

< 학술논문 >

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2015.39.9.839>

ISSN 1226-4873(Print)
2288-5226(Online)

절삭력 진동 분석에 의한 가공조건 모니터링[§]

박춘광* · 김주완* · 김진오*† · 신요안**

* 송실대학교 기계공학과, ** 송실대학교 전자정보공학부

Monitoring Machining Conditions by Analyzing Cutting-Force Vibration

Chunguang Piao^{*}, Ju Wan Kim^{*}, Jin Oh Kim^{*†} and Yoan Shin^{**}

* Dept. of Mechanical Engineering, Soongsil Univ., ** School of Electronic Engineering, Soongsil Univ.

(Received March 28, 2015 ; Revised July 30, 2015 ; Accepted August 4, 2015)

Key Words: Cutting Force(절삭력), Vibration(진동), Milling Machining(밀링가공), Monitoring(모니터링), Frequency(진동수)

초록: 본 논문은 밀링가공에서 측정되는 절삭력 진동을 분석함으로써 가공조건을 모니터링하는 실험적 기술을 다룬다. 이 기술은 앞서 보고된 절삭력 진동의 이송속도 및 절삭깊이와의 관계에 근거한다. 측정 시스템은 동적 힘 센서와 신호 증폭기로 구성되고, 분석 시스템은 오실로스코프와 LabVIEW 프로그램을 갖춘 컴퓨터를 포함한다. 가공조건 중 회전속도를 일정하게 하고 이송속도와 절삭깊이를 변화시키며 실험하였다. 절삭날 수와 회전 진동수의 곱에 해당하는 절삭력 진동 성분의 크기가 가공조건과 선형으로 관계되었다. 이로써 이송속도와 절삭깊이 중 한 가지 가공조건을 알 때 절삭력 진동 분석을 통해 다른 한 가지 가공조건을 확인할 수 있다.

Abstract: This paper deals with an experimental technique for monitoring machining conditions by analyzing cutting-force vibration measured at a milling machine. This technique is based on the relationship of the cutting-force vibrations with the feed rate and cutting depth as reported earlier. The measurement system consists of dynamic force transducers and a signal amplifier. The analysis system includes an oscilloscope and a computer with a LabVIEW program. Experiments were carried out at various feed rates and cutting depths, while the rotating speed was kept constant. The magnitude of the cutting force vibration component corresponding to the number of cutting edges multiplied by the frequency of rotation was linearly correlated with the machining conditions. When one condition of machining is known, another condition can be identified by analyzing the cutting-force vibration.

1. 서 론

사물인터넷(IoT, Internet of Things) 시대가 되어, 다양한 곳에서 감지(sensing)기술에 의한 상태 모니터링이 필수화 되고 있다. 공장 자동화 분야에서는 스마트 팩토리(smart factory)로 발전해가는 과정에 있다. 이 과정에서 기계기술과 정보기술(IT)의 융합에 의해 ‘M2M 기반 지능형 자율생산기계

연구’가 진행되었다.⁽¹⁾ 그 일환으로 machine-to-machine 통신 기술을 생산기계에 적용하여, 밀링가공 중 절삭력 진동을 측정하여 가공공정을 모니터링하는 연구가 보고된 바 있다.⁽²⁾ 이 연구 결과를 기반으로 하여 가공조건을 모니터링 하는 기술을 개발하는 게 필요하다.

앞선 연구에서, 밀링가공 중 절삭력의 진동을 측정하고 분석하여 가공 파라미터와의 관계를 확인하고, 측정된 진동 신호를 분석 장치로 전송할 때 유선 방식과 무선 통신 방식을 적용하여 비교하였다.⁽²⁾ 이 연구의 결과는 이송속도 및 절삭깊이가 절삭력 진동의 크기와 선형관계가 있음을 보여준다. 밀링가공 중 특정 가공조건에서 발생하는

§ 이 논문은 2015년도 대한기계학회 동역학 및 제어부
문 춘계학술대회(2015. 5. 20-22., BEXCO) 발표논문임.

† Corresponding Author, jokim@ssu.ac.kr

© 2015 The Korean Society of Mechanical Engineers

진동은 불형 엔드밀의 수명에 큰 영향을 주므로 이를 없애기 위해 절삭력 진동을 측정하는 연구가 있었다.⁽³⁾ 보다 안정적으로 밀링가공을 진행하기 위해 절삭력 진동 측정으로 가공오차를 줄이는 연구도 보고되었다.^(4,5)

본 논문은 밀링가공 중 절삭력 진동을 측정하고 분석하여 가공조건을 모니터링하는 방법을 제시하고자 한다. 이송속도와 절삭깊이를 변화시켜 절삭력 진동을 측정한다. 측정된 절삭력 진동 신호를 LabVIEW를 통해 분석하여 가공조건과의 관계를 확인한다. 절삭날 수 및 회전 진동수와 관련된 절삭력 진동 성분의 크기와 이송속도 및 절삭깊이와의 관계를 파악하여 가공조건을 모니터링 하도록 한다.

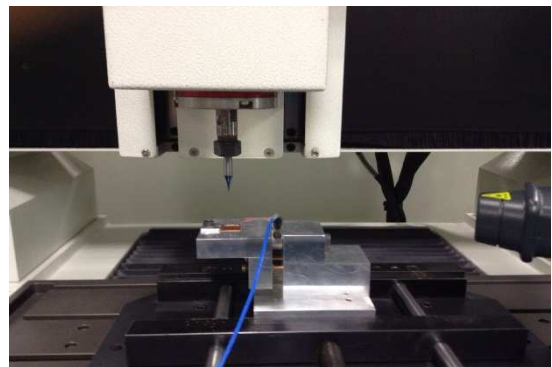
2. 절삭력 진동 측정

2.1 측정 방법

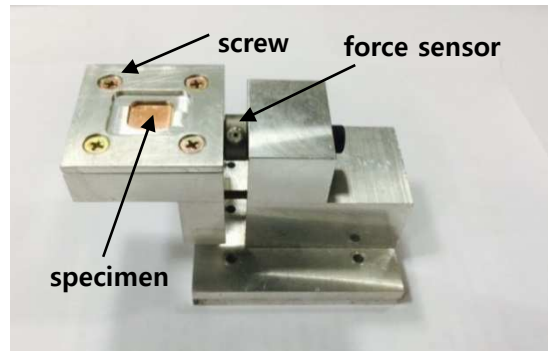
실험 장치를 측정부, 전송부, 분석부의 세 부분으로 구성하였다. 측정부에는 Fig. 1(a)와 같이 밀링머신의 회전 속도를 측정하는 부분과 피삭재로 전달되는 절삭력 진동을 측정하는 부분이 포함된다. 회전 속도를 측정하는 Tachmeter는 Sampo사의 DT6234B를 사용하였다. 절삭력 진동의 측정에서 피삭재를 고정하기 위해 Fig. 1(b)와 같이 지그를 설계하여 제작하였다. 4개의 나사를 통해 덮개 형태로 시편을 지그 본체에 고정시켰다. 피삭재에 전달되는 절삭력 진동은 힘 센서(PCB M2201B01)로 측정하였고 엔드밀의 이송방향과 같은 방향에 설치하였다. 엔드밀로는 2날 평 엔드밀(YG-1SG8A010100)을 사용하였다. 전송부에는 신호증폭기, 터미널블록, DAQ보드 등이 포함된다. 힘 센서에서 출력되는 신호는 Fig. 1(c)와 같이 차례로 신호증폭기, 터미널블록, DAQ보드를 거쳐 LabVIEW 프로그램을 갖춘 컴퓨터에 전달된다. 실험에 사용되는 신호증폭기는 B&K 사의 NEXUS 2690 모델이고 터미널블록은 NI사의 BNC-2110 모델을 사용했으며 DAQ보드는 NI사의 PCI-6013 모델을 사용하였다. 분석부는 LabVIEW 프로그램을 갖춘 컴퓨터가 포함된다. LabVIEW 프로그램으

