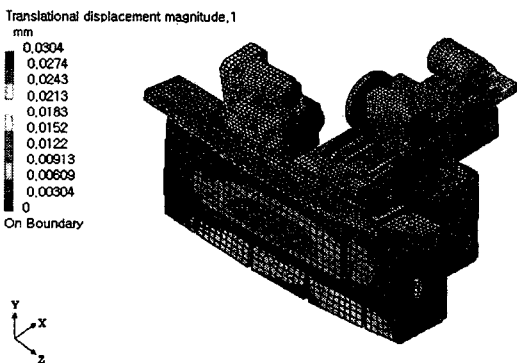


Fig. 5 Static displacement of the machine

총 질량은 3331.4 kg으로 모델링 하였다. 또한 본 연삭기에 최대 하중이 걸리는 경우를 가정하여 150 kg의 질량 요소를 척에 부가하여 해석을 실시하였다. 그 결과를 Fig. 5와 Fig. 6에 그림으로 나타내었고 캠 척에 질량 요소가 부가되는 관계로 캠 척 부위에서 최대 응력이 나타남을 Fig. 6을 통해 알 수 있다. 또한 안전율을 검토한 결과는 Table 2에 정리하여 나타내고 있다. Fig. 5로부터 전체 구조 해석에서 최대 변위가 0.0304 mm가 나타남을 알 수 있다. 또한 시제품으로 실제 제작된 캠 프로파일 연삭기에서 하중이 가해지는 경우 정적 처짐량을 측정하여 본 결과 0.0319 mm를 얻을 수 있는데 이는 해석결과와 비교하여 볼 때, 약 5%의 오차를 가진다는 것을 나타내어 주고 있다. 이런 결과를 통해 연삭기 구조 설계 부분의 타당성을 검증할 수 있다.

Table 2 Results of static analysis for the machine

Max. Axis length [mm]	Maximum Displacement [mm]	Max. Stress [MPa]	Safety factor
2020	0.0304	30.4	4.56

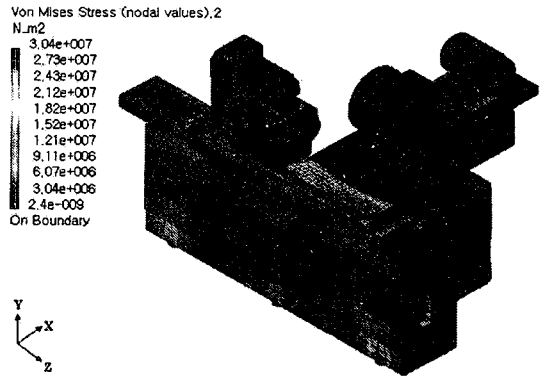


Fig. 6 Static stress of the machine

3.2 모드 해석

동일한 모델링을 이용하여 모드해석을 수행한 결과를 Table 3에 정리하여 놓았다. 여러 연구결과들을 볼 때 가공중의 절삭점에서의 공작기계의 진동은 주축 부분에서 50%이상 발생하고, 그 외에는 베드, 슬라이드 및 접속부에서 발생하는 것으로 알려져 있다.¹²⁻¹⁴ 모드해석 결과 1차부터 2차까지 연삭기 헤드 부분의 진동모드를 관찰할 수 있었으

며 연삭기의 1차 모드 형상(first mode shape)을 Fig. 7에 제시하였다. 이 결과에서는 연삭기 헤드 부분 전체가 X축으로 병진 운동을 하는 것을 알 수 있다.

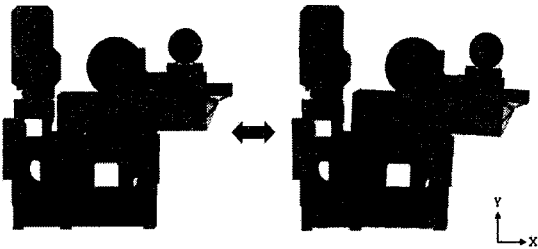


Fig. 7 First mode shape of the grinding machine

Table 3 Results of modal analysis for the machine

Mode number	Frequency [Hz]	Mode number	Frequency [Hz]
1	29.951	6	84.116
2	30.130	7	90.562
3	50.677	8	111.412
4	55.184	9	120.857
5	63.660	10	135.884

4. 진동 측정 실험

4.1 실험장치 및 실험 방법

앞 장에서 제시한 구조 해석을 토대로 캠 프로파일 CNC 연삭기의 시제품을 제작한 후 시험 가공을 실시한 결과 캠 표면에 연삭 자국이 남아 연삭 품질이 현저히 떨어지는 현상을 발견하였다. 이러한 현상이 발생하는 이유를 알아보기 위해 본 연구에서는 진동 측정 실험을 수행하였다. 앞서 언급한 바와 같이 공작기계의 진동은 50% 이상이 주축 부분에서 발생한다고 알려져 있으므로 여기서는 가공 정도에 직접적인 영향을 미치는 스피들을 포함한 연삭기 헤드부분의 진동 특성을 측정하였다.

