

비정상 AE 진동감시 신호의 에너지 분포특성과 시간-주파수 해석 Energy Distribution Characteristics of Nonstationary Acoustic Emission Burst Signal Using Time-frequency Analysis

정 태 건*

Tae-Gun Jeong

(2012년 2월 8일 접수 ; 2012년 3월 2일 심사완료)

Key Words : Nonstationary Signal(비정상 신호), Wigner-Ville Distribution(위그너-빌 분포), Wavelet Transform(웨이블렛 변환), Reassignment(재배치), Renyi Entropy(레니 엔트로피)

ABSTRACT

Conventional Fourier analysis can give only limited information about the dynamic characteristics of nonstationary signals. Instead, time-frequency analysis is widely used to investigate the nonstationary signal in detail. Several time-frequency analysis methods are compared for a typical acoustic emission burst generated during the impact between a ferrite ceramic and aluminum plate. This AE burst is inherently nonstationary and random containing many frequency contents, which leads to severe interference between cross terms in bilinear convolution type distributions. The smoothing and reassignment processes can improve the readability and resolution of the results. Spectrogram and scalogram of the AE burst are obtained and compared to get the characteristics information. Renyi entropies are computed for various bilinear time-frequency transforms to evaluate the randomness. These bilinear transforms are reassigned by using the improved algorithm in discrete computation.

1. 서 론

진동신호를 검출하는 여러 응용분야에서 비정상 신호(nonstationary signal)의 해석이 필요한 경우가 많다. 기본적인 충격실험은 물론이고 진동감시나 이상진단 시스템에서 검출되는 신호는 대부분 비정상 신호이다. 특히 플랜트 진동감시 시스템과 같은 대형 시스템의 경우에는 주로 버스트형 신호의 발생 빈도에 주목해 왔는데 점점 시스템이 복잡해지고 정교한 진동감시 및 피드백이 요구됨에 따라 비정상 신호의 발생여부뿐만 아니라 자세한 특성까지도 파악해야 할 필요성이 증가하고 있다^(1,2).

진동감시 시스템에서 검출되는 신호는 많은 원인 요소로부터 다양한 형태로 나타난다. 특별히 관심을 갖게 되는 신호를 골라 해석하는 방법으로 전통적인 푸리에 해석은 적용이 쉽고 그 결과가 직관적이어서 널리 사용되고 있다. 그러나 전체 측정구간에 대한 평균 특성만을 보여주기 때문에 비정상 신호에 대해서는 그다지 유용하지 않다.

비정상 신호를 해석하는 방법으로는 창함수(window function)를 이용한 시간-주파수 해석(time-frequency analysis)과 웨이블렛(wavelet)을 이용한 시간-주파수 해석이 그 상반적인 장단점과 함께 각기 활발히 연구되어 왔으나 실제 응용면에서는 웨이블렛의 이용이 더 많이 보고되고 있다^(3,4). 그러나 창함수에 기반한 시간-주파수 해석도 간단한 알고리즘의 개발 및 재배치법의 응용으로 그 분해능(resolution)을 높이고 계산효율도 개선시켜서 웨이블렛 방법 못지않

* 교신저자; 정회원, 건국대학교 기계공학부
E-mail : tgjeong@konkuk.ac.kr
Tel : (02)450-3471, Fax : (02)447-5886

게 많이 이용될 수 있다^{5,6)}.

이상진단, 진동감시 및 비파괴검사에 많이 사용되는 음향방출(acoustic emission, AE) 신호는 대개 버스트 형태로 나타나므로 초기에는 버스트 빈도에 의해 결함을 검출하는 형태로 활용되기 시작했다. 이 방법도 매우 유용하지만 더 자세한 신호특성을 알기 위해서는 각각의 버스트에 대한 세부특성 해석이 필요하게 된다. 각각의 버스트는 본질적으로 비정상 신호이고 게다가 랜덤특성도 가지고 있기 때문에 단순 푸리에 해석으로는 그 특성을 알 수 없고 통계적인 해석 및 시간-주파수 해석이 필요하다.