로 절삭력 진동 측정 및 분석 데이터를 실시간으로 모니터링 할 수 있게끔 구성한다. LabVIEW 프로그램에서 신호 처리를 통해, 절삭력 진동의 크기와 주파수를 확인한다.

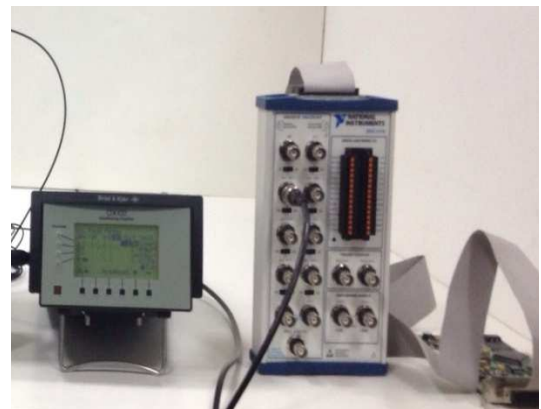
절삭력 진동으로 가공조건을 확인하기 위해 Table 1에서와 같이 회전속도를 3000 rpm 으로 고정하고 이송속도를 9단계, 절삭깊이를 7단계로 설정하였다. 이송속도와 절삭깊이의 63가지 조합에 대해 절삭력 진동 측정 실험을 진행하였다.



(a) Milling machine with force sensors



(b) Zig

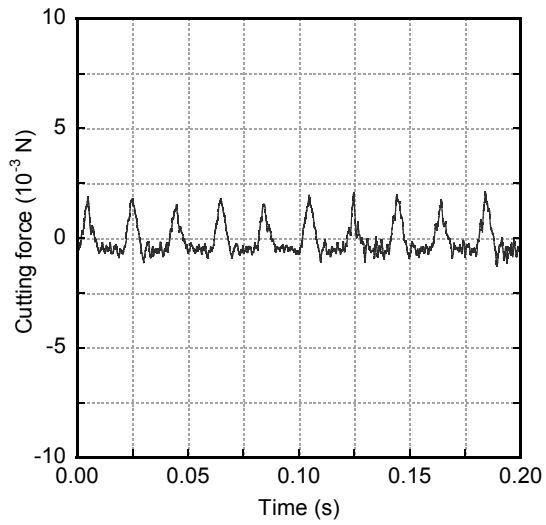


(b) Signal amplifier

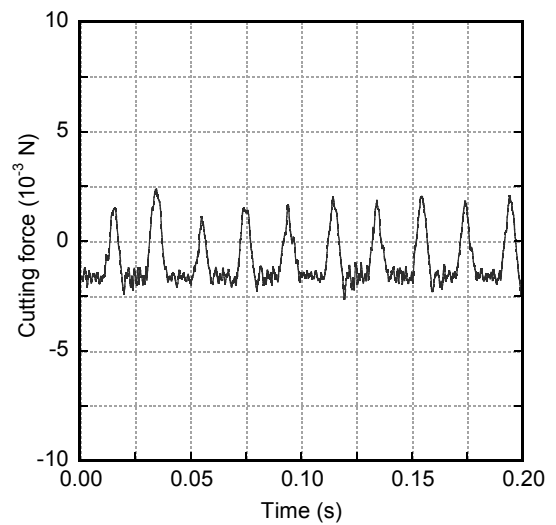
Table 1 Parameter values of milling machining

rotating speed (rpm)	3000
feed rate (mm/s)	0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9
cutting depth (μm)	30, 50, 70, 90, 110, 130, 150

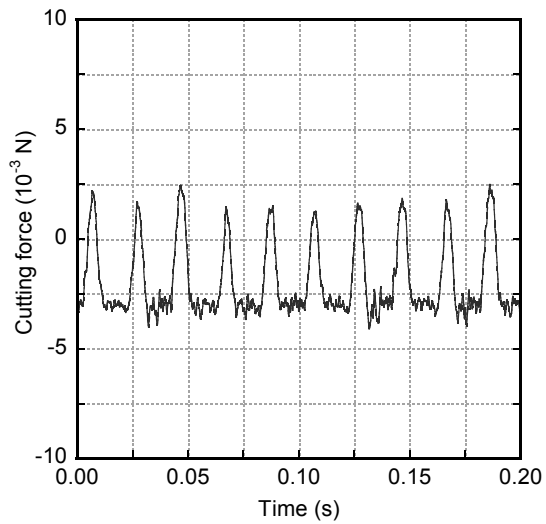
Fig. 1 Experimental set-up during milling machining



