

불규칙 신호의 웨이블릿 기법을 이용한 결함 진단

오재웅#, 김우택*, 심현진*, 아미누딘 빈 아부*, 이해진*, 이정윤**

Fault Diagnosis Using Wavelet Transform Method for Random Signals

Jae-Eung Oh#, Woo-Taek Kim*, Hyoun-Jin Sim*, Aminudin bin Abu*, Hae-Jin Lee* and Jung-Yoon Lee**

ABSTRACT

In this paper, time-frequency analysis using wavelet packet transform and advanced-MDSA (Multiple Dimensional Spectral Analysis) which based on wavelet packet transform is applied for fault source identification and diagnosis of early detection of fault non-stationary sound/vibration signals. This method is analyzing the signal in the plane of instantaneous time and instantaneous frequency. The results of ordinary coherence function, which obtained by wavelet packet analysis, showed the possibility of early fault detection by analysis at the instantaneous time. So, by checking the coherence function trend, it is possible to detect which signal contains the major fault signal and to know how much the system is damaged. Finally, It is impossible to monitor the system is damaged or undamaged by using conventional method, because crest factor is almost constant under the range of magnitude of fault signal as its approach to normal signal. However instantaneous coherence function showed that a little change of fault signal is possible to monitor the system condition. And it is possible to predict the maintenance time by condition based maintenance for any stationary or non-stationary signals.

Key Words: Wavelet(웨이블릿), Wavelet packet(웨이블릿 패킷), Time-frequency analysis(시간-주파수 해석), Fault diagnosis(결함진단), Advanced-MDSA(개선 다차원 해석 법)

1. 서론

설비를 구성하고 있는 기계 장치들의 이상과 파손은 자연 마모와 노후화 및 부품의 결함 등에 의하여 발생되며, 이상이 발생하기 전 반드시 이상과 관련된 징후가 발생한다. 이러한 이상과 관련된 사항을 감지하지 못하고 이상이 발생하면 많은 인명피해와 재산피해를 가져오게 된다. 반면에 이상징후를 사전에 파악함으로써 이상상태를 유발

시킨 원인을 규명하고 필요한 조치를 취하게 되면 생산성 저하 방지는 물론 재해나 사고로부터 인명 손실과 재산손실을 막을 수 있다. 즉, 가동중인 설비로부터 발생하는 진동, 음향, 열, 비틀림과 같은 에너지를 측정하여 설비의 상태를 정량적으로 분석하여 설비의 상태를 판정하는 기술인 설비진단 기술을 통하여 이상 및 결함의 원인과 정도, 설비의 신뢰성, 설비의 유지보수 시기 등을 판단할 수 있다.

접수일: 2005 년 01 월 25 일; 게재승인일: 2005 년 08 월 09 일

한양대학교 기계공학부

E-mail: jecoh@hanyang.ac.kr Tel.: (02) 2220-0452

* 한양대학교 대학원 자동차공학과

** 경기대학교 기계시스템디자인공학부

이상신호를 조기에 감지하기 위해서는 다중입력 신호들 중에서 어느 신호에 이상신호가 포함되어 있으며, 그 이상신호의 정도가 어느 정도인지를 파악하여야 한다. 먼저 다중입력 신호에 대한 소음원이 규명되어야 한다. 이를 위해서는 진동 및 소음원의 위치를 파악하여야 하고 출력에 가장 영향을 크게 미치는 입력신호를 규명하여야 한다. 이들에 대한 연구로는 가솔린엔진, 디젤엔진^{1,6}, 단조 해머, 프레스¹⁴ 및 차량의 고무 마운트 등 다양한 분야에서 시도되었다. 그러나 이들 연구는 고속 푸리에 변환(FFT; Fast Fourier Transform) 기법에 기반을 두고 있기 때문에 신호가 비정상(non-stationary)인 경우에는 적용할 수 없고, 전구간에서의 시간 자료를 필요로 하기 때문에 순간적으로 발생하는 이상신호를 해석할 수 없는 한계를 가지고 있다.

특히 상태 모니터링, 결함진단, 시스템 규명 및 충격파 전파경로의 특성파악 등 해석하고자 하는 신호들의 통계적인 특성이 측정 시점에 따라 변동하는 비정상신호의 해석은 중요한 분야로 부상하고 있으나 신호 중 비정상의 판단 구분조차 명확히 하지 못하고 있는 실정이다. 따라서, 기존의 정상신호로 가정하고 수행하던 해석기법들의 한계를 극복하고자 하는 새로운 기법들이 필요하게 되었다. 이에 따라 시간-주파수를 동시에 해석할 수 있는 웨이블릿 해석기법이 등장하게 되었다. 최근 발전된 웨이블릿 해석기법은 순간적으로 변하는 주파수 성분을 가진 신호의 해석에 강력한 도구로 등장하였다.

웨이블릿 변환기법은 1984년 Gaupillaud 등에 의해 지진파의 해석을 시작으로, 1990년대에 들어서 다양한 웨이블릿의 일반형이 제시되었으며, Coifman 등⁴에 의해 웨이블릿 패킷(wavelet packet)이 소개되었다. 웨이블릿 기법을 응용한 연구는 시스템 해석^{9,16}, 구조물의 결함 진단^{3,9-13}, 의학분야의 신호해석^{2,5}, 노이즈 제거분야^{7,9,17} 등에 널리 이용되고 있으나 단일 신호에 대한 해석이 전부이다.

본 연구에서는 웨이블릿 패킷 해석 기법을 이용하여 비정상 다중입력신호에 대해 다차원 해석까지 가능한 개선 다차원 해석법(Advanced-MDSA; Multiple Dimensional Spectral Analysis)을 제안하여 이상신호의 원인 규명과 이상신호에 의한 결함을 조기에 진단함으로써 상태기준 보수를 수행할 수

있도록 하였다.

