

가공공정 모니터링이 가능한 치과용 크라운 가공기 개발

이종항^{1*}, 허우석²

¹한국공학대학교 기계공학과, ²(주)코마틱코리아

Development of the Dental-crown Machine Tool with Machining Process Monitoring

Jong Hang Lee^{1*}, Woo-Seok Heo²

¹Department of Mechanical Engineering, Tech University of Korea

²Kohmatic-Korea Co., Ltd.

요약 치과용 크라운의 형상은 5축 가공기의 CNC 프로그램에 의해서 가공된다. 이 CNC 프로그램에 의한 가공은 작업자가 가공공정을 항상 모니터링 할 필요가 있다. 미래에 인공지능 기능을 갖춘 스마트 공작기계를 구현하기 위해서는 가공공정을 모니터링 할 수 있는 능력을 갖추고 가공 효율을 높일 필요가 있다. 본 연구에서는 치과용 크라운 가공 중 가공공정 정보를 용이하게 수집할 수 있는 새로운 센서 설치법을 제안하고, 이 센서를 이용하여 가공공정을 지속적으로 모니터링 할 수 있는 가능성을 확인하였다. 스피들 베어링에 열전대를 설치하여 베어링의 온도를 모니터링하고, 모터 제어용 인버터로부터 회전수를 모니터링 한다. 또한, 3축 로드셀을 사용하여 스피들 진동과 공구마모를 모니터링 한다. 특히 로드셀은 공구와 공작물 사이의 신호선에 의한 간섭을 회피할 수 있도록 스피들과 상하 이송용 컬럼 사이에 설치된다. 이러한 센서들에 의하여 온도, 회전수, 스피들 진동, 그리고 공구마모를 모니터링 한 결과, 작업자의 도움 없이도 크라운을 가공하면서 충분히 가공공정을 감시할 수 있었다. 또한, 개발된 치 가공기는 30 micrometer 이하의 가공오차를 갖는다.

Abstract Dental crowns are shaped by machining with a five-axis machine using the CNC(Computer Numerical Control) program. On the other hand, an operator is required to monitor the machining process consistently when the CNC program is used. Thus, there is a need to monitor the machining process to increase the machining efficiency and achieve smart machines with artificial intelligence functions in the future. This paper proposes a new sensor installation method that can easily produce acquisition machining process information during machining. The continuous monitoring of the machining process using this sensor was assessed. The bearing temperature and rotational speed were monitored using a thermocouple and inverter for the motor controller. In addition, a three-axis load cell was used to monitor the spindle vibration and tool wear. In particular, the load cell was installed between the spindle and the vertical column to avoid interference by signal lines between the tool and the workpiece. Monitoring the temperature, rotational speed, spindle vibration, and tool wear using these sensors allowed the machining process to be assessed while machining the crown without an operator. Moreover, the developed machine tool for dental-crown showed a machining accuracy of less than 30 micrometers.

Keywords : Machine Tool, Dental-Crown, Machining Process, Monitoring, Sensor Installation, Machining Accuracy

본 논문은 중소벤처기업부 “산학 Collabo R&D 사업”의 지원을 받아 수행된 연구임.

*Corresponding Author : Jong Hang Lee(Tech University of Korea)

email: ljh@tukorea.ac.kr

Received February 11, 2022

Revised April 4, 2022

Accepted May 6, 2022

Published May 31, 2022

1. 서론

치과에서 사용되는 크라운(crown)은 5축을 이용한 CNC 가공으로 제작된다. 이는 공구지름 1 ~ 6 mm의 엔드밀에 의한 절삭 가공량이 적다는 특징을 가지고 있다.

가공공정 모니터링에서 널리 사용되는 주요 물리량은 공구마모, 채터(chatter), 공구의 충돌, 표면품질이며, 베어링의 온도와 같이 가공과 관련된 장비의 이상 현상들이다[1]. 이들 중 공구마모와 채터는 현재까지도 연구들이 진행되고 있다. 공구마모와 채터를 감지하기 위한 센서로는 힘센서, 가속도센서, 음향방출센서, 전류센서, 비전시스템 등이 사용되며, 베어링의 온도 감지는 열전대가 사용된다.

