

AE 신호를 위한 새로운 DWT 기저함수 제안 및 적용

Proposition and Application of Novel DWT Mother Function for AE signature

구동식*·김재구*·최병근†

DongSik Gu, JaeGu Kim and Byeong Keun Choi

Key Words: Discrete Wavelet Transform(이산 웨이블릿 변환), Acoustic Emission(음향방출), Envelope Analysis(포락처리), Fault Detection(결함 검출), Condition Monitoring(상태 감시)

ABSTRACT

Acoustic Emission(AE) is widely used for early detection of faults for rotating machinery in these days because of its high sensitivity. AE signal has to need for transferring to low frequency range for the spectrum analysis included the fault mechanism. In transferring process, we lose a lot of fault information caused by unusable signal processing method. Discrete Wavelet Transform(DWT) is a method of signal processing for AE signatures, but the pattern of its mother function is not optimized with AE signals. So, we can lose the fault information when we want to use the DWT for AE signal. Therefore, in this paper, we will propose a novel pattern for DWT mother function, which is optimized with AE signals. And it will be applied to compare the results of DWT by daubechies and novel pattern.

1. 서 론

음향방출(Acoustic Emission, AE) 기법을 적용한 기계 상태 감시에 대한 연구는 적용성에서 시작하여 실질적 응용으로 진행되어 왔다. AE는 고주파 저에너지의 신호를 검출할 수 있는 감도(Sensitivity)를 가지고 있어 가속도계(Accelerometer)보다 좀 더 빠르게 결합을 검출 할 수 있는 것으로 알려져 있다. Al-Ghamdi⁽¹⁾는 구름 요소 베어링에 크기가 서로 다른 동일한 형태의 결합을 인가하여, 결합의 크기에 따른 AE신호의 특성을 분석하였으며, Tan⁽²⁾은 기어표면 손상에 대해 AE 신호, 진동 신호 및 오일 분석을 통하여 결합의 진전에 따른 각 신호의 특성을 평가·비교하여 AE의 검출 능력을 확인하였다. Loutas⁽³⁾는 기어에 균열을 인가하여 실시간으로 진

동신호와 AE 신호를 통하여 일부 특징값(feature value)를 분석한 결과, 결합의 발생 초기 단계에서 진동 신호에 나타나지 않는 특징들이 AE 신호에서 발견이 된다고 발표하였다. 또한 Mba⁽⁴⁾는 저속 회전하는 Rotating Biological Contactor(RBC)에서 발생된 볼트의 균열과 느슨함(looseness)를 AE를 통해 검출한 사례를 발표하였다.

이상과 같이 AE의 적용과 그 능력은 충분히 검증되었다. 하지만 AE 신호는 초음파 영역의 것으로, 낮은 신호 대 잡음 비(S/N ratio)를 보이고 있기 때문에 현재까지 알려진 진동법을 사용한 상태 감시 방법과 상이한 주파수 스펙트럼을 보인다. 초음파 영역의 신호를 이미 알려진 결합 주파수 영역으로 변환하기 위해 여러 가지 방법들이 적용이 되었으나, 그 중 포락처리(Envelope Analysis)가 그 역할을 수행하기에 충분한 것으로 발표되었다^{(5)~(7)}. 그러나 포락처리는 그 적용성이 구름요소 베어링의 결함을 검출하는데 탁월한 능력을 가지고 있으나 기어 등의 다른 기계요소 결함을 검출하기엔 부족한 면을