AE 현상은 탄성에너지의 방출을 나타내므로 AE 신호의 해석에도 에너지 특성을 나타내는 제곱형(bilinear) 시간-주파수 변환이 잘 적용될 수 있다. 제곱형 변환 중에서 일반적으로 많이 사용되는 것은 단시간 푸리에 변환(short-time Fourier transform)에 기초한 스펙트로그램(spectrogram)과 웨이블릿 변환에 기초한 스케일로그래프(scalogram)이다. 이것들은 간단히 계산될 수 있으나 분해능이 매우 낮다는 단점이 있다. 한편 분해능이 뛰어난 위그너-빌 분포(Wigner-ville distribution)와 같은 제곱형 변환을 사용할 수도 있으나 이 경우는 인접 주파수 성분들에 의한 간섭이 심하면 아무리 창함수를 조절해 평활화(smoothing)를 시키더라도 유용한 결과를 얻어 내기 힘들다.

이 연구에서는 시간-주파수 해석을 위주로 AE 비정상 진동신호를 해석하고 신호의 특성을 정량화하여 그 결과를 비교해봄으로써 시간-주파수 해석의 유용성을 보여주고자 한다. 특히 여기서 적용되는 AE 신호는 매우 많은 주파수 성분이 혼재되어 있으므로 위그너-빌 분포를 직접 사용하기 보다는 스펙트로그램과 스케일로그래프를 에너지 중심에 따라 재배치하여 분해능을 높이는 방법을 채택했다. 그리고 실제로 구한 시간-주파수 분포의 특성을 비교하기 위해 레니(Renyi) 엔트로피를 사용했다.

2. 비정상 AE 진동신호

AE 신호는 결함 및 이상 검출에 널리 사용된다. 이 신호는 일반적으로 재료의 변형 및 파손에 따른 탄성에너지의 급격하고 자발적인 방출에 따라 발생하는 파동으로 주로 수동적인 진동감시에 많이 사

용된다. 고응력 또는 고온으로 야기된 물질의 상 불안정이 평형상태로 되돌아갈 때 방출되는 원자구조의 급격하고 집약적인 운동으로 특징지어지는 모든 현상을 망라하여 AE로 지칭하는데, 예를 들자면, 결정 파괴, 크랙 생성 및 전파, 전위, 고체의 상변화, 비등, 전기방전 등이 관련된다.

특히 고체구조에서는 일정 수준을 넘어서는 응력에 의해 음향파의 패킷이 방출되는데 이 음향에너지의 이산 패킷을 AE 버스트(burst)라고 한다. AE 센서로 검출된 AE 버스트를 해석하면 음향파의 특성을 알 수 있다. 그러나 탄성파는 본질적으로 분산적(dispersive)이기 때문에 위상 속도와 주파수의 함수로 주어지게 된다. 따라서 AE 신호는 센서 위치를 비롯한 실험환경에 따라 그 모양이 많이 바뀌게 된다.

또 AE 신호에서 고려해야 할 점은 감쇠(attenuation)이다. 파동이 전파됨에 따라 단위체적당 에너지가 감소하기 때문에 재료의 기하학적인 효과도 실험결과에 포함된다. 이것은 흔히 소산(dissipation)이나 산란(scattering)으로 나타나는데 충분히 높은 주파수 영역에서는 이 감쇠효과가 매우 억제되므로 주로 고주파 영역에서 AE 신호를 해석한다.

AE 신호는 AE 현상에 반응하는 센서의 전기출력으로 정의되는데 AE와 마찬가지로 랜덤특성을 가지게 된다. 즉 시간과 버스트 특성의 상관관계는 통계적으로 해석되어야 한다. 상당히 유사한 버스트 신호 사이에서도 모든 특성이 동일한 신호는 결코 발생되지 않으므로 주로 평균 발생률, 버스트 진폭, 버스트 에너지, 주파수 성분을 통계적으로 처리한다.

AE 신호의 주파수 스펙트럼은 증폭시스템의 대역폭, 센서의 주파수 응답, 시편의 형상 및 음향특성, 음향소스의 특성 등에 의해 결정되는데 재료 및 실험 상태에 따라 다양하게 나타나고 또 각 버스트마다 여러 주파수 성분이 혼재하므로 AE 버스트에 대한 상세한 분석이 요구된다.

