

웨이브렛 변환을 이용한 CNC 공작기계의 툴 모니터링

서동욱*, 김도현(서강대 대학원 기계공학과), 전도영(서강대 기계공학과)

Tool Monitoring of a CNC Machining Center Using The Wavelet Transform

D. U. Seo, D. H. Kim(Mech. Eng. Dept., SGU), D. Y. Jeon(Mech. Eng. Dept., SGU)

ABSTRACT

Detection of tool wear is very important in automated manufacturing. This paper presents tool condition monitoring system based on the wavelet analysis of the AC servo motor current in drilling and milling process. The current measurement system is relatively simple and its mounting will not affect machining operations. The discrete wavelet transform was used to decompose the current signal of a spindle AC servo motor in time-frequency domain. The feature vectors were extracted from the decomposed signals and compared for normal and wear condition. The results show the possibility for the effective application of wavelet analysis to tool condition monitoring.

Key Words CNC machining center (CNC 공작기계), Wavelet transform (웨이브렛 변환), Tool monitoring (툴 모니터링), Drilling (드릴링), Milling (밀링), Spindle current (주축전류)

1. 서론

자동화된 생산시스템에서 생산설비의 상태 모니터링은 중요한 부분으로 인식되고 있고 시스템의 신뢰성 및 가동률 향상을 위해 많은 연구가 진행되고 있다. 제조공정에서 기계 가공의 생산성과 생산물의 품질은 공구 상태의 영향을 받는다. 마모된 툴은 공정의 성능에 영향을 주게 되고, 결국 생산물의 질을 저하시키게 된다. 툴이 파손되었을 경우에는 작업의 안전성 및 가공시간의 손실뿐만 아니라 공정성능과 생산물의 품질 저하에 더 심각한 문제를 일으킬 수 있다¹⁾. 자동화의 관점에서 공구가 적절한 시기에 교체될 수 있도록 공정 중에 공구의 마모 진행 상태 및 파손 감지를 위한 시스템의 개발이 필요하다.

이에 본 연구에서는 CNC 공작기계로부터 수집한 전류 신호의 웨이브렛 변환을 통한 공구의 마모 감지를 수행하여 적용 가능성을 살펴보았다. 먼저 웨이브렛 변환의 이론적 배경을 간략히 설명하고, 실험장치 구성과 공구의 마모 상태 분석결과와, 마지막으로 결론 및 현재 연구중인 사항에 대한 언급을 하였다.

2. 웨이브렛 변환

웨이브렛 이론은 순수 수학에의 응용뿐만 아니라, 이를 이용한 신호 및 시스템의 해석에 관한 연구가 1990년대 들어 활발해지고 있고, 다양한 공정에서 웨이브렛 변환을 공구의 파손 감지와 마모상태 진단 및 예측에 적용하였다. Xiaoti Li 등은 웨이브렛 변환을 이용하여 공구의 파손을 감지하였으며^{1) 2)}, 많은 연구에서 퍼지, 신경망 등과 함께 웨이브렛 변환을 툴 모니터링에 활용하였다^{3) 4)}. 웨이브렛 변환은 여러 센서로부터 연속적으로 발생하는 신호 중 아주 불규칙적인, 그리고 시간대역이 아주 짧은 신호들의 해석에 있어서 기존의 신호처리방식에서 잡음으로 처리할 수도 있는 정보량들로부터 의미있는 정보들을 추출할 수 있고, 그로 인해 신호의 정량적인 분석을 제공하는 새로운 알고리즘에 적용할 수 있으리라 생각된다.

2.1 연속 웨이브렛 변환

웨이브렛 변환이란 분석하고자 하는 신호를 주어진 기저함수의 특성을 이용하여 분할하는 과정을 말하며, 이 때 사용하는 기저함수는 스케일링 함수 $\phi(t)$ 와 웨이브렛 함수 $\psi(t)$ 로 나눌 수 있다. 이러한 웨이브렛의 기저들은 모웨이브렛(mother wavelet)

$\psi(t)$ 의 확장(dilation)과 천이(translation)로부터 얻어지며, 다음 두 가지 조건을 만족하여야 한다.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |\psi(t)| = 0 \quad (1)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0$$

스케일 a 와 시간 b 에 대응하는 웨이브렛은 다음과 같이 주어진다¹⁾.