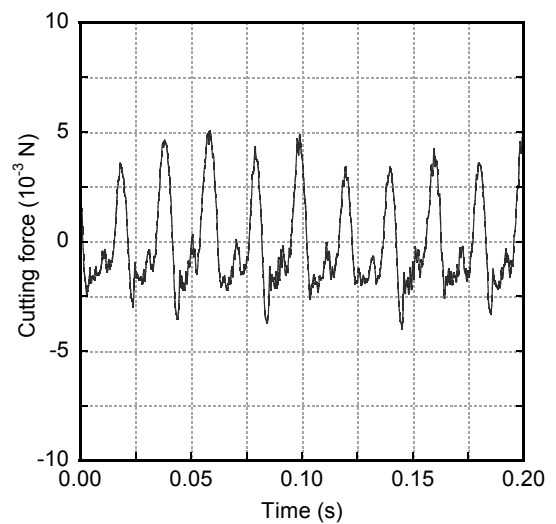
(a) 0.1 mm/s



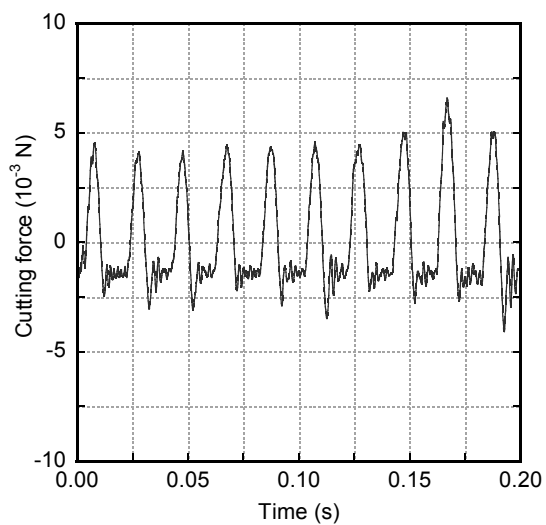
(b) 0.2 mm/s



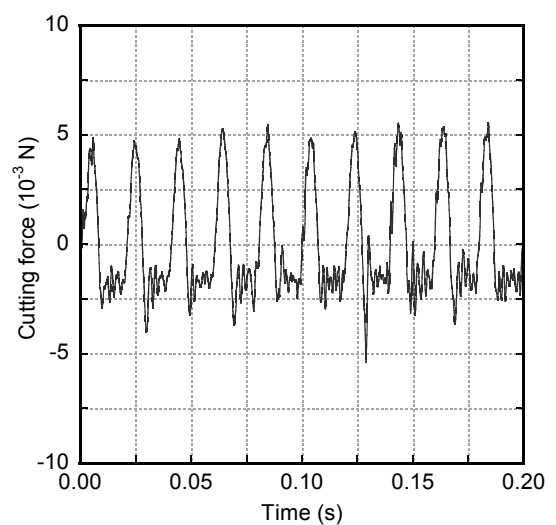
(c) 0.3 mm/s



(d) 0.4 mm/s



(e) 0.5 mm/s



(f) 0.6 mm/s

Fig. 2 Continued

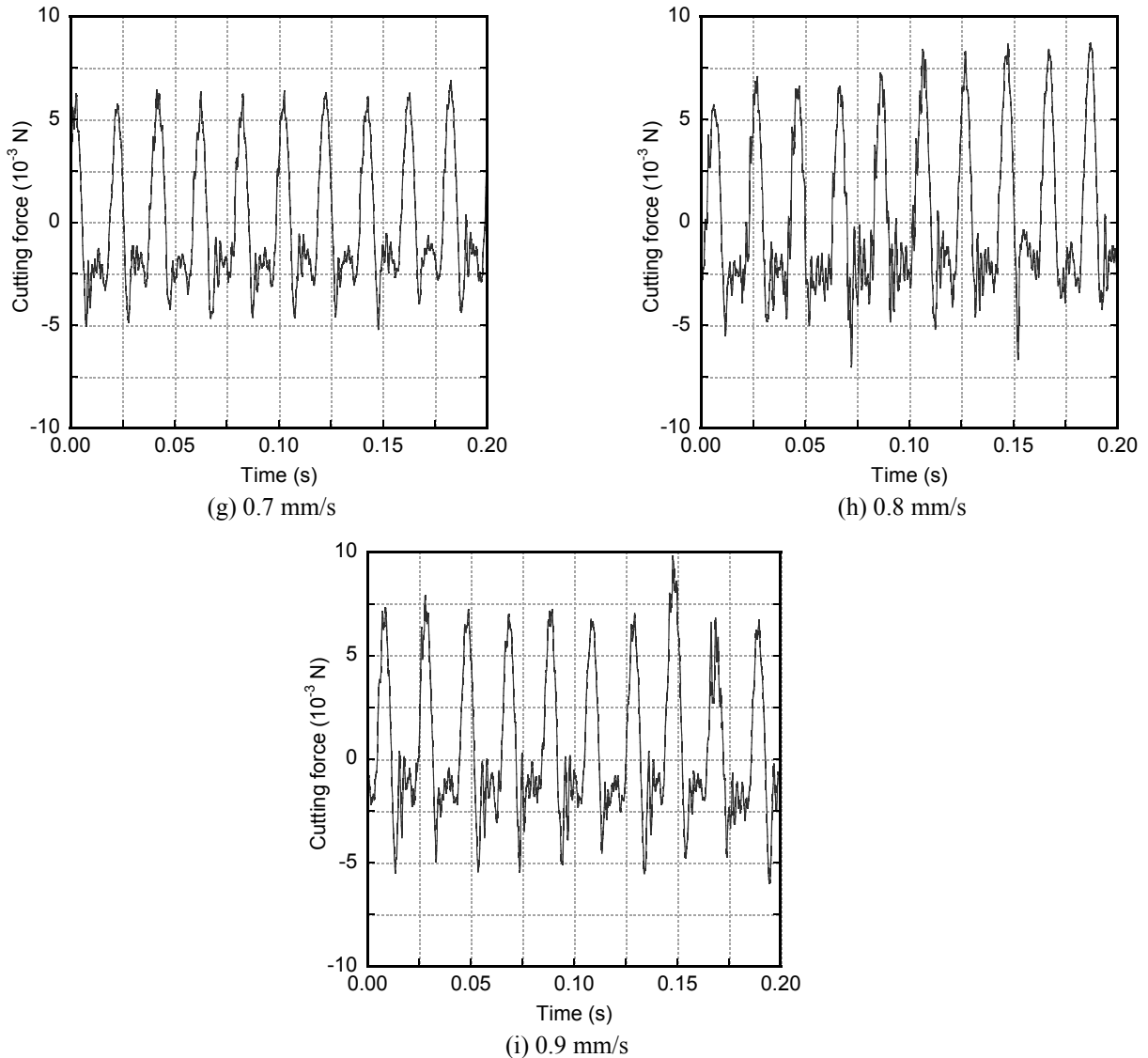


Fig. 2 Signals of cutting force measured at various feed-rates with constant cutting-depth $130 \mu\text{m}$ and rotating speed 3000 rpm

2.2 측정 결과

회전속도를 3000 rpm으로 고정하고 이송속도와 절삭깊이의 서로 다른 총 63가지 조합에 대해 절삭력 진동을 측정하였다. 절삭깊이가 $90 \mu\text{m}$ 로 일정하고 이송속도가 0.1~0.9 mm/s까지 0.1 mm/s 간격으로 측정된 절삭력 진동 신호를 Fig. 2에 나타내었다. 이송속도가 0.1 mm/s로 일정하고 절삭깊이가 30, 50, 70, 90, 110, 130, $150 \mu\text{m}$ 일 때 측정된 절삭력 진동 신호를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 2에서 알 수 있듯이 절삭깊이가 일정하고 이송속도가 증가할 때 절삭력 진동의 크기도 증가한다. Fig. 3에서 알 수 있듯이 이송속도가 일정하고

절삭깊이가 증가할 때 절삭력 진동의 크기도 증가한다. 보다 정확한 절삭력 진동 크기를 얻기 위해 LabVIEW 프로그램에서 절삭력 진동 신호에 대해 FFT 변환을 진행한다.

