Transactions of the KSNVE, 22(11) : 1106~1112, 2012.
http://dx.doi.org/10.5050/KSNVE.2012.22.11.1106 ISSN 1598-2785(Print), ISSN 2287-5476(Online)

절삭력 진동 측정에 의한 가공공정 모니터링
Monitoring of Machining Process by Measuring Vibration of Cutting Forces

전 재 현*·김 진 오†
Jae Hyeon Jeon and Jin Oh Kim

(Received August 16, 2012 ; Revised October 9, 2012 ; Accepted October 9, 2012)

Key Words : Cutting Forces(절삭력), Vibration(진동), Monitoring(모니터링), IT(정보기술)

ABSTRACT

This paper deal with a technique for monitoring machining conditions by measuring the vibration of cutting forces at milling machining. The vibrations of cutting forces in milling process were measured and analyzed to be related with processing parameters. The magnitude of cutting force is linearly proportional to the feed rate and cutting depth, and frequency of cutting force is linearly proportional to the rotating speed. Wired and wireless communication methods were applied in transmitting the measured vibration signals and the two methods were compared. The magnitude of the vibration signals transmitted by the wireless communication method was similar to that transmitted by the wired communication method.

1. 서 론

기술의 융합에 의해 새로운 기술이 출현하는 추세에서, 기계기술과 정보기술(IT)의 융합이 추진되고 있다. 그중에 'M2M기반 지능형 자율생산기계 연구'가 진행되고 있다. 이는 machine-to-machine 통신 기술을 생산기계에 적용하는 내용이다[1]. 여기에 가공공정을 모니터링 하는 기술이 필요하다.

가공공정을 모니터링 하기 위해 가공공정 중 진동하는 절삭력을 측정하는 방안이 제시되었다[2]. 측정된 절삭력 진동을 분석하면 가공 파라미터 값을 측정할 수 있다[3]. 한편, 측정된 신호를 전송하는 데에 유선 통신을 대체하는 무선 통신 기술 적용이 시도되었다[4].

이 논문은 밀링가공 중 절삭력의 진동을 측정하여 가공공정을 모니터링하는 기법을 제시한다. 측정된 절삭력 진동을 분석하여 가공 파라미터와의 관계를 확인한다. 또한 무선 통신 기술을 적용하여 모니터링하는 방안을 제시한다. 이는 생산 중에 발생하는 문제를 현장에서 뿐만 아니라 외부에서도 모바일 장치를 통해 확인할 수 있게 하기 위함이다. 이를 위해 진동 절삭력 실험에 안드로이드 기반 무선통신을 결합한 모니터링 기법을 구현하고, 실험을 통해 유선방법과 비교한다.

2. 절삭력의 발생원인과 종류

2.1 가공 파라미터

밀링 가공에서 발생하는 절삭력의 발생원인은 다양하다. 일반적으로 밀링 가공에서의 절삭력의 파라미터는 가공 공구와 피삭재의 재질, 공구와 피삭재

† Corresponding Author ; Member, Dept. of Mechanical Engineering, Soongsil University
E-mail : jokim@ssu.ac.kr
Tel : +82-2-820-0662, Fax : +82-2-820-0668
* Member, Dept. of Mechanical Engineering, Soongsil University

‡ Recommended by Editor Don Chool Lee
ⓒ The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

가 이루는 각도 등에 의해 결정된다. 단위면적당 절삭력인 비절삭력은 다음과 같다[5].

$$P_s = K_\alpha K_\phi P_{so} \quad (1)$$

여기서 K_α는 칩과 공구 사이의 경계각(α) 계수, K_ϕ는 피삭재의 취부각(ϕ) 계수, P_{so}는 α=0°, ϕ=90°일 때의 비절삭력(kgf/mm^2)으로 피삭재, 이송 속도, 절삭 깊이로 정해지는 계수이다. 이 계수들은 경험식에 의하여 결정된다.

절삭력은 비절삭력에 절삭단면적을 곱하여 kgf 단위로 다음과 같이 나타낸다[6].

$$P_t = P_s \times f_t \sin\theta \times t \quad (2)$$

여기서 f_t는 1날당 이송 거리, θ는 날 끝의 회전각, t는 절삭 깊이이다.

