

HHT를 이용한 간극이 있는 회전체의 고장진단

Fault Diagnosis for Rotating Machinery with Clearance using HHT

이승목*·최연선†

Seung-Mock Lee and Yeon-Sun Choi

Key Words : Rotating machinery(회전기계), Partial rub(부분마멸), Looseness(헐거움), Short time fourier transform(단구간 푸리에 변환), Continuous wavelet transform(연속 웨이블릿 변환), Hilbert-Huang transform(힐버트-후앙 변환)

ABSTRACT

Rotating machinery has two typical faults with clearance, one is partial rub and the other is looseness. Due to these faults, non-linear and non-stationary signals are occurred. Therefore, time-frequency analysis is necessary for exact fault diagnosis of rotating machinery. In this paper newly developed time-frequency analysis method, HHT(Hilbert-Huang Transform) is applied to fault diagnosis and compared with other method of FFT, SFFT and CWT. The results show that HHT can represent better resolution than any other method. Consequently, the faults of rotating machinery are diagnosed efficiently by using HHT.

1. 서 론

모터, 펌프, 압축기, 발전소의 증기터빈, 항공기의 제트엔진 등의 회전기계는 불평형에 의한 편심, 정렬불량 등에 의하여 고정자와 회전자 사이에서 접촉을 유발한다. 이러한 접촉으로 인하여 고정자와 회전자 사이의 간극이 생겨 헐거움(looseness)과 회전마멸현상(rubbing)이 발생하게 된다. 헐거움이나 회전마멸현상이 발생하게 되면 회전기계와 본체 사이에 충격과 마찰을 동반하는 이상 진동을 유발하게 되며, 이는 곧 회전기계의 성능 저하 그리고 수명단축으로 이어진다. 이러한 헐거움과 회전마멸현상은 기계를 장기간 운전하면서 서서히 발생하는 것으로서 적정 간극 유지 및 보수는 결코 쉽지 않은 과제이다.

부분회전마멸과 관련하여 Black[1]은 회전마멸 연구의 선구자로서 제트엔진에서 회전자가 고정자와 접촉하는 경우에 발생하는 물리적 현상에 대한 연구를 수행하였다. Choi[2]는 간단한 실험장치를 제작하여 실험을 수행하였고 Peng[3]

은 FFT Spectrum 과 변형된 시간-주파수 분석을 통하여 회전마멸의 발생여부를 판별하였다. Peng[4]은 웨이블릿 변환을 이용하여 회전체의 부분마멸을 진단하였다. 그러나 축과 축받침 사이의 헐거움이 있을 때 발생하는 회전기계의 이상 진동에 관한 연구는 흔치 않다. Choi[5]는 상관차원분석을 통하여 회전체의 간극을 판별하는 연구를 수행하였으나, 헐거움이 발생했을 시 신호의 특성을 판별하지는 못하였다.

회전체의 부분마멸이나 헐거움을 정확히 진단하기 위해서는 신호의 주파수 특성과 시간의 정확한 정보가 필요하다. 기존의 신호처리방법인 FFT(Fast Fourier Transform)를 이용한 신호처리방법은 시간정보를 알 수 없다는 단점이 있다. 이에 시간-주파수 분석방법인 STFT(Short Time Fourier Transform)과 CWT (Continuous Wavelet Transform)이 널리 사용되고 있다. 그러나 STFT는 일정한 해상도를 제공함에 따라 비정상신호 분석에는 적합하지 않고, CWT는 가장자리 뒤틀림, 에너지손실, 오버랩에 의한 간섭의 발생으로 불확실한 주파수정보가 나타날 수 있다.[6] 이에 본 연구에서는 새로이 개발된 시간-주파수 분석방법인 HHT를 사용하여 간극이 있는 회전체의 고장을 진단하고자 한다.

† 교신저자: 정희원, 성균관대학교 기계공학과
E-mail : yschoi@yurim.ac.kr
Tel : (031)290-7440, Fax : (031) 290-5849

* 정희원, 성균관대학교 대학원 기계공학과

2. 간극이 있는 회전체 실험

2.1 부분마멸 실험

부분회전마멸 현상을 재현하기 위하여 Bently Nevada Co.에서 제작된 RK-4 Rotor Kit을 사용하였다. Fig. 1(a)와 같이 고정자를 조정하여 돌출부와 접촉을 시켜 부분마멸을 재현하였고, 임의의 속도인 1700 rpm에 대하여 Fig. 1(b)와 같이 끝단의 부싱(bushing)에 가속도계를 부착하여 신호를 측정하였다. 이와 같이 측정된 신호는 A/D 변환을 거쳐 컴퓨터에 저장하였으며, MATLAB을 이용하여 신호를 분석하였다. 부분마멸 현상이 발생하면 축에 충격력과 마찰력이 작용한다.[7] 이에 충격신호를 확인하기 위하여 시간축을 로터가 1회전하는 시간의 약 6배인 0.2초로 설정을 하여 분석을 실시하였다.

2.2 헐거움 실험

회전기계의 헐거움에 따른 진동신호의 특성을 파악하기 위하여 Fig. 1(c)와 같이 각각 직경이 10 mm, 11 mm, 12 mm, 13 mm, 14 mm, 15 mm의 6가지 경우에 대하여 실험을 수행하였다. 여기서 10 mm는 헐거움이 없는 상태로 부싱의 직경이 늘어남에 따라 헐거움이 각각 1 mm에서 5 mm로 증가한다. 가속도계의 위치는 부분마멸 상태와 동일하게 Fig. 1(b)와 같이 맨 끝단의 부싱에 부착하였으며, 회전속도는 1700 rpm이다. 헐거움이 발생하면 고정자와 회전자 사이의 규칙적인 충격신호가 아닌 마찰에 기인한 다양한 주파수 성분이 발생하므로 신호의 변화추이를 살펴보기 위하여 시간축을 상대적으로 길게 5초로 설정하였다.

