

# 웨이브렛 변환에 의한 밀링공구의 파손검출

Tool Breakage Detection using Wavelet Transform in Milling Operations

김 신 호, 박 화 영

한국기계연구원 자동화연구부

Sunho Kim, Hwayoung Park

Automation Eng. Dept., KIMM

## 1. 서론

간접적인 방법으로 가공중(In Process) 공구상태를 감지하기 위해, 센서신호를 분석하는 방법으로 시간영역(Time Domain) 해석과 주파수영역(Frequency Domain) 해석이 주로 이용되어 왔다. 시간영역해석의 경우 RMS, Peak Value, 평균/분산을 이용한 정적분석과 AR 모델, ARMA 모델, Kalman Filter 등 동적 시계열 모델이 연구되어 왔다. 주파수영역해석의 경우 푸리에 변환(Fourier Transform)에 의한 신호해석 기술이 주로 이용되고 있다. 그러나 푸리에 변환된 결과에는 시간정보가 포함되어 있지 않고, 국부적인 변환결과가 전체를 대표하는 성질을 가지고 있다. 이에 비해 웨이브렛(Wavelet) 변환은 고주파성분에 대해서는 시간분해능이 높고, 저주파성분에 대해서는 주파수분해능이 높은 다중해상도 해석기술로서 국소적인 변동점을 민감하게 감지하는 것이 가능하다.

본 연구에서는 엔드밀 가공중 발생하는 공구의 파손을 검출하기 위해, 전류센서로 부터 얻은 이송축 부하 전류의 변화에 웨이브렛 변환을 통해 공구의 파손을 검출하는 방법에 대한 연구결과를 소개한다.

## 2. 이론적 배경

종전에는 웨이브렛 변환기술이 의학의 잠수함 탐지, 의학 영상 처리(Medical Image Processing), 음악 합성(Music Synthesis) 등 특수목적에 이용되어 왔으나, 최근에는 생산분야에 적용되어 드릴상태 감지에 적용되기도 했다[1]. 이것은 질서적이거나 전류신호와 같이 비정상성(Nonstationary)을 갖는 신호의 분석에 적합하다.

웨이브렛은 일반적으로 다음과 같은 함수로 표시가 가능하다[2].

$$h^{(a,b)}(x) = |a|^{-1/2} h\left(\frac{x-b}{a}\right)$$

여기서 a는 Dilation Parameter이며, b는 Translation Parameter이다.

웨이브렛 변환후 원신호는 다음과 같이 재구성이 가능하다.

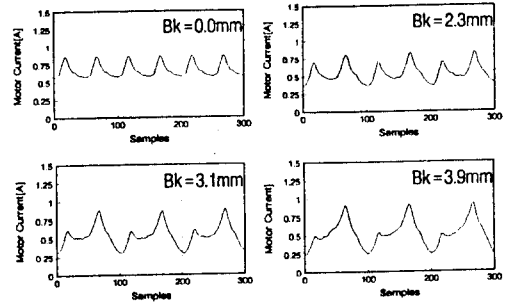


그림1. 공구상태에 따른 전류신호의 변화 (780rpm, Rd6mm, Ad6mm, F100mm/min)

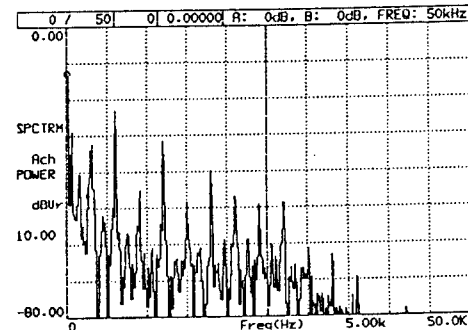
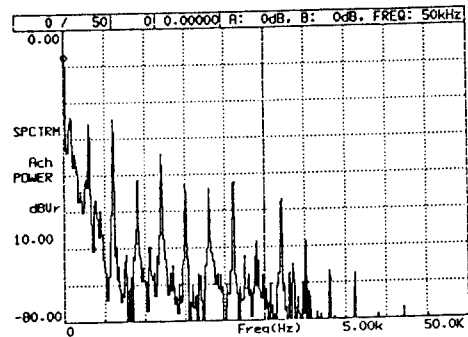


그림2. 전류신호의 푸리에 변환 (그림 위: 정상공구, 그림 아래: 부리진공구)

$$f = C \int \frac{da}{a^2} \int db \langle h^{(a,b)}, f \rangle h^{(a,b)}$$

$f$ : 원함수

$\langle h^{(a,b)}, f \rangle$ : 웨이블릿의 내적

이산적(Discrete) 신호분식을 위해 이산웨이브렛 변환(Discrete Wavelet Transform)은 Daubechies식 [2,3]을 사용한다.