M. Rizal 외는 공구홀더(tool holder)에 설치된 회전형 공구동력계로 신뢰성이 있는 절삭력을 측정하였으며[2], 신재훈과 윤재용은 가속도계와 모드선도 개념을 이용하여 밀링가공 시 발생하는 채터 진동을 감시하였다[3]. M.S.H. Bhuiyan 외는 음향방출센서로 선삭 시의 공구마모, 칩 형성, 표면거칠기를 감지할 수 있음을 보였다[4]. 송기형 외는 이송용 모터의 구동전류를 이용하여 절삭가공 공정에서 절삭력을 추정하였다[5]. 김태곤 외는 스마트 동작기계를 위하여 드릴의 여유면 마모를 기상에서 측정하였다. 그는 복잡한 형상의 공구마모를 4.7% 이하의 오차로 자동 측정하였다[6]. 그리고 장성민과 이승일은 고속의 밀링가공에서 발생하는 진동특성에 대해 연구하였으며[7], 공정식은 랜덤(random) 특성을 가지고 있는 공구마모를 정확히 예측할 수 있는 공구수명식을 최적화 하였다[8]. 또한 각종 신호처리 알고리즘을 사용하여 이상 감지의 품질을 높이는 연구들도 수행되고 있다[9].

일반적으로 장시간 가공은 작업자가 가공 상황을 관찰하고(모니터링), 문제가 있으면 공구를 교환하거나 공작물을 폐기시킨다. 그러므로 스마트 가공시스템(smart manufacturing system)에서는 가공공정을 지속적으로 모니터링 해 주는 기능이 필요하다.

이와 같은 가공공정의 모니터링에 대한 기존연구들과 본 연구의 차이점은 다음과 같다.

첫째, 크라운의 가공은 절삭 가공량이 적기 때문에 작업자가 가공 중에 발생하는 가공상태를 인지하지 못하는 사이에 품질불량이 생길 수 있다. 둘째, 센서에 의해서 매우 작은 절삭력을 모니터링 할 경우 센서신호들이 미약하여 신호대잡음비(Signal to Noise ratio, SN비)가

나쁘다. 셋째, 기존의 연구들은 절삭력 검출용 센서를 공작물 근방에 설치하기 때문에 SN비가 좋은 신호를 수집할 수 있지만, 공작물이 설치된 테이블의 이동에 따라 신호선과 이송계 사이에 간섭이 발생된다. 또한, 이 신호선은 가공된 칩에 의해서 손상을 받을 수 있고, 절삭유에 의하여 신호에 큰 영향을 준다.

K. H. Song에 의해서 조사된 내용인 “일반적인 힘 센서는 형태적인 특징으로 인해 가공공정 중에 움직임이 없는 부분(밀링 가공에서는 소재, 선반 가공에서는 공구)에 주로 설치하게 되는데, 설치의 용이성이 낮음으로 인하여 사용이 제한되기도 한다[1].”와 같이 산업현장에서는 센서신호 자체도 중요하지만 센서설치의 용이성에 대한 연구가 더욱 중요하다는 것을 알 수 있다.

본 연구에서는 위와 같은 기존 연구들의 문제점을 개선하기 위해 특수한 센서설치 방법을 제안하고자 한다. 이 센서설치 방법의 단점인 감도(sensitivity) 저하에도 불구하고 가공량이 적은 실험조건 하에서 가공공정을 모니터링 할 수 있는가를 조사한다. 그 외에도 온도와 회전수를 측정하기 위한 센서들도 설치하여 가공공정 이외의 정보들도 모니터링 될 수 있도록 시스템을 구축하였다.

이러한 센서설치 방법은 가공공정 모니터링 시스템 구축 시 산업현장에서 가장 현실적인 문제인 설치된 센서들이 기계장치들의 동작에 의해 간섭 받지 않고 신호선들이 절삭유에 의해 영향을 받지 않는 시스템 구축에서 하나의 핵심적인 대안이 될 수 있다.

2. 가공공정 모니터링 시스템 설계

2.1 5축 치 가공기 구조

Fig. 1은 치과용 크라운을 가공하는 기계(건식과 습식 가공 모듈)의 개념 설계도이다.

