

엔드밀 가공시 chatter 검출 및 분석법

오상록⁺, 진도훈⁺, 윤문철*

(논문접수일 2004. 4. 23, 심사완료일 2004. 8. 17.)

Detection and Analysis of Chatter in Endmilling Operation

Sang-Lok Oh⁺, Do-Hun Chin⁺, Moon-Chul Yoon*

Abstract

The detection and analysis of chatter behaviour in endmilling is very complex and difficult, so it is necessary to detect and diagnose this chatter phenomenon clearly. This paper presents a new method for detecting the abnormal chatter in endmilling operation, based on the wavelet transform. Using AR spectrum the data that has chatter phenomenon was verified and the fundamental property of chatter and its characteristics in endmilling by using the wavelet transform is reviewed. This result obtained by wavelet transform proves the possibility and reliability of detecting the chatter in endmilling operation.

Key Words : AR Spectrum(자동회귀 스펙트럼), Cutting Force(절삭력), Mother Wavelet(모웨이브렛), Scale Factor(압축계수), Translation Factor(전이계수), Wavelet Transform(웨이브렛 변환)

1. 서론

금형, 자동차, 첨단항공 산업분야에서 엔드밀링 등의 가공은 널리 사용되고 있다. 또한 사용범위에 따라 가공정밀도 개선이나 진동을 고려한 가공이 필요하게 되었고 최적 가공조건을 고려한 실용적 연구의 결과가 필요하게 되었다. 특히 생산가공분야에서 가공 시 chatter 진단은 중요하게 인식되고 있다. 일반적인 기계가공의 이상현상 진단, 특히 엔드밀 가공에서 chatter의 신뢰성 있는 검출과 그 분석이야말로 정밀한 형상과 공작기계의 안정된 가공에 필수적이고,

정밀한 공작물 제작에 매우 중요하다. 그동안 chatter에 관한 많은 연구가 수행되었고, 또한 FFT 등 기존의 방법으로도 많은 연구가 진행되고 있다. FFT와 같이 고유모드를 분석하는 AR(Autoregressive) 스펙트럼을 이용한 chatter모드를 검출할 필요가 있고 이를 이용하여 절삭력 신호에 포함된 chatter 영역 범위를 분석하여 웨이브렛에 적용 가능한 데이터를 추출하여야 한다. 또한 이 절삭력 신호를 웨이브렛 변환(wavelet transform)으로 chatter 현상과 상관이 있는 세부 계수(detail coefficient)의 적용 유무를 규명하고, 그 특징을 분석 검토하는 것이 필요하다. 웨이브렛 변환은 시간과

⁺ 부경대학교 기계공학부 대학원

* 교신저자, 부경대학교 기계공학부 (mcyoon@pknu.ac.kr)

주소: 608-739 부산광역시 남구 용당동 산100번지

주파수 영역에 변동의 크기를 갖는 기저함수를 이용하여 시간과 주파수 영역의 절삭력 신호를 균형적으로 확대 축소한다. 또한 저주파 영역 신호의 해상도를 높게하며, 고주파 영역에서는 시간영역 해상도를 높게 하여 다양한 해상도의 해석을 수행할 수 있다⁽¹⁻³⁾. 채터를 검출하기 위해서는 가능한 빨리 주어진 시간 내에 FFT나 웨이브렛 변환과 같은 시간 및 주파수 영역 신호처리 기술을 이용하여 분석되어야만 한다. 따라서 본 연구에서는 웨이브렛 변환을 이용하여 관련 변수를 계산하였고 이 계산된 변수 중 채터에 적용 가능한 것을 추출하여 그 변수로 엔드밀 가공 중 on-line으로 채터를 검출하고자 하였다. 또한 엔드밀 가공의 기본적인 특성을 이해하고 채터가 있는 엔드밀 절삭력 신호를 이용한 웨이브렛 변환 이론 적용에 따른 그 타당성을 검증하고자 하였다.