공구의 회전 속도와 이송 속도, 절삭 깊이를 주요 파라미터로 선정하고, 이들의 범위를 Table 1과 같이 설정하였다.

2.2 절삭력 종류

밀링 가공 중 절삭력은 정압 절삭력과 진동하는 절삭력으로 구분할 수 있다[7].

정압 절삭력은 주기적인 가진력에 의한 에너지가 진동계에 작용하여 일정한 힘으로 작용하는 절삭력을 의미한다. 회전력이 없이 공구가 이송을 할 경우 정압 절삭력이 크게 발생하면 공구 또는 피삭재가 파손될 수 있다. 밀링 머신에서는 공구의 회전속도와 절삭 깊이를 조절하여 공구의 파손을 막는다.

밀링 가공 중에 절삭력이 변화하는 성분을 절삭력 진동이라 한다. 절삭력 진동은 정압 절삭력을 기준으로 진동하는 절삭력 성분을 의미한다. 절삭력 진동은 공구 형상에 때문에 발생하며 대개 절삭 상태와 조건에 따라서 다르다. 절삭 상태는 피삭재의 재질에 영향을 크게 받으며, 절삭 조건은 스핀들의 회전 속도, 피삭재의 이송 속도, 절삭 깊이 등이다.

Table 1 Parameter values of milling machining

Rotating speed(RPM)	1800, 2400, 3000, 3600, 4200
Feed rate(mm/s)	0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9
Cutting depth(μm)	30, 50, 70, 90, 110

3. 절삭력 진동 측정 방법

진동하는 절삭력을 센서로 검출한 후 진동 신호를 판독 분석 장치로 전송할 때 유선 방식과 무선 방식을 구분하여 사용하였다.

3.1 유선 방식의 측정 방법

유선 방식의 측정 방법에서 실험 장치를 Fig. 1에 개략도로 보인 바와 같이 두 부분으로 구성하였다. 즉, 밀링머신의 회전 속도를 측정하는 부분과 피삭재로 전달되는 진동 절삭력을 측정하는 부분이다. 절삭력 진동의 측정을 위해 지그를 설계하고 제작하였다. 회전 속도를 측정하는 tachometer는 Sampo사의 DT6234B모델을 사용하였다. 밀링 머신에 사용된 공구는 Fig. 2와 같다. 엔드밀 끝의 날의 유형은 Fig. 3에 보인바와 같이 2날, 3날, 4날 등이 있는데, 이 중 직경이 1 mm인 2날 평 엔드밀(YG-1 SG8A01010)을

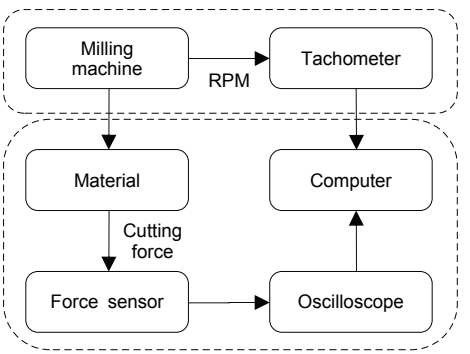


Fig. 1 Block diagram of experimental set-up

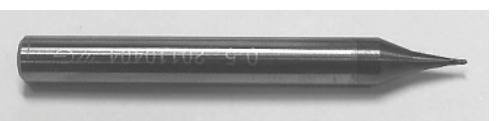


Fig. 2 Shape of an end-mill

(a) 2F (b) 3F (c) 4F

Fig. 3 Type of end-mills

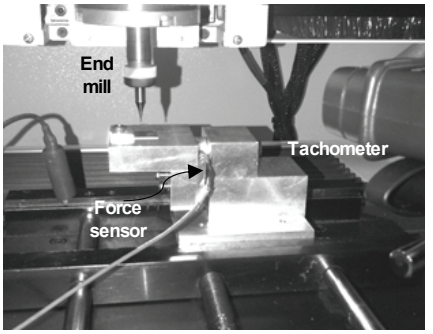


Fig. 4 Experimental set-up during milling machining

Fig. 5 Combination of sensor system and Odroid7

사용하였다. 피삭재(Cu, 99.3 %)로 전달되는 진동 절삭력을 힘 센서(PCB M2201B01)로 측정하고 신호 처리를 통해, 변화하는 힘의 크기와 절삭력 진동의 진동수를 확인한다.