3. 절삭력 진동 분석

3.1 FFT 분석

힘 센서에 의해 측정된 절삭력 진동 신호의 크기와 주파수를 확인하기 위해 LabVIEW 프로그램을 사용한다. LabVIEW에 전달된 절삭력 진동신호는 Fig. 4와 같은 블랙선도를 따라 분석된다. 절삭

Table 2 Magnitude of cutting force measured at various of cutting-depths and feed-rates

feed rate (mm/s)	cutting force (10^{-3} N)							error (%)
	t = 30 μm	t = 50 μm	t = 70 μm	t = 90 μm	t = 110 μm	t = 130 μm	t = 150 μm	
0.1	0.058	0.088	0.116	0.141	0.173	0.228	0.253	5.37
0.2	0.093	0.153	0.202	0.239	0.318	0.383	0.481	4.81
0.3	0.115	0.200	0.272	0.310	0.390	0.514	0.603	4.65
0.4	0.157	0.273	0.369	0.478	0.568	0.712	0.891	4.50
0.5	0.215	0.348	0.450	0.602	0.681	0.894	1.052	4.19
0.6	0.264	0.382	0.520	0.696	0.862	1.086	1.353	6.90
0.7	0.295	0.440	0.613	0.812	1.034	1.213	1.503	4.64
0.8	0.341	0.501	0.681	0.949	1.117	1.423	1.739	5.93
0.9	0.394	0.582	0.834	1.085	1.294	1.646	2.009	5.13
error (%)	6.73	7.22	5.98	4.52	5.54	4.50	4.97	-

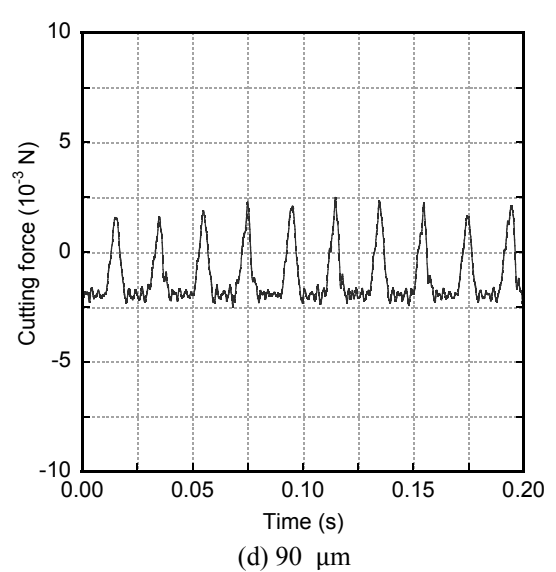
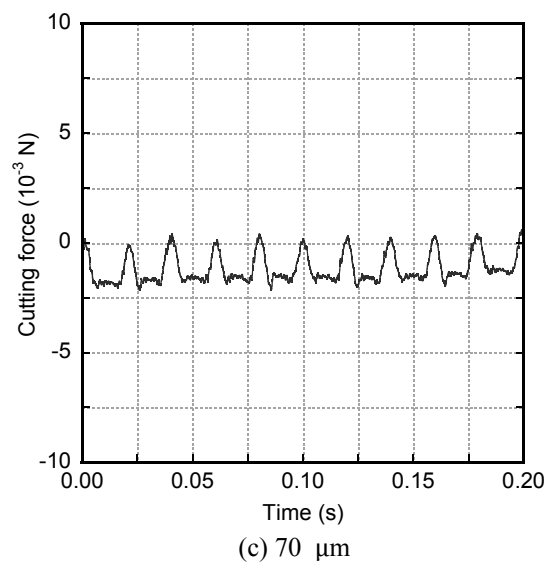
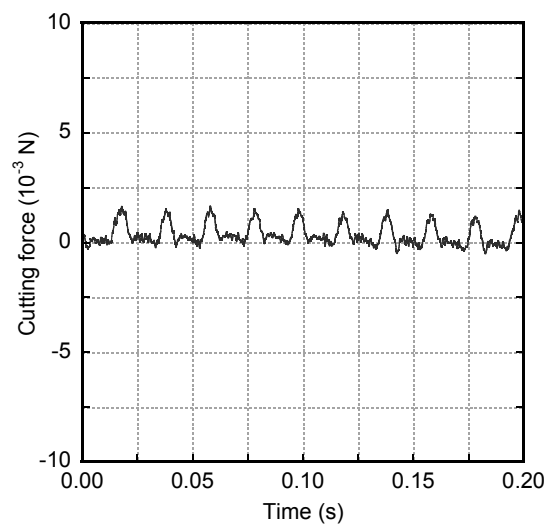
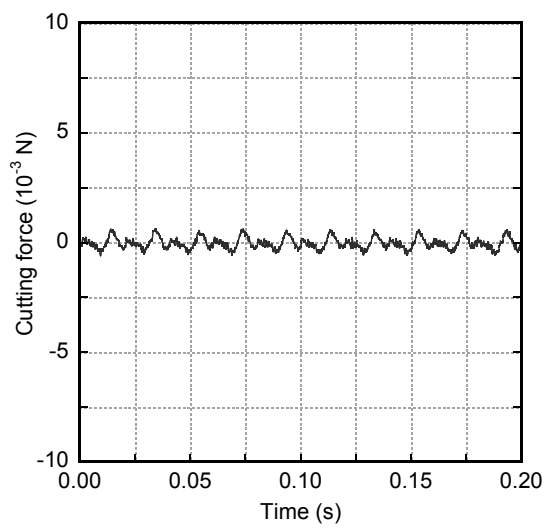