2. 웨이브렛 변환의 이론

2.1 연속 웨이브렛 변환

연속 웨이브렛(Continuous Wavelet Transform, CWT)이란 연속 웨이브렛 함수를 이용하여 신호를 분석하는 방법을 말한다. 분석하고자 하는 신호를 $f(t)$, 웨이브렛 함수를 $CWT(a,b)$, $\psi(t)$ 를 모 웨이브렛이라고 하고, 분석 대상 임의의 신호 $f(t)$ 를 전이시키고 압축시키기 위하여 모 웨이브렛을 곱하여 변환된 웨이브렛을 얻을 수 있고, 이 변환된 신호는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

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

이때 이 변환된 웨이브렛 함수는 다음과 같은 특징을 가져야 한다.

- ① $\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0$
- ② Band-pass 신호
- ③ 시간영역에서 영으로 빠르게 감소한다.

웨이브렛은 모 웨이브렛을 시간 축에 따라 증폭하고 전이시킴으로서 얻어지는 함수이고 압축계수 a 는 a 배 만큼 크기를 증폭시킨 것이고, 전이계수 b 는 b 만큼 위치 이동시켜 나타낸 것이다. ψ 는 모 웨이브렛을 나타내고 웨이브렛 변환 결과는 특정한 전이에서의 신호 $f(t)$ 가 압축되고 전이된 모 웨이브렛과 비슷하며 변환결과는 큰 값을 갖게 된다. 웨이

브렛 변환에 있어 전이계수는 신호의 이동을 의미하고 압축계수는 신호의 확장과 압축을 의미한다. 고주파 신호성분에 대해서는 시간영역에서 신호의 민감도를 높이고 저주파신호성분에 대해서는 주파수 영역성분의 민감도를 높게 된다. 따라서 다중해상도 분석이 가능하다.

$$f(t) = \frac{1}{C_{\psi}} \int_{-\infty}^{\infty} db \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{a^2} CWT(a, b) \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) da \quad (2)$$

역 변환은 식 (2)를 이용하여 수행할 수 있고 모 웨이브렛에 가중치를 부여하여 얻어진다. 만약 웨이브렛 변환에 사용했던 모 웨이브렛과 역 변환에 사용한 모 웨이브렛이 다른 경우에는 원 신호 $f(t)$ 를 복원할 수 없다.

$$C_{\psi} = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\psi(\omega)|^2}{\omega} d\omega \quad (3)$$

여기서 C_{ψ} 는 웨이브렛 계수이다.

2.2 이산 웨이브렛 변환

연속 웨이브렛 변환이 분석하고자 하는 신호가 연속적인 경우에 사용됨에 반하여 분석하고자하는 연속적인 신호를 표본추출(sampled data)한 경우에는 이산 웨이브렛 변환이 사용된다. 이산 웨이브렛 변환(Discrete Wavelet Transform, DWT)은 해석하려는 신호를 이산 저주파 성분 통과 필터(Discrete low pass filter)를 거쳐 신호의 전체적인 특징을 분석하고 이산 고주파 성분 통과 필터(Discrete high pass filter)를 이용하여 신호상의 미세한 특징을 분석하게 된다. 연속 웨이브렛 변환을 적용하기 위해서는 웨이브렛 변환 과정을 전기회로를 구성하여 얻는다. 그러나 현실적으로 수월하게 연속신호를 일정 시간간격으로 이산화한 후 이산 웨이브렛 변환을 적용하게 된다. 이때 이산화 된 신호는 연속 신호와 거의 근사하게 된다. 연속 웨이브렛에서는 연속적으로 웨이브렛 계수를 계산하므로 많은 시간을 요하고 많은 데이터를 생성한다. 이러한 결점을 보완하기 위해 이산 웨이브렛 변환은 2의 누승이 되게 웨이브렛 변환을 수행함으로써 정확하고, 계산시간을 훨씬 줄여 보다 효율적인 변환을 수행할 수 있다. 이산 웨이브렛 변환에 있어서 스케일 함수 $\phi(t)$ 와 웨이브렛 함수 $\psi(t)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\phi(t) = \sum_{n=0}^{N-1} C_n \phi(2t - n) \quad (4)$$

$$\phi(t) = \sum_{n=0}^{N-1} (-1)^n C_n \phi(2t + n - N + 1) \quad (5)$$

여기서 N 은 2의 누승인 데이터의 수이고, C_n 는 웨이브렛 계수이며 다음과 같은 조건을 만족해야한다.