그림의 ①은 스피들(spindle)로서, 최대속도와 최대동력이 40,000 rpm과 1.6 kW 이다. 그림의 ②는 습식가공용 모듈로서, C축이 360° 회전이 가능하도록 설계되었다. 그림의 ③은 픽업 스테이션(pickup station)으로, 8개의 공구가 수납될 수 있도록 설계되어 있다. 그림의 ④는 건식가공용 모듈로서, A축(Fig. 2의 ①)의 180° 회전과 B축(Fig. 2의 ②)의 30° 회전이 가능하도록 설계되어 있다. Fig. 1과 같이 설계된 5축 치 가공기를 실제로 제작한 모습이 Fig. 2(Fig. 1의 ④ 건식가공용 모듈 확대)이다.

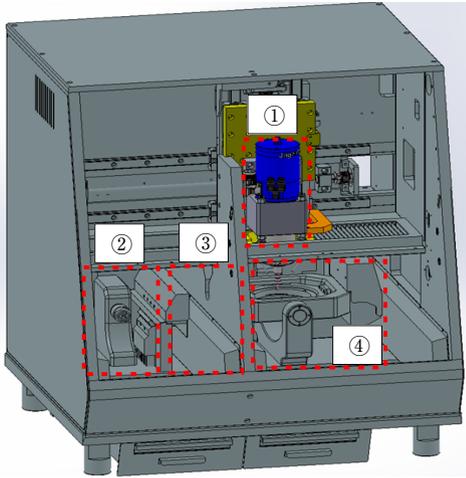


Fig. 1. Concept design for the 5 axis dental-crown machine with wet and dry machining modules.



Fig. 2. Photograph of the dental-crown machine with dry machining module.

2.2 가공공정 모니터링용 센서

Fig. 3은 절삭력 신호를 수집할 수 있는 3축 로드셀이 설치된 사진이다. 이 로드셀은 브라켓(bracket)과 스피indle 하우징(housing) 사이에 설치된다.

기존 연구들은 일반적으로 센서가 테이블(공작물이 설치되는 바이스) 쪽에 설치되어 센서 감도는 향상되지만, 장기적으로 절삭유와 분진에 의해 영향을 받는다[10]. 또한 테이블이 이동할 때 신호선들이 기계장치들과 간섭되거나 가공된 칩(chip)에 의해 파손될 수 있다. 그러나 Fig. 3과 같은 설치 방법으로 로드셀을 설치하면 이러한 문제들을 피할 수 있다.

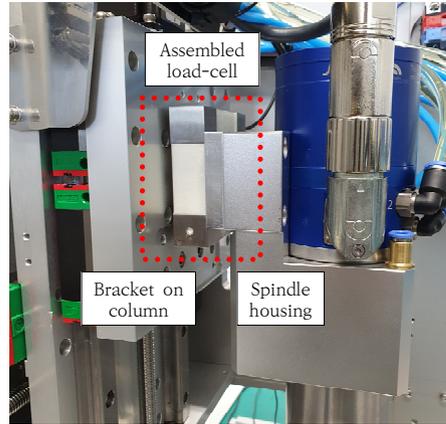


Fig. 3. Photograph of a fabricated load-cell between bracket and spindle housing (dotted line box).

2.3 가공공정 모니터링 시스템

Fig. 4는 치 가공 시 가공공정을 모니터링하기 위한 시스템으로, 고속으로 회전하는 베어링의 윤활유를 냉각시키면서 온도, 스피indle 회전수, 절삭력을 모니터링 할 수 있다. 또한 Labview를 사용하여 이들 신호 수집 프로그램은 작성하였다.

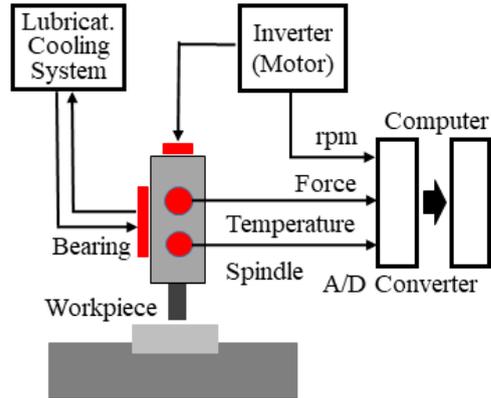


Fig. 4. Schematic diagram of the process monitoring system for dental-crown machining.