2. 이론

2.1 설비 진단

설비진단기술(Machine Condition Diagnosis Technique: MCDT)은 설비의 안전을 확보함과 동시에 유지보수 비용을 절감하기 위하여 개발되었다. 여기서 설비는 통상의 철강과 화학 설비뿐만 아니라 항공기, 선박, 차량 등도 이동 설비로서 설비진단 기술의 중요한 적용 분야이다. 설비진단기술은 설비의 간단한 고장검출 기술뿐만 아니라 평가예측 기능을 지닌 진단기술로서 이 중 예측기술은 설비의 장래 상태를 예측하는 것으로 차기 점검일, 예측 고장율, 잔재수명 등을 사전에 파악하여 설비의 조기진단을 가능하게 하는 상태기준보수의 중요한 분야를 구성하고 있다.

이러한 설비의 유지보수방식으로서의 다음의 Fig. 1 과 같은 방식이 있으나 현재는 대부분의 설비에 있어서 예방보전(PM; Preventive Maintenance)이 채용되고 있다.

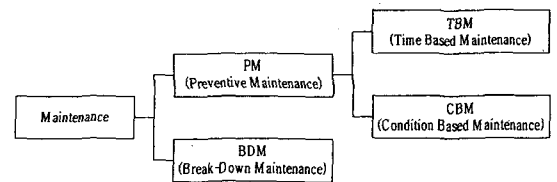


Fig.1 Maintenance classification for plant

종래의 예방보전은 엄밀히 말하면 시간기준(예방)보전(TBM; Time Based Maintenance)방식으로서 과거의 경험에 기초하여 정해진 일정기간이 지나면 수리를 실시하는 것으로서 시간에 맞춰 보수를 해도 항상 어느 수준의 고장은 발생하며, 보수 주기가 통계적으로 결정되기 때문에 과 보수가 될 확률이 크고, 위험하거나 복잡한 설비에 대해서는 효과가 적으며 정기적인 보수에 따라 생산성이 저하된다는 단점을 지니고 있다.

상태기준 보수를 적용하게 되면 플랜트의 가동률을 향상시켜 생산손실을 줄일 수 있고, 설비의 상태에 따라 운전조건을 조절할 수 있으므로 작업과 품질의 안정화가 가능하며, 대기(standby)설비를 줄일 수 있어 설비의 투자효과가 향상될 뿐만 아니라 정량적인 설비 데이터의 축적에 의해

장래의 설비 도입과 설계 시 사양 결정을 수월하게 할 수 있는 등의 많은 장점을 가지고 있다.

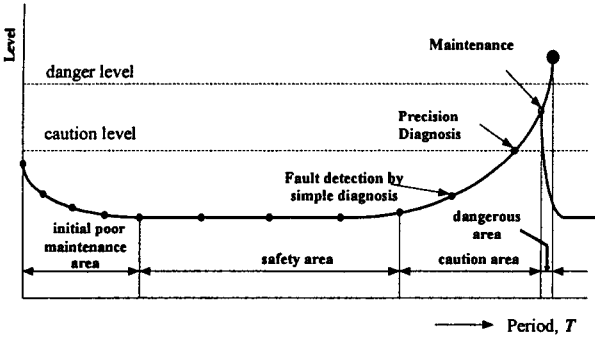


Fig.2 Maintenance timing and level by condition based maintenance

2.2 웨이블릿 패킷 해석기법

웨이블릿 패킷은 다중 해상도 해석(MRA; Multi-resolution Analysis)과 웨이블릿 사이의 관계를 일반화함에 의해 처음으로 소개되었다. 웨이블릿 패킷은 각 웨이블릿 스펙트럼의 옥타브 주파수 밴드가 이중척도 관계를 반복함으로써 상세한 주파수 밴드로 계속 나누어져 가는 웨이블릿의 일반화로서 샘플수가 $N = 2^J$ 인 신호 $x(t)$ 에 대해서는 주파수 구간 $[1/2^{j+1}, 1/2^j]$ 을 $N-1$ 개로 분해하는 웨이블릿 계수와, 구간 $[0, 1/2^{j+1}]$ 을 구성하는 1 개의 척도계수로 나누어진다.

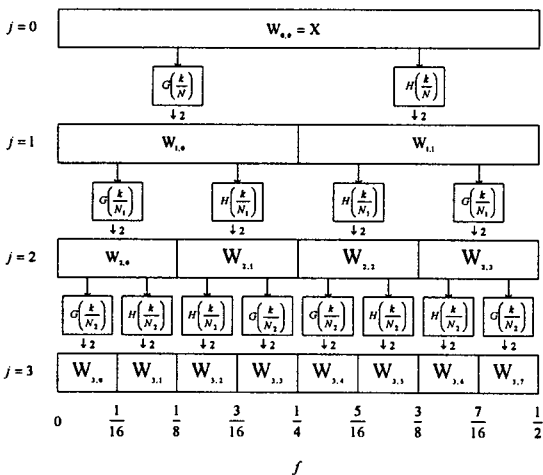


Fig.3 Flow diagram of discrete wavelet packet analysis at depth=3

Fig.3 은 이산 웨이블릿 패킷 변환(DWPT)의 분해과정을 나타낸 것이다. 웨이블릿 해석과 달리 저주파와 고주파의 전영역을 분해해 나감을 알 수 있다. 또한 웨이블릿 패킷 변환은 고주파 영역에 대한 출력력이 뒤바뀌어 웨이블릿 필터와 척도 필터의 순으로 나타남을 알 수 있다.

고주파에서의 필터순서는 다음과 같은 규칙을 따른다.

