

Wavelet 변환을 이용한 절삭신호 분석과 노이즈 제거

하만경*, 광재섭*, 진인태*, 김병탁*, 양재용**

Analysis and Denoising of Cutting Force Using Wavelet Transform

Man-Kyung Ha*, Jae-Seob Kwak*, In-Tai Jin*, Byung-Tak Kim*, Jae-Young Yang**

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, 광학 등을 비롯해 영상, 정보, 항공우주산업의 급속한 발달로 인하여 그 구성부품들의 고정도 가공의 필요성이 증대하고 있다. 또한 금형산업, 자동차 산업, 첨단 항공산업 분야에도 보다 정밀한 가공 부품을 요구하고 있다.

생산가공의 분야에서 생산설비의 상태에 대한 진단은 매우 중요하게 인식되고 있다. 생산가공 장비중에서 공구상태를 진단할 수 있는 방법에는 절삭력, 토크, 음향방출, 전력, 전류, 광학신호 등이 이용되고 있다. 이 중에서 일반적으로 이용되고 있는 것이 공구동력계를 이용한 절삭력 신호의 측정

이다. 이전의 신호처리 기법에 있어서는 단시간푸리에변환(Short-time Fourier Transform)이 널리 사용되었는데 이는 시간영역에서의 창(Windows)의 크기가 항상 일정하기 때문에, 결합 신호를 정확하게 분석하기 곤란하였다. 즉 모든 시간 영역에서 창의 크기가 같고 또한 주파수의 고저에 무관하게 모든 주파수대역에서 같은 분해능을 갖는 특징으로 인하여 급격하게 변화하는 신호분석에는 별로 적합하지 못하였다. 따라서, 추출된 신호로부터 의미 있는 정보를 추출하고, 신호의 정량적 분석을 할 수 있는 방법들이 요구되고 있다.

웨이브렛 변환(Wavelet Transform)은 시간과 주파수 영역에서 변동크기를 갖는 기저함수를 이용하여, 시간과 주파수 영역의 정보를 균형적으로 확대,

2002년 4월 3일 접수
* 부경대학교 기계공학부
** 부경대학교 기계공학과 대학원

축소할 수 있는 장점이 있다⁽¹⁾. 또한 신호에 대한 다각적 해석(Time-Frequency Analysis)을 가능하게 하는 유용한 도구이며, 여러 종류의 신호를 분석하여 신호가 포함하고 있는 물리적 의미를 파악하는데 유용하게 쓰인다⁽²⁾.

기존 연구에서는 음성이나 영상 신호처리, 지진파, 의료, 진동 등에서는 많은 응용과 연구가 이루어지고 있다^(3,4,5,6).

본 연구에서는 선삭가공에서 가공중(On-line)에 공구 팁에 작용하는 절삭력 신호를 검출하여 기존의 통계적 방법과는 달리 더 유용한 신호 해석방법인 웨이브렛 변환을 적용하여 각기 다른 주파수 성분을 동시에 추출하고, 이들의 시간정보를 얻음으로써 시간과 주파수 영역에서 동시에 해석하여 공구파손이 일어나는 이상상태를 진단하였다. 웨이브렛 변환의 노이즈 제거기법을 적용하여 절삭력 신호에 포함되어 있는 노이즈를 제거하는 잡음 제거 효과를 나타내었다. 나아가 선삭 뿐만 아니라 다른 기계가공신호에 적용이 가능함을 제시하고자 한다.

2. 웨이브렛 변환

신호해석의 목적은 신호의 변환에 의해 임의의 신호로부터 관련 정보를 얻어내는데 있다. 일부 신호의 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.

지금까지 정상신호를 변환하기 위한 방법으로 푸리에변환이 많이 사용되어 왔다. 이 방법은 무한 주기의 정현파 기저함수로부터 신호의 수직적 투영, 즉 내적을 계산하는 방법이다. 이 방법은 신호가 정상성분을 가지고 있다면 해석은 용이하다. 그러나 아주 짧은 주기를 가지면서 급격히 변화하는 비주기 신호에서는 전체 주파수축에 대하여 넓게 퍼지는 현상을 보이게 된다.

