

진동 신호를 이용한 캠 프로파일 CNC 연삭기의 실험적 평가에 관한 연구

이춘만*, 임상현†

A study on the Experimental Evaluation for the Cam Profile CNC Grinding Machine using Vibration Signals

Choon Man Lee*, Sang Heon Lim†

Abstract

A cam profile grinding machine is a mandatory machine tool for manufacture of high precision contoured cam. Experimental evaluation of modal analysis is an effective tool to investigate dynamic behavior of a machine. 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 : Vibration(진동), Experimental evaluation(실험적 평가), Grinding machine(연삭기)

1. 서론

산업기술의 발달로 각종 첨단 제품이 개발되면서 기계부품의 정밀가공에 대한 수요가 증가하고 있다. 이러한 기계가공품의 고정밀화 추세에 따라 연삭가공기술도 빠르게 발전하고 있다. 절삭가공 기계들이 고속화, 고정밀화 되어가면서 과거의 연삭가공을 대체하는 경우도 많이 발생하고 있으나 한편으로는 제품의 고정밀화 요구에 따라 연삭가공의 수요가 늘어나고 있으며 높은 생산성과 고정밀, 고품위 연삭 표면을 동시에 요구하고 있다.

특히 캠 연삭의 경우에는 가공면의 형상이 원통 연삭과는 다르게 완전한 원의 형상이 아니므로 연삭기의 연삭숫돌 주축과 공작물 회전축의 회전 정밀도에 의하여 가공정밀도가 크게 영향을 받게 된다. 이런 이유로 인해 연삭가공 공정 중에는 회전축의 편심량과 진동량이 클수록 가공물의 가공정도가 나빠지게 된다. 또한 캠 연삭기에서는 한번 가공이 되어진 부분이 다시 가공되어지는 현상으로 인해 발생하는 채터 진동이라 불리는 자려진동이 발생하므로 채터 진동이 연삭가공의 정밀도에 큰 영향을 미치게 되는 특성을 가진다.¹⁾ 따라서 채

* 주저자, 창원대학교 기계설계공학과 (cmlee@sarim.changwon.ac.kr)

주소: 641-773 경남 창원시 사림동 9

† 창원대 기계설계공학과 대학원

터 진동을 측정하고 그 특성을 분석하여 연삭기의 성능을 높이려는 시도는 오래전부터 있어왔다.⁷⁾ 이러한 진동신호는 기계의 동적 정보를 가지고 있으므로 기계의 성능 및 신뢰성 평가에 많이 사용된다.

기계를 진단하는 일반적인 방법은 기계로부터 발생하는 신호를 측정하여 분석하는 것이다. 진단신호를 측정하기 위하여 계측기를 진단신호가 발생하는 곳에 가능한 한 가깝게 부착하여 측정한다. 이는 여러 가지 이유로 인해 진단신호가 계측기까지 도달하는 동안 본래의 자기 모습을 잃어버리고 상당히 변질되기 때문이다.

Hahn¹⁾은 공작물의 연삭마모에 의해 채터가 발생한다는 가정하에 처음으로 연삭기 진동을 해석하였다. Liao와 Shiang²⁾은 수치적 계산에 의한 가공공정 시뮬레이션을 이용한 연삭공정의 진동해석을 수행하였으며, Staszewski³⁾와 Lin⁶⁾ 등은 웨이블릿 변환을 이용한 잡음이 혼재된 신호로부터 기계의 평가 정보를 추출하였다.

본 연구에서는 일반적인 원통 연삭기에서 더 발전한 캠 프로파일 CNC 연삭기의 진동특성을 실험을 통해 평가하고자 하였다. 또한 진동 신호의 분석을 이용하여 취약한 부분을 규명하고 이러한 진동 신호를 통해 정밀한 캠을 연삭할 수 있는 CNC 연삭기의 강성을 간단히 진단할 수 있는지에 대하여 검토하였다.

2. 실험 장치 및 실험 방법

실험을 하기 위해 본 연구에서는 개발된 캠 프로파일 CNC 연삭기를 사용하였다. 가공 중 절삭점에서의 공작기계의 강성은 주축부에서 50% 이상이 발생하고, 그 외에는 베드, 슬라이드 및 접속부에서 발생하는 것으로 알려져 있다.⁴⁾ 따라서 본 연구에서는 가공 정도에 집적적인 영향을 미치는 주축 스펀들을 포함한 연삭 헤드부분의 진동특성을 측정하였다. Fig. 1에 캠 프로파일 연삭기의 구조 및 가속도계의 장착 지점을 제시하였다. 측정 장비로는 메달리온 FFT 분석기와 PC와의 연결을 위한 DSP카드, 그리고 가속도 센서는 Kistler사의 8774A50 Piezoelectirc 센서로 3축 신호를 동시에 측정할 수 있는 3축 가속도

계이다. 가속도 센서의 사양을 다음 Table 1에 정리하여 제시하였다.