* 교신저자; 정희원, 경상대학교

E-mail : bgchoi@gnu.ac.kr

Tel : 055-640-3186, Fax : 055-640-3188

† 경상대학교 대학원

나타내었다. 또한 포락처리는 일반적으로 대역통과 필터를 사용하여 신호의 주파수 대역을 설정하게 되는데, 이는 기계요소의 고유진동수(natural frequency, NF)를 포함하는 것이 가장 효과적인 것으로 알려져 있다. 하지만 실제 각 요소의 고유진동수를 구하기란 쉽지 않으며, 복잡한 시스템의 고유진동수는 더욱 어려운 상황이다. 그리고 이산 웨이블릿 변환(Discrete Wavelet Transform)은 신호의 분해 단계에 따라 대역통과필터(Band-Pass Filter)의 역할을 함과 동시에 충격파(Impulse wave)를 가중 시키는 역할을 하기 때문에 기어의 결함을 검출하는데 용이한 것으로 연구되었다^{(8),(9)}. 그러나 웨이블릿 변환의 수행에서 가장 중요 시 되는 것은 기저함수(Mother Function)의 선택에 있다 할 수 있다. 일반적으로 많이 사용되는 웨이블릿의 기저함수는 Matlab 등과 같은 프로그램에서 Packet으로 구성이 되어 있으며, 사용자의 선택에 따라 Scaling Filter를 일부 수정하여 사용할 수 있으나, 본연의 기저함수 형태는 수정할 수 없다.

따라서 포락처리와 이산 웨이블릿은 서로 다른 기계요소의 결합 검출에 용이하여 복합 시스템의 결합 검출에의 적용은 부족하다 할 수 있다. 하지만 두 가지 모두의 특성을 사용한다면 하나의 신호 처리만으로 복잡한 시스템에서 다중으로 발생된 여러 기계요소의 결함을 검출 할 수 있을 것이다. 포락처리에 이산 웨이블릿을 적용한 신호 처리 방법을 이용하여 구름요소 베어링과 저속회전 축의 균열을 검출하는 연구에서는 포락처리에 이산 웨이블릿이 첨가되면서 결합 신호가 더욱 증폭된다는 것을 발표하였다^{(10),(11)}.

그러므로 본 연구에서는 포락처리의 단점인 대역통과필터를 이산 웨이블릿으로 대체하여 포락처리를 보강하였다. 이산 웨이블릿의 기저함수는 AE 신호에 적합한 형태로 피로파괴 실험을 통하여 얻은 AE 신호를 바탕으로 하여 구하였다. 보강된 포락처리의 성능을 평가하기 위하여 결함이 포함된 구름요소 베어링을 저속 운전시켜 AE 신호를 취득하였다.

2. 보강된 포락처리

포락처리(Envelope analysis)는 일반적으로 (1) 대역통과필터(Band-Pass Filter, BPF), (2) 신호 변조

(Demodulation), (3) 힐버트 변환(Hilbert Transforms), (4) 저역통과필터(Low-Pass Filter, LPF)의 순으로 신호처리를 진행하게 된다. 그러나 포락처리는 초기 순서인 BPF 대역 설정은 사용자의 임의로 선택된다. BPF는 일반적으로 기계 시스템의 NF를 포함하고 있을 때 가장 효과적인 것으로 알려져 있다. 단일 요소의 기계와 같이 단순 모델에 대한 NF를 해석적으로, 또는 실험을 통하여 구하는 것은 어렵지 않은 일이다. 하지만 여러 가지의 기계요소로 구성되어 있는 기계 시스템의 경우, 해석을 통한 NF의 예측값은 정확해와의 오차에 의해 신뢰도가 떨어지며, 실험을 통한 방법 역시 복잡한 구조로 인해 NF를 정확히 구하는 것은 어려운 일이다. 더욱 이 AE 신호는 일반적으로 수십 kHz ~ 수 MHz의 광범위한 초음파 영역의 주파수 대역을 가진다. 이러한 범위에 존재하는 NF를 찾는 것은 거의 불가능하다. 그러므로 AE 신호를 이용한 CM 시스템에서 각 기계 시스템에 적합한 BPF 대역을 설정하지 못한 포락처리는 그 역할을 충분히 수행할 수 없으며, 기계 시스템의 결합 분석도 제대로 이루어질 수 없다.