Fig. 3 Continued

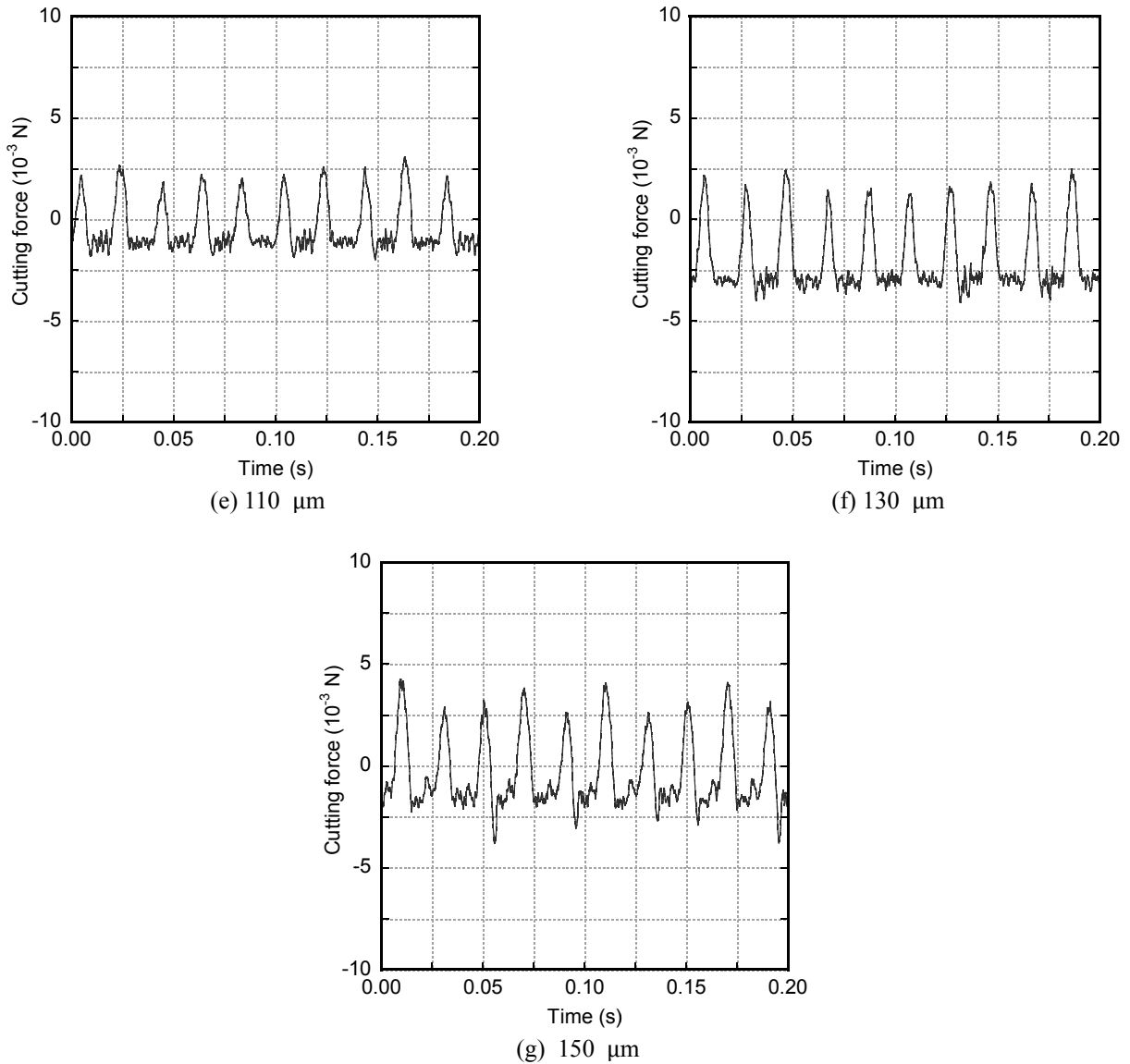


Fig. 3 Signals of cutting force measured at various cutting-depths with constant feed-rate 0.3 mm/s and rotating speed 3000 rpm

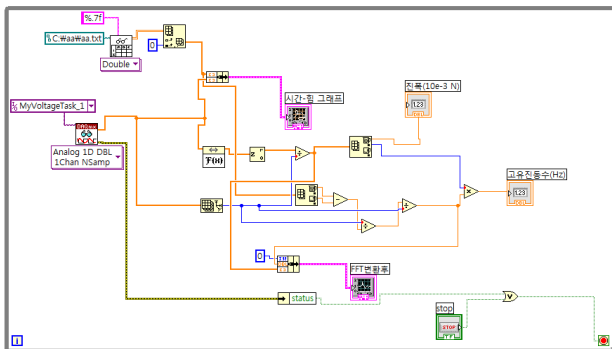


Fig. 4 Block diagram of LabVIEW for analyzing cutting force vibration

력 진동 신호의 주파수를 확인하기 위해서 FFT 분석을 진행한다. 이송속도와 절삭깊이의 63가지 조합에 대해 FFT 변환된 절삭력 진동의 크기를 Table 2에 나타냈다. Table 2에서 알 수 있다시피 이송속도와 절삭깊이가 커짐에 따라 절삭력 진동의 크기도 커진다. Fig. 5는 절삭깊이가 90 μm로 일정하고 이송속도가 0.1~0.9 mm/s까지 0.1 mm/s간격일 때 FFT 변환된 절삭력 진동의 크기를 나타낸다. Fig. 6은 이송속도가 0.1 mm/s로 일정하고 절삭깊이가 30, 50, 70, 90, 110, 130, 150 μm일 때 FFT 변환한 스펙트럼을 나타낸다. 절삭력 주파수는 회전속도에 해당하는 주파수의 n배이다. 이는 n날 엔

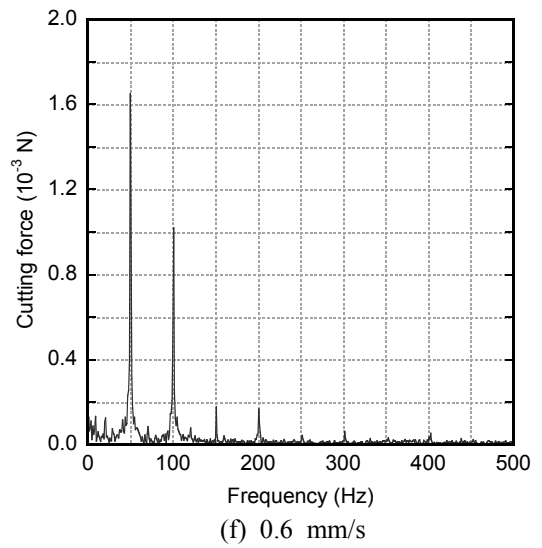
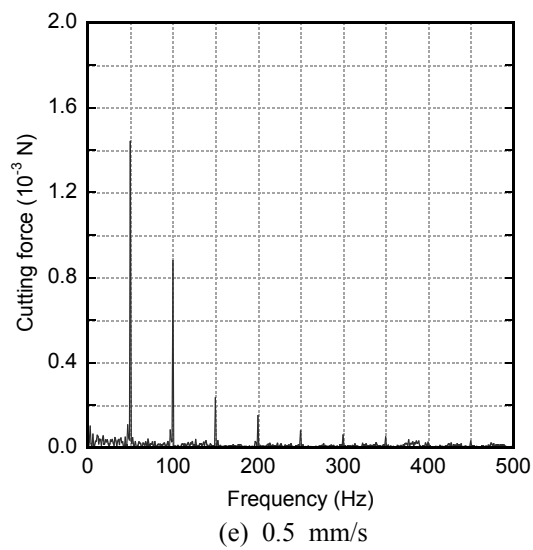
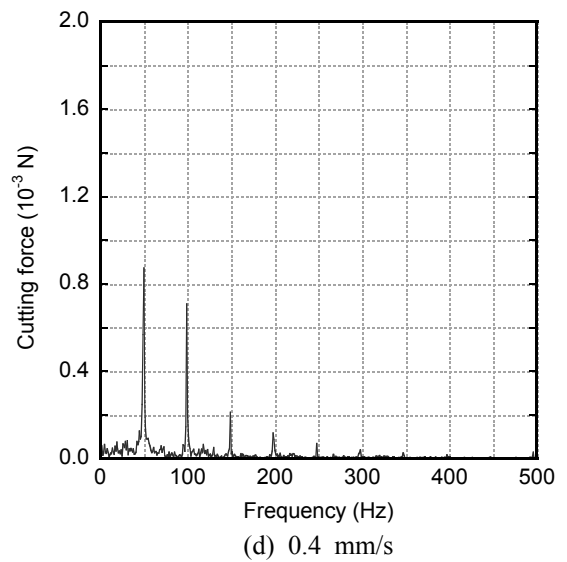
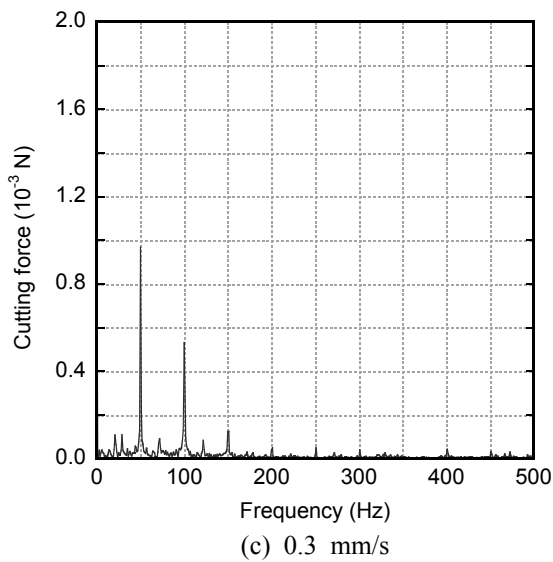
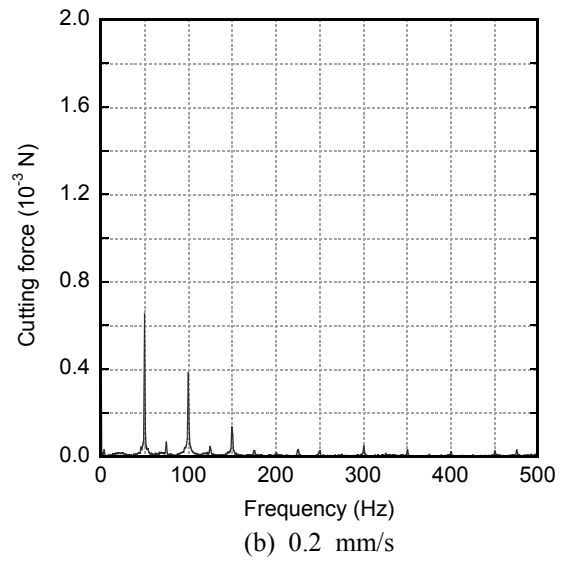
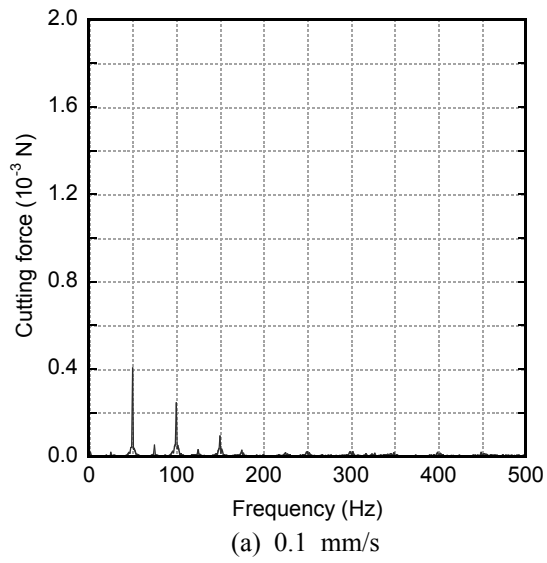