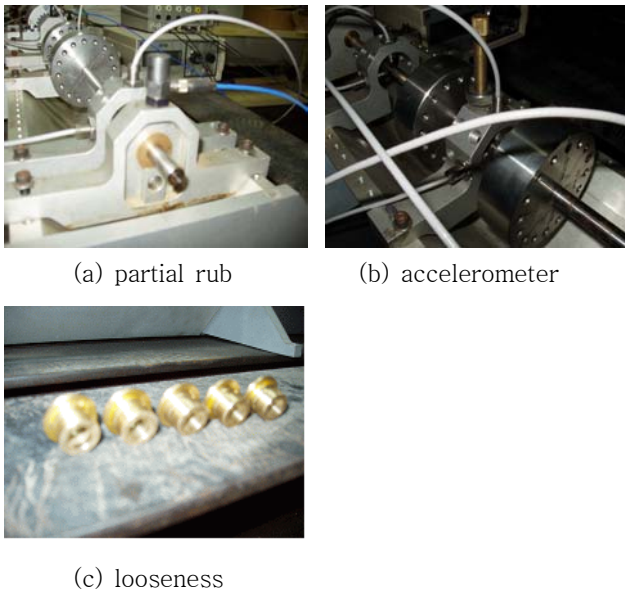


Fig. 1 Experimental set-up

3. 신호처리에 의한 간극 효과 진단

3.1 FFT

시간영역의 신호를 식 (1)과 같이 정의되는 FFT(Fast Fourier Transform)을 이용하여 주파수 영역의 신호로 바꿈으로써 신호를 구성하고 있는 주파수 성분을 확인할 수 있다. FFT를 이용한 주파수 분석은 시스템을 구성하고 있는 주파수 성분을 가장 정확하게 확인할 수 있는 장점이 있어 신호를 처리하는데 널리 사용되고 있다. 그러나 시간에 대한 정보가 없기 때문에 충격신호와 같이 비선형-비정상 상태의 신호에 대해서 정확한 분석이 어렵다.

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt \quad (1)$$

로터시스템의 자유 상태와 부분마멸상태의 측정된 신호를 각각 주파수분석해보면 Fig. 2와 같다. 로터가 1700 rpm으로 회전 할 때 발생하는 회전주파수는 28.3 Hz 이다. 부분마멸상태에서는 회전주파수의 배수 성분들이 자유상태보다 크게 확대되는 것을 확인할 수 있다. 그리고 자유 상태에서는 회전주파수의 2X 성분이 크고, 부분마멸이 발생했을 시에는 6X 성분이 가장 큰 것을 확인할 수 있다. 이는 로터시스템의 비선형성에 기인하여 초조화(super-harmonic)성분이 나타나기 때문이다. 그러나 이 정보만으로는 로터시스템의 부분마멸 유무를 판단하기에는 한계가 있다.

로터시스템의 헐거움에 따른 각각의 상태에 대하여 주파수 분석을 한 결과 Fig. 3과 같다. 헐거움의 크기와 무관하게 비선형성에 기인한 초조화성분이 공통적으로 발생하고 주파수 성분은 차이가 없다. 간극이 2 mm 이상일 시 약 140 ~ 200 Hz 사이의 성분들의 크기가 커지는 것으로 보아 헐거움에 대한 특성은 간극이 2 mm 이상 발생했을 시 나타나는 것으로 예측할 수 있다.

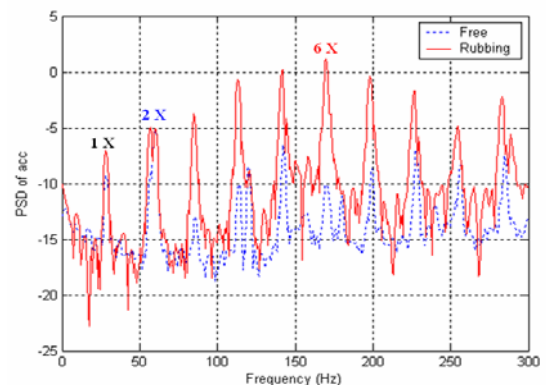


Fig. 2 Frequency of rotor system : partial rub

3.2 STFT

FFT를 통한 분석이 시간에 대한 정보가 없다는 단점이 있는데 반해, 일정 크기의 창함수를 이용한 푸리에변환(STFT : Short-time Fourier Transform)은 시간변화에 따른 주파수 특성을 분석할 수 있다. STFT는 식 (2)와 같이 정의된다.

$$S(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} h^*(\tau - t) s(\tau) e^{-j2\pi f \tau} d\tau \quad (2)$$

비교적 시간에 따른 정확한 주파수 성분을 얻을 수 있지만, 일정한 크기의 창함수 $h(\tau)$ 를 사용하므로 분석영역이 시간, 주파수에 대해 항상 일정하다. 그러므로 비정상 신호(non-stationary signals)를 효율적으로 분석할 수 없고 분석하고자 하는 시간이 매우 짧은 경우 한계가 있다.