본 연구에서 사용한 측정 장비는 메달리온 FFT 분석기와 PC와의 연결을 위한 DSP카드, 그리고 가속도 센서는 Kistler사의 8774A50 Piezoelectric 센서로 3축 신호를 동시에 측정할 수 있는 3축 가속도계를 구조 해석과 동일한 축 방향으로 장착하였다. Fig. 8에 가속도계를 장착한 사진을 보여주고 있다.

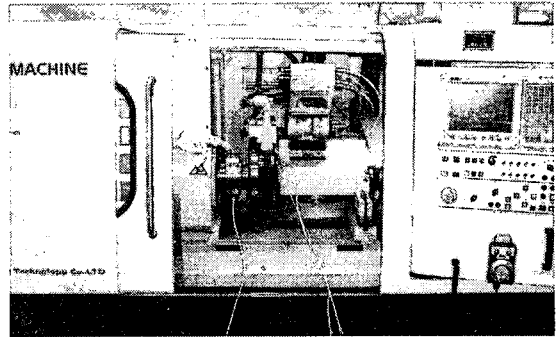


Fig. 8 Basic set up for dynamic evaluation on the developed cam profile CNC grinding machine

4.2 실험결과

우선 연삭기 스피들의 고유 진동을 측정하기 위해 본 연구에서는 가진 실험을 실시하였다. 가속도계를 스피들의 하우징에 위치시키고 스피들을 X방향으로 충격하여 얻어진 결과를 Fig. 9에 200 Hz 까지만 확대하여 나타내었다. 결과에서 나타난 바와 같이 고유 진동은 30.625 Hz와 32.5 Hz사이에서 1차 모드가 발생하고 있음을 알 수 있다. 결과에서 나타나는 바와 같이 1차 고유진동모드는 최대 7.8%의 오차를 나타내고 있음을 알 수 있다. 이 결과로부터 실험으로부터 구한 고유진동수는 유한요소해석을 통한 결과 값과 유사함을 알 수 있다. 하지만 실

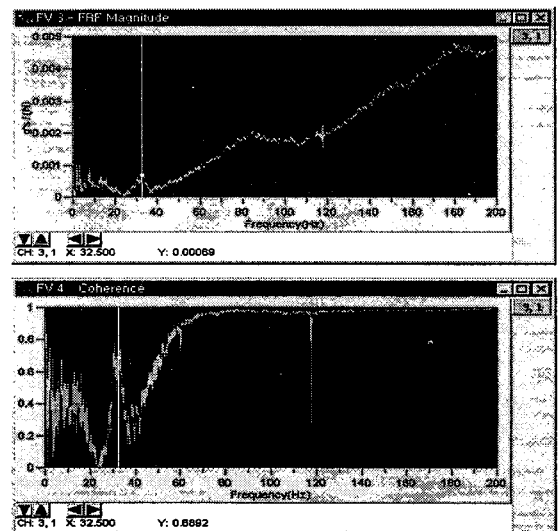


Fig. 9 Natural frequency response of the grinding machine with 200 Hz frequency band

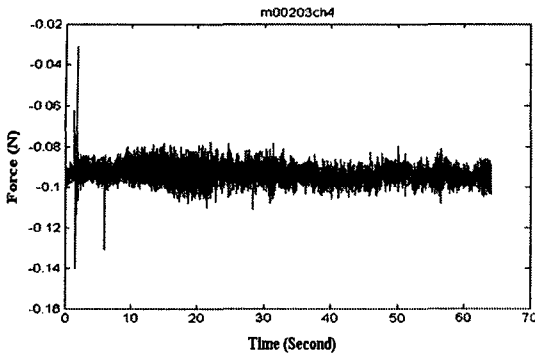


Fig. 10 Result of total vibration signal during cam grinding (X-direction)