3. 가공공정 모니터링 실험 및 고찰

3.1 특징신호의 추출

본 연구의 모니터링 대상은 열전대를 이용한 스피indle 베어링의 온도정보, 모터 인버터로부터 수집한 스피indle 회전수정보, 로드셀로부터 수집한 스피indle 진동과 공구마

모정보이다. 또한, 공구마모량은 수집된 센서신호가 매우 작기 때문에 저용량의 로드셀이 이용된다. 각각의 센서로부터 얻은 특징정보들은 다음과 같다.

3.1.1 베어링 온도

베어링 온도는 공구에 가까운 쪽의 스피들 베어링에 설치된 Table 1의 온도센서로 부터 수집된다. 이는 다른 쪽의 베어링보다 큰 부하를 받아 상대적으로 열 발생량이 많기 때문이다. 이러한 열은 베어링 수명에 큰 영향을 줄 뿐만 아니라, 금속간의 열전도에 의하여 스피들 내에 조립된 빌트인 모터(built-in motor)의 고정자 코일에 영향을 주어 회전력(동력)을 감소시킨다. 그러므로 장시간 동안 가공이 필요한 크라운 가공에서는 베어링 온도를 모니터링 할 필요가 있다.

Table 1. Specification of temperature sensor and load-cell.

Temperature sensor	Load-cell
K type thermocouple	Strain gage with 3 axis
Input : ~100 mV analog	Capacity : 500 N
Precision : 0.3 %F.S	Output : 2.0±10% mV/V
Data Communication : RS485 (RTU)	Precision : 0.5 %F.S.
	Non-linearity : 0.5 %F.S.
Model : TK4N (AUTONICS)	Model : CF-9852 (CAS)

Fig. 5는 윤활유 냉각장치를 가동시키지 않고 스피들 운전에 따른 온도 변화를 나타낸 것이다. 스피들이 회전될 때부터 온도가 계속 증가함을 볼 수 있다. 크라운 가공의 경우 베어링 표면의 온도가 35 °C보다 높은 신호이면, 베어링에 과도한 부하를 받거나, 윤활장치(냉각기 포함)에 문제가 있어 윤활유 공급이 원활하지 않는 것으로 판단한다[11,12]. 특히 300초 이후의 온도 하락은 스피들 정지에 따라 베어링부에서 발생된 열이 윤활유에 의해서 제거되었기 때문이다.

3.1.2 스피들 회전수

Fig. 6은 스피들의 회전수를 모니터링 한 것이다. 이 회전수 정보는 모터 제어용 인버터(inverter)로 부터 수집하였다. 스피들 회전수(또는 절삭속도)는 가공된 표면의 거칠기에 큰 영향을 준다. 따라서 정삭가공에 사용되는 공구선택의 문제점을 파악할 수 있다. 또한, 금형에서 코너(corner)부 가공 시 적절한 공구지름이 결정되어야 하며, 이에 따른 코너부의 표면거칠기를 감시하는 데도 사용될 수 있다.

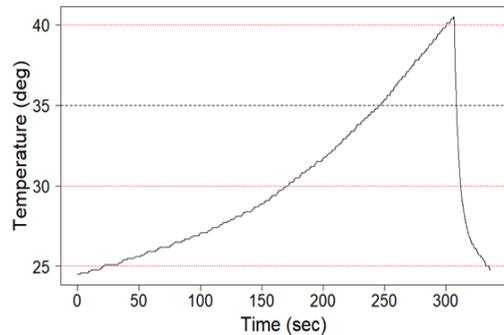


Fig. 5. Temperature signal trend during spindle operation without lubrication cooling (sampling time: 0.1 sec).

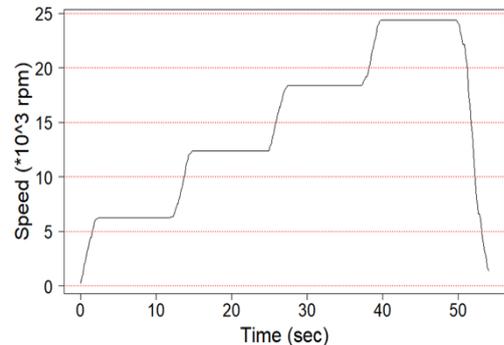


Fig. 6. Rotational speed trend during spindle operation. (sampling time: 0.1 sec)

