

Wavelet 을 이용하여 하드터닝 공정에서 표면품질의 향상을 위한 채터 진단에 관한 연구

박영호* · 공정흥* · 양희남* · 김일해* · 장동영** · 한동철†

(2003 년 5 월 19 일 접수, 2003 년 12 월 5 일 심사완료)

Chatter Detection for Improving Surface Quality of Hard Turning Process with Wavelet Transformation

YoungHo Park , JeongHeung Kong , HeeNam Yang , IlHae Kim , DongYoung Jang ,
DongChul Han

Key Words : Chatter Detection, FFT, Hard Turning, Pseudo Frequency, Surface roughness, Wavelet Transform

Abstract

This paper presents study of efficiency of wavelet transformation for on-line chatter detection during hard turning process. From comparison with other time series and statistical methods such as fast fourier transformation (FFT), Kurtosis and standard deviation (STD), wavelet transform is better than others in on-line chatter detection. With using wavelet function with pseudo frequency corresponding to chatter frequency, chatter could be detected more sensitively. And for both force signal from dynamometer and displacement signal from capacitance type cylindrical sensor (CCS), wavelet transform with DB2 function on level 4 could be well used for chatter detection in hard turning process.

1. 서 론

하드터닝 공정은 경도 60HRC 이상의 공작물을 절삭유 없이 건 절삭하는 공정으로 기존의 선삭 공정과는 공작물의 경도와 요구되는 절삭 공구 등에서 많은 차이가 있다.⁽¹⁾

하드터닝 공정은 기존의 절삭 공정에 비해 더 적은 공정 단계를 요구한다. 따라서 요구되는 자원이나 비용의 절감을 가져올 수 있는 장점이 있고, 또한 여러 종류의 절삭 작업과 복잡한 형상의 절삭을 공작물을 다시 고정하지 않고 작업할 수 있으므로 형상 정밀도 측면에서도 유리하다 할 수 있다. 그리고 건절삭으로 절삭유를 사용하지 않기 때문에 경제적으로 유리하고, 또한 환경 친화적인 성격을 갖고 있다 할 수 있다. 이러한 장점들 외

에 하드터닝 공정으로 인해 공작물 표면에 생기는 압축 잔류응력은 공작물의 피로 강도를 강하게 하는 등 기존의 공정에 비해 많은 장점을 가지고 있다.⁽²⁻⁵⁾

절삭 공정에서 표면조도는 공작물 표면의 물리적인 특성을 반영하는 좋은 지표 중 하나로 실제 공학적인 표면 상태의 중요한 인자로서 고려되어 왔다. 많은 표면조도 모델링에 관한 연구로 여러 절삭인자, 즉 가공속도, 피드, 공구 날끝 각도, 진동 등에 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 최근의 연구 결과로 절삭속도의 증가는 생산성을 향상시키고 동시에 어느정도 까지 표면조도의 향상에도 기여하는 것으로 알려졌다.^(1,6,7) 따라서 요구되는 표면조도의 향상을 위해서 최적화 된 절삭 인자의 선택 및 공구계 진동에 대한 연구가 진행되어 왔다.⁽⁸⁻¹¹⁾

절삭 공정 중에서 채터란 공구와 공작물 사이에서 발생하는 자려진동을 의미하며, 이것은 시스템의 동적 강성에 비해서 훨씬 큰 두께의 칩이 형성될 때에 발생하는 이상 진동으로 가공의 경제적인 측면에서 보면, 공구의 급속한 마모와 공구의 파손을 유발할 수 있기 때문에 가공비를 상승시키는 요인이 되고, 품질면에서도 표면에 물결 무늬

† 책임저자, 회원, 서울대학교 기계항공공학부
E-mail : dchan@amed.snu.ac.kr
TEL : (02)880-7139 FAX : (02)883-1513

* 회원, 서울산업대학교 산업공학과

** 서울대학교 기계항공공학부

모양의 자국이 남기 때문에 결국 매우 거친 표면이 형성되어 바람직하지 못한 결과를 나타내므로 절삭 중 채터에 대한 실시간 감지가 요구된다.^(13, 22)

가공 중 채터가 발생하면 절삭력 신호가 정상상태의 신호에 비해 큰 진폭으로 주기적인 진동을 하게 된다. 이러한 채터 신호의 진단을 위해 현재 공구동력계 및 가속도계가 현재 가장 널리 쓰이고 있다. 이런 방법 이외에 AE 를 사용하거나 모터 전류를 측정하는 방법 등이 널리 사용되고 있다.⁽¹⁴⁾

앞에서 밝힌 것과 같이 채터 진동은 표면정도에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있고, 이의 감지 및 제어가 하드터닝 공정에서도 매우 중요하다. 따라서 각각의 실험에서 발생한 채터 및 정상 절삭상태의 신호를 비교 분석하여 채터를 진단할 수 있다면 표면정도의 향상에 도움이 될 것이다. 이러한 목적을 위해 공구동력계의 절삭력 신호와 원통형 정전용량 변위센서(CCS)의 주축 변위 신호를 측정하고 이를 Wavelet Transform 및 STD 그리고 Kurtosis 등의 분석방법을 이용하여 하드터닝 공정에서의 채터 진단에 응용하기로 한다.

