



	<h1>음향 및 소음 진동 신호처리 기술의 이론 및 응용에 대해서</h1>
<p>음향 진동 신호처리 기술과 응용 (non-stationary 신호처리)</p>	<p>이 상 권* (인하대학교 기계공학과)</p>

1. 머리말

음향 및 소음진동의 신호는 매우 다양하며 복잡하다. 이러한 신호로부터 유익한 정보를 추출하는 것이 신호 처리 기술의 사용 목적이다. 따라서 사용목적에 따라서 신호처리 기술도 다양하다. 이 글에서는 다양한 신호처리 기술 중에 각종 분야에서 응용되고 있는 시간-주파수 변환(time-frequency analysis) 및 시간-스케일링 변환(time-scaling analysis)에 대해서 2003년에 이어 기본 이론을 다시 한번 기술하고 응용편을 추가하여 기술하고자 한다. 일반적으로 가장 기본적인 음향 및 소음진동 신호는 시간에 대한 진폭의 변화를 나타내는 시간 영역의 신호이다. 이러한 시간영역의 신호는 복잡해지면 원하는 정보를 추출하기가 어렵다. 따라서 가장 기본적으로 얻을 수 있는 것이 주파수 영역에서의 신호에 대한 분석이다. 신호에 대한 주파수 분석 기법으로 가장 많이 사용되는 기술은 푸리에 변환이다. 그러나 푸리에 변환은 정상적인 신호(stationary signal)에 대한 주파수 분석에 주로 사용하며, 비정상적인 신호(non-stationary signal)에 대한 주파수 분석 기법에는 오차를 수반한다. 특히 기계의 결함에 의해서 발생하는 신호는 비정상신호로서, 단순히 주파수 성분만 표시하는 푸리에 변환으로서는 결함의 발생시기 및 그때의 주파수 성분 분석을 통한 독특성을 이해하기가 어렵다. 이 경우에는 결함이 발생하는 순간에 주파수 분석을 할 수 있는 방법이 필요하다. 1946년에 Gabor는 시간-주파수 표현 방법을 처음으로 도입하였다. 유사한 시기에 스펙트로그램

(spectrogram)이 Koenig에 의해서 미국음향학회에 소개되었다. 그러나 이 방법은 무한대의 신호를 사용하지 않고 짧은 창문(window) 안의 신호를 사용하기 때문에 불확실성의 원리(uncertainty)의 지배를 받는다. 따라서 시간 분해능(time resolution) 과 주파수 분해능(frequency resolution)을 동시에 만족을 할 수가 없다. 이러한 제한된 어려움을 해결하기 위해서 빌(Ville)에 의해서 1948년도에 새로운 시간-주파수 분석 기법이 미국전자공학회 신호처리 분과회에 소개되었다. 빌이 소개한 방법은 1932년도에 위그너(Wigner: 물리학자)가 발견한 방법에 기초를 두고 있으므로, 이후에 이 방법을 위그너-빌 분포(Wigner-Ville distribution)이라 불린다. 위그너-빌 방법의 결점은 이중선형 변환(bilinear transform)의 원리를 이용함으로 간섭항(cross-term)이 존재하며, 이것이 위그너-빌의 큰 결점이다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 많은 연구가 계속되어서 간섭항을 제거하는 커널함수(kernel function)을 이용하게 되는데, 이러한 커널함수가 제작될 때마다 새로운 논문이 탄생하게 되었다. 이후 간섭항의 형태에 따라서 다양한 커널함수가 존재하는데 이것을 코엔(Cohen)이 총 정리하여 일반화된 시간-주파수 기법을 제시하게 된다. 이러한 커널함수를 사용하면 간섭항은 제거되지만 필수적으로 시간-주파수 분해능이 떨어진다. 그러나 커널함수에 따라서 시간-주파수 분해능을 조정 할 수가 있다. 따라서 스펙트로그램 보다는 매우 좋은 시간-주파수 분해능을 가진다. 그러나 시간-주파수 분해능을 증가시키기 위해서는 계산량이 너무 많아 계산시간이 증가한다. 간섭항의 문제를 제거

특집 : 음향·진동·소음·신호처리 기술과 응용 (non-stationary 신호처리)

