

## Wavelet 변환을 이용한 공구파손 검출

양재용\*(부경대원), 하만경, 구양, 윤문철, 박재섭(부경대), 정진서(부산기능대)

### Detection of Tool Failure by Wavelet Transform

J. Y. Yang(Graduate, PKNU), M. K. Ha, Y. Koo, M. C. Yoon, J. S. Kwak(PKNU), J. S. Jung(PIPC)

#### ABSTRACT

The wavelet transform is a popular tool for studying intermittent and localized phenomena in signals. In this study the wavelet transform of cutting force signals was conducted for the detection of a tool failure in turning process. We used the Daubechies wavelet analyzing function to detect a sudden change in cutting signal level. A preliminary stepped workpiece which had intentionally a hard condition was cut by the inserted cermet tool and a tool dynamometer obtained cutting force signals. From the results of the wavelet transform, the obtained signals were divided into approximation terms and detailed terms. At tool failure, the approximation signals were suddenly increased and the detailed signals were extremely oscillated just before tool failure.

**Key Words :** Wavelet transform(웨이브렛 변환), Cutting force signal(절삭력 신호), Tool failure(공구파손), Turning process(선삭공정), Chatter vibration(채터 진동)

#### 1. 서론

최근에는 정밀기계가공, 전자, 반도체, 전기, 광학등을 비롯해 영상, 정보, 항공우주산업등의 급속한 발달로 인하여 그 구성부품들의 고정도 가공의 필요성이 증대하고 있다. 또한 금형산업, 자동차 산업, 첨단 항공산업등에 기계가공은 넓은 사용범위에 비해 가공정밀도 개선이나 최적가공조건을 위한 연구가 부족한 실정이다.

생산가공의 분야에서 생산설비의 상태에 대한 진단은 매우 중요하게 인식되고 있다. 생산가공 장비중에서 공구상태를 진단할수 있는 방법에는 절삭력, 토크, 음향방출, 전력, 전류, 광학등이 이용되고 있다. 이 중에서 일반적으로 사용되고 있는 것은 공구동력계를 이용한 절삭력 신호의 측정이다. 이 절삭력 신호를 최근 활발히 연구되고 있는 방법중 하나는 웨이브렛 변환(Wavelet Transform)을 이용하여 공구파손의 특징추출을 하는 방법이다. 이전의 신호처리 기법에 있어서는 단시간푸리에변환(Short-time Fourier Transform)이 사용되었는데 이는 시간영역에서의 창(Windows)의 크기가 항상 일정하

기 때문에, 결함에서 되돌아오는 신호를 분석하기 곤란하다. 즉 모든 시간 영역에서 창의 크기가 같고 또한 주파수의 고저에 무관하게 모든 주파수대역에서 같은 분해능을 갖는 특징으로 인하여 급격하게 변화하는 신호분석에는 별로 적합하지 않다. 따라서 추출된 신호로부터 의미있는 정보를 추출하고, 신호의 정량적 분석을 할 수 있는 방법들이 적용되고 있다

웨이브렛 변환은 시간과 주파수 영역에서 변동 크기를 갖는 기저함수를 이용하여 시간과 주파수 영역의 정보를 균형적으로 확대 축소할 수 있는 장점이 있다<sup>(1)</sup>. 또한 신호에 대한 다각적 해석(Time-Frequency Analysis)을 가능하게 하는 유용한 도구이며, 여러 종류의 신호를 분석하여 신호가 포함하고 있는 물리적 의미를 유용하게 파악하는데 쓰인다<sup>(2)</sup>.

기존 연구에서는 아직 웨이브렛 변환을 이용해서 기계가공신호의 처리를 위해 적용한 연구가 아직 부족한 실정이며, 음성이나 영상 신호처리, 지진파, 의료, 진동등에서 많은 응용과 연구가 이루어지고 있다<sup>(3)</sup>.

본 연구에서는 선삭가공에서 가공중(On-line)에 공구팁의 절삭력 신호를 검출하여 웨이브렛 변환을 이용하여 신호분석 함으로써, 공구파손이 일어나는 이상상태를 진단하고, 선삭 뿐만 아니라 다른 기계 가공신호에의 적용에 대한 가능성을 제시하고자 한다.

## 2. Wavelet 이론

신호해석의 목적은 신호의 변환에 의해 임의의 신호로부터 관련 정보를 얻어내는데 있다. 일부신호의 해석방법은 해석을 위해서 일정한 가정을 해야 되며, 이것이 정확한 결과를 낸다고 하더라도 일반적으로 사용하기에는 곤란할 경우가 있다. 이 경우 일반적으로 적용가능한 시험방법이 필요하며, 해석신호의 역변환도 고려하여야 한다.