$$\sum_{n=0}^{N-1} C_n = 2, \quad \sum_{n=0}^{N-1} C_n C_{n+2b} = 2\delta \quad (6)$$

여기서, δ 는 Kronecker 델타를 의미하고 식 (4), (5)와 (6)을 이용한 이산 웨이브렛 식은 다음과 같다.

$$DWT[j, n] = \frac{1}{\sqrt{a_0^j}} \sum_{n=0}^{N-1} f[n] g\left[\frac{n - ka_0^j}{a_0^j}\right] \quad (7)$$

여기서 $g[n]$ 은 모웨이브렛으로서, 식 (1)에 나타난 연속 웨이브렛 변환의 이동과 압축계수 a , b 는 정수 m 의 함수인 $a = a_0^j$ 과 $b = ka_0^j$ 으로 표현된다.

Fig. 1은 DWT 회로를 나타낸 것으로서 입력신호는 이산화 되어 웨이브렛 회로를 거치면서 고주파 성분 통과 필터를 거친 신호는 웨이브렛 계수를 나타내고 저주파 성분 통과 필터를 거친 신호들은 다음 단계의 DWT 회로로 이동하게 되고 이러한 과정을 반복하여 수행함으로써 레벨이 높은

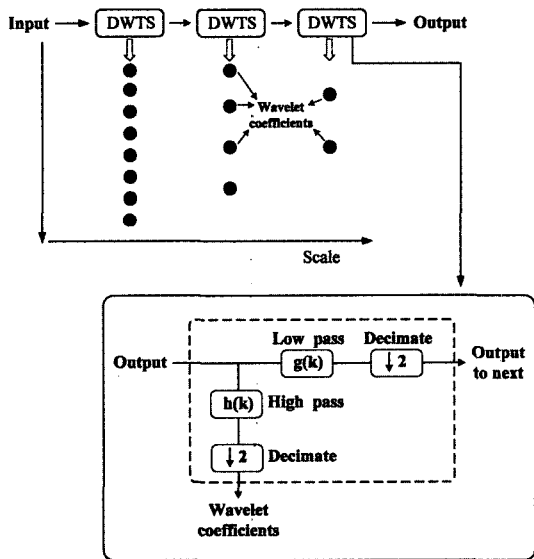


Fig. 1 Schematic diagram of DWT

영역의 이산 웨이브렛이 연속적으로 수행된다.

3. 공구 동력계를 이용한 절삭력 실험

Fig. 2는 채터 신호를 얻기 위한 절삭력 가공 시편의 형상을 보여 주고 있다. 각 단계(①+②+③)에서는 왼쪽에서는 이송이 낮고 오른쪽으로 이동할수록 이송속도는 높아지도록 각 단계(①+②+③)를 10구간으로 구분하여(45~85mm/min에서 1구간 당 4mm/min씩 증가) 이송속도를 주어 점차 오른쪽에서는 채터가 일어나기 쉽도록 절삭조건을 선정하여 가공하였다.

Fig. 3의 (a)는 Fig. 2의 전체구간에서 공작물을 가공할 경우에 절삭력 F_x 방향의 절삭력 측정 결과를 보여 주고 있다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이 공작물의 형태는 3단계(①+②+③)로 구성되어 있다. Fig. 3의 (a)는 500rpm, 축 방향 깊이는 3mm, 이송은 45~85mm/min, 엔드밀은 직경 15mm이고 날수는 4날 엔드밀을 이용해서 각 단계별(①+②+③)로 공구동력계를 이용하여 절삭력을 측정한 신호이다. 각각의 단계에는 10구간으로 나눠 이송을 다르게 하여 측정된 절삭력이다. Fig. 3(b)는 이 절삭력 신호의 AR 파워스펙트럼을 보여 주고 있으며 300Hz(1X)에서 채터주파수가 나타나고