* E-mail : sangkwon@inha.ac.kr / Tel : (032) 860-7305

하면서 시간-주파수 분해능을 주파수의 범위에 따라서 향상시키는 방법으로 최근에 각광을 받는 것이 웨이블릿(wavelet transform) 기술이다. 웨이블릿은 1952년부터 수학자들에 의해서 오랜 기간 동안 연구되어 왔다. 이후 Morlet이 1982년도에 지질 탐사분야를 위해서 웨이블릿을 연구하면서 Grossman과 함께 1984년 상세한 연구결과를 출판했다. 이후에 이미지 해석, 음성신호처리, 데이터 압축, 음향악기 등 다양한 분야에 적용하게 되었다. 이것은 주로 비직교(non-orthogonal), 연속 웨이블릿(continuous wavelet)을 이용하였으며, 모 웨이블릿(mother wavelet)에 관한 연구이다. 이 방법은 1993년에 Wang와 Macfadden 등에 의해서 기어의 결함 진단에 대한 논문이 출판되면서 현재까지 기계의 결함진단에 많이 응용되고 있다. 이러한 연속 웨이블릿의 경우 주파수 분석을 연속적으로 가능하여 시간이 많이 소요된다. 통신신호의 경우 신호의 재생이 중요할때, 이 경우에는 신호에 대한 자세한 주파수 분석이 필요 없고 단지 재생만 가능하면 되므로 자세한 주파수 분석이 필요치 않는 이산 웨이블릿(discrete wavelet)이 1988년도에 Daubechies에 의해서 직교 모 웨이블릿(orthogonal mother wavelet)이 소개되면서 연구에 대한 활기를 띠게 되었다. 기계분야는 이러한 직교 웨이블릿 분야의 하나인 하모닉 웨이블릿(harmonic wavelet)을 1994년도에 Newland가 발견하여 ASME에 소개함으로써 기계의 결함 진단에 응용하기 시작했다. 그러나 이산 웨이블릿의 경우는 결함이 발생 시 나타나는 고주파 에너지를 1/3 옥타브밴드로 주파수 분석을 시행함으로써 주파수 분해능은 상당히 나쁘다. 그러나 시간 축에서 결함이 발생하는 충격의 존재 유무를 찾는 데는 유용하게 사용된다. 따라서 이산 웨이블릿과 연속 웨이블릿은 이용 시 상당한 주의가 요구된다. 또한 모 함수의 선택에 따라서 신호에 대한 필터링 모양이 달라지므로 필터링 하고자 하는 웨이블릿 필터의 모양도 고려하여 적용해야 한다. 이러한 부분에 대한 깊은 관계를 잘 알고 있다면 적용의 범위는 무궁무진하며, 현재에도 적용에 대한 많은 논문이 출판되고 있다. 그러나 기본적으로 시간-주파수 분해능은 위그너 분포 보다는 좋지 않으므로 시간-주파수 분해능이 요구하는 분야는 커널(kernel)을 이용한 위그너 분포를 사용하는 것이 좋다. 이 글에서는 평판에서 탄성과 추적을 위해서 각종 시간-주파수 기법을 비교

분석하여 새로 개발된 고차 위그너 분포를 이러한 탄성과 추적에 적용하여 예제로 보여 주며 기타 응용분야는 다른 기고자의 몫으로 남겨 놓았다.

2. STFT 변환

Gabo⁽¹⁾의 방법을 수식적으로 표현하면 다음과 같다.

$$S_t(f) = \int_{t-\Delta t/2}^{t+\Delta t/2} s(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (1)$$

이 식에서 Δt 는 푸리에 변환을 유도하는 짧은 구간이며 일반적으로 푸리에 변환을 위해서 사용되는 창문(window)의 크기이다. Garbo의 방법은 Koenig⁽²⁾가 발견한 STFT(short time fourier transform)의 기초가 되었으며, Koenig이 소개한 STFT의 수학적 표현은 다음과 같다⁽³⁾.

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

여기서 함수 $h(t)$ 는 창문함수이다. 이 창문함수의 사이즈에 따라서 주파수 영역의 분해능(resolution)과 시간 영역의 분해능이 변화된다. 시간-주파수 분해능은 불확실성 원리(uncertainty principal)에 의해 동시에 같이 증가시킬 수는 없다. 이것이 STFT의 결점이다.