부분마멸이 발생하면 0.2초 동안 6개의 충격성분이 예상되므로 이를 확인하기 위하여 시간을 10등분하여 분석을 실시한 결과 부분마멸이 발생했을 시 자유상태일 시에는 없는 6개의 충격성분이 확인되었지만 해상도가 낮기 때문에 주파수 정보와 시간 정보가 정확하지 않음을 Fig. 4(b)를 통하여 확인할 수 있다. 이는 SFFT분석 시 설정한 간격이 너무 짧아서 충분한 데이터의 수가 없으므로 FFT의 정확도가 떨어졌기 때문이다. 이에 SFFT는 짧은 시간의 분석에는 적합하지 않음을 알 수 있다.

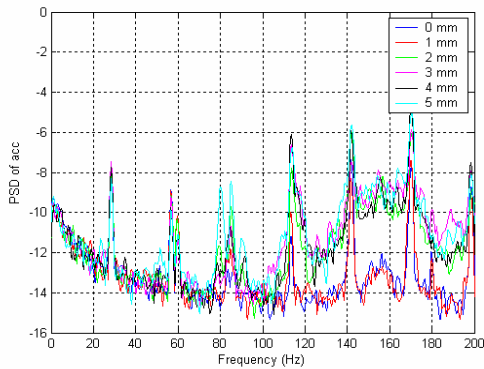
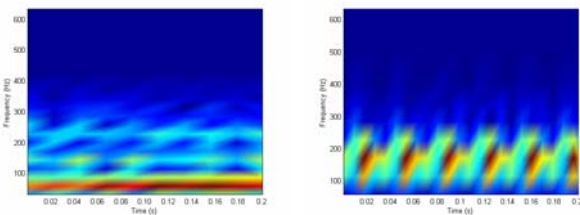


Fig. 3 Frequency of rotor system : looseness



(a) free condition (b) rubbing condition

Fig. 4 SFFT of rotor system : partial rub

회전체에 헐거움이 발생했을 시 특성에 대해서 알아보기 위하여, 간극 0 ~ 5 mm에 대하여 5초를 20등분하여 SFFT 분석을 실시한 결과는 Fig. 5와 같다. FFT를 통하여 분석한 결과에서 확인한 140 ~ 200 Hz성분이 발견되나, 간극이 증가함에 따른 특성의 차이를 뚜렷하게 확인할 수 없다.

3.3 CWT

CWT(Continuous Wavelet Transform)은 가장 널리 사용되고 있는 시간-주파수 분석방법이다. STFT가 일정한 해상도를 가짐에 따라 비정상 신호를 분석하는데 적합하지 않는데 반해, 식 (3)과 같이 정의되는, CWT는 다양한 크기의 창을 사용하여 비정상 신호를 효과적으로 분석할 수 있다.

$$W_x(a, b; \psi) = a^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi_{a,b}^*(t) dt, \quad a > 0 \quad (3)$$

여기서

$$\psi_{a,b}(t) = a^{-1/2} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$$

식 (3)에서 a 는 스케일 변수, b 는 위치 변수이고, $\psi(t)$ 는 모함수(mother wavelet)이다. 웨이블렛의 경우 스케일 변수 a 에 의한 큰 스케일에서 작은 스케일에 걸쳐 윈도우의 스케일이 변화하여 멀티스케일(multi-scale) 해석에 유용하게 쓰인다. 그러나 CWT는 고주파 영역에서는 주파수 분해능이 떨어지고, 저주파 영역에서는 시간 분해능이 떨어지는 단점이 있다.[8]

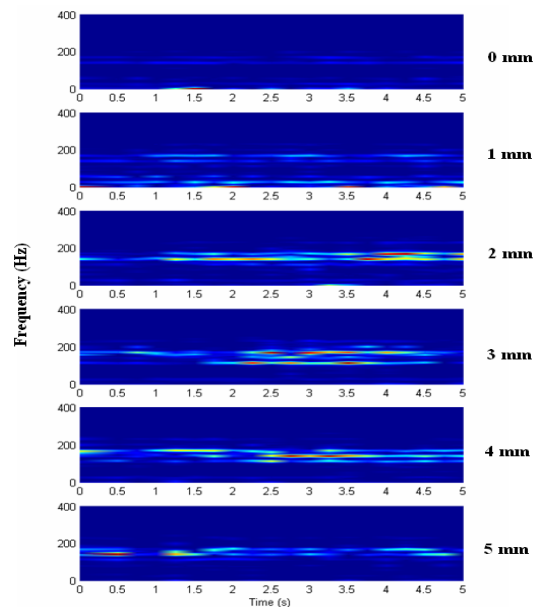


Fig. 5 SFFT of rotor system : looseness

웨이블릿 변환에 사용되는 모함수는 다양하지만, Morlet 웨이블릿이 신호처리에 적합하다.[4] 이에 본 연구에서는 상용프로그램인 MATLAB[9]의 신호처리 툴박스에 포함되어 있는 Morlet 웨이블릿을 사용하여 분석을 실시하였다.

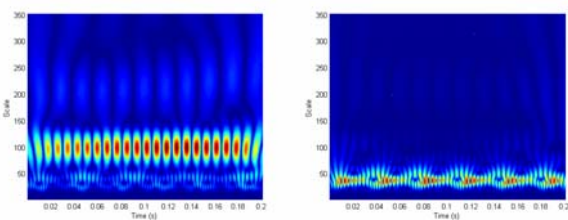
자유 상태와 부분마멸이 있을 시에 대하여 SFFT와 마찬가지로 0.2초에 대하여 분석을 실시한 결과 Fig. 6과 같다. Fig. 6(a)는 자유 상태일 때의 분석 결과로 일정한 스케일을 확인할 수 있다. 이에 반해 6번의 충격신호가 부분마멸일 시 발견되는 것을 Fig. 6(b)를 통하여 확인할 수 있다. 하지만 상대적인 저주파 영역의 스케일은 잔상이 생겨 정확한 주파수 성분을 확인하기는 어렵다. 그리고 양 끝단의 주파수의 왜곡현상이 발생하고 충격신호도 시간축으로 넓게 퍼져있어 충격 유무를 알 수 있을 뿐 정확한 충격이 발생한 시간이나 주파수 성분을 확인하기 어렵다.