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad a, b \in \mathbb{R}, \quad a \neq 0 \quad (2)$$

여기서 a 와 b 는 각각 확장과 천이 변수로서 연속 웨이브렛 변환(continuous wavelet transform, CWT)은 다음과 같이 정의된다.

$$W(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi_{a,b}^*(t) dt \quad (3)$$

여기서 *는 공액 복소수(complex conjugate)를 의미한다.

2.2 이산 웨이브렛 변환

이산 웨이브렛 변환(discrete wavelet transform, DWT)은 앞서 언급된 변환식에서 a, b 를 2의 거듭제곱이 되는 스케일(dyadic scale)을 사용하여 나타내게 된다 $a=2^j, b=k2^j, j, k \in \mathbb{Z}$ 일 때, 웨이브렛은 $\psi_{j,k} = 2^{-j/2} \psi(2^{-j}t - k)$ 로 표현되며, DWT는 다음으로 정의된다.

$$c_{j,k} = \int x(t) \psi_{j,k}^*(t) dt \quad (4)$$

여기서 $c_{j,k}$ 는 웨이브렛 계수이며 원래의 신호 $x(t)$ 의 시간-주파수 그래프상에 나타나게 된다.

웨이브렛 이론의 배경은 주어진 신호를 직교성을 가지고 있는 웨이브렛들을 적용하여 분해할 수 있다는 것이다. 이러한 원리로부터 다중해상도 분석(multiresolution analysis)이 수렴되었으며, 이는 신호의 성분을 단계별로 더욱 세밀하게 표현하는 웨이브렛을 만들어서 적용하는 과정을 거치게 된다. 스케일링 함수 $\phi_{j,k} = 2^{-j/2} \phi(2^{-j}t - k)$ 는 스케일링 계수

$d_{j,k} = \int x(t) \phi_{j,k}^*(t)$ 를 낳게 되고, DWT는 웨이브렛 계수 $c_{j,k}$ 와 스케일링 계수 $d_{j,k}$ 를 다음과 같이 계산한다

$$c_{j,k} = \sum_n x[n] g_j[n - 2^j k] \quad (5)$$

$$d_{j,k} = \sum_n x[n] h_j[n - 2^j k]$$

$j > 0$ 에서, 스케일링 계수와 웨이브렛 계수는

$$c_{i+1,k} = \sum_n g[n - 2k] d_{i,k} \quad (6)$$

$$d_{i+1,k} = \sum_n h[n - 2k] d_{i,k}$$

으로 주어진다. 여기서 g, h 는 각각 웨이브렛 ψ 와 스케일링함수 ϕ 로부터 유도된 고주파, 저주파 통과 필터계수에 해당한다. 그래서 $c_{j,k}$ 는 고주파 통과 필터를 통과한 신호 $x(t)$ 의 고주파 성분(detail)에 해당하며, $d_{j,k}$ 는 저주파 통과 필터를 통과한 신호(approximation)이다. 그림 1에 신호가 분해되는 과정이 도식적으로 나타나 있다.

3. 상태감시 시스템의 개요 및 실험장치 구성

3.1 상태감시 시스템의 개요

상태 감시 시스템은 기본적으로 그림 2에서 보는 바와 같이 적절한 센서를 통한 데이터 획득과 정보의 처리, 그리고 처리된 정보에 입각한 상태 인지 및 판단 과정이 통합되어 있다⁶⁾. 여기서 중요한 것은 어떠한 센서를 어느 부분에 부착하느냐는 문제와 검출된 신호를 어떻게 해석하여 진단을 하느냐는 두 개의 문제이다.

공구의 상태 감시는 광학, 절삭력, 토크, 전력, 전류 등의 이용을 포함한다. 이 중에서 가장 일반적으로 사용되는 것은 절삭력, 음향(acoustic emission), 그리고 전류신호이다. 절삭력의 측정에는 볼 모니터링을 위한 좋은 방법이기도 하지만 측정 시스템의 설치가 까다로우며 매우 고가의 시스템이다. 최근에 음향을

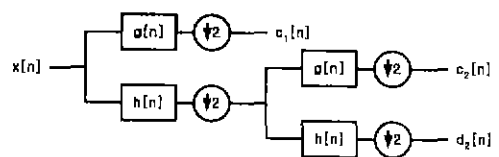


Fig. 1 Multi-stage filter bank for DWT (2-level)