따라서 본 논문에서는 이러한 포락처리의 단점을 보완하기 위해 DWT를 BPF 대신 사용하였다. 그 이유는 DWT는 과도신호에 대해 가중치가 부여되는 하나의 필터로써 Scaling Filter의 레벨에 따라 신호를 여러 가지 주파수 대역으로 분해할 수 있으며, 이미 DWT는 AE 신호를 이용한 기어 결합 검출 능력은 평가되었기 때문이다. 그러나 DWT의 효과를 증대시키기 위해 AE 신호에 적합한 DWT의 기저함수를 사용하여야 하나, 지금까지 그에 대한 연구는 수행되지 못하였다. 그러므로 본 연구에서 AE 신호에 적합한 DWT의 기저함수를 제안하며, 이를 이용한 DWT를 포락처리에 적용한다.

3. DWT 기저함수 제안

DWT의 기저함수를 제안하기 위해 균열 발생 시의 AE 신호의 형태를 파악하기 위해 Fig. 1과 같은 시험편을 이용하여 피로파괴 실험을 수행하였으며, AE 센서는 Fig. 2와 같이 시편의 측면에 마그넷 홀더(Magnet Holder)을 사용하여 고정하였다.

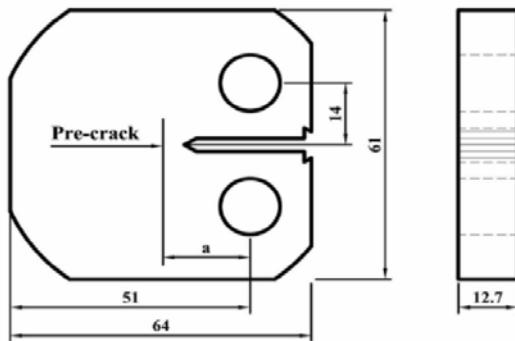


Fig. 1 Specimen for fatigue test



Fig. 2 Installation of AE sensor

Table 1 Specifications of AE test

Parameter	Value
Threshold	30 dB
Preamplifier	40 dB
Sampling Frequency	5 MHz
Pre-Trigger	100 μ s
Hit Length	40 μ s

본 실험은 고탄소강의 일종인 SM53C강(KS규격 D3752) 사용하였으며, 예비균열(pre-crack)은 3mm 삽입된 상태이다. 설정 응력은 15kN에서 10Hz의 정현파로 Servo Hydraulic Test 시험기를 사용하여 대기 중에서 수행하였다. AE 센서를 통한 신호의 저장은 매 30초마다 1회 저장되었다.

Table 1은 본 실험에 사용된 AE 시스템의 파라미터값을 나타내며, Fig. 3은 실험의 결과로 얻은 AE 신호를 시간신호(상)와 STFT(Short Time

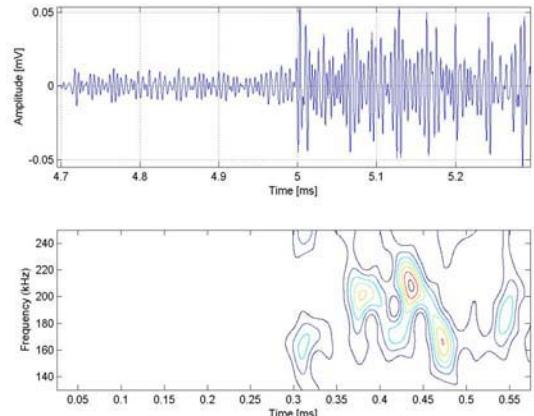


Fig. 3 AE signal caused by crack growth

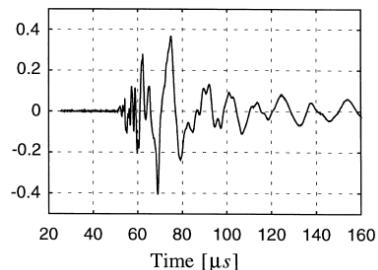


Fig. 4 AE recording(13)