Table 1 Specification of accelerometer

가속도 범위	±50 [g]
가속도 한계	±500 [g _{pk}]
감도	100 [mV/g]
주파수 응답 범위	7,000 [Hz]

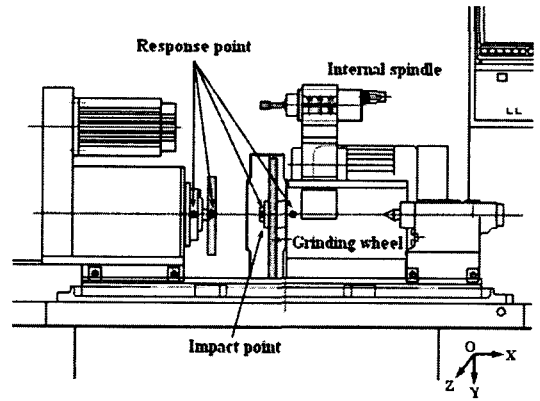


Fig. 1 Cam profile CNC grinding machine and measurement points

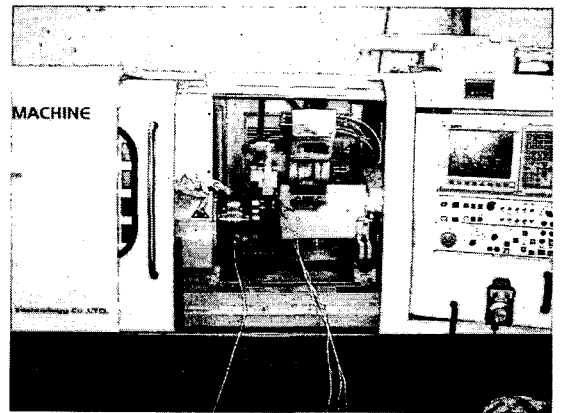


Fig. 2 Basic set up for dynamic evaluation on the developed cam profile CNC grinding machine

Fig. 2는 본 연구에서 제시한 측정 장치를 구성하

여 개발된 연삭기에 설치한 그림을 나타낸 것이다.

가속도계를 측정 대상물에 부착할 때는 부착하고자 하는 부위에 이물질이 제거하고 견고하게 부착하여 측정을 하는 동안 피 측정물에서 떨어지거나 측정 방향이 변하지 않도록 해야 한다.

3. 실험 결과

우선 연삭기 주축 스피들의 고유 진동을 측정하기 위해 본 연구에서는 가진 실험을 실시하였다. 가속도계를 주축 스피들의 하우징에 위치시키고 스피들을 Z방향으로 충격하여 얻어진 결과를 Fig. 3에 나타내었고 Fig. 4는 Fig. 3에서 얻어진 결과를 200 Hz 까지만 나타낸 것이다. 결과에서 나타난 바와 같이 고유 진동은 30.625 Hz와 32.5 Hz사이에서 1차 모드가 발생하고 있음을 알 수 있다.

실험으로부터 구한 고유 진동수의 검증에 위해 유한요소해석기법을 도입하여 고유 진동해석을 실시하였다. Fig. 5는 CATIA V5를 이용하여 연삭기를 모델링하고 모드 해석을 실시한 결과 중 1차 모드의 형상을 나타낸 결과이다. 이 결과에서는 연삭기 헤드 부분이 X축으로 병진 운동을 하는 것을 알 수 있었다. 그리고 Table 2에 각 모드에 대한 해석 결과를 정리하여 놓았다.

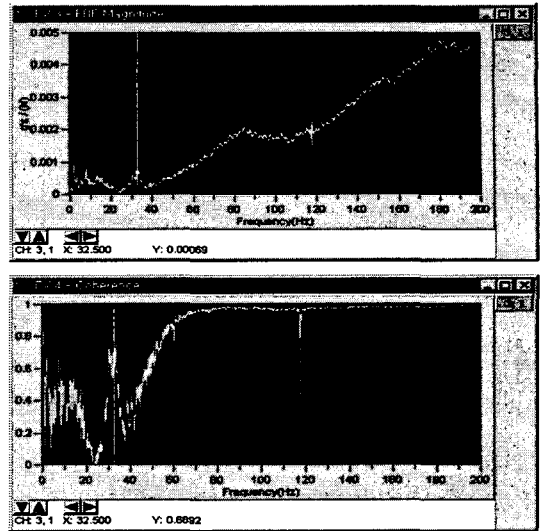


Fig. 4 Natural frequency response of the grinding machine with 200 Hz frequency band