2. 채터 진단을 위한 여러 데이터 분석 방법

센서로부터 출력되는 절삭 신호의 처리 방법은 시스템의 모니터링 능력에 큰 영향을 미친다. 전통적인 신호처리의 방법은 여러 가지가 있는데 그 중 FFT 가 대표적이다. FFT 는 시스템의 주파수에 대한 정보를 제공하기 때문에 채터에 의해서 발생하는 특정 주파수의 진동 성분에 대한 정보를 줄 수 있다. FFT 이외에 평균값이나 RMS(root mean square) 그리고 STD(standard deviation), Kurtosis 같은 통계적 처리 방법 등도 절삭신호의 처리에 널리 사용되고 있다.⁽¹⁴⁾ 최근에는 이러한 절삭신호의 실시간 모니터링에는 'Time Series Analysis'가 더 유리하므로,⁽¹⁵⁾ 이러한 시간 영역의 신호를 분석하는 방법으로 Wavelet Transform 을 사용하는 응용 사례가 많아 지고 있다.

2.1 Fourier Transform VS Wavelet Transform

신호 $f(t)$ 를 분석할 때, $f(t)$ 를 선형 분해(Linear Decomposition) 하는 것은 그 신호의 성질이나 특성을 이해하는 데에 매우 중요한 의미를 가질 수 있다. 예를 들어 가장 많이 사용하는 신호 처리 방법 중의 하나인 Fourier Transform 은 식 (1)과 같이 정의된다.

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt \quad (1)$$

F.T.과 비교해서 W.T.은

$$Wf(s, u) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\psi_{s,u}^* dt \quad (2)$$

와 같이 정의된다.⁽¹⁷⁾

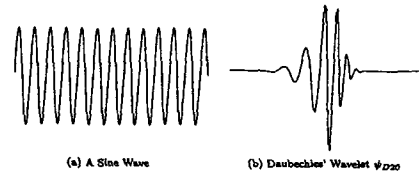


Fig. 1 Comparison of fourier transform and wavelet transform

두 변환을 비교해보면, Fig. 1 에서처럼 F.T.은 무한히 연속되는 Sine 'Wave'로서 신호를 분해하지만, W.T.의 경우에는 연속된 사인파가 아닌 특정한 부분에 에너지가 집중된 Small Wave 란 의미의 'Wavelet'으로서 신호를 분해하며 다양한 형태와 그에 따른 특성을 갖는 Wavelet 기저가 존재하는 특징을 갖고 있다.⁽¹⁷⁾

이러한 변환의 특성 차이에 의해 Fourier Transform 은 주기적이고 시불변하는 Stationary 신호 분석에 적합하다. 한편, Wavelet Transform 은 전이(Transient)과정 중의 Non-Stationary, 시변(Time-Varying)하는 신호에 대해서도 훌륭한 분석을 수행할 수 있다는 장점 뿐 아니라 신호가 갖는 특성을 시간과 주파수 영역에서의 효율적인 국소화를 수행할 수 있으며 특정 주파수영역에서의 시간 정보를 나타낼 수 있는 특성을 갖고 있다.⁽¹⁶⁾

따라서 변화하는 실시간 절삭 데이터를 분석하는 경우에 Wavelet Transform 을 사용하는 것이 유리하며, 그럼으로써 가공 중의 여러 이상 신호의 형상과 발생 시간에 대한 정보를 얻을 수 있다. 또한 Wavelet 기저 선택의 다양성으로 주어진 신호의 특징에 가장 적합한 해석을 할 수 있는 장점도 가지고 있으며, 실시간 처리에서 매우 중요시 되는 속도에서도 많은 장점을 갖고 있다.⁽¹⁶⁾ 이러한 많은 장점으로 인해 Wavelet Transform 은 많은 연구 분야에서 점차 각광을 받고 있고 데이터 압축이나 이미지 등의 영상처리 그리고 노이즈 제거, 수치해석, 최적 설계 등 응용 분야가 급속히 확장되고 있다.