3. 웨이블릿 변환(Wavelet Transform)

웨이블릿 변환은 일반적인 충격과 신호가 가지고 있는 특성을 잘 표현하기 위해 사용되는 방법으로 창문의 사이즈를 조정하여 고주파에서는 시간 분해능을 증가시키고, 저주파에서는 주파수 분해능을 증가시킨다. 그러나 불확실성의 원리는 여전히 존재한다. 따라서 고주파에서는 주파수 분해능이 나빠지고, 저주파에서는 시간 분해능이 감소한다. 웨이블릿 변환에 대한 수학적 표현은 다음의 식과 같다.

$$\begin{aligned} CWT(a, b) &= \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \\ &= \int s(t) e^{-\left(\frac{t-b}{a}\right)^2 / \sigma^2} e^{-j2\pi \frac{f_0}{a}(t-b)} dt \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 함수 $\psi(t)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\psi(t) = Ae^{-\left(\frac{t-b}{a}\right)^2} e^{j2\pi\frac{f_0}{a}(t-b)} \quad (4)$$

함수 $\psi(t)$ 의 envelop는 STFT에서의 $h(t)$ 에 해당하며 $\psi(t)$ 의 파형은 지수함수와 사인함수를 곱한 것으로 나타나 웨이블릿을 형성한다. 일반적으로 $\psi(t)$ 를 모 웨이블릿(mother wavelet)라 한다. 이 모 웨이블릿은 스케일링요소(scaling factor) a 와 이동요소(shift factor) b 에 의해서 조정된다. 이때 a 는 주파수와 역으로 관계가 있으며 b 는 시간축의 이동에 관계한다.

그림 1은 연속 웨이블릿의 그림 표현으로 여러 단계의 a 값에 대한 창문 크기를 표현한 것으로, 각 모 웨이블릿이 위치하는 주파수에서 파형이 변화함을 보여준다.

이산 웨이블릿의 경우 1/3 옥타브필터의 연속 표현으로 창문 겹침 전혀 없음으로 음향 진동신호를 분석하여 시간-주파수 영역에서 보면 매우 이상한 형태로 나타날 수 있다. 이 부분을 보상하기 위해서 웨이블릿 팩(wavelet pack)이라는 이산 웨이블릿 보다 창문을 더 짧

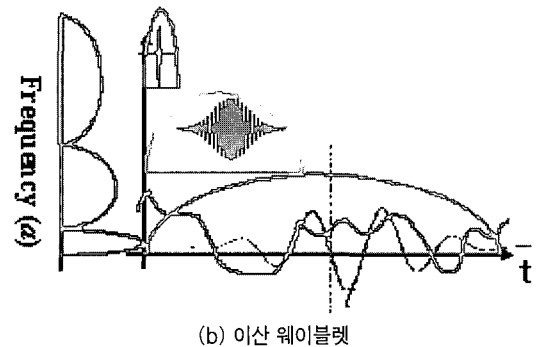
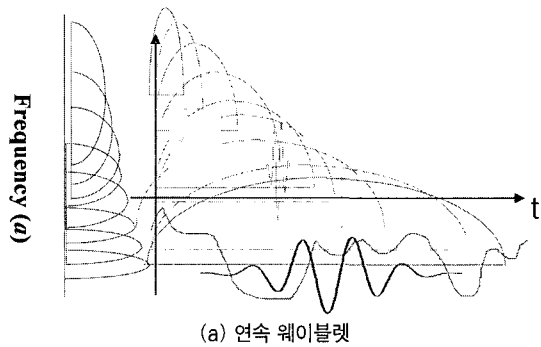


그림 1 웨이블릿 변환의 그림설명

게 쪼개어 1/12 옥타브 혹은 1/n 옥타브로 표현 하지만 여전히 이산 웨이블릿을 기본하여 창문 겹침 현상이 나타나지 않음으로 음향 진동 신호의 분석용으로 이용하기에는 적당하지 않다.