$$(Tf)_{mn} = \langle h_{mn}, f \rangle = a_0^{m/2} \int dx h(a_0^m x - nb_0) f(x)$$

$(Tf)_{mn}$ : Discrete Wavelet Transform

$\langle h_{mn}, f \rangle$ : Wavelet 계수

$a_0, b_0$ : Fixed Dilation and Translation Steps

Dilation과 Translation 계수는 다음과 같은 관계가 있다.

$$a = a_0^m, b = nb_0 a_0^m$$

$m, n$ : Index

이상과 같은 관계에서 원 함수는 다음식으로 재구성이 가능하다.

$$f(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c(n) \phi_n(x) + \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=-\infty}^{\infty} d(i, j) \psi_{ij}(x) \quad (1)$$

$$\text{여기서 } c(n) = \int f(t) \phi_n(t) dt$$

$$d(i, j) = \int f(t) \psi_{ij}(t) dt \text{는 웨이블릿 변환의 계수}$$

이때  $\phi(x), \psi(x)$ 는

$$\phi(x) = \sum_n h(n) \phi(2x-n)$$

$$\psi(x) = \sum_n (-1)^n h(n+1) \phi(2x-n) \text{가 된다.}$$

$\phi(x)$ : Scaling Function

$\psi(x)$ : Primary Wavelet

$c(n)$ : Wavelet 변환의 계수

$n$ : Index

(1)식에서 두번째항은 무시해도 원함수를 충분히 재현함으로 [1], 본 논문에서는 첫번째항만 고려한다. 또한  $h(n)$ 은 Daubechies계수 [2]로 (0,3)을 사용했고, Mallet 기법 [4]을 이용해  $c(n)$ 을 구했다.

### 3. 실험장치 및 방법

절삭실험에는 수직형머시닝센터(대우중공업, FZ25)가 사용되었다. 머시닝센터의 주축은 7.5KW의 AC 서보모터, X, Y 이송축은 1.1KW의 DC 서보모터 그리고 Z 이송축은 1.8KW의 DC 서보모터로 구동된다. 가공물은 S45C(ANSI 1045+)가, 공구는 직경 25mm의 2개

의 턴을 갖는 T.A.형 엔드밀 홀더(Sumitomo CME 2025)와 초경합금 P30(Sumitomo MDMM52R) 턴이 사용되었다. 주축 회전수는 780rpm으로 고정시키고 이송 속도와 절삭깊이(Rd) 절삭폭(Ad)을 변화시켜 가면서

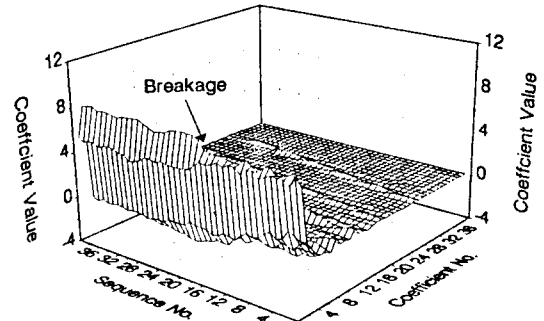
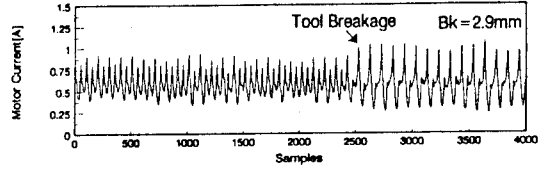


그림3. 공구가 부러지는 순간의 이송축 전류신호 및 웨이블릿 계수의 변화 (780rpm, Rd6mm, Ad5mm, F160mm/min)

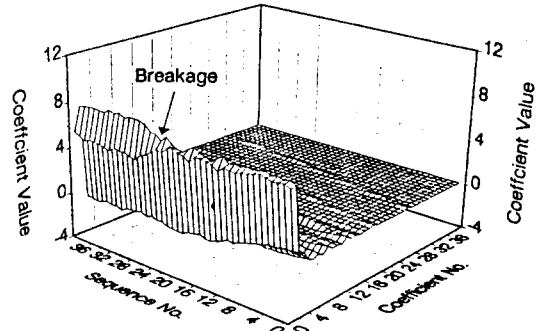
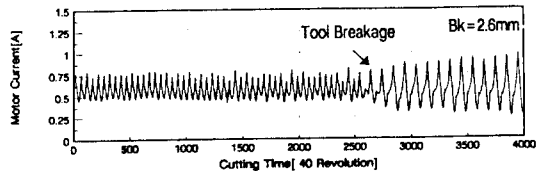