시간 5초에 대하여 간극 0 ~ 5 mm에 대하여 CWT를 이용한 분석결과는 Fig. 7과 같다. 간극이 0mm와 1 mm일 시 상대적인 저주파 성분의 스케일이 뚜렷하게 나오는 것을 확인할 수 있다. 간극이 2mm이상 커짐에 따라 상대적인 저주파 영역의 에너지는 작아지고 고주파 영역의 에너지가 높아진다. 하지만 간극이 커짐에 따른 마찰에 의한 영향은 상대적으로 고주파 영역인 140 ~ 200 Hz에서 발견되는 것으로 추정되는데 CWT는 상대적인 고주파 영역에서 주파수 분해능이 떨어지기 때문에 그에 대한 특성을 뚜렷하게 파악하기 어렵다.

4. HHT를 이용한 간극 효과 진단

4.1 HHT

기존 주파수 분석의 단점을 극복하고자 최근에 새로운 주파수 분석 방법인 HHT(Hilbert-Huang Transform)가 연구되었다.[10] HHT의 장점은 다른 방법보다 선명한 결과를 얻어 낼 수 있다는 것이다. HHT는 크게 힐버트변환(Hilbert Transform)과 EMD(Empirical Mode Decomposition)으로 이루어져 있다. 신호를 힐버트변환을 하여 의미 있는 값을 얻기 위해서는 신호가 단일떨림(single oscillation)이어야 한다.



(a) free condition (b) rubbing condition

Fig. 6 CWT of rotor system : partial rub

실제 기계구동계에서 발생하는 신호는 복잡한 신호로 이루어져 있다. 이를 위하여 EMD방법을 사용하여 여러 개의 단일떨림신호인 IMF(Intrinsic Mode Function)로 분류하여 각각의 IMF를 힐버트 변환하여 분석하는 방법이다.

4.2 힐버트 변환

힐버트 변환에서 중요한 특성은 하나의 단일성분(mono-component)에 대하여 하나의 순간주파수(instantaneous frequency)를 갖는다는 것이다. 임의의 신호 $x(t)$ 에 대하여 힐버트 변환 $y(t)$ 는 식 (4)과 같이 정의된다.

$$y(t) = \frac{P}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{t-\tau} d\tau \quad (4)$$

임의의 신호 $x(t)$ 와 힐버트 변환쌍인 $y(t)$ 를 복소수쌍으로 표현하여 식(5)와 같이 해석적 신호 $z(t)$ 를 만들 수 있다.

$$z(t) = x(t) + iy(t) \quad (5)$$

위의 신호를 지수 형태로 나타내면 식 (6)과 같다.

$$z(t) = a(t)e^{i\theta t} \quad (6)$$

여기서

$$a(t) = \sqrt{x^2(t) + y^2(t)},$$

$$\theta(t) = \tan^{-1}\left(\frac{y(t)}{x(t)}\right)$$

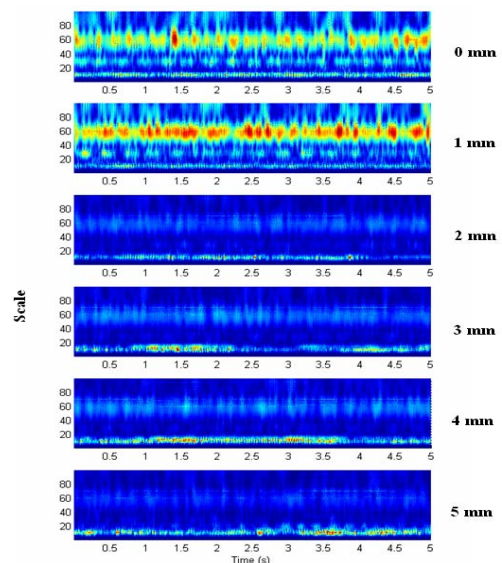


Fig. 7 CWT of rotor system : looseness

$a(t)$ 는 신호 $x(t)$ 의 에너지가 시간 영역에서 어떠한 에너지를 갖는지에 대한 순간크기이고 $\theta(t)$ 는 신호 $x(t)$ 의 순간위상이다. 여기서 힐버트 변환의 중요한 성질은 순간위상각을 시간에 대하여 미분한 순간주파수이다. 만일 신호 $x(t)$ 가 단일 성분의 신호라면 이 순간주파수는 신호의 고유한 특성을 보여주는 파라미터가 될 수 있다. 그러나 힐버트 변환의 단점은 신호가 단일 성분이 아니라 복합 성분이면 순간주파수의 의미는 사라진다. 예를 들어 단일성분의 신호인 $x(t) = \sin(2\pi t)$ 의 경우 Fig. 8(a)에서 볼 수 있듯이 시간에 따른 순간주파수 성분이 일정하게 나온다. 이 순간주파수는 위 신호의 고유한 특성이다. 그러나 $x(t) = 0.5(\sin(2\pi t) + \sin(10\pi t))$ 의 경우는 1 Hz 성분과 5 Hz 성분으로 이루어진 복합 성분 신호이다. 위 신호의 순간주파수를 Fig. 8(b)에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 신호가 복합성분일 때는 의미 있는 순간주파수를 얻지 못한다.