이 논문에서 사용한 AE 신호는 충격을 받는 고체구조에서 발생한 단일 버스트 패킷으로 AE 센서(AET MC500)로부터 검출된 신호를 프리앰프(AET 160B)와 메인앰프(AET 204B)로 증폭한 것이다. 이 앰프에는 자체적으로 125~2000 kHz의 대역필터가 내장되어 있으나 고주파 영역을 더 집중적으로

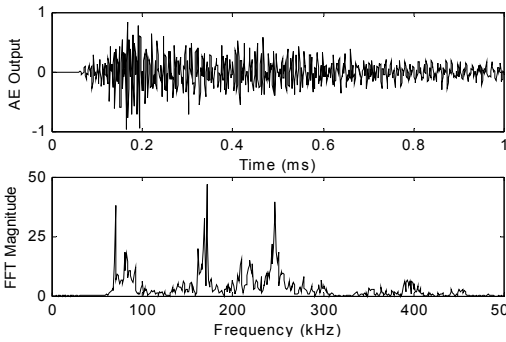


Fig. 1 Time history and frequency spectrum of a particular AE burst from an impact process

분석하기 위해 추가로 아날로그 고역필터(Krohn-Hite 3202)를 사용했다. 가능한 한 신호 전체의 특성을 보존하기 위하여 디지털 필터는 사용하지 않았다.

Fig. 1은 페라이트 공구가 알루미늄 표면을 미세하게 스칠 때 발생하는 AE 신호의 시간선도와 주파수 스펙트럼을 나타낸 것이다. AE 센서를 페라이트에 매우 가깝게 설치했으므로 신호의 비선형성과 센서 입력범위를 고려할 때 아주 작은 에너지의 AE 버스트가 필요하다. 실험방법은 회전하는 알루미늄 디스크와 페라이트를 공기베어링을 통해 떨어져 있게 하고 알루미늄의 작은 돌출부를 페라이트에 간헐적으로 충돌시켜 가능한 한 작은 크기의 AE 버스트를 발생시킨다.

재현성이 떨어지면서도 상당한 크기를 갖는 100 kHz 이하 성분을 억제하면서 150~300 kHz 부근의 신호를 살리기 위하여 여러 번의 시행착오를 거쳐 300 kHz 고역필터를 사용했지만 아직도 100 kHz 이하 성분들이 잔류하고 있음을 알 수 있다. 주 관심사인 160 kHz 및 250 kHz 근처의 뚜렷한 성분 외에도 220 kHz, 300 kHz, 400 kHz 부근의 작은 성분도 확인할 수 있다. 그러나 이 결과는 버스트 전체에 걸친 평균값으로 버스트 내에서 시간에 따라 이 주파수 성분들이 어떻게 변화해 가는지는 Fig. 1의 선형 푸리에 해석 결과만으로는 알 수 없다. 따라서 이 논문에서는 시간-주파수 해석을 적용하여 이 AE 버스트의 세부 특성을 연구한다.

3. AE 신호의 에너지 분포 해석

AE 신호는 본질적으로 탄성에너지 방출에 의해

결정되는 음향파이므로 단시간 푸리에 변환(short time Fourier transform, STFT)과 같은 선형변환보다는 제곱형 변환을 사용하는 해석이 더 유리하다. 흔히 사용되는 제곱형 변환으로는 스펙트로그램과 스케일로그래프가 있는데 두 경우 모두 에너지를 나타내지만 컨벌루션 계산에 수반되는 제곱과정에서 복합신호에 대한 교차항을 발생시키고 실제 계산결과는 선형해석과 같은 분해능을 가지므로 STFT와 큰 차이가 없다.

일반적으로 매우 우수한 분해능 특성을 갖는 대표적인 제곱형 시간-주파수 해석은 위그너-빌 분포(Wigner-Ville distribution, WVD)인데 여러 주파수가 혼재된 신호에 대해서는 역시 교차항 간섭이 심해 AE 신호에 바로 적용하기에는 부적절하다. 제곱형 변환에서 분해능을 유지하면서 교차항 간섭을 완화시키는 최선의 방법은 시간과 주파수 영역을 별도로 평활화시키는 평활화 가상 위그너-빌 분포(smoothed pseudo Wigner-Ville distribution, SPWV)이다. 그러나 이 방법도 교차항 간섭이 극심한 경우에는 큰 이점이 없다.