힘값과 해석 값이 동일하지 않음을 발견할 수 있는데 이것은 경계조건의 선정, 기계를 감싸고 있는 커버의 미 고려, 각 연결부위의 탄성 계수 및 댐핑 계수 등의 오차에 기인한 것이라 볼 수 있다. Fig. 10은 캠 연삭을 수행하면서 연삭기 헤드의 진동을 측정된 결과를 나타낸 것이다. 연삭을 수행할 때의 조건은 정삭가공을 기준으로 하여 주축 속도를 1775 rpm, 절삭 깊이를 0.02 mm/min 그리고 이송을 360 %/min으로 선정하였다. 그리고 측정된 결과를 총 10개의 부분(Segment)으로 나누어 그 중 가공단차가 가장 많이 발생하는 6번째의 스펙트럼 분석 결과를 Fig. 11에 나타내었다. Fig. 11의 결과로부터 25.75 Hz, 29.5 Hz, 48 Hz, 51.75 Hz, 77.75 Hz, 96.5 Hz의 순으로 피크가 발생함을 알 수 있다. 주어진 연삭 조건으로부터 29.5 Hz의 성분은 연삭 스피들의 회전으로 인해 생기는 것임을 알 수 있다. 이 결과에서 알 수 있듯이 개발된 연삭기가 고유 진동에 매우 근접한 진동 특성을 가지고 있음을 판단할 수

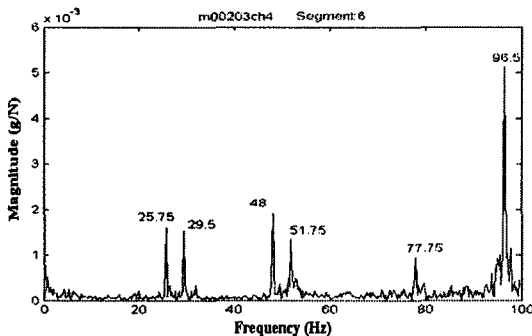


Fig. 11 Spectrum of figure 9 in segment 6

있다. 이것은 앞서 언급한 바와 같이 공진에 의한 채터 진동이 발생할 가능성을 내포하고 있다고 판단할 수 있는 근거가 된다.¹³

5. 구조설계 변경

앞 장의 결과들에 의해 캠 연삭기가 정상적인 캠 연삭을 수행할 수 없음을 알 수 있으며 이에 본 연구에서는 캠 연삭기 설계 수정을 통해 문제점을 수정하였으며 이것을 Fig. 12에 나타내었다. 수정된 파트는 연삭기 주축부분의 베어링을 유정압 베어링에서 볼 베어링으로 바꾸어 설계하여 연삭시 변칙적으로 바뀌는 힘에 대응을 하였으며, 직선 이송을 위해 LM가이드를 사용하여 이송시에 발생하는 백래쉬를 제거하였다. 사용된 LM가이드의 각 방향에 대한 동적 정격하중은 62,300 N, 정적 정격하중은 96,600 N이고 축방향의 동적 모멘트는 1180 Nm, 축방향의 정적 정격모멘트는 1600 Nm이며 축의 횡방향 동적 정격 모멘트는 660 Nm, 축의 횡 방향 정적 정격모멘트는 970 Nm이다. 그리고 고 정밀 볼 베어링의 동하중은 8820 N이고 정하중은 8480 N이

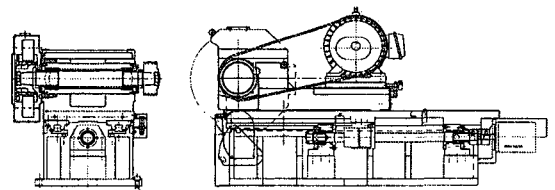


Fig. 12 Drawing of modified head unit part for the cam profile CNC grinding machine