2.1절에서 설명한 절삭력 진동과 가공 파라미터의 관계를 파악하고자 회전 속도, 이송 속도, 절삭 깊이를 5단계로 구분하여 실험하였다. Fig. 4와 같이 장비를 설치한다. 이때 절삭 방향은 힘 센서를 압축하는 방향으로 하고, 정확한 실험을 위해 평 엔드밀을 활용하여 평면 가공을 한 후 실험을 실시하였다.

3.2 무선 방식의 측정 방법

절삭력 진동 신호 전송에 무선 통신을 활용 한다. 실험에서 사용한 무선 통신 장비는 Hardkernel사에서 제공하는 Odroid7이다. Odroid7은 구글의 오픈 소스 운영체제(OS)인 안드로이드를 일반 임베디드 기기에 적용하기 위한 공식 개발 툴이다. 안드로이드는 무선 통신이 가능하도록 기본적인 WiFi 디바이스 드라이브를 포함한다. 기본 어플리케이션 레이어는 JAVA 언어로 구성되고, 핵심 libraries 부분 등은 C, C++로 작성된다. Odroid7 보드의 디버깅보드에 확장보드를 장착하여 외부 아날로그 신호를 받고, Odroid7에서 신호를 처리하는 방식이다[8].

Fig. 5는 유선 방식과의 비교를 위한 실험 장치 구성을 보여준다. 가진기(PCB K2004E01)에 의해 발생되는 힘을 힘 센서로 감지하고 신호 조정 증폭기(B&K 2692)로 신호를 증폭하며 Odroid7으로 신호가 전달된다. 전달된 신호는 Odroid7 화면에 시간과 전압의 그래프로 실시간 출력된다. 출력된 그래프는 오실로스코프와 마찬가지로 파형의 위치 조정과 X축의 시간 단위 조절, Y축의 전압 단위 조절이 가능하다.

가진기에 입력되는 신호의 주파수와 크기를 변화시켜 Odroid7에 출력되는 신호를 확인하는 방법으로 실험을 하였다. 이때 Odroid7으로 전달되는 신호는 원신호의 20배로 증폭하였다. 이는 오실로스코프에 비해 노이즈 레벨이 높아 전달되는 신호를 구별하기 어려운 문제를 해결하기 위함이다.

4. 절삭력 진동 측정 결과

4.1 유선 방식의 측정 결과

힘 센서에서 측정된 신호와 FFT 변환된 스펙트럼을 Figs. 6, 8, 10에 나타내었다. 절삭력 진동과 각 파라미터와의 관계를 Tables 2~4에 기재하였고, 이 데이터를 그래프로 작성하여 Figs. 7, 9, 11에 나타내었다. Figs. 9와 11에서 점선은 측정 데이터를 직선 맞춤한 결과이다.

Table 2와 Figs. 6~7에 나타낸 결과는 엔드밀 회전 속도에 따른 절삭력 진동 경향을 보여준다. 이송 속도는 0.5 mm/s, 절삭 깊이는 70 μm로 일정하게 유지한 상태의 결과이다. Table 2에서 알 수 있듯이, 절삭력 진동수는 회전속도에 해당하는 진동수의 2배이다. 이는 Fig. 3(a)에 보인 2날 엔드밀의 특성으로서 한 번 회전하는 동안 두 번의 절삭력이 가해지기 때문이다. 반면에, Fig. 7에서 보듯이 절삭력의 크기는 회전속도에 따른 일관된 경향을 보이지 않는다.

Table 3과 Figs. 8~9에 나타낸 결과는 엔드밀 이송 속도에 따른 절삭력 진동 경향을 보여준다. 회전속도는 3000 RPM, 절삭 깊이는 70 μm로 일정하게 유지한 상태의 결과이다. Table 3과 Fig. 9에서 알 수 있듯이, 이송 속도 변화에 선형 비례하여 절삭력 크기가 변화한다.