또한 힐버트 변환은 신호가 단일 성분이라도 신호의 최대점을 이은선과 최소점을 이은선이 x 축을 기준으로 대칭이 아니라면 정확한 순간주파수를 얻지 못한다. $x(t) = \sin(2\pi t)$ 의 신호에 1.5를 더한 $x(t) = \sin(2\pi t) + 1.5$ 를 힐버트 변환하면 Fig. 8(c)와 같다. 위 신호는 단일성분이긴 하지만 x 축 위쪽으로 신호가 치우쳐 있다. 이 신호의 순간주파수는 실제 순간주파수와는 전혀 다르다. 이처럼 힐버트 변환의 적용은 정현과 같은 x 축에 대칭적인 모습을 가진 단일 성분의 신호에만 적용이 가능하다. 그러나 구동되고 있는 기계의 진동 신호는 수많은 성분들의 조합으로 이루어지며 비선형-비정상 상태의 신호이다. 따라서 기존의 힐버트 변환은 기계의 진동 신호에 적용하는 데에 한계가 있고 현대적 신호를 해석하는데 제한적으로 사용될 수 있다.

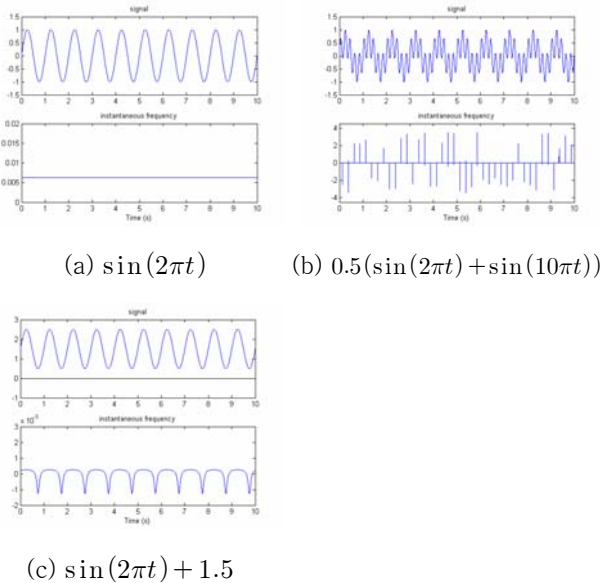


Fig. 8 Limitation of Hilbert transform

4.3 EMD

EMD(Empirical Mode Decomposition)방법은 복합 성분의 신호를 단일 성분의 신호인 IMF들로 분류해 내는 것이다. IMF란 다음의 두 가지 조건을 만족시켜야 한다. 첫 번째는 신호의 모든 최대점들은 0보다 커야 하고 모든 최소점들은 0보다 작아야 한다. 두 번째는 데이터의 최대점들을 이은선과 최소점들을 이은선이 x 축을 기준으로 대칭이어야 한다. 위 두 가지 조건을 만족하면 IMF는 단일성분의 신호가 된다.

EMD방법은 첫 번째로 신호의 모든 최대점들을 찾아서 연결하여 신호의 최대경계선을 만든다. 두 번째로 신호의 모든 최소점에 대하여서도 같은 작업을 반복한다. 세 번째로 최대점을 이은 선과 최소점을 이은선 사이의 평균값을 구한다. 원신호에서 평균값을 빼고 남은 신호가 첫 번째 쉬프팅(shifting)을 마친 신호가 된다. 위의 일련의 과정을 Fig. 9(a) ~ (c)에 나타내었다. 위의 과정을 마친 Fig. 9(c)의 신호는 IMF의 성질을 만족하는 것처럼 보이지만 약 22번째 데이터의 평균값에서 피크가 존재한다. 이에 좀 더 정확한 IMF를 얻기 위해서 식 (7)과 같이 과정을 반복한다.

$$\begin{aligned} c_{11} &= x(t) - m_{11} \\ c_{12} &= c_{11} - m_{12} \\ &\vdots \\ c_{1k} &= c_{1(k-1)} - m_{1k} \end{aligned} \quad (7)$$

c_{1k} 가 IMF의 조건을 만족시키면 비로소 첫 번째 성분인 c_1 이 된다. 총 5번의 과정을 반복하여 최종적으로 얻어진 신호는 Fig 9(d)와 같다. IMF의 첫 번째 조건인 모든 최대점이 0보다 크고 최소점이 0보다 작은 것은 IMF가 단일펄스신호이어야 하기 때문에 반드시 필요한 조건이다. 그러나 두 번째 조건인 신호는 x 축을 기준으로 대칭이어야 한다는 것은 신호의 특성을 없애버릴 수 있기 때문에 이를 방지하기 위하여 변환 과정 중 식 (8)과 같이 표준 편차에 제한을 둔다. 일반적으로 이 표준 편차의 제한은 0.2 ~ 0.3의 값을 가진다.[11]

$$SD = \sum_{t=0}^T \left[\frac{|h_{1(k-1)}(t) - h_{1k}(t)|^2}{h_{1(k-1)}^2(t)} \right] \quad (8)$$

첫 번째 성분이 구해지면 이 첫 번째 성분을 원신호에서 분리해내고 남은 신호를 원신호로 하여 식 (7)의 과정을 반복하여 두 번째 성분을 구한다. 이는 잔여신호가 최소 두개 이상의 최대점 혹은 최소점을 갖을 때까지 반복한다. 만약 잔여 신호가 위의 조건을 만족시키지 못한다면 이 신호를 최종잔여신호(residue signal)라 한다. 이 잔여 신호는 데이터의 추세를 나타낸다. 그러면 최종적으로 n 개의 성분과 잔여 신호를 얻게 된다. 위의 과정을 거치면 최종적으로 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$x(t) = \sum_{i=1}^n c_i + r_n \quad (9)$$

위의 n 개의 성분에 각각 힐베르트 변환을 통하여 스펙트럼을 표시한 것이 HHT이다.