W.T.을 사용하여 효율적인 해석을 위해서는 소멸모멘트와 지지구간에 대한 적절한 선택이 필요하다. 소멸모멘트란 신호 표현의 효율성을 나타내는 것으로서 고차의 신호일수록 소멸모멘트를 크게 하는 것이 유리하다. 반면 지지구간은 계산 시간과 관계되며 신호의 세밀한 표현이 요구될 때에는 계산 시간이 늘어나더라도 지지구간을 줄여야 한다. 일반적으로 두 가지 특성을 모두 좋게 할 수는 없으며 많은 공학적인 문제에서와 같이 적절한 균형을 맞추어 선택해야 한다. 이런 까닭에 Daubechies Wavelet 의 경우 동일한 소멸모멘트를 갖는 Wavelet 중에 가장 최소의 지지구간을 갖는 장점으로 응용범위가 계속 넓어지고 있다.⁽¹⁷⁾

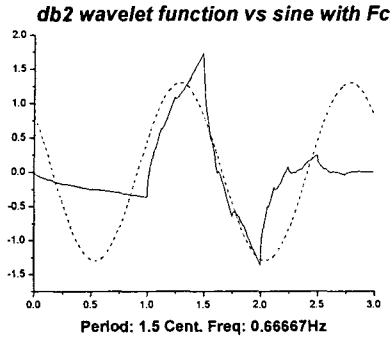


Fig. 2 DB2 wavelet function and sine wave with its center frequency

2.2 Pseudo-Frequency

Wavelet 함수의 스케일에 대응하는 주파수를 찾는 방법 중의 한가지는 Pseudo-frequency 로, 이는 식 (3)과 같이 정의된다.⁽²¹⁾

$$F_a = \frac{F_c}{a * \Delta} [Hz] \quad (3)$$

여기서 a 는 wavelet 함수의 스케일이고, Δ 는 샘플링 시간[sec]을 나타낸다. F_c 는 Center Frequency [Hz]로서, Wavelet 함수의 주파수 성분 중에 Wavelet 의 모양과 가장 근접하는 사인파의 주파수라고 할 수 있으며, 이것은 FFT 를 수행했을 때 최대값을 나타내는 지점의 주파수라고도 할 수 있다. Daubechies Wavelet 중 DB2 를 예로 들어 보자. DB2 Wavelet 함수를 FFT 했을 경우 Fig. 3 의 그래프와 같이 최대 주파수가 0.6667Hz 에서 나타나는데, 이 주파수를 갖는 사인파를 재구성해서 원래 wavelet 함수와 비교를 해보면 Fig. 2 의 그래프와 같다.

Wavelet 함수의 스케일은 식 (3)에서 보듯 분모에 위치하는데, 이것은 Fig. 4 에서 보면 쉽게 알 수 있다. Fig. 2 에서 보인 Wavelet 함수를 ψ(t)라 하면, Wavelet 함수의 정의에 따라 ψ(t)를 2 배 확대하면 식 (4)와 같다.

$$\psi_1(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} \psi\left(\frac{t}{2}\right) \quad (4)$$

편의상 wavelet 함수의 x 축 평행이동은 고려하지 않았다. 따라서 ψ₁ 의 F.T.은

$$\Psi_1(\omega) = \sqrt{2} \Psi(2\omega) \quad (5)$$

와 같이 나온다. 따라서 Fig. 5 에서 보듯 Ψ₁(ω)의 F_c는 ψ(ω)의 F_c의 1/2 배가 된다.

그러므로 위와 같이 Pseudo-Frequency 는 wavelet 함수에 대응하는 주파수를 효과적으로 표현한다고 할 수 있다.

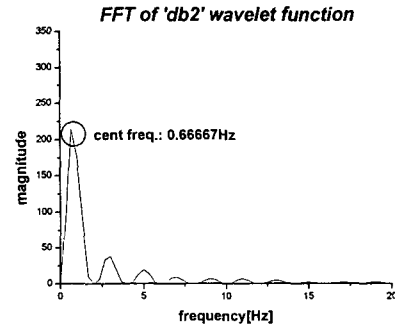


Fig. 3 F_c of DB2 wavelet function

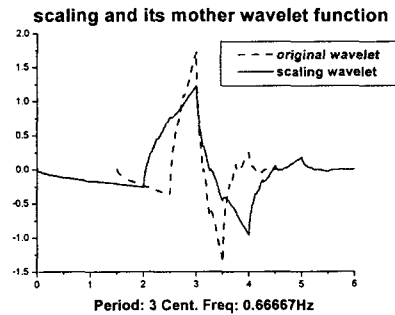


Fig. 4 Effect of scaling in time domain

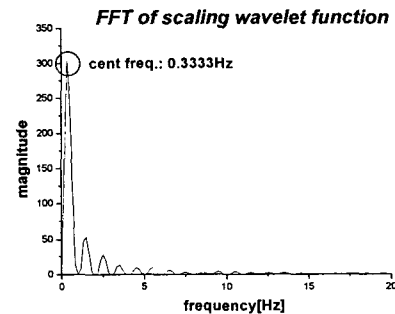


Fig. 5 F_c of DB2 scaling wavelet function

3. Experimental Setup

절삭 실험은 실린더 형상의 공작물을 세라믹 공구 및 PCBN 공구를 사용하여 회전 CNC 선반에서 수행하였다. 실험을 위해 사용한 공구는 NTK 사의 CNGA120404TN, CNGA120408TN 을 사용했고, PCBN 공구로는 ㈜다인의 CNMA120404, CNMA120408 을 사용했다. 세라믹 및 PCBN 공구