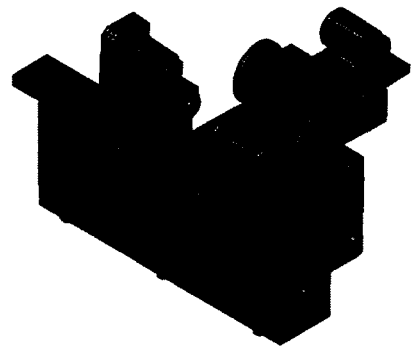


Fig. 5 First mode shape of the grinding machine

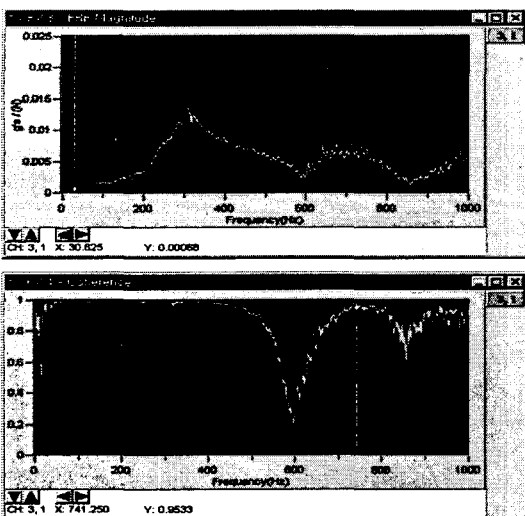


Fig. 3 Natural frequency response of the grinding machine

Table 2 Results of modal analysis using FEM

Mode number	Natural frequency [Hz]	Mode Number	Natural 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

결과에서 나타나는 바와 같이 1차 고유진동모드는 최대 7.8%의 에러를 나타내고 있음을 알 수 있다. 이 결과로부터 실험으로부터 구한 고유진동수는 유한 요소해석을 통한 결과값과 유사함을 알 수 있다. 하지만 실험값과 해석값이 동일하지 않음을 발견할 수 있는데 이것은 경계조건의 선정, 각 연결부위의 탄성 계수 및 댐핑 계수 등의 오차에 기인한 것이라 볼 수 있다.

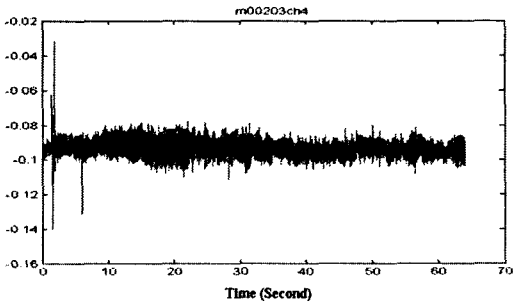


Fig. 6 Result of total vibration signal during cam grinding with condition 1 (X-direction)

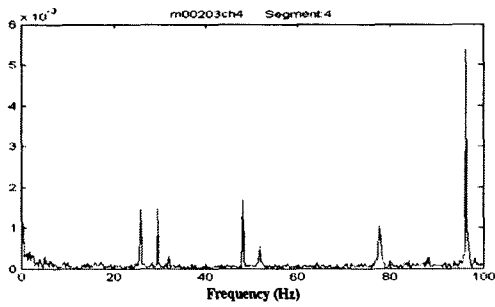


Fig. 7 Spectrum of figure 6 in segment 4

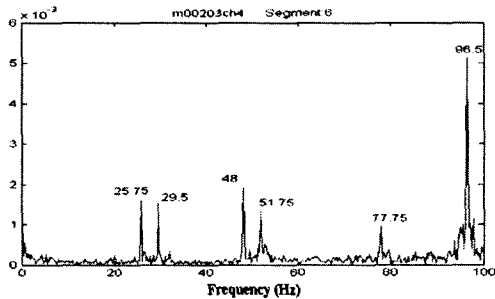


Fig. 8 Spectrum of figure 6 in segment 6

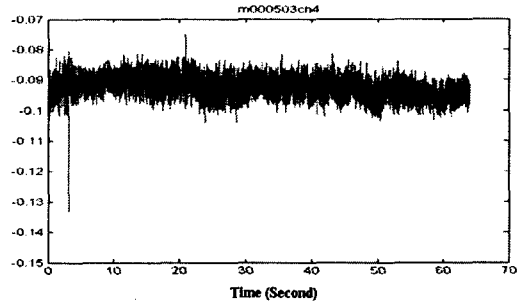


Fig. 9 Result of total vibration signal during cam grinding with condition 2 (X-direction)