부분마멸이 있는 로터시스템에 대하여 EMD를 실시한 결과는 Fig. 10과 같다. 자유 상태의 신호는 4개의 성분과 잔여신호로 구성되어 있고, 부분마멸상태의 신호는 3개의 성분과 잔여신호로 구성되어 있다.

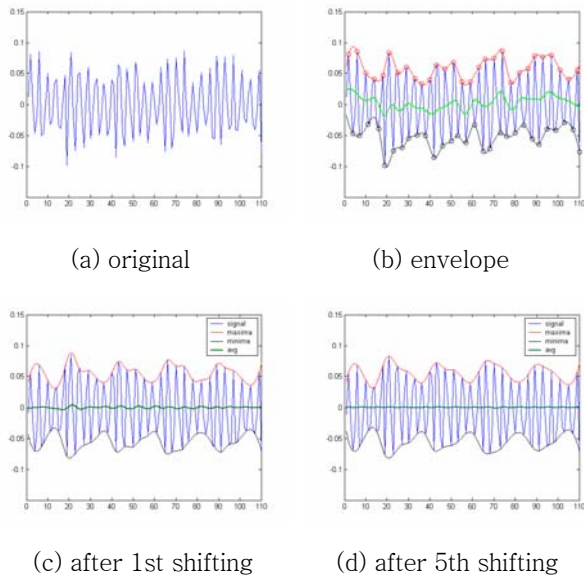


Fig. 9 Illustration of the sifting processes

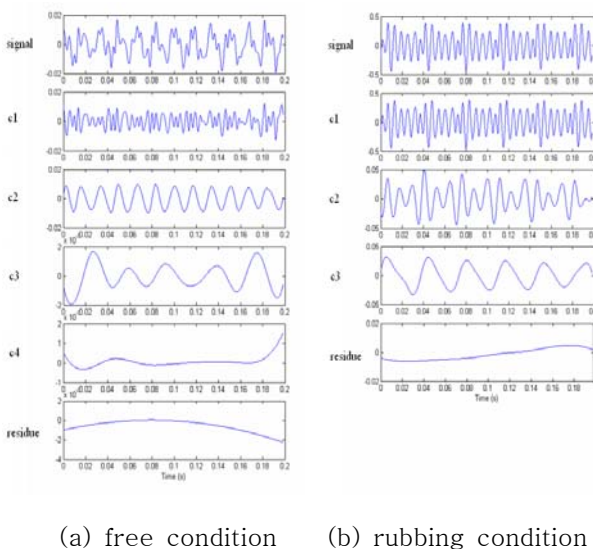


Fig. 10 IMFs of rotor system

4.4 HHT 적용 사례

HHT의 장점을 알아보기 위하여 식 (10)과 같은 2가지 신호에 대하여 가장 널리 쓰이고 있는 시간-주파수 분석방법인 CWT과 비교 분석하였다.

$$sig_1(t) = 2\sin(6\pi t) + \sin(72\pi t), 0 \leq t \leq 2(s) \quad (10)$$

$$sig_2(t) = \begin{cases} \sin(6\pi t), & 0 \leq t \leq 1(s) \\ 2\sin(24\pi(t-1)), & 1 \leq t \leq 2(s) \end{cases}$$

sig_1 은 3 Hz의 주파수 성분과 36 Hz의 주파수의 선형조합으로 이루어져 있고, 3 Hz의 성분은 좀 더 높은 크기 (magnitude)를 가지고 있다. sig_1 에 대하여 분석한 결과는 Fig. 11과 같다. Fig. 11(a)는 CWT를 사용한 분석 결과로써 상대적으로 크기가 컸던 3 Hz의 성분이 에너지가 크게 나왔으나, 상대적으로 고주파인 36 Hz에 비해서 스케일이 넓게 펼쳐져 있는 것을 확인할 수 있다. 이에 반해 Fig. 11(b)는 HHT를 이용한 분석결과로써 저주파, 고주파와 상관없이 일정한 해상도를 보이고 3 Hz성분의 에너지가 큰 것을 확인할 수 있다. sig_2 는 3 Hz주파수와 조화성분의 조합으로 이루어져 있다. sig_2 에 대하여 각각 CWT와 HHT를 사용하여 분석한 결과를 Fig. 12에 나타내었다. CWT는 시작주파수인 3 Hz인 상대적인 저주파영역이 넓게 퍼져 있고 주파수가 변하는 순간인 1초 부근의 경계선이 모호한 것을 Fig. 12(a)를 통하여 확인할 수 있다. 이에 반해 Fig. 12(b)를 보면 상대적인 저주파, 고주파와 상관없이 일정한 해상도를 보이며 1초에서 주파수가 명확히 바뀌는 것을 확인할 수 있다. 이처럼 HHT를 이용한 시간-주파수 방법은 기존의 다른 방법보다 높은 해상도를 제공함으로써 신호분석을 정확하게 할 수 있다.