4. 위그너 분포(Wigner Distribution)

앞에서 논의된 푸리에 변환은 무한대 시간의 창문을 이용하며, STFT 그리고 웨이블릿 변환은 주어진 짧은 구간의 창문을 이용하였다. 백색 잡음 속에 충격파 신호가 묻혀 있다면 푸리에 변환을 통하여 이 충격파 신호에 포함된 주파수 성분을 명확히 찾아내기는 어렵다. 이 경우에 주로 사용되는 방법으로 자기상관함수(auto correlation)의 푸리에 변환이다. 신호 $s(t)$ 의 자기상관함수의 푸리에 변환을 주파수 스펙트라(frequency spectra)라 불린다. 유사하게 비정상상태의 충격파 신호가 백색 잡음 속에 숨겨져 있다면, 이 신호 $s(t)$ 에 대한 순간자기상관함수(instantaneous auto correlation)의 푸리에 변환을 이용한다면, 비정상상태의 충격파 신호도 보다 명확히 찾을 수 있다. 이것을 수학적으로 표현하면 다음식과 같다.

$$\begin{aligned} W(t, f) &= \int s(t - \tau/2) s^*(t + \tau/2) e^{-2\pi j f \tau} d\tau \\ &= \int S(f - \nu/2) S^*(f + \nu/2) e^{-2\pi j \nu t} d\nu \end{aligned} \quad (5)$$

이 관계식을 위그너 분포(Wigner distribution)라 불린다. 이 방법을 전자신호처리학회에 빌(Vill)이 소개함으로써 위그너-빌 분포의 함수가 널리 사용하게 되었다⁽⁴⁾. 여기에 사용되는 창문은 일반 푸리에 변환과 같이 무한대 시간이다. 그러나 실제로 컴퓨터를 이용하여 위그너 분포를 구하려면 무한대의 창문을 사용할 수 없으므로 STFT처럼 짧은 구간의 창문을 이용한다. 이러한 창문 $h(t)$ 을 이용한 위그너 분포를 가상 위그너 분포(pseudo Wigner distribution)이라 불린다. 따라서 가상 위그너 분포는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} W_{pw}(t, f) &= \int_{-T_w}^{T_w} s(t + \frac{\tau}{2}) s^*(t - \frac{\tau}{2}) \\ &\quad e^{-j2\pi f \tau} d\tau \end{aligned} \quad (6)$$



여기서 T_w 가 창문의 사이즈이다. 이 경우에 시간 분해능은 창문의 이동이, STFT 혹은 웨이블렛 변환처럼 창문 사이즈 혹은 시간이동 요소 b 만큼 이동하지 않고, 연속적으로 모든 데이터에 대해서 이루어지므로 시간 분해능이 완벽하다. 그러나 주파수 분해능은 창문의 사이즈에 따라서 영향을 받는다. 그러나 창문의 사이즈는 충분히 신호에 따라서 조정이 가능하므로 주파수 분해능도 충분히 증가시킬 수 있다. 따라서 이 방법의 경우 창문의 크기만 증가하면 시간-주파수 분해능이 동시에 증가함으로 비정상상태의 신호를 보다 정확히 표현할 수 있다. 그러나 이 방법의 문제는 신호 $s(t)$ 에 대한 변환이 아니고 $s(t)$ 의 곱으로 나타나는 자기상관함수의 변환을 이용함으로, 만약 신호 $s(t)$ 가 두 개의 신호(예제: 두 개 이상의 사인 신호 혹은 두 개 이상의 충격파) 향으로 이루어져 있다면 간섭항(cross)이 나타난다. 이러한 간섭항은 원래 신호에 대한 혼선을 불러일으킨다. 이러한 혼선을 방지하기 위해서 간섭항을 제거하기 위한 커널이 필요하다⁶⁾. 커널은 신호의 형태에 따라서 다양한 형상을 가진다. 따라서 커널을 이용한 위그너 분포를 Cohen이 처음 발견하였으므로 일반적으로 Cohen 분류의 이중선형변환 (bilinear time frequency transform) 이라 불린다⁶⁾. 이것의 수학적 표현은 다음과 같다.

$$C(t, f) = \iint W(t', f') \Phi(f' - f, t' - t) dt' df' \quad (7)$$

여기서 $\Phi(\xi, \tau)$ 를 커널함수라 불린다. 결론적으로 위그너 분포를 이용한 비정상상태의 신호를 성공적으로 완성하려면 이 커널함수의 바른 선택과 새로운 커널함수의 설계에 달려있다.