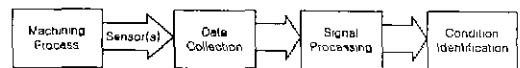


Fig. 2 Tool condition monitoring system

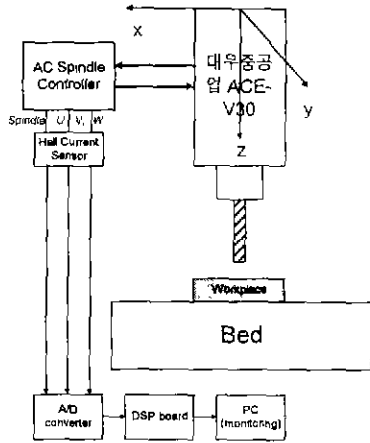


Fig. 3 Schematic diagram of the experimental set-up

이용한 방법이 톨 모니터링에서 효과적임이 입증되고 있다. 음향 측정의 주요한 이점은 음향 신호의 주파수 범위가 기계의 진동이나 주위 환경의 잡음보다 훨씬 높다는 것이다²⁾. 그러나 절삭력과 마찬가지로 음향 센서를 어디에, 어떻게 설치하느냐가 문제이다. 반면에 전류 측정은 가장 간단한 방법으로, 센서의 설치가 기계 가공 작업에 영향을 미치지 않는다¹⁾. 이러한 이유로 본 연구에서도 공구의 상태 감시를 위해 전류신호를 이용하였다.

공구의 상태감시에서 가장 중요한 문제 중의 하나는 주어진 절삭조건에서 가능한 한 정확하게 측정 신호로부터 정량적인 특징값을 얻어내는 특징 추출(feature extraction)과정이다²⁾ 본 연구에서는 측정신호를 웨이브렛 변환을 통하여 시간-스케일 영역에서 관찰하는 방법을 적용하였다. 스펙트럼 분석은 톨 모니터링에서 가장 일반적으로 사용하는 신호 처리

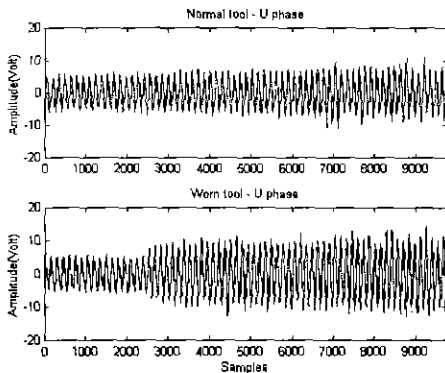


Fig. 4 Spindle current signal in drilling process, spindle : 300 r/min, feed : 120 mm/min

Table 1 Experimental conditions

Operation	drilling	milling
Tool	HSS-drill	End mil
Diameter (mm)	5	10
Cutting conditions	Spindle speed (r/min) 300, 600	1500, 3000, 4500
Feed rate (mm/min)	60, 120, 240	100, 200, 300
Cutting depth (mm)		3
	Without coolant	
Workpiece	A16061-T6	

방법이다. 하지만 스펙트럼 분석은 주파수 영역에서만 좋은 분해능을 갖고 시간 영역에서의 몇몇 정보가 손실되는 단점을 가진다. 반면에 웨이브렛 분석은 시간과 주파수 모든 영역에서 동시에 좋은 분해능을 갖는다. 그래서 여러 다른 주파수 대역에서 시간 영역에 있는 보다 많은 정보를 추출할 수 있다.

3.2 실험장치 구성

그림 3은 실험장치 구성도이다. 간단한 G-코드 작성으로 몇가지 실험조건하에서 절삭작업(드릴링 및 밀링)을 수행하였다 실험에 쓰인 장치는 대우중공업의 ACE-V30 모델을 사용했으며, DSP 보드에는 dSPACE사의 DS1003, AD 보드에는 DS2201을 사용하였다. 공작기계의 스핀들 모터에 홀센서를 부착시켜 1 ms마다 주축 전류신호를 획득하여 시스템의 운전에 방해를 주지 않으면서 공구의 상태를 모니터링하도록 하였다.