Fig. 5 Continued

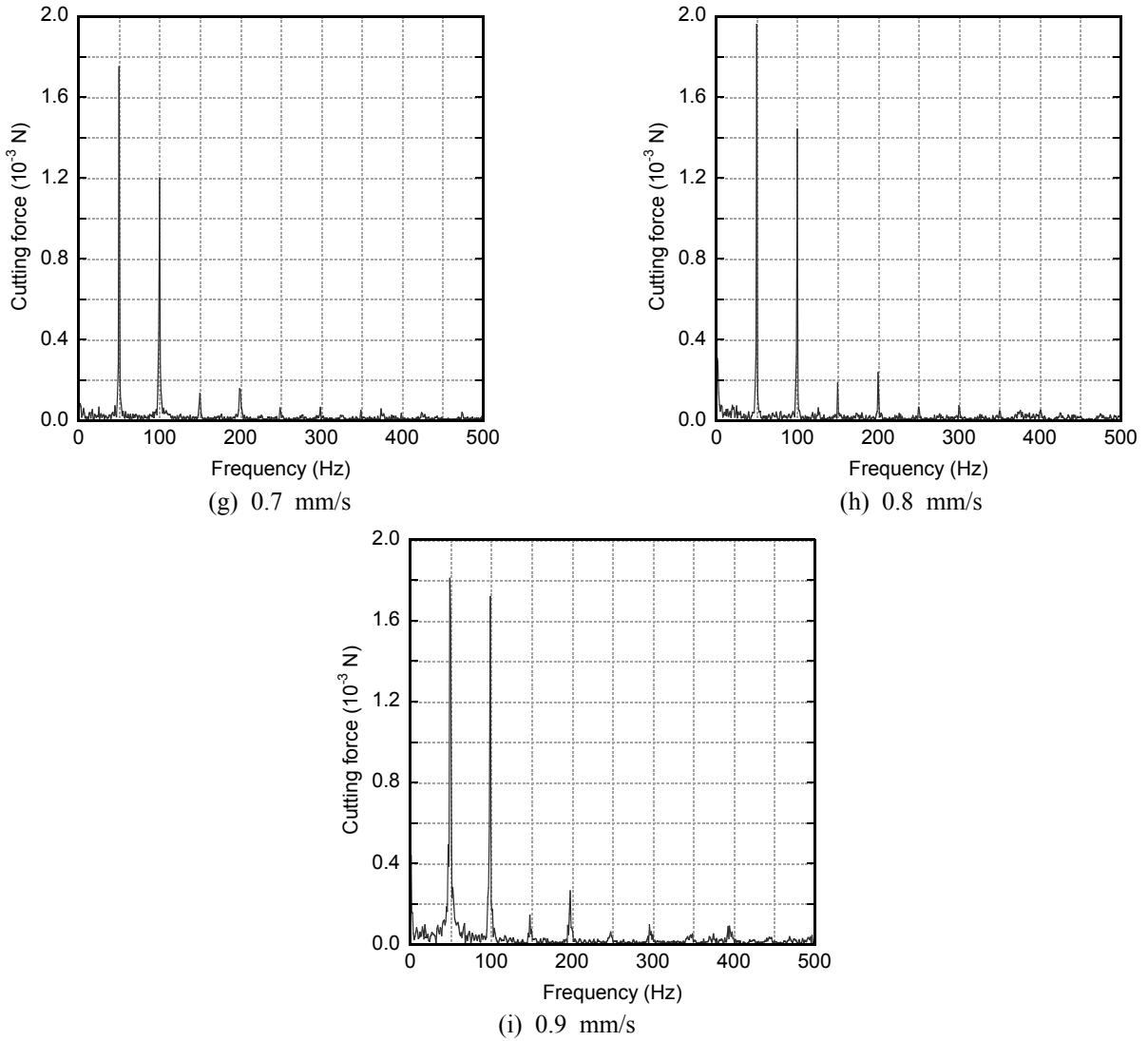


Fig. 5 Spectrums of cutting force at various feed-rates with constant cutting-depth 130 μm and rotating speed 3000 rpm