교차항 간섭과 분해능 문제를 한층 더 개선할 수 있는 방법으로 재배치법(reassignment)이 있다. 재배치법은 원래 스펙트로그램을 개선하기 위해 개발되었지만 다른 시간-주파수 변환에 대해서도 적용할 수 있다^(7,8). 재배치법은 단순히 시간-주파수 분포의 가독성(readability)을 개선해줄 뿐만 아니라 시간-주파수 정보의 추출이나 판단기준으로도 사용될 수 있다. 이 연구에서 수행된 재배치 계산은 다음과 같은 과정을 통해 수행되었다.

3.1 재배치 스펙트로그램의 정의

보통 STFT $F_x^h(t, \omega)$ 크기의 제곱으로 정의되는 스펙트로그램을 WVD $W_x(t, \omega)$ 의 2차원 컨벌루션으로 나타내면 다음과 같다.

$$S_x^h(t, \omega) = \frac{1}{2\pi} \iint W_x(s, \xi) W_h(s - t, \xi - \omega) ds d\xi \quad (1)$$

여기서 t , ω 는 각각 시간, 주파수 영역을 나타내고 $x(t)$ 는 신호, $h(t)$ 는 창함수를 나타낸다. 스펙트로그램값이 계산되는 각 점 (t, ω) 에 대해 이 값을 이동시킬 에너지 중심점 $(\hat{t}_x, \hat{\omega}_x)$ 을 계산하는 재배치

연산자는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \hat{t}_x(t, \omega) &= \frac{1}{S_x^h(t, \omega)} \iint s W_x(s, \xi) W_h(s-t, \xi-\omega) ds d\xi \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \hat{\omega}_x(t, \omega) &= \frac{1}{S_x^h(t, \omega)} \iint \xi W_x(s, \xi) W_h(s-t, \xi-\omega) ds d\xi \end{aligned} \quad (3)$$

이 좌표값으로 정의되는 재배치 스펙트로그램은 다음과 같다.

$$\hat{S}_x^h(t, \omega) = \frac{1}{2\pi} \iint S_x^h(s, \xi) \delta(t-\hat{t}_x, \omega-\hat{\omega}_x) ds d\xi \quad (4)$$

3.2 재배치 연산자 알고리즘의 개선

재배치 연산자 식 (2), (3)은 원래 STFT의 위상미분으로부터 계산하도록 정의되는데 이 방법은 위상 펼침 문제와 함께 단지 근사값만을 주게 된다. 이를 개선하기 위해 위상미분을 STFT의 편미분으로 대체해서 계산하고 $C_x^h(t, \omega) = |F_x^h(t, \omega)| e^{i(\phi-\omega t/2)}$ 로 정의하면 재배치 연산자는 다음과 같이 간단하게 된다. 여기서 ϕ 는 STFT의 위상을 나타낸다.

$$\hat{t}_x(t, \omega) = t + Re \left\{ \frac{C_x^{th}(t, \omega)}{C_x^h(t, \omega)} \right\} \quad (5)$$

$$\hat{\omega}_x(t, \omega) = \omega - Im \left\{ \frac{C_x^{dh}(t, \omega)}{C_x^h(t, \omega)} \right\} \quad (6)$$

여기서 $th = th(t)$ 이고 $dh = dh(t)/dt$ 이다. 즉 STFT를 두 번 더 계산함으로써 위상미분의 근사계산을 피하게 된다. 특히 창함수가 $h(t) = e^{-\lambda t^2}$ 인 경우에는 $dh(t)/dt = -2\lambda th(t)$, $C_x^{dh}(t, \omega) = -2\lambda C_x^{th}(t, \omega)$ 가 되어 단지 한 번의 STFT 계산만 필요하게 되므로 재배치 계산이 더 빠르게 되고 이것을 특별히 가보 스펙트로그램(Gabor spectrogram)이라 한다.