정현파가 아닌 신호에 대하여 해석하는 방법으로 시간-주파수의 2차원적 함수로 분석하는 Short time Fourier Transform 해석 방법이 Garbor에 의해서 나오게 되었다. 이는 신호를 일정한 크기의 해석 윈도우를 사용하여 윈도우의 크기에 따라 결정되는 극히 제한된 범위에 대한 정보만을 제공하고, 빠른 과도현상이 일어나는 신호에 대해서는 정확한 분석이 이루어지기 어렵다. 이에 가변적인 윈도우를 얻을 수 있는 방법인 웨이브렛 변환이 사용되게 되었다.

### 2.1 연속 웨이브렛 (Continuous Wavelet)

연속 웨이브렛 변환이란 연속 웨이브렛 함수를 이용해서 신호를 분석하는 새로운 방법을 말한다. 만일 분석하고자 하는 신호를  $f(t)$ , 웨이브렛 함수를  $\Psi_{a,b}(t)$ 라고 하고, 이는 공액복소수(Complex conjugate)이다.  $\Psi(t)$ 를 마더 웨이브렛(Mother Wavelet)라 하면, 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

$$W(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot \Psi_{a,b}(t) dt \quad (1)$$

여기서, 웨이브렛은 마더 웨이브렛을 시간축에 따라 증폭(Scaling)하고, 위치이동(Shift)시킴으로써 얻어지는 함수들의 집합이다<sup>(4)</sup>

이 방법은 STFT가 일정한 윈도우를 취함으로써 나타나는 분해능의 한계를 극복할수 있게 해준다.

$$\Psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (2)$$

여기서,  $\Psi_{a,b}(t)$ 는 모 웨이브렛을 시간축상에서  $a$ 배 만큼 크기를 증폭(Scaling)시키고,  $b$ 만큼 위치이동(Shift)시킨 함수이다. 또한 스케일링 함수

의 적분값은 아래식을 만족한다.

$$\int_{-\infty}^{\infty} \Psi(t) dt = 1 \quad (3)$$

따라서, 웨이브렛 변환식은 다음과 같이 나타낸다.

$$W(a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (4)$$

그리고 웨이브렛은 다음과 같은 특징을 가진다.

$$I) \int_{-\infty}^{\infty} \Psi(t) dt = 0 \quad (5)$$

II) 밴드패스(Bandpass) 신호이다.

III) 시간영역에서 영(Zero)으로 빠르게 감소한다.

I)은 웨이브렛 변환이 역변환이 존재하기 위한 조건이고, II)는 주파수 영역에서 웨이브렛 함수의 특징을 나타낸다. III)은 실제적인 웨이브렛 변환에서 시간영역에서의 분해능을 좋게하기 위한 조건이다.

마더 웨이브렛의 형태는 Morlet, Haar, Shannon, Meyer, Daubechies 등 만들어낸 사람들에 따라 다양하며 각각의 마더 웨이브렛이 가지고 있는 신호분해의 특징과 장점에 따라서 응용되는 분야는 다를 수 있다<sup>(5)</sup>

### 2.2 이산 웨이브렛 (Discrete Wavelet)

연속 웨이브렛 변환이 분석하고자 하는 신호가 연속적인 신호의 경우에 사용됨에 반하여 분석하고자 하는 신호가 연속적인 신호를 표본추출한(Sampled Data)인 경우에는 이산 웨이브렛 변환이 사용된다.

이산 웨이브렛 변환은 같이 해석하고자 하는 신호를 이산 저주파 성분 통과 필터(Discrete Low Pass Filter)  $p$ 를 이용하여 신호의 전체적인 특징을 분석하고, 이산 고주파 성분 통과 필터(Discrete High Pass Filter)  $q$ 를 이용하여 신호상의 미세한 특징을 분석해 내는 것을 말한다. 따라서 주어진 신호  $S$ 를 각각  $p$ 와  $q$ 를 통과시켜  $A1$ 과  $D1$ 으로 분해한 후 다시  $A1$ 을  $A2$ 와  $D2$ 로 분해하는 과정을 반복한다.

## 3. 실험장치 및 조건

### 3.1 장치 구성도

본 연구에서는 선반을 이용해 가공중(On-line)의 절삭력을 측정하고자 했다. Fig. 1에서는 실험 장치 구성도를 나타내었다. 또한 공구동력계를 설치하기 위해 공구를 고정할 수 있는 지그를 제작했다. Fig. 2에서는 시편의 크기와 모양을 나타내었는데 각 단을

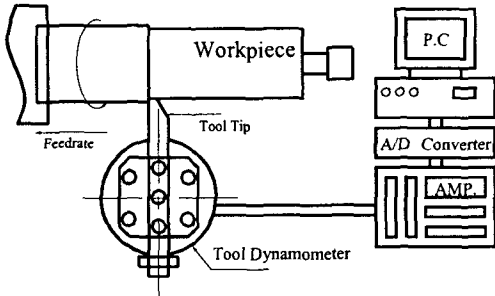


Fig. 1 Experimental set-up

1.5mm씩 주어 절입깊이가 깊어지는 형상으로 제작하였다.