Table 1 Cutting conditions of experiments

Ex. No.	Insert Material	Nose Radius [mm]	Cutting Speed [m/min]	Feed Rate [mm/rev]	Depth of Cut [mm]	Workpiece Length [mm]
1	Ceramic	0.4	210	0.1	0.1	130
2	Ceramic	0.8	210	0.1	0.1	150
3	Ceramic	0.8	210	0.15	0.1	130
4	Ceramic	0.4	210	0.15	0.1	150
5	Ceramic	0.8	260	0.1	0.1	130
6	Ceramic	0.4	260	0.1	0.1	150
7	Ceramic	0.4	260	0.15	0.1	130
8	Ceramic	0.8	260	0.15	0.1	150
9	PCBN	0.4	190	0.1	0.1	150
10	PCBN	0.4	230	0.1	0.1	150
11	PCBN	0.4	190	0.1	0.1	150
12	PCBN	0.4	230	0.1	0.1	150
13	Ceramic	0.4	190	0.1	0.1	150
14	Ceramic	0.4	230	0.1	0.1	150
15	Ceramic	0.4	190	0.1	0.1	150
16	Ceramic	0.4	230	0.1	0.1	150

는 주철의 고속 절삭용 공구로 적용되기 시작하여 최근에는 강인한 재료나 고경도재 등의 난삭재 가공 및 건절삭 가공 등으로 적용처가 확대되고 있는 상황이다. 공작물은 고주파 처리된 HRC 60 및 HRC 45 정도의 실린더 형상의 SKD11 을 사용하였다. SKD11 은 다른 규격으로는 AISI D2 라고도 하는데 이 재료는 탄소 및 크롬 성분이 많이 포함된 것이 특징이며, 높은 내마모성을 가지고 있으며, 열처리가 가능하다. 공작물의 직경은 67mm 가공 부 길이는 130mm, 150mm 인 것 등을 사용하였다. 각 실험은 동일한 환경에서 이루어졌고, 실험세트는 각각 하나의 새 공작물과 새 공구를 사용하여 이루어졌고, 실험 중 비정상적인 가공에 대해서는 재 실험을 통해 실험의 신뢰성을 높였다.

Table 1 은 하드터닝 공정에서 채터 진단과 여러 절삭인자와 표면정도와와의 관계를 밝히기 위해서 다구체 실험 계획법을 이용하여 설계한 절삭 조건을 표로 나타낸 것이다.

4. 실험결과

4.1 Pseudo Frequency 결정

절삭 신호 중 채터 감지에 가장 적합한 Daubechies Wavelet 함수의 차수와 레벨을 결정하기 위해서, 먼저 채터신호의 시간과 주파수 영역에서 특성을 살펴보자. Fig. 3 은 채터가 발생했을 때의 신호 중에서 한 회전만을 나타낸 것이다.

Fig. 6 은 시간 영역에서의 주응력 방향과 평행한 주축 변위 신호(CCS-X)이며 Fig. 7 은 변위 신호를 FFT 한 것이다. Fig.7에서 알 수 있듯이 채터 주파수는 약 330Hz 정도로 이 주파수를 포함하는 대역을 갖는 Wavelet 함수를 사용하면 채터를 민감하게 감지할 수 있을 것으로 예상된다.

주축의 회전수가 1000rpm 일 때, 샘플링 시간은 $\Delta = 1.1719e-004$ sec 이고, 각각의 Daubechies 함수의 레벨에 따른 Pseudo-Frequency 를 구하면 Fig.8에서 보는 바와 같다.

Fig. 8 에서 알 수 있듯이 2 차 이상의 Daubechies Wavelet 함수에 대해서는 Pseudo-Frequency 값에 큰

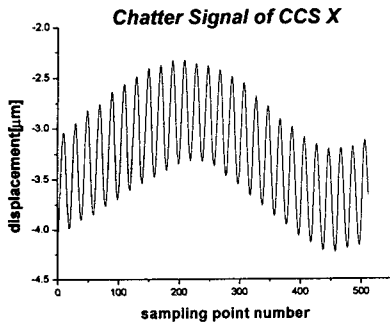


Fig. 6 Raw signal of spindle displacement on chatter condition : Table 3, Ex. No.1