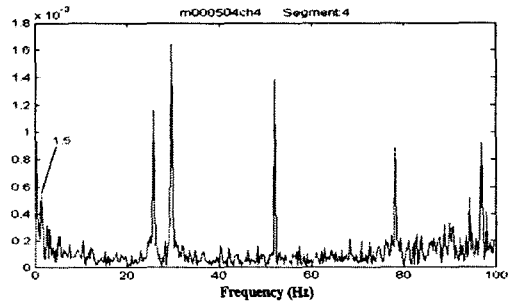


Fig. 10 Spectrum of figure 9 in segment 4

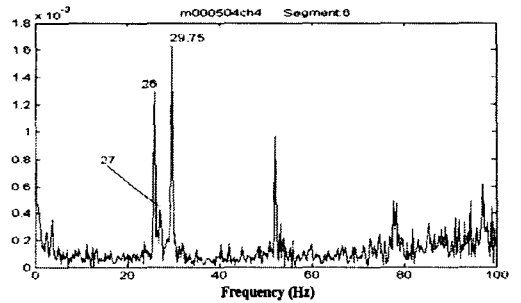


Fig. 11 Spectrum of figure 9 in segment 6

Table 3 Grinding condition of cam machining

Item	Condition 1	Condition 2
Spindle Speed	1775 [rpm]	1775 [rpm]
절삭 깊이	0.02 [mm/min]	0.005 [mm/min]
Grinding feed rate	360 [°/min]	360 [°/min]

Fig. 6에서 Fig. 11까지는 캠 연삭을 수행하면서 연삭기 헤드의 진동을 측정된 결과를 나타낸 것이다. 연삭을 수행할 때의 조건은 Table 3에 정리하였다. Fig. 8의 결과로부터 연삭 조건 1인 경우 25.75 Hz, 29.5 Hz, 48 Hz, 51.75 Hz, 77.75 Hz, 96.5 Hz의 순으로 피크가 발생함을 알 수 있고, 연삭 조건 2의 경우도 비슷한 경향을 발생하고 있음을 Fig. 11을 통해 알 수 있다. 또한 연삭 조건으로부터 29.5 Hz와 29.75 Hz의 성분은 연삭 주축 스피들이 회전하면서 생기는 것임을 알 수 있다. 이 결과에서 알 수 있듯이 개발된 연삭기가 고유 진동에 매우 근접한 진동 특성을 가지고 있음을 판단할 수 있다. 이것은 앞서 언급한 바와 같이 공진에 의한 chatter 진동이 발생할 가능성을 내포하고 있다고 판단할 수 있고 또한 실제 연삭 가공을 수행한 결과 캠 표면에 미세한 chatter 진동의 흔적을 발견할 수 있었다.

앞에서 나타난 결과들에 의해 캠 연삭기가 정상적인 캠 연삭을 수행할 수 없음을 알 수 있었으며 이에 본 연구에서는 캠 연삭기 설계 수정을 통해 문제점을 수정하였다. 수정된 파트는 연삭기 주축부분의 베어링을 유정압 베어링에서 볼 베어링으로 바꾸어 설계하여 연삭시 변칙적으로 바뀌는 힘에 대응을 하였으며, 요철형의 슬라이딩 이송부분을 LM가이드를 사용하여 이송시에 발생하는 요동 운동을 제거하였다. 이런 설계변경으로 인해 고유 진동의 변화가 있을 것이라 판단하고 유한요소해석을 통해 그 진동수의 변화를 파악한 결과 중 1차 모드 형상을 Fig. 12에 나타내었다. 설계 수정 전 고유 모드 형상과 비교해보면 매우 다른 형상을 나타내고 있다. Fig. 12에 나타난 결과를 통해 볼 때 연삭기 이송 부분의 강성이 증가하였음을 판단할 수 있다. 또한 Table 4에 각 모드에 대한 고유 진동수를 정리하여 놓았다. 이상의 결과를 통해 연삭 주축 스피들의 최대 속도(2000 rpm)에서도 공진에 의한 chatter링의 발생은 존재하지 않음을 알 수 있으며 이 과정을 통해 캠 프로파일 연삭기를 성공적으로 개발할 수 있었다. Fig. 13은 고정밀 볼 베어링을 사용한 스피들과 직선운동을 안내하기 위한 LM 가이드 등을 사용하여 개발된 연삭기를 이용하여 캠을 연삭하고 있는 장면을 나타낸 것이다.

