

과도응답신호의 잡음제거기법

안호일*

A Denoising Method for the Transient Response Signal

Hoil Ahn*

요 약

함정에 탑재되는 주요장비는 내충격성능을 확인하기 위해 충격시험을 실시하고 계측된 신호는 최대충격가속도, 지속시간, 응답스펙트럼 등 충격응답신호의 시간이력을 분석한다. 그러나 계측된 신호는 배경잡음, 계측기오차, 케이블의 과도운동 등으로 충격성잡음과 백색잡음으로 인한 신호왜곡이 발생할 수 있으므로 충격시험으로부터 정확한 시간이력을 추출하기 위해서는 이러한 잡음을 제거해야 한다. 충격성잡음은 중간값필터를 이용하여 제거하고 백색잡음은 웨이블렛의 계수값을 축소함으로써 잡음이 제거된 충격응답신호의 시간이력으로부터 정도높은 최대충격, 지속시간 및 충격응답스펙트럼이 획득가능하다. 제안된 기법의 타당성을 판단하기 위해 수치 시뮬레이션을 수행한 결과 신호대잡음비가 30dB 이상 향상되었음을 확인하였고, 실제계측된 수중폭발충격신호에 적용시켜 향상된 충격응답스펙트럼을 추출하였다.

*Keywords: shock test(충격시험), (wavelet)웨이블렛, median filter(중간값 필터), threshold policy(임계 처리)

Abstract

The shock test of shipboard equipments is performed for the evaluation of the shock-resistant capability by analyzing the maximum acceleration, the effective time duration and the shock response spectrum, etc. But some measured signals have impulsive noise and gaussian white noise because of the ambient noise, the acquisition equipment error and the transient movement of cables during the shock test. The improved transient signal analysis method which removes the noise of measured signal using the threshold policy of the median filter and the orthogonal wavelet coefficients is proposed. It was verified that the signal-to-noise ratio was improved about 30dB by the numerical simulation. And the shock response spectrum was extracted using the denoised shock response signal which was applied by this proposed method.

접수일자: 2001년 4월 14일, 승인일자: 2001년 7월 11일

* 정회원, 국방과학연구소 연구원 (E-mail: hiahn@sunam.kreonet.re.kr)

1. 서론

합정에 탑재되는 주요장비는 충격시험을 수행하여 내충격성능을 확인한다. 그러나 충격시험으로부터 획득된 신호는 배경잡음, 계측장비오차 및 케이블 등의 과도운동에 따라 충격성잡음과 백색잡음 등이 발생하는 경우가 있는데 이러한 영향으로 인하여 충격응답특성의 분석에 상당한 오차를 발생시킬 가능성이 많다. 따라서 실제 신호에 영향을 최소화시키면서 잡음만을 제거하는 신뢰성있는 신호처리기법의 적용이 요구된다.

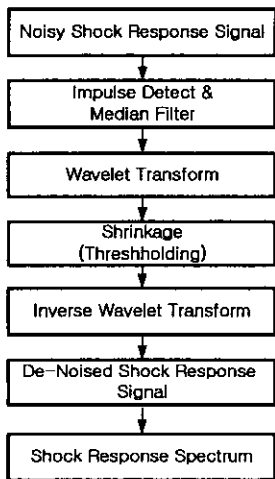


Fig.1 Flow chart of transient data analysis

본 논문에서는 Fig.1과 같이 중간값필터와 웨이블릿 신호처리기법을 적용하여 응답신호에 대한 충격성잡음과 백색잡음을 제거하는 기법을 제시한다. 과도신호에 포함된 충격성잡음을 제거하기 위하여 신호특성에 맞도록 임계값을 설정, 최적화하여 중간값필터를 적용한 후 웨이블릿 신호처리를 함으로써 실제 신호에 영향을 최소화하였다. 제시된 신호처리기법을 검증하기 위하여 수치시뮬레이션을 수행하여 과도신호에 포함된 잡음을 제거하는 유용성을 확인하였고, 실제 충격신호를 적용하여 잡음의 영향이 없는 충격응답스펙트럼을 추출하였다.

2. 충격응답신호 분석

계측기를 이용하여 획득한 충격응답신호는 충격성잡음(impulsive noise)과 가우시안백색잡음(Gaussian white noise) 등 시스템 잡음을 포함하고 있다고 가정하면 식(1)과 같이 표현할 수 있다.

$$s = f + e_I + e_w \quad (1)$$

여기서, s 는 계측된 신호, f 는 잡음이 없는 실제신호, e_I 는 충격성잡음이고 e_w 기대값이 0이고 분산 σ^2 인 가우시안 백색 잡음이다.