[1] $W_{j-1,n}$ 에서 n 이 짝수이면, $W_{j,2n}$ 은 저역통과 필터 $G(\cdot)$ 를, $W_{j,2n+1}$ 은 고역통과 필터 $H(\cdot)$ 를 지난다. 즉,

$$W_{j,2n} = A_j W_{j-1,n} \text{ 이고 } W_{j,2n+1} = B_j W_{j-1,n} \quad (1)$$

[2] $W_{j-1,n}$ 에서 n 이 홀수이면 $W_{j,2n}$ 은 $H(\cdot)$, $W_{j,2n+1}$ 은 $G(\cdot)$ 를 지난다. $W_{j,2n} = B_j W_{j-1,n}$ 이

$$W_{j,2n+1} = A_j W_{j-1,n} \quad (2)$$

이에 따라 수준 j 에서는 2^j 개의 벡터 $W_{j,n}$ ($n=0, \dots, 2^j-1$)을 만들 수 있고, 이는 주파수구간 $[n/2^{j+1}, (n+1)/2^{j+1}]$ 에 해당된다.

$$u_{n,l} = \begin{cases} g_l, & \text{if } n \bmod 4 = 0 \text{ or } 3 \\ h_l, & \text{if } n \bmod 4 = 1 \text{ or } 2 \end{cases} \text{ 이라면,}$$

웨이블릿 패킷 테이블에서 절점 (j,n) 에 상응하는 필터는 다음과 같이 정의된다.

$$u_{j,n,l} \equiv \sum_{k=0}^{L-1} u_{n,k} u_{j-1, \lfloor n/2 \rfloor, l-2^{j-1}k} \quad (3)$$

수준 $j=1,2,\dots,J$ 에서의 웨이블릿 패킷 계수는 다음의 식(4)에 의해 입력으로부터 바로 구해진다.

$$W_{j,n,t} = \sum_{l=0}^{L-1} u_{j,n,l} X_{2^j \lfloor (t+1) \rfloor - l \bmod N} \quad (4)$$

2.3 개선 다차원 해석법(Advanced-MDSA)

순간시간 t 에서의 입력과 출력은 웨이블릿 패킷의 계수 $X(t, f)$ 와 $Y(t, f)$ 가 된다. 비정상 신호의 경우 입출력간의 관계를 주파수 전달 함수를 이용하여 나타내면 다음의 식과 같다.

$$Y(t, f) = \hat{H}(t, f)X(t, f) \quad (5)$$

여기서, $\hat{H}(t, f)$ 는 순간시간 주파수 전달함수(Instantaneous Frequency Response Function)이다.

식 (5)의 양변에 공액 복소수 $Y^*(t, f)$ 를 곱하여 다음 식을 얻는다.

$$\begin{aligned} Y^*(t, f)Y(t, f) \\ = \hat{H}^*(t, f)\hat{H}(t, f)X^*(t, f)X(t, f) \end{aligned} \quad (6)$$

또한, 식 (5)에 입력의 공액 복소수 $X^*(t, f)$ 를 양변에 곱하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} X^*(t, f)Y(t, f) \\ = \hat{H}(t, f)X^*(t, f)X(t, f) \end{aligned} \quad (7)$$

식 (6)과 (7)에 기대값을 취하여 $(1/T)$ 를 곱하면 순간스펙트럼(Instantaneous Spectrum) $\hat{S}_{xx}(t, f)$, $\hat{S}_{yy}(t, f)$, $\hat{S}_{xy}(t, f)$ 의 관계식을 얻을 수 있다. 이 순간시간스펙트럼을 이용하여 순간시간에서의 일반기여도 함수(OCF: Ordinary Coherence Function) 를 구하면 다음의 식과 같다.

$$\gamma_{xy}^2(t, f) = \frac{|\hat{S}_{xy}(t, f)|^2}{\hat{S}_{xx}(t, f)\hat{S}_{yy}(t, f)} \quad (8)$$

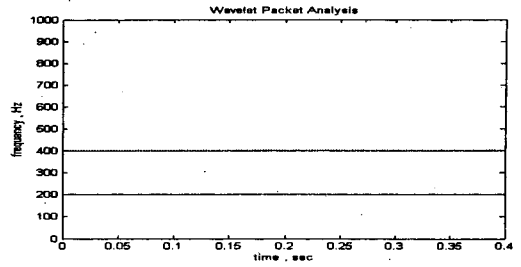
3. 조기진단을 위한 시뮬레이션

다중입력신호 중 결합이 존재하는 신호가 포함된 경우 결합신호를 규명하기 위하여 개선 다차원 해석법(Advanced-MDSA)을 적용한 시뮬레이션을 수행하였다. 정현파 성분으로 이루어진 신호와 주파수 변조된 신호를 대상으로 하였고, 샘플수는 1024 개, 최대 주파수는 1,000 Hz 로 하였으며 Nyquist 주파수를 만족시키는 2.56 배를 장비의 측정 최대 주파수로 하였고 샘플 주기는 0.4 초로 하였다.

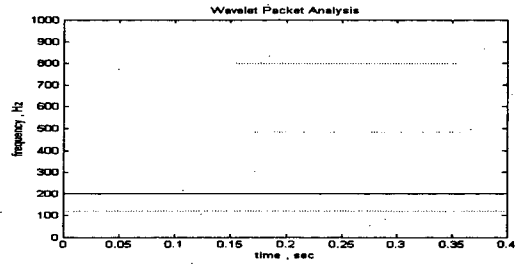
3.1 정현파 합성신호의 경우

정현파 합성신호는 200 Hz, 400 Hz, 600 Hz, 800 Hz 성분을 포함한 3-입력/1-출력 시스템을 다음의 식과 같이 구성하였다.