Table 2 Fundamental frequency and force magnitude measured at various of rotating-speeds

Rotating speed (RPM)	Cutting force	
	Frequency(Hz)	Magnitude(10^{-3} N)
1800	60	5.48
2400	80	6.88
3000	100	7.60
3600	120	7.97
4200	140	2.86

Table 3 Fundamental frequency and force magnitude measured at various of feed-rates

Feed rate (mm/s)	Cutting force	
	Frequency(Hz)	Magnitude(10^{-3} N)
0.1	100	4.46
0.3	100	7.10
0.5	100	7.60
0.7	100	9.32
0.9	100	13.78

Table 4 Fundamental frequency and force magnitude measured at various of cutting-depths

Cutting depth (μm)	Cutting force	
	Frequency(Hz)	Magnitude(10^{-3} N)
30	100	2.13
50	100	4.52
70	100	7.60
90	100	8.85
110	100	11.67

Table 4와 Figs. 10~11에 나타낸 결과는 절삭 깊이에 따른 절삭력 진동 경향을 보여준다. 회전속도는 3000 RPM, 공구 이송 속도는 0.5 mm/s로 일정하게 유지한 상태의 결과이다. Table 4와 Fig. 11에서 알 수 있듯이, 절삭력 크기는 절삭 깊이에 선형 비례한다. 이러한 관계로부터, 밀링 가공 중 절삭력 진동 측정을 통해 가공 상태를 확인할 수 있다. 예를 들어 진동 절삭력이 급격히 커질 경우에는 가공조건을 조절함으로 가공성능을 향상시킬 수 있다. 반면 진동 절삭력이 0이 된다는 것은 가공이 완료가 되었거나 혹은 툴이 파손되어 가공이 불가능하다는 것이다.

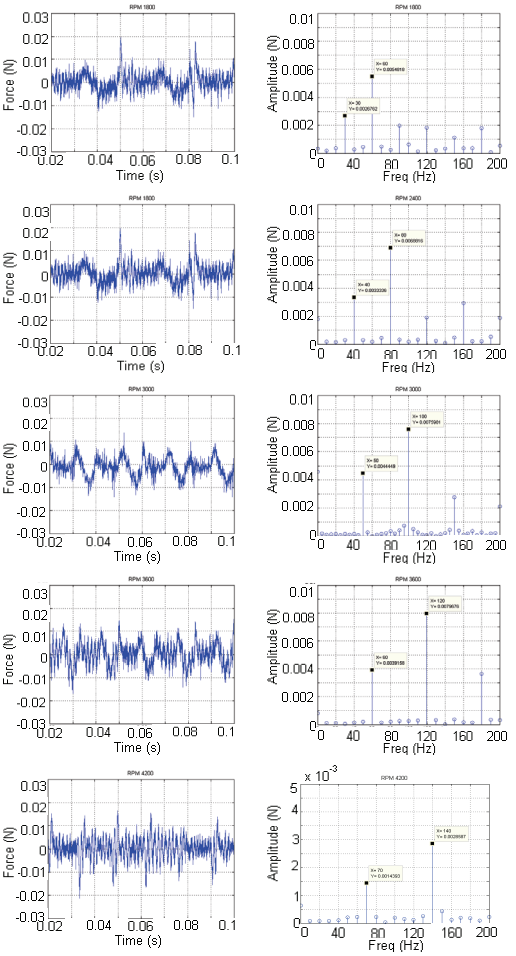


Fig. 6 Signals and spectrums measured at various rotating-speeds

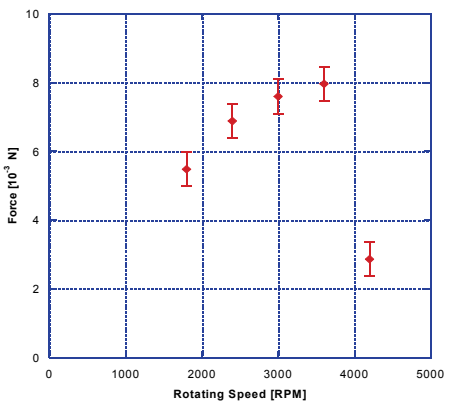


Fig. 7 Dynamic cutting-forces measured at various rotating-speeds with fixed feed-rate 0.5 mm/s and cutting-depth 70 μm

