

밀링가공에서 효과적인 chatter진동 판별을 위한 신호 획득

조문호^a, 김혁^a, 구준영^a, 이종환^b, 김정석^{c*}

Signal Acquisition for Effective Prediction of Chatter Vibration in Milling Processes

M. H. Jo^a, H. Kim^a, J. Y. Koo^a, J. H. Lee^b, J. S. Kim^{c*}^a School of Mechanical Engineering, Pusan National Univ., Jangjeon 2-dong, Geumjeong-gu, Busan, 609-735, Republic of Korea^b Dept. of Mechatronics Engineering, Korea Polytechnic Air Colleges, Igeum-dong, Sacheon-si, Gyeongsangnam-do, 664-708, Republic of Korea^c School of Mechanical Engineering, ERC/NSDM, Pusan National Univ., Jangjeon 2-dong, Geumjeong-gu, Busan, 609-735, Republic of Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received	8	May	2014
Revised	20	June	2014
Accepted	24	June	2014

Keywords:

Chatter vibration
Tool passing frequency
Accelerometer
Microphone
AE sensor

ABSTRACT

This paper proposes a method to predict chatter vibration generated in milling processes and to enhance machining quality and surface finish. Chatter vibration is a common problem in the milling of thin walls and floors. It causes a poor surface finish, or even marks, to appear on the final machined surface. Therefore, an effective method is necessary to predict chatter vibration in machine tools. In this investigation, chatter vibration is measured by an accelerometer, microphone, and Acoustic Emission (AE) sensor in a machining operation. Based on the results of the experiment, a microphone can be applied for the prediction of chatter vibration in milling processes.

1. 서론

공작기계의 공정운영 중 공구와 공작물 사이의 상대진동으로 발생하는 chatter진동은 제품의 표면건전성을 저하시키고 절삭부하를 증가시켜 생산성을 감소시킨다. 또한 chatter진동의 발생이 지속되었을 경우 공작기계의 구동계의 피로도를 증가시켜 장비수명을 단축시킬 수 있게 된다. 이에 chatter진동의 발생을 예측하고 제어하기 위해 사전에 가공시스템의 동특성을 파악하고 안정선도를 작성하여 절삭조건을 선정하는 방법등이 연구되어왔다^[1,2]. chatter진동의 발생은 공작물 표면상의 나타나는 chatter무늬나 특유의 소음, 진동 그리고 절삭력의 변화 등으로 판단할 수 있다^[3]. 밀링머신에서 chatter진

동의 발생은 구조적으로 낮은 강성을 가지는 공구와 홀더, 스피들이 이루는 가공 시스템의 동특성에 영향을 주로 받으므로^[4,5] 실제 가공이 이루어지는 공구 팁에서 해머 가진 시험을 통한 주파수응답 함수(Frequency response function, FRF)을 통해 동특성을 파악하여^[6] 스피들 회전속도와 절삭깊이로 나타내어지는 안정선도를 얻게 된다^[7,8]. 그러나 가진실험을 통한 주파수응답을 알기 위해서는 정확하고 섬세한 작업이 요구되어지고 항상 일정한 주파수응답을 얻기가 어렵다. 이에 공구 팁에 가진 실험시 그 정확도를 증가하기 위한 방안이 정립될 필요가 있다.

기존의 연구에서는 절삭력의 변화 및 진동변위를 관측하기 위해 공구동력계 및 가속도계를 이용하여 chatter진동을 판별하는 방법을

* Corresponding author. Tel.: +82-51-510-3079

Fax: +82-51-518-7207

E-mail address: juskim@pusan.ac.kr (Jeong Suk Kim).

주로 사용하였다⁹⁾. 그러나 가속도계나 공구동력계의 경우 소재나 공구에 부착되어야 하기 때문에 사용의 제약이 따른다. 본 연구에서는 마이크로폰과 AE(Acoustic Emission)센서를 이용한 음압신호를 통해 채터진동을 판별하고자 한다. 채터진동의 판별 및 검출에 있어 먼저 가공시스템의 고유진동수 확인을 위한 가진 실험을 실시하고 가속도계, 마이크로폰, AE센서를 이용한 채터진동의 판별 가능성을 살펴본다. 이를 통해 절삭공정 중에 채터진동을 효과적으로 감지할 수 있는 센서의 적용 여부를 파악하고자 한다.