정현파가 아닌 신호에 대하여 해석하는 방법으로 시간-주파수의 2차원적 함수로 분석하는 단시간 푸리에 변환 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 이

루어지기 어렵다. 이에 가변적인 윈도우를 얻을수 있는 방법인 웨이브렛 변환이 사용되게 되었다.

2.1 연속 웨이브렛(Continuous Wavelet)

연속 웨이브렛 변환이란 연속 웨이브렛 함수를 이용해서 신호를 분석하는 방법을 말한다. 만일 분석하고자 하는 신호를 $f(t)$, 웨이브렛 함수를 $\Psi_{a,b}(t)$ 라고 하면, 이 함수는 공액복소수이다. $\Psi(t)$ 를 마더 웨이브렛(Mother Wavelet)라 하면, 다음식과 같은 관계가 있다.

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

여기서, 웨이브렛은 마더 웨이브렛을 시간축에 따라 증폭(Scaling)하고, 위치이동(Shift)시킴으로써 얻어지는 함수들의 집합이다⁽⁷⁾.

이 방법은 단시간 푸리에 변환이 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, 증폭 함수의 적분값은 아래식을 만족한다.

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

따라서, 웨이브렛 변환식은 다음과 같이 나타낼수 있다.

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

이와 같은 웨이브렛은 다음과 같은 특징을 가진다.

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

(II) 밴드패스(Band Pass) 신호이다.

(III) 시간영역에서 영(Zero)으로 빠르게 감소한다.

특징(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 등이 있고, 각각의 마더 웨이브렛이 가지고 있는 신호분해의 특징과 장점에 따라서 응용되는 분야는 다를수 있다⁽⁸⁾.

2.2 이산 웨이브렛(Discrete Wavelet)

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

이산 웨이브렛 변환은 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 저주파 성분 $A1$ 과 고주파 성분 $D1$ 으로 분해한 후, 다시 $A1$ 을 $A2$ 와 $D2$ 로 분해하는 과정을 반복한다.

2.3 잡음제거 기법(Denoising)

웨이브렛 변환은 잡음이 첨가된 신호에서 잡음을 제거하는 특징을 가지고 있으므로, 잡음에 영향을 많이 받는 신호의 잡음제거 기법에 우수한 특징을 가지고 있다. 잡음을 제거하는 방법으로는 여러가지가 있지만, 대개 그 원인을 제거하는 것보다 결과로서 나오는 잡음을 필터로 감쇄시키는 방법이 주로 사용되고 있다. Donoho^(9,10) 등에 의해 잡음제거 기법이 개발되었으며, 웨이브렛을 이용한 잡음제거 기법의 과정은 다음과 같다.

- (Ⅰ) 잡음성분을 정규화한다.
- (Ⅱ) 강 임계치법(Hard Thresholding) 또는 약 임계치법(Soft Thresholding)으로 설정치 처리를 수행한다.

강 임계치법과 약 임계치법은 다음과 같이 나타낸다.

강 임계치법 ;

$$\delta_{\lambda}^H = \begin{cases} 1, & \text{if } |f(t)| > \lambda \\ 0, & \text{if } |f(t)| \leq \lambda \end{cases} \quad (6)$$

약 임계치법 ;

$$\delta_{\lambda}^S = \begin{cases} \text{sign}(f(t))(|f(t)| - \lambda), & \text{if } |f(t)| > \lambda \\ 0, & \text{if } |f(t)| \leq \lambda \end{cases} \quad (7)$$

여기서 λ 는 임계값으로 다음과 같다.

$$\lambda = \sqrt{2 \log(n)} \cdot (2\sigma) / \sqrt{n} \cdot 2^{(J-j)/2} \quad (8)$$

n 은 각 스케일에서의 샘플수를, σ 는 웨이브렛 도메인상에서 각 스케일의 표준편차를, J 는 각 스케일 ($j = j_0, \dots, J$)을 나타낸다^(11,12).