공구동력계는 Kistler사의 9272 Type의 공구동력계를 사용하였고 검출되는 절삭력 신호의 변화거동을 관찰하기 위하여 오실로스코프(Oscilloscope)로 시각화 하였고, 신호를 Amplifier로 증폭한 후 12bit의 분해능을 가진 A/D변환기를 사용하여 얻어진 데이터를 컴퓨터에 저장하여 절삭력을 검출하였다.

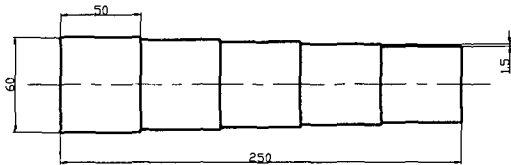


Fig. 2 Demension and Shape of specimen

### 3.2 실험조건

실험을 위해 아래의 Table의 조건과 같이 실험을 하였고, 시편은 기계구조용강인 열처리하지 않은 SM45C의 환봉을  $\phi 60 \times 250$ 의 공작물을 사용했다. 공작물은 공구의 파손을 감지하기 위해 1.5mm씩 단을지게 제작하였다. 이송속도를 0.3mm/rev의 속도

Table 1 Experimental condition

Items	Type
Lathe	HWACHEON HL 380B
Tool dynamometer	Kistler 9272
Amplifier	Kistler 5019
Tool	TNGA160408
Specimen	SM45C 250×60 $\phi$
Turning conditions	Feedrate : 0.3mm/rev Spindle speed : 680rpm

로 공구가 이송하면서 절입깊이가 깊어져 공구파손이 일어나는 시점까지의 절삭력을 측정하였다. 절삭용 팁은 대한중석의 TNGA160408 Type의 세라믹과 메탈을 혼합한 서멧(Cermet)절삭 팁을 사용했다.

### 4. 신호의 변환과 분석 및 고찰

Fig. 3는 공작물을 이송속도 0.3mm/rev, 스피드 속도 680rpm으로 가공중 On-line으로 절삭력 신호를 받은 데이터를 전압크기로 나타내었다. 이 원 신호를 웨이브렛 변환을 이용해서 저주파와 고주파로 분해해서 나타낸 신호를 Fig. 4에서는 1차 웨이브렛 변환된 저주파와 고주파 신호를, Fig. 5에서는 2차 웨이브렛 변환된 저주파와 고주파 신호로 각각 분해하였다. 여기서 웨이브렛 변환을 위한 기저 웨이브렛으로는 여러 종류의 마더 웨이브렛중 신호분석에 사용된 마더 웨이브렛은 신호의 크기가 작고, 빠른 감쇠와 짧은 지연특성, 또한 진동하는 형태의 신호이므로 신호의 형태를 고려하여 Daubechies 계열의 계수인 Daubechies-4계수를 사용하여 변환을 수행했다.

변환된 데이터에서 볼수 있는 것처럼 Fig. 3의 원 신호를 3차변환까지 하여 저주파로부터 신호의 형태에 대한 정보를 얻을수가 있고, 고주파로부터 각 신호의 크기에 따른 정보를 얻을수 있다. 절입깊이 3단계인 4.5mm의 절입깊이에서 과도절삭으로