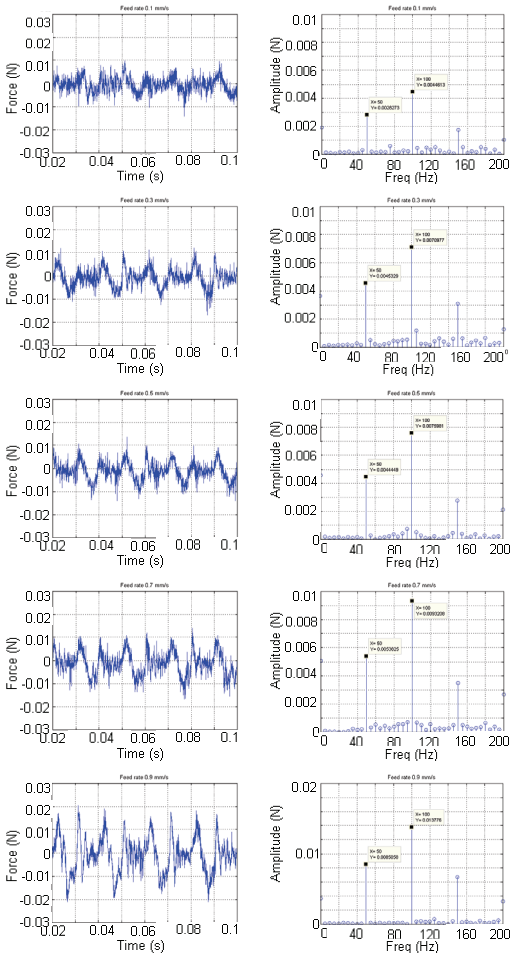


Fig. 8 Signals and spectrums measured at various feed-rates

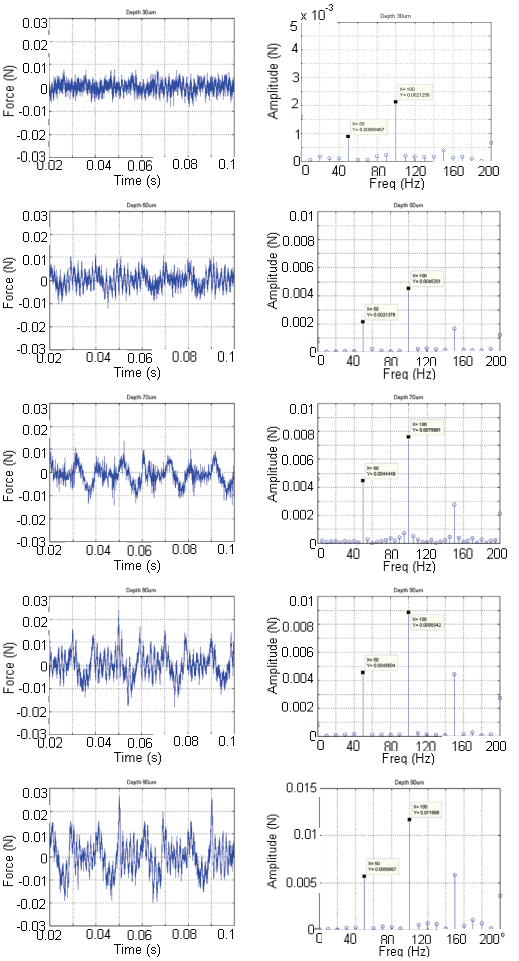


Fig. 10 Signals and spectrums measured at various cutting-depths

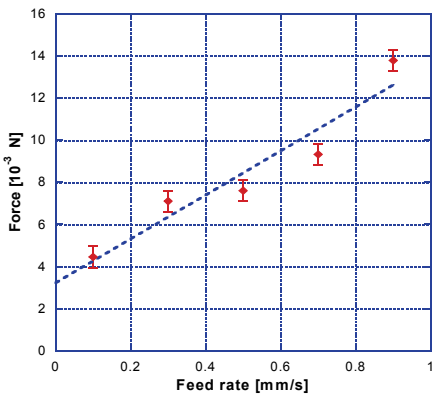


Fig. 9 Dynamic cutting-forces measured at various feed-rates with fixed rotating speed 3000 RPM and cutting-depth 70 μm