커널함수의 설계는 모호성(ambiguity) 영역에서 완성된다. 모호성 영역은 위그너 분포의 이중 역푸리에 변환을 통하여 이루어진다. 이것을 도식적으로 표현하면 그림 2와 같다. 그림 2에서 위그너 분포의 영역을 $W(t, f)$ 라 표현하면, 모호성 영역은 $A(\xi, \tau)$ 로 표현된다. 그리고 $R(t, \tau)$ 는 자기상관함수이다. 커널 설계방법으로서 먼저 신호에 대한 위그너 분포를 구하면 많은 간섭항이 나타난다. 이러한 간섭항을 제거하기 위해서는 위그너 분포를 이중 역푸리에 변환을 시도하여 신호에 대한 모호성함수를 구한다. 모호성함수의 특징은

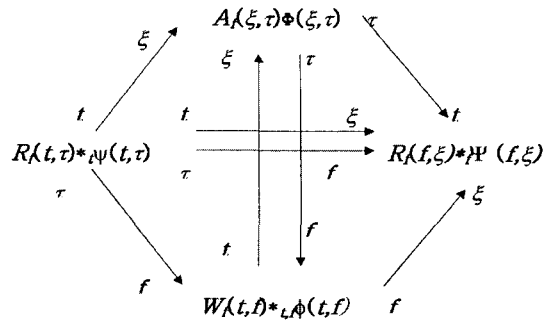


그림 2 모호성함수와 위그너 분포

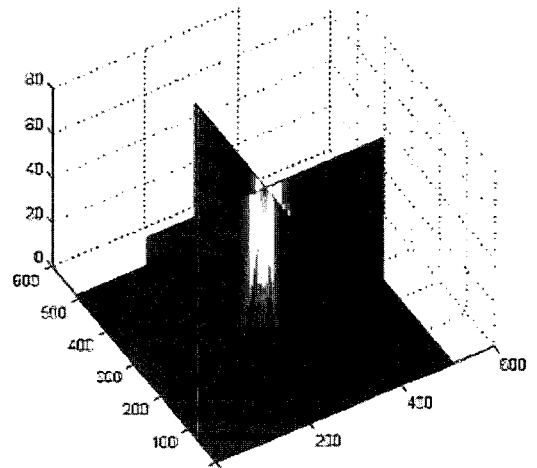


그림 3 간섭항을 제거하기 위한 지수커널함수

간섭항은 원점을 기준으로 떨어져 있으며 원래 신호항들은 원점의 주변에 모여서 큰 값들을 이룬다. 이러한 이유는 위그너 분포상에서 간섭항들은 원래 정현파 성분을 가진 파형이지만 신호항들은 DC값을 가진 성분들이다. 따라서 모호성함수는 이들의 푸리에 변환이므로 원점에 DC성분들이 모이고 원점에서 벗어나면 간섭항이 된다. 여기에 신호항만을 강조하기 위해서 커널함수를 곱하면 간섭항은 축소되고 신호항만은 증가한다. 신호항을 강조하기 위한 커널은 매우 다양한데, 그림 3은 지수커널로서 원점에서 1을 가지고 지수함수로 2차원적으로 감소하는 함수가 된다. 이 커널함수는 다음과 같이 표현된다.

$$\Phi(\xi, \tau) = e^{-\xi^2 \tau^2 / \sigma} \quad (8)$$

모호성함수에 커널이 곱해진 함수를 가중된 모호성

(weighted ambiguity)함수라 불리며 이것을 다시 이중 푸리에 변환을 하면 가중된 위그너 분포가 된다.

5. 고차시간-주파수 해석 (Higher Order Time Frequency Analysis)

2차 모멘트를 이용한 위그너 분포를 표현하는 방법은 식 (5)로 표현되었다. 식 (5)에 대한 위그너 분포는 4차 모멘트를 이용한 4차 위그너 분포가 되며, 식 (9)로 표현된다⁷⁾.

$$SSW_f(t, f) = \frac{1}{2} \int h(t)C(f, t - \tau)C(f, t + \tau)d\tau$$

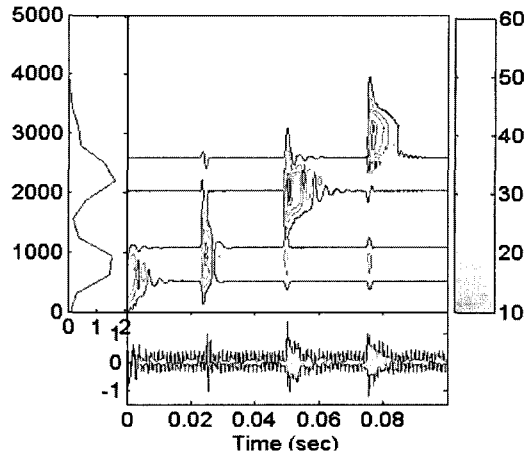
$$SSW_f(t, f) = \frac{1}{2} \int H(f)C(t, f - \nu)C(t, f + \nu)d\nu \quad (9)$$