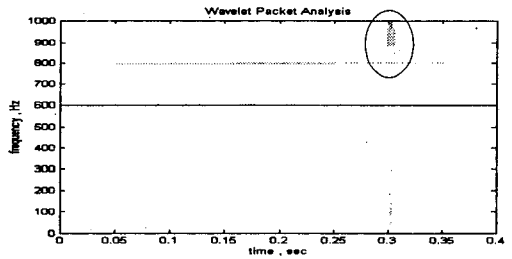
$$\begin{aligned} x_1 &= \sin(2\pi f_1 t) + \sin(2\pi f_2 t) \quad x_2 = \sin(2\pi f_1 t) + \sin(2\pi f_4 t) \\ x_3 &= \sin(2\pi f_3 t) + \sin(2\pi f_4 t) + impulse(t = 0.3 \text{ sec}) \\ y &= \sin(2\pi f_1 t) + \sin(2\pi f_2 t) + \sin(2\pi f_4 t) \\ &\quad + impulse(t = 0.3 \text{ sec}) \\ f_1 &= 200 \text{ Hz}, \quad f_2 = 400 \text{ Hz}, \quad f_3 = 600 \text{ Hz}, \quad f_4 = 800 \text{ Hz} \end{aligned}$$



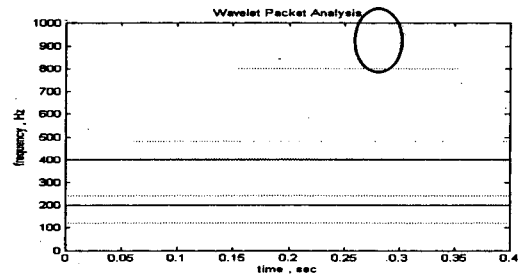
(a) x_1



(b) x_2



(c) x_3



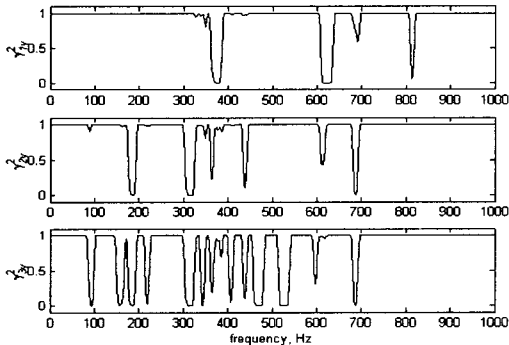
(d) y

Fig.4 Wavelet packet analysis for MISO system of sinusoidal signals

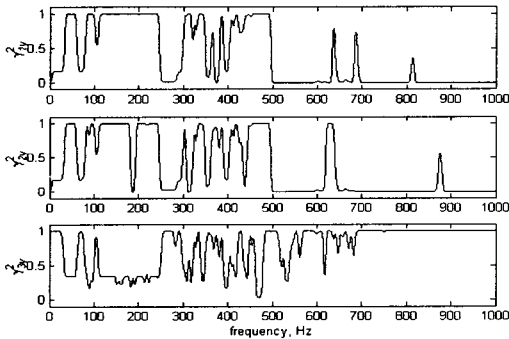
정상신호와 이상신호를 비교하기 위하여 0.3 초 시점에서 입력-3 과 출력신호에 가상으로 만든 이상신호(임펄스 신호)를 추가하였다. 다음의 Fig.4 는 웨이블렛 패킷 해석결과를 나타낸 것이다.

0.3 초에서 입력-3 과 출력의 원(0)으로 표시한 부분이 이상신호에 의한 것이다. 수평선으로 나타나는 것은 일정주파수의 정상신호임을 알 수 있다.

0.1 초와 0.3 초를 대상으로 개선 다차원 해석법을 수행한 결과 일반기여도 함수의 값은 다음의 Fig.5 와 같이 나타났다.



(a) OCF (0.1 sec.)



(b) OCF (0.3 sec.)

Fig.5 Ordinary coherence functions of sinusoidal signals

이상신호가 가해진 0.3 초의 경우는 이상신호를 포함한 x_3 가 가장 큰 기여도를 보이고 있다. 이는 Fig.4 의 (c)와 (d)에 나타난 이상신호가 고주파 부분에 나타나 x_3 의 기여도는 1 에 가까운 값을 보인 반면 x_1 과 x_2 는 고주파 부근에서 기여도 값이 0 에 가까운 값을 보였다.

다음의 Fig.6 은 시간의 변화에 따른 기여도 값의 변화를 보이고 있다. 각 입력의 출력에 대한 기여도 값이 시간의 변화에 따라 변화함을 알 수 있다. x_1 과 x_2 는 처음 구간에서 큰 값을 보이나 점차 줄어들며, 이상신호인 0.3 초의 경우 x_1 과 x_2 는 매우 작은 값을 나타내는 반면 x_3 은 큰 기여도 값을 보이고 있다.

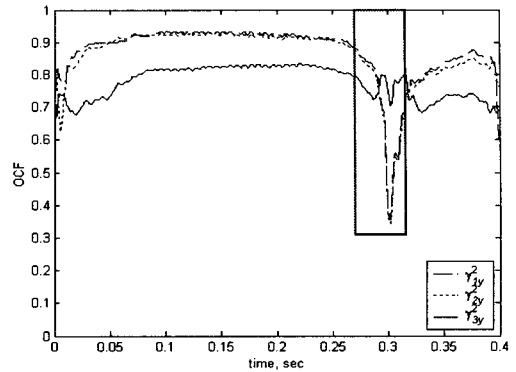
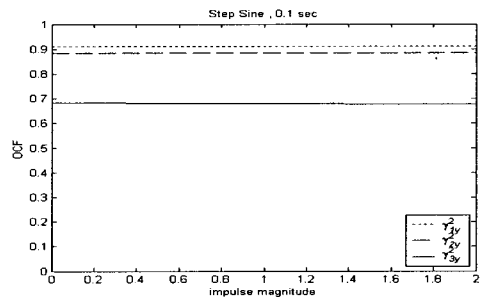