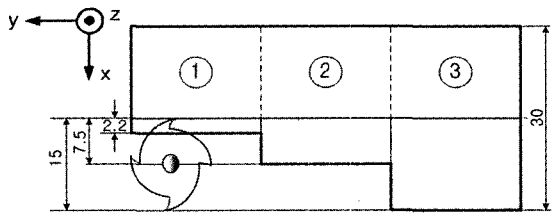
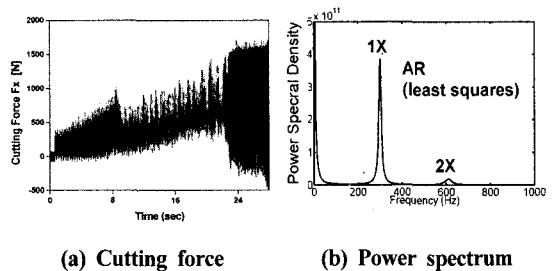


Fig. 2 Geometric configuration of workpiece



(a) Cutting force (b) Power spectrum

Fig. 3 Cutting force(no chatter①+severe chatter③) and power spectrum in all stage of the workpiece

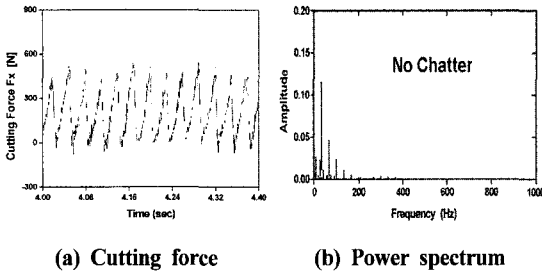


Fig. 4 Cutting force(no chatter) and power spectrum in the first stage of the workpiece

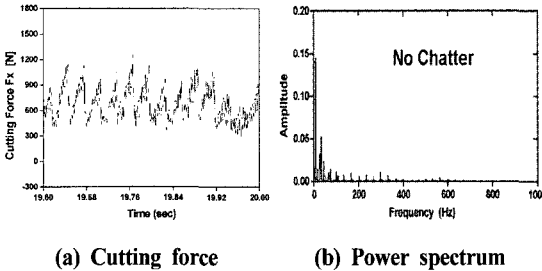


Fig. 5 Cutting force(no chatter but initial chattering) and power spectrum in the second stage of the workpiece

있음을 알 수 있고 600Hz(2X)는 이 채터주파수의 2배 조화 주파수(harmonic frequency)이다.

Fig. 4에서는 Fig. 2의 ①단계에서의 절삭력을 확대(zooming)하여 나타낸 절삭력 신호이고 이것의 파워스펙트럼을 보여 주고 있다. 분석한 결과 Fig. 4의 (a)와 (b)에서 나타나듯이 채터주파수가 검출되지 않았으며 따라서 채터가 발생하지 않음을 알 수 있다. 파워 스펙트럼 분석에서 나타난 주파수는 채터가 발생한 것이 아니라 단지 공구 날 패싱(tooth passing)에 의한 것임을 보여 준다.

Fig. 5는 Fig. 2의 ②단계에서의 절삭력을 확대하여 나타낸 절삭력신호(a)이고 그 파워스펙트럼(b)을 분석한 것을 보여주고 있으며 Fig. 5의 (a)와 (b)에서 나타나듯이 이 단계에서는 심각한 채터는 발생하지 않고 있지만 확대한 시간영역 신호에서 약한 채터가 나타나기 시작함을 확인할 수 있다. 채터가 심각하지 않은 것은 채터의 에너지가 약하기 때문이며 나타난 주파수는 단지 공구 날 패싱 주파수보다 약한 것으로 판단된다.

Fig. 6(a)는 Fig. 2의 ②단계에서 ③단계로 진행되는 영역에서의 절삭력을 보여 주고 있으며 가공 폭이 증가하여

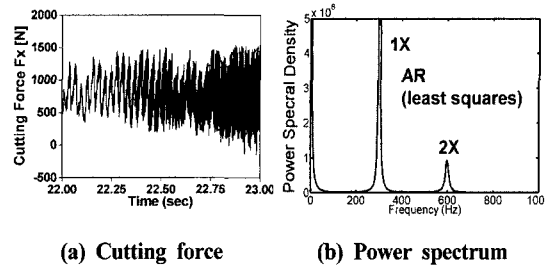


Fig. 6 Cutting force(severe chatter) and power spectrum in the third stage of the workpiece

