

웨이브렛 변환을 이용한 밀링 공구의 마모 감지 연구

전도영*(서강대 기계공학과), 이 건, 김경호(서강대 대학원 기계공학과)

A Study on the Wear Detection of a Milling Using the Wavelet Transform

Doyoung Jeon, Gun Lee and Kyoungho Kim(Mech. Eng. Dept., Sogang Univ.)

ABSTRACT

The detection of tool wear is very important in an automated manufacturing system. This paper presents a tool condition monitoring system based on the wavelet transform analysis of the AC servo motor current in a milling process. The current measurement is relatively simple and does not affect machining operations. The discrete wavelet transform was used to decompose the current of a spindle AC servo motor in the time and frequency domain. The feature vectors were extracted from the decomposed signals and compared to clarify normal and wear conditions. The results show the feasibility of the wavelet transform analysis for the tool condition monitoring.

Key Words : Wavelet transform, Milling, Wear, Tool condition monitoring

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 받는데 마모된 공구는 결국 생산물의 질을 저하시키게 된다. 공구가 파손되었을 경우에는 작업의 안전성 및 가공시간의 손실 뿐만 아니라 공정성능과 생산물의 품질 저하에 더 심각한 문제를 일으킬 수 있으므로⁶⁾ 자동화의 관점에서 공구가 적절한 시기에 교체될 수 있도록 공정 중에 공구의 마모 진행 상태 및 파손 감지를 위한 시스템의 개발이 필요하다.

웨이브렛 이론은 1990년대 들어 신호 및 시스템의 해석분야 연구에 적용되며, 다양한 공정에서 공구의 파손 감지와 마모상태 진단 및 예측에 연구되고 있다. Xiaoli Li 등은 웨이브렛 변환을 이용하여 공구의 파손을 감지하였으며^{1,2)}, 많은 연구에서 피지, 신경망 등과 함께 웨이브렛 변환을 툴 모니터링에 활용하였다^{3,7)}. 웨이브렛 변환은 여러 센서로부터 연속적으로 발생하는 신호 중 아주 불규칙적이며 시간

대역이 짧은 신호들의 해석에 있어서 기존의 신호처리 방식에서 잡음으로 처리할 수도 있는 정보량들로부터 의미있는 정보들을 추출할 수 있는 특징이 있다.

2. 상태감시 시스템의 개요 및 실험장치 구성

2.1 상태감시 시스템의 개요

상태 감시 시스템은 기본적으로 Fig. 1에서 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 포함하는데 이 중에서 가장 일반적으로 사용되는 것은 절삭력, 음향과 전류신호이다. 절삭력의 측정은 툴 모니터링을 위한 좋은 방법이기도 하지만 측정 시스템의 설치가 까다로우며 매우 고가의 시스템이다. 최근에 음향을 이용한 방법이

툴 모니터링에서 효과적임이 입증되고 있는데 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 방법으로서 센서의 설치가 기계 가공 작업에 영향을 미치지 않는다¹⁾. 이러한 이유로 본 연구에서도 Fig. 1과 같이 공구의 상태 감시를 위해 전류 신호를 이용하였다.

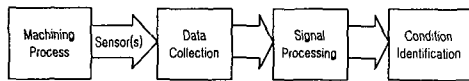


Fig. 1 Tool condition monitoring system.

공구의 상태감시에서 가장 중요한 문제 중의 하나는 주어진 절삭조건에서 가능한 한 정확하게 측정 신호로부터 정량적인 특징 값을 얻어내는 특징 추출(feature extraction)과정이다²⁾. 본 연구에서는 측정 신호를 웨이브렛 변환을 통하여 관찰하는 방법을 적용하였다. 스펙트럼 분석은 툴 모니터링에서 가장 일반적으로 사용하는 신호 처리방법이지만 스펙트럼 분석은 주파수 영역에서만 좋은 분해능을 갖고 시간 영역에서는 몇몇 정보가 손실되는 단점을 가진다. 반면에 웨이브렛 분석은 시간과 주파수 모든 영역에서 동시에 좋은 분해능을 가지므로 여러 다른 주파수 대역에서 시간 영역에 있는 보다 많은 정보를 추출할 수 있다.