Fig.6 Variation of the ordinary coherence functions of sinusoidal signals

즉, 입력신호 중에 포함된 미세한 이상신호일지라도 기여도의 값을 변화시켜 이상신호를 포함하고 있는 소음원을 발견할 수 있다. 다음으로 입력-3 의 0.3 초인 시점에 이상신호를 추가하여 그 크기를 변화시켜가며 기여도와 파고 율을 계산하였다. 그 결과는 Fig.7 과 같다. 0.1 초, 0.2 초, 0.3 초에서 기여도를 계산한 결과 0.1 초와 0.2 초 등 이상신호가 발생하지 않은 지점에서는 기여도의 변화가 나타나지 않았으나, 이상신호가 발생한 0.3 초의 경우는 기여도의 변화가 발생하였다. Fig.7(c)에서 입력-3 의 기여도가 변화하는 것을 보면 입력-3 에 이상신호가 포함되어 있음을 알 수 있고, 이와 같이 기여도의 변화를 파악하면 다중입력신호 중 이상신호를 조기에 판단할 수 있다.

반면, Fig.7(d)는 임펄스의 크기변화에 따른 파고 율의 변화를 나타내고 있다. 파고 율은 임펄스의 크기가 1 까지는 변화가 없으므로 이와 같이 미세한 이상신호에 의한 진단은 기존의 파고 율을 이용하는 방법으로는 이상신호를 구분할 수 없게 된다.



(a) at 0.1 sec

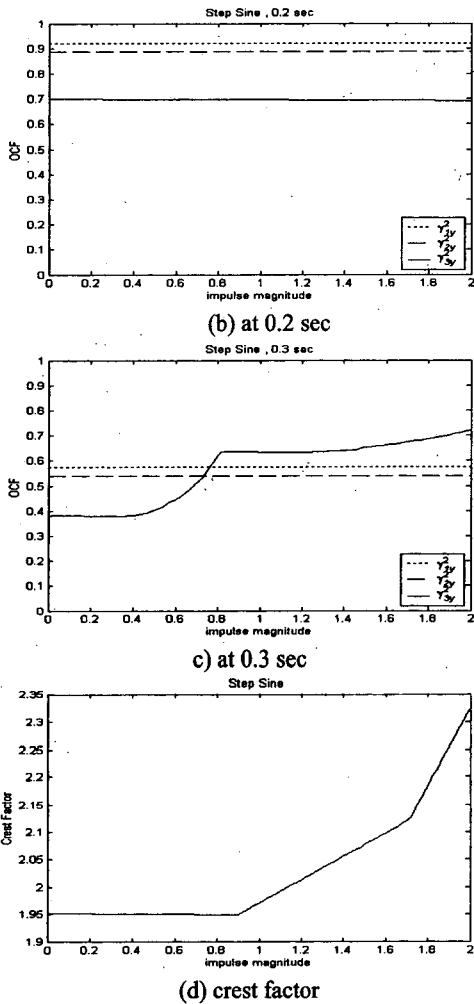


Fig.7 OCF and crest factor variation from change of impulse magnitude for sinusoid signals

3.2 주파수 변조신호의 경우

다음의 Fig.8 은 주파수 변조신호에 대한 3-입력 /1-출력 시스템의 웨이블릿 패킷 해석 결과를 나타낸 것이다. 원으로 표시한 부분이 이상신호에 의한 것이다. 0~0.2 초 사이에 0~600Hz로 변화하는 입력-1, 0.1~0.3 초 사이에 150~750Hz로 변화하는 입력-2 와 0.2~0.4 초 사이에 300~900Hz로 변화하는 입력-3 및 이들의 합성신호인 출력으로 구성되어 있다. 0.1초와 0.3초를 대상으로 개선 다차원 해석법을 적용한 결과 다음의 Fig.9 와 같이 나타났다. 0.1 초의 경우 일반기여도 순서는

$x_1 > x_2 > x_3$, 0.3 초의 경우는 $x_3 > x_2 > x_1$ 의 순서로 출력에 기여하고 있다. 이상신호가 가해진 0.3 초의 경우는 이상신호를 포함한 x_3 가 가장 큰 기여도를 보이고 있다.