(full immersion) 채터가 나타나고 있는 것을 볼 수 있으며 ③단계에서의 채터주파수(1X 300Hz, 2X 600Hz)는 Fig. 6(b)인 AR 스펙트럼분석에서 알 수 있다. 따라서 Fig. 4, Fig. 5, Fig. 6을 분석하여 보면 전체 절삭력의 AR 스펙트럼(①+②+③) Fig. 3(b)는 ③단계에서 주로 채터가 나타남을 보여주고 있으며 이 경우 채터주파수가 300Hz에서 일어난 것을 알 수 있다. 즉 Fig. 6(a)는 시간이 지나면서 즉 Fig. 3(a)의 그림에서 왼쪽에서 오른쪽으로 이동할수록 심각한 채터(1X-300Hz, 2X-600Hz)가 강하게 발생하고 있었으며 각 부분을 확대하여 분석한 결과에서는 22.3초 부근에서 심한 채터가 Fig. 6(a)와 같이 확실하게 나타난 것을 알 수 있었고 그 이후의 신호를 스펙트럼 처리한 Fig. 6(b)를 통하여 채터의 발생 유무를 알 수 있다. 그렇기 때문에 22.3초를 경계로 하여 이 신호의 전후 범위의 데이터를 갖고 있는 Fig. 3(a)의 신호를 이용하여 심한 채터를 검출하는 방법을 웨이블릿 방법으로 검출하는데 필요한 데이터의 범위로 하였고 또한 채터 검출을 위한 웨이블릿 변환 분석 데이터로 이용하였다.

Fig. 7(a), (c), (e)는 각각 Fig. 2의 ③단계에서 F_x , F_y , F_z 각 방향의 절삭력을 각각 측정된 결과이고 그 절삭력 신호의 AR 스펙트럼을 각각 Fig. 7(b), (d), (f)에서 보여주고 있다. AR 스펙트럼 분석은 엔드밀의 날과 채터주파수에 의해 조화성분으로 나타나는 것으로 생각된다. 각 방향의 절삭력 F_x , F_y , F_z 는 각각의 신호에서 동일한 채터의 특성을 나타내고 있으며 이것들은 1X(약 300Hz), 2X(약 600Hz) 영역 부근에서 채터주파수가 나타나고 있다.

그러므로 각 방향의 절삭력 F_x , F_y , F_z 는 웨이블릿 변환 분석에 사용되어도 무방하다고 생각된다. 공구 동력계는 동적 성분을 포함한 절삭력 신호를 얻기 위하여 이용되며 이때 샘플링 주파수를 15kHz로 하였다. 본 논문에서는 모웨

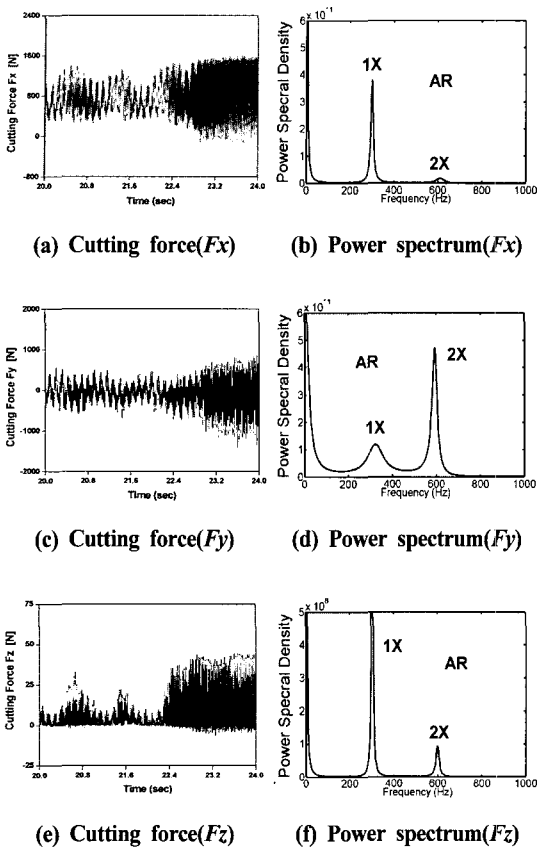


Fig. 7 Cutting force F_x , F_y and F_z in each direction and its power spectrum in the third stage of the workpiece

이브렛으로 Daubechies 웨이브렛을 사용하였다. 이 경우 채터 성분인 1X(약 300Hz)의 성분이 FFT 및 AR 스펙트럼 분석으로도 검출되는 것을 알 수 있고 Fig. 8의 세부계수(detail coefficient) 성분을 스펙트럼 분석하여 파워스펙트럼을 구하면 1X의 성분도 그대로 포함하고 있음을 확인할 수 있었다.