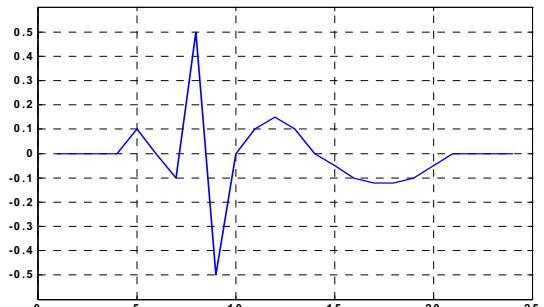


Fig. 5 Pattern proposition for mother function

Fourier Transform)이용한 주파수와 시간에 대한 Color map(하)을 나타낸 것이다. Fig. 3에 나타낸 시간신호는 1회 저장된 AE 신호에 대해, 최대 피크 (peak)가 발생된 지점은 확대하여 나타낸 것으로, Fig. 3과 같은 형태의 과도신호가 균열을 성장에 따라 점차적으로 빈도가 높아졌다. 또한 발생된 AE 신호는 항상 일정한 형태를 보였으며, Fig. 3(하)와 같이 약 140kHz와 260kHz 사이의 대역에서 크게 나타남을 알 수 있었다.

Johnson^{(12)~(14)}은 복합재 박판의 균열진전에 대해 6개의 AE 센서를 통하여 AE 신호의 형태를 분석하였고, 수학적으로 예측하였다. Fig. 4는 Johnson에 의해 계측된 AE 신호를 나타낸다.

Fig. 3의 시간신호와 Fig. 4는 계측 시스템의 설정 파라미터 차이에 의한 주파수 대역이 상이하여 서로 다른 형태를 띠고 있는 것으로 보인다. 하지만 과도신호의 발생 직후 형태를 살펴보면, 초기 빠른 주기의 신호 발생 후 주기가 느려지는 것을 알 수 있다. 이에 따라 AE의 과도신호에 적합할 것으로 사료되는 형태를 Fig. 5와 같이 제안한다.

제안되는 패턴은 앞서 설명한 바와 같이 최대 피크까지 상대적으로 빠른 주기를 가지며 증가하고, 최대 피크 이후 진폭이 감소함과 동시에 주기가 상대적으로 느려지는 형태로 제안한다.

4. 제안 기저함수의 적용

Fig. 5와 같이 제안된 기저함수의 적합성을 평가하기 위하여 균열진전 실험을 통해 얻은 AE신호와 2007년 정⁽⁶⁾과 김⁽⁷⁾ 등에 의해 발표된 베어링 결함에 의한 AE 신호에 대하여 분석을 실시했다. 또한 신호처리 기법은 최근 구⁽¹⁰⁾ 등에 의해 발표된 포락 처리와 이산웨이블릿을 동시에 적용한 방법을 사용하였다.

4.1 균열진전 실험의 AE 신호

Fig. 6은 Fig. 3에 나타낸 신호에 대해 기저함수 도비치5(db5)를 사용한 것으로 그 형태는 Fig. 7과 같으며, Fig. 8은 제안된 패턴에 의한 결과를 나타낸 것이다.

Fig. 6과 Fig. 7의 진폭값의 단위가 서로 상이하기 때문에 비교를 위하여 최대진폭값에 대한 피크들의 비에 대해 비교를 한다. 제안된 기저함수 패턴을 이용한 결과는 기존의 기저함수를 이용한 결과에 비해 $1X(15\text{Hz})$ 값의 비가 높게 나타남을 알 수 있으며, 그에 대한 조화성분은 기존 함수에서 $4X(60\text{Hz})$ 까지 나타난 것에 비해 제안된 기저함수에 의한 결과는 $5X(75\text{Hz})$ 까지 확실히 발생하고 있다.