2. 채터진동 검출 실험

2.1 실험장치

밀링가공에서 채터진동 검출 실험을 위해 Fig. 1과 같이 장치를 구성하였다. 채터진동 검출에 이용된 공작기계로서 Makino V55 고속가공기를 사용하였으며, 실험에 사용된 공구는 YG-1사의 2날의 직경 6 mm인 텅스텐카바이드 공구를 사용하였다. 가속도 신호는 Bruel & Kjaer사의 Type 4384 가속도계를 사용하였고, 음압 신호는 Bruel & Kjaer사의 Type 4189 마이크로폰을 사용하였다. 이때 외부의 소음을 최대한 방지하기 위해 공작기계의 내부에 마이크로폰을 설치하였다. 또한 PAC 타입의 AE센서를 사용하여 AE 신호를 획득하였다. 공작물은 평판 형태의 AISI D2 소재를 사용하였으며 센서에 의해 입력된 신호는 NI사의 Labview 2012 프로그램을 기반으로 출력되도록 시스템을 구성하였다.

채터진동은 진동이 일어나는 곳의 고유진동수 근처에서 일어나는 특성을 가지므로 채터검출 실험에 앞서 주파수응답특성을 파악하였다. 가공시스템의 고유진동수를 파악하기 위하여 가진실험을 실시하였고 실험을 위한 장치는 주축선단 부위에 가속도계를 부착하고 실제 가공이 일어나는 공구날 끝부분을 가진하여 실시하였다. 가속도계의 부착위치는 Fig. 2과 같이 부착하였는데 그 위치가 변