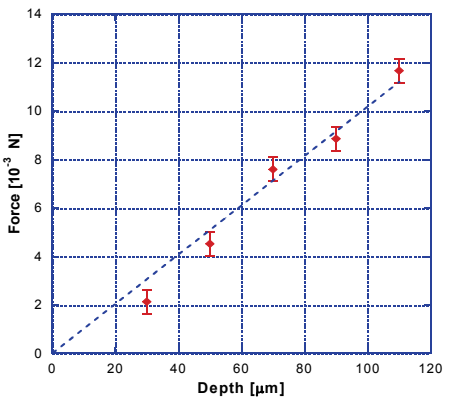
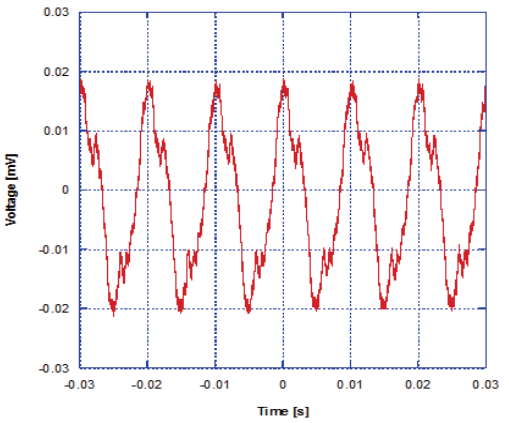


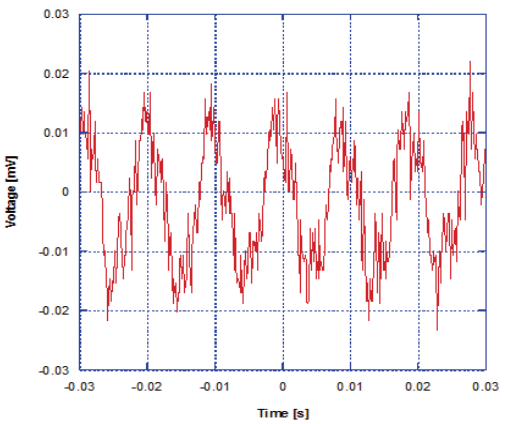
Fig. 11 Dynamic cutting-forces measured at various cutting-depths with fixed rotating speed 3000 RPM and feed-rate 0.5 mm/s

4.2 무선 방식의 측정 결과

Odroid7의 확장보드에서 S5PC110의 ADC 성능은 최대 1 MSPS(megasamples per second)의 속도로 데이터를 획득 할 수 있으나, 모든 데이터 값들을 서버로 전송하면 부하가 발생한다. CPU가 처리할 수 있는 부하를 넘어서게 되면 WiFi 통신은 물론 자체 기능을 제대로 수행 할 수 없기 때문에 데이터를 가공하여 서버로 전송한다[8]. 이 문제 해결을 위하여 데이터의 전송량을 조절해야만 한다. 이



(a) Oscilloscope



(b) Odroid7

Fig. 12 Comparison of wired and wireless communication

Table 5 Comparison of average peak-to-peak voltage

Measuring device	Average p-p voltage(mV)
Oscilloscope	0.038 ± 0.005
Odroid7	0.036 ± 0.005

과정으로 인해 데이터 전송 지연이 발생하고 또한 데이터를 가공하는 과정에서 발생하는 손실로 오차가 발생 할 수 있다.

무선 통신을 모니터링 기법에 활용하기 위해서 측정 결과의 신뢰성이 필요하다. 이를 위해 무선 방식의 측정 결과와 유선 방식의 측정 결과를 비교한다. 3.2절에 서술한 방법으로 실험을 하였다. 오실로스코프를 사용하는 유선 전송 방식의 경우 Fig. 12(a)와 같이 1초당 5000개의 데이터로 표현된다. 반면에 Odroid7을 사용하는 무선 전송 방식의 경우 Fig. 12(b)와 같이 1초당 2500개의 데이터로써 오실로스코프에 비해 절반의 데이터양으로 표현된다. 신호의 크기를 Table 5에서 비교한다. 그 결과 Fig. 12(a)와 (b)의 두 가지 방식으로 전송하여 분석한 신호 크기가 유사하였다. 이와 같이 기존 유선 방식이 아닌 무선 통신을 활용한 모니터링으로 절삭력 진동의 크기 측정이 가능하다.