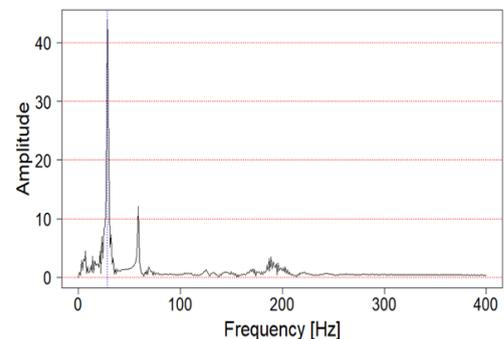


Fig. 7. FFT signal of a load-cell for spindle vibration. (sampling frequency: 5 kHz)

3.1.3 스피들의 진동

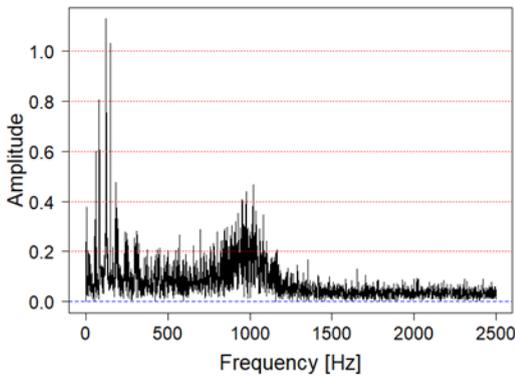
Fig. 7은 스피들에 진동이 발생될 때 컬럼과 스피들 하우징 사이에 설치된 Table 1의 로드셀로 부터 수집한 동적신호 성분을 FFT 처리하여 얻은 것이다. 스피들 부위에서 생기는 진동 정보(peak frequency : 28 Hz)가 반영되는 것을 볼 수 있다.

3.1.4 공구마모

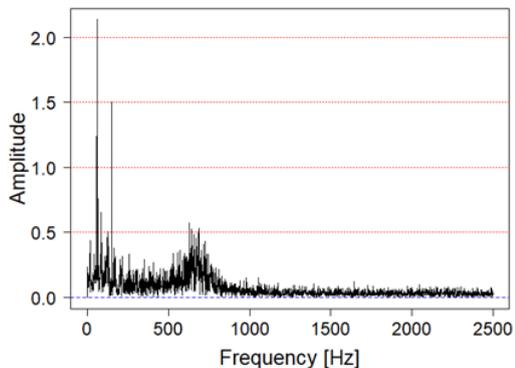
공구마모 모니터링은 동일한 가공조건하에서 정상공구와 마모공구(flank wear : 0.5 mm)에 대한 절삭력 신호(Table 1의 load-cell)를 이용하였다.

Fig. 8은 정상공구와 마모공구에 대한 로드셀 신호를 FFT처리하여 얻은 것으로, 정상공구의 피크주파수가 1,000 Hz의 위치에 있는데 비하여 마모공구는 약 680 Hz 근방에 위치함을 볼 수 있다. 이러한 특징신호의 차이를 딥러닝 등 인공지능에 학습을 시키면 공구마모에 대한 감시가 가능할 것으로 예상된다.

위와 같은 실험결과는 본 연구에서 제안한 새로운 센서설치법으로도 스피들 진동과 공구마모를 충분히 모니터링 할 수 있음을 보여준다. 이는 센서를 설치할 경우 산업현장에서 현실적인 문제인 공구와 신호선간의 간섭을 최소화하기 위한 대안이 될 것으로 판단된다[1]. 즉, 이 설치법은 기존의 설치법에 비하여 센서신호의 감도는 떨어지지만, 센서를 가공기에 쉽게 적용할 수 있고, 환경에 의한 영향도 최소화시키면서 가공공정을 충분히 모니터링 할 수 있다[10].



(a) FFT characteristics of the fresh tool.



(b) FFT characteristics of the worn tool.

Fig. 8. FFT signal of a load-cell for the fresh and worn tool. (sampling frequency: 5 kHz)

한편, 절삭가공량이 적은 가공인 경우는 센서 출력의 신호대 잡음비가 나쁘므로 절삭력 신호의 동적인 성분을 이용하는 것이 좋다.

3.2 치 가공기의 가공성능 평가

치 가공기의 가공성능을 평가하기 위한 실험조건은 Table 2와 같다.

Table 2. Experimental conditions for performance test.