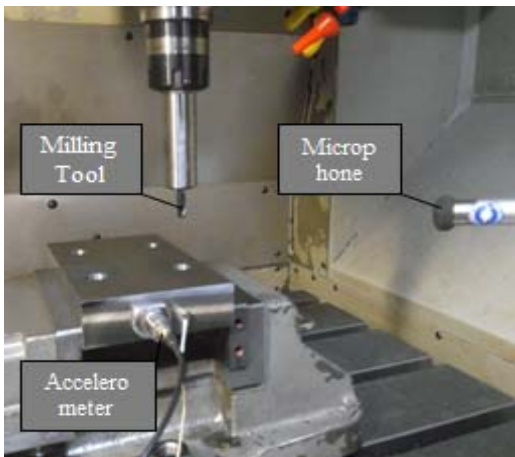


Fig. 1 Experimental setup

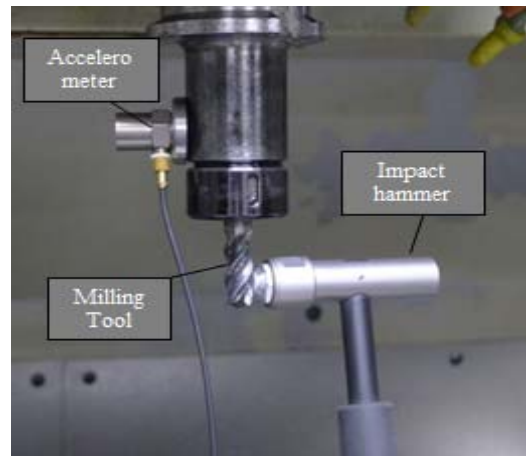


Fig. 2 Modal test setup

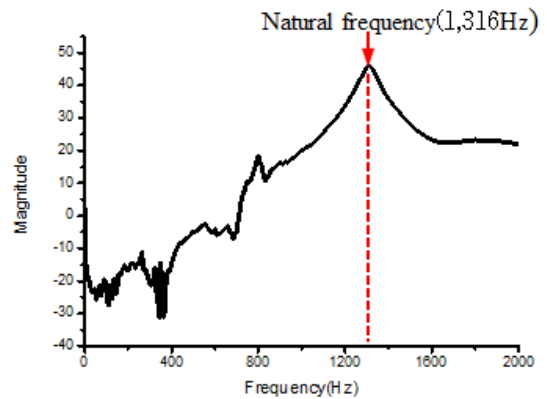


Fig. 3 Frequency Response Function

하더라도 동특성이 일관된 결과를 얻었으므로 비교적 부착하기 쉬운 위치를 선정하였다. Impact hammer로 공구날 끝부분을 10회 가진하였고 10회의 결과를 평균하여 주파수 응답을 파악하였다. 또한 NI사의 Lab View 2012 프로그램을 이용해 주축에 가해지는 Impact hammer의 입력신호와 가속도계의 응답신호를 실시간으로 얻을 수 있는 프로그램을 제작하여 Fig. 3와 같이 주파수응답특성을 나타내었으며, 고유진동수 1,316 Hz를 확인하였다.

2.2 실험방법

평판 형태의 소재를 Slotting 가공으로 절삭실험을 실시하였으며 절삭실험에 사용된 절삭 조건은 Table 1에 나타내었다.

절삭조건 선정시 채터진동의 발생은 절삭깊이 및 스피들의 회전 속도에 가장 큰 영향을 받으므로 날당이송을 0.01으로 고정한 후

Table 1 Cutting conditions

Spindle Speed (rpm)	4,000, 6,000, 8,000, 10,000
Feed per Tooth (mm)	0.01
Depth of Cut (mm)	1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6, 1.7

스핀들의 회전속도를 4가지 수준에서 선정하였고, 절삭깊이를 1.1 ~1.7 mm까지 선정하여 각각의 실험을 실시하였다. 또한 채터진동의 발생에 영향을 미치는 공구의 장착길이는 모두 일정한 조건으로 정하였다. 가공시 발생하는 채터진동의 판별은 가공 후 가공물의 표면을 관측하여 채터무늬의 유무를 가지고 판별하거나 가속도신호, 음압신호, AE신호를 각각 FFT(Fast Fourier Transform) 분석하여 판별하였다. 또한 채터무늬의 관찰 결과와 신호 분석을 통한 채터진동의 판별결과를 각 센서별로 비교하여 그 정확성을 검증하였다. 안정적인 가공 시에는 Tool passing frequency(TPF)의 주파수 영역에서 그 진폭이 가장 크게 발생하는 특징을 가지고 있다. 따라서 FFT 분석시 고유진동수 부근에서 TPF의 배수가 아닌 주파수가 그 진폭이 급격히 증가할 때 채터진동이 발생한 것으로 판별하였다.

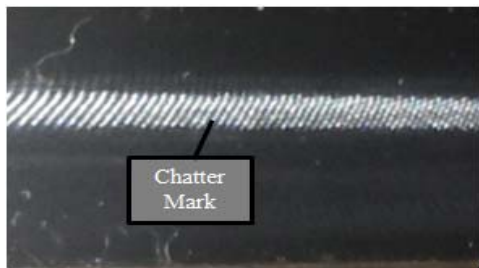
2.3 실험결과

절삭실험 결과 채터진동 발생시 Fig. 4와 같이 가공면에서 그 차이를 보였다. 정상적인 가공면에 비해 채터진동이 발생한 면에서는 선명한 채터무늬를 관측할 수 있다.

주축 스핀들 속도 6,000 rpm에서 가속도계를 통해 얻어진 신호를 주파수영역으로 변환 후 결과를 Fig. 5와 같이 나타내었다. 절삭깊이 1.1 mm에서는 TPF에서 가장 큰 진폭값을 가졌으며 절삭깊이 1.5 mm인 실험에서는 1,576 Hz에서 절삭깊이 1.1 mm에 TPF의 진폭과 비교하여 약 9배 가량 큰 진폭 값을 가지는 것을 관측할 수 있었다. 1,576 Hz는 TPF의 배수가 아닐 뿐만 아니라 고유진동수 값인 1,316 Hz 부근의 값이므로 채터진동의 특성과 부합하여 채터진동으로 판별하였다.