효과적인 공구의 파손 및 마모 감지 방법은 공구의 상태 변화에 민감해야 하는 반면, 동작환경의 변화에는 민감하지 않아야 한다. 그래서, 몇가지 다른 조건하에서의 절삭 테스트가 수행되었다. 표 1은 실

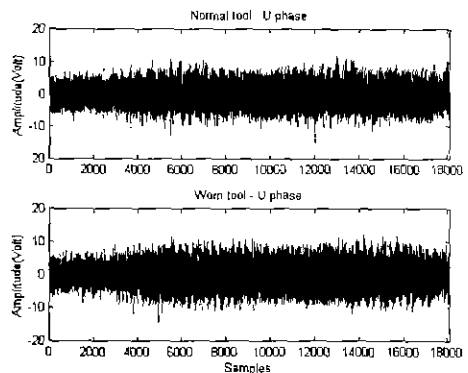


Fig. 5 Spindle current signal in milling process. spindle : 4500 r/min, feed : 300 mm/min

험에서의 공구의 파라미터와 절삭조건을 보여준다.

4. 정상툴과 마모된 툴의 비교 및 분석

4.1 시간영역에서의 신호

그림 4, 5는 표 1의 절삭조건 중 정상툴과 마모된 툴의 주축 삼상전류신호 중 한 상의 시간영역 그래프의 예이다. 드릴링의 경우 정상툴에 비해 마모된 툴의 경우가 진폭의 크기가 약간 증가함을 보이고 있기는 하지만 그 차이가 미약하고, 밀링의 경우는 거의 차이가 없어서 시간 영역에서 공구의 상태를 판단하기에는 무리가 있음을 알 수 있다. 그러므로 이 시간영역의 데이터를 웨이블릿 변환을 통하여 공구의 마모상태 판단을 위한 유의한 특징을 추출, 분석하였다.

4.2 웨이블릿 분석 및 변수 추출

웨이블릿 분석을 하기 전에 그 분석을 위해 사용할 웨이블릿을 선택하고 분석할 레벨의 단계를 결정해야 한다. 여기서 사용된 웨이블릿은 다우비치 웨이블릿(Daubechies wavelet, db4)이다.

그림 6은 그림 4의 신호에서 임의의 1024개 샘플을 취하여 10레벨까지 웨이블릿 변환을 수행하여 각 레벨의 계수를 순차적으로 그린 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 미약하지만 6, 7레벨(3.90625~15.625 Hz)에서 차이가 있음을 알 수 있다.

공구의 상태 판단을 위해서는 그 상태 변화에 가장 민감한 부분이 감시되어야 할 것이다. 그림 7은 그림 4의 신호를 가지고 웨이블릿 변환한 후 각 레벨에서의 에너지값을 그린 것으로 절삭조건에 따라서 공구 마모에 민감한 부분이 어디인가를 알려준다. 그림에서 알 수 있듯이 레벨 6, 7에 에너지의 대부분이 있음을 알 수 있고 마모된 툴의 경우 정상툴에 비해 크기가 커진다. 밀링의 경우도 마찬가지로

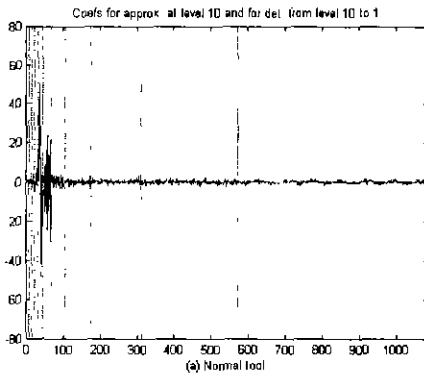


Fig. 6(a) Wavelet coefficients from current signal (normal condition)

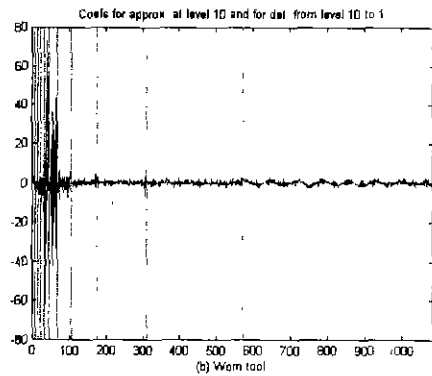


Fig. 6(b) Wavelet coefficients from current signal (wear condition)

