

Wavelet 변환에 의한 압축기의 이상상태 식별

Identification of Abnormal Compressor using Wavelet Transform

정지홍*, 이기용 (부산대 원), 강명창(부산대 기계기술연구소),
김정석(부산대 ERC/NSDM), 이현욱, 이갑규(LG전자)

Ji-hong Jeong*, Gi-yong Lee(Graduated School, Pusan Univ.), Myeong-chang Kang(RIMT, Pusan Univ.),
Jeong-suk Kim,(ERC/NSDM, Pusan Univ.), Hyun-uk Lee, Gam-gyu Lee(LG electronics)

Abstract

Wavelet Transform is a new tools for signal processing, such as data compressing, extraction of parameter for Reconition and Diagnostics. This transform has an advandage of a good resolution compared to Fast Fourier Transform(FFT)

In this study, We employ the wavelet transform for analysis of Acoustic Emission raw signal generated from rotary compressor.

In abnormal condition of rotary compressor, the state of operating condition can be classified by analyzing coefficient of wavelet transformed signal.

Key Words : Wavelet Transform(웨이브렛 변환), Acoustic Emission(음향방출), Rotary Compressor(회전식 압축기), Burst Type(돌발형), Continus Type(연속형), Butting(버팅)

1. 서 론

웨이브렛 변환(Wavelet Transform)은 분석하고자 하는 신호를 시간 영역에서 주파수 영역으로 변환 시킬때 신호에 포함되어 있는 주파수 성분에 따라서 분석창(Window)을 고주파 성분에 대해서는 시간 영역의 분해능이 높게, 저주파 신호에 대해서는 주파수 영역의 분해능을 높게 변화시켜 변환하는 방법으로 주파수 성분을 각 주파수 별로 분리 시킬수도 있고 주파수 영역에서 시간영역의 정보도 알수 있는 장점이 있어 패턴 인식이나 잡음 제거등 현재 신호 처리 분야에서 많이 응용되고 있는 새로운 변환 방법으로 AE(Acoustic Emission)의 경우에도 효과적으로 이용할 수 있을 것으로 사료된다.⁽¹⁾

따라서 본 연구에서는 압축기의 회전 부품에서 발생하는 AE신호를 웨이브렛 변환 통하여 계수를 추출하고 이들 계수를 비교하여 압축기 이상상태를 분류할 수 있는 기법을 제안하고자 한다.

2. 웨이브렛 변환

2.1 웨이브렛 이론

웨이브렛 변환은 모웨이브(Mother Wavelets)이라 정의되는 $\Psi(t)$ 를 변이 시키고 확대/축소 시킴으로써 얻어지는 함수들의 집합을 말한다. 여기에서 모

웨이브렛 함수는 식 (1)를 만족해야 하므로 시간적으로 유한하게 되고, 평균이 0이므로 급속히 진폭이 작아지게 되는 특성을 가지고 있다.

$$\int_{-\infty}^{\infty} \Psi(t) dt = 0 \quad (1)$$

$$\Psi_{a,\tau}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{t-\tau}{a}\right) \quad (2)$$

모웨이브렛 함수를 이용하여 어떤 신호 $s(t)$ 의 웨이브렛 변환은 식 (3)와 같이 나타난다.

$$WT(a, \tau) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int s(t) \Psi\left(\frac{t-\tau}{a}\right) dt \quad (3)$$

식 (3)에서 보는 바와 같이 웨이브렛 변환은 두가지 변수 τ , a 의 함수인데 τ , a 가 실수 ($\tau, a \in R$ with $\tau \neq 0$)일 때 연속 웨이브렛 변환(Continuous Wavelet Transform)이라 하고 τ , a 가 정수 ($\tau = \tau_0^j, a = k a_0 \tau_0^j$ with $j, k \in Z$ and $\tau > 1, a_0 > 0$, fixed)일 때 이산 웨이브렛 변환(Discrete Wavelet Transform)이라 하는데 보통 실제 적용에 있어서 식(4)에 나타난 바와 같이 $\tau_0 = 2, a_0 = 1$ 을 이용한다

$$DWT(j, k) = \frac{1}{\sqrt{2^j}} \int s(t) \Psi\left(\frac{t-2^j k}{2^j}\right) dt \quad (4)$$

변수 a 는 주파수에 관련이 있는 변수인데, a 를 크

게 하면 모웨이브렛이 축소되어 저주파 성분에 있어서 주파수 분해능을 향상시킬 수 있고 a 를 작게 하면 모웨이브렛이 팽창되어 고주파 성분을 시간의 분해능을 향상시킬 수 있다. 변수 τ 는 시간에 관련이 있는 함수인데 τ 를 이용하여 모웨이브렛을 원하는 곳에 이동시킬 수가 있다.