이 논문에서는 이산화된 신호를 사용하므로 샘플링 주기 T_s , FFT에서 얻는 주파수 개수 N 인 신호에 대한 이산 재배치 연산자는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \hat{n}_x[n, m] &= \frac{1}{T_s} \hat{t}_x \left(n T_s, \frac{2\pi m}{NT_s} \right) \\ &= n + Re \left\{ \frac{G_x^{T_s^{-1}th}[n, m]}{G_x^h[n, m]} \right\} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \hat{m}_x[n, m] &= \frac{NT_s}{2\pi} \hat{\omega}_x \left(n T_s, \frac{2\pi m}{NT_s} \right) \\ &= m - Im \left\{ \frac{G_x^{T_s dh}[n, m]}{G_x^h[n, m]} \right\} \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 $T_s^{-1}th[n] = nh(nT_s)$, $T_s dh[n] = T_s dh/dt(nT_s)$ 이다.

3.3 창함수의 미분

위의 재배치 연산에서 창함수 $h(t)$ 의 미분이 필요한데 이는 창함수가 미분가능한 함수인 경우에만 가능하다. 실제 응용에서는 자작 창함수를 쓸 수도 있으므로 엄밀한 미분형 대신에 차분식을 사용한 근사형을 사용할 수 있다. 유한 구간 $[-T/2, T/2]$ 에서 다음과 같이 $h(t)$ 를 모델링한다.

$$h(t) = \begin{cases} \alpha + \beta t + h_0(t) & \text{for } |t| \leq T/2 \\ 0 & \text{for } |t| \geq T/2 \end{cases} \quad (9)$$

여기서 $\alpha = (h(T/2) + h(-T/2))/2$ 는 선형추세(linear trend)의 편차, $\beta = (h(T/2) - h(-T/2))/T$ 는 기울기를 나타내고 $h_0(t)$ 는 창 양끝에서 그 값이 영인 연속함수이다. 이 조건에서 dh_0/dt 는 일차 차분식으로 정확하게 근사화되므로 dh/dt 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{dh(t)}{dt} &= \begin{cases} \alpha \delta(t+T/2) - \alpha \delta(t-T/2) \\ + \beta + dh_0/dt \end{cases} \text{ for } |t| \leq T/2 \\ &= 0 \text{ for } |t| \geq T/2 \end{cases} \quad (10)$$

3.4 스케일로그래의 재배치

웨이블렛의 제곱형 변환에 해당하는 스케일로그래도 WVD의 컨벌루션으로 표현될 수 있다.

$$T_x^\psi(t, a) = \frac{1}{2\pi} \iint W_x(s, \xi) W_\psi \left(\frac{s-t}{a}, a\xi \right) ds d\xi \quad (11)$$

여기서 ψ 는 모 웨이블릿(mother wavelet)이고 a 는 팽창(dilation) 스케일 요소이다. 이 스케일로그래프에 대한 재배치 연산자는 다음 식으로 표현된다.

$$\hat{t}_x(t, \omega) = t - \frac{1}{T_x^{\psi}(t, a)} \iint s W_x(s, \xi) W_{\psi}\left(\frac{s-t}{a}, a\xi\right) ds d\xi \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \hat{\omega}_x(t, \omega) &= \frac{\omega_0}{\hat{a}_x(t, \omega)} \\ &= \frac{1}{T_x^{\psi}(t, a)} \iint \xi W_x(s, \xi) W_{\psi}\left(\frac{s-t}{a}, a\xi\right) ds d\xi \end{aligned} \quad (13)$$

앞에서와 마찬가지로 재배치된 스케일로그래프는 더 이상 제공형은 아니나 스케일 요소와 시간 이동에 공변하는 에너지 분포를 전 영역에서 나타내므로 충격형 신호해석에 유용하다.

4. AE 진동신호 특성의 시간-주파수 해석

실제 계측된 AE 버스트 신호(Fig. 1)에 대해서 가장 기본적인 가보 스펙트로그램을 먼저 구했다. 그 이유는 계산이 가장 간단하고 간섭항의 영향을 비교적 적게 받기 때문이다. 이 신호를 기준으로 다른 시간-주파수 해석의 유용성을 검토할 수 있다. Fig. 2는 AE 버스트의 가보 스펙트로그램을 시간-주파수 평면에 나타낸 것인데 Fig. 1의 주파수 스펙트럼에서 예측된 것처럼 여러 주파수 성분들이 혼재되어 있음을 알 수 있다. 특히 100 kHz 이하에서 1 ms 내내 지속되고 있는 성분은 알루미늄 플레이트에서의 마찰에 기인한 것이다. 페라이트 시편으로

부터 방출되는 성분인 160 kHz 이상 성분들은 매우 복잡하게 섞여있음을 알 수 있다.