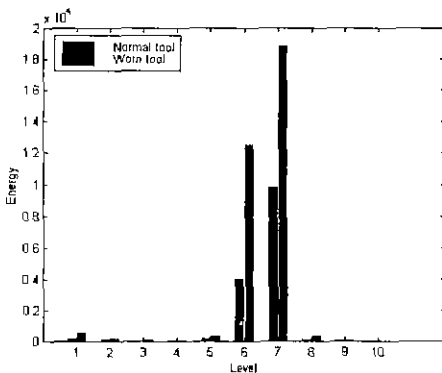


Fig. 7 Energy of each level in drilling process, spindle : 300 r/min, feed : 120 mm/min

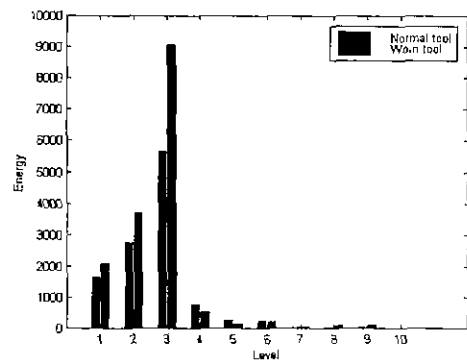


Fig. 8 Energy of each level in milling process, spindle : 4500 r/min, feed : 300 mm/min

그림 5의 원신호를 가지고 웨이브렛 변환하여 각 레벨의 에너지를 구했을 경우 그림 8에서 보는 바와 같이 3레벨(62.5~125 Hz)에서 정상틀과 마모된 틀의 차이가 나타남을 알 수 있다. 표 1의 몇가지 절삭조건에 대해 동일한 분석을 한 결과, 절삭조건에 따라서 공구의 마모상태를 드러내는 특징적인 레벨이 존재하며 각 레벨의 에너지값을 비교함으로써 공구의 마모에 따라 차이의 변화가 커지게 된다.

5. 결론

본 연구에서는 다양한 절삭조건을 갖는 CNC 조각기계의 틀 모니터링을 위해 주축전류를 이용, 웨이브렛 변환을 통한 변수 추출을 하여 공구의 마모 진단을 수행하였다. 시스템의 운전상태에 영향을 미치지 않으면서 공구의 상태감시를 위해 주축전류를 이용하였으며, 획득한 신호로부터 상태 감시에 적절한 특징추출을 위해 기존의 신호처리 방식과는 다른 웨이브렛 변환을 이용하여 틀 상태 모니터링의 가능성을 검토하였다. 절삭가공의 다양한 운전조건에서 본 방법의 타당성을 검증하기 위해 다양한 실험 데이터 확보 및 분석이 필요하다. 다양한 주축 및 이송축 속도에서의 실험과 공구 직경 및 피삭재의 재질을 변화시켜가며 실험을 하고 있으며, 이러한 연구 내용을 가지고 틀 상태 모니터링을 위한 알고리즘을 개발중이다. 본 연구를 통한 틀 상태 감시 기술을 이용하여 산업공정에서의 위험 방지 및 전체 공정의 효율 및 안정성을 향상시킬 수 있으리라 기대된다.

참고문헌

1. Li Xiaoli, "On-line detection of the breakage of small diameter drills using current signature wavelet transform". *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 39, pp. 157-164, 1999.
2. Xiaoli Li, Shen Dong, Zhejun Yuan. "Discrete wavelet transform for tool breakage monitoring", *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 39, pp. 1935-1944, 1999.
3. Yingxue Yao, Xiaoli Li, Zhejun Yuan, "Tool wear detection with fuzzy classification and wavelet fuzzy neural network", *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 39, pp. 1525-1538, 1999.
4. Xue Hongjian, Yang Kechong and Yang Rong, "The shape characteristic detection of tool breakage in milling operations", *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 37, pp. 1651-1660. 1997.
5. G. S. Hong, M. Rahman, and Q. Zhou, "Using neural network for tool condition monitoring based

- on wavelet decomposition", *Int. J. Mach. Tools Manufact*, Vol. 36, pp. 551-566, 1996.
6. Y. M. Niu, Y. S. Wong, G. S. Hong, "Multi-category classification of tool conditions using wavelet packets and ART2 network", *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol 120, pp. 807-816, 1998.
7. K. Mori, N. Kasashima, J. C. Fu, K. Muto, "Prediction of small drill bit breakage by wavelet transforms and linear discriminant functions", *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 39, pp. 1471-1484, 1999.
8. P. W. Prickett, C. Johns, "An overview of approaches to end milling tool monitoring", *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 39, pp 105-122, 1999