이러한 변수 τ , a 의 성질 때문에 웨이브렛 변환은 주파수 영역에서 시간의 영역을 알 수 있게 했으며 또한 이 함수를 확장과 이동을 시켜 주파수에 따라서 분해능을 달리하게 하여 유연성 있는 해석이 가능하다.

2.2 다중해상도 웨이브렛 변환(Multiresolution Wavelet Transform)

다중해상도 웨이브렛 변환은 이산화된 웨이브렛 함수를 정규직교 좌표계에 적용함으로써 주어진 신호의 특성을 분해하여 나타내는 알고리즘으로 Mallet, Doubechies 등이 제안했다^(2,3). 이 방법은 식 (5)에 나타낸 스케링(Scaling) 함수라 불리는 함수 $\Phi(n)$ 를 결정하고 이것을 기초로 모웨이브렛 $\Psi(n)$ 를 구한다.

$$\Phi(n) = \sum_{k=0}^N g(k)\Phi(2n-k) \quad (5)$$

$$\Psi(n) = \sum_{k=0}^N h(k)\Phi(2n-k) \quad (6)$$

여기에서 $g(k)$ 와 $h(k)$ 는 스케링과 웨이브렛 필터 계수로서 각각 저주파 통과 필터와 고주파 통과 필터 역할을 하여 각 함수들의 계수에 의해 주파수 분할이 이루어진다.

Fig. 1은 스케링 함수와 웨이브렛 함수이용 신호가 분해되는 과정을 도식적으로 나타내었다.

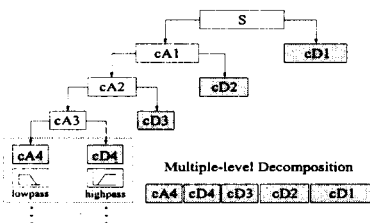


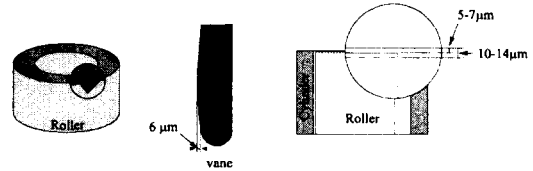
Fig. 1 Structure of Decomposition

3. 이상상태 시료 제작 및 실험 방법

3.1 인위적 이상상태의 제작

인위적인 제작한 이상상태는 롤러찍힘(Roller defect), 롤러높음(Roller lift), 베인 힘(Vane

Deflection) 등 3종류이다. 롤러찍힘은 롤러에 축방향으로 윗부분에 찍힘을 주었고, 롤러높음은 롤러를 5~7 μ m 높여서 조립하여 베어링과의 마찰을 정상인 경우보다 많이 발생하도록 하였으며, 베인 힘은 베인 표면에 길이 방향으로 굴곡을 주어 베인 스톱(Vane Slot)과 마찰이 많이 일어 나도록 했다. 이상상태 종류별 인위적인 제작방법을 Fig. 2에 나타내었다.



Roller Defect	Vane Deflection	Roller Lift
롤러에 축방향으로 윗부분에 찍힘을 줌	베인이 세로 방향으로 굴곡을 줌	조립시에 롤러를 높여 베어링과의 마찰을 발생

Fig. 2 Type of artificial abnormal condition

3.2 실험 방법

본 연구에 사용된 실험 장치 구성을 Fig. 3에 나타내었다.

실험은 압축기(회전 주파수 : 50Hz)를 정격 기동(220V)으로 가동시킨후 압축기의 측면에 AE 센서를 부착하여 신호를 획득하였다. 압축기 외형(Shell)은 곡면이므로 접촉면적에 따른 AE센서의 민감도를 고려하여 직경이 작은 Pico-Type(PAC , 직경 : 5mm)의 AE센서를 선정하였으며, AE 신호는 미약하므로 신호의 증폭을 위해 전치증폭기(Pre-Amp)를 사용하였으며, 이 증폭기를 가동시키기 위하여 전원 공급기로 24V를 공급하였다. 필터는 100~300kHz의 대역필터를 사용하였으며, 데이터 획득을 위해서 A/D Board(Gagescop, 분해능: 12bit, 20MHz)와 획득 프로그램을 사용하여, 샘플링주파수 2MHz로 총 40.5ms를 획득하고 이중 한주기의 데이터만 분석하였다.