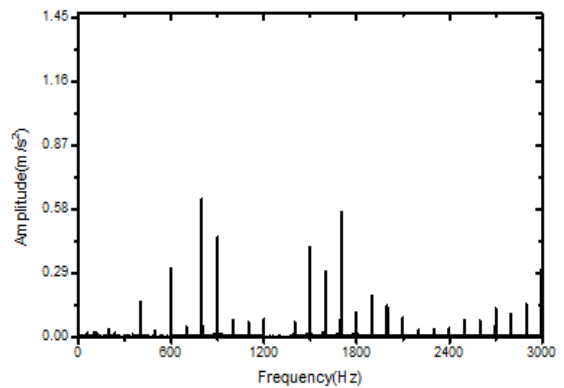


(a) Stable cutting

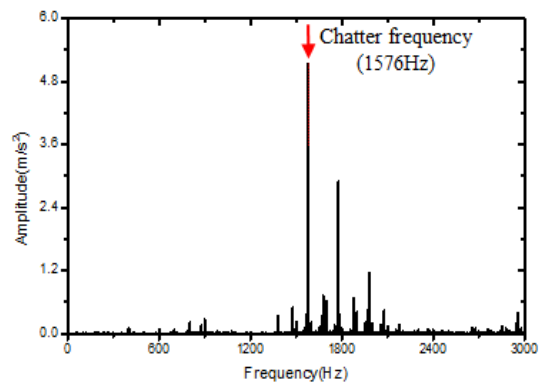


(b) Unstable cutting

Fig. 4 Machined surface according to cutting condition

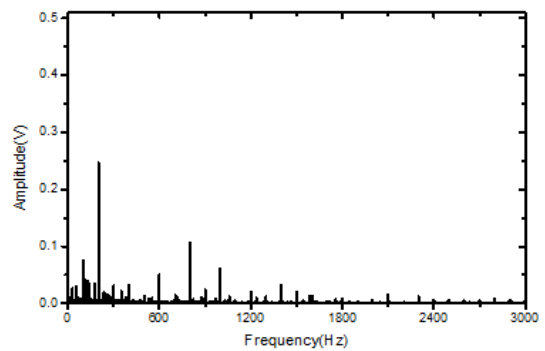


(a) depth of cut 1.1 mm

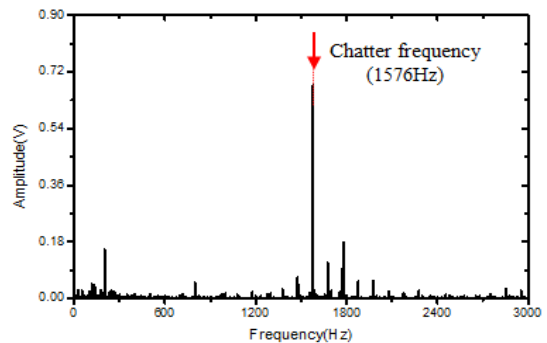


(b) depth of cut 1.5 mm

Fig. 5 Results of FFT Analysis with Accelerometer with 6,000 rpm

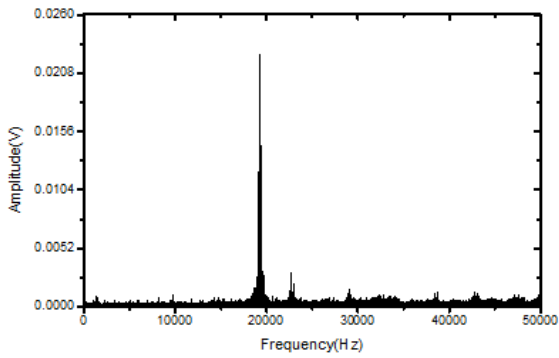


(a) depth of cut 1.1 mm

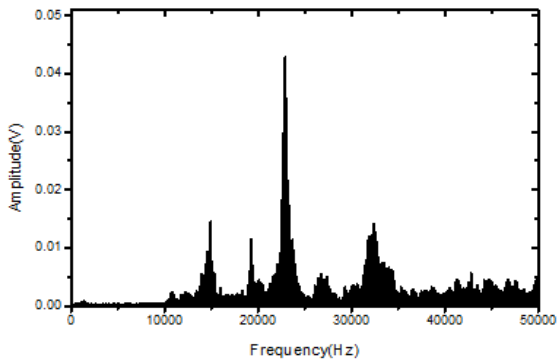


(b) depth of cut 1.5 mm

Fig. 6 Results of FFT Analysis with Microphone with 6,000 rpm

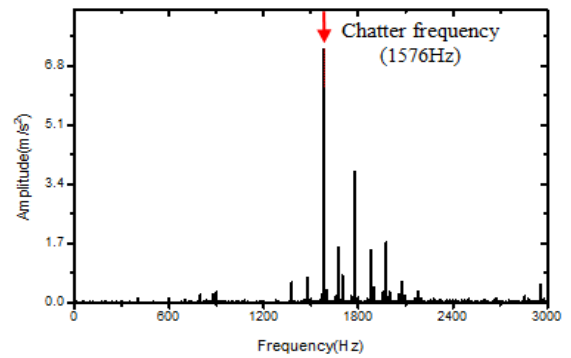


(a) depth of cut 1.1 mm

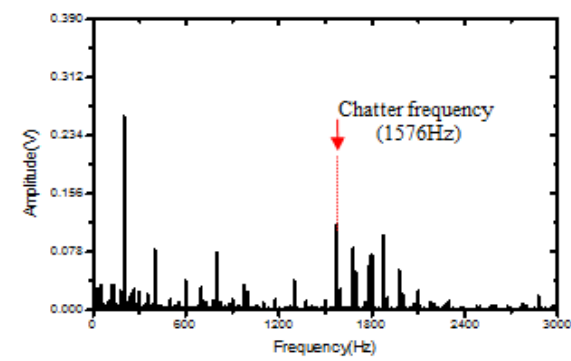


(b) depth of cut 1.5 mm

Fig. 7 Results of FFT Analysis with AE signal with 6,000 rpm