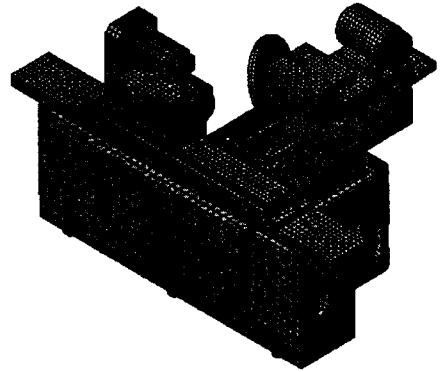


Fig. 12 First mode shape of the modified grinding machine

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

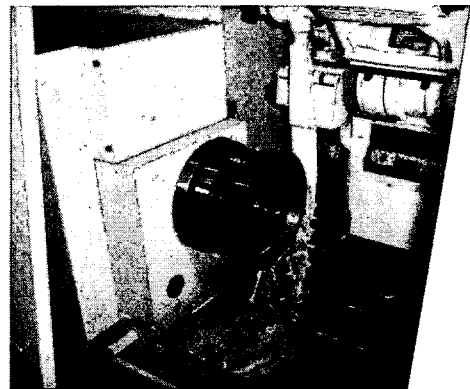


Fig. 13 Grinding process using the developed machine

4. 결 론

본 연구에서는 고정밀 캠의 내·외경을 연삭 가공할 수 있는 캠 프로파일 CNC 연삭기의 진동 특성을 평가하였다. 또한 실험 결과와 비교를 하기 위해 유한요소해석 기법을 도입하여 진동 해석을 수행하였다. 결과에서 나타나는 바와 같이 실험적으로 구한 진동값과 유한요소해석을 통한 해석값이 근사치를 나타내고 있음을 알 수 있으며 유한요소해석에 필요한 경계조건의 선정, 각 연결 부위의 탄성 계수 및 댐핑 계수 그리고 비 선형성을 정확하게 규명하기 어려운 점이 실험값과 오차의 원인이라 판단된다.

실험을 통해 연삭 주축의 회전 진동수(29.5 Hz, 29.75 Hz)는 연삭기의 고유 진동수(30.675 Hz)와 매우 가까운 곳이 분포하고 있음을 발견할 수 있었다. 이로 인해 캠을 연삭한 결과 채터 진동에 따른 캠 표면의 결함이 발생함을 알 수 있었다. 따라서 연삭기 설계를 변경하였으며 그로 인해 고유 진동수를 높게 되었고 성공적인 캠 연삭을 수행할 수 있게 되었다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 지역혁신 인력양성사업의 연구결과로 수행되었음

참 고 문 헌

- (1) Hahn, R.S., 1954, "On the Theory of Regenerative Chatter in Precision Grinding Operations", Trans. ASME, Vol. 76, No. 1, pp. 593~597.
- (2) Liao, Y.S., and Shiang, L.C., 1989, "Computer Simulation of Self-Excited and Forced Vibrations in the External Cylindrical Plunge Grinding Process", Grinding Fundamentals and Applications - Winter Annual Meeting of ASME, pp. 167~182.
- (3) Ehrich, F.F., 1992, *Handbook of Rotordynamics*, McGraw-Hill, New York.
- (4) Kim, H.S., Jeong, K.S., and Lee, D.G., 1995, "Structural Design and Evaluation of the Three Axis Ultra-Precision CNC Grinding Machine", Transactions of the KSME, Vol. 19, No. 12, pp. 3392~3402.
- (5) Staszewski, W., 1998, "Wavelet Based Compression and Feature Selection for Vibration Analysis", Journal of Sound and Vibration, Vol. 211, pp. 735~760.
- (6) Lin, J., and Qu, L., 2000, "Feature Extraction Based on Morlet Wavelet and Its Application for Mechanical Fault Diagnosis", Journal of Sound and Vibration, Vol. 234, pp. 135~148.
- (7) Choi, S.H., Kim, D.H., and Ahn, Y.M., 2000, "Dynamic Analysis of External Cylindrical Grinding Considering Spindle and Workpiece Vibrations", Journal of KSPE, Vol. 17, No. 6, pp. 192~198.
- (8) Lee, S.H., et al., 2002, "The Failure Mode Analysis of Machine Tools using Performance Tests", Spring Annual Meeting of KSPE, pp. 90~93.
- (9) Park, S.J., et al., 2002, "Fault Diagnosis of a Pump using Acoustic and Vibration Signals", Fall Annual Meeting of KSPE, pp. 883~887.
- (10) Ji, G., et al., 2004, "Experimental Modal Analysis of Machining Centers", Spring Annual Meeting of KSMTE, pp. 82~87.