그림4. 공구가 부러지는 순간의 이송축 전류신호 및 웨이블릿 계수의 변화 (780rpm, Rd8mm, Ad4mm, F100mm/min)

실험을 하였다. 센서로는 실용성과 유연성을 고려해 이송축 모터와 드라이버 사이에 설치된 홀(Hall)형 전류센서를 사용했다.  $N/D$  샘플링 주파수는 3,328Hz(주축 1회전당 256 데이터 수집)로 하였다. 엔드밀 턴을 파손 시키기 위해 턴의 뒷면에(앞면은 절삭력에 영향을 줌) WEDM을 이용해 0.2mm의 홈 작업을 수행했다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

실험결과 공구가 파손되기 전 신호와 파손된 후의 전류신호를 각 주축 3회전에 대해 그림1에 나타내었다. 공구가 파손되기 전에는 각 턴의 전류 분포가 고르게 나타난다. 그러나 턴이 부러지면 두개의 턴에 분포되는 전류의 차이는 다르게 나타난다. 즉 부러진 턴은 그 만큼 칩(Chip) 제거량이 작아져서 부하가 적어지나, 그 다음에 오는 턴의 경우 상대적으로 제거해야 할 칩의 양이 많아져 부하가 크게 나타난다. 이는 턴의 부러진 량(Bk)이 크면 클수록 격차가 커진다.

본 연구에서는 이러한 전류신호를 2가지 방법을 사용해 공구파손을 검출한다.

그림2는 턴이 부러지기전과 턴이 부러진 후 나타나는 이송축 부하 전류신호를 푸리에 변환한 결과이다. 거의 특징을 찾기 어렵다.

그림3-5는 몇가지 경우에 있어서 턴이 부러지는 순간에 대해 웨이블릿 개수를 구해 연속적으로 표시한 결과이다. 개수는 40개로 하였으며 턴이 부러지는 순간을 전후하여 주축 1회전당 256개의 데이터를 취해 웨이블릿 변환을 수행했다. 그림에서 보이듯이 턴이 부러지면 웨이블릿의 크기 뿐 아니라 패턴의 변화도 크게 나타난다. 이것은 밀링공구의 파손을 검출하는데 좋은 정보가 된다.

#### 5. 결론

본 연구에서는 엔드밀 가공중 발생하는 공구의 파손을 검출하기 위해, 전류센서로 부터 얻은 이송축 부하 전류의 변화를 이용해 주파수분석을 수행했다. 주파수 분석은 푸리에 변환과 웨이블릿 변환등 2가지 방법을 적용했는데, 비정상성을 갖는 전류신호의 경우, 웨이블릿 변환은 좋은 신호처리 기술임을 입증했다.

#### 참고문헌

- [1] Tansel, I. N., Mckdeci, C., Rodriguez, O. and Uragan, B., "Monitoring Drill Conditions with Wavelet Based Encoding and Neural Networks", Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 33, No.4, pp.559-575, 1993
- [2] Daubechies, I., "Orthonormal Bases of Compactly Supported Wavelets", Commun Pure Appl. Math. XLI, pp.909-996, 1988
- [3] Daubechies, I., "The Wavelet Transform, Time-Frequency Localization and Signal Analysis", IEEE Trans. on Inf. Theory, Vol. 36, NO.5, pp.961-1005, 1990

[4] Newland, D. E., "Some Properties of Discrete Wavelet Maps", Probabilistic Engineering Mechanics, 9, pp.59-69, 1994

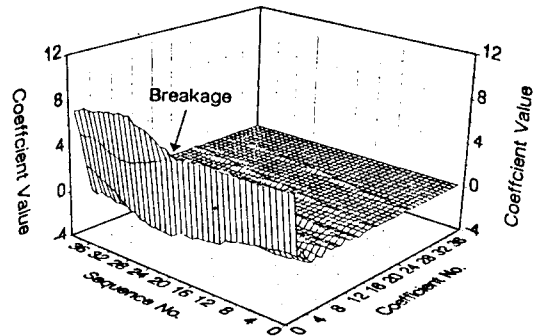
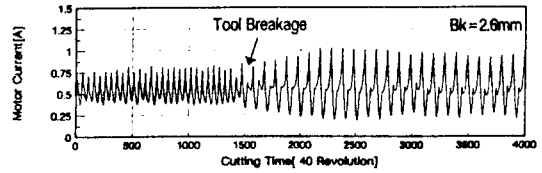


그림5. 공구가 부러지는 순간의 이송축 전류신호 및 웨이블릿 개수의 변화 (780rpm, Rd8mm, Ad5mm, F100mm/min)