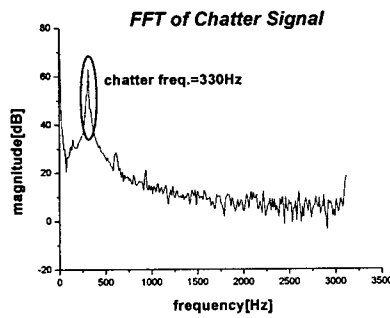


Fig. 7 FFT of Fig.6 signal

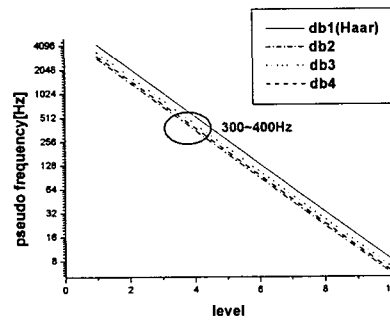


Fig. 8 Pseudo-Frequency of Daubechies wavelet at various orders and levels

변화가 없으므로, 계산의 속도를 위해서 DB2를 사용하는 것이 좋다. 그리고 Fig. 7에서 나타난 것처럼 본 실험 장치의 채터 주파수가 330Hz 이므로, Fig. 8에서 Pseudo-Frequency가 330Hz에 해당하는 레벨을 찾아보면 4임을 알 수 있으며, 레벨 3과 5에서도 약간의 영향이 있을 것으로 예상된다. Fig. 9에서 y축은 wavelet 계수들의 RMS 값이다. Fig. 9에서 보듯이 정상 신호와 채터 신호가 level 4에서 가장 큰 차이를 보이고 있다. 따라서 Pseudo-Frequency는 wavelet 함수의 스케일에 대응하는 주파수를 효과적으로 나타냄을 확인할 수

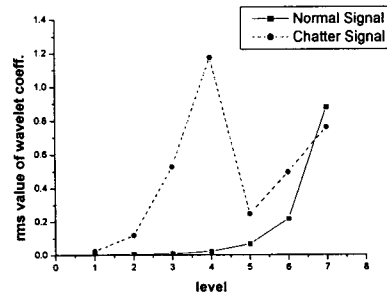


Fig. 9 Difference between normal and chatter signal at various level of DB2 W.T.

있었고, 이러한 방법은 Wavelet Transform을 채터 감지에 사용할 때 가장 좋은 레벨을 결정하는 기준이 됨을 알 수 있다.

4.2 Wavelet Transform과 채터 진단을 위한 기타 방법과의 비교

Fig. 10, 11, 12 세 그래프는 위에서 결정한 DB2 level 4로서 채터가 발생했을 때의 전체 실시간 절삭 신호를 분석한 결과를 나타낸 것으로 FORCE-X는 주 응력을 의미하고, CCS-X는 FORCE-X 방향과 나란한 방향으로의 축 변위를 의미한다.

Fig. 10의 Wavelet Transform의 결과를 보면 채터가 발생한 구간에서 RMS 값이 매우 크게 나타나며, CCS X와 FORCE X의 모양이 비슷함을 알 수 있다. CCS X의 STD 값은 채터를 감지할 수 없는 변동을 보였고, FORCE-X로는 Wavelet Transform의 결과와 비슷한 정도로 채터를 감지하는 것을 알 수 있었다. 이렇게 채터 발생시 변위 신호에 의해서 STD 값이 크게 변하지 않는 이유는 정상 절삭일 때의 변위 신호 자체가 주기적인 Sine 함수와 비슷한 파형을 보이고, 일반적으로 채터 신호의 형태는 Fig.6에서와 같이 사인파의 형상을 보이기 때문이다. 정상 신호와 채터 신호에서 STD 값의 변화는 두 신호의 크기 차이에 의존하게 되는데, 이 때 변위 신호의 경우 전체적인 신호의 모양이 변하지 않고 각 부분에서의 미세한 변화만이 나타나므로 STD 값의 변화도 작게 되기 때문이다. 만일 매우 심한 채터가 발생해서 변위 신호의 형상이 크게 변화하는 경우에는, STD 값의 변화를 이용하여 채터를 감지할 수 있음을 확인할 수 있었다. 반면 공구동력계는 회전하는 공작물이 아니라 피드 방향으로 일직선 운동을 하는 공구의 신호를 측정한다. 그러므로 공구동력계의 신호는 사인파가 아닌 일정한 수준의 신호에 약간의 진동이 추가된 신호 양상을 보이기 때문에 절삭력 신호는 변위 신호보다 채터가 발생할 때 신호의 진

폭의 변화가 매우 커져서 STD 값이 민감하게 변하게 된다는 것을 확인 할 수 있다.