3. 실험장치 및 조건

3.1 실험장치

본 연구에서는 선반을 이용해 가공중의 절삭력을 측정하였다. Fig. 1은 실험 장치의 구성도를 나타낸 것이다. 선반의 공구대에 공구동력계를 설치하였으며, 바이트 고정용 지그를 제작하여, 바이트를 공구동력계 상부에 부착하였다.

공구동력계는 Kistler사의 9272 Type의 공구동력계를 사용하였다. 검출되는 절삭력 신호의 변화거동을 관찰하기 위하여 오실로스코프(Oscilloscope)로 시각화 하였고, 신호를 Amplifier로 증폭한 후 12bit의 분해능을 가진 A/D 변환기를 사용하여 얻어진 데이터를 컴퓨터에 저장하여 절삭력을 분석할 수 있게 하였다.

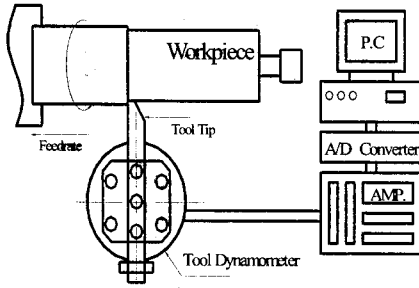


Fig. 1 Experimental set-up

3.2 실험조건

Fig. 2에서는 실험에 사용된 시편의 치수와 모양을 나타내었다. 재종으로는 일반적으로 널리 쓰이는 기계구조용 강(SM45C)을 열처리하지 않고 사용하였다. 시편은 $\phi 60 \times 250$ 의 치수로 파손이 쉽게 일어날 수 있도록 하기 위해 50mm마다 1.5mm씩 절입깊이가 깊어지면는 단을 가지게 하였다. 가공이 진행되면서 점차 절입이 깊어지는 형태로 각 단계마다 깊어지는 절입깊이로 인해 절삭팁에 작용하는 힘이 커지도록 제작하였다. 이송속도를 0.3mm/rev로 공구가 이송하면서 점차 절입깊이가 깊어져 공구파손이 일어나 가공이 끝난 시점까지의 절삭력을 측정하였다. 실험을 위한 조건은 Table 1의 조건과 같고, 가공상태는 건식으로 절삭유를 사용하지 않고 가공하였다.

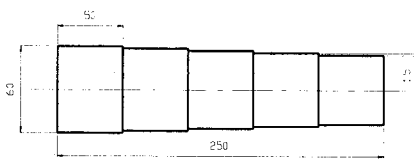


Fig. 2 Dimension and geometry of specimen

Table 2에서 시편의 화학적 성분을 나타내었다. 절삭용 팁은 대한중석의 TNGA160408 Type인 서멧(Cermet)을 사용하였다. 서멧 절삭 팁은 고온에서 소결한 재료로서 세라믹의 장점인 고경도와 초경의 장점인 인성을 두루 갖춘 우수한 제품이며, Table 3에서 여러 가지 기계적 성질을 나타내었다.

Table 1 Experimental condition

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

Table 2 Chemical composition of specimen

Elements	C	Si	Mn	P	S	Bal.
Composition (wt.%)	0.45	0.30	0.80	0.03	0.035	98.395

Table 3 Mechanical property of cermet tip

Component	Density (g/cm ³)	Hardness (HRA)	Fracture strength (MN/m ²)	Heat expansion (10E-6/°C)
TiCN	6.48	92.5	7.5	8.2

4. 신호 분석 및 노이즈 제거

4.1 신호의 변환과 분석

Fig. 3은 절삭력 신호를 저역 통과필터와 고역 통과필터를 통해 저주파와 고주파 신호로 분해하는 과정을 그림으로 나타낸 것이다.