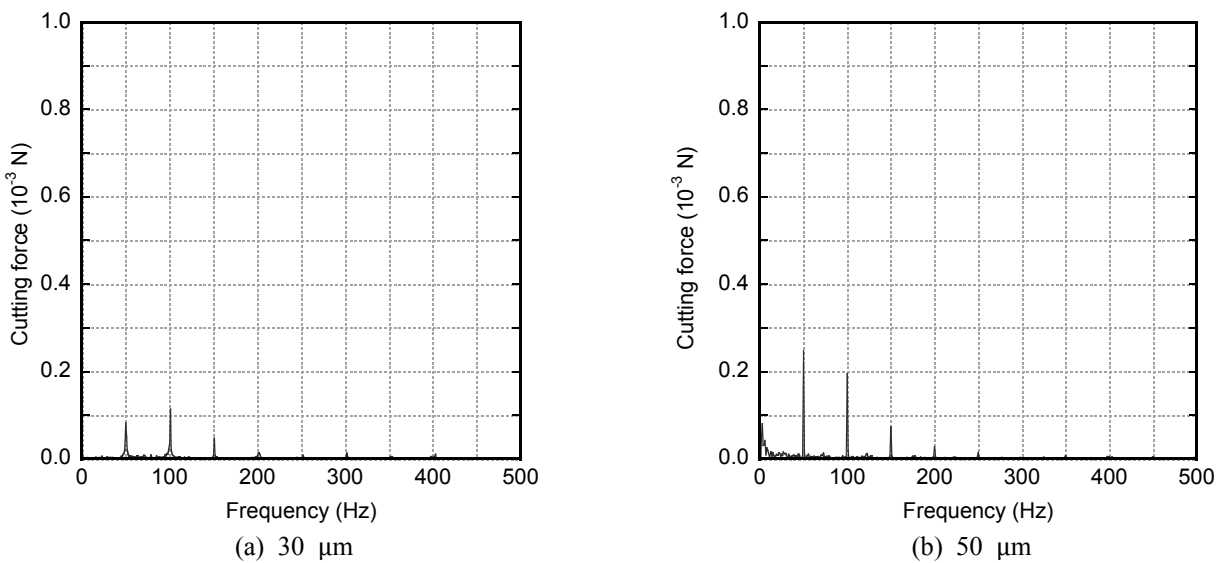
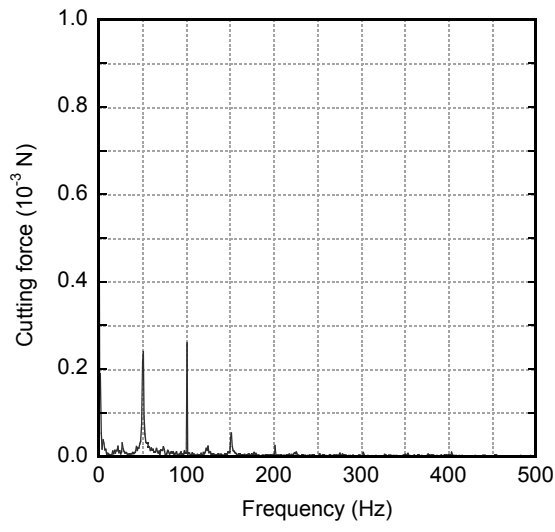
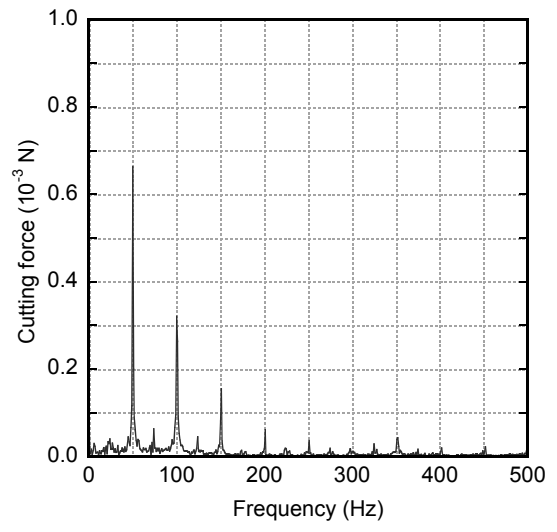