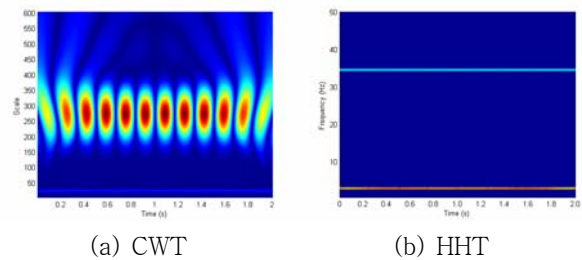


Fig. 11 Comparison sig 1

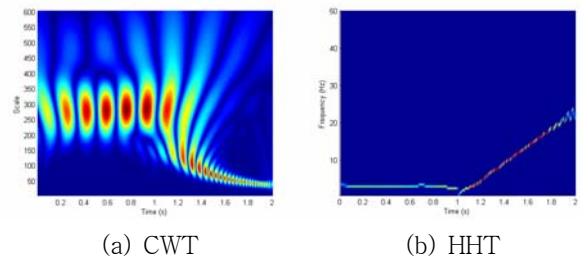


Fig. 12 Comparison sig 2

4.5 HHT에 의한 간극효과 진단

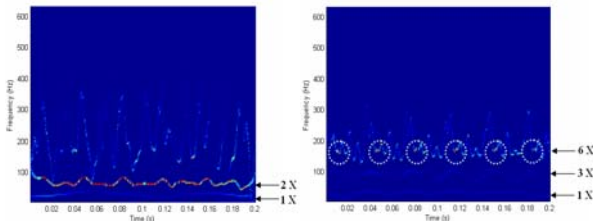
HHT를 부분마멸이 있는 로터시스템에 대하여 적용하였다. 자유 상태 시 회전주파수인 1X 성분과 로터의 비선형성에서 기인한 2X 성분을 Fig. 13(a)를 통하여 확인할 수 있다. 그중에서도 2X 성분이 가장 높은 에너지를 가지고 있음을 확인할 수 있는데, 이는 FFT를 이용한 주파수 분석 결과와 같다. 부분마멸이 발생했을 시는 회전주파수의 1X 성분과 3X 성분이 전 시간에 걸쳐 있는 것을 확인할 수 있다. 그리고 FFT를 이용한 주파수 분석 시 6X 성분이 가장 크게 있었는데, 이는 부분마멸에 의한 충격성분임을 Fig. 13(b)를 통하여 확인할 수 있다. Fig. 13은 세밀하게 나타나 있으므로 쉽게 확인하기 하기 위하여 가우시안필터(Gaussian filter)를 사용한 결과 Fig. 14와 같다. 1회전당 한번의 충격신호인 총 6번의 충격신호의 정확한 주파수와 충격시간을 Fig. 14(b)를 통하여 뚜렷하게 확인할 수 있다.

간극의 변화 0 ~ 5 mm 에 대하여 HHT분석 결과를 Fig. 15에 나타내었다. 간극이 2 mm부터 약 140 ~ 200 Hz의 주파수 성분이 크게 나타나기 시작함에 따라 헐거움에 기인한 특성이 간극 2 mm부터 시작된다고 예측할 수 있다. 이는 앞선 FFT를 이용한 분석을 바탕으로 예측한 결과와 같은 결과이다. 또한 간극이 증가함에 따라 140 ~ 200 Hz의 성분들이 점점 복잡하고 크게 나타나는 것을 Fig. 15를 통하여 확인할 수 있다. 이는 간극이 증가함에 따라 마찰력에 기인한 특성이 나타나기

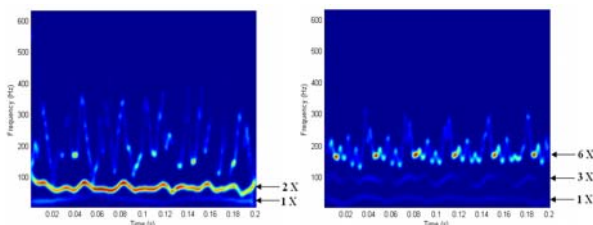
때문이다. 그러나 충격 신호가 뚜렷하게 있는 부분마멸과는 달리 헐거움이 발생 시 마찰에 기인하여 많은 주파수 성분을 갖는 경우 이에 대한 주파수 성분을 명확하게 구분하기는 한계가 있었다. 하지만 간극이 증가함에 따라 에너지의 크기 변화의 추이를 명확히 확인할 수 있었다. 그러므로 정확한 주파수 정보를 제공하는 푸리에 변환을 이용한 주파수 분석과 병행하여 사용하면 신호의 특성을 정확하게 파악할 수 있다.

4.6 토 의

HHT는 시간-주파수 분석방법으로 CWT보다 높은 해상도를 가짐을 확인할 수 있었다. EMD과정에서 스플라인 시 어떤 방법을 쓰느냐에 따라 정확도에 영향을 끼칠 수 있을 것이다. 본 연구에서는 큐빅스플라인 보간법(cubic spline fitting)을 사용하였다. EMD과정에서 최대값, 최소값을 스플라인 시 양 끝단에 값이 존재하지 않게 되면 발산하는 문제점이 발생하기 때문에 잘못된 주파수 정보가 발생할 수 있다. 이에 본 연구에서는 끝단의 값을 주변 값의 평균값으로 지정하여 스플라인을 시킴으로써 끝단의 발산문제를 해결하였지만, 가상의 값이므로 끝단에서 주파수정보가 약간 왜곡 될 수 있다. HHT방법은 미분에 의하여 주파수가 정의되기 때문에 충분한 데이터수가 필요하다. Huang은 경험적으로 하나의 주파수를 표현하기 위해서는 최소 5개 이상의 데이



(a) free condition (b) rubbing condition
Fig. 13 HHT of rotor system : partial rub