(a) Accelerometer



(b) Microphone

Fig. 8 Comparison of FFT Results in depth of cut 1.7 mm

마이크로폰을 이용한 음압신호의 FFT 분석결과를 Fig. 6에 나타내었다. 절삭깊이 1.1 mm에서 TPF인 200 Hz에서 진폭이 가장 큰 결과를 얻었다. 같은 실험조건에서의 가속도계에서 FFT결과와 비교하여 보았을 때 가속도계에서는 TPF 단일 주파수영역에서만 가장 큰 진폭값을 가지는 것에 비해, 마이크로폰의 경우 TPF의 배수영역에서도 진폭값이 상대적으로 크게 가지는 것을 확인하였다. 이는 안정적인 가공에서 마이크로폰을 이용한 FFT 특성으로 사료되며 가속도계에 비하여 TPF의 배수영역에서 더 큰 진폭값을 가질 수 있음을 확인하였다. 이는 모두 TPF의 배수영역에서 나타내었으므로 안정적인 가공으로 판별하였다. 절삭깊이 1.5 mm에서는 가속도계와 동일하게 1,576 Hz에서 가장 큰 진폭값을 가지는 것을 확인하였고, 가속도계와 FFT 결과 역시 유사함을 보였다.

Fig. 7에서는 AE 센서를 통한 신호의 FFT결과를 나타내었다. 절삭깊이 1.1 mm에서는 19,000 Hz대역의 주파수가 검출이 되었고 절삭깊이 1.5 mm에서는 22,000 Hz대역에서 새로운 주파수가 검출되었다. 이러한 결과를 토대로 각각의 실험조건에서 채터진동을 판별하였으나, 이 주파수값은 실제 채터주파수값과는 거리가 멀고 그 경향성도 불명확하여 채터진동 검출에 어려움이 있다.