여기서 2차 모멘트에 대한 간섭항이 있듯이 4차 모멘트에 의한 간섭항이 여전히 존재한다. 이러한 문제는 식 (9)에 새로운 창문함수 $h(t)$ 와 $H(f)$ 를 이용하여 제거할 수가 있다. 이 두 함수는 새로운 커널을 형성하지만 기본적으로 일반적인 커널과 다르다. 이러한 이유는 고차에서 나타나는 간섭항은 DC성분을 갖는 간섭항이므로 일반적인 방법의 커널에 대한 설계로서는 곤란하다. 이 글에서는 이러한 새로운 커널을 설계하여 고차 위그너 분포에 적용하였다.

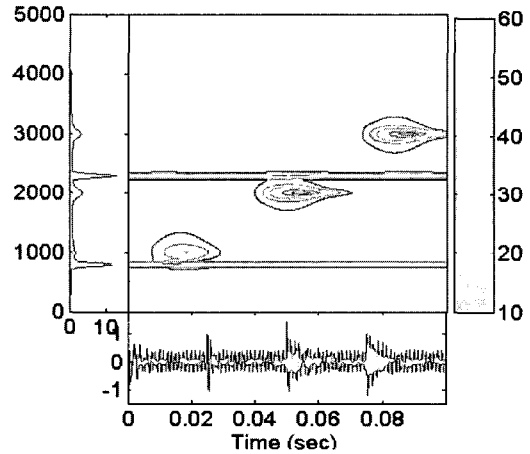
6. 시간 주파수 기법의 응용

6.1 시뮬레이션 신호에 대한 적용

시간-주파수 해석의 각 기법에 대한 이해를 위해서 2개의 사인함수(900 Hz, 2400 Hz) 신호와 4개의 충격 신호를 이용하여 각 기법을 적용하고자 한다. 그림 4는 시뮬레이션 신호에 대한 STFT이다. (a)의 경우는 창문이 작아서 충격신호는 잘 표현되지만 사인 신호는 주파수 분해능이 나빠서 사인파가 존재하는 주파수에서 밴드 폭이 넓다. (b)의 경우는 창문이 커서 주파수 분해능은 우수하나 시간 분해능이 나빠 초기 4개의 충격파 중에서 초기 충격파가 보이지 않는다. 또한 시간 분해능이 충분하지 않아서 충격파의 발생 시점을 정확히 알 수가 없다. 따라서 STFT의 경우 창문의 사용에 주의해야 한다.



(a)



(b)

그림 4 시뮬레이션 신호에 대한 STFT 해석

그림 5의 경우는 연속 웨이블릿을 이용한 경우이다. 이 경우에는 저주파에서는 주파수 분해능이 충분하여 사인파형(900 Hz)을 비교적 잘 표현하지만 고주파에서는 사인파형(2,400 Hz)의 주파수를 정확히 이해 할 수가 없다. 저주파에서 고주파로 이동하면서 시간 분해능이 증가함으로 충격파의 발생 위치를 정확히 찾을 수가 있다. 따라서 고주파 성분을 가진 충격파의 해석에는 유리하다. 그림 6의 경우는 이산 웨이블릿을 이용한 경우이다. 이 경우에는 1/3 옥타브밴드로 이동하면서 창문 겹침 현상이 없어서 신호가 정확한 표현이 어렵다. 두 개의 사인파형에 대한 정보가 정확하지 않다. 특히 고주파에 사인파형이 있다면 주파수분해능이 부족하여 정보를 정확히 얻기가 어렵다. 이것은 자연적이다. 이