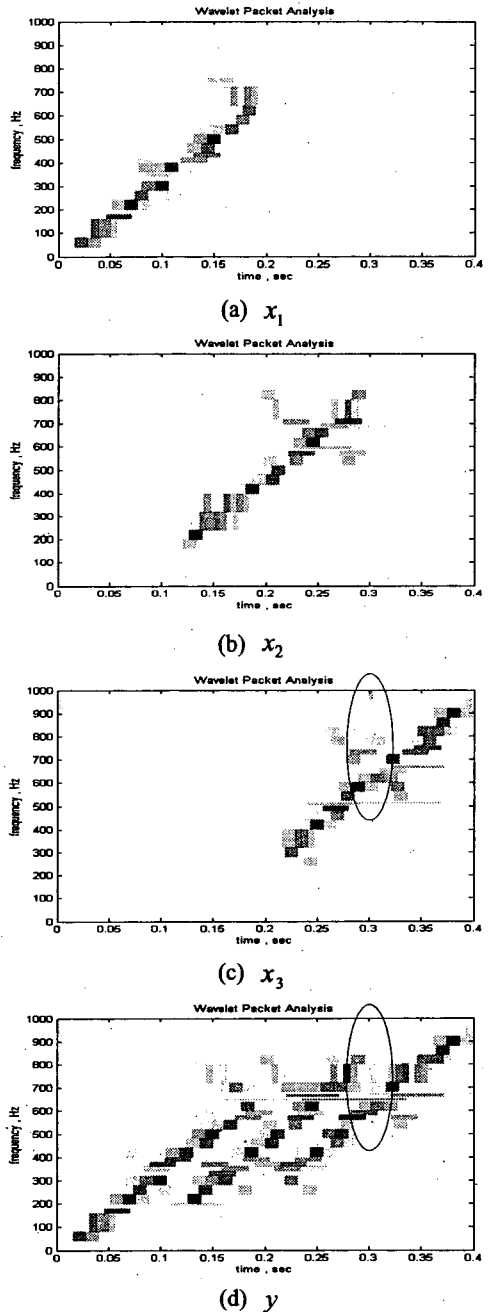


Fig.8 Wavelet packet analysis for chirp signals

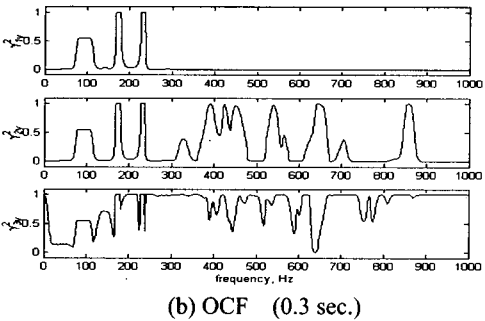
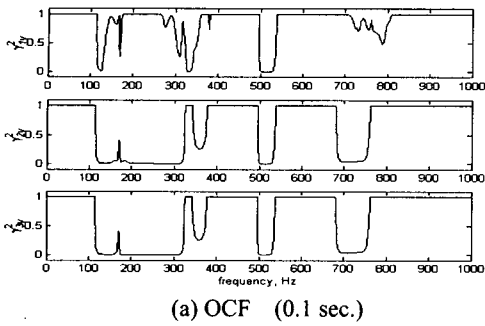


Fig.9 Ordinary coherence function of chirp signals

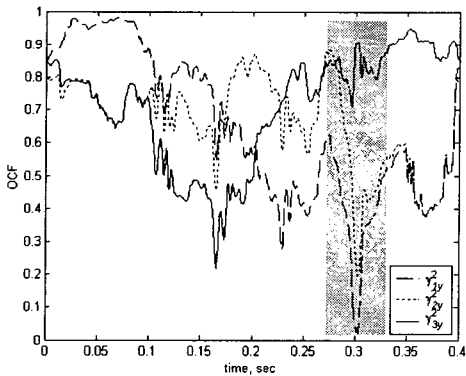
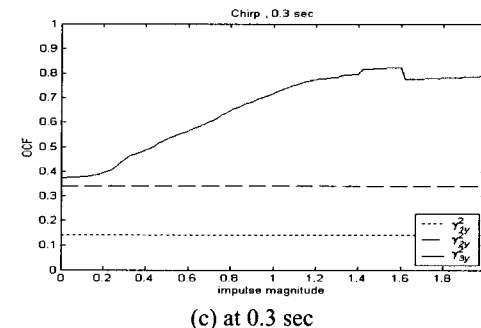
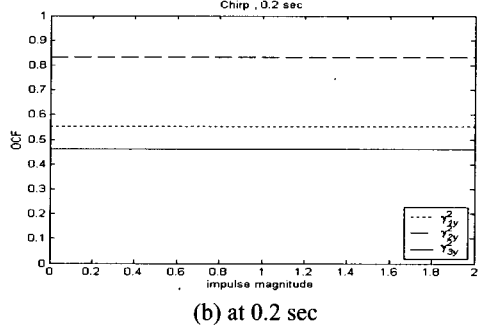
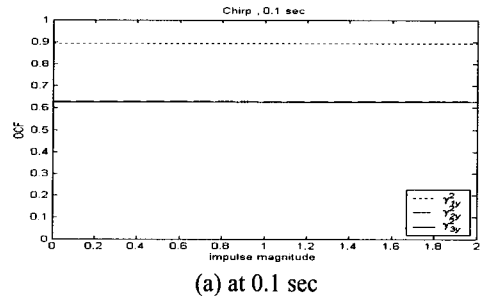
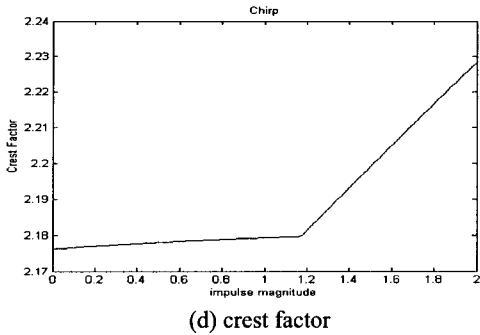


Fig.10 Variation of the ordinary coherence function of chirp signals

정현파 합성의 경우와 같이 이상신호 이외의 지점에서는 OCF의 순서가 일정하나, 이상신호가 가해진 지점에서 이상신호를 포함한 신호가 가장 크게 나타나며, 고주파부근의 기여도 값이 이상신호는 크고 그 외의 신호는 매우 낮음을 알 수 있다. 일반기여도함수의 시간적 변화를 다음의 Fig.10에 나타내었다. 각 입력의 출력에 대한 기여도 값이 시간의 변화에 따라 변화함을 알 수 있다. x_1 은 처음에 큰 기여도값을 보이지만 점차 작아지고 있

으며, x_2 는 0.1 초와 0.25 초 사이에서 큰 값을 보이고, 그 이후는 x_3 이 큰 기여도 값을 보이고 있다. 또한, 이상신호가 가해진 0.3 초의 경우 x_1 과 x_2 는 매우 작은 값을 나타내는 반면 x_3 은 큰 기여도 값을 보이고 있다. 즉, 이상신호에 의한 기여도 값이 특정 시간에 대하여 큰 변화를 보이므로 시간변화에 따른 웨이블릿 패킷을 이용한 기여도 함수의 결과로부터 이상신호를 검출할 수 있다. 결론적으로, 웨이블릿 패킷 해석법을 이용한 개선 다차원 해석법을 이용할 경우 기여도 값의 변화를 파악함으로써 이상신호가 포함된 다중입력신호의 결합진단을 조기에 파악할 수 있을 것으로 판단된다.