4.2 베어링 결함 신호

베어링 결함은 외륜 결함으로 운전속도 80rpm,

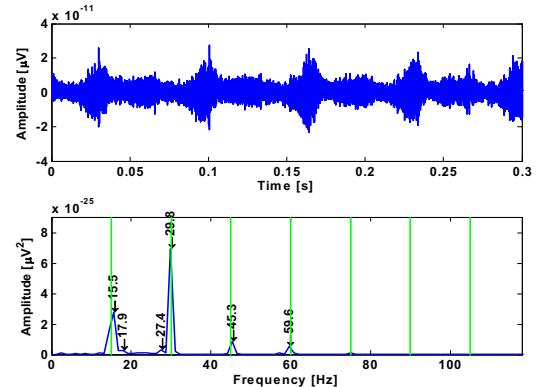


Fig. 6 Time and power spectrum using db5

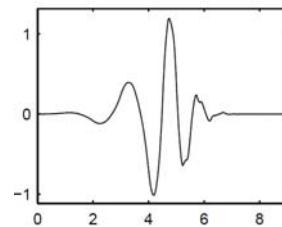


Fig. 7 Daubechies 5

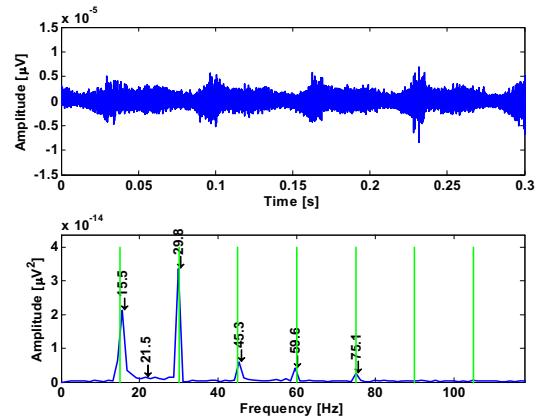


Fig. 8 Time and power spectrum using proposed pattern

부하 5kN의 조건으로 운전되었으며, 그에 대해 15초가 15회 저장된 신호를 평균하여 결과를 나타내었다. Fig. 9는 정⁽⁶⁾에 의해 나타내어진 결과이다.

Fig. 10은 본 논문에서 제안한 기저함수 패턴을 이용한 결과로, 기존의 주파수 분석 결과에 비해 조화성분들의 피크가 확연히 나타나고 있음을 알 수 있다. 또한 Fig. 10은 DWT Level 4에 해당하는 것으로 Level 1부터 6까지 모두 유사한 형태를 띠었

다. 따라서 본 논문에서 제시한 새로운 기저함수 패턴은 결합 정보를 AE 신호의 특성 분석에 충분히 활용 가능한 것으로 사료된다.

5. 결 론

본 논문에서는 AE 신호에 적합한 DWT 기저함수 패턴을 구하기 위하여 균열진전 실험을 통해 AE 신호를 취득하였다. 취득한 AE 신호에서 검출된 과도신호의 형태를 파악하고, 참고문헌의 정보와 비교하였다. 균열진전 실험 결과로 얻은 과도신호의 형태는 참고문헌의 AE 신호와 유사한 형태를 가지고 있었으며, 이를 토대로 새로운 기저함수 패턴을 제안하였다. 제안된 기저함수 패턴을 이용한 신호 분석 결과, 균열진전 실험 데이터의 주파수 분석 및 외륜 결합을 가지는 구름요소 베어링의 주파수 분석에서 기준의 DWT 기저함수에 비해 좀 더 낮은 결과를 얻을 수 있었다.

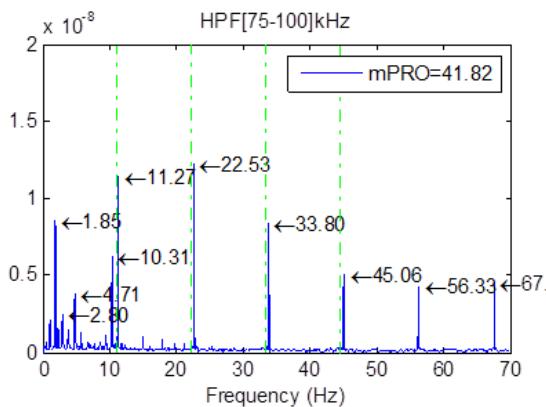


Fig. 9 Power spectrum⁽⁶⁾

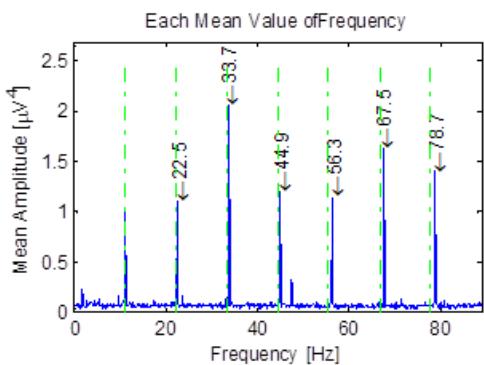


Fig. 10 Power spectrum by the proposed mother function(Level 4)