Odroid7으로 진동 절삭력을 측정하여 데이터의 손실이 많이 발생하였으나 무선 통신 기술의 발전 및 신호처리 방법의 향상으로 개선될 수 있다. 이 실험을 통해 무선 방식의 진동 절삭력 측정 활용 방안을 제시한다.

5. 결 론

기계기술과 정보통신기술을 융합하는 연구의 일환으로, 지능형 가공공정 모니터링 기법을 연구하였다. 밀링가공 중 절삭력의 진동을 측정하고 분석하여 가공 파라미터와의 관계를 확인하였다. 측정된 진동 신호를 분석 장치로 전송할 때 유선 방식과 무선 통신 방식을 적용하여 비교하였다.

밀링 가공에서 절삭력 진동을 분석한 결과, 진동하는 절삭력의 크기는 이송 속도와 절삭 깊이에 선형적으로 비례하고, 절삭력의 진동수는 회전 속도와 날의 개수에 비례함을 확인하였다. 이러한 관계로부터, 밀링 가공 중 절삭력 진동 측정을 통해 가공 상태를 확인할 수 있다.

또한 무선 통신 방식으로 진동 신호를 전송하여 분석한 진동 절삭력의 크기는 유선 방식으로 측정한 크기와 유사함을 확인하였다. 무선 통신 기술과 절삭력 진동 측정 기술의 융합으로, 가공 공정 상태를 장소에 상관없이 모니터링 할 수 있다.

후 기

이 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 “IT융합 고급인력과정 지원사업”의 지원으로 수행되었음(NIPA-2012-H0401-12-1004).

참 고 문 헌

(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., Hong, J. H., Jeong, S. I., Cho, L. J., Oh, S. H., Piao, C., Kim, J. O. and Yoo, M., 2011, Application of Vibration Sensors for Intelligent Manufacturing System of IT-Convergence Research, Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 714~715.

(3) Jeon, J. H., Hong, J. H. and Kim, J. O., 2012, Vibration of Cutting Forces during Milling Machining, Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 473~474.

(4) Jeon, J. H., Kim, J. O., Lee, J. M. and Jung, S. H., 2012, Integration of Vibration Measurement and Wireless Communication for Monitoring Milling Machining, Proceedings of the KSME IT Convergence Division Spring Conference, pp. 85~86.

(5) No, S. L. and Yoo, O. I., 2007, Manufacturing Processes, Bogdoo, pp. 202~210.

(6) Kim, J. D. and Kim, D. S., 1997, Development of a Combined-type Tool Dynamometer with a Piezo-film Accelerometer for an Ultra-precision Lathe, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 71, No. 3, pp. 360~366.

(7) Hwang, C. H. and Cho, D. W., 1999, Chatter Prediction in Endmilling Using Dynamic Cutting Force Modeling, Journal of the Precision Engineering, Vol. 16, No. 2, pp. 104~115.

(8) Lee, J. M., Jeon, J. H., Jung, S. H. and Kim, J. O., 2012, Android Based Wireless Vibration Sensor System for Milling Machining, Proceedings of the KSME IT Convergence Division Spring Conference, pp. 112~113.

Jae Hyoen Jeon received the B.S. degree in mechanical engineering from Soongsil University in 2011. He is currently a graduate student of Soongsil University, where he works in Vibration Laboratory. His research interests are in the analysis of ultrasonic sensors and actuators by computer simulations.

Jin Oh Kim received the B.S. and M.S. degrees in mechanical engineering from Seoul National University in 1981 and 1983, respectively, and the Ph.D. degree from University of Pennsylvania in 1989. Since 1997, he has been with the Faculty of Soongsil University, where he is currently a Professor of mechanical engineering. His research interests are in the area of ultrasonic sensors and actuators using mechanical vibrations and human-body dynamics for rehabilitation robots.