(d) crest factor
Fig.11 OCF and crest factor variation from change of impulse magnitude for chirp signals

Fig.11 은 이상신호의 크기를 변화시켜가며 기여도를 구한 결과이다. 정현파 합성신호의 경우와 동일한 결과를 보여주고 있다.

Fig.11(d)의 파고율은 임펄스의 크기가 1.2 까지는 변화가 없으므로 이와 같이 미세한 이상신호에 의한 진단은 기존의 파고율을 이용하는 경우는 이상신호를 구분할 수 없다. 반면, Fig.11(c)에서 입력-3의 기여도가 변화하는 것을 보면 입력-3에 이상신호가 포함되어 있음을 알 수 있다.

4. 자동차 급가속 신호를 이용한 이상신호의 진단

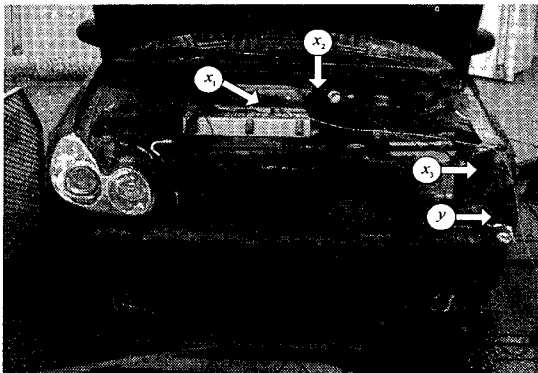
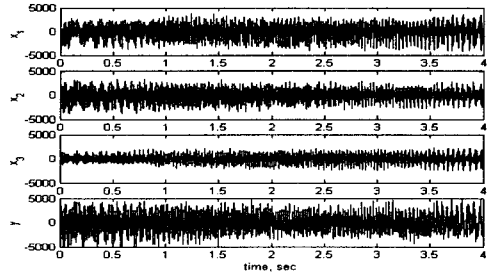


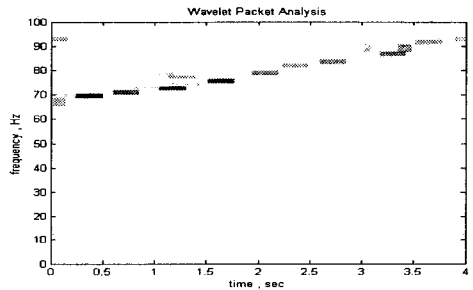
Fig. 12 Sensor position layout for vehicle test

A사의 1500cc 승용차를 대상으로하여 2 단 급가속상태에서 4 초간(2100~ 2850rpm: 70Hz ~95 Hz 범위) 측정된 데이터를 대상으로 하였다. 입력-1은 엔진블록의 가속도값을, 입력 2는 흡기계 엔진측의 음압값을, 입력-3은 공명기 앞의 음압값을 그리고 출력은 흡기계 토출측의 음압값으로 하는

3-입력/1-출력 시스템을 구성하였다. Fig.12는 승용차 측정위치의 전체적인 외관을 나타낸 것이다.



(a) 3-input/1-output time data

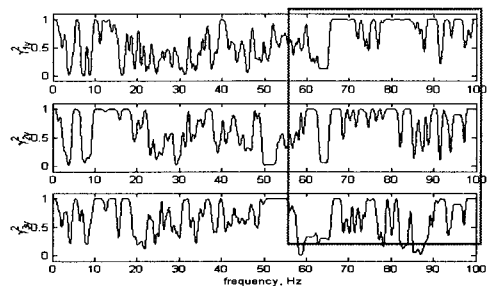


(b) time-frequency plane of output

Fig.13 Input/output time signals and wavelet packet coefficient distribution of output

이들 4개의 입력에 대한 시간데이터를 Fig.13(a), 출력의 웨이블릿 해석결과를 Fig.13(b)에 나타내었다. 시간 0~4 초 사이에서 주파수가 70Hz에서 95Hz로 점차 증가하는 신호임을 알 수 있다.

개선 다차원 해석을 통하여 얻은 입력들의 기여도는 다음의 Fig.14와 같다. 70-95Hz 범위의 주파수에서 입력-3의 기여도가 가장 크게 나타났다.



(a) OCF (1 sec.)