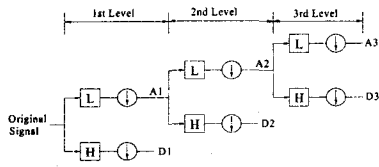


Fig. 3 Wavelet decomposition tree

Fig. 4는 공작물을 이송속도 0.3mm/rev, 스피들 속도 680rpm으로 가공중에 얻어지는 절삭력 신호를 전압크기로 나타내었다. Fig. 4의 신호를 1차 웨이브렛 변환을 이용해서 저주파와 고주파로 분해하여 나타낸 것이 Fig. 5이다. Fig. 5의 저주파 신호를 2차 웨이브렛 변환하여 저주파와 고주파 신호로 각각 분해한 것이 Fig. 6이다. 여기서 웨이브렛 변환을 위한 마더 웨이브렛의 선정에는 신호의 크기가 작고, 빠른 감쇠와 짧은 지연특성, 또한 진동하는 형태의 신호이므로 신호의 형태를 고려하여 Daubechies-4의 계수를 사용하였다⁽¹³⁾.

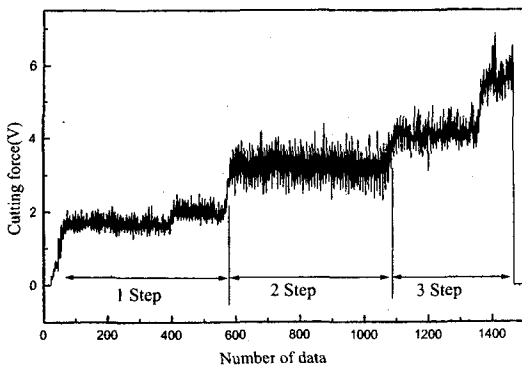
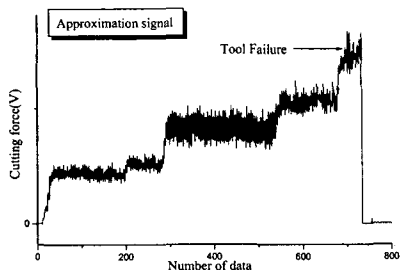
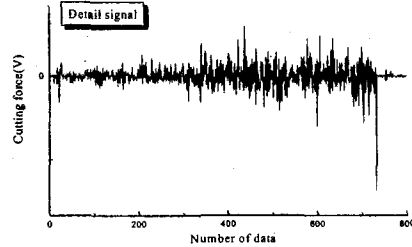


Fig. 4 Cutting force signal on turning

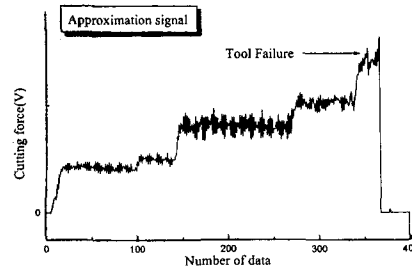


(a)

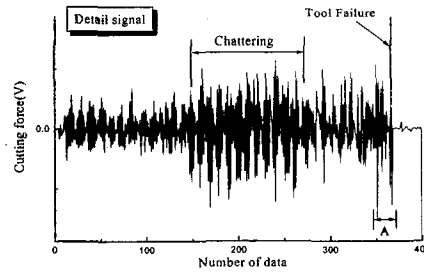


(b)

Fig. 5 First level of wavelet transform

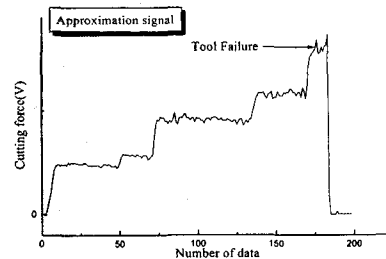


(a)

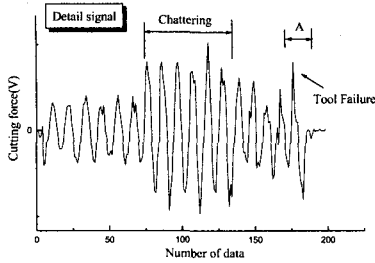


(b)

Fig. 6 Second level of wavelet transform

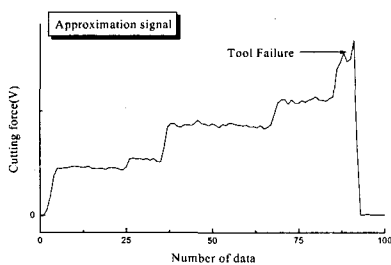


(a)