Cutting parameters	Values
Rotational speed	10,000 rpm
Feed rate	300 mm/min
Cutting depth (z-axis)	0.2 mm
Cutting depth (radial)	1 mm
Tool dia. (flat end-mill)	6 mm with 2 blades
Workpiece & dimension	Zirconium Dioxide (ZrO ₂) 40 x 40 x 40 mm
No. of cutting test	10

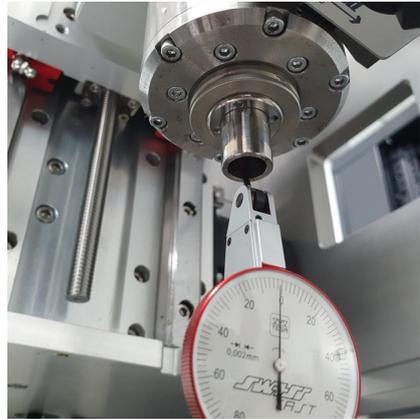


Fig. 9. Photograph of measurement for spindle run-out.

스핀들의 런아웃(run-out) 측정은 Fig. 9와 같이 콜릿(collet)이 조립되는 스피들 회전부의 내부 테이퍼 면이 측정될 수 있도록 다이얼게이지(dial gage)를 설치한다. 다이얼게이지의 영점을 조정한 후, 스피들을 시계방향으로 서서히 회전시키면서 게이지의 눈금을 읽은 결과, 스피들의 런아웃은 2 ~ 3 μ m 이었다.

Fig. 10은 지르코니아 소재를 엔드밀로 가공하는 모습이며, 10개의 소재를 가공한 공작물의 모습이 Fig. 11이다. 이 10개의 가공결과에 대하여 1 μ m 분해능을 갖는 마이크로미터로 가공오차를 측정하여 나타낸 것이 Fig. 12이다.

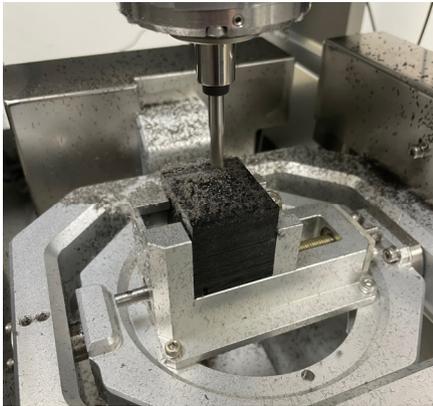


Fig. 10. Photograph of end-milling for performance test.



Fig. 11. Photograph of workpiece after 10 times cutting test.

Fig. 12와 같이 x방향의 가공오차는 $-7 \sim +30 \mu\text{m}$ 사이에 있고, y 방향의 가공오차는 $-22 \sim -7 \mu\text{m}$ 사이에 있는 것을 볼 수 있다. 이러한 가공오차는 공구 및 공작물의 설치오차, 스핀들 런아웃, 절삭력에 의한 공구의 변형, 그리고 10,000 rpm에서의 동적 편심에 의한 오차가 포함된다. 일반적으로 치과용 크라운의 가공에서는 최종적으로 공작물에 나타나는 총 가공오차가 $\pm 30 \mu\text{m}$ 이내에서 사용된다. 그러므로 Fig. 12와 같이 최대 $30 \mu\text{m}$ 의 오차는 정상적인 가공오차로 판단된다[12].

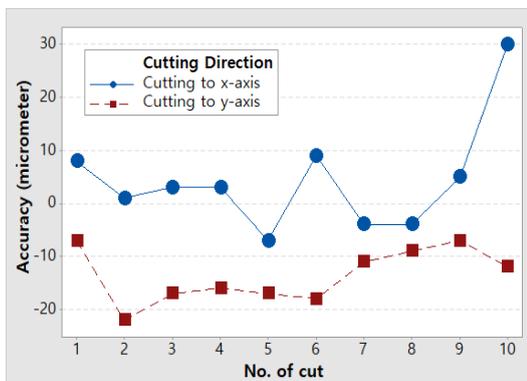


Fig. 12. Machining accuracy for 10 times cutting test.