Fig. 8은 절삭깊이 1.7 mm인 절삭실험에서 마이크로폰과 가속도계 신호의 FFT 결과를 각각 나타내고있다. 가속도계의 경우 1.7

Table 2 Results of experiments for chatter vibration

DOC \ RPM	4,000			6,000			8,000			10,000		
	Mic	ACC	AE	Mic	ACC	AE	Mic	ACC	AE	Mic	ACC	AE
1.7	x	x	x	x	o	x	o	o	o	o	o	o
1.6	x	x	x	o	o	o	o	o	o	o	o	o
1.5	x	x	x	o	o	o	o	o	o	o	o	o
1.4	x	x	x	o	o	o	o	o	o	o	o	o
1.3	x	x	x	o	o	o	x	o	o	o	o	o
1.2	x	x	x	o	o	o	x	o	o	x	o	o
1.1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Sensor	Mic	ACC	AE	Mic	ACC	AE	Mic	ACC	AE	Mic	ACC	AE

Mic: Microphone o Chatter Occur
 Acc: Accelerometer x No Chatter
 AE: Acoustic Emission

mm에서도 신호상에서 채터진동 특성이 나타났으며 이는 가공면의 채터무늬 발생과도 잘 일치하는 모습을 보였다. 그러나 마이크로폰의 경우 절삭깊이 1.7 mm에서는 TPF가 가장 큰 진폭 값을 갖는 것을 알 수 있다. 이는 외부 외란요소(소음, 다른 장비의 시동) 등에 의한 것으로 판단된다. 그러나 Table 2에서 가공조건 별 채터진동 판별 결과를 정리하여 나타낸 결과 가속도계와 마이크로폰의 채터주파수 및 진폭의 특성이 90% 이상 일치하였다.

3. 결론

밀링가공에서 chatter 판별시 이용할 수 있는 센서로 가속도계, 마이크로폰, AE센서를 이용하여 chatter진동 판별실험을 수행한 결과로 다음과 같은 결론을 얻었다.

AE센서 신호는 정확한 chatter주파수 값을 얻기 힘들고 그 경향성이 불명확하여 chatter판별에는 사용하기 어려운 것으로 사료되었으며, 마이크로폰의 경우 chatter주파수 측정값과 chatter진동 발생시 진폭의 특성이 가속도계와 비교하여 90% 이상 일치하는 결과를 얻었다. 따라서 적절한 외부 소음 차단 및 신호처리가 이루어질 때 가속계를 대신하여 마이크로폰으로도 충분히 chatter진동의 판별이 가능할 것으로 보인다.

후 기

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었습니다.

References

- [1] Guillem, Q., Joaquim, C., 2011, Chatter in machining processes: A review, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 51:5 363-376.
- [2] Hiromitsu, M., Toru, Y., 2012, Tracing and Visualizing Variation of Chatter for In-Process Identification of Preferred Spindle Speeds, *Procedia CIRP* 4 11-16.
- [3] Arkadiusz, P., Bartosz P., Krzy, S. M., Stefan D., Marcin, H. M., 2013, Active vibration control in milling flexible workpieces, *Journal of Vibration and Control* 19:7 1103-1120.
- [4] Gagnola, V., Bouzgarrou, B.C., Ray, P., Barra, C., 2007, Model-based chatter stability prediction for high-speed spindles, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 47 1176-1186.
- [5] Kecik, K., Rusinek, R., Warminski, J., Weremczuk, A., 2012, Chatter control in the milling process of composite materials, *Journal of Physics: Conference Series* 382 012012.
- [6] Shin, S. B., Lee, H. H., Kim, J. S., Kim, J. Y., Yang, M. Y., 2010, A Study on Chatter Stability of High Speed Spindle, *Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers* 19:3 340-345.
- [7] Hamed, M., Gholamreza, V., Mohammad R. M., 2013, Experimental dynamic modelling of peripheral milling with process damping structural and cutting force nonlinearities, *Journal of Sound and Vibration* 332 4709-4731.
- [8] Krzysztof J. K., Marek A. G., 2011, Chatter vibration surveillance by the optimal-linear spindle speed control, *Mechanical Systems and Signal Processing* 25 383-399.
- [9] Kim, M. K., 2001, Diagnosis of Chatter Vibration using Frequency Domain in a Milling Process, *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers* 10:3 12-18.