2.1 충격성잡음 제거

충격성잡음은 중간값필터(median filter)를 이용하여 제거할 수 있으나, 중간값필터는 신호의 왜곡을 초래할 수 있으며 필터의 계수에 따라 신호가 상이하게 된다(Sucher, 1994). 이런 신호의 왜곡을 최소화시키며 충격성잡음만을 제거하기 위해서 식(2)과 같이 임계값(threshold)을 설정하여 임계값 이상의 데이터에 대해서만 중간값필터를 적용하였다. 이때 임계값은 식(3)과 같이 충격응답신호의 특성에 맞게 지수적으로 감소하는 곡선을 선택하여 초기 충격신호의 최대값에 영향을 주지 않게 하였다.

$$s = \begin{cases} Med(s) & \text{if } |s| \geq Thr \\ s & \text{if } |s| < Thr \end{cases} \quad (2)$$

$$Thr = C_1 e^{C_2 t} \quad (3)$$

여기서, C_1, C_2 는 상수이고 $Med(\cdot)$ 는 중간값을 나타낸다.

2.2 백색잡음 제거

$L^2(R)$ 공간에서 신호의 길이가 2^k 일 때 해상도 수준 레벨 K 에서 $s = f + e_w$ 의 성분은 식(4)~식(6)과 같이 웨이블릿 표현식으로 나타낼 수 있다(Chan,1995).

여기서 모웨이블렛(mother wavelet)은 응골받침(compactly supported)이고 직교웨이블렛인 Daubechies웨이블렛을 사용하였다 (Axler /Gehring,2000).

$$s = \sum_{k=k_0}^{K-1} \sum_{j=1}^{2^k} \bar{d}_{k,j} \psi_{k,j} + \sum_{j=1}^{2^{k_0}} \bar{c}_{k_0,j} \phi_{k_0,j} \quad (4)$$

$$f = \sum_{k=k_0}^{K-1} \sum_{j=1}^{2^k} d_{k,j} \psi_{k,j} + \sum_{j=1}^{2^{k_0}} c_{k_0,j} \phi_{k_0,j} \quad (5)$$

$$e_W = \sum_{k=k_0}^{K-1} \sum_{j=1}^{2^k} \varepsilon_{k,j} \psi_{k,j} \quad (6)$$

이때 잡음은 낮은 크기의 고주파수 성분을 가지고 있다는 특성으로 잡음의 저주파수 성분은 무시할 수 있고 식(4)와 식(5)의 계측된 충격응답신호(s)와 실제신호(f)의 근사계수(approximate coefficient)는 거의 같게 된다(Newland,1994).

$$\bar{c}_{k_0,j} \approx c_{k_0,j} \quad (7)$$

식(7)을 이용해 식(4)~식(6)으로부터 식(8)을 얻게 된다.

$$\bar{d}_{k,j} = d_{k,j} + \varepsilon_{k,j} \quad (8)$$

이때, $\varepsilon_{k,j}$ 은 기대값이 0이고 분산이 σ^2 인 가우시안 분포특성을 가지고 있으므로 웨이블렛계수 $\bar{d}_{k,j}$ 는 기대값이 $d_{k,j}$ 이고 분산이 σ^2 인 랜덤변수로 볼 수 있다(김충락 등,1998). 그러므로 $\varepsilon_{k,j}$ 의 표준편차를 구하여 임계치리를 하면 잡음이 제거된 $d_{k,j}$ 와 유사한 신호를 얻을 수 있다. Donoho와 Johnstone(1994)은 식(9)와 식(10)와 같이 하드임계치리(hard thresholding)와 소프트 임계치리(soft thresholding)를 제안하였으며 이를 이용해 웨이블렛계수를 축소하면 Fig.2와 같다.

$$Thr^{Hard}(x, \lambda) = \begin{cases} x & \text{if } |x| \geq \lambda \\ 0 & \text{if } |x| < \lambda \end{cases} \quad (9)$$

$$Thr^{Soft}(x, \lambda) = \begin{cases} x - \text{sgn}(x)\lambda & \text{if } |x| \geq \lambda \\ 0 & \text{if } |x| < \lambda \end{cases} \quad (10)$$

하드임계치리법은 오차의 기대값을 최소화한다는 측면에서 좋은 잡음제거 알고리즘을 제공하여 신호대잡음비를 높게하나 과도신호처리에 있어서 완전한 잡음제거가 되지 않는 깃스현상이 발생하여 본 연구에서는 소프트임계치리법을 채택하였다 (Donoho,1995).