따라서 본 연구는 AE 시스템을 이용한 기계요소 결합 검출 및 상태감시 분야에 좋은 예를 제시할 수 있을 것이며, 새로운 기저함수의 개발은 결합 검출에 매우 중요한 요소로 작용함을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술진흥원의 지역혁신인력양성사업(N010012)과 2단계 BK21의 친환경냉열에너지기계연구 사업팀의 지원으로 수행되었음.

참 고 문 헌

- (1) Al-Ghamd, A. M., and Mba, D., 2006, A comparative experimental study on the use of acoustic emission and vibration analysis for bearing defect identification and estimation of defect size, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 20, pp.1537~1571.
- (2) Tan, C. K., Irving, P., and Mba, D., 2007, A comparative experimental study on the diagnostic and prognostic capabilities of acoustics emission, vibration and spectrometric oil analysis for spur gears, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 21, pp.208~233.
- (3) Loutas, T. H., Sotiriades, G., Kalaitzoglou, I. and Kostopoulos, V., 2009, Condition monitoring of a single-stage gearbox with artificially induced gear cracks utilizing on-line vibration and acoustic emission measurement, Applied Acoustics, Vol.70, pp.1148~1159.
- (4) Mba, D., 2002, Applicability of acoustic emission to monitoring the mechanical integrity of bolted structures in low speed rotating machinery: case study, NDT&E International, Vol.35, pp.293 ~300.
- (5) Kim, Y. H., Andy, C.C. T., Joseph M., Vladis, K. and Yang, B. S., 2007, A comparative study on the application of acoustic emission technique and acceleration measurements for low speed condition monitoring, Proceeding of the 12th Asia-Pacific

Vibration Conference(APVC), Sapporo, Japan.

(6) Jeong, H. E., Gu, D. S., Kim, H. J., Andy, C.C. T., Kim, Y. H. and Choi, B. K., 2007, The application of AE transducer for the bearing condition monitoring of low-speed machine, Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, KSNVE07S-09-03.

(7) Kim, H. J., Gu. D. S., Jeong, H. E., Andy, C.C. T., Kim, E. and Choi, B. K., 2007, The comparison of AE and Acceleration transducer for the early detection on the low-speed bearing, Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, KSNVE07S-09-04.

(8) Baydar, N. and Ball, A., 2001, DETECTION OF GEAR FAILURES VIA VIBRATION AND ACOUSTIC SIGNALS USING WAVELET TRANSFORM, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 17, No. 4, pp.787~804.

(9) Kunpeng, Z., San, W. Y. and Soon, H. G., 2009, Wavelet analysis of sensor signals for tool condition monitoring: A review and some new results, International Jounal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 49, pp.537~553.

(10) Gu, D. S., Kim, J. G. and Choi, B. K., 2009, Rolling element bearing fault detection using acoustic emission signal analyzed by envelop analysis with discrete wavelet transform, Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp.109~110.

(11) Gu, D. S., Lee, J. H., Kim, B. S., Yang, B. S. and Choi, B. K., 2010, Application of the AE Technique for the Detection of Shaft Crack with Low Speed, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering. Vol. 20, No. 2, pp. 185~190.

(12) M. Johnson and P. Gudmundson, 2000, Broad-band trasient recording and characterization of acoustic emission events in composite laminates, Composites Science and Technology, Vol.60, pp.2803-2818.

(13) M. Johnson, 2003, Clasification of AE transient based on numerical simulations of composite laminates, NDT&E International, Vol.36, pp.319-329.

(14) M. Johnson and P. Gudmundson, 2001, Experimental and theoretical characterization of acoustic emission transients in composite laminates, Composites Science and Technology, Vol.61, pp.1367-1378.