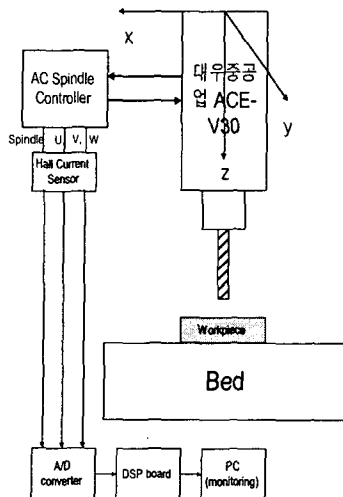


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental set-up.

Operation		milling
Tool		Hss-End Mills
	Diameter(mm)	10, 13, 16, 20
Cutting conditions	Spindle speed(r/min)	1500, 4500
	Feed rate(mmm/min)	100, 300
	Cutting depth(mm)	1,3
	Without coolant	
Workpiece	Al6061-T6, 연강	

Table. 1 Experimental conditions.

2.2 실험장치 구성

Fig. 2는 실험장치 구성도이다. 간단한 G-코드 작성으로 몇 가지 실험조건하에서 절삭작업(밀링)을 수행하였다. 실험에 쓰인 장치는 대우중공업의 ACE-V30 모델을 사용했으며, DSP 보드에는 dSPACE사의 DS1003, AD 보드에는 DS2201을 사용하였다. 공작기계의 주축모터에 홀 센서를 부착시켜 1 ms마다 주축 전류신호를 획득하여 시스템의 운전 에 방해가 되지 않으면서 공구의 상태를 모니터링 하도록 하였다.

효과적인 공구의 파손 및 마모 감지 방법은 공구의 상태 변화에 민감해야 하는 반면, 동작환경의 변화에는 민감하지 않아야 하므로 몇 가지 다른 조건 하에서의 절삭 테스트가 수행되었다.

Table. 1은 실험에서의 공구의 파라미터와 절삭조건을 보여준다.

3. 정상툴과 마모툴의 비교 및 분석

3.1 시간 영역에서의 신호

Fig. 3은 Table. 1의 절삭 조건 중 주축속도가 1500 r/min, 재질은 알루미늄, 공구의 직경은 10 mm 일 때 이송속도를 100 mm/min로 했을 경우의 삼상 전류 신호 중 한 상의 그래프이다.

Fig. 3에서 볼 수 있듯이 CNC 공작 기계에서 밀링시 시간 영역에서 나타나는 진폭의 차이는 미약하므로 이를 공구의 마모나 손상을 확인하는데 사용하는 것은 무리가 있다고 생각된다. 따라서 시간 영역에서 전류 신호를 웨이브렛 변환을 하여서 공구 상태를 판단하기 위한 유의한 특징을 추출하고 분석하였다.

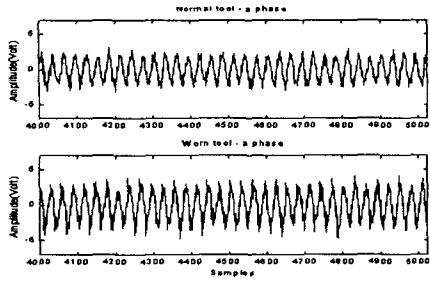


Fig. 3 Current of spindle motor
(AL, 1500 rpm, 300 mm/min, tool diameter:10mm)

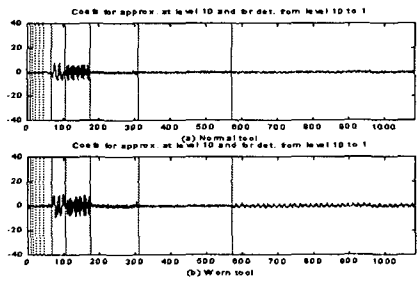


Fig. 4 Wavelet transform coefficients
(AL, 1500 rpm, 300 mm/min, tool diameter:10mm)