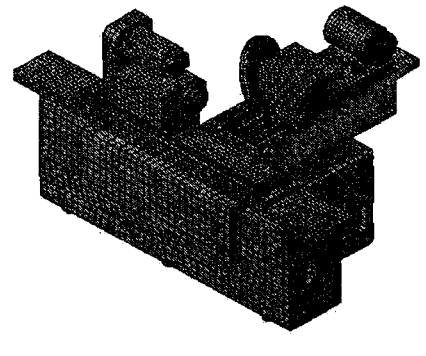


Fig. 13 First mode shape of the modified grinding machine

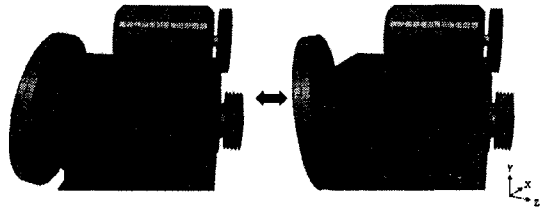


Fig. 14 The magnified shape of the grinding head part in the figure 13

며 총 5개의 베어링을 사용하여 스피들을 지지하고 있다. 이런 설계변경으로 인해 고유 진동의 변화가 있을 것이라 판단하고 유한요소해석을 통해 그 진동수의 변화를 파악한 결과 중 1차 모드 형상을 Fig. 13에 나타내었다. 좀 더 확실한 결과를 보기 위해 Fig. 14에 연삭기 스톱 장착 부위만 확대하여 나타내었다. 여기서 설계 수정 전 고유 모드 형상인 Fig. 7과 비교해보면 매우 다른 형상을 나타냄을 알 수 있다. 또한 Table 4에 각 모드에 대한 고유 진동수를 정리하여 놓았다. 나타난 결과를 통해 볼 때 연삭기 이송 부분의 강성이 증가하였음을 판단할 수 있다.

이상의 결과를 통해 연삭 스피들의 최대 속도 (2000 rpm)에서도 공진에 의한 채터링의 발생은 존재하지 않음을 알 수 있으며 이 과정을 통해 캠 프로파일 연삭기를 성공적으로 개발할 수 있었다. Fig. 15는 고 정밀 볼 베어링을 사용한 스피들과 직선운동을 안내하기 위한 LM 가이드 등을 사용하여 개발된 연삭기를 이용하여 캠을 연삭하고 있는 장면을 나타낸 것이다.

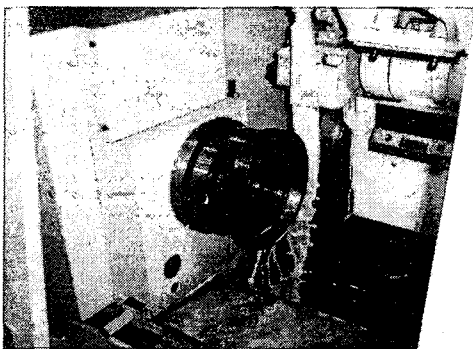


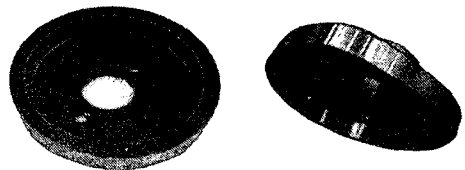
Fig. 15 Grinding process using the developed machine

6. 가공 결과

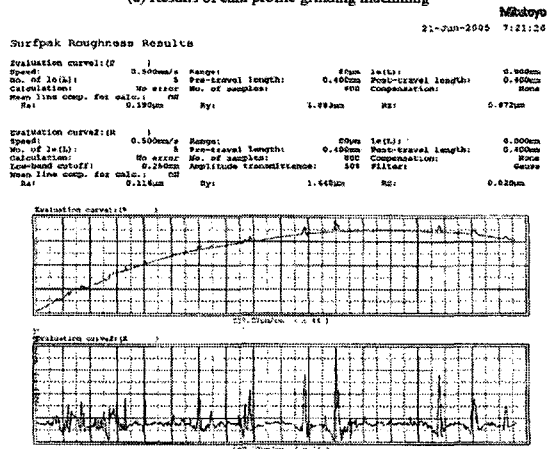
본 연구에서는 고 정밀 캠의 내·외경을 연삭 가공할 수 있는 3축 캠 프로파일 CNC 연삭기를 설계 및 제작을 하고 연삭기를 평가하였다. 설계 변경전 나타났던 가공 단차가 모두 해결된 가공 결과물을 얻을 수 있었으며 연삭 가공된 형상과 표면거칠기의 측정 결과 중 하나를 Fig. 16에 나타내었다. 연삭 가공된 캠의 각 부위의 표면을 측정한 결과 평균 표면거칠기(R_a)가 0.148 μm 이하로 나타남을 알 수 있었다.