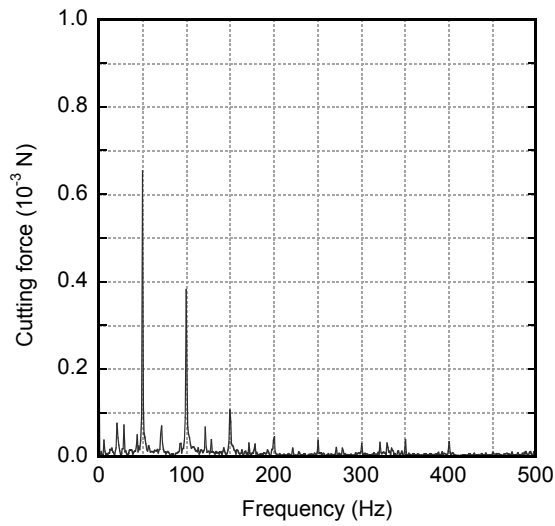
Fig. 6 Continued



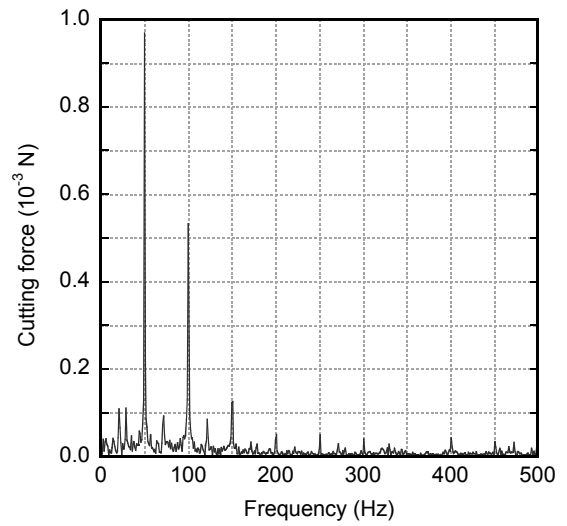
(c) 70 μm



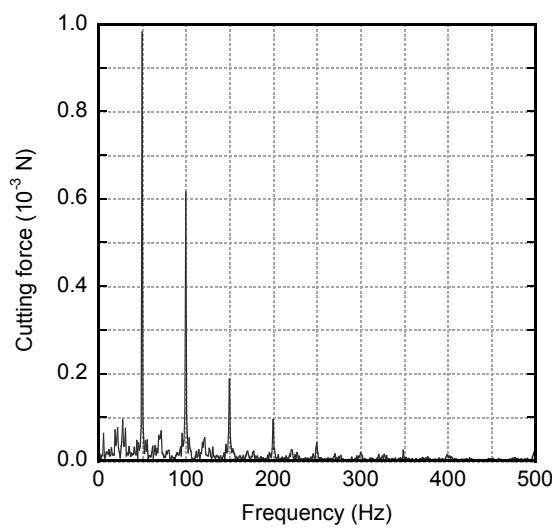
(d) 90 μm



(e) 110 μm

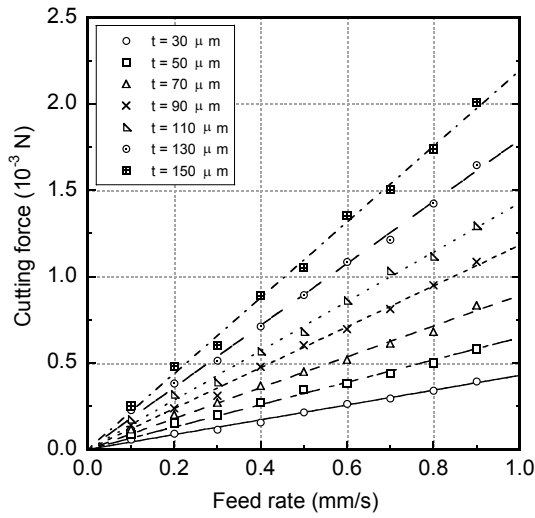


(f) 130 μm

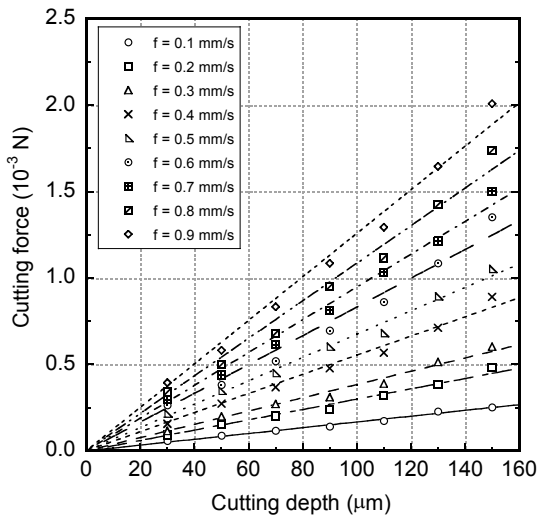


(g) 150 μm

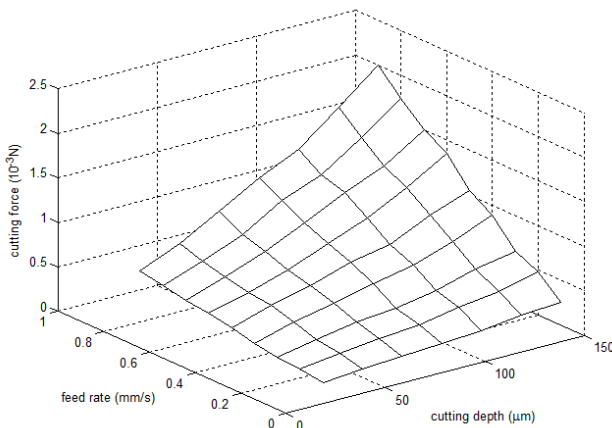
Fig. 6 Spectrums of cutting force at various cutting-depths with constant feed-rate 0.3 mm/s and rotating speed 3000 rpm



(a)



(b)



(c)

Fig. 7 Magnitude of cutting forces measured at various feed-rates and cutting-depths

드밀이 한번 회전하는 동안 n번 절삭하기 때문이다. 실험에는 2날 엔드밀을 사용하므로 회전속도

3,000 rpm에 해당하는 주파수 50 Hz의 2배인 100 Hz에서 절삭력 진동이 발생한다. Fig. 5와 Fig. 6에서 50 Hz 진동 성분이 더 크게 나오는 이유는 2날 엔드밀이 절삭할 때 두 날의 절삭량이 정확히 같지는 않기 때문이다.

3.2 가공조건과의 관계

FFT 분석에서 얻어진 결과에 의해 밀링가공 중의 가공조건을 확인하고자 한다. Fig. 7(a)는 절삭깊이가 각각 30, 50, 70, 90, 110, 130, 150 μm 일 때 이송속도에 따른 절삭력 진동의 크기를 나타낸다. Table 2에서도 알 수 있듯이 평균 오차가 모두 8% 이내이다. 이는 이송속도가 작을 때 2날 엔드밀의 두 날의 절삭량이 다르기 때문이다. Fig. 7(b)는 이송속도가 0.1~0.9 mm/s까지 0.1 mm/s 간격으로 절삭깊이에 따른 절삭력 진동의 크기를 나타낸다. Table 2에서도 알 수 있듯이 실험 데이터와 선형화 직선의 오차는 7% 이내이다. Fig. 7(c)는 이송속도, 절삭깊이에 따른 절삭력 진동의 크기를 3D 그래프로 나타낸다. 이로써 일정한 구간에서 이송속도와 절삭깊이 중 한 가지 가공조건을 알면 절삭력 진동 분석에 의해 얻어진 선형관계에 의해 다른 한 가지 가공조건을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 논문은 밀링가공 중 절삭력 진동을 측정하고 분석하여 가공조건을 모니터링하는 방법을 제시하였다. 실험 장치를 구성하고 이송속도를 9단계, 절삭깊이를 7단계로 설정하여 두 가공조건에 대한 63가지 조합에 대해 절삭력 진동을 측정하였다. 측정된 진동 신호를 LabVIEW를 통해 분석하였다. LabVIEW에서 FFT 분석을 해 절삭날 수 및 회전 진동수에 대응하는 절삭력 진동 성분의 크기를 얻었다.

분석 결과 절삭날 수 및 회전 진동수에 대응하는 절삭력 진동 성분의 크기와 이송속도 및 절삭깊이는 선형비례 한다는 것을 파악하였다. 분석된 절삭력 진동의 크기를 이송속도와 절삭깊이에 따른 2D 및 3D 그래프로 나타내었다. 이로써 일정한 구간에서 이송속도와 절삭깊이 중 한 가지 가공조건을 알면 절삭력 진동 분석에 의해 다른 한 가지 가공조건을 확인할 수 있다.

이와 같은 모니터링 지능형 자동 생산 시스템에 활용하여 궁극적으로 M2M(machine-to-machine)기반 스마트 공장 실현에 기여하고자 한다.

후 기

본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신기술진흥센터의 “ICT융합 고급인력과정 지원사업”의 지원으로 수행되었음(IITP-2015-H8601-15-1001).

참고문헌
(References)

- (1) Kim, B. H., Ahn, H. J., Kim, J. O., Yoo, M., Cho, K. J. and Choi, D. S., 2010, “Application of M2M Technology to Manufacturing Systems,” *Proceedings of ICTC 2010*, pp. 519~520.
- (2) Jeon, J. H. and Kim, J. O., 2012, “Monitoring of Machining Process by Measuring Vibration of Cutting Forces,” *Trans. Korean Soc. Noise Vib. Eng.*, Vol. 22, No. 11, pp. 1106~1112.
- (3) Daud, R., Hasfa, N. K., Tomadi, S. H., Hassan, M. A., Kadrigama, K. and Noor, M. M., 2009, “Prediction of Chatter in CNC Machining based on Dynamic Cutting Force for Ball End Milling,” *Proceedings of the International Multiconference of Engineers and Computer Scientists*, pp. 1751~1756.
- (4) Huang, S., Tan, K. K., Hong, G. S., Wong, Y. S., 2007, “Cutting Force Control of Milling Machine,” *Mechatronics*, Vol. 17, No. 10, pp. 533~541.
- (5) Dolen, M., Kaftanoglu, B. and Lorenz, R. D., 2004, “A Cutting force Estimator for CNC Machining Centers,” *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 53, No. 1, pp. 313~316.