(a) free condition (b) rubbing condition
Fig. 14 HHT of rotor system : Gaussian filter

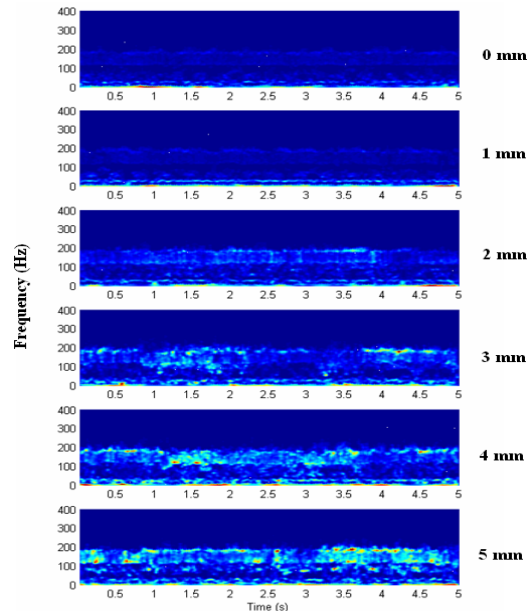


Fig. 15 HHT of rotor system : looseness

터의 수가 필요하다는 것을 확인하였다.[10] 본 연구에서는 주파수를 명확히 하기 위하여 기준 주파수를 샘플링수를 바꿔가면서 분석한 결과 관심영역 최대주파수의 약 13배의 샘플링수가 필요하다는 것을 확인할 수 있었다. 이에 관심영역 주파수 분석을 위해서는 측정된 신호의 재샘플링(re-sampling)이 필요하다. 이는 FFT를 이용한 분석 시 필요한 2배의 샘플링수보다 높은 샘플링수를 요구하는 것으로써 관심영역이 고주파인 신호에 대해서 분석하고자 하는 시간이 길어질 경우 데이터양이 많아지므로 계산 시간이 길어지는 단점이 있다.

5. 결론

본 연구에서는 부분마멸과 헐거움이 있는 로터시스템에 대하여 기존의 신호 분석 방법인 FFT, STFT, CWT을 사용하여 분석하고, 새로운 시간-주파수 분석방법인 HHT를 사용하여 회전체의 간극 효과를 살펴보았다.

그 결과 FFT를 이용한 주파수 분석은 정확한 주파수 성분을 알아낼 수 있다는 장점이 있지만, 시간정보가 없기 때문에 충격 신호 등과 같은 비선형-비정상 신호에 대해서는 적합하지 않았다. STFT는 FFT에 근거하여 정확한 주파수 성분을 확인할 수 있다. 그러나 일정한 크기의 창함수를 사용함으로써 비정상 상태의 신호에는 한계가 있고, 분석하는 시간이 매우 짧은 경우 간격을 설정하기가 어렵다. CWT를 이용한 분석방법은 비선형-비정상상태의 신호 분석에 적합한 결과를 얻을 수 있으나 해상도가 낮아 정확한 시간 정보와 주파수 정보를 확인하기 어렵고, 상대적으로 저주파 영역에서의 잔상이 생기는 문제점이 있다. HHT를 이용한 분석방법은 관심영역 최대주파수의 약 13배인 높은 샘플링을 요구하지만, 비선형성에 기인한 조화성분도 명확히 분석이 가능하고, 고주파수, 저주파수와 무관하게 높은 선명도를 가짐에 따라 신호의 정확한 시간정보 및 주파수정보를 확인할 수 있다. 이에 비선형-비정상 상태의 신호를 분석하여 회전기계의 상태 이상을 정확하게 판별할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- (1) H. F. Black, 1968, "Interaction of a Whirling Rotor with a Vibrating Stator Across a Clearance Annulus", J. Mech. Engr. Sci, 10, 1-12.
- (2) Y. S. Choi, 2000, "Experimental Investigation of Partial Rotor Rub", KSME International Journal, Vol. 14, No.11, pp. 1250-1256.
- (3) Z. K. Peng, 2003, "Detecting of the Rubbing-caused Impacts for Rotor-stator Fault diagnosis using reassigned Scalogram", Mechanical System and Signal Processing, Vol. 19, No. 2, pp. 391-409.
- (4) Z. Peng, Y. He, Q. Lu, F. Chu, 2003, "Feature Extraction of the Rub-impact Rotor System by Means of Wavelet Analysis", Journal of Sound and Vibration 59, pp. 1000-1010.
- (5) 최연선, 박상문, 2004, "상관차원을 이용한 회전기계의 간극 진단", 한국소음진동공학회 추계학술대회 논문집, pp. 134-139.
- (6) Z. K. Peng, F. L. Chu, 2004, "Application of the wavelet transform in machine condition monitoring and fault diagnostics : a review with bibliography", Mechanical Systems and Signal Processing 18, pp. 199-221.
- (7) 최연선, 2001, "회전기계에서의 회전마멸 현상", 한국소음진동공학회지, 제 11권 제 5호, pp. 609-618.
- (8) 황성욱, 이상권, 2003, "STFT, 고차위그너분포 및 웨이블렛 변환 기술을 이용한 엔진밸브 진동신호 규명", 한국자동차공학회 추계학술대회논문집, pp. 732 ~ 737.
- (9) Matlab version 6.5, The mathworks, 2002.
- (10) N. E. Huang, Z. Shen, S. R. Long, M. C. Wu, H. H. Shih, Q. Zheng, N. C. Yen, C. C. Tung, H. H. Liu, 1998, "The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis", Proceedings of the Royal Society of London, vol 454, pp. 903-995.