Table 4 Results of modal analysis using FEM

Mode number	Natural frequency [Hz]	Mode Number	Natural frequency [Hz]
1	38.725	6	84.429
2	38.959	7	91.426
3	62.819	8	100.266
4	63.659	9	105.116
5	79.939	10	112.362



(a) Results of cam profile grinding machining



(b) Surface roughness result of cam

Fig. 16 Experimental results of high precision cam profile grinding machining

7. 결론

본 연구에서는 고 정밀 캠의 내·외경을 연삭 가공할 수 있는 3축 캠 프로파일 CNC 연삭기를 설계 및 제작을 하고 진동 실험을 통해 연삭기의 문제점을 발견하였으며 설계 보완을 거쳐 최종적으로 캠 프로파일 CNC연삭기를 개발하였다. 연삭기의 경량화와 제작의 용이성을 구현하기 위해 사각 Box를 적층한 구조를 적용하여 베드를 설계, 제작 하였으며 고 정밀 볼 베어링을 적용한 스프링들과 유지 및 보수에 용이한 볼 스크류를 직선운동 안내기구로 채택하여 제작의 용이성을 구현하였다. 또한 설계된 구조물의 응력 해석을 위해서 각각의 기계요소들을 CATIA V5를 이용하여 모델링하고 해석을 실시하였다. 해석 결과 실제 실험 결과와 비교하여 볼 때 5 %오차 내의 결과를 얻었음을 확인할 수 있었고 그 안전율 또한 4.56의 값을 얻게 되어 연삭기 설계의 타당성을 검증하였고 개발의 신뢰성을 확보하였으며 이를 토대로 시제품을 제작하였다. 제작된 시제품으로 캠 연삭을 수행해 본 결과, 불량 표면이 발생하였는데 원인 규명을 위해 모드해석의 결과와 실험을 비교하여 그 원인을 밝혔으며 설계 변경을 수행하여 다시 제작을 하였다. 이로 인해 고유 진동수를 높이게 되었고 이는 진동에 대해 강한 설계가 이루어졌음을 판단할 수 있는 근거가 된다. 이와 같은 연구 결과를 통해 개발된 연삭기는 고 정밀 캠을 연삭하는데 적합함을 알 수 있다. 향후 연구과제로 보다 정확한 이론적 근거를 제시하기 위해 각각의 연결 부위의 강성을 고려하여 구조해석을 수행할 것이며 보다 정확한 진동측정을 위해 가진기를 이용한 진동측정을 수행하여야 한다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 지역혁신 인력양성사업의 연구결과로 수행되었음.

참고문헌

- Hahn, R. S., "On the Theory of Regenerative Chatter in Precision Grinding Operations," Trans. ASME, Vol. 76, No. 1, pp. 593-597, 1954.
- Kim, H. S., Jeong, K. S. and Lee, D. G., "Structural Design and Evaluation of the Three Axis Ultra-Precision CNC Grinding Machine," Transaction of KSME, Vol. 19, No. 12, pp. 3392-3402, 1995.
- Yamamoto, S., "A Report of Cylindrical Grinding Machine for Non-Circle Manufacturing," Monthly Mechanical Engineering, Vol. 29, No. 4, pp. 74-81, 2004.
- Staszewski, W., "Wavelet Based Compression and Feature Selection for Vibration Analysis," Journal of Sound and Vibration, Vol. 211, pp. 735-760, 1998.
- Lin, J. and Qu, L., "Feature Extraction Based on Morlet Wavelet and Its Application for Mechanical Fault Diagnosis," Journal of Sound and Vibration, Vol. 234, pp. 135-148, 2000.
- Weck, M., "Machine Tools," John Wiley & Sons Vol. 2, pp. 129-157, 167-173, 203-205, 1984.
- Park, C. W., "Theory of Grinding Machining," Science Technology, Korea, pp. 27-47, 2002.
- Samick LMS CO., LTD., "THK The Mark of Linear Motion(Catalog)," Samick LMS CO., LTD., pp. A166-A167, D-188-D-189, 2004.
- Shigley, S. E. and Mischke, C. R., "Mechanical Engineering Design," McGraw-Hill Int'l Ed., pp. 479-523, 1989.
- Slocum, A. H., "Precision Machine Design, Prentice-Hall Inc.," pp. 502-512, 589-625, 717-727, 1992.
- Koenigsberger, F., "Design Principle of Metal-Cutting Machine Tools," The Macmillan Company, pp. 44-45, 1965.
- Ehrich, F. F., "Handbook of Rotor-dynamics," McGraw-Hill, New York, 1992.
- Choi, S. H., Kim, D. H. and Ahn, Y. M., "Dynamic Analysis of External Cylindrical Grinding Considering Spindle and Workpiece Vibrations," Journal of KSPE, Vol. 17, No. 6, pp. 192-198, 2000.
- Ji, G., Park, D. G., Chung, W. J. and Lee, C. M., "Experimental Modal Analysis of Machining Centers," Spring Annual Meeting of KSMTE, pp. 82-87, 2004.