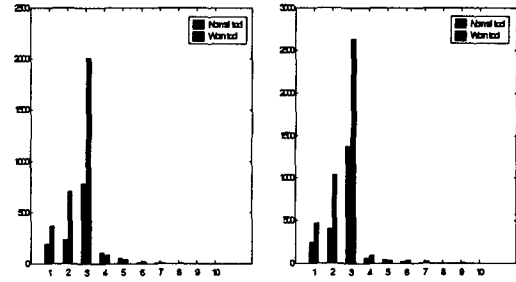
3.2 웨이블릿 분석 및 변수 추출

웨이블릿 분석을 하기 전에 먼저 분석을 위해 사용할 웨이블릿을 선택하고 분석할 레벨의 단계를 결정해야 한다. 본 실험 데이터의 웨이블릿 분석에 다우비치 웨이블릿(Daubechies Wavelet, db4)을 사용하여 임의의 1024개의 분할 레벨 10레벨까지 분석하였다.

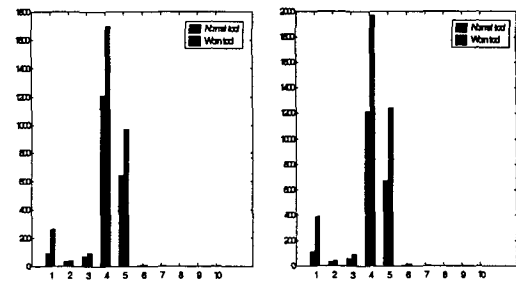
Fig. 4는 웨이블릿 변환을 통해 각 레벨의 계수값을 표현해주고 있다.

Fig. 5는 10레벨까지 웨이블릿 변환을 수행하여서 각각의 레벨에서 에너지를 히스토그램으로 표현한 것이다.

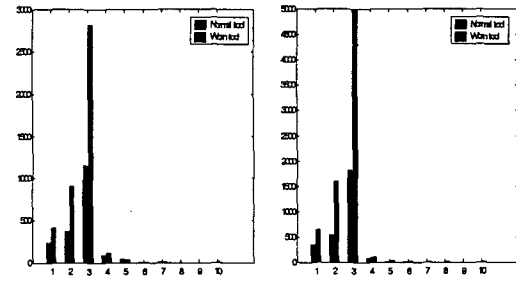
Fig. 5(a)와 (b)에서 보면 알 수 있듯이 주축 회전 속도가 4500 rpm에서는 공구의 작동 주파수인 100 Hz를 포함하는 3레벨에서 에너지의 대부분이 나타나며 이송속도는 공구의 상태를 판단하기 위해 사용할 레벨의 판단에는 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. Fig. 5(c)와 (d)에서 주축 회전 속도가 1500rpm일 때에도 공구의 작동 주파수인 33.3Hz를 포함하는 4, 5레벨에서 에너지의 대부분이 나타나며 이 경우에도 이송속도는 공구의 상태를 판단하기 위해 사용할 레벨의 판단에는 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 또한 5(b)와 (f)에서 보면 알 수 있듯이 공구의 직경은 에너지의 값은 변화시키지만 레벨을 결정하는 요소로는 작용하지 않음을 알 수 있다.



(a)4500rpmf:100(AL,10mm)(b)4500rpmf:300(AL,10mm)



(c)1500rpmf:100(AL,10mm)(d)1500rpmf:300(AL,10mm)



(e)4500rpmf:300(Fe,20mm) (f)4500rpmf:300(AL,20mm)

Fig. 5 Energy level

또한 Fig. 5(e)와 (f)에서 알 수 있듯이 가공 재료의 변화에 따라 에너지의 크기는 변화하나 주축 회전 속도의 차이가 없으면 웨이블릿 변환 시 나타나는 레벨에는 차이가 없음을 알 수 있다.