Kurtosis 의 경우 Fig. 12 에서 보듯이 절삭력 신호의

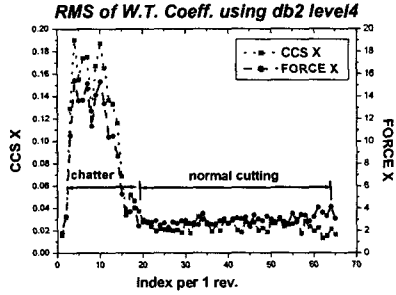


Fig. 10 W.T. on chatter condition - Speed: 1118rpm, Feed rate: 0.1mm/rev, depth: 0.1mm

경우 정상신호일 때 정규분포를 나타내는 3 에 가까운 값을 나타내다가, chatter가 발생하면 신호가 사인파로 바뀌어 사인파의 Kurtosis 값인 1.515 에 근접한 값을 나타내는 양상을 보여 준다. 변위 신호의 경우는 절삭력 신호와는 반대로 정상 신호일 때가 사인파에 더 가깝기 때문에 1.5 수준의 값을 보이다가, chatter가 발생하여 사인파의 형태가 왜곡 되면 1.5 보다 높아지게 된다. 즉 사인파의 왜곡 정도가 변위 신호에서의 chatter 수준을 보여 준다고 할 수 있다.

4.3 Wavelet Transform 을 이용한 정상상태의 신호와 chatter상태의 신호의 비교

정상적인 절삭이 이루어졌을 때와 가공도중 chatter가 발생했을 때의 경계를 구분하기 위해 Table 1 의 여러 가공 조건에서의 실험을 수행하였다. Table 2 와 Fig. 13, 14, 15 는 Table 1 의 가공 조건에서 절삭 실험을 수행한 결과를 각각 표와 그래프로 나타낸 것이다.

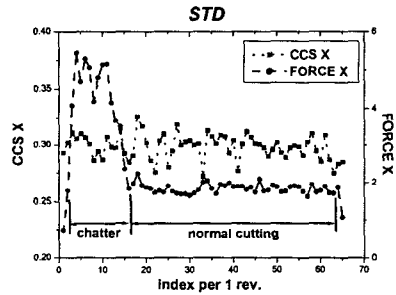


Fig. 11 STD on chatter condition - Speed: 1118rpm, Feed rate: 0.1mm/rev, depth: 0.1mm

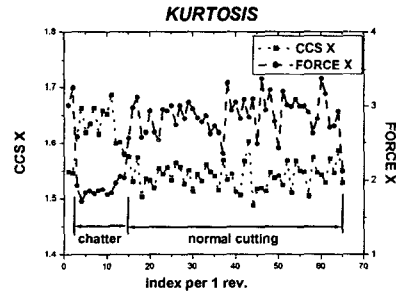


Fig. 12 kurtosis on chatter condition - Speed: 1118rpm, Feed rate: 0.1mm/rev, depth: 0.1mm

Table 2 Experimental results on normal cutting conditions

		CCS X	CCS Y	FORCE X	FORCE Y	FORCE Z
W.T. [RMS Value]	Maximum	0.0385	0.0329	3.86	3.98	4.90
	Average	0.0282	0.0284	3.13	2.91	3.11
	Minimum	0.0201	0.0213	2.48	2.19	2.03
STD	Maximum	0.314	0.294	2.78	3.54	4.50
	Average	0.299	0.284	2.08	2.25	3.01
	Minimum	0.283	0.276	1.53	1.76	1.70
Kurtosis	Maximum	1.57	1.55	3.20	3.15	3.13
	Average	1.55	1.54	2.93	2.91	2.97
	Minimum	1.54	1.52	2.80	2.78	2.90

Table 3 Experiment set condition of chatter

Ex. No.	1	2	3	4
Material of Insert	Ceramic	Ceramic	Ceramic	Ceramic
Workpiece Hardness[HRC]	60	60	60	60
RPM	1070	1419	726	730
Feed Rate[mm/rev]	0.05	0.05	0.1	0.1
Depth of Cut[mm]	0.1	0.1	0.1	0.1
Workpiece Length[mm]	170	170	170	170
Nose Radius of Tool Insert[mm]	0.8	0.8	0.8	0.8

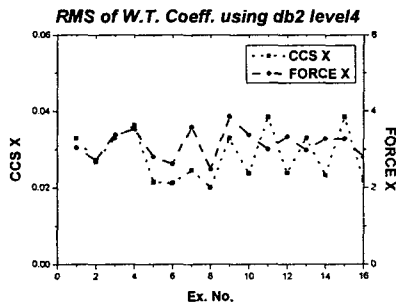


Fig. 13 Average of W.T. on normal cutting conditions

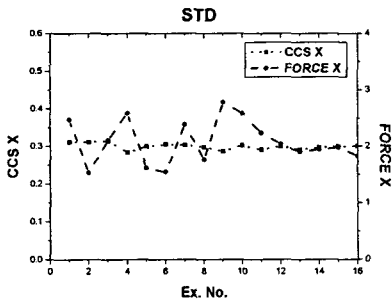


Fig. 14 Average of STD on normal cutting conditions

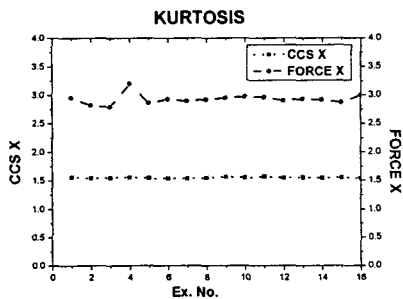


Fig. 15 Average of kurtosis on normal cutting conditions

정상 절삭을 했을 경우 Fig.13, 14, 15 에서 알 수 있듯이, 절삭 조건이 변화해도 Wavelet Transform RMS 평균값은 일정한 수준을 나타낸다. 즉 변위 신호의 경우 X 나 Y 모두 평균값이 0.03 정도이며 절삭력 X, Y 는 본 신호의 자리수의 정도 차이로 인해 평균 3 정도로 계산되지만 비슷한 경향을 보이는 것을 알 수 있다.