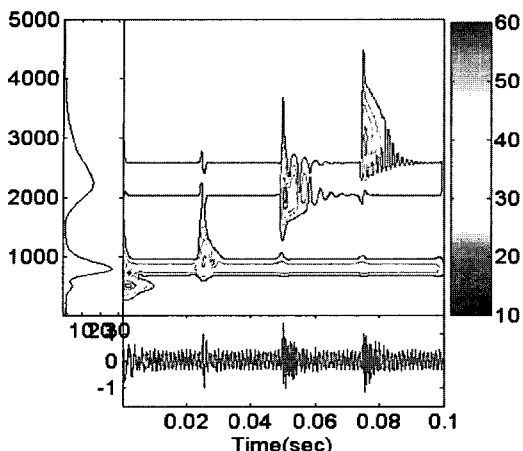


그림 5 시뮬레이션 신호에 대한 연속 웨이블릿 해석

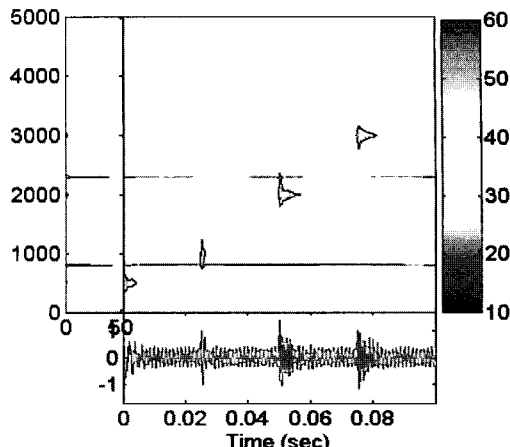


그림 8 시뮬레이션 신호에 대한 커널을 가진 위그너-빌 해석

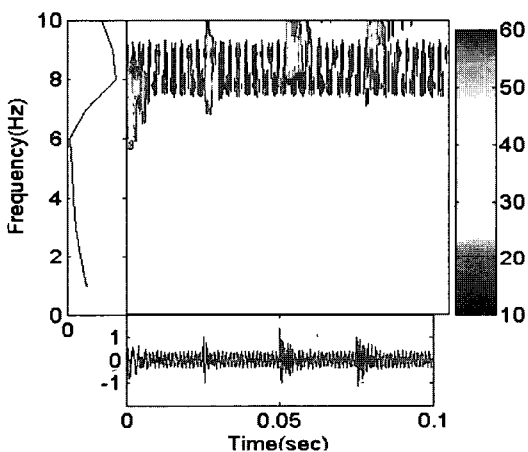


그림 6 시뮬레이션 신호에 대한 이산 웨이블릿 해석 (db5 mother wavelet 이용)

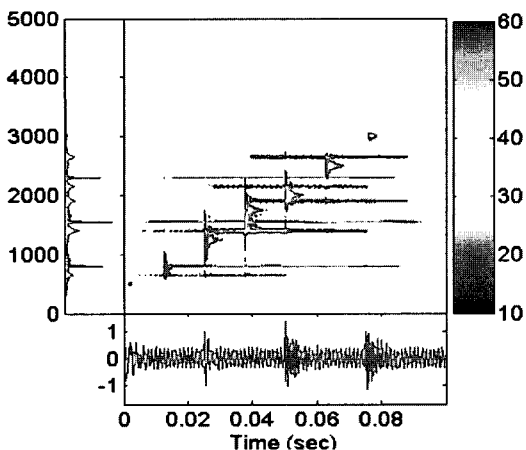


그림 7 시뮬레이션 신호에 대한 위그너-빌 해석

분을 해결하기 위해서 이산 웨이블릿 팩을 적용해도 한계가 있다.

그림 7은 동일한 신호에 대한 위그너 분포를 나타내는데 간섭항(cross term) 때문에 정확한 정보를 얻기가 어렵다. 그림 8은 지수커널을 이용한 위그너 분포이다. 이 경우는 매우 좋은 시간 주파수 분해능을 볼 수가 있다. 그러나 이 경우도 커널의 선택에 주의가 필요하다.