160 kHz에서 250 kHz에 이르는 구간에서는 신호들의 지속시간 차이를 관찰할 수 있다. 또 350, 380 kHz 근처에서 간헐적으로 나타나는 성분도 있고 450 kHz 성분도 미세하게 나타난다. 그러나 이 성분들의 자세한 주파수 정보 및 시간에 따른 추이를 보기에는 분해능이 많이 부족함을 알 수 있다.

스펙트로그램의 분해능을 높이는 방법으로 앞에서 설명한 재배치법이 매우 유용하다. Fig. 2의 가보 스펙트로그램을 에너지 중심에 따라 재배치한 결과를 Fig. 3에 보인다. 재배치 전과 비교해 볼 때, 분해능이 많이 개선되어 각각의 성분들의 변화과정을 쉽게 알아볼 수 있다. 특히 주파수 분해능이 뛰어나 여러 주파수 성분들의 세부 특성을 잘 나타내고 있다. 70, 165 kHz 성분은 1 ms 구간 내내 지속되고 있고, 210 kHz 성분은 0.55 ms까지 240 kHz 성분은 0.72 ms까지 지속된다. 340 kHz 성분은 0.15~0.25 ms에서 한번 발생되었다가 0.85~0.95 ms에서 다시 나타난다. 380 kHz 성분은 0.17~0.3 ms에서 보이고 그 이후로 0.58, 0.72, 0.87 ms에서 다시 나타난다. 끝으로 440 kHz 성분이 0.14~0.17 ms에서 아주 약하게 나타난다.

여기서 70 kHz 성분을 제외한 나머지 성분들은 실험에 사용된 페라이트 시편의 탄성에너지 방출과 관계된 것들이다. 이 성분들의 상대적인 크기와 빈도는 실험조건 및 센서 장착 방법에 따라 결정되는데 재배치 가보 스펙트로그램을 사용하면 고분해능의 시간-주파수 선도로부터 정확한 정보를 얻어낼 수 있게 된다.