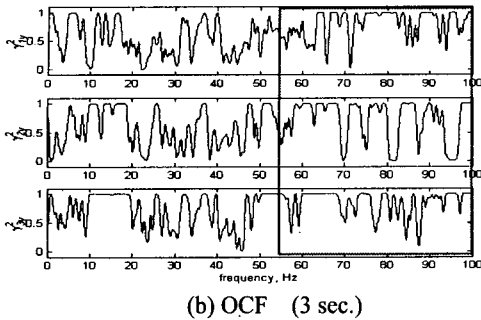


Fig.14 Coherence functions for vehicle test

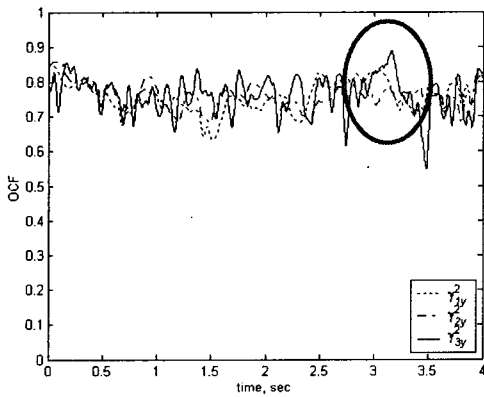


Fig.15 Variation of the ordinary coherence function of vehicle acceleration

순간시간에서의 이상신호에 대한 영향을 살펴보기 위하여 입력신호 x_i 의 3 초지점에 임펄스 신호를 추가하여 시간변화에 따른 기여도를 살펴보았다. 그 결과 다음의 Fig.15 와 같이 나타났으며, 3 초인 지점에서 입력-3 의 기여도가 상대적으로 큰 값을 나타내고 있어 이상신호가 입력-3 에 포함되어 있음을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구는 불규칙 신호의 특성을 갖는 신호를 대상으로 웨이블릿 패킷 해석 기법을 이용하여 이상신호 검출을 위한 방법과 개선 다차원 해석기법을 적용하여 불규칙 신호특성을 갖는 이상신호에 의한 결함을 조기에 판단 할 수 있는 방법에 대하여 연구하였으며 본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 다중입력/단일출력 시스템의 불규칙 신호를

대상으로 웨이블릿 패킷 해석결과를 이용하는 다차원 해석을 수행함으로써, 기존의 푸리에 방식에 의한 정상신호의 기여도평가를 비정상 신호의 해석까지 가능하도록 확장한 개선 다차원 해석법 (Advanced-MDSA)을 제안하였다.

2. 이상신호가 발생하는 지점에서의 기여도 해석 결과 입력신호 중 이상신호를 포함한 신호가 가장 큰 기여도 값을 나타냈다. 따라서 이상신호에 의한 결함이 존재하는 경우는 웨이블릿 패킷 결과를 이용한 기여도 값의 변화를 파악함으로써 이상신호를 포함한 신호를 판단할 수 있었다.

3. 이상신호의 크기변화에 따른 파고율과 에너지증가율을 조사한 결과 이상신호가 일정크기까지는 파고율의 변화가 없어 이를 이용한 이상신호의 판단은 불가능 하였으나, 웨이블릿 패킷 해석을 이용하는 경우는 미세한 이상신호에 대해서도 기여도의 변화가 나타남으로써 기존의 방법으로는 판단 불가능한 이상신호를 조기에 감지할 수 있었다.

참고문헌

1. Alfredson, R.J., "The Partial Coherence Technique for Source Identification on a Diesel Engine," Journal of Sound and Vibration, Vol. 55, No. 4, pp. 487-494, 1977.
2. Allen, J. and Murray, A., "Time-Frequency Analysis of Korotkoff Sounds," Conf. IEEE, London WC2R 0BL, pp 4/1-4/5, 1997.
3. Aretakis, N. and Mathioudakis, K., "Wavelet Analysis for Gas Turbine Fault Diagnostics," ASME Jr. of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 119, pp. 870-876, 1997.
4. Coifman, R.R. and Wickerhauser, M.V., "Entropy-Based Algorithms for Best Basis Selection," IEEE Transactions on Information Theory, Vol. 30, pp. 713-718, 1992.
5. Crowe, J.A., "The Wavelet Transform and Its Application to Biomedical Signals," Conf. IEEE, London WC2R 0BL, pp 2/1-2/3, 1997.
6. Desantes, J.M., Torregrosa, A.J. and Broatch, A., "Wavelet Transform Applied to Combustion Noise Analysis in High-Speed DI Diesel Engines," SAE

- Conference 2001-01-1545, 2001.
7. Donoho, D.L, "De-Noising by Soft-Thresholding," IEEE Transaction on Information Theory, Vol. 41, No. 3, pp. 613-627, 1995.
 8. Gaupillaud, P., Grossmann, A. and Morlet, J., "Cycle-Octave and Related Trnsaforms in Seismic Signal Analysis," Geoexploration, Vol. 23, pp. 85-102, 1984.
 9. Kim, Y.Y. and Hong, J.C., "Frequency Response Function Estimation Via a Robust Wavelet De-Noising Method," Journal of Sound and Vibration, Vol. 244, No. 4, pp. 635-649, 2001.
 10. Lin, J. and Qu, L., "Feature Extraction Bases on Morlet Wavelet and Its Application for Mechanical Fault Diagnosis," Journal of Sound and Vibration, Vol. 234. No. 1, pp. 135-148, 2000.
 11. Ling, S.F. and Liu, B., "Health Monitoring of International Combustion Engines by Wavelet Based Vibration Analysis," ASME No. 97EN039, pp. 373-380, 1997.
 12. Liu, B. and Ling, S.F., "On the Selection of Informative Wavelets for Machinery Diagnosis," Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 13, No. 1, pp. 145-162, 1999.
 13. Mahfouz, I.A., "Condition Monitoring of a Gear Box Using Vibration and Acoustic Emission Based Artificial Neural Network," SAE Conference 2001-01-1484, 2001.
 14. Oh, J.E., "Applications of Multi-Dimensional Spectral Analysis for Noise Source Identification on Mechanical Structures," Thesis for doctor's degree, Tokyo Institute of Technology, 1983.
 15. Park, J.S. and Kim, K.J., "Source Identification Using Multi-Input/Single-Output Modeling and Causality Checking of Correlated Inputs," Journal of Vibration and Acoustics, Vol. 116, pp. 232-236, 1994.
 16. Robertson, A.N., Park, K.C. and Alvin, K.F., "Identification of Structural Dynamic Models Using Wavelet-Generated Impulse Response Data," ASME Journal of Vibration and Acoustic, Vol. 120, pp. 261-266, 1998.
 17. Sardy, S., Tseng, P. and Bruce, A., "Robust Wavelet Denoising," IEEE Trans. on signal processing, Vol. 49, No. 6, pp. 1146-1152, 2001.