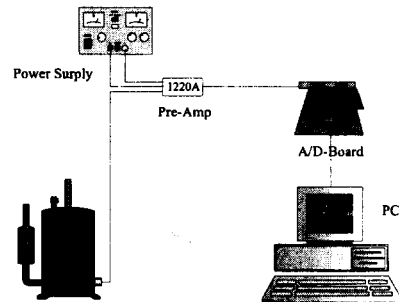


Fig. 3 Experimental set-up

4. 실험결과 및 고찰

4.1 AE 원신호와 발생원

정상과 이상상태의 AE 원신호 파형을 Fig. 4에 나타내었다. 정상 압축기의 경우 회전 하는 동안 연속형 신호 사이에 돌발형 신호가 크게 왔을때 2개가 주기적으로 발생하는 것을 알 수 있는데 이러한 돌발형 신호중 진폭이 가장 큰 경우는 회전형 압축기에서 나타나는 버팅(Butting) 현상이라고 여겨진다.⁽⁴⁾ 이 현상은 압축된 공기와 흡입공기의 영향으로 베인이 베인 슬롯(Vane Slot)에 부딪치는 현상을 말하는데, Fig. 5에 이러한 버팅 메카니즘을 나타내었다.

이 신호를 0° 라고 두면 진폭이 낮은 돌발형 신호는 30° 부근에서 나타나는데 이는 압축된 공기가 토출되어 나갈 때 이 공기의 영향으로 밸브가 리테이너에 부딪치거나 클랭크 축이 롤러에 부딪치는 것으로 추정되어 진다.

연속형 신호는 돌발형 신호와 달리 회전부품들 사이에서 발생하는 마찰에 의해 것으로 여겨지고, 처음에는 진폭이 높게 나타나다가 점점 감소하다가 후반부에 다시 증가하는 경향이 보인다.

이상상태 압축기의 경우에도 정상 상태의 경우와 마찬가지로 돌발형 신호와 연속형 신호가 나타나며 이상상태별 돌발형 신호의 개수는 이상 상태의 원인과 상관 없이 나타난다.

연속형 신호의 경우 이상상태별로 특이한 경향을 보이는데 롤러 높음의 경우 정상의 경우보다 진폭이 전반적으로 높고, 롤러적힘의 경우 롤러가 높은 경우보다 진폭이 낮지만 중간 부분에 낮은 진폭의 구간이 존재한다. 베인의 휨 경우 롤러 적힘과 유사한 경향을 보이지만 낮은 진폭의 구간이 롤러 적혔을 때보다 앞에 나타난다.

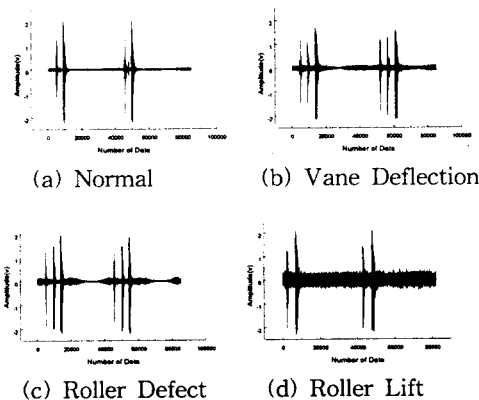


Fig. 4 Waveforms of AE raw signal

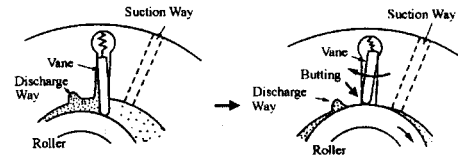
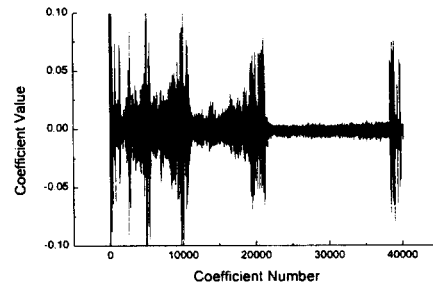


Fig. 5 butting mechanism

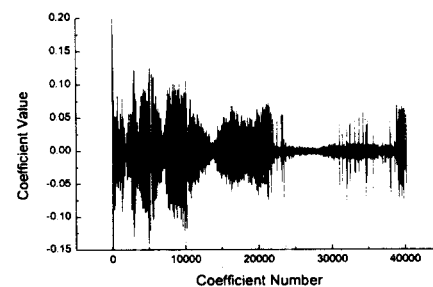
4.2 웨이브렛 분석

압축기에서의 AE 신호는 연속형 신호와 돌발형 신호가 혼합되어 있고 각각 발생원이 다르며 이상상태 원인에 따라 돌발형 신호보다 연속형 신호가 그 특성을 잘 나타내고 있다. 하지만 진폭의 비가 상대적으로 많은 차이를 보여 돌발형 신호 때문에 연속형 신호의 분석이 용이하지 못하다. 따라서 본 연구에서는 돌발형 신호와 연속형 신호를 나눌 수 있는 설정치를 두어 연속형 신호와 돌발형 신호를 분리하고, 연속형 신호에서 돌발형 신호의 위치에 0을 대입하여 전체적인 데이터 개수는 변함 없도록 하여 연속형 신호에서 돌발형 신호의 영향으로 전체적인 파형은 유지하도록 하고 웨이브렛 변환 하였다.