재배치 계산에 소요되는 시간을 비교해보면, 이

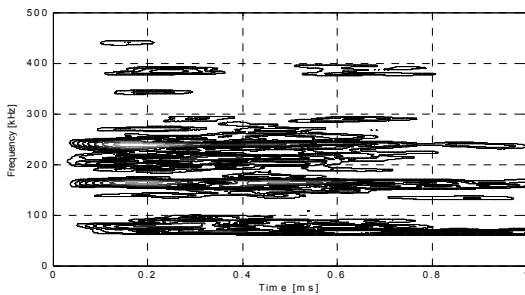


Fig. 2 Gabor spectrogram

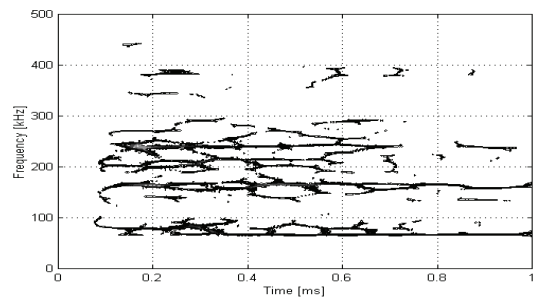


Fig. 3 Reassigned Gabor spectrogram

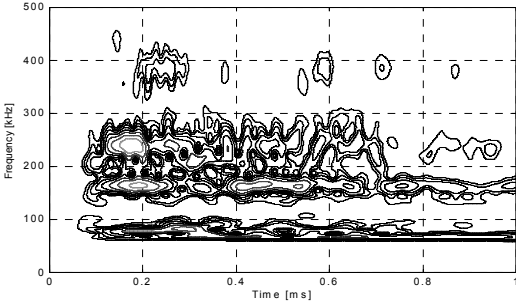


Fig. 4 Scalogram

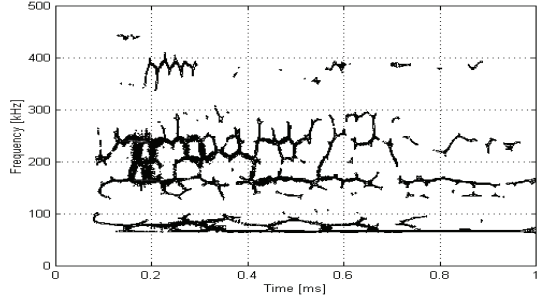


Fig. 5 Reassigned scalogram

Table 1 Renyi entropy for various bilinear time-frequency distributions

Time-frequency distribution	Renyi entropy	
	Before filtering	After filtering
Spectrogram	3.53	4.97
Scalogram	3.84	4.17
Wigner-Ville(WVD)	1.48	3.16
Pseudo WVD	2.82	3.70
Smoothed pseudo WVD	2.94	4.34

연구에 사용된 컴퓨터(Dell Inspiron 1720)의 CPU 계산시간이 스펙트로그램 계산에서는 1.326초 소요된 반면 재배치 가보 스펙트로그램 계산에서는 9.922초가 소요됐다. 더 좋은 분해능을 얻기 위해 약 7.5배의 계산시간이 더 소요되었다.

일반적으로 진동해석에 더 많이 사용되는 웨이블릿 해석에 기반한 스케일로그래를 계산한 결과를 Fig. 4에 나타냈다. 이 결과는 몰레(Morlet) 웨이블릿을 사용한 것으로 스펙트로그램과 비교했을 때 시간 분해능은 더 높지만 주파수 분해능이 낮음을 알 수 있다. 스펙트로그램에서는 나타나지 않았던 성분들이 보이므로 스펙트로그램과 상호보완적으로 사용하면 유용한 결과를 얻을 수 있다.

스케일로그래도 재배치를 할 수 있는데(Fig. 5) 스펙트로그램의 재배치와 마찬가지로 여기서도 분해능이 상당히 많이 개선되었음을 알 수 있다. 특히 시간 분해능이 뛰어나 신호의 시간에 따른 변화를 더 잘 볼 수 있다. 스케일로그래의 계산시간은 10.889초가 소요되었고 재배치 계산에 16.614초가 더 소요되었다. 가보 스펙트로그램 계산에 비해 계산시간이 훨씬 더 길다는 것을 알 수 있다.

비정상 신호의 특성을 나타내는 지표로 전체신호를 구성하는 기본신호의 수를 사용하는데 이것은 신호의 정보량 및 랜덤도와 관계있는 레니 엔트로피(Renyi entropy)로 나타낸다. 레니 엔트로피는 평균 정보량을 나타내는 샤논 엔트로피를 일반화한 것으로 다음과 같이 정의되며

$$R_x^\alpha = \frac{1}{1-\alpha} \log_2 \left\{ \int f^\alpha(x) dx \right\} \quad (14)$$

제공형 시간-주파수 분포에는 3차 레니 엔트로피

$$R_C^3 = -\frac{1}{2} \log_2 \left\{ \frac{1}{2\pi} \iint C_x^3(t, \omega) dt d\omega \right\} \quad (15)$$

를 적용한다. 이 정의에 따라 여러 제공형 시간-주파수 분포에 대해 계산한 레니 엔트로피값을 Table 1에 정리했다.

먼저 신호의 기본특성과 레니 엔트로피 사이의 관계를 알아보기 위해 AE 원신호와 고역필터를 통과한 신호의 레니 엔트로피값을 식 (15)를 이용해 계산했다. 필터링 전에는 100 kHz 이하 성분의 크기가 압도적으로 크기 때문에 신호의 복잡도는 그다지 크지 않다. 한편 필터링 후에는 140~300 kHz 구간의 많은 성분들이 비슷한 수준으로 존재하기 때문에 신호의 복잡도 및 정보량이 증가하게 된다. Table 1을 보면 필터링 후의 레니 엔트로피값이 0.33~1.68 만큼 증가한 것을 알 수 있다. 웨이블릿을 사용한 스케일로그래의 경우가 필터링에 따른 레니 엔트로피 증가가 가장 작았고, 교차항 간섭이 극심하게 나타나는 WVD의 경우에 레니 엔트로피 증가가 가장 크다. 이는 WVD의 특성상 여러 주파수 성분이 가깝고 비슷하게 혼재하는 경우 좋은 결

과를 얻기 어렵다는 것을 의미한다.