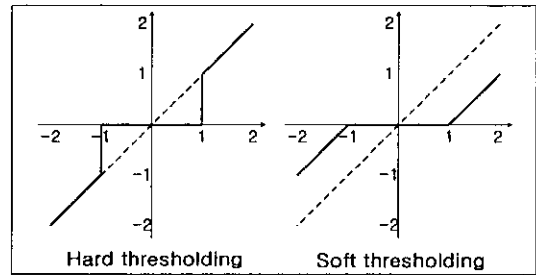


Fig.2 Thresholding results of $f=x$ at $\lambda=1$

식(9)~식(10)의 임계값 λ 는 식(11)과 같이 표현된다.

$$\lambda = \sqrt{2 \ln 2^k} \hat{\sigma}_N \quad (11)$$

식(11)은 표준편차가 $\hat{\sigma}_N$ 이고 표본크기(2^k)가 충분히 큰 모든 잡음의 크기가 임계값보다 작을 확률이 상당히 큼을 나타낸다.

$\hat{\sigma}_N$ 은 백색잡음의 표준편차를 나타내며 실제 계측신호의 잡음 표준편차를 알 수 없기 때문에 Donoho와 Johnstone이 제안한 웨이블렛의 가장 높은 레벨의 계수값을 이용하여 식(12)과 같이 잡음의 표준편차 추정치 $\hat{\sigma}_N$ 를 구할 수 있다.

$$\hat{\sigma}_N = \frac{\text{Med}(|\bar{d}_{K-1,j}|)_{1 \leq j \leq 2^{K-1}}}{0.6745} \quad (12)$$

이러한 일련의 임계치리 과정을 통하여 축소된 웨이블렛계수를 웨이블렛 역변환을 취하여 잡음이 제거된 신호를 얻을 수 있다.

3. 수치시뮬레이션 및 계측신호 적용

3.1 수치시뮬레이션을 통한 검증

잡음이 포함된 충격응답신호 분석법의 타당성을 검증하여 계측신호에 적용하기 위하여 Table 1과 같이 충격응답신호와 유사한 지수감소신호와 충격성잡음을 가하고 기대값이 0이고 표준편차가 1인 백색잡음을 포함한 Case.1과 기대값이 0이고 표준편차가 2인 백색잡음을 포함한 Case.2인 두가지 경우에 대해 수치시뮬레이션을 수행하였다.

Table 1 Used signals for the numeric simulation

Noisy Signals	Case.1	Case.2
Original signal (f)	$f(t) = e^{-t}(7 \sin 4\omega t + 6 \sin 7\omega t + 2 \sin 13\omega t)$	
Impulsive Noise (e_I)	57 at t=0.33 -45 at t:0.68 60 at t=1.03 -40 at t:1.23 54 at t=2.03 38 at t:2.50 -50 at t=2.75 45 at t:3.50 25 at t=4.00 50 at t:4.50	
Gaussian White Noise (e_W)	E : 0 σ : 1	E : 0 σ : 2
SN ratio (dB) (signal to white noise)	33.4	19.2
SN ratio (dB) (signal to total noise)	22.8	15.6

Case.1과 Case.2의 신호는 Fig.3과 같다.

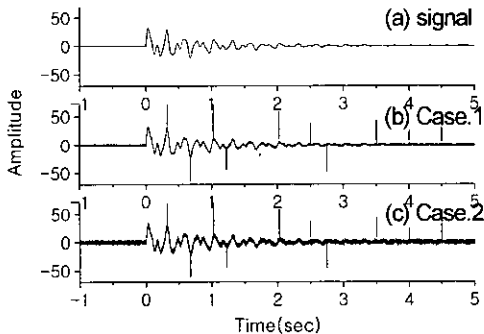


Fig.3 Original and noisy signals

식(1)에서 충격성잡음 e_I 을 제거하기 위해 임계값을 $Thr = 51.2 e^{0.4383t}$ 로 정하고 식(2)를 이용하

여 임계값보다 큰 신호에 대해 중간값필터를 적용하여 Fig.4와 같이 충격성잡음을 제거하였다.