Fig. 8은 Fig. 2의 전 구간(①+②+③)에서 가공한 F_x 방향의 절삭력 (a)를 나타내며 (b)는 절삭력 F_x 의 근접계수(approximate coefficient)이고 (c)는 고주파 신호성분인 세부계수(detail coefficient)이며 (d)는 (b)와 (c)를 합성하여 재구성한 신호를 나타내고 있다. (c)의 신호, 즉 세부계수는 채터가 발생하는 경우 그 크기가 상당히 큼을 알 수 있으며 이는 채터 발생시의 신호와 그 위치가 비교적 잘 일치하고 있으며 따라서 채터 특성과 상관이 되는 파라미터로 볼 수

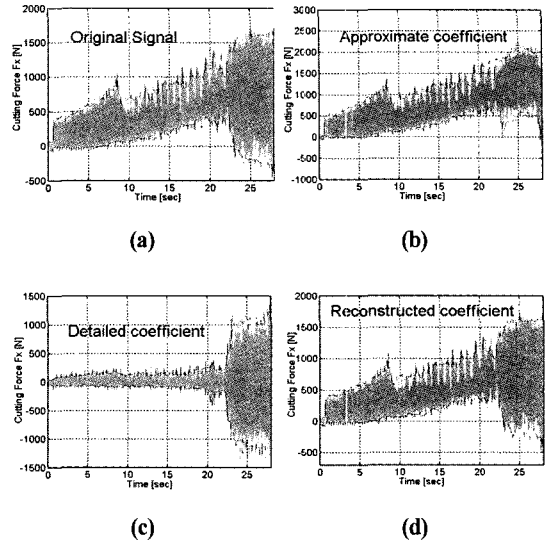


Fig. 8 Cutting force(F_x) and approximate and detail coefficient in level 1

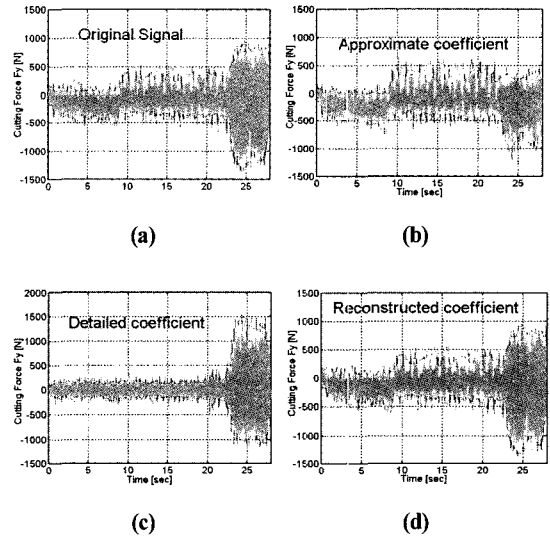


Fig. 9 Cutting force(F_y) and approximate and detail coefficient in level 1

있다.

Fig. 9, Fig. 10은 Fig. 2의 전 구간(①+②+③)에서 가공한 F_y , F_z 방향의 절삭력을 각각의 (a)에서 나타내고 있으며 또 각각의 신호 (b)는 절삭력 F_y , F_z 의 근접계수