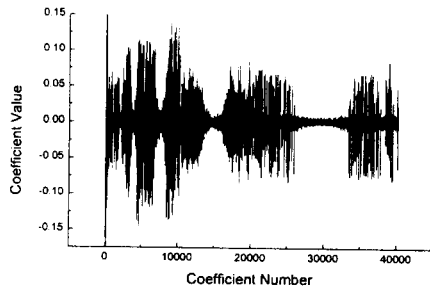
사용한 모 웨이브렛은 Doubechies 10을 사용하였고 12단계로 나눈 다음 구한 계수를 Fig. 6에 나타내었다.



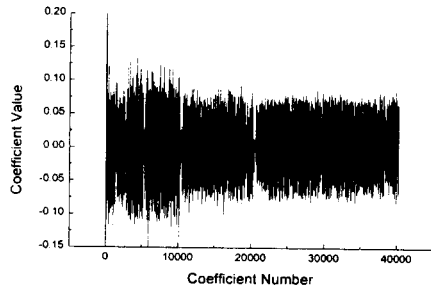
(a) Normal



b) Vane Deflection



(c) Roller Defect



(d) Roller Lift

Fig. 6 Result of Wavelet Analysis

Fig. 6에서 보면 이상상태별 웨이블릿의 계수가 크질수록 계수의 값이 별로 변동 사항이 없다는 것을 알 수 있는데 이는 고주파에서는 시간영역의 분해능이 높고 저주파에는 주파수 분해능이 높은 웨이블릿 변환 특성 때문에 그런 것 같다.

이러한 계수들 중에서 전체적인 경향을 가지는 가장 저주파 영역의 계수를 추출하여 Fig. 7에 나타내었다.

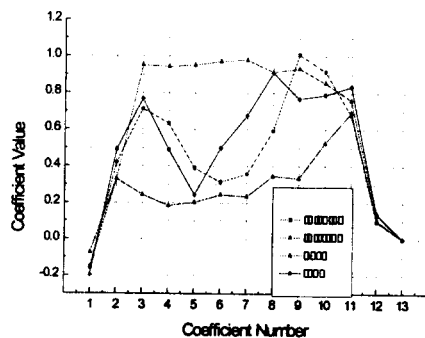


Fig. 7 Pattern of Wavelet Coefficient

Fig. 7에 나타난 바와 같이 정상인 압축기의 경우 전체적으로 계수의 값이 낮으며 처음으로 피크를 보이는 시점이 이상상태의 압축기의 경우보다 빠르다는 것을 알 수가 있고 롤러가 높은 경우 전체적으로 계수의 값이 높음을 알 수가 있다. 또한 롤러가 찍혔을 경우는 베인이 흰 이상상태와 비슷한 경향을 보이지만 처음으로 골이 나타나는 위치가 베인이 휘었을 때 보다 늦은 것을 알 수 있다. 이러한 웨이블릿 계수로부터 이상상태별 압축기의 패턴을 효과적으로 분류 할 수 있을 것이다.

5. 결 론

압축기에서 발생하는 AE 신호를 웨이블릿 변환하여 이상상태 압축기의 식별하는 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 회전형 압축기에서 발생하는 AE 신호는 돌발형 신호와 연속형 신호를 나눌 수 있고 각각 발생원이 다르다는 것을 파악할 수 있었다.
- (2) 웨이블릿 변환은 저주파에서는 주파수 영역의 분해능이 높고 고주파에서는 시간 영역의 분해능이 높다는 것을 확인 할 수 있었다.
- (3) 웨이블릿 변환은 신호의 특성을 추출하는데 유효한 변환 방법이라는 것을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. Ueno, Y., Mori, Kasashima, N. and Yoshioka, T., "Prediction of Spalling on a Rolling Bearing using the Discrete Wavelet Transform", JSPE, Vol. 61, No. 4 pp, 521-526, 1995
2. Y.T.Chan, Wavelet Basics, 1995
3. Ingrid Daubechies, Ten Lectures on Wavelets, 1992
4. Ichiya Sato and Takao Yoneyama, "Diagnosis of Rotaring Slides in Rotary Compressors using Acoustic Emission Technique", The Japanese Society for NDI, pp. 405-412, 1988