상태 판단을 위해서는 그 상태 변화에 가장 민감한 부분이 감시되어야 하는데 그림에서 볼 수 있듯이 주축속도에 따른 작동 주파수를 포함하는 레벨에 대부분의 에너지가 존재함을 알 수 있고 마모된 공구의 경우 정상 공구에 비해 그 레벨에서 에너지의 크기가 큼을 알 수 있다.

Level	주파수 범위(Hz)
1	250.0-500.0
2	125.0-250.0
3	62.5-125.0
4	31.3-62.5
5	15.6-31.3
6	7.8-15.6
7	3.9-7.8
8	2.0-3.9
9	1.0-2.0
10	0.5-1.0

Table. 2 Frequency range in each levels

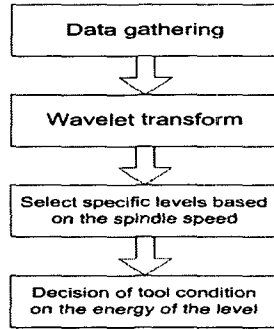


Table. 3 Tool monitoring system

Table. 2는 샘플링 주파수가 1000Hz 일 경우에 다우비치 웨이브렛(Daubechies Wavelet, db4)을 사용하여 10단계까지 분할 시 각 레벨이 포함하는 주파수를 나타낸다.

3.3 공구의 상태 판단

Table. 1의 절삭 조건에 대하여 실험을 반복 수행한 후 웨이브렛 분석을 한 결과 실험 전에 예상한 바와 같이 주축 회전수에 해당하는 레벨에서 크기가 차이가 난다. 즉 공구의 상태 판단을 위해서는 국소화된 지점에서 에너지의 크기가 차이가 나야 하는데, 특정 레벨에서 이러한 에너지가 나타남을 알 수 있고 이 레벨은 작동 주파수를 결정하는 주축 회전 속도에 따라서 결정된다. 따라서 공구 마모 감지를 위해서는 Table. 3과 같은 흐름도를 생각할 수 있다. 미리 공구 마모 감시를 위한 웨이브렛 레벨을 정할 수 있고, 정상상태의 레벨보다 일정 수치 이상으로 레벨 에너지가 변화하면 마모 상태가 되었다고 판단할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 다양한 절삭 조건을 갖는 CNC 공작기계의 밀링 작업 시에 공구 모니터링을 위해 주축 전류 신호를 웨이브렛 변환하여 변수 추출을 함으로써 공구의 상태를 판단하였다. 주축 전류를 이용한 것은 시스템의 운전 상태에 영향을 주지 않기 위해서이며, 획득한 신호로부터 상태 감시에 적절한 특징 추출을 위해서는 기존의 신호 처리 방식과는 다른 국소화된 신호 처리 방식이 필요했고 이를 위해 웨이브렛 변환을 이용하여 상태 모니터링을 실시하였다.

다양한 조건에서 실험을 실시한 결과 공구의 상태 모니터링을 위한 레벨의 결정에는 작동 주파수를 결정하는 주축 회전 속도가 가장 중요한 요소임을 알 수 있었다. 지금까지의 실험을 통해서 공구 모니터링을 위한 적정 레벨의 결정 방법을 알 수 있었

으며, 현재는 확연히 구분되는 정상 공구와 마모 공구의 상태만을 감지할 수 있다. 따라서 좀 더 다양한 공구를 가지고 보다 많은 실험을 통해 데이터를 정리한다면 공구의 상태를 정확히 판단할 수 있을 것으로 생각된다.

후 기

본 연구는 유변공정연구센터(ARC)를 통한 한국 과학재단의 지원을 받아 이루어졌으며 지원에 감사드립니다.

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* Vol. 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* Vol. 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* Vol. 39, pp. 1525-1538, 1999.
4. Xue Hongjian, Yang Kechong and Yang Rong, "The shape characteristic detection of tool breakage in milling operations", *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 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", *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 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* Vol. 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* Vol. 39, pp. 105-122, 1999.