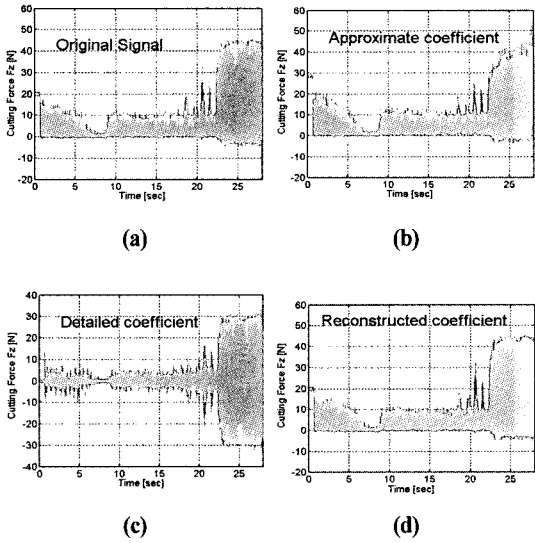


Fig. 10 Cutting force(F_z) and approximate and detail coefficient in level 1

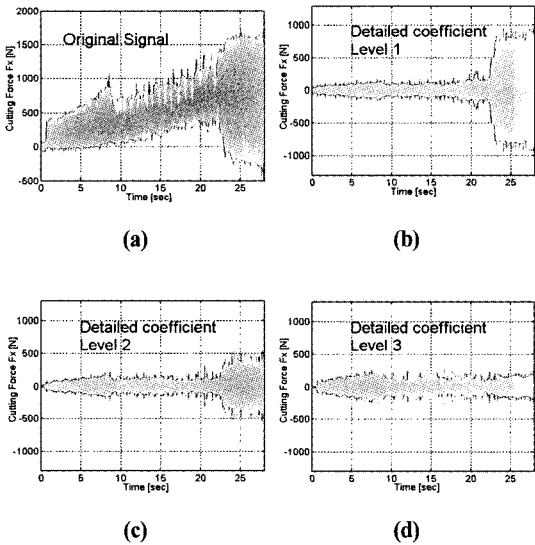


Fig. 11 The detail coefficients in several level for cutting force F_x

(approximate coefficient)이고 (c)는 각각의 고주파 신호 성분인 세부계수를 나타내고 있다. (d)는 마찬가지로 (b)와 (c)를 합성하여 재구성 한 신호를 각각 나타내고 있다. Fig. 9, Fig. 10의 (c) 신호 즉 세부계수는 채터가 발생하는 경우

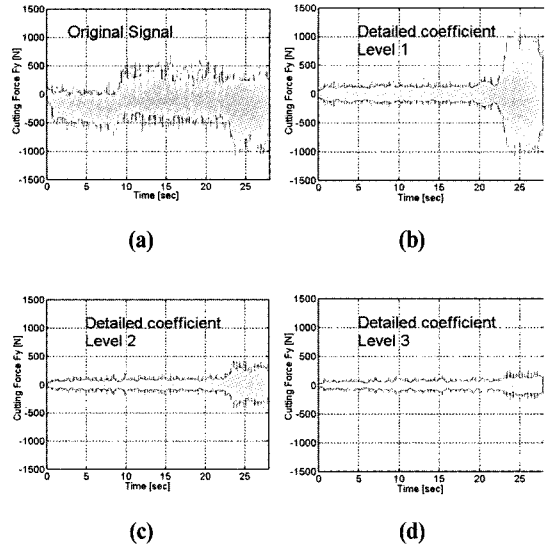


Fig. 12 The detail coefficients in several level for cutting force F_y

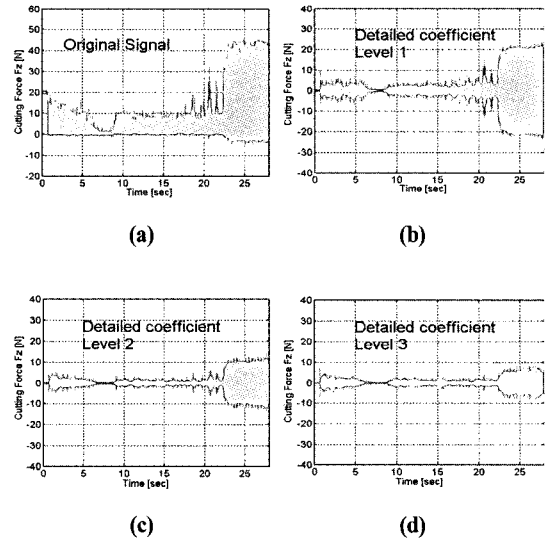


Fig. 13 The detail coefficients in several level for cutting force F_z

Fig. 8의 F_x 의 경우와 같게 그 크기가 상당히 크고 이 또한 채터 발생시의 신호와 그 위치가 잘 일치하고 있다. 따라서 F_y , F_z 신호를 웨이브렛 변환한 세부계수는 각각의 경우 채터 검출 특성을 갖고 있는 파라메타임을 알 수 있다.