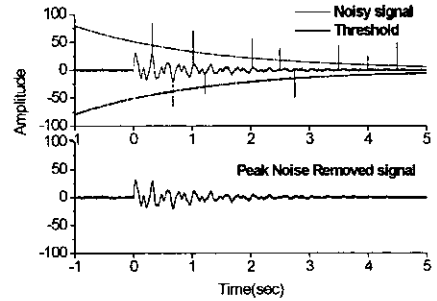


Fig.4 Median filter threshold and filtered signal

충격성잡음이 제거된 신호에 대해 웨이블릿을 이용하여 백색잡음을 제거하기 위해 레벨5까지 분해하였다. Case.1과 Case.2의 계수값은 Fig.5~Fig.6에 나타내었다.

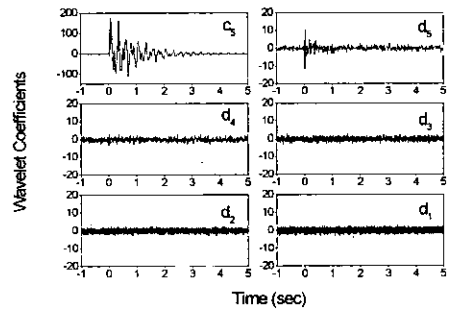


Fig. 5 Wavelet coefficients of Case.1

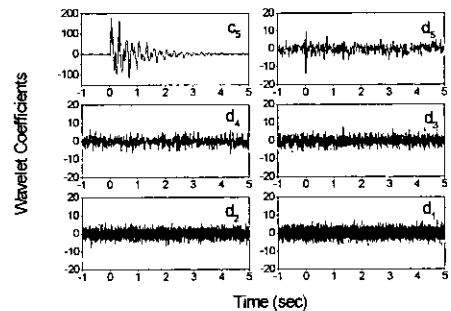


Fig.6 Wavelet coefficients of Case.2

식(11)~식(12)를 이용하여 임계처리를 위해 Table.2와 같이 잡음신호의 표준편차와 임계값을 구하여 식(10)를 이용하여 임계처리후 Fig.7과 같이 두가지 경우의 신호를 복원하였다.

Table 2 Standard deviation and thresholding of noisy signals

Noisy Signals	Case.1	Case.2
Standard deviation of noise ($\hat{\sigma}_N$)	1.1283	2.2315
Thresholding (λ)	4.8901	9.6718

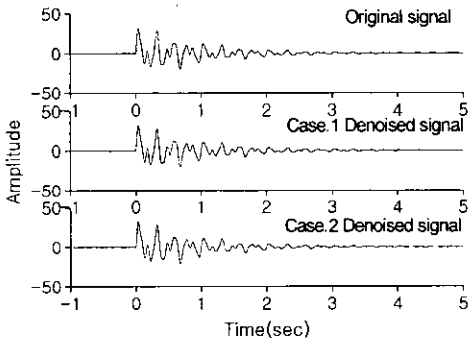


Fig.7 Original and denoised signals

원신호와 Case.1과 Case.2의 잡음 전·후의 신호의 분포 및 특성을 Table.3과 Fig.8에 나타내었으며 Case.1의 경우 신호대잡음비가 22.8dB에서 62.4dB로, Case.2의 경우 15.6dB에서 51.8dB로 각각 39.6dB, 36.2dB향상되었으므로 충격응답신호에 적용이 타당한 것으로 판단된다.

Table 3 Signal to noise ratio of before and after denoised signal

	Signal	SN ratio(dB)
Case.1	before denoising	22.8
	after denoising	62.4
Case.2	before denoising	15.6
	after denoising	51.8

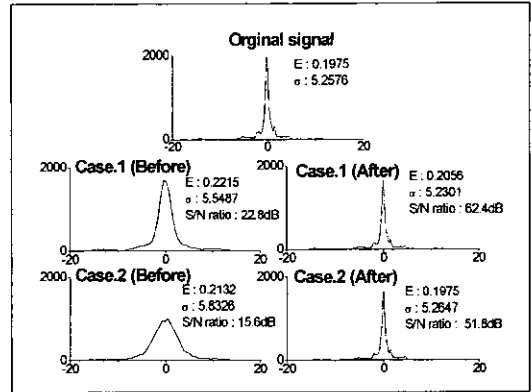


Fig.8 Histograms of before and after denoising

3.2 계측된 수중폭발 충격신호 적용

수치시뮬레이션으로부터 입증된 분석기법을 시험의 통해 획득된 수중폭발 충격응답신호에 적용하였다.