4. 결론

본 논문에서는 치과용 크라운을 가공할 때 공정을 지속적으로 모니터링 하는 시스템을 제작하여 실험한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. 첫째로, 스핀들 하우징과 컬럼 사이에 로드셀을 설치하여 가공공정을 모니터링 할 수 있다. 이는 공작물 쪽에 직접 로드셀을 설치하는 것보다 신호선들의 간섭이나 파손을 최소화 시킬 수 있다. 둘째로, 스핀들 회전수나 베어링 온도를 모니터링 하여 사용자들에게 유익한 정보를 알려줄 수 있다. 셋째로, 절삭 가공량이 적어도 로드셀 신호를 적절히 처리하면 공구마모나 스핀들 진동도 모니터링 할 수 있다. 넷째, 개발된 치 가공기는 최대 $30 \mu\text{m}$ 의 가공오차를 갖는다.

References

- [1] K. H. Song, D. Y. Lee, "The state of the art in monitoring technology of machine operation", *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol.35, No.3, pp.293-304, March 2018. DOI: <https://doi.org/10.7736/KSPE.2018.35.3.293>
- [2] M. Rizal, J. A. Ghani, M. Z. Nuawi, C. H. C. Haron, "Development and testing of an integrated rotating dynamometer on tool holder for milling process", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol.52, pp.559-576, Feb. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2014.07.017>
- [3] J. H. Shin, J. W. Youn, "Chatter monitoring in head-tilting 5-axis machining centers using an accelerometer signal", *J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng.*, Vol.27, No.2, pp.132-139, March 2018. DOI: <https://doi.org/10.7735/ksmte.2018.27.2.132>
- [4] M. S. H. Bhuiyan, I. A. Choudhury, M. Dahari, "Monitoring the tool wear, surface roughness and chip formation occurrences using multiple sensors in turning", *Journal of Manufacturing Systems*, Vol.33, No.4, pp.476-487, Oct. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2014.04.005>
- [5] K. H. Song, D. Y. Lee, K. H. Park, J. H. Kim, Y. J. Choi, "Cutting force estimation using feed motor drive current in cutting process monitoring", *Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol.37, No.11, pp.803-812, Nov. 2020. DOI: <https://doi.org/10.7736/JKSPE.020.094>
- [6] T. G. Kim, K. W. Shin, S. W. Lee, "Vision based on-machine measurement of flank wear in drill tool for smart machine tool", *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol.35, No.2, pp.145-149, Feb. 2018. DOI: <https://doi.org/10.7736/KSPE.2018.35.2.145>

[7] S. M. Jang, S. I. Lee, "A Study on the Vibration Parameters for High Speed Face Milling Machining", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.14, No.9, pp. 4149-4155, 2013.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2013.14.9.4149>

[8] J. S. Kong, "Optimization of the Tool Life Prediction Using Genetic Algorithm", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.19, No.11, pp.338-343, 2018.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2018.19.11.338>

[9] J. A. Duro, J. A. Padget, C. R. Bowen, H. A. Kim, A. Nassehi, "Multi-sensor data fusion framework for CNC machining monitoring", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol.66, pp.505-520, Jan. 2016.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2015.04.019>

[10] J. D. Kim, Y. H. Ji, M. C. Yoon, "Chatter detection in end-milling using stochastic variables", *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, Vol.28, No.4, pp.246-252, 2019.
DOI: <https://doi.org/10.7735/ksmte.2019.28.4.246>

[11] Spindle Manual, *Jager GmbH*, No. of Item 10303048, 2014.

[12] W. S. Heo, Company standards: performance test of dental crown machine, *Kohmatic Korea Co. Ltd.*, 2022.

허 우 석(Woo-Seok Heo)

[정회원]



- 2020년 2월 : 한국공학대학교 기계시스템공학 (공학박사)
- 2006년 1월 ~ 현재 : (주)코마텍코리아 대표이사
- 2012년 2월 ~ 현재 : 도이슐레코리아유한회사 대표이사
- 2017년 4월 ~ 현재 : (주)코마텍코리아 기술연구소 연구소장

<관심분야>

기계요소부품, 정밀기계

이 종 향(Jong Hang Lee)

[정회원]



- 1990년 2월 : 연세대학교 기계공학 학과 (기계공학석사)
- 1994년 8월 : 연세대학교 기계공학 학과 (기계공학박사)
- 1987년 1월 ~ 1997년 10월 : 한국생산기술연구원 선임연구원
- 1998년 1월 ~ 현재 : 한국공학대학교 기계공학과 교수

<관심분야>

제조공정, 정밀기계