또 하나 주목할 점은 Wavelet Transform 을 수행한 그래프가 다른 그래프에서보다 최대값이 평균값이나 최소값의 변화에 비해 상당히 큰 변화를 나타내고 있는데, 이것은 가공도중 칩이 영킨 부분에서의 Wavelet Transform 의 RMS 값이 상승하기 때문이다.

Table 3 은 여러 절삭 조건에서 발생하는 채터에 대해 비교 분석하기 위해서, Table 1 조건 중에서 실험자의 경험을 바탕으로 일부 조건을 수정하여 채터가 발생했을 때의 절삭 조건을 나타낸 표이다. Fig.16, 17, 18 은 Table3 의 조건으로 절삭을 수행하여 채터가 발생했을 때의 신호를 Wavelet Transform 과 STD 그리고 Kurtosis 를 이용해서 나타낸 결과이다.

각 그래프에서는 채터가 발생한 시점과 진행과정 그리고 다시 정상 절삭 상태로 바뀌는 시점을 잘 나타내 주고 있다. 절삭 조건이 변화해도 각 실험 결과의 전체적인 양상은 비슷하게 나타났으며, 채터의 수준에 따라 최대값이 다르게 나타났다. 각 그래프에서 보면 W.T.을 이용한 결과가 STD 나 Kurtosis 를 이용한 결과보다 정상구간과 채터구간의 값의 차이가 더욱 커서 채터에 대한 민감도가 다른 두 결과보다 우수함을 알 수 있다.

절삭력 Z 를 제외한 변위 X 이외의 신호에서도 이와 같은 결과를 도출할 수 있었다. 절삭력 Z 의 경우, 다른 신호들과는 다르게 채터가 발생한 구간에서 정상 절삭 구간과 큰 차이를 보이지 않아 채터를 감지하기에는 부적합하게 나타났다.

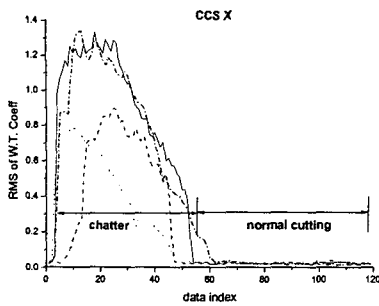


Fig. 16 Wavelet Transform on chatter conditions

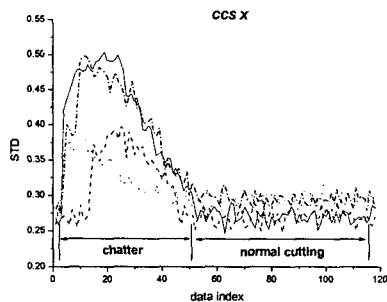


Fig. 17 STD on chatter conditions

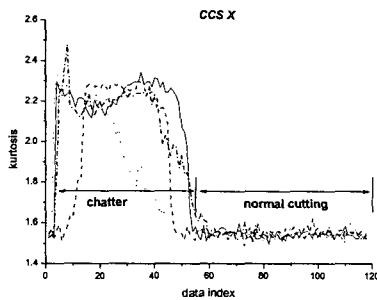


Fig. 18 Kurtosis on chatter conditions

5. 결론

하드터닝 공정 중 표면품질의 향상을 위해 실시간 절삭 과정 중에 발생하는 채터를 감지하기 위해서 원통형 변위 센서와 공구동력계로 측정된 신호를 FFT 와 Wavelet Transform, STD, Kurtosis 등을 이용해서 분석해 보았다. 여러 가지 조건외 정상 상태 신호와 채터 상태에서의 신호를 비교 분석해 보았고 Pseudo Frequency 등을 이용하여 하드터닝 및 일반 선삭에서 보다 좋은 채터 진단 결과를 보여주는 Wavelet 함수를 찾고, 이를 이용하여 실시간 채터 진단을 수행했다.

이와 같은 실험으로 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 채터 주파수에 해당하는 Pseudo-frequency 를 갖는 Wavelet 함수를 이용하여 절삭 과정 중에 발생하는 채터를 민감하게 감지할 수 있었다. 일반적으로 하드터닝에서 채터 진동수가 200 ~ 600 [Hz]정도인데 이는 Level 4의 DB2 함수를 이용하면 채터를 진단 할 수 있음을 알 수 있었다.