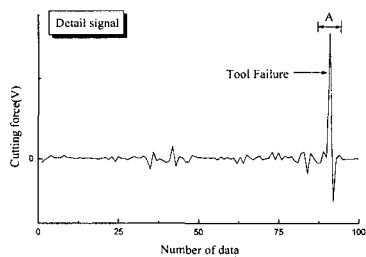


(b)

Fig. 7 Third level of wavelet transform



(a)



(b)

Fig. 8 Forth level of wavelet transform

변환된 데이터에서 볼수 있는 것처럼 Fig. 4의 신호를 1차에서 4차까지 변환하여 저주파로부터 신호의 형태에 대한 정보를 얻을 수가 있고, 고주파로부터 각 신호의 크기에 따른 정보를 얻을수 있다. 3mm 절입깊이인 2단계 구간에서는 절입깊이가 깊어짐으로 인해 시스템의 불안정으로 채터링이 일어난 것을 보여주고 있다. 변환된 고주파 신호에서

채터링이 일어난 구간과 신호의 크기를 시간축에 따라 나타난 것을 알 수 있다. Fig. 5의 1차 변환된 고주파 신호에서는 나타나지 않지만 차수가 높아지면서 채터링이 발생한 구간의 신호특징이 확연한 것을 알 수 있다. 이로써, 채터링의 발생시점의 검출이 고차 변환으로 갈수록 더 용이하다는 것을 알 수 있었다.

4.5mm 절입깊이인 3단계 구간에서는 과도절삭으로 인해 절삭력이 급격히 상승한 후 공구 팁의 파손이 일어났다. 공구파손이 일어난 시점의 신호를 보면 저주파 신호에서는 고차분해로 갈수록 신호의 크기가 시스템 계의 불안정으로 갑자기 증가하여 파손이 일어난 시점의 신호를 보여준다. 고주파 신호에서는 고차분해로 갈수록 공구파손 부분인 A구간의 신호가 변동폭이 심한 것을 볼수 있는데 Fig. 8의 고주파 신호에서는 주파수 폭이 작은 신호는 상쇄되고, 파손부분의 신호를 잘 파악할 수 있음을 보여주고 있다. 공구가 파손된 후에는 절삭이 되지 않아 절삭력은 영으로 감소하였다. Fig. 9에서는 채터링이 발생한 시편의 사진과 파손된 공구 팁의 사진을 보여주고 있다.

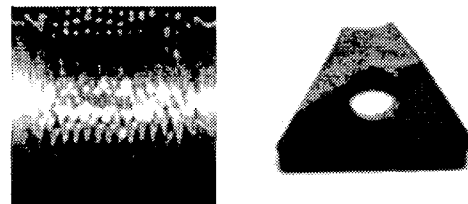


Fig. 9 Photograph of chattering specimen and damaged cermet tip

4.2 노이즈 제거기법에 의한 신호처리

절삭력 신호를 웨이브렛 변환을 통해 노이즈를 제거기법을 통해 노이즈를 제거하는 과정을 Fig. 10에서 보여주고 있다. 웨이브렛 계수를 통해 분해된 신호를 임계치 처리하고, 다시 분해의 역순으로 역변환을 하여 노이즈가 제거된 신호를 얻을 수 있다⁽¹⁴⁾. Fig. 11은 노이즈 제거기법을 통해 Fig. 4의 신호를 노이즈를 제거한 결과를 보여주고 있다. Fig. 11에서 알 수 있는 바와 같이 기계가공신호의 노이즈를 제거함으로써 보다 정량적이고 정확한 분석이 가능함을 알 수 있다.