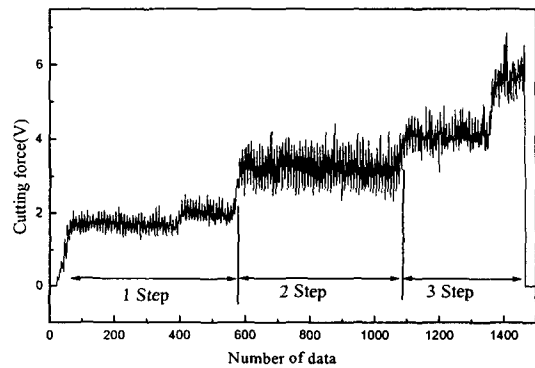


Fig. 3 Cutting force signal on turning

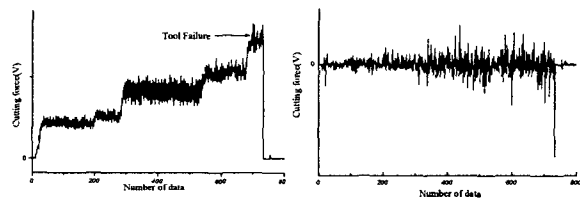


Fig. 4 First level of wavelet transform

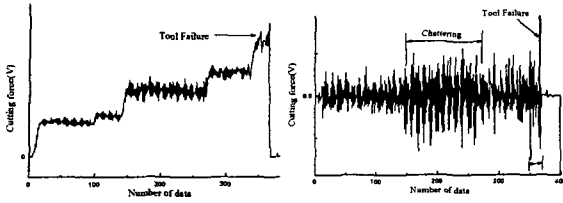


Fig. 5 Second level of wavelet transform

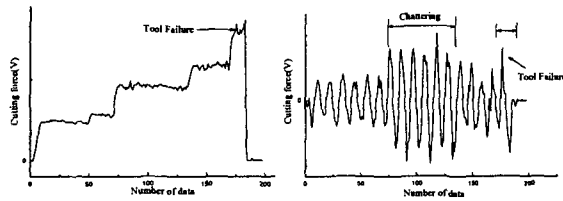


Fig. 6 Third level of wavelet transform

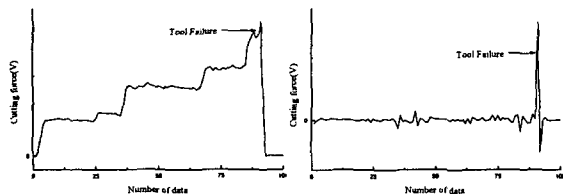


Fig. 7 Forth level of wavelet transform

인한 절삭력의 급격한 상승후 공구팁이 파손이 일어났다. 이는 신호처리를 통해 공구파손의 시점과 정량적 값을 정확히 알아낼 수 있음을 보여주고 있다. 또한 2단계인 3mm의 절입깊이 구간에서는 공작물이 채터링이 일어난 현상을 신호를 통해 알 수 있는데 저주파 신호에서는 신호의 크기와 형태를 특징적으로 나타내 주고 있으며, Fig. 5와 Fig. 6의 고주파 신호에서 보게되면 채터링이 일어난 구간에서는 절삭력이 다른구간에 비해 큰 것을 보여주고 있다. 또한 Fig. 7의 고주파 신호에서는 공구파손이 일어난 부분의 절삭력의 크기가 최대로 커지면서 파손이 일어난 시점이라는 것을 보여주고 있다. 절입깊이가 깊어짐에 따라 절삭공구에 걸리는 저항이 커지면서 시스템이 불안정해지면서 공구파손이 발생했다. 그리고 공구파손으로 인해 절삭이 되지 않고 절삭력은 영으로 감소했다. 여기서 웨이브렛 변환을 통해 미세한 신호특징의 추출과 분석이 가능함을 보여주고 있다. 그리고 Fig. 8에서는 채터링이 발생한 시편의 사진과 파손된 공구팁의 사진을 보여주고 있다.

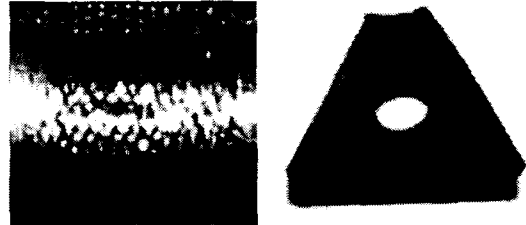


Fig. 8 Photograph of chattering specimen and damaged cermet tip

### 5. 결론

본 연구에서는 선반가공에서의 절삭력 신호를 획득하여 그 신호로부터 특징추출을 위해 기존의 신호처리 방식과는 다른 웨이브렛 변환을 이용하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 절삭력신호에서 공구파손시 급격히 증가하는 저주파, 고주파신호의 분석으로 인해 공구파손시점의 예측이 가능하였다.
2. 채터링이 발생한 구간의 가공에서 고주파신호의 분석을 통해 채터링이 발생하는 구간의 신호분석이 가능함을 보여주었다.
3. 최근 활발히 연구되고 있는 새로운 신호처리 방식인 웨이브렛 변환을 도입하여 기계가공신호의 분석에 적용한 결과 그 유효성을 입증하였다.

### 참고문헌

1. G. Strang, T. Nguyen, "Wavelet and Filter Banks", Wellesley-Cambridge Press, pp. 221~262, 1997.
2. Yisong Dai, "The Time-Frequency analysis approach of electric noise based on the wavelet transform", Solid-State Electronics 22, pp. 2147~2153, 2000.
3. 이호철, 김윤영, 이용욱, "모드형상의 웨이브렛 변환을 이용한 보의 결함 진단", 한국소음진동공학회 춘계학술대회논문집, pp. 430~435, 1999.
4. I. Daubechies, "The wavelets transform, time-frequency localization and signal analysis", IEEE Transactions on Information Theory, Vol. 39(5), pp. 961~1005, 1990.
5. S. G. Mallat, "A theory for multi-resolution signal decomposition : the wavelet representation", IEEE Transaction on pattern Analysis and Intelligence, Vol. 11(7), pp. 674~693, 1989.