(2) 채터가 발생했을 때의 신호는 변위 센서와 공구동력계에서 모두 비슷한 양상을 보였고, 분석한 결과 두 신호 모두 채터 진단에 효율적으로 적용될 수 있음을 보였다.

(3) Wavelet Transform, STD, Kurtosis 모두 변위 신호와 공구동력계 신호를 이용한 채터 발생의 진단 및 발생 위치나 그 수준을 감지할 수 있음을 알 수 있었다. 그 중 Wavelet Transform을 이용한 분석은 STD나 Kurtosis 보다 채터가 발생 했을 때 더욱 민감한 값의 변화를 보이고 변위 신호 및 절삭력 신호 모두에서 보다 채터 진단에 효율적인 것을 알 수 있었다.

후기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(2000-1-30400-008-3) 지원으로 수행되었음.

참고문헌

- (1) Jang DongYoung, Choi Y., Kim H., and Hsiao, 1996, A. "Study of the Correlation Between Surface Roughness and Cutting Vibrations to Develop an On-line Roughness Measuring Technique in Hard Turning," *International Journal of Machine Tools Manufacturing*, 36(3), pp. 453-464.
- (2) König, W., Klinger, M. and Link, R., 1990, "Machining Hard Materials with Geometrically Defined Cutting Edges - Field of Applications and Limitations," *Annals of CIRP*, Vol. 39, pp. 61-64.
- (3) Wick, C., 1988, "Machining with PCBN Tools," *Manufacturing Engineering*, pp. 73-78.
- (4) Nakai, T., Nakatani, S., Tomita, K. and Goto, M., 1991, "Hard Turning by PCBN," Superabrasive 91', *the International Conference and Exposition Focusing on Industrial Applications of Diamond and CBN*, Chicago, IL, June 11-13, 1991, pp. 11-61.
- (5) Ekstedt, T., 1987, "Challenge of Hard Turning," *Carbide and Tool Journal*, Vol. 19, pp. 21-24.
- (6) Gorlenko, O.A., 1981, Assessment of Surface Roughness Parameters and Their Interdependence, *Precision Engineering*.
- (7) Thomas, T.R., 1981, "Characterization of Surface Roughness," *Precision Engineering*.
- (8) Jang DongYoung, Seireg, A., 1989, "Dynamic

- Simulation for Predicting Surface Roughness in Turning,” *ASME Machinery Dynamics Applications and Vibration Control Problems*, De Vol. 182, pp. 31~36.
- (9) Saxena J. P., 1982, “Effect of Machining Conditions on Cutting Tool Vibrations.” *Adv. Mach. Tool Des. Manufact. Tech.*, pp. 98~106.
- (10) Taraman, K., 1974, “Multi Machining Output – Multi Independent Variable Turning Research by Response Surface Methodology,” *International Journal of Production Research* 12, pp. 233~245.
- (11) Hasegawa, M., Seireg, A. and Lindberg, R.A., 1976, “Surface Roughness Model for Turning,” *Tribology International*, pp. 285~289.
- (12) Kim, IIHae 2001, A Study on In-Process Measurement of Spindle Vibration and Cutting States Using Cylindrical Capacitive Displacement Sensor.
- (13) TLUSTY, J., 2000, *Manufacturing Process and Equipment*. Prentice Hall.
- (14) Cho, D.W., Lee, S.J. and Chu, C.N., 1999, “The State of Machining Process Monitoring Research in Korea,” *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 39, pp. 1697~1715.
- (15) PANDIT, S.M., SUBRAMANIAN, T.L., and WU, S.M., 1975, “Modeling Machine Tool Chatter by Time Series,” *Journal of Engineering for Industry* 97, pp. 211~215.
- (16) C. Sidney Burrus, Ramesh A. Gopinath, Haitao Guo, 1998, *Introduction to Wavelets and Wavelet Transforms*. Prentice Hall.
- (17) Stéphane Mallat, 1998, *A Wavelet Tour of Signal Processing* 2nd. Ed., Academic Press.
- (18) Berger, B. S., Minis, I., Harley, J., Rokni, M. and Papadopoulos, M., 1998, “Wavelet Based Cutting State Identification,” *Journal of Sound and Vibration* 213(5), pp. 813~827.
- (19) Khraisheh, M. K., Pezeshki, C. and Bayoumi, A. E., 1995, “Time Series Based Analysis for Primary Chatter in Metal Cutting,” *Journal of Sound and Vibration* 180(1), pp. 67~87.
- (20) RuXu Du, 2001, *Engineering Monitoring and Diagnosis Using Wavelet Transforms*, CRC Press LLC
- (21) <http://www.mathworks.com>, Wavelet Toolbox.
- (22) BOOTHROYD, G., 1975, *Fundamentals of Metal and Machine Tools*, New York: McGraw-Hill..