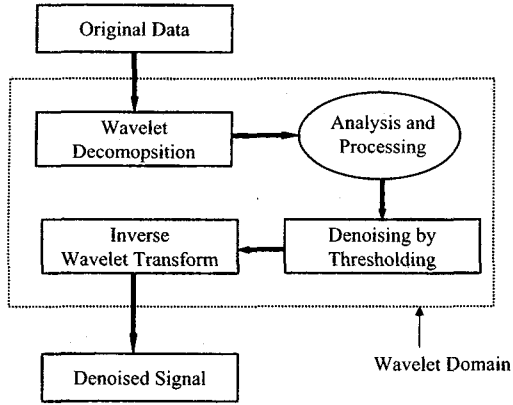


Fig. 10 Diagram of denoising procedure by wavelet transform

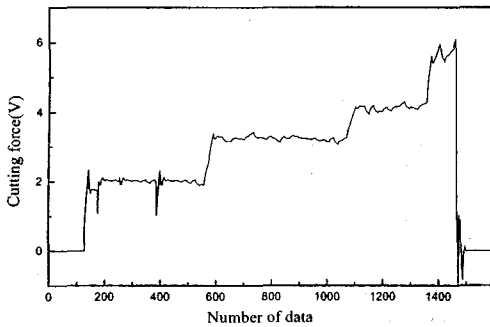


Fig. 11 Denoised signal by wavelet transform

5. 결론

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

1. 웨이브렛 변환된 절삭력 신호에서 공구파손시 급격히 증가하는 저주파, 고주파 신호의 분석으로 공구의 파손시점을 검출하는 것이 가능하였다.
2. 웨이브렛 변환된 고주파 신호의 분석을 통해 채

터링이 발생하는 구간의 검출이 가능함을 보였다.

3. 노이즈가 포함된 기계가공신호의 웨이브렛 변환을 적용하여 노이즈가 제거된 신호를 얻을 수 있었다. 이로써 보다 정량적인 분석이 가능함을 입증하였다.

참고문헌

1. G. Strang and 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. 이현동, 이광식의, "이산 웨이브렛 변환에 의한 부분방전 패턴 분석," 한국조명·전기설비학회 논문집, 제15권, 제1호, pp. 84~89, 2001.
4. 박정빈, 황재문, 정성환, "웨이브렛 변환을 이용한 디지털 갈라 영상의 정보보," 한국멀티미디어학회 춘계학술대회 발표논문집, pp. 187~192, 1998.
5. 이호철, 김윤영, 이용욱, "모드형상의 웨이브렛 변환을 이용한 보의 결함 진단," 한국소음진동공학회 춘계학술대회논문집, pp. 430~435, 1999.
6. 박화영, 김선호, 안중환, 이만형, "이송모터 전류신호의 Wavelet 변환에 의한 공구파손 식별," 한국정밀공학회지, 제13권, 제9호, pp. 31~37, 1996.
7. I. Daubechies, "The wavelets transform, time-frequency localization and signal analysis," IEEE Transactions on Information Theory, Vol. 39(5), pp. 961~1005, 1990.
8. 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.
9. D. L. Donoho, I. M. Johnstone, "Adapting to unknown smoothness via wavelet shrinkage," J. Amer. Statist. Assoc. Vol. 90, pp. 1200~1224, 1995.
10. D. L. Donoho, I. M. Johnstone, "Ideal denoising in an orthonormal basis chosen from a library of bases," Technical Report 461, Department of

Statistics, Stanford University.

- 11.V. Cherkassky, S. Kilts, "Myopotential denoising of ECG signals using wavelet thresholding methods," *Neural Networks* Vol. 14, pp. 1129~1137, 2001.
12. 이현동, 이광식, "웨이브렛 변환의 노이즈 제거 기법에 의한 부분방전신호 특성," *Journal of KIEE*, Vol. 15, No. 4, pp. 62~68, 2001.
- 13.A. Bakhtazad, A. Palazoglu, J Romagnoli, "Process trend analysis using wavelet-based denoising," *Control Engineering Practice*, Vol. 8, pp. 657~663, 2000.
- 14.Y. Wang, K. S. Moon, "A methodology for the multi-resolution simulation of grinding wheel surface," *Wear*, Vol. 211, pp. 218~225, 1997.