식(2)를 이용하여 소프트임계처리된 중간값필터를 통과하여 충격성잡음을 제거한 후 수치계산에서와 같이 Daubechies웨이블렛을 사용하여 변환을 하여 웨이블렛계수를 구한 후 식(11)과 식(12)로부터 잡음의 표준편차($\hat{\sigma}_N$)는 1.5858, 임계값(λ)은 6.8733을 구하여 웨이블렛계수 축소후 복원하여 Fig.9와 같이 신호대잡음비가 21.7dB증가된 임펄스잡음과 가우시안잡음이 제거된 양호한 충격응답신호를 획득할 수 있었다.

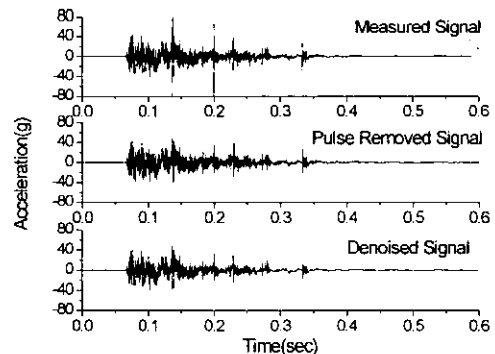


Fig.9 Measured and denoised signals

Fig.10에 나타난 바와같이 신호처리전·후의 충격응답신호를 이용하여 충격응답스펙트럼 (shock response spectrum, SRS)을 구한 결과, 잡음영향으로 인한 고주파수영역이 신호처리 전보다 낮음을 알 수 있었다.

이와같은 과정의 통해 획득된 충격응답스펙트럼은 차기함정의 내충격설계에 중요한 기초자료로 제공된다.

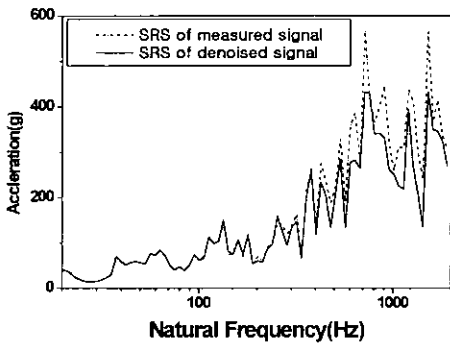


Fig.10 Shock Response Spectrum of measured and denoised signals

4. 결 론

함정의 탑재장비 충격시험시 계측기를 통해 획득된 충격성 잡음 및 배경잡음 등은 실제 신호에 상당한 영향을 미칠 수 있다. 본 연구에서는 과도신호에 포함된 충격성잡음과 배경잡음을 제거하는 기법을 제시하였다. 과도신호에 포함된 이러한 잡음을 제거하기 위하여 신호특성에 맞도록 임계값을 설정, 최적화하여 중간값필터를 적용한 후 웨이블릿 신호처리를 적용하여 실제 값에 미치는 영향을 최소화하였다.

제시된 기법을 이용하여 시뮬레이션결과 충격성 잡음 및 백색잡음을 포함하고 있더라도 신호대잡음비를 약 30dB이상 향상시킬 수 있음을 확인하였다. 또한, 실제 계측한 수중폭발 충격응답신호를 적용하였을 때 신호대잡음비가 약 20dB향상하여 정도 높은 충격응답스펙트럼을 추출할 수 있었다.

참 고 문 헌

- 김충락, 송현중, 장대홍, 홍창곤, 1998, "웨이브렛의 기본이론과 통계에의 응용", 대우학술총서.
- D.E.Newland, 1994, "An introduction to random vibrations, spectral & wavelet analysis", Longman Scientific and Technical.
- R.Sucher, 1994, "Removal of impulse noise by selective filter", IEEE International conference in Image Processing, vol.2, pp502-506, Austin.
- D.L.Donoho, I.M.Johnstone, 1994, "Ideal spatial adaptation by wavelet shrinkage", Biometrika, vol 81, pp425-455.
- Y.T.Chan, 1995, "Wavelet Basics", Kluwer Academic Publishers.
- D.L.Donoho, 1995, "De-noising by soft-thresholding," IEEE Trans. on Inf. Theory, 41, 3, pp613-627.
- S.Axler, F.W.Gehring, K.A.Ribert, 2000, "Fourier and Wavelet Analysis", Springer.



< 안 호 일 >