7. 평판(Beam)에 대한 탄성파 추적

시간-주파수 기술을 평판에 적용하기 위해서 그림 9와 같은 평판에 대해서 원점에서 충격을 주고 임의의 점에서 측정된 진동신호와 이론적으로 구한 탄성파는 그림 10과 같다. 이러한 신호에 대하여 커널을 가진 위그너 분포를 탄성파에 적용하면 그림 11과 같다. 그

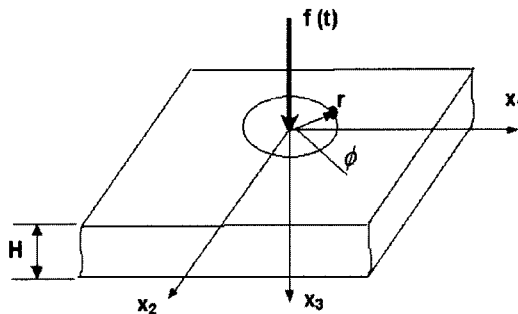


그림 9 시뮬레이션 신호에 대한 커널을 가진 위그너-빌 해석

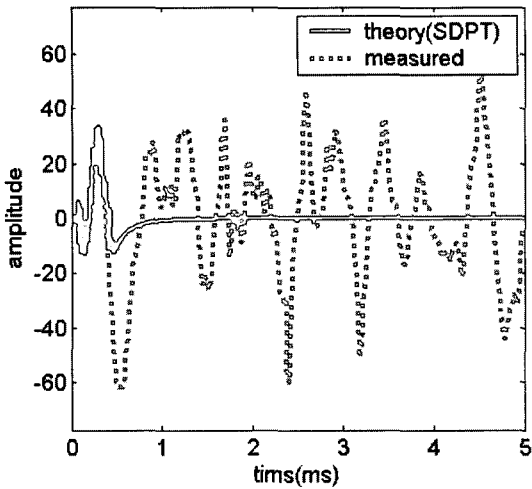


그림 10 시뮬레이션 신호에 대한 커널을 가진 위그너-빌 해석

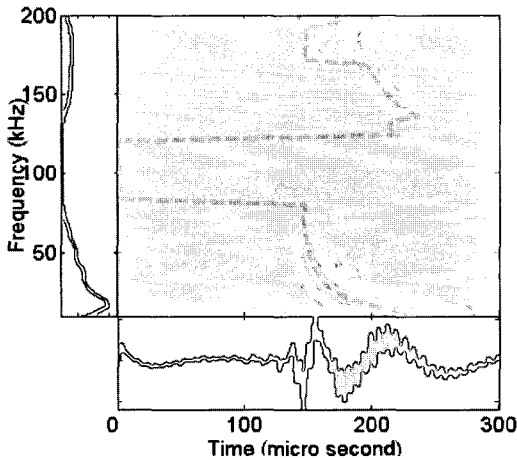


그림 11 시뮬레이션 신호에 대한 커널을 가진 위그너-빌 해석

림 10에서 이론은 반사파 영향이 없고 측정치는 반사파의 영향이 존재함을 알 수가 있다. 그리고 이 파형은 가속도 측정이 가능한 부분까지만 나타난 것이다. 이론적으로 고주파까지 고려한 것이 그림 11에 나타난 파형이며 이것에 대한 시간-주파수 해석을 나타내고 있다.

8. 맺음말

- (1) 이 글에서는 STFT, 위그너 분포, 웨이블릿 변환에 대하여 기술하였다.
- (2) 시뮬레이션 신호에 대하여 분석 결과 커널을 가진 위그너 분포가 시간-주파수 분해능을 향상 시키는 장점이 있다.
- (3) 웨이블릿의 경우는 시간-주파수 분해능을 고려해서 적용해야 한다.

참고문헌

- (1) Gabor, D., 1946, "Theory of Communication," Journal of IEE, Vol. 93, p. 429~457.
- (2) Kodera, K., 1978, "Analysis of Time-varying Signals with Small BT Value," IEEE Tran., ASSP, Vol. 26, No. 1, p. 64~76.
- (3) Koenig, R., 1946, "The Ssound Spectrogram," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 18, p. 19~46.
- (4) Ville, J., 1948, "Theori et Application Dela Notion de Signal and Analytique, Cables et Transmissions," Vol. 2A, No. 1, p. 61~74.
- (5) Hammond, J. K. and White, P. R., 1996, "The Analysis of Non-stationary Signals Using Time-frequency Methods," Journal of Sound and Vibration, Vol. 190, No. 3, p. 419~447.
- (6) Cohen, L. L., 1995, "Time-frequency Analysis," Prentice Hall.
- (7) Kronland. R. and Morlet, J., 1987, "Analysis of Sound Through Wavelet Transforms, International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence," Vol. 1, pp. 273~302.
- (8) Onsay, T. and Haddow, A. G., 1994, "Wavelet Transform Analysis of Transient wave Propagation in a Dispersive Medium."