Fig. 11, Fig. 12, Fig. 13은 F_x , F_y , F_z 각 신호를 웨이브렛 변환하여 각각 서로 다른 레벨 1, 2, 3에서의 세부계수의 값을 나타내고 있다. 각 레벨에서 채터의 검출의 가능성을 검토하고자 계산되었고 500rpm의 경우 레벨 1의 세부계수에서 채터 분석이 가장 확실하게 검출할 수 있었고 이때 레벨이 2 나 3으로 증가함에 따라 세부계수로는 채터의 검출이 어렵게 되고 검출 계수로 선택하기에는 곤란하게 됨을 알 수가 있었다. 각 절삭력 F_x , F_y , F_z 에서 세부계수의 크기가 상대적으로 큰 범위에서 채터가 발생하는 것을 알 수 있다. Fig. 11~Fig. 13 그림의 각각 (b)는 레벨 1, (c)는 레벨 2, (d)는 레벨 3에서의 세부계수로서 레벨이 높은 경우의 세부계수에서는 분석과 검출이 곤란하여짐을 알 수 있다. x, y, z 방향의 절삭력 데이터를 처리한 Fig. 11, Fig. 12, Fig. 13 그림에서 알 수 있듯이 레벨 1에서 채터는 각 그림의 세 번째 단계에서 가장 명확하게 나타나고 있다.

4. 결론

본 논문에서는 엔드밀 가공 시 채터 검출을 위하여 웨이브렛 변환을 이용하였다. 웨이브렛 변환을 적용한 결과 세부계수 레벨 1인 경우가 가장 적합함을 알 수 있었다. 또한 채터 영역 유무의 특성을 AR 스펙트럼으로 확인하여 적절한 데이터 범위를 선정하고 웨이브렛 변환을 통한 채터 모드 검출 타당성을 입증하고자 하였다. 일반적인 FFT 스펙트럼 분석 대신 웨이브렛 분석법으로 시간영역범위에서 고주파성분 계수를 이용하여 채터 분석을 수월하게 검출할 수 있었다. 연구 결과 웨이브렛 변환 시 레벨이 증가함에 따라 채터 신호 모드의 검출은 어렵다는 것을 알 수 있었고, 웨이브렛 변환에서는 정확한 주파수의 검출은 불가능하지만 시간 영역에서 고주파 성분인 레벨 1의 세부계수로 각 F_x , F_y , F_z 방향의 모든 절삭력을 이용하여 채터 발생 유무를 검출할 수 있었다.

후 기

이 논문은 2004년도 두뇌한국21사업에 의하여 일부 지원되었음.

참 고 문 헌

- (1) Chui, C. K., 1992, *An Introduction to Wavelets, Wavelet Analysis and Its Applications*, Academic Press Inc., Boston.
- (2) Jaideva, C. G., and Andrew, K. C., 1999, *Fundamentals of Wavelets*, John Wiley & Sons.
- (3) Rao, R. M., and Bopardikar, A. S., 1998, *Wavelet Transforms*, Addison Wesley.
- (4) Newland, D. E., 1994, "Wavelet Analysis of Vibration Part1:Theory," *Trans. ASME Journal of Vibration and Acoustics*, Vol. 116, pp. 409~416.
- (5) Newland, D. E., 1993, *An Introduction to Random Vibration, Spectral & Wavelet Analysis*, 3rd ed. Longman.
- (6) Gilbert, S., and Truong N., 1996, *Wavelet and Filter Banks*, Wellesley Cambridge Press.
- (7) Yoon, M. C., Cho, H. D., and Kim, S. K., 1999, "A Study on the Diagnostics of Machining System with ARMA Modeling and Spectrum Analysis," *KSMTE*, Vol. 8, No. 3, pp. 42~51.
- (8) Yoon, M. C. and Chin, D. H., 2004, "On-line Detection of Chatter Using Wavelet Transform," *Proceedings of the ICAMT2004*, pp. 14~18.