이 연구에서는 필터링 후의 신호를 사용하여 시간-주파수 해석을 실시했는데 먼저 WVD를 보면 교차항 간섭을 완화하기 위해 평활화하는 정도에 따라 점차적으로 레니 엔트로피값이 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 분해능이 개선됨에 따라 신호의 정보량이 증가하기 때문이다. 또 스펙트로그램이 스케일로그램보다 0.8 만큼 더 크다. 이는 웨이블릿에 기반한 스케일로그램보다 단시간 푸리에 변환에 의거한 스펙트로그램이 이 특정 AE 신호에 대하여 더 좋은 결과를 나타내준다는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

공구재료인 페라이트와 알루미늄 시편 사이의 미세한 충돌에 의해 발생하는 AE 버스트 신호를 검출하여 시간-주파수 해석을 실시했다. 특히 널리 사용되고 있는 웨이블릿 기반 해석에 대하여 단시간 푸리에 변환 기반 해석의 유용성을 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 일반적으로 많이 사용되는 WVD는 서로 인접한 주파수 성분들이 비슷한 크기로 존재하는 경우의 에너지 분포 해석에 그다지 유용하지 않았으며 스펙트로그램 해석이 더 좋은 결과를 내주었다.

(2) 교차항 간섭과 분해능 향상이라는 서로 상충적인 요구조건을 만족시키기 위한 방법으로 평활화와 재배치를 비교했는데 재배치 결과가 더 우수함을 알 수 있었고 재배치 계산 알고리즘을 개선함에 따라 계산시간이 단축되었다.

(3) 시간-주파수 분포의 정보량을 평가하기 위해 레니 엔트로피를 사용한 결과, 이 연구에 사용된 AE 버스트 신호의 에너지 분포 해석에는 단시간 푸리에 변환에 기초한 스펙트로그램이 웨이블릿에 기초한 스케일로그램보다 더 적절함을 알 수 있었다.

(4) 웨이블릿에 기반한 해석은 시간 분해능이 더 우수했고, 단시간 푸리에 변환에 기반한 해석은 주파수 분해능이 더 우수한 결과를 보여주었다.

후 기

이 논문은 2009년도 건국대학교 학술진흥연구비

지원에 의한 논문임.

참 고 문 헌

(1) Feng, Y. and Schindwein, F. S., 2009, Normalized Wavelet Packets Quantifiers for Condition Monitoring, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 23, pp. 712~723.

(2) Ebersbach, S. and Peng, Z., 2008, Expert System Development for Vibration Analysis in Machine Condition Monitoring, Expert Systems with Applications, Vol. 34, pp. 291~299.

(3) Peng, Z. K. and Chu, F. L., 2004, Application of the Wavelet Transform in Machine Condition Monitoring and Fault Diagnostics: A Review with Bibliography, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 18, pp. 199~221.

(4) Zhang, J., Li, R. X., Han, P., Wang, D. F. and Yin, X. C., 2003, Wavelet Packet Feature Extraction for Vibration Monitoring and Fault Diagnosis of Turbo-generator, Proceedings of the Second International Conference on Machine Learning and Cybernetics, pp. 76~80.

(5) Jeong, T. G., 2006, Study on the Non-stationary Behavior of Slider Air Bearing Using Reassigned Time-frequency Analysis, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 16, No. 3, pp. 255~262.

(6) Jeong, T. G., 2007, Study on the Non-linearity of the Nonstationary Impulse Signal Using Re-assigned Time-frequency Analysis, Lecture Notes in Computer Science, Vol. 4706, Part II, pp. 873~882.

(7) Kodera, K., De Villedary, C. and Gendrin, R., 1976, A New Method for the Numerical Analysis of Nonstationary Signals, Physics of the Earth and Planetary Interiors, Vol. 12, pp. 142~150.

(8) Papandreou-Suppappola, A., 2003, Applications in Time-frequency Signal Processing, CRC Press, Florida.